

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

BERMAKI Mohammed Hamza

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} cycle en Électrotechnique

Option : Haute tension

Intitulé de la thèse :

*Modélisation expérimentale et optimisation du
procédé de l'extraction des jus en utilisant le champ
électrique pulsé*

Devant le jury composé de :

Président :	Pr. BENDAOU Abdelber	Prof.	Université Djillali Liabes
Directeur de thèse :	Dr. REMAOUN Sidi Mohammed	M.C.A	USTMB Oran
Co-Directeur de thèse :	Pr. REDONDO Luis	Prof.	ISEL Lisbonne (Portugal)
Examineurs :	Dr. MILOUDI Mohamed	M.C.A	Université Djillali Liabes
	Dr. MILOUA Farid	M.C.A	Université Djillali Liabes
Invité :	Pr. TILMATINE Amar	Prof.	Université Djillali Liabes

Soutenue en: 2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Cette thèse est le fruit de Cinq années de travaux réalisés au sein du Laboratoire APELEC de l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbes en collaboration avec le Laboratoire de Biocybernétique de la Faculté de Génie Electrique de l'Université de Ljubljana (Slovénie) et le Laboratoire du Groupe de Recherche des Puissances Pulsées GIA2P2, Institut Supérieur d'Ingénierie de Lisbonne (ISEL) (Portugal).

Tout d'abord, Je tiens à remercier chaleureusement le professeur TILMATINE Amar pour son aide précieuse et inestimable tout au long de mon parcours universitaire. Je lui exprime ma gratitude la plus profonde pour ses conseils et son soutien, sa patience, sa disponibilité, sa générosité et sa grande compétence qui m'ont beaucoup aidé à surmonter les obstacles. Monsieur je vous suis très reconnaissant.

J'adresse mes plus vifs remerciements au Dr. BELLEBNA Yassine (ENP, Oran) pour son aide précieuse, sa disponibilité et pour la sincérité de nos rapports.

Je remercie vivement mon directeur de thèse, Dr. REMAOUN Sidi Mohammed (USTO, Oran) pour les corrections apportées à cette thèse ainsi que pour ses remarques très bénéfiques.

Je tenais à remercier aussi Pr REDONDO Luis, Dr. CANACSINH Hiren et Dr. REBERSEK Matej de m'avoir si chaleureusement accueillie dans leurs laboratoires. J'ai beaucoup appris des collaborations qu'on a su développées.

Je voudrais remercier aussi Pr BENDAOUD Abdelber, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider cet honorable jury. Je suis aussi très honoré de la présence dans ce jury de Dr. MILOUDI Mohamed et de Dr. MILOUA Farid.

Un grand merci à tous les membres des laboratoires APELEC, IRECOM et ICEPS ainsi que tous les étudiants de master qui se sont succédés, durant ces dernières années au laboratoire APELEC et avec qui j'ai partagé les différentes taches expérimentales.

Merci à toute ma famille, mes frères, à mes amis, mes collègues et tous ceux qui comptent énormément pour moi.

Finalement, je ne remercierai jamais assez mes très chers parents qui ont su m'entourer de tout leur amour, leur affection faisant de moi ce que je suis maintenant, merci pour tout. J'espère que vous serez toujours fières de moi, et je vous dédie ce travail.

Table des Matières

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etat de l'art sur le Champ Electrique Pulsé et ses applications	
1. Introduction	4
2. Evolution historique et chronologique dans le traitement par champ électrique pulsé	5
3. Technologie des puissances pulsées	6
4. Equipement CEP	7
1. Source d'énergie primaire	7
2. Stockage de l'énergie	8
1. Stockage capacitif	8
2. Stockage inductif	8
3. Commutateurs	9
1. Commutateurs solides ou liquides	9
2. Commutateurs à gaz et sous vide	10
3. Commutateurs à semi-conducteur	10
4. Chambre de traitement	12
1. Chambres à plaques parallèles	12
2. Chambre coaxiale	12
3. Chambre co-field	13
5. Etude de la cellule biologique	13
1. La cellule : Approche biologique	13
2. La cellule : Approche physique	14
3. La membrane cellulaire	15
6. Electroporation	17
1. Electroporation réversible et irréversible	18
2. Méthodes de détection de la perméabilisation cellulaire	20
1. Analyse visuelle macroscopique	20
2. Analyse microscopique	21
3. Analyse par mesure de la conductivité	21
4. Analyse acoustique	21
7. Principaux paramètres influençant le traitement par CEP	22
1. Paramètres électriques	22
1. Intensité du champ électrique	22
2. Nombre d'impulsions	22
3. Fréquence de répétition des impulsions	22

4. Durée du traitement	23
5. Forme d'impulsion	23
2. Température	24
3. Paramètres microbiologiques	24
8. Diverses applications du CEP	25
1. Lyse cellulaire et extraction de contenu cytoplasmique	26
2. Ablation tumorale	26
3. Electrochimithérapie (ECT)	27
4. Outil de laboratoire	28
5. Thérapie génique (EGT)	28
6. Nanoporation	28
7. Electrofusion	28
8. Agroalimentaire	28
9. Applications du CEP dans l'industrie agroalimentaire	29
1. Extraction de pigments	30
2. Extraction des jus	31
3. Inactivation des microorganismes	32
1. Traitement du jus de pomme	32
2. Traitement du lait	32
3. Traitement des œufs	33
4. Traitement de la soupe de pois verts	33
4. Purification de l'eau	33
10. Différents types de générateurs pulsés	34
1. Générateur d'impulsion à décharge de condensateur	34
2. Générateur de Marx	35
3. Générateur haute tension à transformateur	37
4. Transformateur a lignes de transmission (TLT)	38
11. Conclusion	39

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

1. Introduction	40
2. Produits biologiques étudiés	41
3. Procédé d'extraction des jus par pressage	42
1. Préparation de l'échantillon pour l'extraction	42
2. Chambre d'extraction	42
3. Extraction par pressage	44
4. Procédure de mesure	45
4. Dispositif de traitement par CEP	45

1. Principe	46
2. Eléments constituant le banc expérimental	46
1. Alimentation haute tension continue	46
2. Condensateurs	47
3. Commutateur	47
4. Chambre de traitement	49
3. Forme et durée des impulsions	49
5. Méthodologie des plans d'expériences	51
1. Principe	51
2. Notions de base	51
1. Réponse et facteur	52
2. Domaine de variation d'un facteur	52
3. Variable centrée réduite	52
4. Interactions	53
3. Plans factoriels complets	53
4. Plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse	54
1. Modèle polynomial du second degré	54
2. Plan composite à faces centrées	54
5. Logiciels des plans d'expériences	56
6. Conclusion	57

Chapitre 3 : Analyse expérimentale d'une nouvelle chambre de traitement à 4 électrodes

1. Introduction	58
2. Chambres de traitement 1D et 2D	58
3. Modélisation expérimentale des chambres 1D et 2D	60
1. Etude paramétrique "un facteur à la fois"	60
1. Analyse de l'influence de la tension appliquée	60
2. Analyse de l'influence du nombre d'impulsions	62
3. Analyse de l'influence de la durée d'impulsion	63
4. Choix des intervalles d'étude	65
2. Résultats et discussion	65
1. Chambre 1D	65
2. Chambre 2D	72
3. Discussions	78
4. Conclusion	79

Chapitre 4 : Analyse expérimentale des chambres de traitement coaxiales cylindriques

1. Introduction	81
2. Chambres de traitement utilisées	81
3. Modélisation expérimentale du traitement CEP des trois chambres cylindriques	82
1. Etude paramétrique	82
1. Analyse de l'influence du nombre d'impulsions	83
2. Analyse de l'influence de la durée d'impulsion	84
3. Analyse de l'influence de la distance inter-électrodes	85
4. Choix des intervalles d'étude	85
2. Résultats du plan CCF pour les trois chambres cylindriques	86
4. Conclusion	95

Chapitre 5 : Réalisation de générateur de Marx à semi-conducteurs

1. Introduction	97
2. Principe du générateur de Marx	97
3. Réalisation d'un générateur de Marx négatif à base de semi-conducteurs	98
1. Partie de commande	99
2. Partie pilote des IGBTs	99
3. Circuit de puissance	100
1. Chargement des condensateurs en utilisant des résistances.....	100
2. Chargement des condensateurs en utilisant des IGBTs	102
4. Résultats expérimentaux	103
4. Réalisation d'un générateur de Marx positif à base de semi-conducteurs	105
1. Système de commande	107
1. Logiciel de programmation MPLAB IDE	107
2. Programmeur MPLAB ICD2	107
3. Description du circuit de commande utilisé	108
2. Techniques utilisées pour l'isolation	108
1. Circuit "Bootstrap"	108
2. Technique chaîne de diodes	109
3. Liste des composants	111
4. Réalisation du circuit imprimé	112
5. Mise en marche du générateur de Marx positif réalisé	115

5. Conclusion	116
	118
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Publications et communications	

Introduction

Générale

Introduction générale

Les méthodes de traitement thermique, telles que la pasteurisation, sont couramment utilisées dans l'industrie alimentaire pour augmenter la durée de conservation et assurer la sécurité alimentaire en inactivant les microorganismes pathogènes. Bien que les méthodes de traitement thermique fournissent des aliments plus sûrs, celles-ci peuvent également affecter défavorablement le goût, la couleur, l'arôme et la qualité nutritionnelle des aliments. De nos jours, avec la demande croissante des consommateurs de produits alimentaires frais ou de produits alimentaires transformés à petit plan, il existe un intérêt croissant pour les procédés non thermiques pour le traitement des aliments. L'industrie alimentaire a étudié plusieurs techniques prometteuses de traitement non thermique, en citant par exemple l'utilisation du champ électrique pulsé, des impulsions du champ magnétique oscillantes, des champs électromagnétiques induits par micro-ondes, une pression hydrostatique élevée, des rayonnements ionisants électroniques, des impulsions lumineuses intenses et d'autres [1].

L'utilisation de l'électricité dans le traitement des aliments a été introduite au début des années 1900, étant donné qu'elle fut appliquée pour la pasteurisation du lait à l'aide d'une méthode connue sous le nom de méthode Electro-Pure [2]. Ainsi, la technologie des champs électriques pulsés (CEP) est une méthode non-thermique de traitement des aliments qui utilise de courtes impulsions d'électricité [3]. En effet, selon le mécanisme de Zimmermann, l'application d'un champ électrique externe sur une cellule provoque une augmentation transitoire de la différence du potentiel transmembranaire, ce qui modifie l'organisation de la membrane plasmique et la rend localement perméable. Des pores de différents diamètres se forment au niveau de la membrane [4]. Ce phénomène qui est appelé électroperméabilisation, électroplasmolyse ou encore électroporation, a incité les chercheurs à exploiter cette technique dans divers domaines, tel que celui de l'agro-alimentaire qui sera étudié lors de cette thèse.

Notons que depuis les années 60, et par l'apparition des premiers rapports établis sur les effets du champ électrique pulsé (CEP) sur les cellules végétales, animales et microbiennes, que de nombreuses applications dans l'agroalimentaire et la bio-ingénierie ont été étudiées (conservation des aliments, extraction des jus...) [5, 6].

Comme pour toute application industrielle, un équipement adéquat ainsi que des connaissances sur l'évolution de la technique sont nécessaires [7]. Ceci dit, les systèmes CEP ont une configuration d'un générateur d'impulsions approprié pour pouvoir fournir de l'énergie électrique ainsi qu'une chambre de traitement où sera placé l'aliment.

Le principe de la génération des puissances pulsées est d'abord de stocker l'énergie électrique dans un élément de stockage qui est souvent un condensateur et de la transmettre à une charge en un temps très bref à l'aide d'un commutateur [8].

Ainsi pour délivrer les impulsions, plusieurs générateurs ont été développés dans différents laboratoires de recherches; Ces générateurs doivent offrir une large gamme de variation des différents paramètres d'impulsions (amplitude de tension, largeur d'impulsion, fréquence ...). Avec l'évolution de l'électronique de puissance, il est possible de générer plusieurs impulsions de l'ordre de Kilovolts avec des durées très courtes [9].

Les dispositifs de commutation sont des composants essentiels dans les systèmes d'alimentation pulsée. Les générateurs pulsés classiques utilisent des commutateurs de type éclateurs qui malheureusement possèdent des limites tels qu'une courte durée de vie en termes de nombre de cycles de fonctionnement, une faible fréquence de commutation, et surtout qu'ils sont de grande taille ce qui nécessite plus de maintenance, etc... Ces dernières années, les commutateurs à semi-conducteurs comme MOSFET ou IGBT ont remplacés les éclateurs du fait qu'ils sont compacts, fiables, flexibles, plus efficaces, et ont une longue durée de vie ainsi que des coûts et des pertes plus faibles [10].

Le générateur de Marx est un générateur d'impulsions à haute tension. Son principe fondamental est de charger des condensateurs en parallèle avec une tension d'entrée fournie par une alimentation continue, ces condensateurs sont ensuite connectés en série à l'aide de commutateurs pour produire des impulsions de haute tension à travers la charge [11]. Une partie de cette thèse sera consacrée à la réalisation de générateurs de Marx utilisant des semi-conducteurs.

L'autre élément incontournable des systèmes CEP est la chambre de traitement. En effet, le produit alimentaire est placé à l'intérieur de celle-ci, où deux électrodes sont séparées avec un matériau non conducteur. Il existe deux types de chambres de traitement: statiques et dynamiques. Dans les deux cas, les impulsions électriques à haute tension sont appliquées aux électrodes. La chambre statique où seulement un volume donné peut être traité à la fois, est destinée à des applications expérimentales. Alors que la chambre dynamique permet un traitement continu, conformément aux exigences des applications industrielles [12]. Notons qu'à partir de cette différence d'utilisation, on a opté pour une chambre de type classique où deux configurations différentes ont été réalisées et analysées dans ce travail.

Objectif de l'étude

Le traitement par CEP des différents fruits et légumes avant le procédé d'extraction a été déjà utilisé, et son efficacité déjà prouvée concernant

l'augmentation de la quantité des jus extraite, tout en gardant l'arôme et la qualité nutritive du produit.

L'objectif de ce travail concerne la modélisation expérimentale et l'optimisation des procédés d'extraction par CEP. Pour cela, la méthodologie des plans d'expériences a été utilisée. En outre, des générateurs du champ pulsé à commutation électronique ont été développés et réalisés.

Aperçu de l'étude

Une alimentation pulsée classique qui a pour principe, la charge et décharge de condensateurs à travers un éclateur a été réalisée au niveau du laboratoire APELEC, et a été utilisée pour traiter les différents aliments. Aussi, deux chambres de traitement statiques ont été réalisées et leur rendement analysé pour les procédés d'extraction de jus de carotte et de betterave. Les différents travaux effectués dans le cadre de cette thèse ont été appuyés par la méthodologie des plans d'expériences qui permet non seulement une bonne organisation des expériences et mais aussi une meilleure analyse des résultats obtenus.

La dernière étape de ce travail a été consacrée à la réalisation d'un générateur pulsé à base de semi-conducteurs capable de délivrer des impulsions carrées. Dans cette optique, on s'est intéressé au générateur de Marx.

Ainsi, le présent manuscrit a été divisé en cinq chapitres : le premier chapitre est une revue bibliographique qui décrit en détails la technologie du CEP, son principe, ses différentes composantes ainsi que ses applications.

Le second chapitre présente le matériel et méthodes utilisés pour la réalisation des tâches expérimentales. Plusieurs chambres de traitements et le générateur de CEP ont été décrits dans ce chapitre.

Enfin, les troisième et quatrième chapitres ont été respectivement consacrés à la réalisation et l'analyse expérimentale de chambres de traitement à électrodes plaques parallèles et des chambres de forme cylindrique.

Et pour finir, le dernier chapitre a été dédié à la réalisation de deux générateurs de Marx à base de semi-conducteurs, au niveau du Laboratoire de Biocybernétique de la Faculté de Génie Electrique de l'Université de Ljubljana (Slovénie) et le Laboratoire du Groupe de Recherche des Puissances Pulsées GIA²P², Institut Supérieur d'Ingénierie de Lisbonne (ISEL) (Portugal).

Chapitre 1

Etat de l'Art sur le Champ Electrique Pulsé et ses Applications

Chapitre 1 : Etat de l'Art sur le Champ Electrique Pulsé et ses Applications

1.1. Introduction

L'appellation « puissance pulsée » (sous-entendu électrique) est un terme générique qui recouvre de nombreux aspects dont nous ne traiterons qu'une petite partie dans ce travail. On appelle hautes puissances pulsées les technologies permettant la génération de très fortes puissances électriques instantanées, sous forme d'impulsions extrêmement denses et brèves créées à partir d'une énergie préalablement accumulée [13]. Ce type de phénomène est représenté dans la nature par la foudre, qui constitue une décharge électrique brève de l'énergie électrostatique accumulée entre les nuages et la terre.

Deux premiers aspects résultent de cette définition :

- Aspect génération des puissances pulsées,
- Aspect utilisation.

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, 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 leur fréquence de commutation et la tension maximale qu'ils peuvent supporter. 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 avec des pertes négligeables et un faible coût, n'existe actuellement pas [14].

L'effet principal d'un champ électrique pulsé (CEP) sur les cellules végétales ou animales est appelé électroporation, ce phénomène qui se caractérise par l'augmentation de la perméabilité des cellules ouvre la voie à un large domaine d'application. En effet, la technologie CEP est utilisée dans plusieurs domaines, que ce soit au niveau des laboratoires de recherche ou même celui à l'échelle industrielle [15, 16]. Parmi ces domaines d'application on peut citer entre autres :

- Domaine des lasers, des rayons X et des microondes
- Domaine médical

- Agro-alimentaire

Avant d'entamer les différentes expériences et travaux réalisés dans le cadre de cette thèse, une revue bibliographique est présentée dans ce premier chapitre, afin de mieux comprendre le principe, l'équipement ainsi que les applications de la technologie des champs électriques pulsés.

1.2. Evolution historique et chronologique dans le traitement par champ électrique pulsé

Il existe plusieurs façons d'utiliser une source d'alimentation électrique pour le traitement des aliments : sous forme de chauffage ohmique, chauffage micro-ondes, et de forte intensité des CEP. Parmi ceux-ci, le chauffage ohmique est l'une des premières méthodes.

Le chauffage ohmique repose sur l'utilisation de la chaleur produite lorsqu'un courant électrique passe à travers la nourriture, et a déjà été approuvé pour des produits visqueux et de particules. En effet cette méthode de traitement qui repose essentiellement sur la température présente plusieurs inconvénients en ce qui concerne la détérioration de qualité de produit en matière de goût et en matière de sa valeur nutritive. En plus de ça l'énergie dissipée sera dans ce cas très importante. C'est ce qui pousse à l'utilisation d'autres technologies qui sont appelés à combler ce déficit parmi celle-ci le traitement par CEP.

Les premières études sur les effets des CEP sur la viabilité des micro-organismes ont débuté au début des années 60. Les premiers résultats expérimentaux sur les paramètres électriques et microbiologiques montraient une perturbation irréversible aux niveaux de la membrane des cellules. Une première utilisation des CEP pour la décontamination des bactéries a vu le jour avec une approche différente des méthodes et techniques traditionnelles (la filtration, le traitement chimique).

La décontamination bactérienne employant des impulsions élevées de champ électrique est apparue en 1967. Le mécanisme causant la réduction de la viabilité de la cellule est supposé être basé sur l'augmentation de la perméabilité de la membrane externe exposée à des impulsions de durées relativement longues (ordre de grandeur de milliseconde). Une telle augmentation dans la perméabilité de la membrane de cellules avec l'augmentation de l'amplitude du champ électrique avait été expliquée en 1965 comme mécanisme de traitement des cellules. Dans les années 70, on continuait sur le concept de la décharge diélectrique des membranes de cellules. Dans les années 80, les chercheurs se sont également concentrés sur les effets mortels des CEP sur les bactéries et les cellules de levure. Après ces études de base, une partie des travaux de recherche sur les CEP s'est concentrée sur la décontamination

bactérienne, avec dans la plupart des études des impulsions de microseconde et milliseconde.

Plus récemment, des équipes de recherche sur l'effet des impulsions électriques ultracourtes sur les cellules biologiques pour des applications cliniques ont continué leurs travaux sur l'électropérimabilisation des cellules, pour des applications d'électro chimiothérapie à savoir le traitement des cellules cancéreuses et transfert d'ADN. Dans ce cas, la membrane des cellules est affectée et il y a création de pores sans qu'elle soit détruite et le phénomène de l'électroporation est réversible.

Au cours des trois dernières décennies, l'électroporation irréversible a été considérée comme un effet secondaire indésirable et a été étudiée seulement pour définir la limite supérieure des paramètres électriques qui induisent l'électroporation réversible. Toutefois, au cours des dernières années, l'électroporation irréversible a émergé en exposant les cellules à des niveaux de champs électriques de façon à avoir la destruction irréversible de leur membrane extérieure [17].

1.3. 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 [18]. La figure 1.1 illustre bien ce principe.

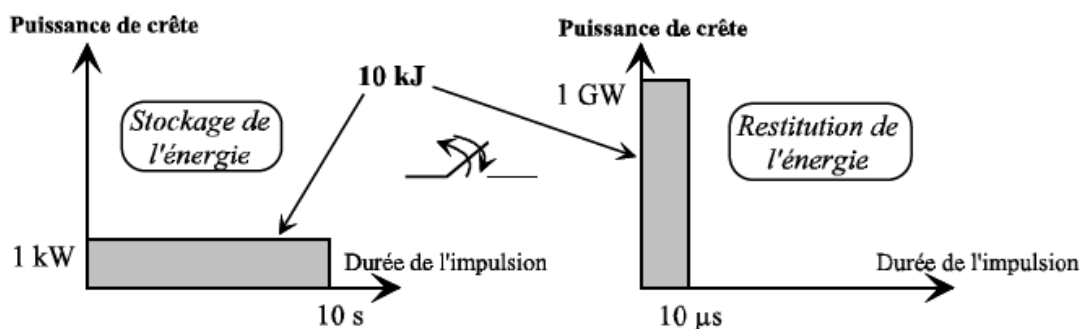


Fig.1.1. Principe de la production de puissances pulsées [18]

De ce fait le principe de base de la technologie CEP repose sur l'application d'impulsions de champs électriques avec des durées très courtes (microsecondes à millisecondes) et une intensité de l'ordre de kV/cm. Le temps de traitement est calculé en multipliant le nombre et la durée des impulsions. Le processus est basé sur des tensions électriques pulsées livrés à un produit placé entre un ensemble d'électrodes ; La distance entre les électrodes est un paramètre important puisqu'elle influe directement sur l'intensité du champ électrique. La haute tension appliquée entraîne un champ électrique qui provoque des perturbations au niveau des membranes cellulaires, ce phénomène est appelé électroporation. Le champ électrique peut être appliqué sous la forme d'impulsions exponentiellement décroissante, carrées,

bipolaires ou oscillantes et à température ambiante, sous-ambiante ou légèrement supérieure à la température ambiante [19].

Plusieurs technologies de traitement non-thermique ont été proposées sur la base du même principe consistant à maintenir les aliments au-dessous des températures normalement utilisées dans le traitement thermique. Cela conserverait la qualité nutritionnelle des aliments, y compris les vitamines, les minéraux et les arômes essentiels, tout en consommant moins d'énergie que le traitement thermique.

Notons que ces dernières années, la technique CEP a été reconnue comme une technologie non-thermique émergente [20, 21]. Cela est dû à la capacité du CEP à inactiver les microorganismes dans les aliments, à réduire l'activité enzymatique et à prolonger la durée de conservation avec des changements négligeables dans la qualité du produit final par rapport à l'original. Selon l'intensité du champ électrique, l'électroporation peut être réversible (décharge de la membrane cellulaire) ou irréversible (rupture ou lyse de la membrane cellulaire), mais cet effet peut être contrôlé selon l'application [22].

1.4. Equipement CEP

La génération de puissances électriques pulsées passe, par une phase d'amplification de puissance depuis une source primaire vers une application, schématisée par une charge [14]. Le principe général d'un système générateur de puissances pulsées est représenté sur la figure 1.2.



Fig.1.2. Principe général d'un système générateur de puissances pulsées [18]

1.4.1. Source d'énergie primaire

La source primaire est une alimentation de laboratoire régulée en tension et souvent en courant, son rôle est simple et fondamental à la fois : générer la haute tension continue avec laquelle se charge l'élément de stockage. Le dimensionnement de la puissance de la source dépend, évidemment, du produit des valeurs maximales de tension et de courant qu'elle est capable de fournir. La tension délivrée par la source peut, soit être égale à la tension que l'on souhaite appliquer à l'utilisation s'il n'y a pas de circuit amplificateur de tension dans la chaîne, soit être inférieure à la tension de sortie dans le cas contraire. Le courant débité dépend essentiellement du temps dont on dispose pour stocker l'énergie, des caractéristiques du banc de stockage et de l'aspect répétitif ou non des impulsions de sortie. Typiquement, une

alimentation de quelques dizaines de watt répond à de nombreuses applications. Une puissance d'au moins quelques kilowatts est nécessaire dès que l'on souhaite travailler en fréquence, toutefois cela dépend de l'application utilisée [14].

1.4.2. Stockage de l'énergie

Il y a deux types de stockage d'énergie : capacitif et inductif, de ce fait l'élément de stockage peut soit être un condensateur soit une inductance. La façon dont est restituée cette énergie est différente suivant le type de stockage, en fait lors du stockage capacitif un commutateur à fermeture doit être utilisé, alors que le stockage inductif nécessite un commutateur à ouverture [18].

1.4.2.1. Stockage capacitif

En ce qui concerne le stockage capacitif (figure 1.3), 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 [18].

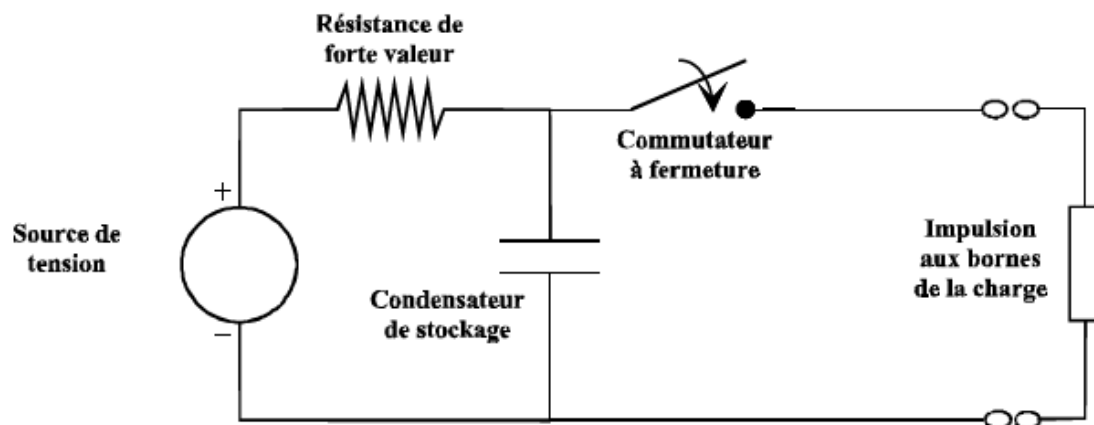


Fig.1.3. Principe du stockage capacitif [18]

Le stockage capacitif fonctionnant avec une technologie de commutation à fermeture rapide offre plus de degrés de liberté et une mise en œuvre moins délicate. Les domaines de commutation allant de la microseconde à la dizaine de picoseconde sont alors accessibles [23].

1.4.2.2. Stockage inductif

Pour le stockage inductif (figure 1.4), le courant qui circule à travers une faible résistance et une bobine permet à cette dernière d'accumuler une énergie égale à $(LI^2/2)$. Cette énergie est transférée, presque en totalité, à la charge lorsque le commutateur s'ouvre [18].

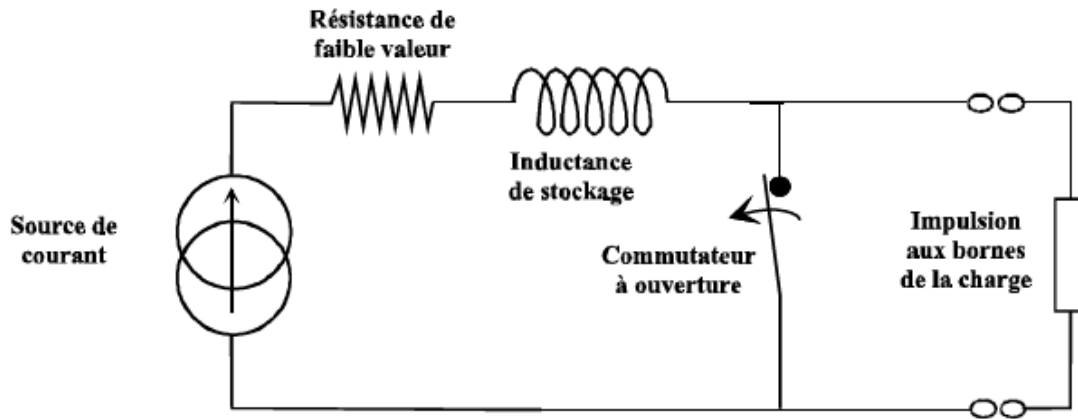


Fig.1.4. Principe du stockage inductif [18]

L'intérêt principal du stockage inductif réside dans la compacité des systèmes mais reste pénalisé par les commutateurs à ouverture [24].

1.4.3. Commutateur

Les commutateurs haute tension représentent un élément essentiel dans la génération des puissances pulsées. Le choix de la technologie de commutation affecte les performances des générateurs (forme et amplitude des impulsions, taux de répétition, efficacité de commutation, temps de montée et durée de vie).

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).

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 [18].

1.4.3.1. Commutateurs solides ou liquides

Les éclateurs solides ou liquides possèdent deux performances intéressantes pour un commutateur : une grande tenue diélectrique et un faible temps de commutation. Par exemple, la rigidité diélectrique du mica est de $600 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ et celle d'une huile vaut $200 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ (en comparaison avec les $30 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ de l'air). Ces valeurs permettent d'utiliser des éclateurs de faible distance inter-électrodes et, par conséquent, de limiter l'inductance de l'arc, ce qui réduit le temps de montée de l'impulsion. Par contre, le principal inconvénient des commutateurs solides réside dans le fait qu'ils ne peuvent servir qu'une seule fois. Le canal d'arc qui se développe dans le solide le détériore suffisamment pour que sa perte de rigidité diélectrique soit irréversible [14, 25].

1.4.3.2. Commutateurs à gaz et sous vide

L'éclateur à gaz se compose de deux électrodes séparées par un isolant de type gazeux. Bien qu'ils soient les plus anciens et les plus simples des commutateurs, leurs performances leur laissent une large place dans beaucoup d'applications actuelles. Leur fonctionnement repose sur l'établissement d'un canal conducteur par développement d'une décharge électrique de type streamer. Le point fort de ces commutateurs est leur tenue en tension élevée qui dépend, bien évidemment, de la géométrie des électrodes, de la nature et de la pression du gaz utilisé. Les éclateurs sous vide sont plutôt utilisés dans des applications nécessitant un temps de recouvrement rapide ou pour de très forts courants. Les temps de commutation les plus rapides sont de l'ordre de quelques dizaines de picosecondes pour des commutateurs à hydrogène sous pression (faible énergie commutée).

Ces commutateurs présentent, bien évidemment, des inconvénients qui les condamnent pour certaines applications : perturbations électromagnétiques générées par l'arc lors de l'amorçage, faible dynamique de travail au niveau de la tension commutée, fréquence de répétition très faible pour les forts courants et forte érosion des électrodes pour les forts courants [14, 26].

1.4.3.3. Commutateurs à semi-conducteur

Les composants de puissance commandables sont apparus dans les années 1950 avec les premiers thyristors de puissance. Depuis, ils n'ont cessé d'évoluer et ont donné naissance au MOSFET dans les années 1970 et à l'IGBT dans les années 1980.

Le MOSFET est très bien adapté pour les convertisseurs basse-tension et à fréquence élevée (inférieure à 100V et supérieure à 50kHz) alors que l'IGBT est utilisé pour les tensions supérieures à 300V et des fréquences rarement supérieures à 20kHz. Les GTO et thyristors sont dédiés aux applications haute tension (>1kV) fort courant (>1kA). La figure 1.5 résume cette classification de composants de puissance en fonction de la fréquence de commutation et du produit U.I des composants [27, 28].

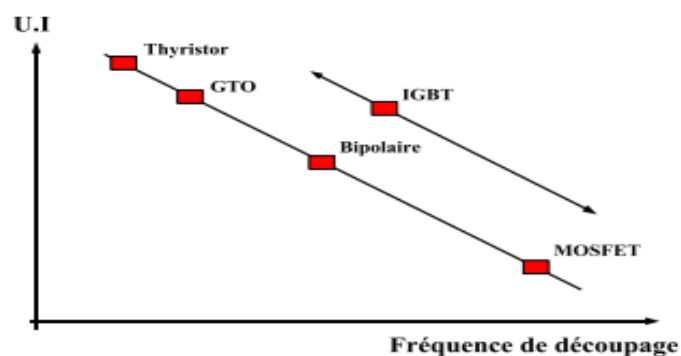


Fig.1.5. Classification des composants de puissance en fonction de la fréquence de découpage et le produit U.I des composants [27]

Les modules IGBT ont un domaine d'application qui recouvre totalement celui des transistors bipolaires, partiellement celui des MOSFET et des GTO. C'est pourquoi les modules IGBT sont des composants d'avenir dans les fortes et moyennes puissances [27, 28].

- **Thyristor** : Le thyristor est le premier semi-conducteur contrôlé permettant de choisir l'instant de déclenchement grâce à l'injection d'une impulsion de courant de quelques ampères. Le thyristor s'arrêtera de commuter lorsque le courant passera à zéro. Les thyristors sont utilisés pour la commutation de très hautes tensions (de l'ordre de quelques kV) mais présentent des temps de commutation assez longs (de 25 à 50 μ s). Ces commutateurs seront privilégiés pour la génération d'impulsions longues (μ s, ms) [24].

- **Mosfet** : Le transistor MOSFET (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semi-conducteur) est un transistor utilisé pour amplifier ou commuter des signaux électroniques. Le MOSFET est un périphérique doté de quatre bornes correspondant à une source, une grille, un drain et un corps. Cependant, son corps (ou substrat) est généralement connecté à la borne de la source, ce qui en fait un périphérique à trois bornes. Le MOSFET est devenu le plus commun des transistors utilisés à la fois dans les circuits numériques et analogiques.

Il offre de meilleures performances de commutation que le transistor bipolaire. C'est un périphérique contrôlé par tension, nécessitant une énergie négligeable pour assurer la conduction et assurant ainsi des économies d'énergie par rapport au transistor bipolaire [29].

- **IGBT** : L'IGBT est essentiellement un commutateur de transistor de puissance qui offre une grande efficacité et une commutation rapide. Il est largement utilisé pour des applications d'électronique de puissance pour le contrôle des moteurs, l'éclairage et bien d'autres applications dans les secteurs de l'industrie et de la consommation. Les transistors IGBT présentent une haute impédance d'entrée et une faible impédance de sortie, et combinent les avantages des transistors de puissance MOSFET et bipolaires. Ils offrent ainsi une grande capacité de transport du courant semblable à celle d'un circuit bipolaire, mais avec la facilité de contrôle d'un MOSFET [29]. Ce composant existe dans des calibres qui vont de quelques ampères à basse tension et des calibres de 1200V/450A voire des modules de 6500V/600A, c'est le composant de puissance qui connaît le taux de croissance le plus élevé de ces dernières années [30].

1.4.4. Chambre de traitement

La chambre de traitement est l'un des éléments les plus importants et compliqués du système de traitement par CEP, puisque c'est à l'intérieur de celle-ci que va être placé l'aliment afin de subir les impulsions électriques [19].

La chambre de traitement se compose généralement d'au moins deux électrodes ; l'une est reliée au générateur et l'autre est reliée à la terre. Les deux électrodes sont séparées par un isolant électrique [19, 31]. Selon l'application, la chambre de traitement peut être construite selon différentes configurations géométriques : rectangulaire (électrodes plates en parallèles) et cylindrique (électrodes coaxiales ou électrodes colinéaires). La distance inter-électrodes est un paramètre important puisqu'il influe directement sur l'intensité du champ électrique et sur la quantité du produit à traiter.

Les chercheurs du CEP ont été très inventifs dans la conception des chambres de traitement, en commençant par expérimenter des chambres statiques qui sont utilisées au niveau des laboratoires de recherche, ensuite et au fil des années de recherches, des chambres dynamiques ont vu le jour, ces dernières permettent un traitement continu et sont plus destinées à une utilisation à l'échelle industrielle [12, 32]. Ainsi plusieurs configurations ont été conçues et développées, parmi les chambres de traitement les plus répandues : Chambre à plaques parallèles, Chambre coaxiale et Chambre "co-field".

1.4.4.1. Chambres à plaques parallèles

Comme son nom l'indique, ce type de chambre comporte des électrodes sous forme de plaque (généralement en tôle d'acier inoxydable) et d'un isolant (figure 1.6)[33].

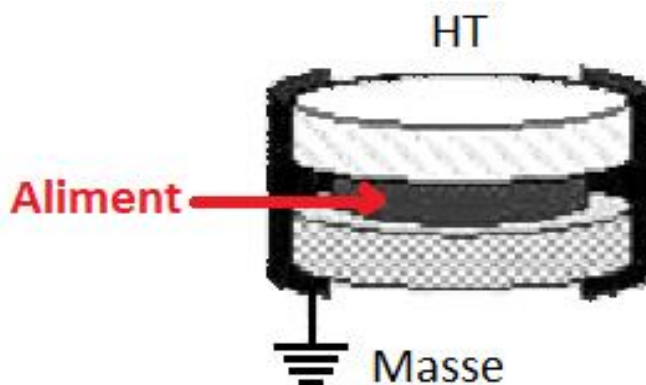


Fig.1.6. Chambre a plaques parallèles [19]

1.4.4.2. Chambre coaxiale

Cette chambre se compose de deux électrodes de forme cylindrique, un cylindre interne entouré par un autre externe, l'aliment est disposé entre les deux (figure 1.7) [34].

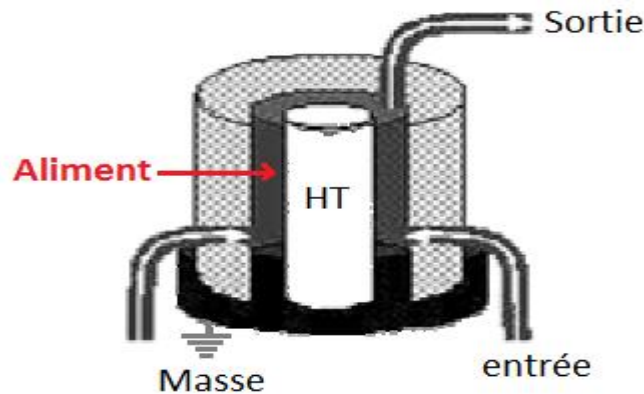


Fig.1.7. chambre coaxiale dynamique [19]

1.4.4.3. Chambre « Co-Field »

Les chambres co-field dans lesquelles deux tubes en acier inoxydable sont séparés par un isolant (figure 1.8), sont très utilisées à l'échelle industrielle [35].

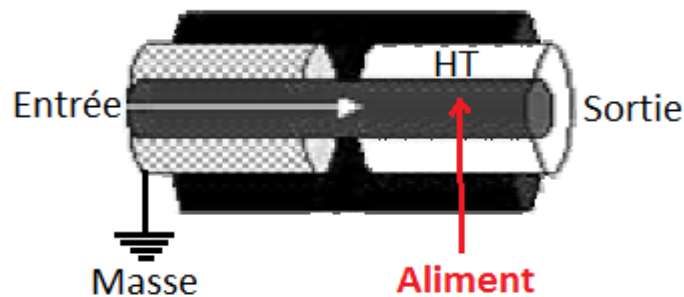


Fig.1.8. Chambre Co-field [19]

1.5. Etude de la cellule biologique

1.5.1. La cellule : Approche biologique

La cellule est un système complexe qui peut grandir, se reproduire, traiter des informations, répondre à des stimulations et exécuter un nombre extraordinaire de réactions chimiques [36]. La figure 1.9 illustre la structure de la cellule biologique.

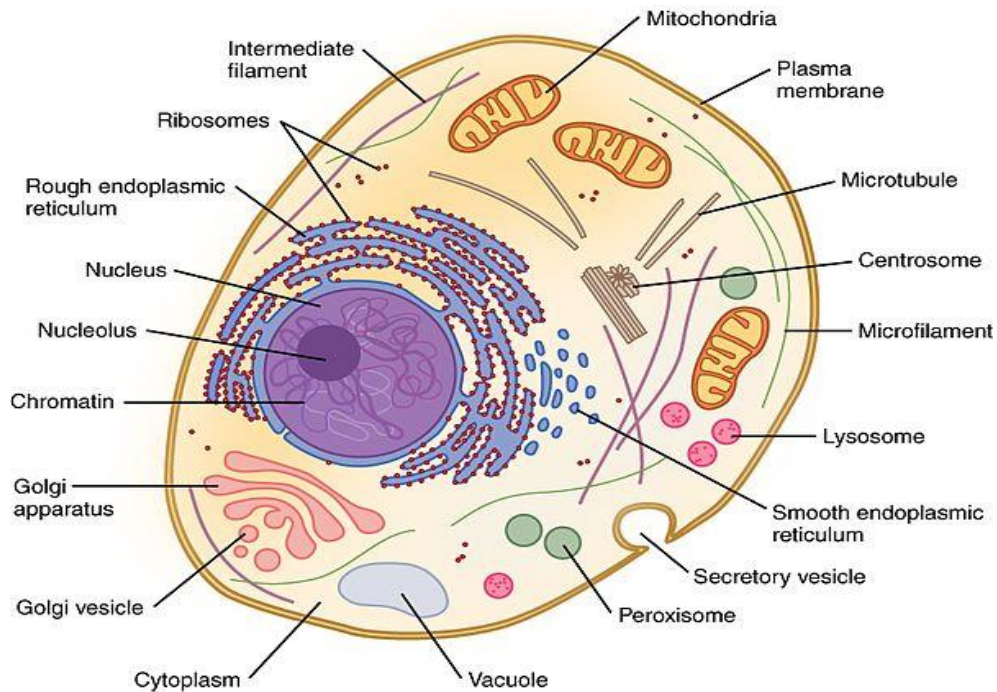


Fig.1.9. Structure d'une cellule biologique

Une grande partie du volume de la cellule est composée d'un milieu appelé cytoplasme. Il contient entre autres des mitochondries, l'appareil de Golgi, le réticulum endoplasmique, des ribosomes, le noyau (contenant le matériel génétique) pour des cellules de type eucaryotes et des polysomes, dont les fonctions permettent le maintien en vie de la cellule.

Ce milieu est délimité par une membrane plasmique (bicouche phospholipidique), qui a une composition chimique différente du milieu extérieur de la cellule.

1.5.2. La cellule : Approche physique

La figure 1.10 présente un schéma très simplifié d'une cellule biologique. Un modèle simple d'une cellule biologique consiste à décrire celle-ci comme une entité composée d'un milieu conducteur correspondant au cytoplasme, caractérisé par sa conductivité σ cytoplasme et d'un milieu isolant, correspondant à la membrane plasmique, caractérisée par sa permittivité ϵ membrane.

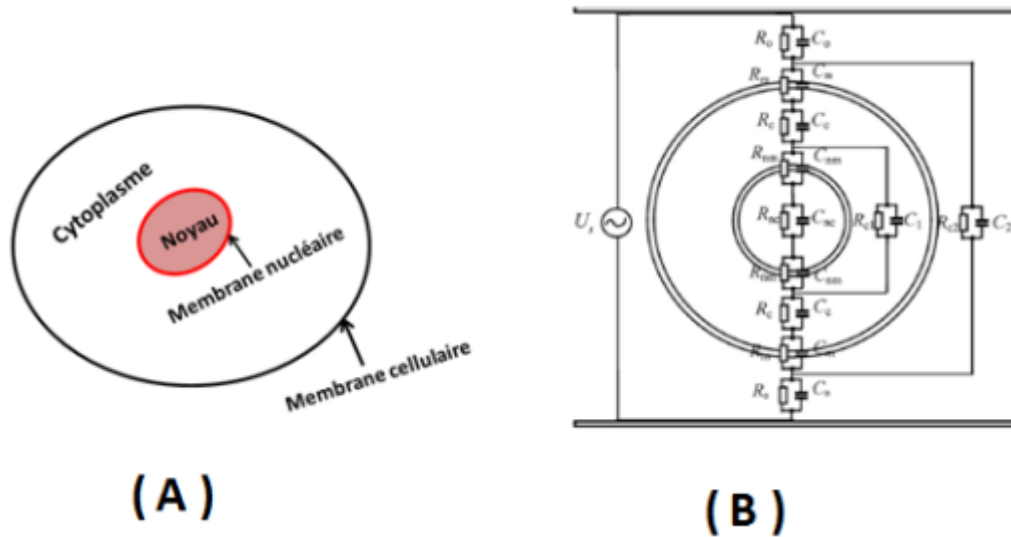


Fig.1.10. Modèle d'une cellule biologique simplifié (A) et modèle électrique d'une cellule (B)

Dans les modèles électriques de cellules, la membrane cellulaire est assimilée à un condensateur et les milieux intra et extracellulaires sont considérés comme modérément conducteurs. La figure présente un exemple de modèle électrique d'une cellule biologique prenant en compte la modélisation de la membrane plasmique et nucléaire de la cellule [24].

1.5.3. La membrane cellulaire

Tous les types de cellules, procaryotes ou eucaryotes, animales ou végétales, sont délimités par une membrane cellulaire cytoplasmique qui s'avère être indispensable à la vie, en raison de sa capacité à séparer le milieu intracellulaire du milieu extracellulaire, assurant ainsi l'intégrité cellulaire. Bien que la présence d'une membrane cellulaire soit commune à tous les types cellulaires, il existe certaines différences : contrairement à la cellule animale, la cellule végétale et la cellule bactérienne présentent une paroi cellulaire rigide associée à la membrane plasmique [37].

La membrane plasmique joue un rôle essentiel dans les échanges cellulaires. Elle a pour rôle de séparer et de maintenir un équilibre osmotique entre le milieu extra cellulaire et le cytoplasme. La Figure 1.11 présente de façon schématique la composition d'une membrane plasmique.

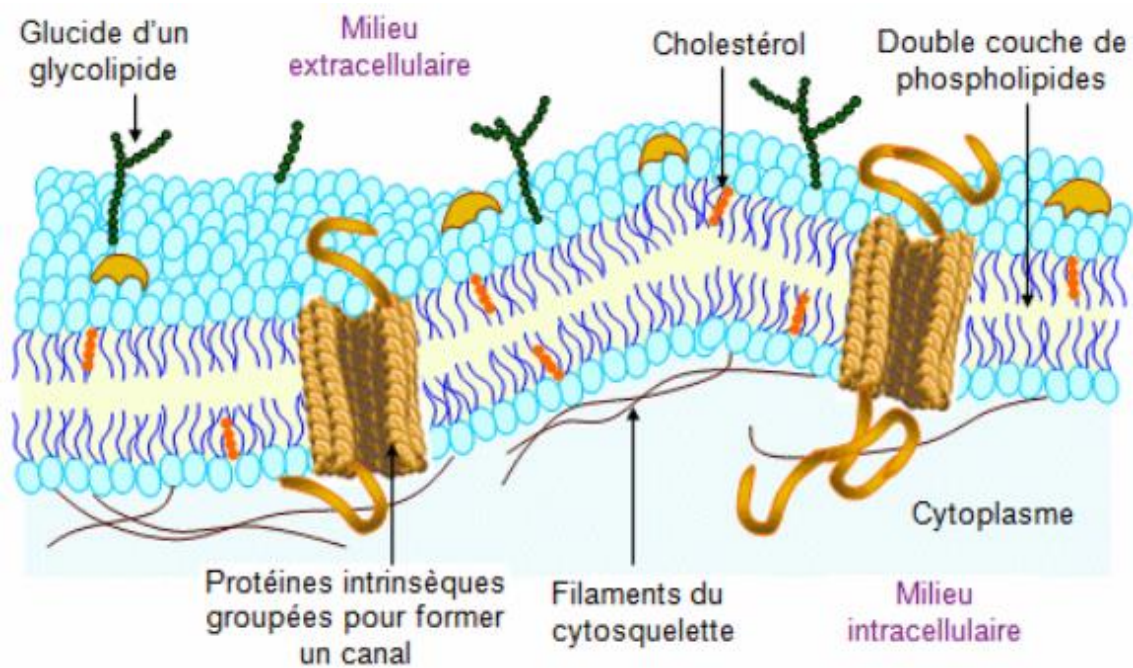


Fig.1.11. Image présentant la complexité de la membrane plasmique

La membrane plasmique est une double couche lipidique, composée principalement de phospholipides. Ces derniers sont composés d'une « tête » hydrophile (qui aime l'eau) et d'une double « queue » hydrophobe (qui a peur de l'eau). Le milieu extracellulaire et le cytoplasme, constitués principalement d'eau, expliquent l'agencement des phospholipides dont les têtes constituent les faces de la membrane alors que les queues donnent un caractère hydrophobe à l'intérieur de la membrane. Dans cette double couche lipidique sont insérées des protéines qui confèrent à la membrane des fonctions spécifiques propres à chaque type de cellule. En effet, elles permettent sous la forme de canaux le transport d'éléments entre le milieu extracellulaire et le cytoplasme. Elles jouent également un rôle essentiel dans la communication de la cellule avec son environnement.

Du fait de la différence de concentration ionique entre le milieu de culture et le cytoplasme, il existe une diffusion passive d'ions entre les deux milieux grâce aux canaux ioniques. Généralement, les ions circulent du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré. C'est le principe des lois de l'osmose. La concentration en ions sodium Na^+ est plus importante dans le milieu extracellulaire que dans le milieu intracellulaire et inversement pour les ions potassium K^+ . Pour maintenir le déséquilibre ionique d'autres canaux dits « actifs » assurent le déplacement des ions dans l'autre sens.

Dû à cette inégale répartition des ions de part et d'autre de la membrane, l'intérieur de la cellule est à un potentiel inférieur à celui de l'extérieur de la cellule. La membrane plasmique est alors caractérisée par son potentiel transmembranaire de

repos. Ce dernier va dépendre directement du type de cellule considéré mais typiquement il varie autour de 70 mV [38].

1.6. Électroporation

Le terme « électroporation » a été, pour la première fois, employé par Neumann et son équipe au début des années 1980 [39, 40]. Ce terme servait alors à désigner une augmentation de la perméabilité de la membrane plasmique des cellules, liée à leur exposition à des impulsions électriques. Par augmentation de la perméabilité, on entend que le passage de certaines molécules au travers de la membrane est facilité, voire même que la traversée de la membrane devient possible pour certaines molécules qui ne le peuvent pas d'ordinaire.

Le terme « électroporation » a été choisi car la perméabilisation était interprétée par la formation de pores au travers de la membrane. La Figure 1.12 en présente une illustration imagée [39].

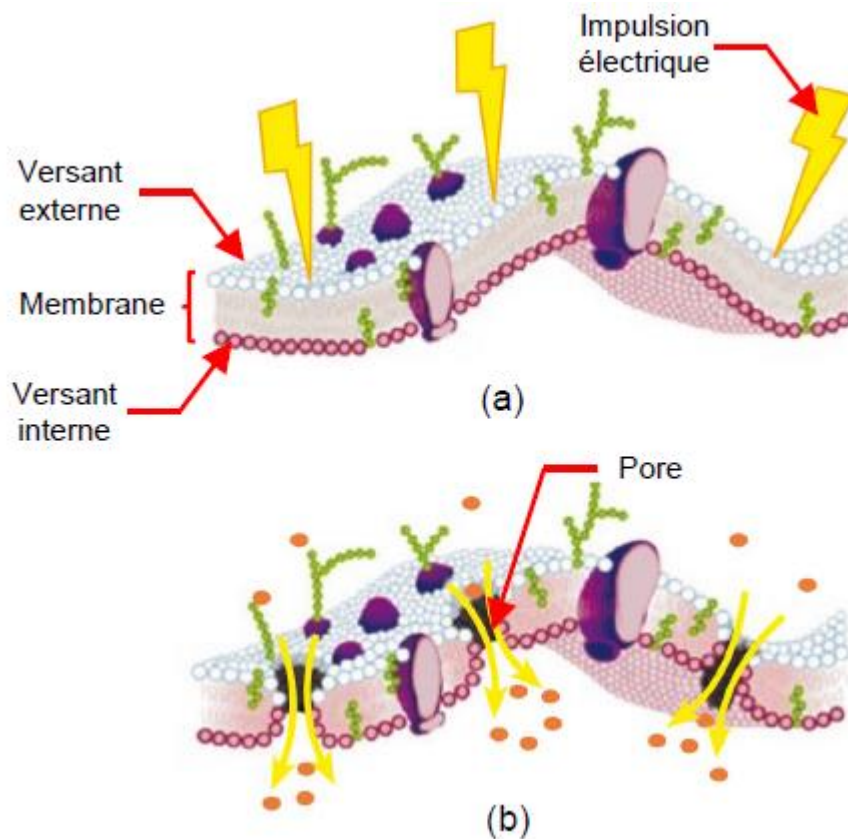


Fig.1.12. Illustration imagée de l'électroporation [39]

- (a) Membrane soumise à une impulsion électrique à l'état initial
(b) Membrane « électroporée » suite l'application de l'impulsion électrique

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.

La figure 1.13 représente le principe de l'électroporation. En effet, 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 [18].

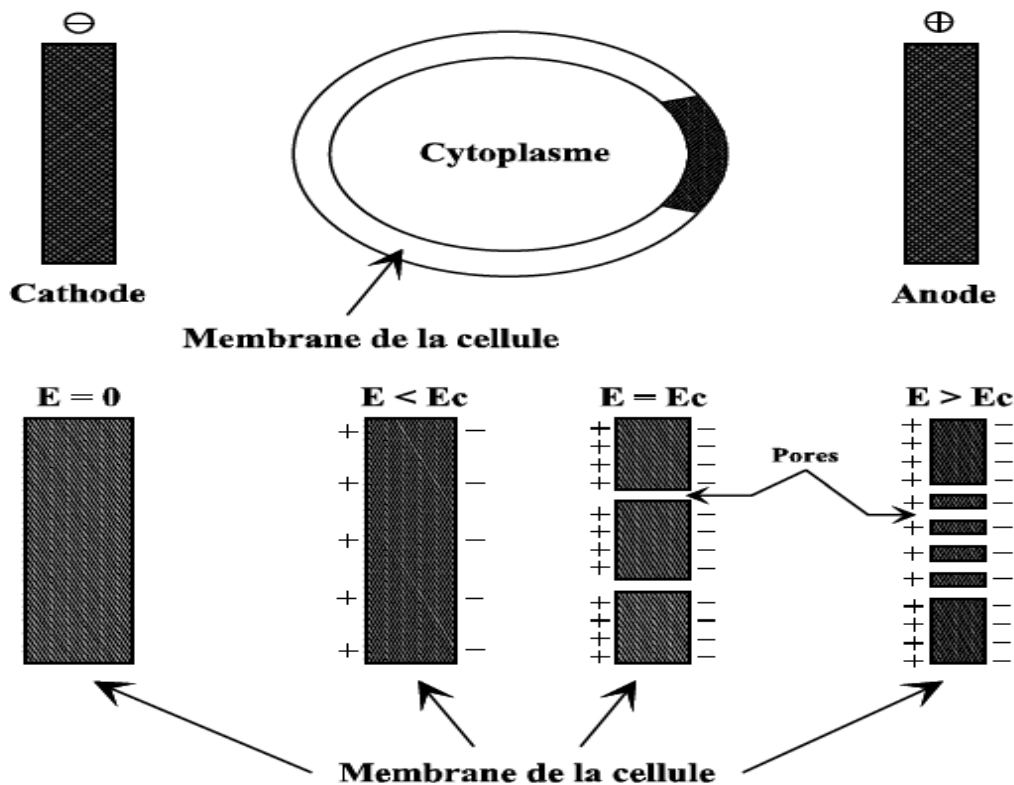


Fig.1.13. Principe de l'électroporation [18]

Cette électroporation apparaît pour une valeur critique d'environ 1 Volt [18, 41], 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) [18, 42].

1.6.1.Électroporation réversible et irréversible

L'électroporation peut être réversible ou irréversible (figure 1.14). Elle 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, on parle d'irréversibilité, l'électroporation provoque alors des phénomènes beaucoup plus complexes qui

endommagent sérieusement la cellule, tel que la nécrose (dégagement intracellulaire du Calcium) ou l'apoptose (mort programmée de la cellule) [43].

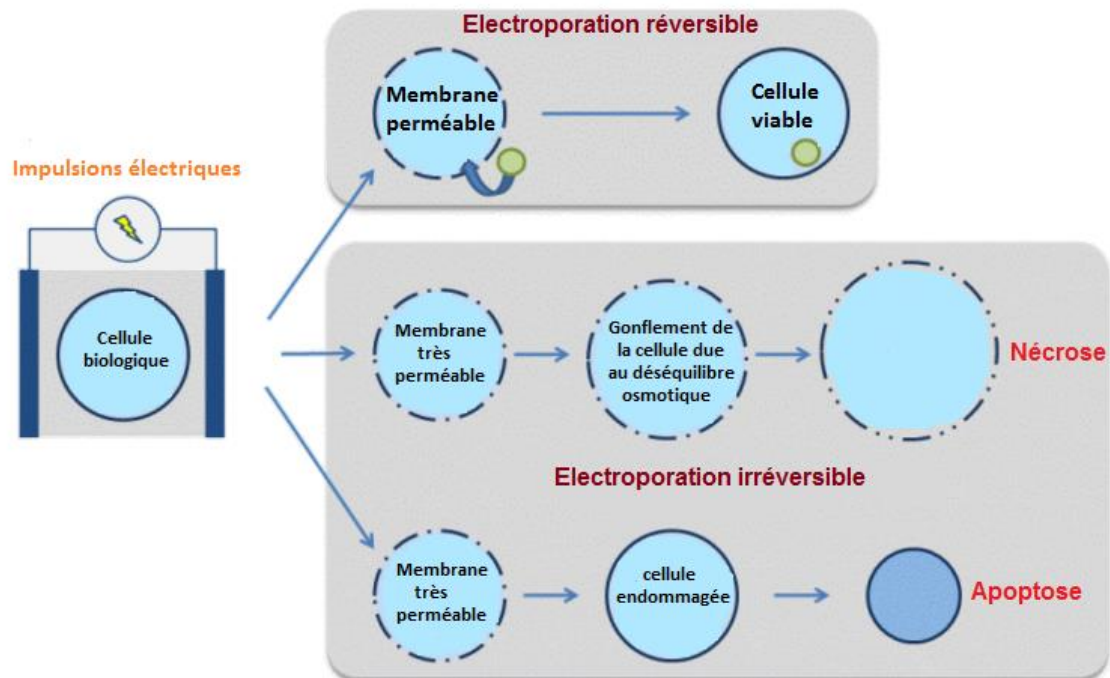


Fig.1.14.Électroporation réversible et irréversible

Lorsque que la perméabilisation induite est temporaire et ne modifie pas la viabilité de la cellule, on parle communément d'«electroporation réversible». L'électroporation réversible est typiquement obtenue avec des impulsions électriques d'une centaine de microsecondes à quelques millisecondes et d'intensité de l'ordre du kV/cm [39, 44]. Le temps d'apparition de l'électroperméabilisation est estimé à quelques microsecondes après l'application de ces impulsions électriques tandis que le temps nécessaire à la cellule pour retrouver son intégrité (« resealing » en anglais) peut s'élever à quelques minutes.

Lorsque les paramètres des impulsions électriques longues sont critiques (par exemple une très forte intensité combinée à une longue durée et/ou un grand nombre d'impulsions appliquées), la perméabilisation de la membrane peut devenir irréversible. Il s'en suit alors une rupture de la membrane et la mort de la cellule. Ce phénomène est plus couramment désigné par le terme «electroporation irréversible» [39].

La Figure 1.15 propose un aperçu des applications de l'électroporation réversible et irréversible. Notons au passage, que diverses applications de la technologie des CEP seront détaillées plus tard.

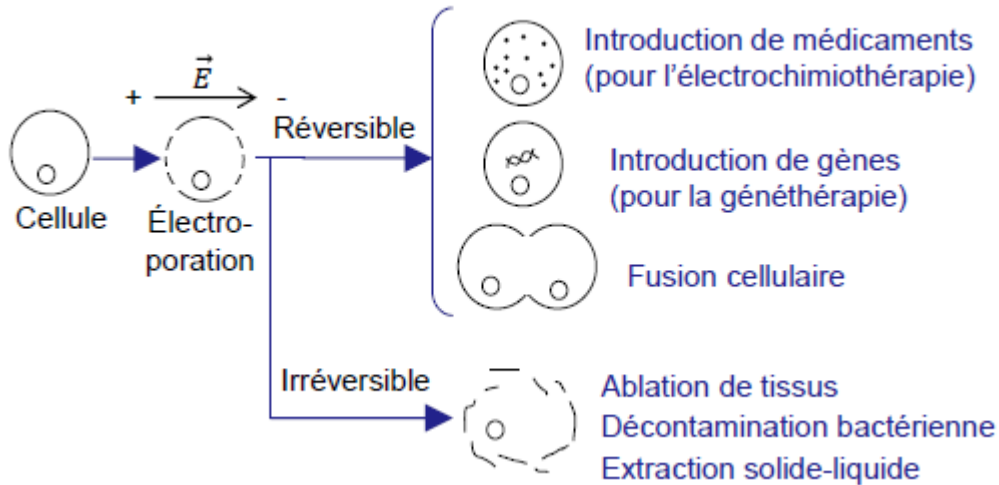


Fig.1.15. Aperçu des applications de l'électroporation réversible et irréversible [39]

1.6.2. Méthodes de détection de la perméabilisation cellulaire

La perméabilisation cellulaire provoque des changements structuraux au niveau des cellules. La création des pores facilite les phénomènes de transfert de la matière de part et d'autre de la membrane. Plusieurs études ont été réalisées afin de caractériser la perméabilisation et les changements qui peuvent survenir après un traitement électrique. Le choix de la méthode de caractérisation dépend des objectifs (suivi en fonction du temps du traitement,...) et de la nature du produit traité [45, 46].

1.6.2.1. Analyse visuelle macroscopique

Bluhm et Sack, 2009 ont montré des changements structuraux au niveau des cellules de betteraves à sucre après traitement par CEP sur des racines entières. La figure 1.16 est une photo prise pour des racines de betteraves traitées par CEP puis découpées. Cette photo montre bien qu'après traitement électrique, les cellules sont endommagées et libèrent leur contenu cellulaire.

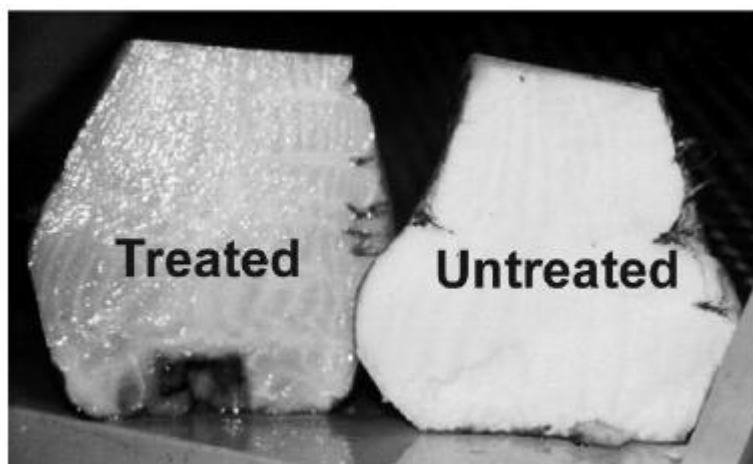


Fig.1.16. Découpage des betteraves à sucre avant et après traitement par CEP [46]

1.6.2.2. Analyse microscopique

L'analyse microscopique permet de visualiser les cellules de près, la figure 1.17 montre des cellules de *Saccharomyces cerevisiae* traitées et non traitées par CEP. Pour la cellule non traitée, tous les composants de la cellule (vacuole, ribosomes, mitochondrie...) sont présents et intacts. L'application suffisamment intense des CEP permet de détruire la membrane cellulaire par formation de pores libérant ainsi la majorité du contenu cellulaire [46].

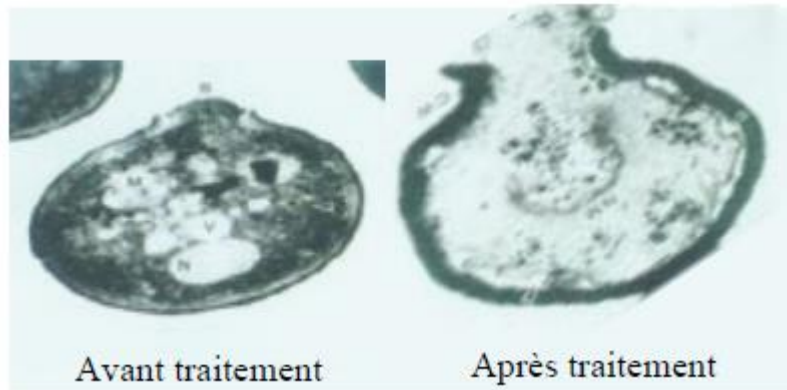


Fig.1.17. Cellules de *Saccharomyces cerevisiae* non traitées et traitées par CEP (40 kV/cm) [46]

1.6.2.3. Analyse par mesure de la conductivité

La formation des pores dans la membrane cellulaire entraîne la libération du contenu intracellulaire. Étant donné que les constituants de la cellule végétale sont composés d'éléments conducteurs, il suffit de suivre l'évolution de la conductivité électrique du milieu extracellulaire afin de détecter la perméabilisation cellulaire [46].

1.6.2.4. Analyse acoustique

L'analyse acoustique est une méthode non destructive qui se base sur l'étude de la propagation du son ou de l'énergie dans le produit. Le principe général consiste à émettre une impulsion sonore dans le milieu à étudier, puis, grâce à un ou plusieurs récepteurs de capter le ou les échos de cette impulsion produite par le milieu ou à la frontière du milieu. Les principales informations fournies par cette technique sont les suivantes :

- La vitesse de propagation dans le milieu : cette dernière est associée à la densité du milieu et à sa compressibilité ou son module d'élasticité.
- L'atténuation dans le milieu : celle-ci est liée à la viscosité du milieu et à son homogénéité.
- Le temps de parcours dans le milieu, qui permet de déterminer les éventuelles inclusions dans le milieu [46].

1.7. Principaux paramètres influençant le traitement par CEP

Lors du traitement par champ électrique pulsé, plusieurs paramètres peuvent influencer de manière favorable ou bien défavorable sur l'efficacité de la perméabilisation. Les principaux seront détaillés ci-dessous.

1.7.1. Paramètres électriques

1.7.1.1. Intensité du champ électrique

L'intensité du champ électrique, qui est l'un des principaux facteurs influençant l'efficacité du traitement par CEP, est déterminée par la tension (kV) à travers les électrodes et la distance inter-électrodes (cm). L'application d'un champ électrique externe avec une intensité supérieure à l'intensité critique, favorise la formation des pores dans la membrane cellulaire. Le comportement des cellules dépend donc de l'intensité du traitement (E). Il existe une valeur critique à partir de laquelle la perméabilisation cellulaire commence [46].

1.7.1.2. Nombre d'impulsions

Plusieurs études ont montré que le couple nombre et amplitude des impulsions appliquées détermine la phase de déclenchement du mécanisme d'électroporation [24, 47].

Une efficacité similaire de perméabilité des membranes a été obtenue soit par un grand nombre d'impulsions de faible intensité (quelques centaines de V/cm) soit par un nombre plus faible d'impulsions de plus forte amplitude (quelques kV/cm). Le travail de Rubisky a notamment pu déterminer la quantité d'impulsions nécessaires pour effectuer une électroporation irréversible efficace pour le cancer de la prostate et cela sans effets secondaires [24, 48].

Des résultats obtenus par l'équipe de Miklavcic sur l'électroporation de cellules de vésicule endocytotique de souris ont montré qu'un grand nombre d'impulsions qui sont caractérisées par une durée de 60 ns et d'une intensité de 50 kV/cm ont à la fois, un effet sur les membranes interne et externe de la cellule [24, 49]. En réduisant le nombre de ces impulsions, un effet de perméabilité est détecté uniquement sur la membrane plasmique.

1.7.1.3. Fréquence de répétition des impulsions

La fréquence de répétition joue aussi un rôle important sur la perméabilisation des membranes. L'équipe de Pucihar a montré que le seuil de déclenchement de l'électroporation varie en fonction de la fréquence de répétition (1.170 V/cm pour 1 Hz et 1.565 V/cm pour 8,3 kHz) [24, 50]. Dans le domaine de l'électro-chimiothérapie, il a été montré que l'augmentation de la fréquence de répétition des impulsions réduisait

sensiblement les effets secondaires au cours du traitement et notamment les effets dus aux fortes contractions musculaires [24, 51].

1.7.1.4. Durée du traitement

De nombreuses études ont porté sur l'effet de la durée du traitement pour la perméabilisation des cellules et l'amélioration de l'extraction. L'augmentation de la durée du traitement améliore l'inactivation microbienne et augmente l'indice de perméabilisation des cellules [46]. Le temps de traitement a été défini plus tôt comme le produit du nombre d'impulsions et de la largeur d'impulsion. Hülshager et son équipe (1981) ont développé un modèle mathématique qui relie la fraction de survie microbienne avec le temps de traitement par CEP. L'inactivation des microorganismes augmente avec une augmentation du temps de traitement. Cependant, une augmentation de la largeur d'impulsion peut également entraîner une augmentation indésirable de la température des aliments [34].

1.7.1.5. Forme d'impulsion

Selon l'installation électrique utilisée, les impulsions générées peuvent avoir différentes formes, durées et énergies. Il existe plusieurs types d'impulsions avec des formes : rectangulaires monopolaires, bipolaires, oscillatoires et exponentielles.

Les impulsions bipolaires peuvent provoquer un stress supplémentaire dans la structure de la membrane cellulaire et contribuent efficacement dans l'amélioration de l'endommagement des cellules. Il a également été démontré que les impulsions bipolaires requièrent moins d'énergie et réduisent les dépôts de solides sur les électrodes ainsi que l'électrolyse des aliments.

Les impulsions rectangulaires semblent être plus efficaces pour la perméabilisation des cellules et plus rentables énergétiquement même si le coût d'équipement est plus onéreux que celui d'un générateur d'impulsions exponentielles. D'autre part, elles présentent l'avantage de délivrer l'énergie électrique à la tension maximale durant la quasi-totalité de chaque impulsion. Par contre, les impulsions exponentielles nécessitent un temps de « remise à zéro » relativement long. La durée de l'impulsion exponentielle est définie comme étant le temps nécessaire pour décroître la tension de 37% de sa valeur maximale [46]. La figure 1.18 représente les différentes formes d'impulsions utilisées dans la technologie des CEP.

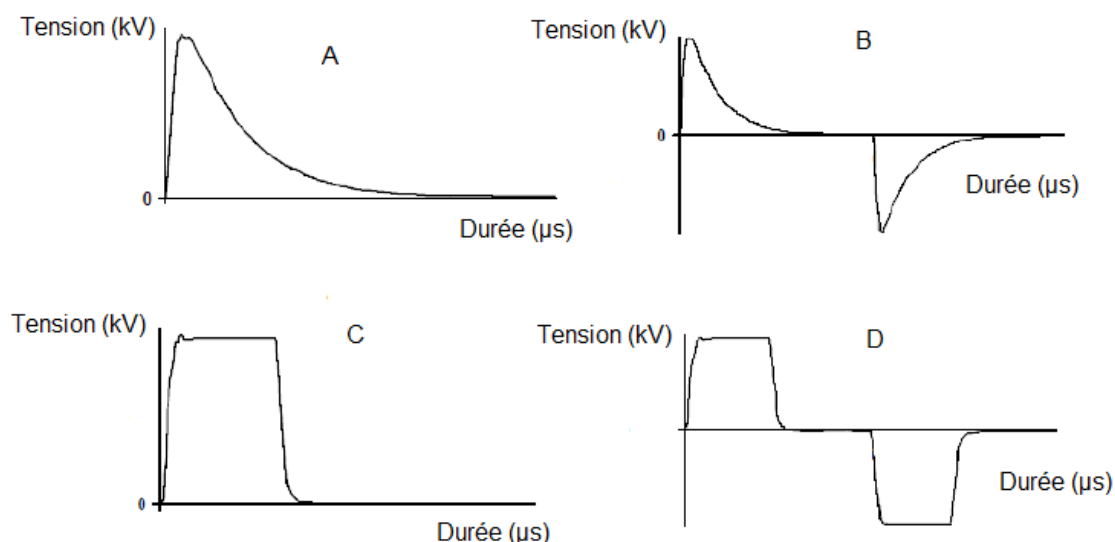


Fig.1.18. Formes d'impulsions utilisées dans la technologie CEP

A : exponentielle décroissante B : exponentielle bipolaire

C : impulsion carrée mono-polaire D : impulsion carrée bipolaire

1.7.2. Température

La température a un effet considérable sur l'efficacité du traitement électrique ainsi que la perméabilisation cellulaire. En effet, le traitement thermique a une influence sur la stabilité et la fluidité de la membrane cellulaire. Dunn et Pearlman (1987) ont observé une augmentation de l'inactivation de *S. Dublin* dans le lait lorsque la température passe de 40 à 50°C. Jayaram (1983) a également remarqué une meilleure inactivation est obtenue lorsque la température passe de 24 à 60 °C. Les mêmes tendances ont également été observées sur les produits végétaux, l'extraction a été favorisée avec l'augmentation de la température [46]. La température interviendrait en diminuant le potentiel transmembranaire critique, ou en diminuant l'épaisseur de la bicouche lipidique [34]. Les méthodes de traitement thermique ont des effets néfastes sur la qualité des aliments, et c'est justement pour cela que la technologie CEP représente une bonne alternative du fait qu'elle soit une méthode de traitement non thermique. Pour cette raison, un refroidissement approprié et un contrôle permanent de la température sont nécessaires pour maintenir des températures alimentaires très inférieures à celles générées par le traitement thermique.

1.7.3. Paramètres microbiologiques

De nombreux auteurs s'accordent à dire que la sensibilité des micro-organismes dépend de leur genre. Pour Sale et Hamilton (1967), les levures sont plus sensibles que les formes végétatives des bactéries, alors que pour Hulsheger et Coll (1983), les bactéries à Gram positif et les levures, sont moins sensibles que les

bactéries à Gram négatif. Pothakamury et Coll. (1995) rapportent une sensibilité supérieure des bactéries à Gram négatif et des levures.

L'état physiologique dans lequel se trouvent les microorganismes entraîne une différence de sensibilité aux CEP. Les cellules en phase de croissance logarithmique sont plus sensibles que les cellules en phase stationnaire.

POTHAKAMURY et coll. (1996) l'ont constaté sur *Escherichia coli*, 2 réductions décimales sont obtenues pour les premières, alors que le même traitement (4 impulsions de 36 kV/cm, à 7°C), diminue de moins de 90 % la population initiale, pour les secondes [25]. WOUTERS et coll. (1999) obtiennent les mêmes résultats sur *Listeria innocua* (figure 3). Il semble que la zone de séparation entre la cellule mère et la cellule fille (septum) offre une sensibilité supérieure aux CEP. JAYARAM et coll. (1992) ont constaté que le taux d'inactivation de *Lactobacillus brevis* augmente si le nombre de germes augmente, mais c'est tout à fait le contraire ce que JEANTET et coll, ont observé sur la *Salmonelle enteirdis*.

Les spores bactériennes semblent plus résistantes que les formes végétatives. Les spores de *Bacillus cereus* et *Bacillus polymyxa* résistent à un champ de 30 kV/cm.

Toutefois, il est possible qu'un temps d'application important puisse inactiver les spores de *Bacillus subtilis*. Car, il semble qu'un effet bactéricide indirect de produits d'électrolyse serait à l'origine de cette inactivation [34].

1.8. Diverses applications du CEP

La perméabilisation des cellules provoquée par l'application d'un CEP peut se manifesté sous plusieurs formes et donc engendré différents états comme montré dans la figure 1.19, cela dépend des divers paramètres évoqués dans la section précédente.

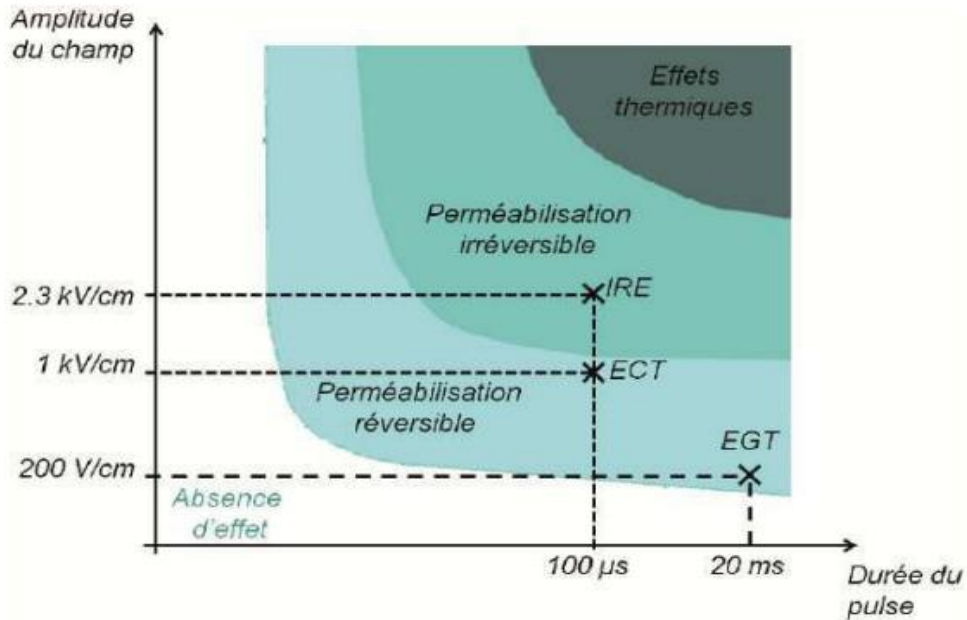


Fig.1.19. Schéma récapitulatif des différents effets obtenus par l'application d'impulsions électriques sur des cellules ainsi que quelques applications : IRE = Électroporation irréversible (ablation de tumeurs), ECT = ElectroChimiothérapie, EGT = Electro transfert de gènes [52]

Cette diversité d'états en fonction des paramètres appliqués ainsi que la possibilité d'accéder facilement à l'intérieur de la cellule ont ouvert la voie à un bon nombre d'applications dont les principales sont listées ci-dessous [52].

1.8.1. Lyse cellulaire et extraction de contenu cytoplasmique

Déjà en 1968, Sale et Hamilton avaient mis en évidence que l'application de champs intenses entraînait la destruction de la membrane provoquant une lyse cellulaire. Cette méthode a ensuite été utilisée pour l'analyse du contenu de cellules après leur lyse. D'autre part, Neumann a très tôt démontré (1972) que même une perméabilisation réversible pouvait permettre à certaines molécules de sortir de la cellule [52].

1.8.2. Ablation tumorale

Toujours dans le registre de la perméabilisation irréversible, il est possible de détruire une tumeur sans intervention chirurgicale. En effet, l'augmentation de la durée des impulsions ou de leur nombre peut provoquer des dommages irréversibles à un tissu sans induire d'effets thermiques. Ainsi, un tissu tumoral peut être détruit sans avoir à y accéder directement (par chirurgie). Cette technique proposant une méthode efficace d'ablation tumorale, même dans des zones difficiles d'accès, et sans intervention chirurgicale lourde, semble donc tout à fait cliniquement réalisable [52].

1.8.3. Electrochimithérapie (ECT)

L'accès facilité au cytoplasme grâce aux impulsions électriques a permis à beaucoup d'applications, nécessitant l'entrée de molécules hydrophiles dans la cellule, de se développer.

Néanmoins, l'application in vivo la plus aboutie dans ce domaine reste l'électrochimiothérapie. Ce traitement consiste à électroperméabiliser réversiblement et localement les cellules cancéreuses avant d'injecter un médicament cytotoxique. Dans le cadre de la chimiothérapie classique, la quantité de médicament entrant dans les cellules est faible car ces dernières sont souvent non-perméables (n'entrant pas d'elles-mêmes dans les cellules). Les doses sont alors augmentées pour maximiser la quantité de principe actif dans les cellules tumorales. D'un autre côté, les fortes doses entraînent des effets secondaires importants. Le rôle de la perméabilisation du tissu tumoral juste avant (ou juste après) l'injection du médicament va permettre une entrée massive des molécules d'intérêt, et donc une réduction des doses nécessaires à l'induction d'un effet.

Ainsi, les premiers tests in vitro combinaient l'effet de la bléomycine (agent anti-cancéreux par induction de cassures de l'ADN) et d'impulsions électriques. Et que très rapidement, le traitement fut appliqué sur l'animal puis en tests cliniques. En 2006, des protocoles furent standardisés et qu'un générateur dédié à cet effet, a été mis sur le marché (CliniporateurTM). A ce jour, plus de 100 cliniques prodiguent efficacement des traitements par électrochimiothérapie [52]. La figure 1.20 représente les différentes étapes de la procédure.

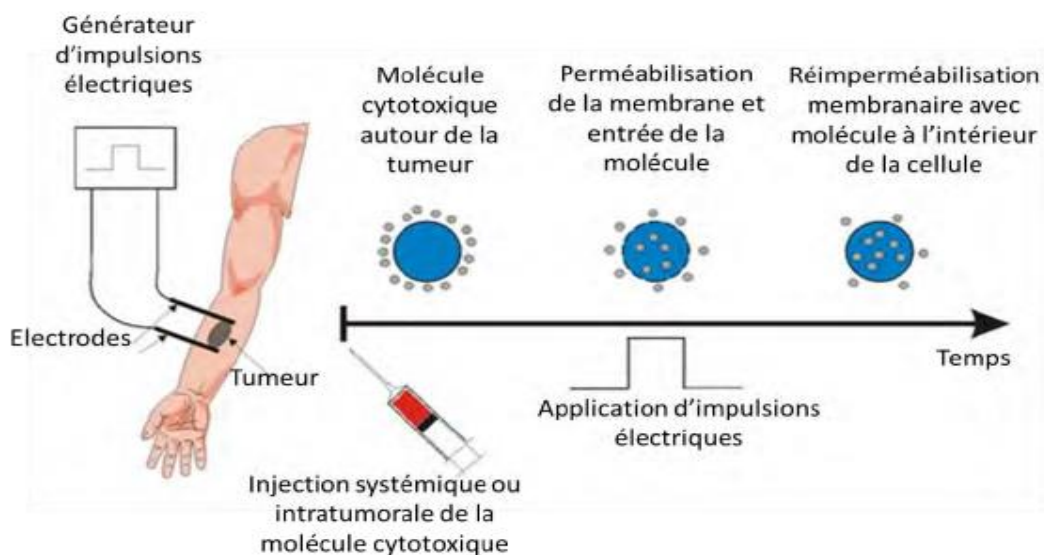


Fig.1.20. Schéma classique de l'électrochimiothérapie ECT décrivant les différentes étapes de la procédure [38]

1.8.4. Outil de laboratoire

Toujours dans le cadre de l'accès au cytoplasme, l'électroperméabilisation est très souvent utilisée en routine de laboratoire pour le transfert de gènes dans des bactéries (transformation) ou de cellules (transfection). Ces utilisations ont permis l'entrée sur le marché de plusieurs systèmes commerciaux d'électroperméabilisation [52].

1.8.5. Thérapie génique (EGT)

Le transfert d'un gène à l'intérieur de cellules ou d'un tissu à l'aide d'impulsions électriques a aussi été transposé à la médecine. En effet, l'utilisation de l'électroperméabilisation permet de s'affranchir de l'emploi d'un quelconque virus qui pourrait entraîner un risque pour le patient. Le premier test clinique en phase d'électro-transfert de gène sur des patients atteints de cancer est concluant [52].

1.8.6. Nanoporation

Grâce aux progrès technologiques, il est maintenant possible de délivrer des impulsions ultracourtes (10 ns à 300 ns) et de très forte amplitude (10 à 150 kV/cm); ce sont les nanopulses (nPEF). Les premières expérimentations suggèrent que l'application sur le vivant de ce genre d'impulsions très courtes pourrait entraîner la perméabilisation des membranes lipidiques internes de la cellule sans endommager l'enveloppe externe. Néanmoins, bien que ces impulsions induisent des effets internes de la cellule (apoptose,...), il a été noté que la membrane externe était aussi perméabilisée. Cependant, dans ces conditions, la membrane cytoplasmique n'est perméable qu'à de petites molécules [52].

1.8.7. Electrofusion

L'électrofusion est la formation in vitro d'une seule cellule hybride par l'union de deux cellules provenant de différentes espèces ou à des stades cellulaires différents en utilisant la technologie des CEP. Ce mode de production d'hybridomes fut découvert en 1982 par l'équipe de Zimmermann [52].

1.8.8. Agroalimentaire

Dans ce cadre, l'utilisation de champs intenses est exploitée par les industriels pour l'extraction de jus (raisin, betterave, canne à sucre,...etc.), la stérilisation de jus de fruits ou de lait. Cette partie sera traitée en détail dans la section suivante (1.9). La figure 1.21 représente quelques exemples des applications citées précédemment.

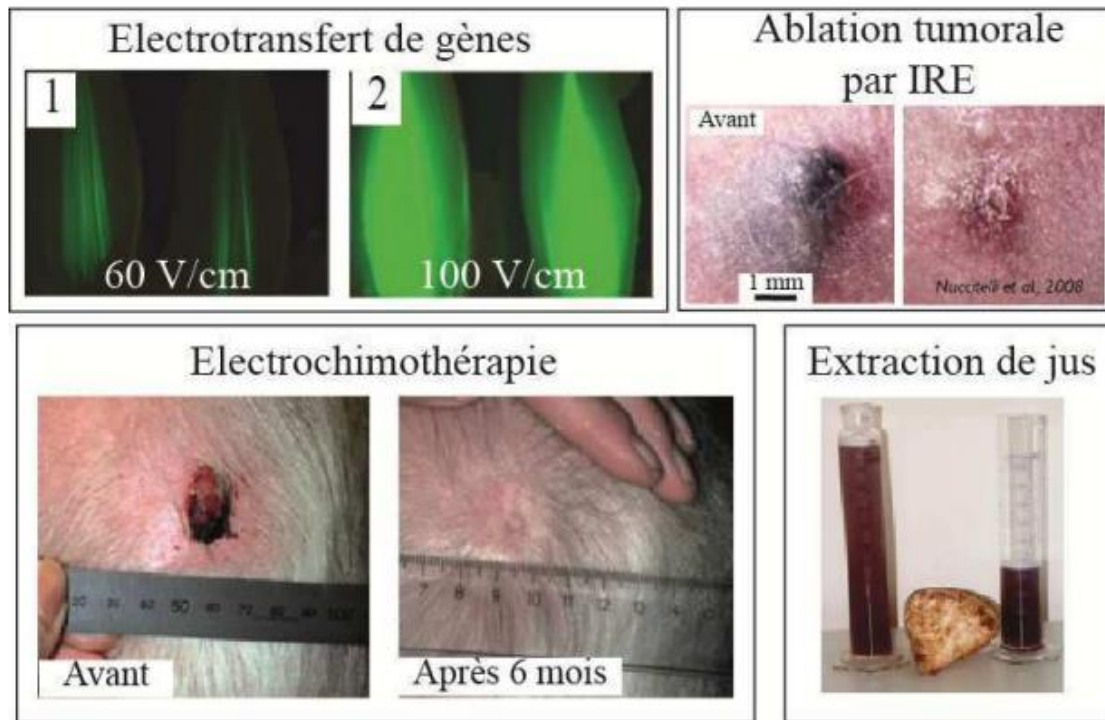


Fig.1.21. Exemples d'applications des CEP [52]

1.9. Applications du CEP dans l'industrie agroalimentaire

La technologie CEP est une méthode largement utilisée dans l'industrie alimentaire dans le cadre de l'extraction des composants intracellulaires tels que le sucre à partir de betteraves [53], des jus de fruits [54] et des lipides à partir des algues pour la production d'énergie renouvelable [55] (Figure 12). L'électroporation a été aussi utilisée pour la préservation des aliments (notamment les épinards) assurant une meilleure résistance des produits alimentaires aux dommages causés par la congélation [56].

Elle est également un outil prometteur utilisé pour la stérilisation de l'eau et la conservation des aliments. En effet, l'intégrité et la morphologie des bactéries sont soutenues par la paroi cellulaire, cible des principaux processus d'inactivation microbienne. Une approche prometteuse de l'inactivation bactérienne est basée sur l'utilisation de CEP [37].

Les travaux de Pillet et al. (Figure 1.22) ont montré que l'exposition des bactéries sous forme végétative aux impulsions de champ électrique conduit à une désorganisation structurale liée à des altérations morphologiques et mécaniques de la paroi cellulaire. D'autre part, le traitement des spores avec CEP induit une destruction partielle des nanostructures des protéines de l'enveloppe, associée à des altérations internes du cortex et du noyau [37].

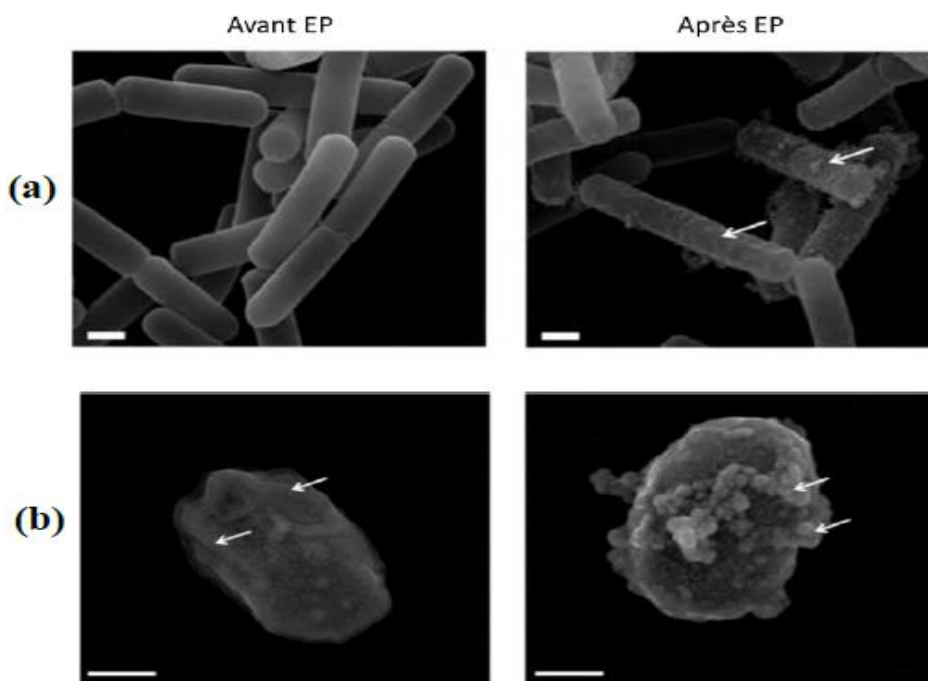


Fig.1.22. Images en microscopie électronique à balayage avant et après électroporation montrant (a) la désorganisation de la paroi cellulaire des bactéries sous forme végétative après l'application des impulsions du champ électrique (1000 impulsions à 7.5 kV/cm). Les flèches blanches indiquent les dommages de surface, barres d'échelle : 500 nm

(b) les spores bactériennes altérés par le champ électrique (10 000 impulsions à 7.5 kV/cm).
Barres d'échelle : 250 nm [37]

1.9.1. Extraction de pigments

De nombreuses études ont été réalisées et il ressort de ces travaux que l'efficacité du CEP 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 de 10 impulsions créant un champ d'amplitude 1,6 kV/cm 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 [18].

Cette technique très prometteuse peut être appliquée en prétraitement de la biomasse micro-algale avant l'extraction par solvant. Très récemment, Zbinden et al.,(2013) a montré l'efficacité des CEP sur l'extraction des lipides de la micro-algue *Ankistrodesmus falcatus* [57].

1.9.2. Extraction des jus

Vu que le traitement par CEP augmente la perméabilité des cellules, il est très utilisé pour améliorer le rendement des procédés d'extraction des jus de fruits et de légumes (Pomme, carotte, betterave...etc).

L'efficacité de l'électroporation irréversible a de plus été démontrée pour l'extraction solide-liquide de matières végétales (par exemple pour l'extraction du jus sucré de la betterave ou l'extraction des composés phénoliques du raisin). La Figure 1.23 montre une comparaison de résultats obtenus lors de l'extraction du jus sucré de betteraves par électroporation irréversible et par la technique d'extraction traditionnelle. Elle montre également l'installation industrielle utilisée pour le traitement des betteraves par électroporation. À souligner que l'électroporation irréversible présente l'avantage appréciable d'être moins coûteuse en énergie que les techniques thermiques [39].

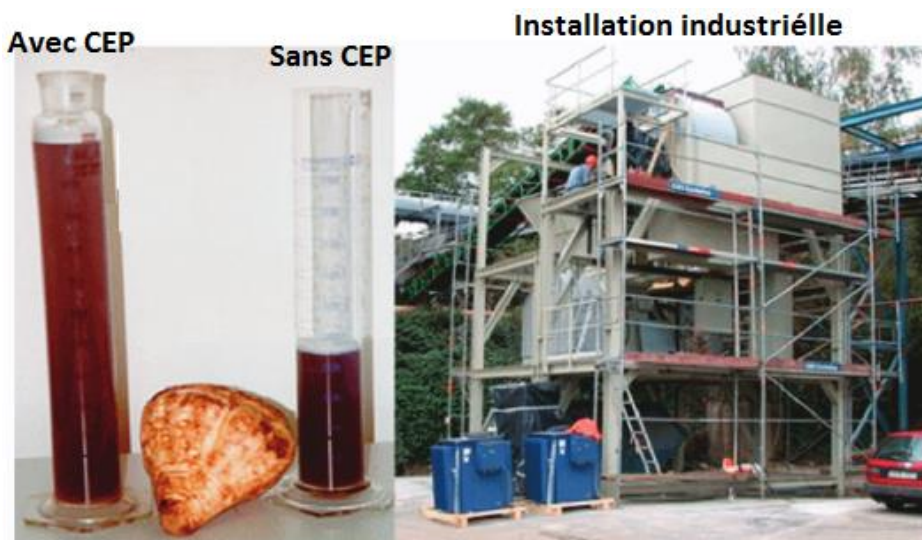


Fig.1.23. Comparaison des résultats de l'extraction du jus sucré de betteraves par électroporation irréversible et par la technique d'extraction traditionnelle [39]

Les travaux réalisés par T.K. Gachovska (2006) sur les feuilles de luzerne représentent un autre exemple de l'efficacité des CEP dans l'extraction des jus. En effet, à partir des expériences menées et de l'analyse, il a été prouvé que le traitement par CEP a entraîné la dégradation de la membrane cellulaire des feuilles de luzerne et a amélioré l'extraction du jus de 37,8% de plus que l'échantillon non traité. Il a aussi augmenté la quantité de matière sèche, des résidus et du filtrat obtenue à partir du jus de luzerne comme montré dans la figure 1.24 [58].

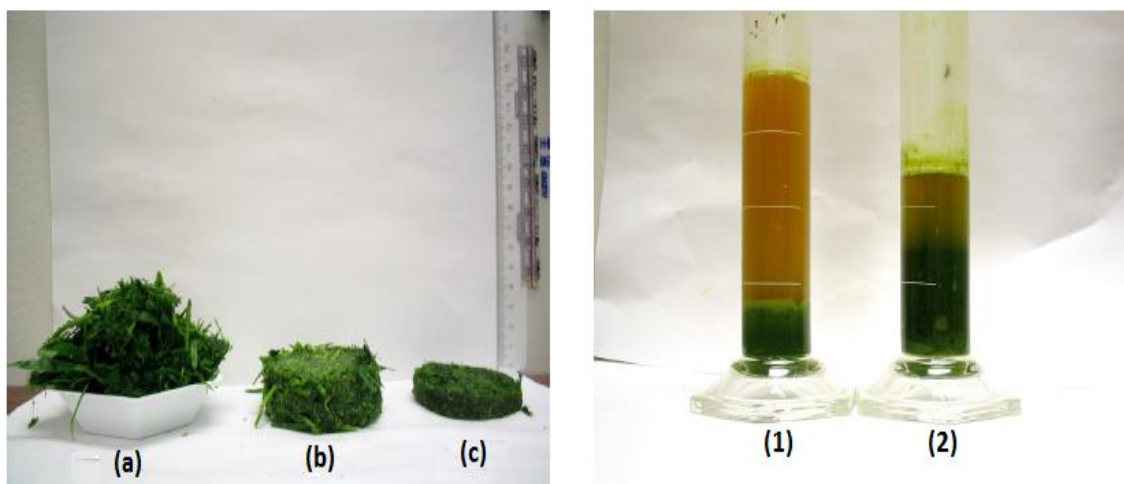


Fig.1.24. Extraction du jus de luzerne par CEP [58]

- (a) Feuilles de luzerne avant pressage (b) Résidu après pressage sans traitement par CEP
(c) Résidu après pressage avec traitement par CEP
(1) Jus extrait avec traitement par CEP (2) Jus extrait sans traitement par CEP**

1.9.3. Inactivation des microorganismes

Les traitements par CEP permettent d'obtenir des hauts degrés de dégradation des microorganismes tout en étant rapides et à faible température. Les applications potentielles de cette technologie incluent la majeure partie des boissons et jus de fruits, le lait, les œufs liquides, les sirops, sauces ou purées et les soupes [18]. Le lait cru représente un bon modèle pour étudier l'efficacité du procédé et étudier les autres effets sur les constituants biologiques.

1.9.3.1. Traitement du jus de pomme

Les études réalisées par Simpson et al (1995), ont montré que le jus de pomme obtenus après un traitement par CEP à 50 kV/cm, 10 impulsions et une largeur d'impulsion de 2 μ s et une température de traitement maximale de 45 ° C avait une durée de conservation de 28 jours, alors qu'elle est seulement de 21 jours dans le cas de jus de pomme fraîchement pressé. Il n'y avait pas de changements physiques ou chimiques dans l'acide ascorbique ou les sucres dans le jus de pomme traité par CEP et un panneau sensoriel n'a révélé aucune différence significative entre les jus traités et non traités [59].

1.9.3.2. Traitement du lait

Fernandez-Molina et al. (1999) a étudié la durée de conservation du lait écrémé brut (0,2% de graisse du lait), traité durant 2 μ s avec 30 impulsions exponentielles décroissantes de 40 kV/cm. Il a remarqué que la durée de conservation du lait qui était de 2 semaines conservée à 4 °C augmente considérablement jusqu'à 22 jours

(3 semaines), et ce dans le cas du traitement du même produit à 80 °C pendant un temps de 6 s suivi avec un CEP à 30 kV / cm, 30 impulsions et une largeur d'impulsion de 2 µs. La température de traitement n'a pas dépassé 28 °C pendant le traitement par CEP du lait écrémé brut [59].

1.9.3.3. Traitement des œufs

Les premières études sur les ovoproduits ont été menées par Dunn et Pearlman (1987) dans une chambre de traitement statique à électrodes parallèles avec un intervalle de 2 cm en utilisant 25 impulsions de forme exponentielle décroissante et avec des tensions d'environ 36 kV. Des essais ont été effectués sur des œufs liquides, sur des œufs liquides pasteurisés par la chaleur et sur des ovoproduits avec du sorbate de potassium et de l'acide citrique ajouté comme conservateurs. Des comparaisons ont été effectuées avec des œufs réguliers pasteurisés à la chaleur avec et sans ajout de conservateurs alimentaires lorsque les œufs ont été stockés à des températures de réfrigération faibles (4 °C) et haute (10 °C). L'étude a montré une augmentation des durées de conservation des ovoproduits avec le traitement par CEP. En effet, la durée de conservation était de 4 jours pour 10 °C, 10 jours pour 4 °C et de seulement quelques heures pour les échantillons ayant subis un traitement thermique [59].

1.9.3.4. Traitement de la soupe de pois verts

Vega-Mercado et al. (1996a) a exposé la soupe de pois à 2 séries de 16 impulsions à 35 kV/cm pour éviter une augmentation de température supérieure à 55 °C pendant le traitement. La durée de conservation de la soupe de pois traités avec CEP (conservée à la température de réfrigération) dépasse 4 semaines. Il n'y avait aucun changement apparent dans les propriétés physiques et chimiques ou les caractéristiques sensorielles de la soupe de pois directement après le traitement par CEP ou pendant les 4 semaines de stockage à des températures de réfrigération [60].

1.9.4. Purification de l'eau

La technologie des CEP a aussi été utilisée pour purifier les eaux, un traitement en continue est nécessaire pour cette application. La société américaine Diversified Technologies (DTI), a lancé en 2007 un nouveau système de pasteurisation à CEP haute capacité (Figure 1.25). Le procédé est destiné à la purification des eaux. Il permet d'obtenir une réduction bactérienne supérieure à 5 fois avec un débit pouvant atteindre 10 000 litres par heure [61].



Fig.1.25. Système de pasteurisation à CEP destiné à la purification des eaux (DTI) [61]

1.10. Différents types de générateurs pulsés

L'objectif général d'un générateur est de transformer un signal continu en une impulsion électrique de courte durée et de forte amplitude (kV). Un générateur de puissance pulsée est constitué de :

- Une source haute tension continue permettant de charger le système.
- Un élément de stockage déterminant l'énergie et la durée de l'impulsion.
- Un commutateur (Switch) permettant de délivrer les impulsions et influant sur la durée et la forme des impulsions [62].

Le schéma bloc de base du système de génération d'impulsion est présenté dans la figure 1.2.

1.10.1. Générateur d'impulsion à décharge de condensateur

Dans la grande majorité des applications que l'on rencontre, le stockage de l'énergie est de type capacitif et est égale à $(CV^2/2)$, où C représente la valeur de la capacité totale et V la tension de charge du condensateur.

Il est possible de réaliser des associations série de condensateurs (figure1.26.a) pour résoudre des problèmes de tenue en tension et/ou des associations parallèle (figure1.26.b) pour augmenter l'énergie stockée (à tension donnée) ou le courant délivré à l'utilisation (ou charge) [14].

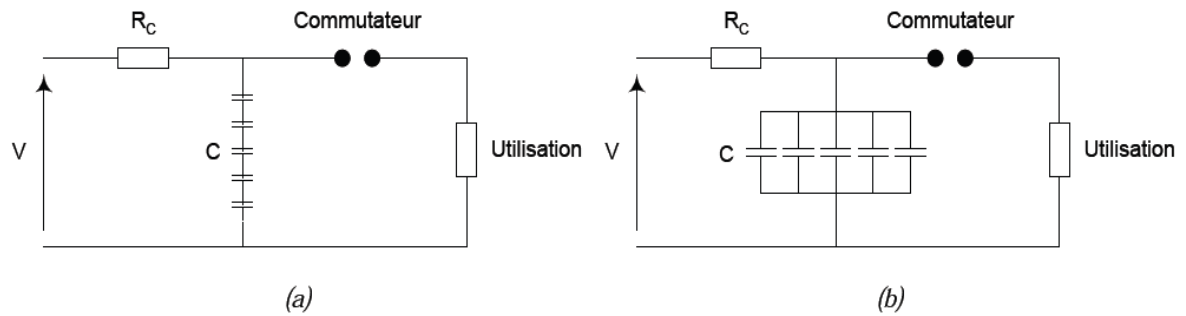


Fig.1.26. Stockage capacitif de l'énergie par association série (a) ou parallèle (b)[14]

Les commutateurs utilisés sont ceux à gaz et sous vide bien que malgré qu'ils soient les plus anciens et les plus simples des commutateurs, leurs performances leur laissent une large place dans beaucoup d'applications actuelles. Leur fonctionnement repose sur l'établissement d'un canal conducteur par développement d'une décharge électrique de type streamer. Le point fort de ces commutateurs est leur tenue en tension élevée qui dépend, bien évidemment, de la géométrie des électrodes, de la nature et de la pression du gaz utilisé [14].

1.10.2. Générateur de Marx

Le générateur de Marx est une source d'impulsion haute puissance à stockage d'énergie capacitif inventé par Erwin Marx en 1923 [63]. Bien que plutôt utilisé pour générer de fortes tensions, il est capable de générer des impulsions bi-exponentielles de faible durée pouvant atteindre plusieurs méga volts. Le générateur de Marx offre un choix assez large en termes d'amplitude de tension, de courant, de temps de montée et de durée d'impulsion. L'énergie stockée, et donc le courant délivré à la charge, peuvent aisément être ajustés en associant en série ou en parallèle des condensateurs au niveau de chaque étage. Par ailleurs, il n'y a pas de limite critique concernant l'amplitude de tension ainsi que son temps de montée en dehors des problèmes d'isolement électrique et de la valeur de l'inductance équivalente du générateur qui en résulte. Si l'on ajoute à cela une bonne connaissance de la conception de tels générateurs, cela explique qu'il soit le plus connu et l'un des systèmes les plus utilisés pour produire des impulsions de courte durée et de forte puissance, quel que soit le domaine d'application.

Le principe de base est de charger en parallèle des étages de condensateurs à une tension V_0 et de les associer en série pour les décharger dans la charge utile. Le changement de configuration s'effectue par l'intermédiaire de commutateurs à fermeture (aussi appelés éclateurs dans le cas de commutateurs à gaz). Théoriquement, l'amplitude de l'impulsion de sortie est égale à $N \times V_0$ avec N le nombre d'étages [64]. Le circuit élémentaire d'un générateur de Marx 4 étages est représenté dans la figure 1.27.

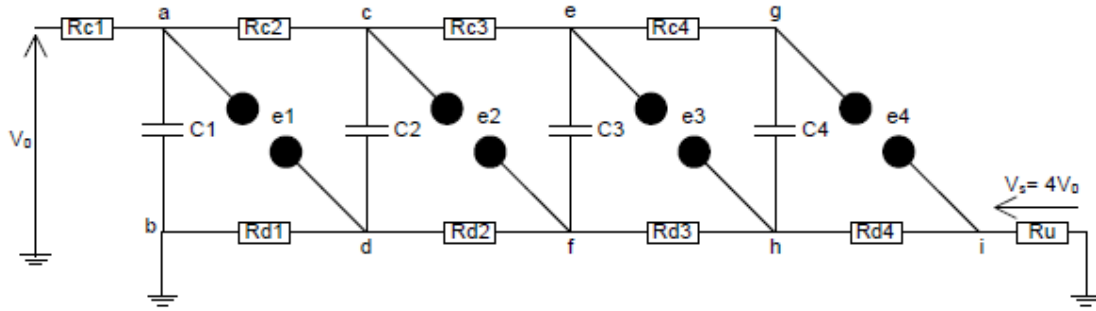


Fig.1.27. Schéma électrique équivalent d'un générateur de Marx classique à 4 étages [64]

Chaque étage est composé d'un condensateur C_i , d'une résistance de charge R_{c_i} , d'une résistance de décharge R_{d_i} , et d'un commutateur E_i . Nous représentons, aussi, la charge utile placée en sortie de ce générateur par R_u .

Idéalement, le fonctionnement est le suivant : une alimentation continue charge à une tension V_0 , au travers des résistances de charge R_{c_i} , les différents étages de condensateurs associés en parallèle. Les valeurs de ces résistances de charge sont déterminées en fonction de la puissance de la source d'alimentation de tension V_0 et paramètrent le plus souvent la fréquence de répétition du générateur. Une fois les étages chargés, les points a, c, e et g sont au potentiel V_0 tandis que les points b, d, f et h sont référencés à la masse par l'intermédiaire des résistances R_{d_i} . La Figure 1.28 représente le circuit équivalent du générateur de Marx lors de la phase de charge [64].

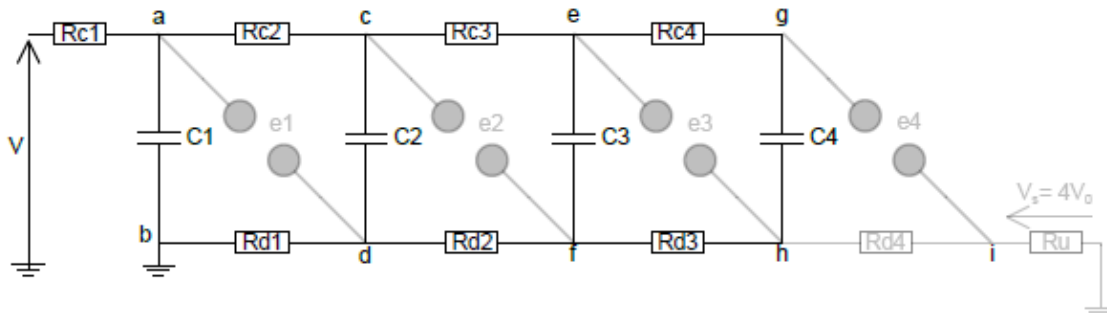


Fig.1.28. Schéma électrique équivalent d'un générateur de Marx durant la phase de charge des condensateurs [64]

Une fois le générateur chargé, le commutateur e_1 se ferme de manière déclenchée ou autonome. Le potentiel au point d est alors porté à V_0 . Par conséquent, celui du point c passe de V_0 à $2V_0$. A cet instant, le commutateur e_2 , dimensionné pour tenir une tension à peine supérieure à V_0 , est soumis à une tension supérieure à sa tension de claquage. Il se ferme à son tour. Ce processus de multiplication de tension se poursuit ainsi d'étage en étage jusqu'à la sortie. Le circuit équivalent de cette phase de décharge est présenté à la figure 1.29. Les capacités parasites existantes entre chaque élément du système (commutateur, condensateur,...) jouent un rôle non négligeable sur le déclenchement des étages. En effet, elles génèrent de légères

surtensions qui permettent d'accroître la différence de potentiel aux bornes de chaque commutateur et assurer, ainsi, une commutation rapide. De plus, lorsque tous les commutateurs sont en vue directe les uns des autres, le déclenchement du premier peut favoriser celui des suivants par photo-ionisation du gaz, induite par le flux lumineux créé par l'arc électrique. En général, la commutation complète se fait en un temps compris entre quelques nanosecondes et quelques microsecondes [64].

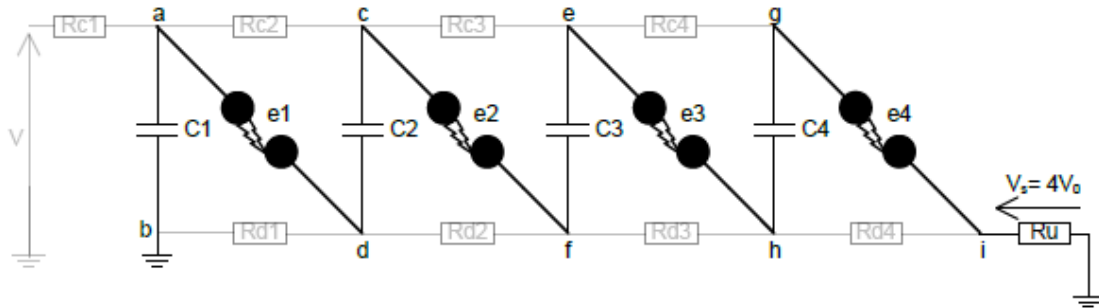


Fig.1.29. Schéma électrique équivalent d'un générateur de Marx durant la phase de décharge des condensateurs [64]

Toutefois avec l'évolution remarquable dans l'électronique de puissance, des générateurs de Marx à base de semi-conducteurs ont vu le jour. Notons que le cinquième et dernier chapitre sera consacré à l'étude et la réalisation de ce type de générateurs.

1.10.3. Générateur haute tension à transformateur

Le principe de ce générateur repose sur l'utilisation d'un commutateur à Semi-conducteur (thyristors), associé à un transformateur d'impulsions destiné à amplifier les impulsions délivrées par le commutateur suivant le schéma de principe de la figure 1.30. Le but est donc de générer, à une fréquence réglable de 0 à 500 Hz, des impulsions de tension de fronts de montée rapides (200 ns) et d'amplitude voisine de 60 kV [14].

Pendant il est nécessaire d'optimiser les éléments constitutifs du transformateur (câbles HT, matériau ferrite, nombre d'enroulements, diélectrique assurant la tenue en tension, etc...) afin d'avoir un contrôle fiable sur les paramètres des impulsions de sortie.

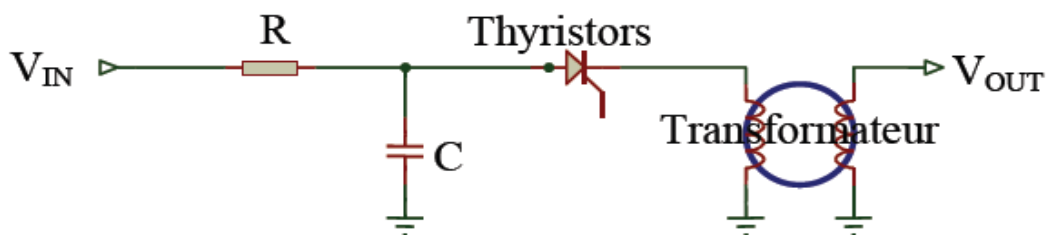


Fig.1.30. Générateur d'impulsions haute tension à transformateur [14]

Afin d'améliorer encore la tension de sortie du transformateur, les enroulements primaire et secondaire peuvent être branchés en autotransformateur (figure 1.31). De cette manière, les enroulements du primaire sont pris en compte dans le gain en tension.

Ainsi, par exemple, pour un même transformateur composé d'un tore de ferrite 3F4 alimenté sous 8kV, une impulsion d'amplitude 21kV est obtenue avec un montage classique alors qu'elle atteint 27kV en montage en autotransformateur [14].

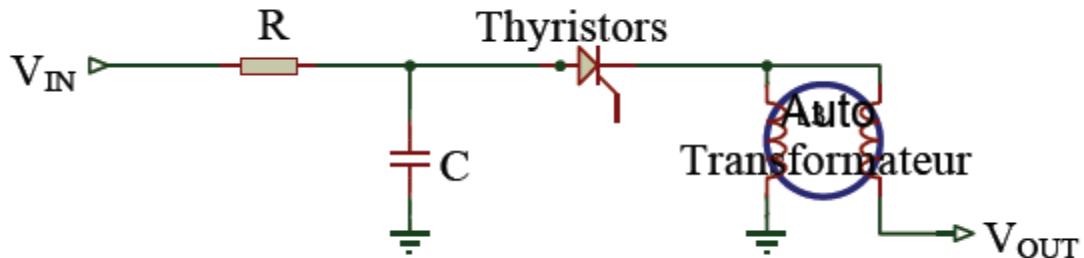


Fig.1.31. Générateur d'impulsions haute tension à transformateur (montage en autotransformateur) [14]

1.10.4. Transformateur à lignes de transmission (TLT)

C'est le concept le plus ancien de génération d'impulsions nanosecondes à haute tension principalement utilisé dans les systèmes de radar et récemment aussi pour l'électroporation. Ce type de générateur permet de créer une impulsion rectangulaire dont les propriétés temporelles sont fixées par la configuration du circuit correspondant. Le principe général d'un tel générateur (Figure 1.32) est basé sur l'utilisation d'une ligne de transmission d'une impédance caractéristique Z_0 alimentée par une source haute tension continue. La ligne est ainsi alimentée à une haute tension VHT [65].

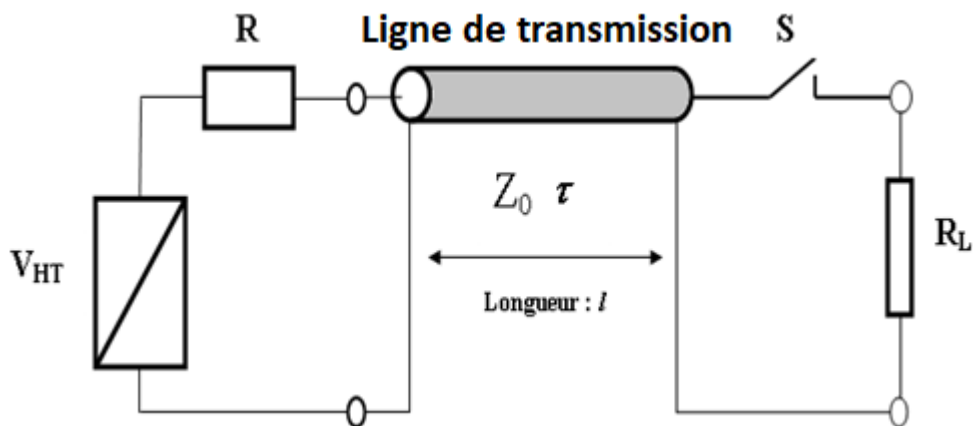


Fig.1.32. Générateur de ligne de transmission

Le générateur fonctionne en deux phases, la charge et la décharge, et génère des impulsions à ondes carrées. Au cours de la phase de charge, l'interrupteur S est hors tension et l'alimentation à haute tension variable VHT charge la ligne de transmission à la tension préétablie. Dans la phase de décharge, le commutateur est activé, et la ligne de transmission est évacuée à travers la charge reliée à la sortie [11].

La durée de l'impulsion dépend de la longueur du câble de transmission et elle peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\tau = \frac{l\sqrt{\varepsilon_r}}{c} \quad (1.1)$$

τ : Durée d'impulsion du générateur de ligne de transmission

ε_r : La permittivité relative diélectrique utilisée dans la ligne.

l : La longueur de la ligne de transmission.

c : La vitesse de la lumière dans le vide.

1.11. Conclusion

L'état de l'art de cette étude a, dans un premier temps, mis en évidence la technologie CEP ainsi que son équipement. En effet, le principe de la génération des puissances pulsées repose sur le stockage plus ou moins long de l'énergie électrique et sa restitution vers la charge dans un temps très bref. Les systèmes CEP se compose généralement d'une alimentation de tension continue, un générateur pulsé et une chambre de traitement où sera placé l'aliment à traiter.

L'effet principal d'un CEP sur les cellules animales ou végétales est appelé électroporation, et pour mieux assimiler ce phénomène quelques notions en biologie ont été nécessaires (cellule, membrane plasmique...etc.).

On a présenté à la fin du chapitre les différents générateurs pulsés et les diverses applications de cette technologie, spécialement dans le domaine agroalimentaire puisqu'il représente l'objet de cette thèse.

Le chapitre suivant sera consacré aux différents matériels et méthodes utilisés dans le cadre de ce travail.

Chapitre 2

Matériels et Méthodes

Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

2.1. Introduction

Parmi les applications les plus utilisées du champ électrique pulsé dans le domaine agro-alimentaire, il y a l'extraction des jus à partir des fruits et légumes. En effet, cette technique présente l'avantage d'être une méthode non thermique, sélective, de courte durée de traitement (quelques millisecondes) et de faible consommation énergétique. La création de pores dans les membranes cellulaires (electroporation) permet de libérer le contenu intracellulaire et donc d'augmenter le rendement des procédés d'extraction. La combinaison des champs électriques pulsés avec l'extraction à partir des agro-ressources pourrait avoir de multiples avantages tels que : une extraction plus sélective des composés cellulaires entraînant une réduction et une simplification des opérations de purification et de clarification des produits obtenus, une extraction non-thermique, une réduction voire même élimination totale de l'utilisation de solvants organiques ou d'adjuvants de pressage, ou encore une meilleure déshydratation des rejets végétaux [46].

Le travail présenté dans cette thèse a pour principe : l'application simultanée d'une pression et d'un CEP pour l'extraction des jus à partir des fruits et légumes. Comme présenté dans la figure 2.1, et afin de prouver l'efficacité de ce procédé, une comparaison entre les résultats obtenus avec et sans traitement par CEP doit être faite. L'amélioration du rendement est assez nette surtout pour les tissus à forte teneur d'eau.

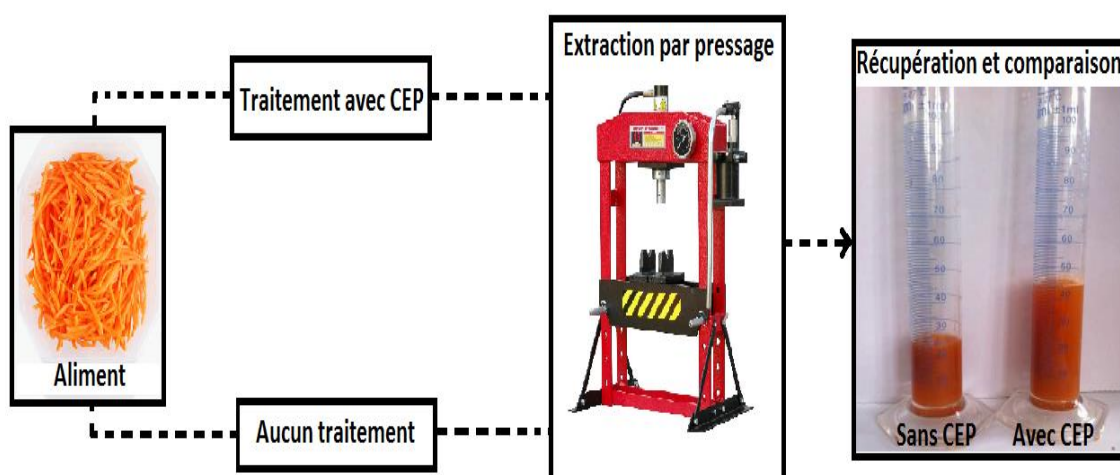


Fig.2.1.Comparaison entre l'extraction avec et sans CEP

Ainsi, nous présentons dans ce second chapitre, la méthodologie expérimentale adoptée au cours de ce travail, tout en décrivant les différents procédés avec les matières premières étudiées, les dispositifs expérimentaux, les paramètres opératoires

ainsi qu'une description détaillée sur la méthodologie des plans d'expériences qui a été utilisée pour la modélisation des procédés d'extraction des jus par CEP.

2.2. Produits biologiques étudiés

Les aliments soumis à un champ électrique, ont des caractéristiques qui leur sont propres, et qui doivent être prises en compte afin de développer un procédé de traitement de ces aliments.

La résistivité des aliments est très variable, elle varie de $0,4 \Omega \cdot m^{-1}$ pour les aliments à forte teneur en sels et en eau, à plus de $100 \Omega \cdot m^{-1}$ pour les matières grasses et les huiles [66].

Beaucoup d'aliments ont une structure hétérogène, de sorte que leurs caractéristiques électriques varient, et donc leur modélisation en tant que composant électrique peut présenter des difficultés. La conception des installations à champs électriques pulsés doit prendre en compte ces caractéristiques électriques, selon l'usage pour lequel elles sont destinées.

Un phénomène particulier peut se produire, lorsque l'on soumet un aliment à un champ électrique pulsé : c'est le claquage diélectrique. Il résulte de la brutale modification des propriétés conductrices d'un matériau sous l'effet d'un champ électrique intense, et se matérialise sous la forme d'une étincelle. Il est, là aussi, nécessaire de contrôler ce phénomène [34].

De ce fait, le choix des aliments doit prendre en considération tous ces paramètres. Plusieurs aliments ont été expérimenté, au final, notre choix s'est porté sur deux d'entre eux largement disponibles : la carotte et la betterave rouge.

- Carotte : La carotte est un légume de la famille des *Apiacées*, cultivée pour sa racine comestible rouge-orangée, consommée comme légume. C'est une source très riche en *caroténoïdes*. Ces derniers sont des composés ayant des propriétés anti-oxydantes et sont capables de neutraliser les radicaux libres. Les principaux caroténoïdes retrouvés dans la carotte (crue, cuite ou jus) sont le *bêta carotène*, la *lutéine* et la *zéaxanthine*. Le tableau 2.1 résume l'ensemble des principaux constituants de la carotte [46].

Tableau.2.1.Composition moyenne approximative des carottes

Composants	Teneur (%)
Eau	89,7
Glucides	6,2
Protéines	0,8
Lipides	0,3
Fibres alimentaires	2

- Betterave : La betterave est un légume de la famille des *Chénopodiacées*, dont la racine est composée d'environ 76% d'eau et 24% de matières sèches (Voir tableau 2.2). Ces dernières comprennent 5% de pulpe. Insoluble dans l'eau, la pulpe est principalement constituée de celluloses, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines utilisées pour l'alimentation animale. Le sucre représente, pour sa part, 75% des matières sèches de la racine [46]. Enfin et sachant qu'il existe plusieurs types de betteraves, que notre choix s'est porté sur la betterave rouge pour qu'elle soit utilisée dans ce travail de thèse.

Tableau.2.2.Composition moyenne approximative des betteraves

Composants	Teneur (%)
Eau	75-76
Matières sèches solubles (sucre et non sucre)	18-19
Matière sèche insoluble (marc)	4-5,5

2.3. Procédé d'extraction des jus par pressage :

Dans cette section, nous allons décrire le procédé d'extraction de jus de betterave ou de carotte en utilisant une chambre d'extraction et une presse hydraulique.

2.3.1. Préparation de l'échantillon pour l'extraction

Afin d'assurer de bonnes conditions de travail, il est nécessaire d'utiliser des légumes frais et de même qualité. Aussi les betteraves ont été râpées comme montré dans la figure 2.2, ce qui permettra d'avoir une bonne disposition de l'aliment dans la chambre de traitement et ainsi éviter qu'un claquage ne se produise lors du traitement par CEP.



Fig.2.2. Betteraves râpées avant l'extraction

2.3.2. Chambre d'extraction

Dans le cadre de cette thèse, une chambre statique plaque-plaque spécialement conçue et réalisée au laboratoire APELEC de l'Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, a été utilisée. Cette chambre a la particularité d'être à la fois une chambre d'extraction et de traitement.

La chambre est composée d'un cylindre isolant en matière plastique (téflon), le piston cylindrique et un disque de diamètre de 70 mm forment des électrodes pendant le traitement CEP ainsi que la structure rigide pour le pressage de jus (figures 2.3 et 2.4). Le Jus extrait a été filtré à travers un tamis en acier inoxydable placé sur le dessus du piston perforé. Le jus extrait pendant le pressage a été recueilli dans un collecteur en plastique placé sous la chambre de traitement (figure 2.5). Le volume de la chambre est de 192,3 millilitres (ml) [62].

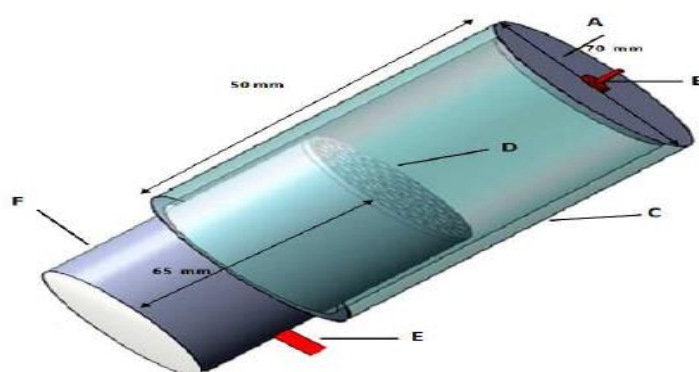


Fig.2.3. Dessin de la chambre tracée avec Solide-Works

A-Disque en acier inoxydable (électrode supérieure), B- prise de connexion électrique sur l'électrode de disque, C- cylindre en téflon, D- Tamis en acier, E- piston en acier cylindrique perforé (électrode inférieure), F- prise de connexion électrique sur l'électrode cylindrique

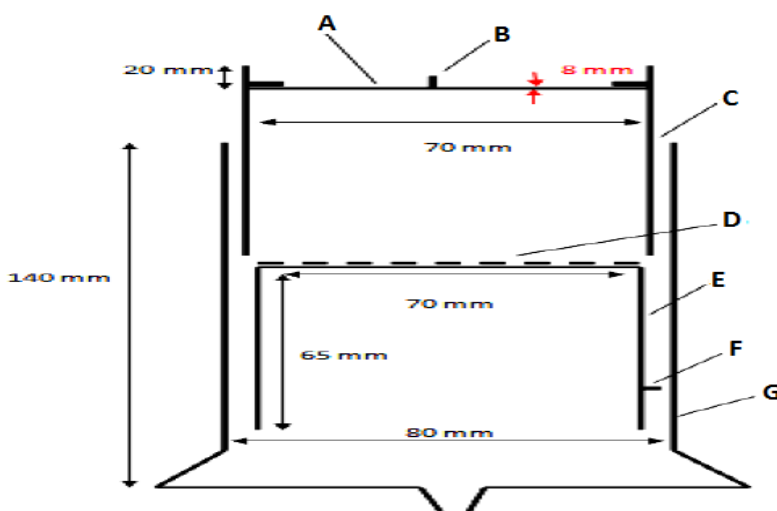


Fig.2.4. Schéma synoptique de la chambre d'extraction et de traitement

A-Disque en acier inoxydable (électrode supérieure), B- prise de connexion électrique sur l'électrode de disque, C- cylindre en téflon, D- Tamis en acier, E- piston en acier cylindrique perforé (électrode inférieure), F- prise de connexion électrique sur l'électrode cylindrique, G- récipient en plastique pour la collecte du jus extrait

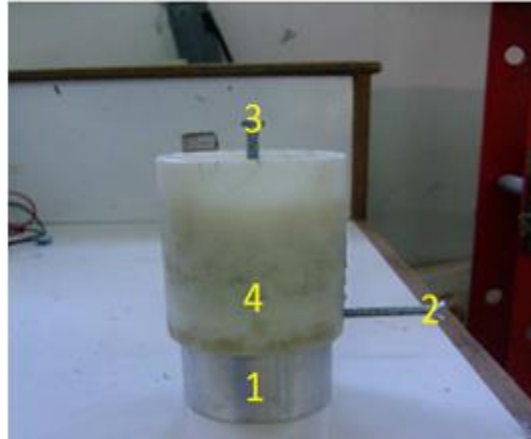


Fig.2.5. Chambre d'extraction et de traitement statique utilisée

1-Disque en acier inoxydable (électrode inférieure de masse), 2 - Prise de connexion électrique sur l'électrode de disque, 3- Prise de connexion électrique sur l'électrode HT, 4 - Cylindre en téflon

2.3.3 Extraction par pressage

L'extraction solide-liquide par pression est largement utilisée dans le domaine agroalimentaire. L'extraction par pressage mécanique est une opération unitaire qui vise la séparation solide-liquide sous l'effet des gradients de pression établis de part et d'autre du milieu d'extraction. Le liquide contenu dans les pores d'une matrice solide est alors expulsé par compression [46].

Une presse hydraulique (figure 2.6) a été utilisée dans ce travail. En effet, après que l'aliment soit placé dans la chambre d'extraction, une pression est exercée entre les deux électrodes supérieure et inférieure et permet ainsi l'extraction du jus.



Fig.2.6. Presse hydraulique utilisée

2.3.4. Procédure de mesure

Une fois le jus de betteraves extrait, deux paramètres sont mesurés : la masse en utilisant une balance électronique (Kern 440-47N) d'une résolution de 0.1g et portée 2000g et l'absorbance en bétanine en utilisant un spectrophotomètre (OPTIZEN 1412V). Ces deux appareils sont présentés dans la figure 2.7.



Fig.2.7. Balance électronique (a) et spectrophotomètre (b) utilisés

La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative et qualitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée, généralement en solution [67]. Plus l'échantillon est concentré, plus il absorbe la lumière dans les limites de proportionnalité énoncées par la loi de Beer-Lambert. A noter que l'absorbance n'a pas d'unité de mesure.

La densité optique des échantillons est déterminée par un spectrophotomètre. En se basant sur cette méthode, c'est l'absorbance en bétanine du jus de betterave, qui a été analysé. Dans ce cas, la longueur d'onde étant fixé à $\lambda = 537$ nm.

La bétanine (parfois *bétacyanine*) est un pigment de couleur rouge du groupe des *bétacyanines*, une sous-classe des *bétalaïnes*. La bétanine est le colorant majoritaire du jus de betterave (de 75 à 95 %).

2.4. Dispositif de traitement par CEP

On a vu dans le premier chapitre, qu'un système à CEP requiert un équipement conséquent.

Il se compose généralement d'une source de tension continue, un élément de stockage de l'énergie électrique (condensateur), un commutateur et une chambre de traitement ainsi que les appareils de mesures adéquats. Le banc expérimental ainsi que les différents appareils utilisés dans ce travail sont décrits ci-dessous.

2.4.1. Principe

Le dispositif expérimental qui a été réalisé au sein du laboratoire APELEC, est de type générateur à décharge de condensateur. En effet le principe est de charger un ou un ensemble de condensateurs avec une haute tension délivrée par une alimentation continue. Cette tension sera ensuite déchargée à travers un éclateur vers la chambre de traitement où se produisent les impulsions électriques. Un schéma simplifié ainsi qu'une photographie du banc expérimental utilisés sont respectivement présentés dans les figures 2.8 et 2.9.

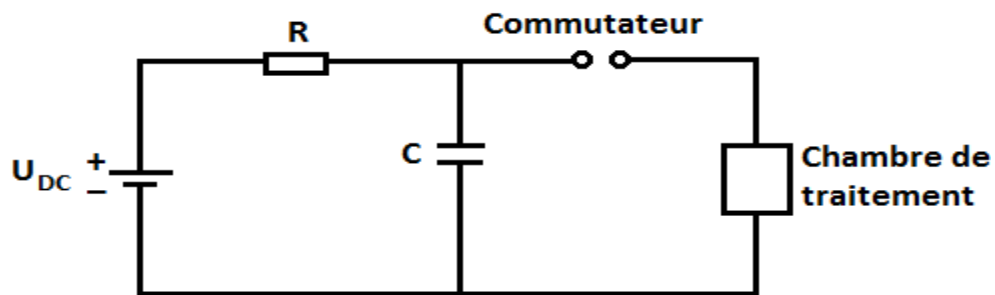


Fig.2.8. Schéma simplifié du banc expérimental

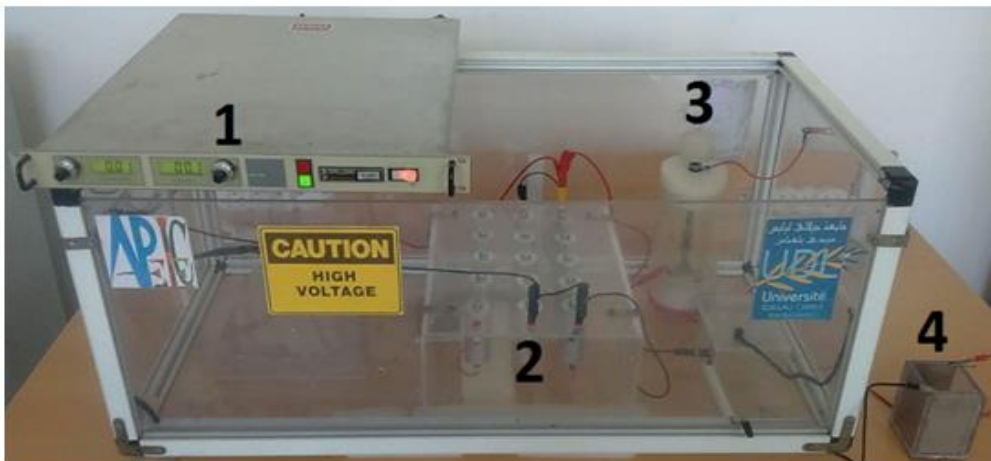


Fig.2.9. Banc expérimental utilisé

- 1- Alimentation de tension continue, 2- Élément de stockage (condensateurs), 3- Eclateur,
4- Chambre de traitement

2.4.2. Éléments constituant le banc expérimental

2.4.2.1. Alimentation haute tension continue

Il faut noter, que vu notre besoin d'une alimentation de haute tension continue qui peut générer de l'énergie électrique nécessaire pour charger les condensateurs, qu'on a eu recours à une alimentation de type (SpellmanSL300).

Elle peut délivrer des tensions pouvant aller jusqu'à 40kV avec un courant maximal de 7.5 mA.

2.4.2.2. Condensateurs

L'élément de stockage a pour rôle de stocker l'énergie électrique délivrée par l'alimentation continue. Cette étape est primordiale pour créer les impulsions. Et connaissant que dans la majorité des cas, le stockage est de type capacitif, qu'un ensemble de trois blocs de condensateurs ont été utilisés, constitué chacun de cinq condensateurs connectés en série comme le montre la figure 2.10. Diverses connexions peuvent se faire entre les trois blocs, ce qui permet d'avoir un large choix en termes de tension maximale supportée par l'élément de stockage et en termes de durée d'impulsion.

Sachant que des condensateurs de $2\mu\text{F}$ ont été utilisés, et que chaque condensateur peut supporter 2kV, la tension maximale pouvant être atteinte est de 10kV pour une valeur équivalente de capacité de $1.2\mu\text{F}$.

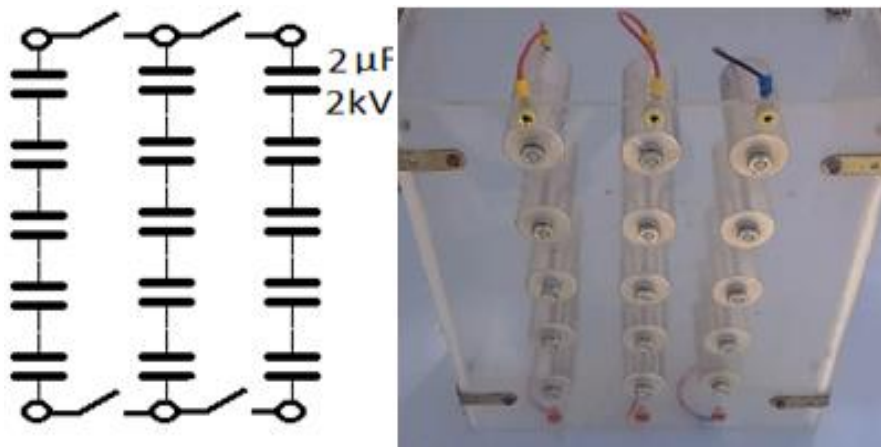


Fig.2.10. Elément de stockage (condensateurs) utilisé

2.4.2.3. Commutateur

On a vu dans le premier chapitre, qu'il existe plusieurs types de commutateur, celui qu'on a utilisé dans notre dispositif est un commutateur à éclateurs.

Les éclateurs sont constitués de deux électrodes face à face dans un milieu qui peut être l'air ambiant (éclateur à air), de l'air mais dans un milieu clos (à air encapsulé) ou du gaz (éclateurs à gaz).

Au-delà d'une certaine valeur de tension entre les bornes, donc d'un certain champ électrique entre les électrodes, un amorçage se produit et un courant s'établit entre les deux électrodes en formant un arc électrique à travers le gaz qui sépare les électrodes. En général une des électrodes est reliée à une haute tension, et l'autre à

la terre. Après amorçage, les deux électrodes se trouvent donc pratiquement au même potentiel.

Au cours de la réalisation de générateur de CEP, nous avons utilisé un éclateur constitué de deux sphères en acier de diamètre 28 mm. Ce type d'éclateurs peuvent décharger des tensions allant jusqu' au 100 kV et aussi supporter des courants très élevés de l'ordre de plusieurs dizaines d'ampères. Ils se limitent à des taux de répétition compris entre 1 Hz et 100 Hz, ce qui représente une fréquence faible mais suffisante pour les expériences réalisées dans le laboratoire (figure 2.11).



Fig.2.11. Eclateur pour le déchargement des condensateurs

- 1- Electrode HT, 2- Electrode de masse, 3- Connexion de l'électrode à la masse, 4- Support pour le réglage de distance inter-électrode

La tension de traitement appliquée à la chambre de traitement dépend de la distance entre les deux sphères de l'éclateur (distance inter-électrodes).

La tension de claquage pour ce diamètre peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$V_0 = 5,85 d_{sph}^{0,75} \quad (2.1)$$

Où :

d_{sph} : Distance entre les sphères (mm),

V_0 : Tension de claquage, qui est la tension appliquée à la chambre de traitement.

2.4.2.4. Chambres de traitement

Deux chambres de traitement statiques ont été utilisées dans ce travail, leur configurations ainsi que les résultats obtenus seront présentés dans les chapitres 3 et 4.

2.4.3. Forme et durée des impulsions

La figure 2.12 représente la courbe de la tension aux bornes d'un condensateur qui se charge à travers une résistance (courbe de charge) ou qui se décharge dans une résistance (courbe Décharge).

On voit que la courbe de décharge est rigoureusement symétrique à la courbe de charge par rapport à un axe de symétrie horizontal passant par la valeur 50%. A chaque combinaison RC (résistance R et condensateur C) correspond une seule courbe de charge et de décharge. Autrement dit le temps nécessaire pour que, lors de la charge, la tension aux bornes du condensateur atteigne 50% de sa valeur maximum est déterminé par la valeur de R et de C et ce temps est identique lors de la décharge pour que la tension aux bornes du condensateur diminue de 50%.

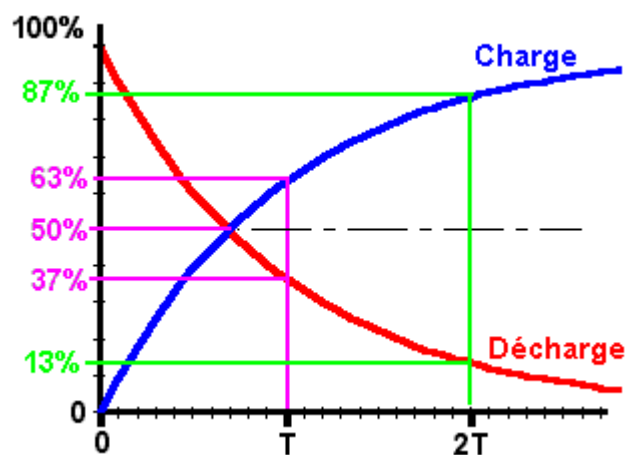


Fig.2.12. Courbes de charge et de décharge d'un condensateur

En pratique on considère non pas une tension de niveau égale à 50% de la tension maximale mais égale à 63% de la tension maximale lors de la charge et 37% de la tension maximale lors de la décharge.

Le temps nécessaire pour atteindre 63% de la tension maximale lors de la charge et 37% de la tension maximale lors de la décharge est appelé τ "constante de temps". La formule permettant de calculer cette constante de temps est la suivante (Avec T exprimé en secondes, R en ohms et C en farads) :

$$T = R \times C \quad (2.2)$$

Pour la décharge du condensateur C dans une résistance de valeur R, la tension aura chuté à 37% de sa valeur initiale au bout d'un délai égal à la constante de temps (voir courbe ci-dessus).

Au bout d'un temps égal à 5T on considère que le condensateur est complètement chargé (ou déchargé) puisque la tension à ses bornes dépasse 99% (ou est inférieure à 1%).

Vu que le banc expérimental utilisé repose sur le principe de charge et décharge de condensateurs, l'impulsion générée est donc de forme exponentielle décroissante.

Comme mentionné précédemment plusieurs connexions sont possibles entre les trois blocs de condensateurs. Ainsi, La durée d'impulsion peut être contrôlée en modifiant la valeur de la capacité équivalente.

Les figures 2.13.a et 2.13.b présentent des oscillogrammes de deux durées d'impulsions obtenus à partir de deux valeurs de capacité différentes.

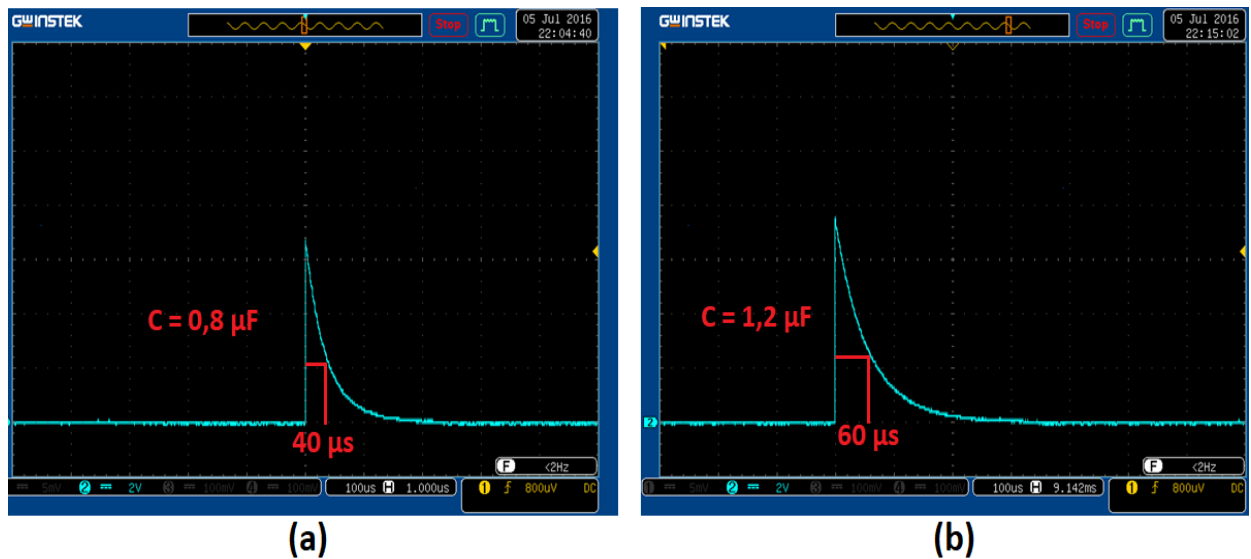


Fig.2.13. Oscillogrammes de deux impulsions obtenues à partir de deux valeurs de capacité différentes

a) $\Delta t = 40 \mu s$ pour $C = 0,8 \mu F$ b) $\Delta t = 60 \mu s$ pour $C = 1,2 \mu F$

Le tableau 2.3 présente un récapitulatif des durées d'impulsions obtenues pour les différentes valeurs de capacités.

Tableau.2.3. Durée d'impulsion en fonction de la capacité

C (μF)	0.2	0.4	0.5	0.8	1.2
T (μs)	8	20	24	40	60

2.5. Méthodologie des plans d'expériences

2.5.1. Principe

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type : $y = f(x_i)$.

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées [68].

2.5.2. Notions de base

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs [69].

L'étude d'un processus peut donc, le plus souvent, être schématisée de la manière suivante (figure 2.14) :

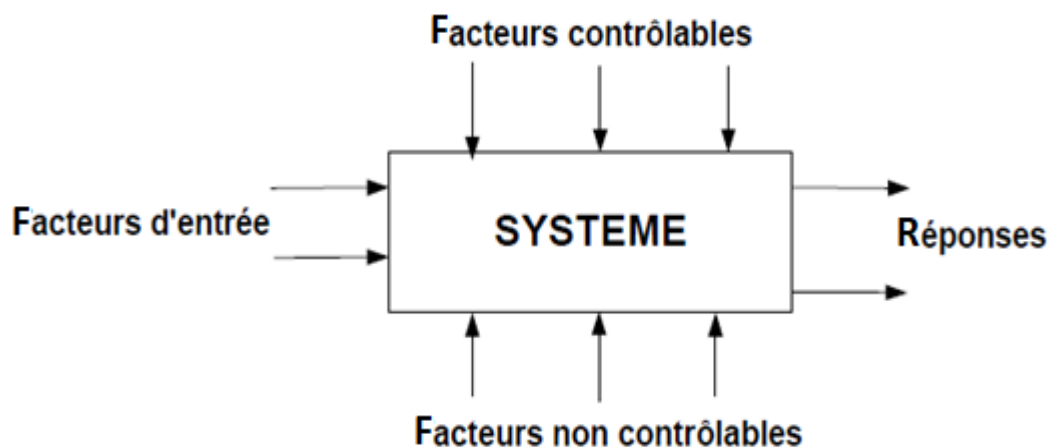


Fig.2.14.Représentation schématique d'un processus

2.5.2.1. Réponse et facteur

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs [68].

2.5.2.2. Domaine de variation d'un facteur

La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur ou encore le domaine d'étude. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$ comme illustré dans la figure 2.15 [68].

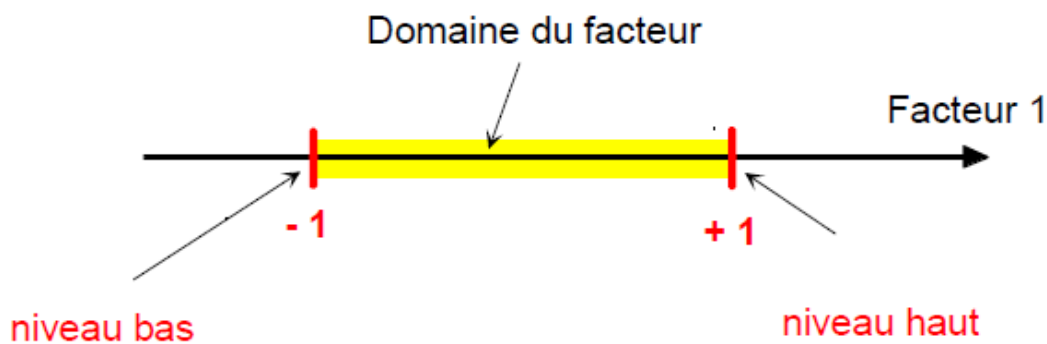


Fig.2.15. Domaine de variation du facteur

2.5.2.3. Variable centrée réduite

Dans la méthode des Plans d'Expériences, des variables mathématiques sont mises en correspondance avec des grandeurs physiques (électriques, physiques, thermiques...) supposées intervenir dans le problème.

D'une manière générale, une modification aux niveaux des unités de mesure, la valeur -1 pour le niveau bas et $+1$ pour le niveau haut donc un changement d'origine qui permet de traiter tous les facteurs de la même manière. Ces modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variable centrée réduite ; « Centrées » pour indiquer le changement d'origine et « réduites » pour signaler la nouvelle unité [70].

Le passage des variables d'origine x , aux variables centrées réduites, x^* est donné par la relation suivante :

$$x^* = \frac{x - x_c}{pas} \quad (2.3)$$

Où:

x^* : est la variable centrée réduite;

x : est la variable exprimée en unités courantes ;

x_c : valeur centrée en unités courantes;

pas : est la variation entre la valeur centrale et une extrémité du domaine.

2.5.2.4. Interactions

Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrée. On parle d'interaction entre deux facteurs A et B quand l'effet du facteur A sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur B [69].

2.5.3. Plans factoriels complets

Il s'agit de plans pour lesquels on étudie k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le modèle mathématique adopté a priori est un polynôme prenant en compte la moyenne, les effets de chaque facteur et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, ..., k à k [62, 70].

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (2.4)$$

Un plan 2^k comporte 2^k points expérimentaux qui se situent aux 2^k sommets d'un hyper cube de k dimensions. Le modèle mathématique contient 2^k coefficients qui sont les inconnues.

L'ensemble des résultats d'un plan 2^k conduit donc à un système de 2^k équations à 2^k inconnues, si l'on ne tient pas compte des erreurs expérimentales [62, 70]. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle : $y = Xa$

Avec :

Y : vecteur ayant pour composantes les réponses de chaque essai, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$),

a : vecteur ayant pour composantes la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions, et représenté par une matrice colonne ($2^k, 1$) ; ces composantes sont les inconnues que l'on cherche à déterminer,

X : matrice carrée ($2^k, 2^k$) composée de -1 et $+1$ suivant les valeurs des niveaux x_i .

2.5.4. Plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse

Les plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses sont apparus dans la seconde moitié du XXème siècle. Leur construction permet de minimiser les

incertitudes affectant les prédictions d'une réponse au sein d'un domaine expérimental.

Le nombre d'essais d'un plan d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse croît rapidement en fonction du nombre de facteurs. Pour qu'un plan d'expériences constitue une stratégie efficace et économique, il convient donc de limiter le nombre de facteurs mise en œuvre. Ce constat conduit fréquemment à fixer à un niveau constant un nombre important de paramètres de réglage. Ce choix ne doit en aucun cas être fait au hasard. C'est pourquoi, les plans pour l'étude des surfaces de réponse succèdent généralement à une étape de criblage des facteurs, pour laquelle le recours à un dispositif expérimental est nécessaire [70].

2.5.4.1. Modèle polynomial du second degré

Dans ce cas, on ajoute un terme carré au modèle mathématique:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (2.5)$$

Dans le cas d'un plan à deux facteurs, la formule est la suivante :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 \quad (2.6)$$

Il y a donc six inconnues à déterminer.

Le plan d'expériences fournit un certain nombre de valeurs de la réponse y . L'interprétation du plan consiste donc à trouver les coefficients et, par la suite, résoudre un système de n équations (s'il y a n réponses) et p inconnues (s'il y a p coefficients) [70].

2.5.4.2. Plan composite à faces centrées

Le plan composite centré (Central Composite Design) fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Dans ce contexte, il s'agit sûrement des dispositifs expérimentaux les plus répandus dans la littérature anglo-saxonne. Leur usage est particulièrement destiné aux problèmes d'optimisation, quand la stratégie expérimentale conduit à construire et interpréter un modèle empirique, pour la recherche d'une solution dans le domaine expérimental [62, 70].

La construction d'un plan composite centré proposée par George E. Box et K.B. Wilson peut se décomposer en trois parties :

- Les $2k$ sommets du domaine sont définis à partir d'un plan factoriel à deux niveaux par facteur analogue à ceux que nous avons précédemment décrits;
- Les points en étoile positionnés à une distance $\pm a$ du centre du domaine suivant les axes des facteurs (figure 2.16) sont destinés à l'estimation des termes carrés présents dans le modèle mathématique. L'ensemble des points en étoile

constitue un dispositif au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc $2k$ points en étoile.

- On effectue enfin n_0 répétitions au centre du domaine. Le nombre de répétitions au point central dans les plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponse est généralement trois points [62, 70].

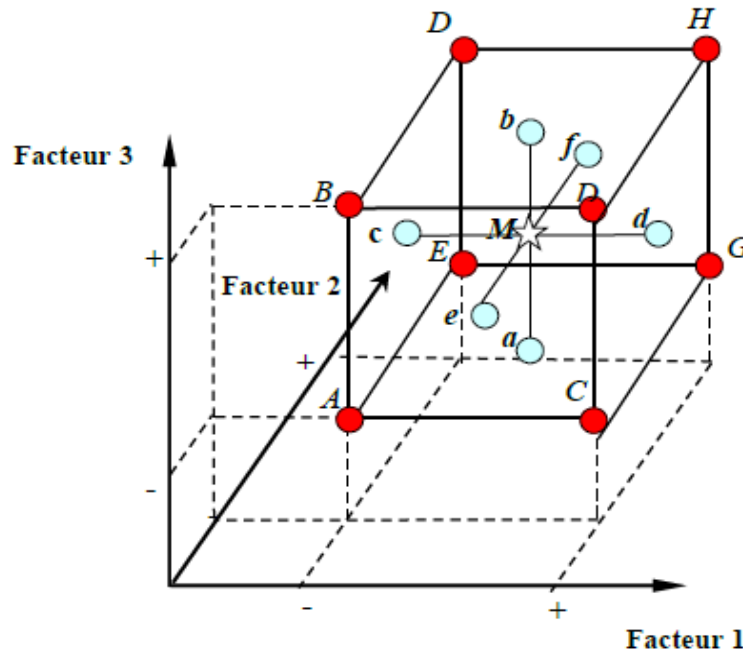


Fig.2.16. Disposition des expériences dans un plan composite centré

Le nombre total d'essais n à réaliser est la somme ; des essais du plan factoriel, soit n_f , et des essais du plan en étoile, soit n_a et des essais au centre, soit n_0 . Le nombre N des essais d'un plan composite est donné donc par la relation suivante:

$$N = n_f + n_a + n_0 \quad (2.7)$$

Lorsque le domaine expérimental est défini à partir des variations de k facteurs, le nombre de traitements expérimentaux proposés par un plan composite centré est donc égal à :

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (2.8)$$

Avec

2^k : nombre d'essais correspondant au plan factoriel ;

$2k$: nombre d'essais du plan en étoile ;

n_0 : nombre d'essais au centre.

2.5.5. Logiciels des plans d'expérience

La plupart des logiciels qui traitent des plans d'expériences sont inclus dans des logiciels de statistiques. Les premiers logiciels de plans d'expériences étaient très pauvres et mal adaptés aux besoins des expérimentateurs. Depuis peu, un effort considérable a été entrepris par les informaticiens et les statisticiens pour que ces logiciels répondent mieux à l'esprit et aux besoins des expérimentateurs. Cette introduction s'est faite petit à petit sous la pression de la demande [71].

Ces logiciels sont encore très marqués par leur origine statistique et peuvent rebuter certains utilisateurs. Mais l'on constate un progrès constant vers l'amélioration, c'est-à-dire vers une meilleure prise en compte des exigences des expérimentateurs. Néanmoins, ces logiciels nécessitent tous une bonne connaissance de la méthode des plans d'expériences et ne peuvent pas être utilisés sans une formation solide aux plans d'expériences [71].

Ces logiciels comportent, en général, les chapitres suivants :

- Construction des plans d'expériences : Plans factoriels complets, plans factoriels fractionnaires, plans à plus de deux niveaux (surfaces de réponse), plans de mélanges, plans D-optimaux ;
- Interprétation et analyse : Calcul des effets, des interactions, des coefficients du modèle mathématique, modélisation, calcul des réponses prédites, analyse des résidus ;
- Représentations graphiques : Diagramme des effets, diagramme des interactions, diagramme des résidus, diagramme de Daniel, courbes iso réponses en 2-D ou 3-D ;
- Aide : Tutorial, aide en ligne, possibilité d'importer et d'exporter des fichiers de données dans différents formats, parfois hotline.

Parmi ces logiciels on cite le logiciel MODDE de la société Umetrics, qui est un logiciel spécialisé pour la construction et l'analyse de plans d'expériences. Il permet de bâtir et d'analyser des plans de criblage, en surface de réponse, Taguchi, de mélanges, D-optimaux, des plans multi variés « Onion Designs » ainsi que des plans comportant à la fois des composants et des facteurs de procédés. Pour estimer les modèles, il utilise soit la méthode des moindres carrés usuelle (MLR) soit la méthode des moindres carrés partiels (PLS). Cela permet notamment d'ajuster un modèle reliant les variations de toutes les réponses aux facteurs en prenant en compte la structure de covariances [71].

2.6. Conclusion

On a, dans ce chapitre, décrit le matériel ainsi que les méthodes utilisées pour la réalisation des différents travaux expérimentaux, qui seront abordés lors de cette thèse.

L'extraction des jus par pressage a été combinée avec un traitement par champ électrique pulsé. Ainsi pour l'extraction une presse hydraulique et une chambre d'extraction réalisée au sein du laboratoire APELEC ont été utilisés. Le dispositif expérimental utilisé pour générer les impulsions a été présenté dans ce chapitre, il se compose d'une alimentation de haute tension continue, d'un ensemble de condensateurs, d'un éclateur et de chambre de traitement. L'impulsion de sortie est de type exponentiel décroissant pouvant atteindre une tension maximale de 10kV.

Enfin, puisque nous avons aussi utilisé la méthodologie des plans d'expériences pour une meilleure organisation et interprétations des résultats, une description des principes et les notions de base de cette méthodologie était nécessaire. C'est dans cette optique que le logiciel MODDE 5.0 a été utilisé.

Chapitre 3

Analyse Expérimentale d'une Nouvelle Chambre de Traitement à 4 Electrodes

Chapitre 3 : Analyse Expérimentale d'une Nouvelle Chambre de Traitement à 4 Electrodes

3.1. Introduction

La chambre de traitement représente un élément fondamental du système de traitement par CEP puisque le produit alimentaire est placé à l'intérieur de celle-ci, où deux électrodes sont connectées avec un matériau non conducteur pour éviter l'écoulement électrique de l'une à l'autre. On peut rencontrer deux grands types de chambre : statique et dynamique. Les chambres statiques, où seul un volume donné peut être traité à la fois, ne concernent que les applications expérimentales. Les chambres dynamiques permettent un traitement en continu, en accord avec les exigences d'une application industrielle. Actuellement, trois types de chambre prédominent : les chambres à plaques parallèles, les chambres coaxiales et les chambres "co-field".

La chambre de traitement à plaques parallèles se compose de deux électrodes en forme de plaques en tôle d'acier inoxydable et d'un isolant, elle permet l'uniformité du champ électrique et donc un traitement homogène.

La chambre "co-field" dispose de deux tubes en acier inoxydable séparés par un isolant, elle offre de meilleures caractéristiques de dynamique des fluides.

La chambre coaxiale est essentiellement composée d'un cylindre intérieur entouré d'une électrode cylindrique annulaire externe qui permet à l'aliment de circuler entre elles. Bien que les chambres de traitement coaxial soient plus simples, leur section transversale permet de réduire l'écoulement des aliments et, comme certains aliments contiennent des particules solides, cela peut entraîner un blocage du flux.

L'objectif du présent travail est la conception et la réalisation d'une nouvelle chambre de traitement comprenant 4 électrodes.

Une étude comparative est effectuée avec la chambre comprenant seulement 2 électrodes et ce en utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

3.2. Chambres de traitement 1D et 2D

Deux chambres de traitements de forme carrées parallélépipède en plexiglas ont été réalisées.

La première chambre a été conçue de telle sorte que le champ électrique soit appliqué dans un seul sens (appelée chambre 1D) en utilisant des électrodes parallèles et opposées en acier inoxydable (figure 3.1.a). Tandis que la deuxième chambre a été conçue pour que le champ électrique soit appliqué suivant deux directions (appelée chambre 2D).

Ainsi, quatre plaques ont été utilisées dans ce cas, chaque paire de plaques métalliques adjacentes forme une électrode (figure 3.1.b).

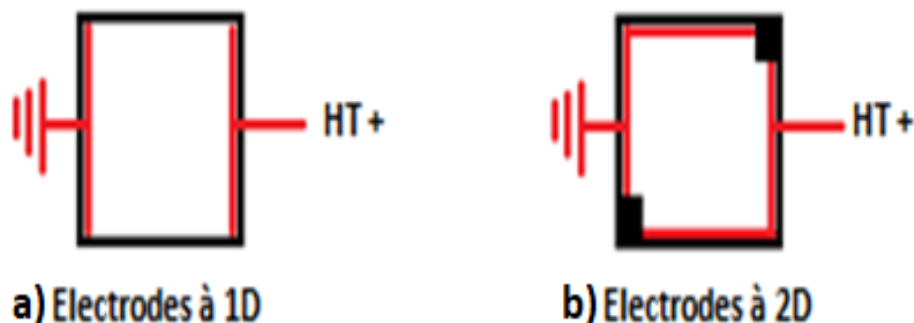


Fig.3.1.Représentation schématique des deux chambres 1D et 2D

Les deux chambres de traitement réalisées ont des dimensions identiques 6x6x10 cm³. Pour la chambre 1D une plaque métallique de dimensions 6x10 cm² a été utilisée, tandis que pour la chambre 2D deux plaques métalliques (formant une électrode en forme de L) de dimensions 6x10 cm² et 4,5x10 cm² ont été utilisées. Le volume des deux chambres de traitement est de 192,3 ml.

La figure3.2 représente les deux chambres de traitement 1D et 2D réalisées, avec les dimensions utilisées.

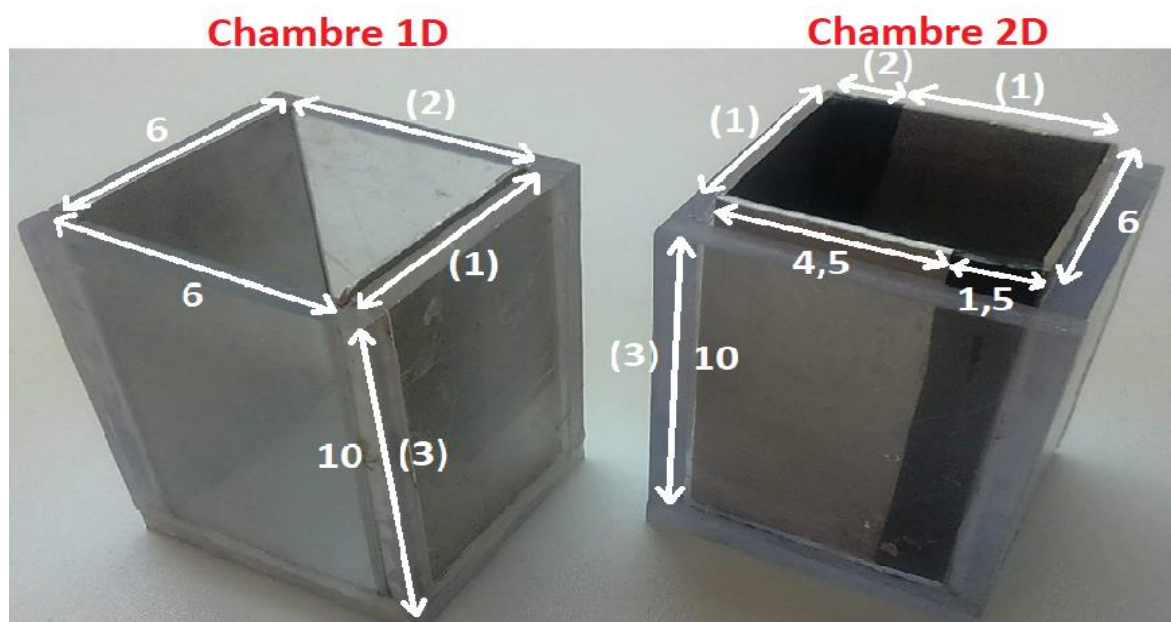


Fig.3.2.Dimensions des chambres de traitement 1D et 2D (en cm)

1- Electrodes 2- Isolant 3- Plexiglas

3.3. Modélisation expérimentale des chambres 1D et 2D

L'objectif de l'optimisation et modélisation est de fournir une estimation du modèle mathématique de l'extraction de jus traité par CEP en fonction de différents paramètres de

traitement afin de déterminer la meilleure configuration, qui permet d'obtenir le meilleur rendement en termes de quantité du jus de betterave extrait.

3.3.1. Etude paramétrique "un facteur à la fois"

Le procédé d'extraction du jus de betterave décrit dans le chapitre précédent est utilisé afin d'évaluer le rendement des chambres de traitement 1D et 2D.

La méthodologie des plans d'expériences a été utilisée dans ce travail pour une meilleure organisation des expériences, et pour tirer le maximum d'informations à partir des résultats obtenus. Ainsi, la première étape est une étude paramétrique qui consiste à faire des expériences préliminaires afin de définir l'intervalle d'étude des différents facteurs.

Toutes les expériences ont été réalisées en maintenant certains facteurs constants pour toute l'étude:

- Fréquence de répétition d'impulsion $f = 1$ Hz
- Pression d'extraction constante $P = 50$ kg/cm²
- Durée totale de la pression mécanique $\Delta t = 300$ s
- Intervalle inter-électrodes de la chambre de traitement $D = 6$ cm

Les facteurs variables sont :

- Tension appliquée V (kV)
- Nombre d'impulsions n
- Durée d'impulsion T (μ s)

Afin de définir l'intervalle d'étude de ces trois facteurs, une série d'expériences et d'essais préliminaire ont été effectués et sont présentés dans la section ci-dessous.

3.3.1.1. Analyse de l'influence de la tension appliquée

En plus des facteurs qui seront constants durant ce travail (Fréquence, pression... etc.), l'étude consiste à fixer deux paramètres variables, à savoir le nombre d'impulsions et la durée d'impulsion et faire varier la tension appliquée afin de voir son influence sur le rendement du procédé d'extraction du jus de betterave.

A noter que l'influence de la tension est la même que celle de l'intensité du champ électrique puisque l'un est proportionnel à l'autre :

$$V = E \times D \quad (3.1)$$

Où :

V : tension appliquée (kV)

D : distance inter-électrodes (cm)

E : intensité du champ électrique (kV/cm)

La figure 3.3 présente la variation de la masse du jus en fonction de la tension appliquée pour les deux chambres 1D et 2D.

On peut clairement constater que le rendement en termes de masse de jus pour la chambre 1D est proportionnel à la tension appliquée, en effet la masse augmente avec l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre sa valeur maximale à 7kV, un effet inverse est toutefois signalé à 8kV.

Les mêmes remarques sont constatées pour la chambre 2D, à savoir que le rendement en termes de masse de jus est proportionnel à la tension appliquée. En effet, il atteint sa valeur maximale à 4kV, l'effet inverse se produit à 5kV.

Aussi, il est clair d'après les deux graphes que le rendement en termes de masse de jus est supérieur pour la chambre 2D.

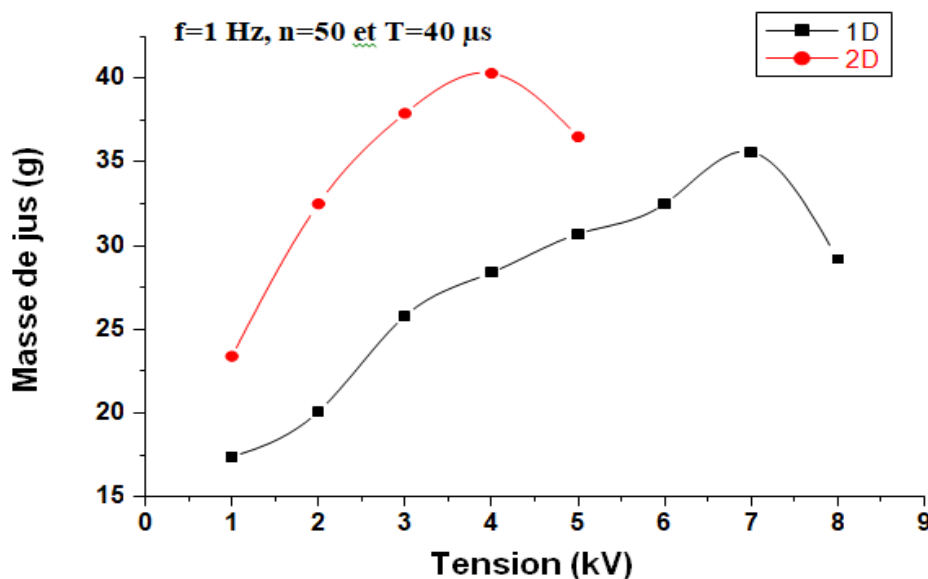


Fig.3.3.Variation de la masse du jus en fonction de la tension (1D et 2D)

La figure 3.4 présente la variation de l'absorbance en fonction de la tension appliquée pour les chambres 1D et 2D. Encore, il faut le préciser que dans le cas de la chambre 2D, on s'est limité à une valeur de tension ne dépassant pas les 5 kV, ceci dans le but d'éviter tous risques de claquages.

L'absorbance est aussi proportionnelle à la tension appliquée. Puisque, on peut facilement remarquer que pour la chambre 1D, elle avait tendance à augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale à 6 kV, mais que l'effet inverse se produit, lorsqu'on dépasse les 7 kV. De même que pour la chambre 2D, où elle atteint une valeur maximale de 4kV, alors que l'effet inverse se produit au-delà 5kV. Enfin, Comme c'est le cas pour la masse du jus, un meilleur rendement en absorbance a été obtenu avec la chambre 2D pour les valeurs de tensions inférieures ou égales à 4 kV.

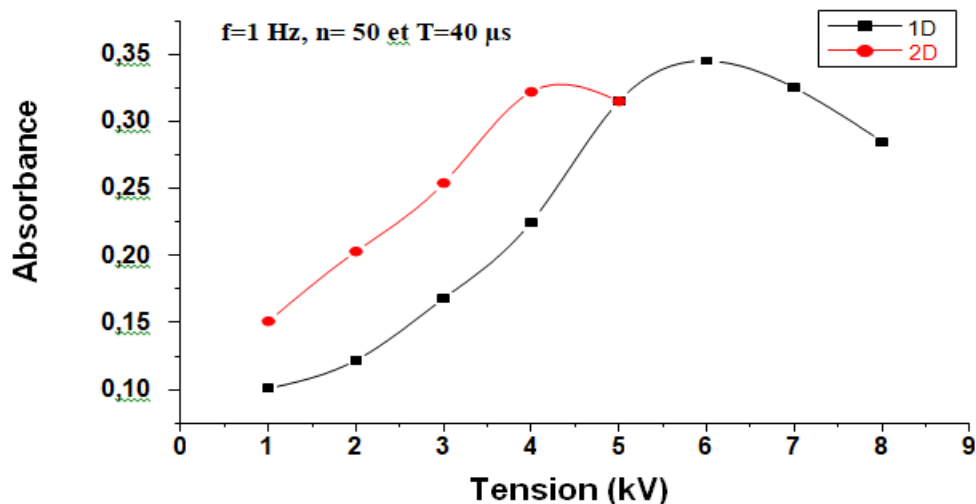


Fig.3.4. Variation de l'absorbance en fonction de la tension (1D et 2D)

3.3.1.2. Analyse de l'influence du nombre d'impulsions

Suivant le même principe, l'analyse de l'influence du nombre d'impulsions a été faite en variant tout en gardant la tension appliquée ainsi que la durée d'impulsion fixes.

La figure 3.5 représente la variation de la masse du jus en fonction du nombre d'impulsions pour les chambres 1D et 2D. On remarque que la masse du jus est proportionnelle au nombre d'impulsions. En effet, le rendement augmente petit à petit jusqu'à atteindre une valeur maximale avec $n=100$ pour la chambre 1D alors que pour la chambre 2D, il l'atteint pour $n=80$.

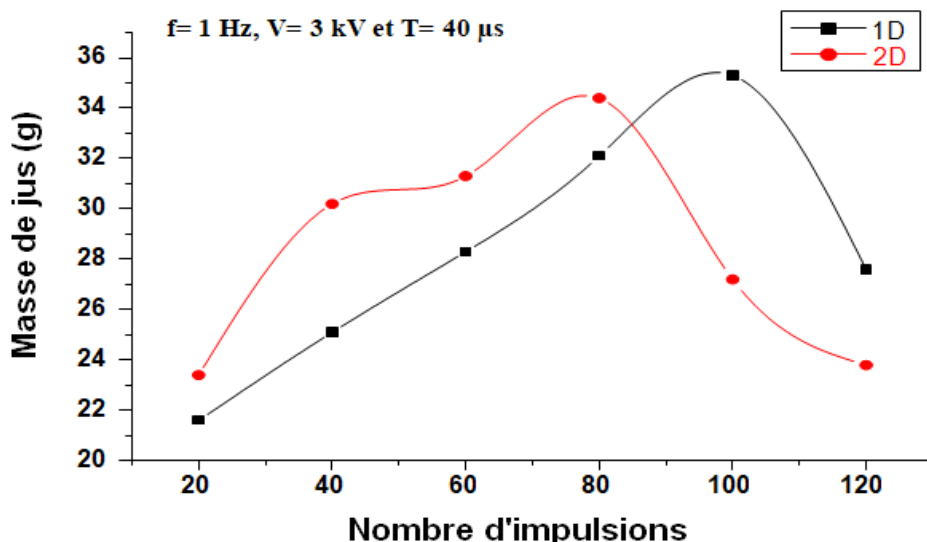


Fig.3.5. Variation de la masse du jus en fonction du nombre d'impulsions (1D et 2D)

Les courbes de la figure 3.6 qui présente la variation de l'absorbance en bétanine en fonction du nombre d'impulsions pour les chambre 1D et 2D, montrent bel et bien que

l'absorbance est proportionnelle au nombre d'impulsions. En effet, sa valeur augmente progressivement avec l'augmentation du nombre d'impulsions. Les valeurs maximales sont toutefois obtenues avec $n=100$ pour la chambre 1D et avec $n=80$ pour la chambre 2D.

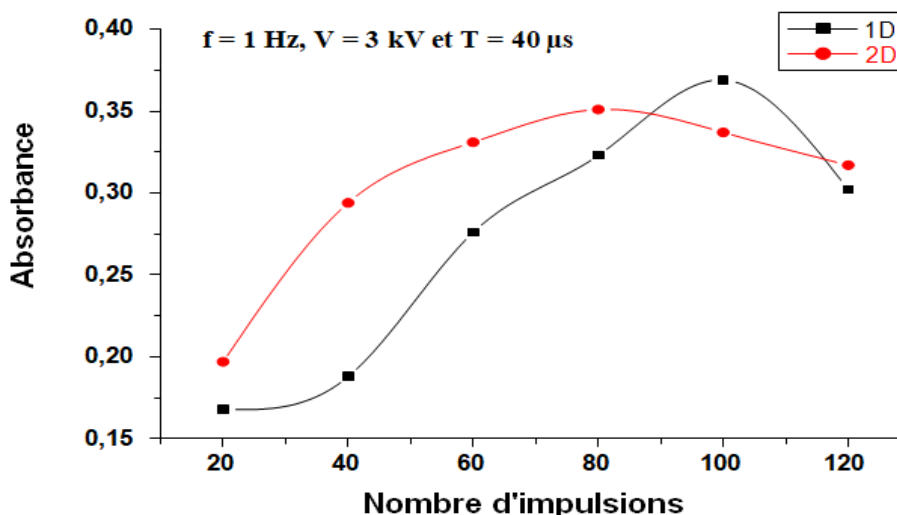


Fig.3.6. Variation de l'absorbance en fonction du nombre d'impulsions (1D et 2D)

3.3.1.3. Analyse de l'influence de la durée d'impulsion

Il est utile dans ce cas de préciser que les deux paramètres qu'on considère fixes sont celui de la tension appliquée ainsi que le nombre d'impulsions. Ainsi, la variation de la durée de l'impulsion nous permettra d'analyser l'influence de ce facteur sur le rendement du procédé d'extraction.

Des durées comprises entre 8 et $60\mu s$ ont été utilisées selon les valeurs des condensateurs disponibles. Toutefois, en ce qui concerne la chambre 2D, on s'est limité à une durée d'impulsion maximale de $40\mu s$. Car, on a malheureusement remarqué qu'un claquage se produit pour $T=60\mu s$.

Les figures 3.7 et 3.8 Montrent respectivement, la variation de la masse du jus et de l'absorbance respectivement en fonction de la durée d'impulsions pour les configurations 1D et 2D.

On remarque que la variation de la masse du jus en fonction de la durée d'impulsion est linéaire pour la chambre 1D. En effet le rendement maximal est atteint avec la plus grande durée d'impulsion $T=60\mu s$. Par contre, le rendement en termes de masse de jus pour la chambre 2D augmente jusqu'à $T=20\mu s$. Puis, il commence à diminuer à partir de $T=30\mu s$. Toutefois les masses de jus obtenues avec la chambre 2D sont encore une fois supérieures par rapport à celles obtenues avec la chambre 1D.

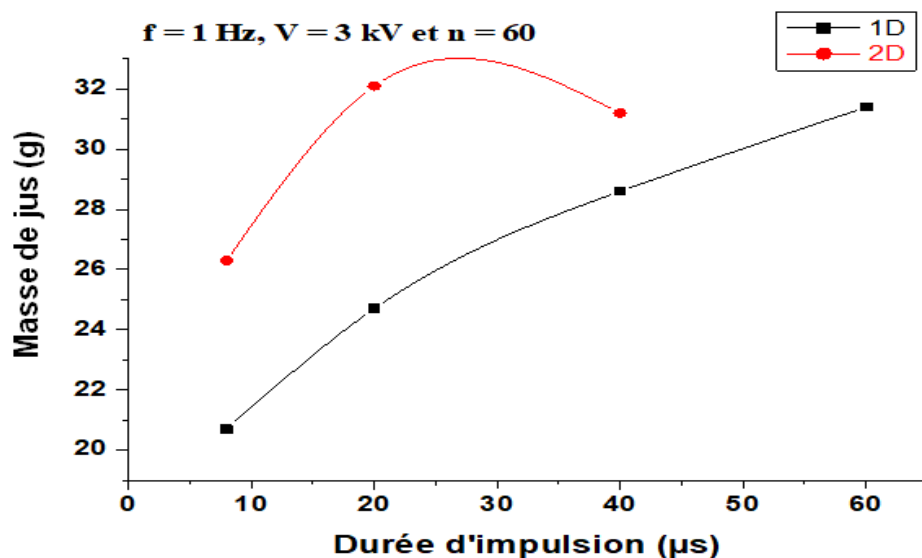


Fig.3.7. La variation de la masse du jus en fonction de la durée d'impulsions (1D et 2D)

Les courbes obtenues pour l'absorbance sont pratiquement identiques à celles de la masse du jus. On remarque que l'absorbance augmente proportionnellement avec la durée d'impulsions et comme pour la masse du jus, le rendement maximal en termes d'absorbance pour la chambre 1D est atteint avec la plus grande durée d'impulsion $T = 60 \mu s$.

Pour la chambre 2D, l'absorbance augmente pour $T = 20 \mu s$ par rapport à $T = 8 \mu s$. Cependant, on peut facilement remarquer que le rendement baisse pour $T = 40 \mu s$.

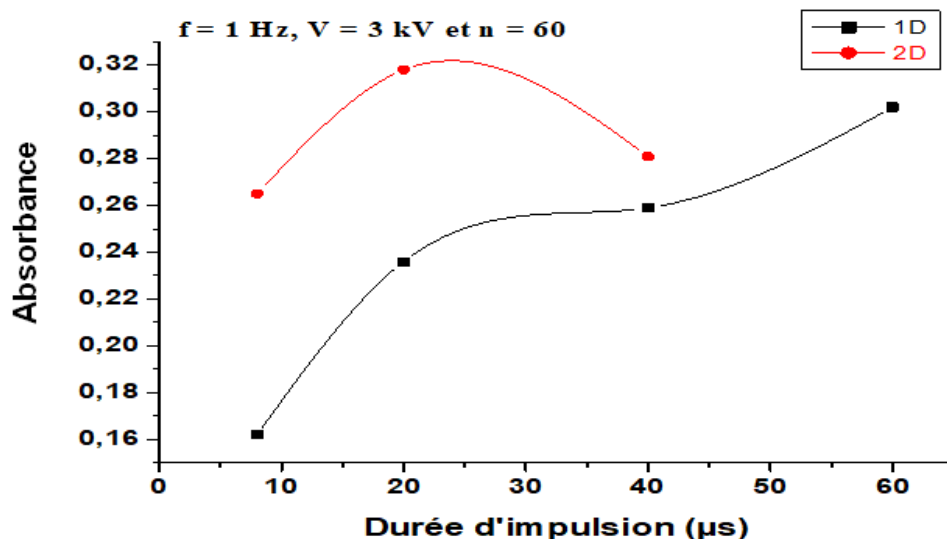


Fig.3.8. La variation de l'absorbance en fonction de la durée d'impulsions (1D et 2D)

3.3.1.4. Choix des intervalles d'étude

Le plan expérimental factoriel fractionnaire a été réalisé pour identifier le point optimal (V_0 , n_0 et T_0); les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies pour chacune des trois variables d'entrée (V_{min} , V_{max}), (n_{min} , n_{max}) et (T_{min} , T_{max}).

Ainsi, et dans le but d'identifier le domaine de variation des trois facteurs pour les chambres 1D et 2D, des expériences "un facteur à la fois" ont été effectuées. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau 3.1.

Tableau.3.1. Domaine de variation des trois facteurs pour les chambres 1D et 2D

Facteurs variables	Tension (kV)		Nombre d'impulsions		Durée d'impulsions (µs)	
	V _{min}	V _{max}	n _{min}	n _{max}	T _{min}	T _{max}
1D	6	8	80	120	20	60
2D	3	5	60	100	8	40

Les points centraux (V_C, n_C et T_C) des expériences préliminaires que nous avons effectuées, sont calculés comme suit:

- Chambre 1D :

$$V_C = (V_{max} + V_{min})/2 = (6 + 8)/2 = 7 \text{ kV} \tag{3.2}$$

$$n_C = (n_{max} + n_{min})/2 = (80 + 120)/2 = 100 \tag{3.3}$$

$$T_C = \frac{T_{max}+T_{min}}{2} = \frac{20+60}{2} = 40 \text{ µs} \tag{3.4}$$

- Chambre 2D :

$$V_C = (V_{max} + V_{min})/2 = (3 + 5)/2 = 4 \text{ kV} \tag{3.5}$$

$$n_C = (n_{max} + n_{min})/2 = (60 + 100)/2 = 80 \tag{3.6}$$

$$T_C = \frac{T_{max}+T_{min}}{2} = \frac{8+40}{2} = 24 \text{ µs} \tag{3.7}$$

3.3.2. Résultats et discussions

3.3.2.1. Chambre 1D

Les résultats du plan CCF sont donnés dans le tableau3.2.

Tableau.3.2. Résultats du plan CCF pour la chambre 1D

Exp N°	Facteurs d'entrée			Sorties		
	V (kV)	N	T (µs)	m (g)	Abs	W (J)
01	6	80	20	21,3	0,317	576
02	8	80	20	29,3	0,384	1024
03	6	120	20	24,7	0,364	864
04	8	120	20	30,3	0,395	1536
05	6	80	60	27,4	0,389	1728
06	8	80	60	32,7	0,457	3072
07	6	120	60	28,5	0,377	2592
08	8	120	60	32,8	0,383	4608
09	6	100	40	25,2	0,386	1440
10	8	100	40	32,8	0,415	2560
11	7	80	40	31,3	0,371	1568
12	7	120	40	31,4	0,373	2352
13	7	100	20	26,6	0,355	980
14	7	100	60	29,9	0,388	2940
15	7	100	40	30,5	0,385	1960
16	7	100	40	30,5	0,382	1960
17	7	100	40	30,5	0,384	1960

D'après la figure 3.9, on peut d'ores et déjà remarquer que la qualité prédictive du modèle est satisfaisante puisque les valeurs de coefficient Q^2 et R^2 présentées dans la figure 3.9 sont proches de 100%. Ceci conduit à la validation mathématique des modèles.

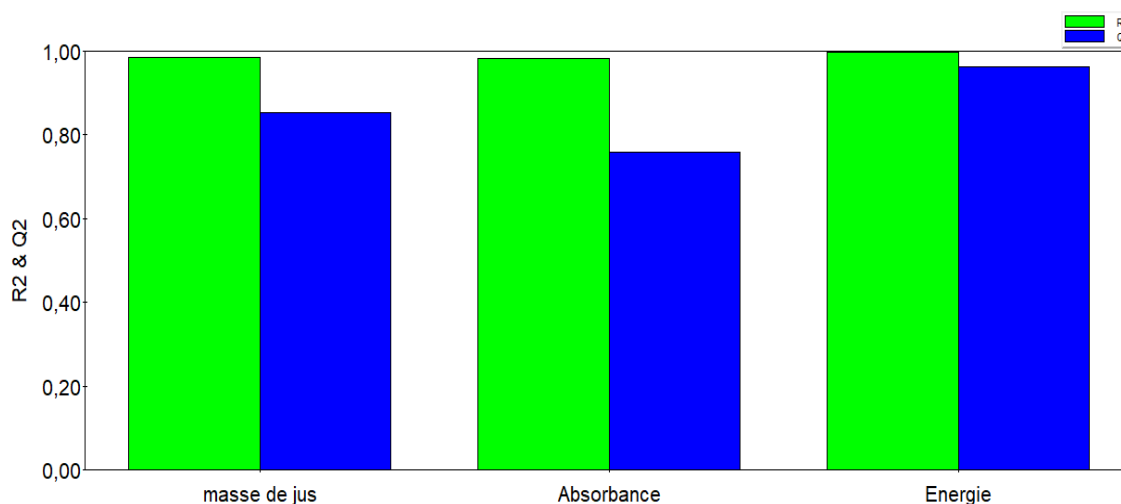


Fig.3.9. Critères de validité des modèles mathématiques (chambre 1D)

Le modèle mathématique de la masse du jus extrait, de l'absorbance et de l'énergie en fonction des facteurs proposés sont respectivement données par MODDE 5.0 :

$$m = 30,32 + 3,08 V + 0,56 n + 1,91 T - 1,19 V^2 + 1,15 n^2 - 1,94 T^2 \quad (3.8)$$

$$Abs = 0,38 + 0,02 V + 0,017 T + 0,019 V^2 - 0,009 n^2 - 0,0095 T^2 - 0,0122 V * n - 0,018 n * T \quad (3.9)$$

$$W = 1960 + 560 V + 398,4 n + 996 T + 112 V * n + 280 V * T + 200 n * T \quad (3.10)$$

Les figures 3.10, 3.11 et 3.12 représentent les tracés respectifs des effets de chaque facteur sur les réponses, à savoir la masse du jus, l'absorbance et de l'énergie.

La figure 3.10 montre que les trois facteurs influent positivement sur le rendement en termes de masse de jus extrait. Cependant, le facteur « tension appliquée » est le facteur le plus important et le plus influent. Toutefois une augmentation considérable de la tension ou de la durée d'impulsion engendre un effet thermique qui est néfaste pour la qualité du jus et même pour la quantité à cause de l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le jus extrait. A noter que les interactions des facteurs sont non significatives.

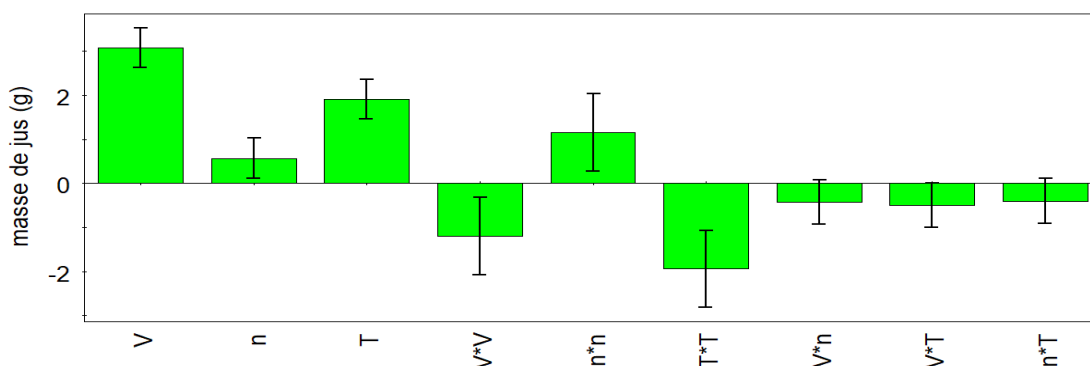


Fig.3.10. Tracé des effets des facteurs sur la masse du jus (1D)

Ensuite, en ce qui concerne l'absorbance, ce sont les facteurs tension appliquée ainsi que la durée de l'impulsion, qui sont les plus significatifs. Par contre, celui du nombre d'impulsions, n'a aucun effet sur les résultats. Ces conclusions restent valables dans les limites de l'intervalle d'étude.

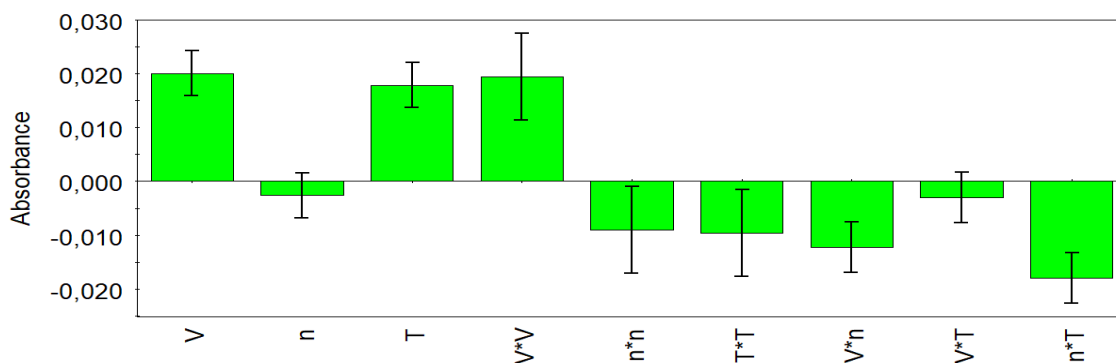


Fig.3.11. Tracé des effets des facteurs sur l'absorbance (1D)

Le tracé de degré de l'influence des trois facteurs sur l'énergie (figure 3.12), montre que la tension, le nombre et la durée des impulsions ont une grande influence sur l'énergie consommée. Ceci est tout à fait logique, vu que cette dernière en dépend. En effet, on peut la calculer selon la formule suivante :

$$W = \frac{1}{2} n C V^2 \tag{3.11}$$

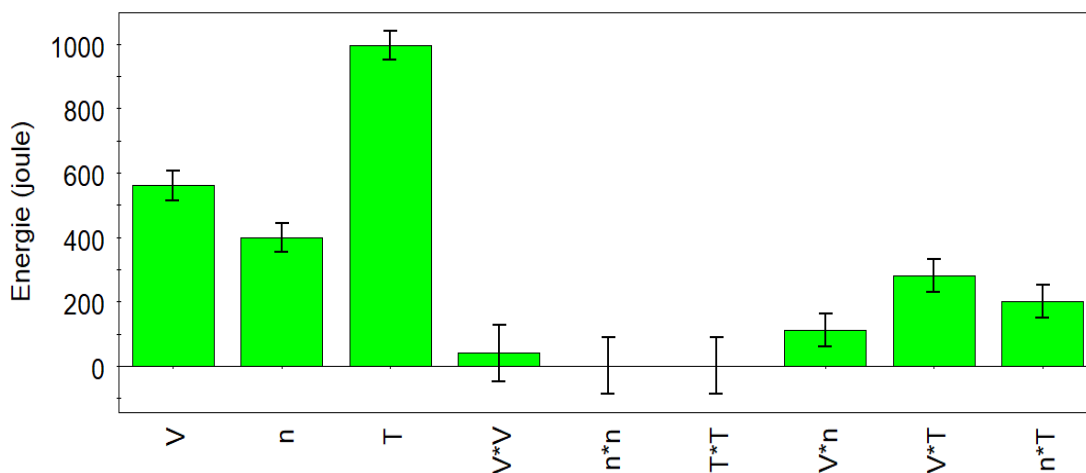


Fig.3.12. Tracé de degré d'influence des facteurs sur l'énergie (1D)

Selon ce modèle, l'optimum du processus proposé par MODDE 5.0 qui donne les valeurs optimales des facteurs qui permet d'avoir un rendement maximal de jus extrait dans le cas de la chambre 1D est obtenu pour une tension $V = 8$ kV, un nombre d'impulsion $n = 80$ impulsions et une durée d'impulsion $T = 35,89 \mu s$, puisqu'on obtient une masse de jus de $m = 32,76$ g avec une absorbance de 0,42 et une énergie consommée de 1828,83 joule (figure 3.13).

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 Tension	Free		6	8	1 masse de jus	Maximize	1	32,5058	33,6688	
2 nombre d'impulsions	Free		80	120	2 Absorbance	Maximize	1	0,443997	0,457647	
3 Durée d'impulsion	Free		20	60	3 Energie	Minimize	1		442,16	833,04

1	2	3	4	5	6	7	8	
Tension	nombre d'impulsions	Durée d'impulsion	masse de jus	Absorbance	Energie	iter	log(D)	
1	6	120	20,0459	24,2609	0,3697	812,51	3763	1,5558
2	8	80	20	29,4673	0,385	973,599	5000	1,1584
3	8	80	35,8965	32,7684	0,4203	1828,83	4910	0,8379
4	8	80	52,9761	33,5775	0,4448	2747,72	2411	1,0753
5	8	80,0001	38,0506	33,0267	0,4242	1944,73	4866	0,8469
6	7,4348	80	20	28,1723	0,3493	846,216	4927	1,4595
7	8	80,0003	52,9251	33,5792	0,4448	2744,98	3663	1,0744
8	8	80	52,9761	33,5775	0,4448	2747,72	2411	1,0753

Fig.3.13. Valeurs optimales proposées par MODDE 5.0 (1D)

Les courbes de prédiction de la variation de la masse du jus et de l'absorbance en fonction des trois facteurs choisis pour la chambre 1D sont respectivement présentées dans les figures 3.14 et 3.15.

Le graphique de la réponse prédite de la masse du jus extrait confirme les résultats du tracé des effets des facteurs sur la réponse. En effet, la masse du jus extraite est largement supérieure pour une tension de 8 kV par rapport à celle obtenue pour des valeurs égales à 6 et 7 kV. Enfin, la durée d'impulsion reste à un degré moindre, un facteur moins influent, alors que celui de l'effet du nombre d'impulsions reste négligeable.

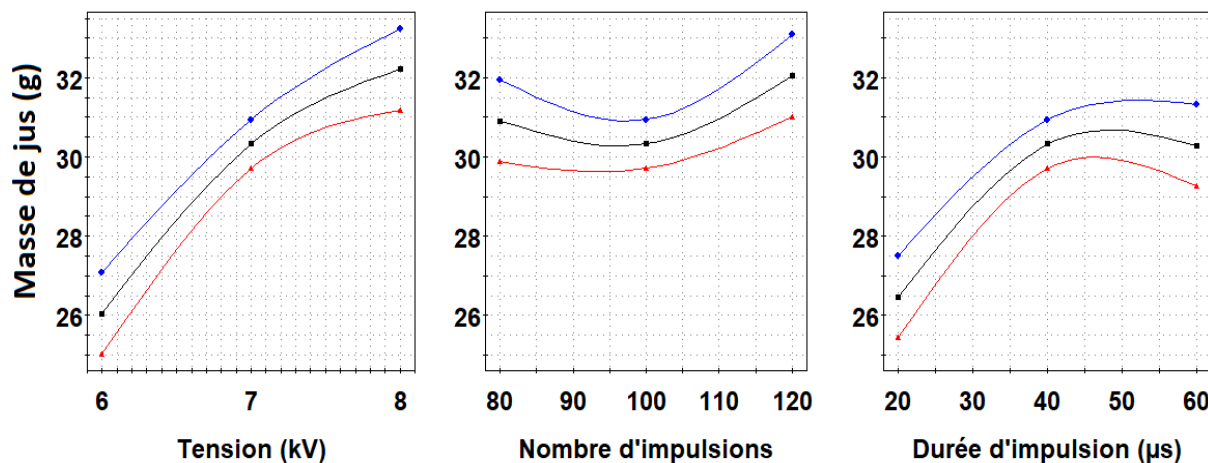


Fig.14 Courbes de prédiction de la masse du jus extrait (1D)

La même conclusion a été faite dans le cas de l'absorbance où les facteurs « tension » et « durée d'impulsion » restent les plus influents. En plus et étant donné que la distance inter-électrodes utilisée lors des expériences, était de 6 cm, la valeur du champ maximal qu'on atteint était faible de l'ordre de 1.33 kV/cm (8kV/6cm). Par conséquent, un effet thermique ne pouvait en aucun se produire. Ce qui explique l'absence d'un effet négatif de la tension sur le rendement.

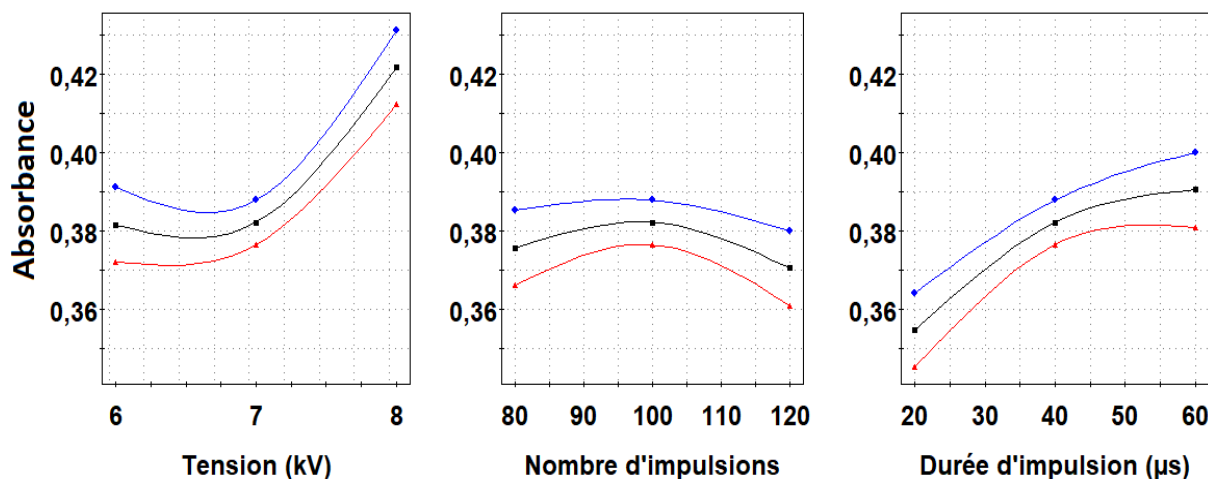


Fig.3.15. Courbes de prédiction de l'absorbance (1D)

Les figures 3.16 et 3.17 montrent respectivement les contours d'iso-réponses obtenues dans le cas de la chambre 1D avec ce modèle pour la masse du jus extrait et l'absorbance, et ce pour une durée d'impulsion $T=40\ \mu\text{s}$.

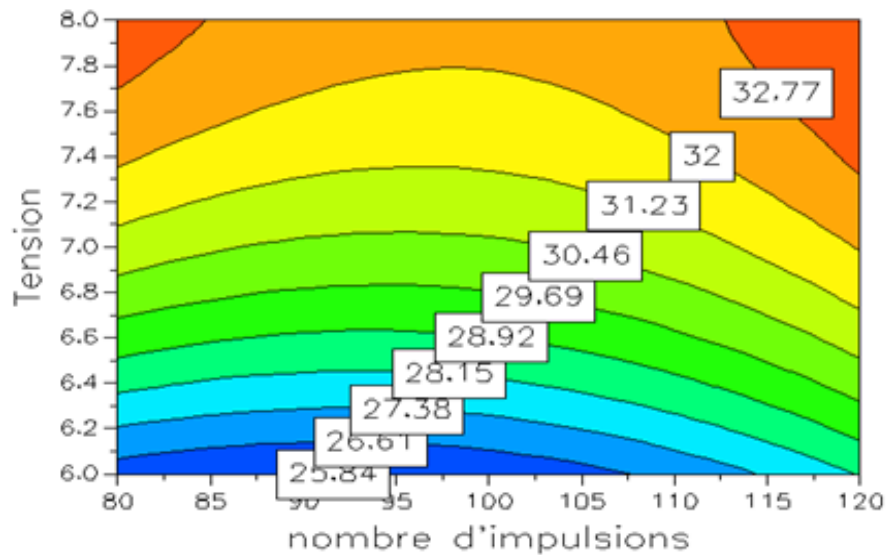


Fig.3.16. Courbes iso-réponses obtenues de la masse du jus en fonction des facteurs V et n pour $T=40\ \mu\text{s}$ (chambre 1D)

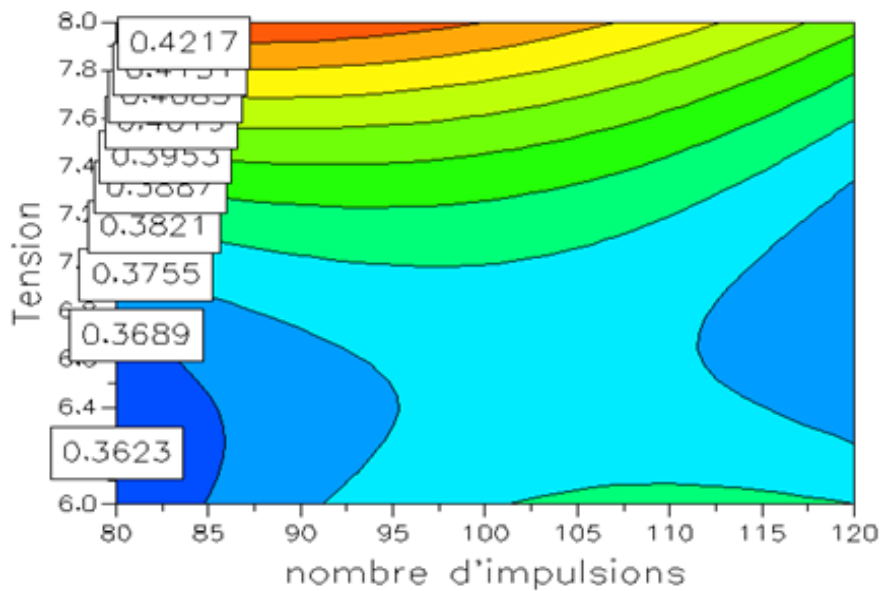


Fig.3.17. Courbes iso-réponses obtenues de l'absorbance en fonction des facteurs V et n pour $T=40\ \mu\text{s}$ (chambre 1D)

Les figures 3.18 et 3.19 montrent respectivement les contours d'iso-réponses obtenues avec ce modèle pour la masse du jus extrait et l'absorbance (Configuration 1D), et ce pour un nombre d'impulsion $n=100$.

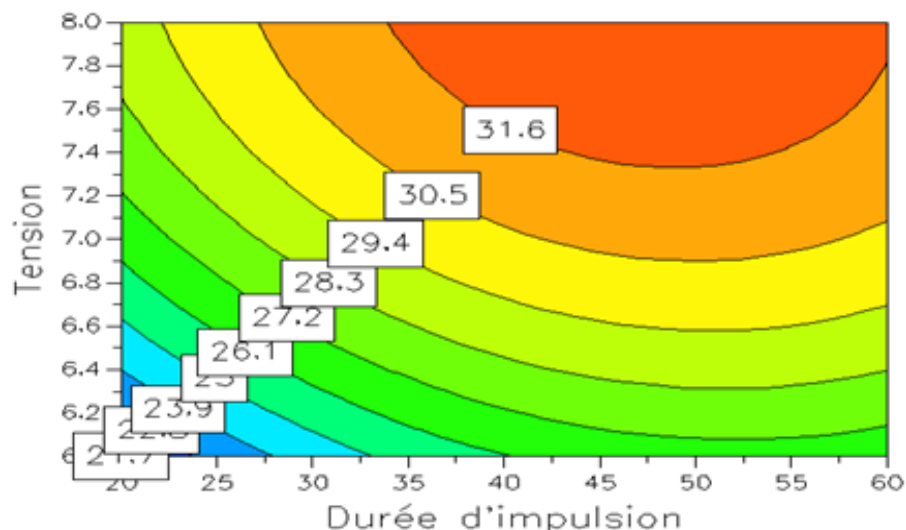


Fig.3.18.Courbes iso-réponses obtenues de la masse du jus en fonction des facteurs V et T pour n=100 (chambre 1D)

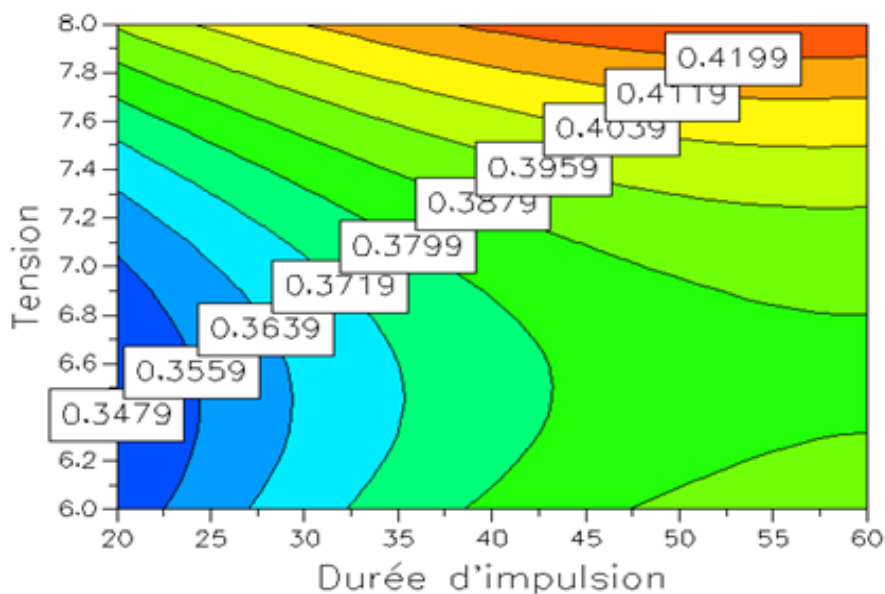


Fig.3.19.Courbes iso-réponses obtenues de l'absorbance en fonction des facteurs V et T pour n=100 (chambre 1D)

On peut facilement constater que le meilleur rendement en termes de masse de jus, à savoir 32,77 g, a été obtenu avec la valeur de tension la plus élevée et pour 80 et 120 impulsions. Ceci est en concordance avec les résultats déjà obtenus qui confirment que le facteur « tension » est le plus influent lors de ce procédé. Ce résultat est très important puisqu'il nous permet de constater que le nombre d'impulsions doit être raisonnable. Car, au-delà d'une certaine valeur, il n'y aura plus d'augmentation du rendement mais plutôt une perte d'énergie.

Même remarque peut être faite dans le cas de l'absorbance. En effet, le meilleur résultat Abs= 0,42 a été obtenu lors de l'application d'une tension de valeur égale à 8 kV et

d'un nombre d'impulsions compris entre 80 et 100. Par contre, au-delà de ces valeurs, on a remarqué une baisse de rendement ce qui a conduit à une perte d'énergie.

On peut aussi remarquer que le meilleur rendement en termes de masse de jus, a été obtenu avec des durées d'impulsion supérieure à 35µs. Ceci vient confirmer l'importante influence du facteur « durée d'impulsions » par rapport à celui de la tension. L'explication de ce résultat est simple. En effet, il faut une durée suffisante pour assurer l'électroporation des cellules de betteraves exposées aux impulsions électriques. D'ailleurs, on constate que pour des durées inférieures à 35 µs, la quantité de jus extraite n'est pas aussi optimal mais dans certains cas, elle est faible. Ceci est dû au tissu biologique de l'aliment à traiter qui n'a pas été entièrement électroporé.

En ce qui concerne l'absorbance, les résultats sont en concordance avec ceux de la masse du jus. Puisque le meilleur rendement a été obtenu avec des durées d'impulsions supérieures à 40 µs. Tout cela ne peut que confirmer l'interprétation les résultats obtenus précédemment.

3.3.2.2. Chambre 2D

Les résultats du plan CCF pour la chambre 2D sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau.3.3. Résultats du plan CCF pour la chambre 2D

Exp N°	Facteurs d'entrée			Sorties		
	V (kV)	N	T (µs)	m (g)	Abs	W (J)
01	3	60	8	34,3	0,376	54
02	5	60	8	39,1	0,482	150
03	3	100	8	36,2	0,456	90
04	5	100	8	39,5	0,515	250
05	3	60	40	38,4	0,488	216
06	5	60	40	40,1	0,522	600
07	3	100	40	39,2	0,492	360
08	5	100	40	39,5	0,495	1000
09	3	80	24	37,7	0,474	180
10	5	80	24	41,5	0,543	500
11	4	60	24	35,9	0,404	240
12	4	100	24	36,8	0,422	400
13	4	80	8	37,7	0,53	128
14	4	80	40	39,8	0,577	512
15	4	80	24	37,6	0,449	320
16	4	80	24	37,2	0,471	320
17	4	80	24	37,4	0,459	320

D'après la figure 3.20, on peut d'ores et déjà remarquer que la qualité prédictive du modèle est satisfaisante puisque les valeurs de coefficient Q^2 et R^2 présentées dans la figure 3.20 sont proches de 100%. Ceci conduit à la validation mathématique des modèles.

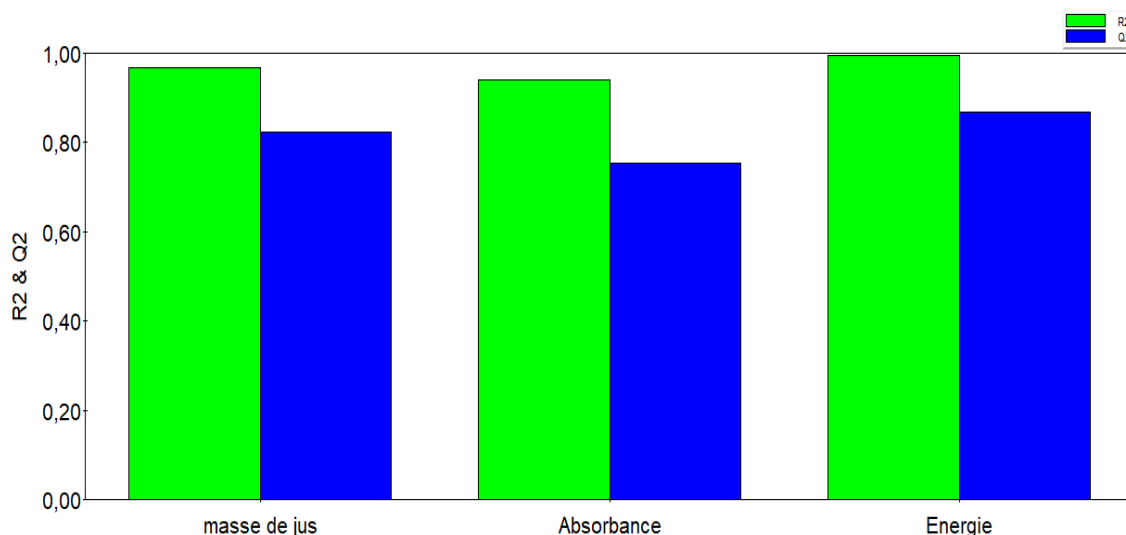


Fig.3.20. Critères de validité des modèles mathématiques (chambre 2D)

Le modèle mathématique respectif de la masse du jus extrait, de l'absorbance et de l'énergie en fonction des facteurs proposés par MODDE 5.0 sont :

$$m = 37,76 + 1,39 V + 1,02 T + 1,56 V^2 - 1,68 n^2 + 0,71 T^2 - 0,76 V * T \quad (3.12)$$

$$Abs = 0,47 + 0,02 V + 0,021 T - 0,077 n^2 + 0,063 T^2 - 0,016 V * T - 0,017 n * T \quad (3.13)$$

$$W = 320 + 160 V + 84 n + 201,6 T + 40 V * n + 96 V * T + 51 n * T \quad (3.14)$$

A partir de ce modèle mathématique, le tracé respectif des effets de chaque facteur sur les réponses, à savoir la masse du jus, de l'absorbance et de l'énergie sont respectivement illustrés dans les figures 3.21, 3.22 et 3.23.

La figure 3.21 montre que la tension et la durée d'impulsion ont une influence positive sur le rendement en termes de masse de jus, alors que celui du nombre d'impulsions l'est beaucoup moins. On peut ajouter une autre remarque qu'on peut considérer comme étant très importante. Puisque l'interaction entre la tension et la durée d'impulsion est significatif. Ceci dit et pour mieux optimiser le rendement, il faut soit une tension de valeur élevée avec une durée d'impulsion très courte ou bien une tension moyenne avec des durées d'impulsions plus au moins longues.

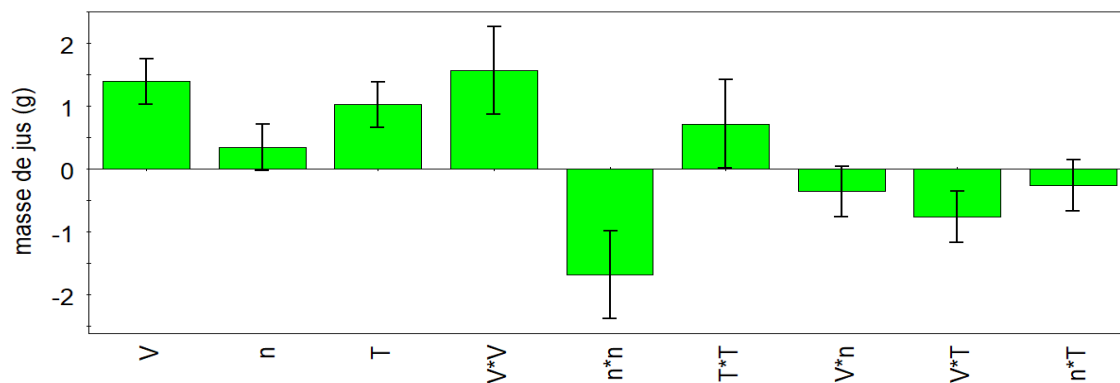


Fig.3.21. Tracé des effets des facteurs sur la masse du jus (2D)

La même remarque peut être faite en ce qui concerne l'absorbance, pour laquelle la tension ainsi que la durée d'impulsions restent les facteurs les plus significatifs. Par contre, celui du nombre d'impulsions n'a aucun effet sur la réponse.

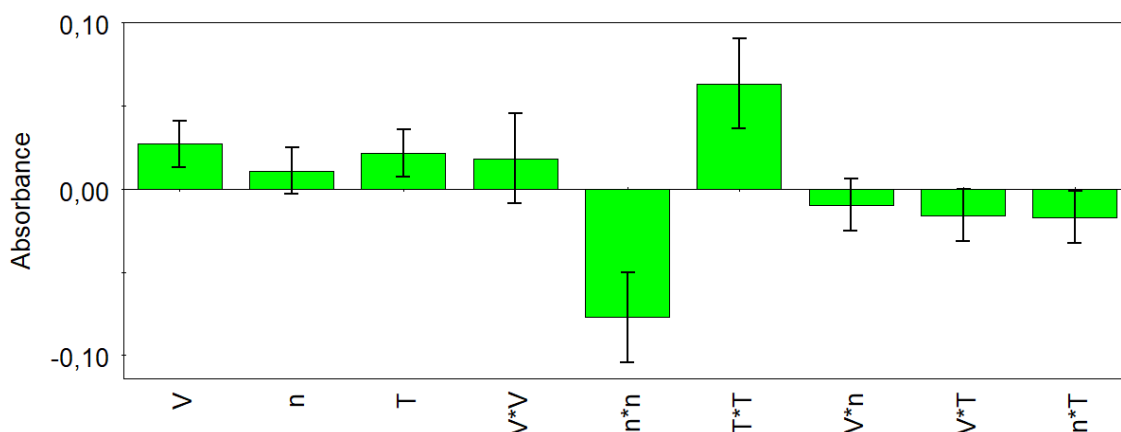


Fig.3.22. Tracé des effets des facteurs sur l'absorbance (2D)

Concernant l'énergie, les résultats sont les même que ceux obtenus avec la chambre 1D, ce qui est tout à fait logique étant donné que l'énergie est calculée selon la même formule et ce quel que soit la configuration de la chambre de traitement.

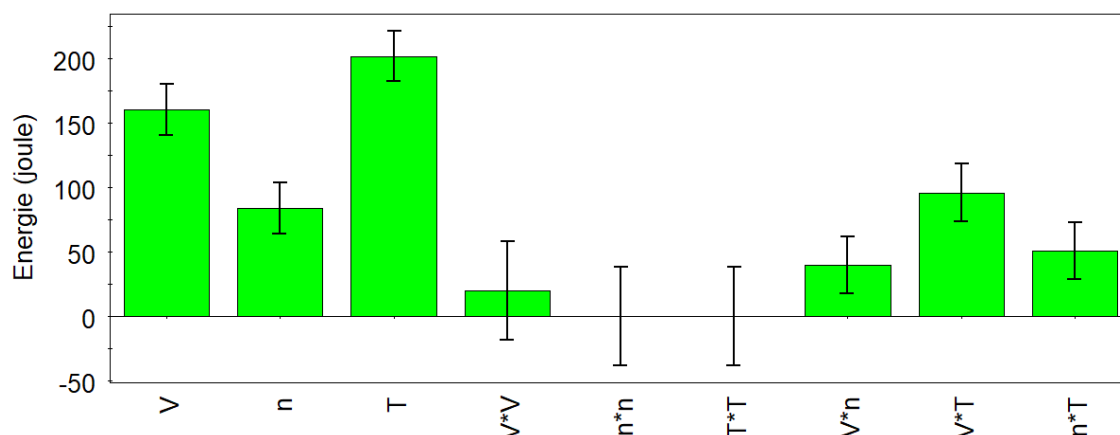


Fig.3.23. Tracé des effets des facteurs sur l'énergie (2D)

Selon ce modèle, l'optimum du processus proposé par MODDE 5.0 pour la chambre 2D, c'est-à-dire celui pour lequel on peut obtenir un rendement maximal du jus extrait qui correspond en fin de compte à une masse de jus de $m = 40,47$ g, une absorbance de 0,55 et une énergie consommée de 170 joule, a été obtenu pour une tension $V = 4.92$ kV, un nombre d'impulsions $n = 73$ impulsions et une durée d'impulsion $T = 8 \mu s$ (figure 3.24).

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit		Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	Tension	Free		3	5	1	masse de jus	Maximize	1	40,3925	41,0424	
2	nombre d'impulsions	Free		60	100	2	Absorbance	Maximize	1	0,552788	0,571042	
3	Durée d'impulsion	Free		8	40	3	Energie	Minimize	1		22,1401	112,66

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Tension	nombre d'impulsions	Durée d'impulsion	masse de jus	Absorbance	Energie	iter	log(D)
1	3	85,2192	8	37,0061	0,4987	72,5733	3499	1,2601
2	5	66,5589	8	40,2513	0,5333	153,34	5000	0,4179
3	3	79,3923	40	40,4191	0,5689	282,713	5000	0,4876
4	4,7995	69,8046	38,3799	40,4767	0,5556	628,383	1046	1,1887
5	4,8991	74,2472	8	40,4381	0,5606	172,274	4956	0,1187
6	3	85,2192	8	37,0061	0,4987	72,5733	3499	1,2601
7	4,9215	73,0333	8	40,4711	0,5583	170,025	5000	0,1176
8	4,7957	70,0222	38,3186	40,4734	0,5557	628,202	2035	1,1885

Fig.3.24. Valeurs optimales proposées par MODDE 5.0 (2D)

Les courbes de prédiction de la variation de la masse du jus et de l'absorbance en fonction des trois facteurs choisis pour la chambre 2D sont respectivement présentées dans les figures 3.25 et 3.26.

Le graphique de la réponse prédite de la masse du jus extrait pour la chambre 2D, confirme les résultats du tracé des effets des facteurs sur la réponse. En effet, la masse du jus obtenue pour une tension de 5kV est largement supérieure par rapport à celle pour laquelle où on a appliqué des tensions de 3 et 4 kV. Le nombre d'impulsions a peu d'influence sur la réponse. Toutefois, le meilleur rendement est prédit à $n=80$ impulsions, car au-delà de cette valeur, un effet négatif se produit avec une perte d'énergie non négligeable. Enfin, l'augmentation de la durée d'impulsion améliore le rendement du procédé, ce qui confirme l'importance d'avoir des impulsions de durée suffisante pour que l'électroporation se produise.

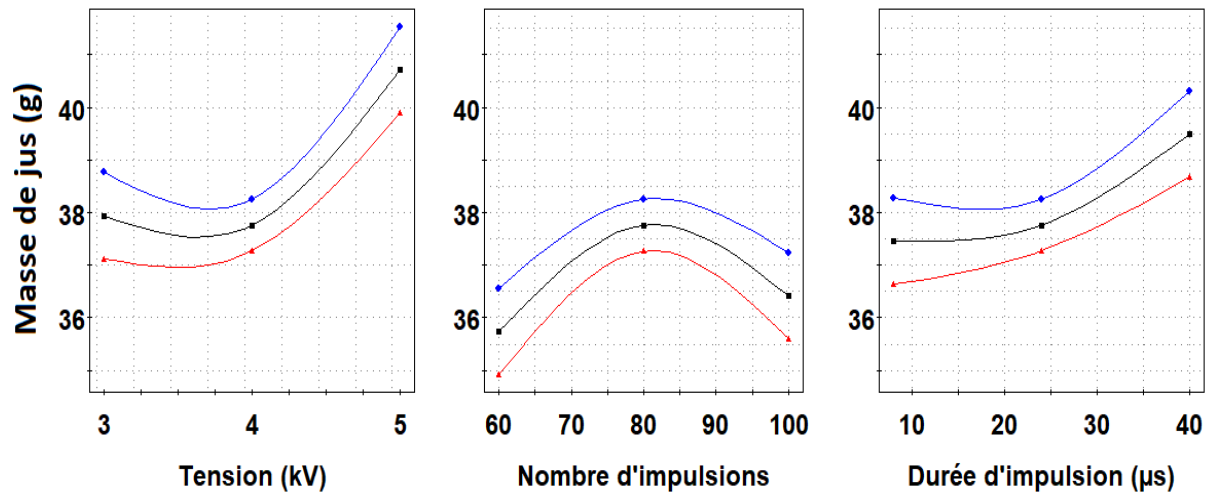


Fig.3.25. Courbes de prédiction de la masse du jus extrait (2D)

Pour l'absorbance, cette dernière augmente au fur et à mesure qu'on augmente la tension ainsi que la durée d'impulsion. De plus, un nombre d'impulsions de $n=80$ permet d'avoir le meilleur rendement, Ce qui est tout à fait le contraire pour $n=100$.

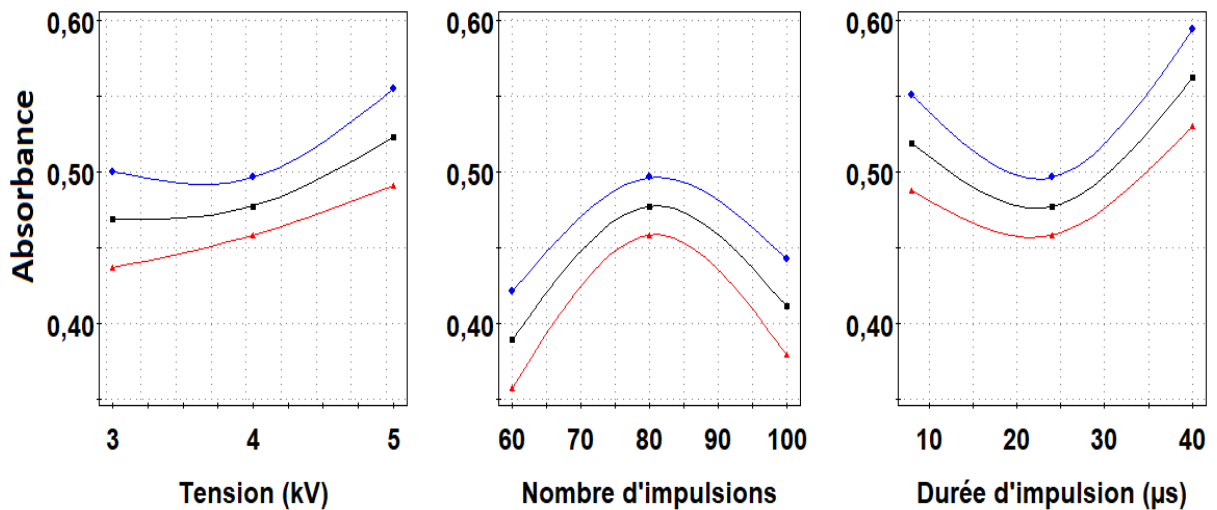


Fig.3.26. Courbes de prédiction de l'absorbance (2D)

Les figure 3.27 et 3.28 montrent les contours d'iso-réponses obtenus avec le présent modèle pour respectivement la masse du jus extrait et l'absorbance (Configuration 2D), pour une durée d'impulsion $T=40\mu s$.

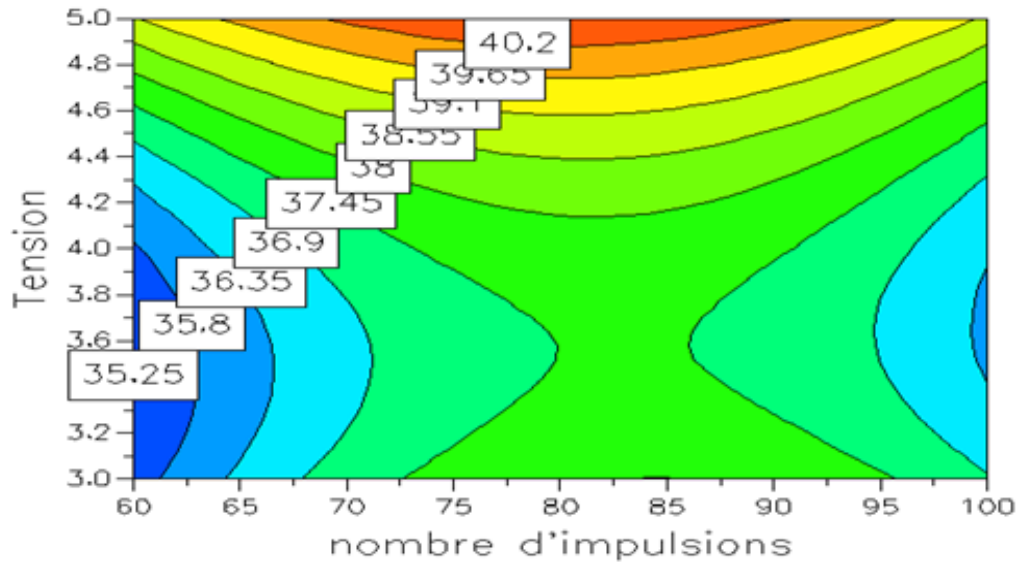


Fig.3.27. Courbes iso-réponses obtenues de la masse du jus en fonction des facteurs V et n pour T= 40 μ s (chambre 2D)

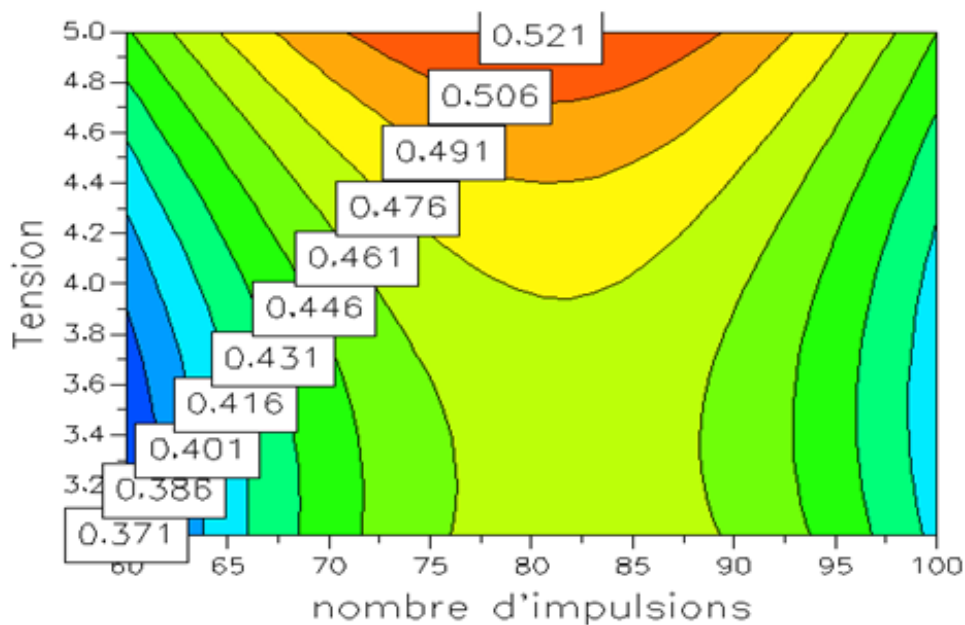


Fig.3.28. Courbes iso-réponses obtenues de l'absorbance en fonction des facteurs V et n pour T= 40 μ s (chambre 2D)

Les figures 3.29 et 3.30 montrent les contours d'iso-réponses obtenus avec le présent modèle pour respectivement la masse du jus extrait et l'absorbance (Configuration 2D), pour un nombre d'impulsion n=100.

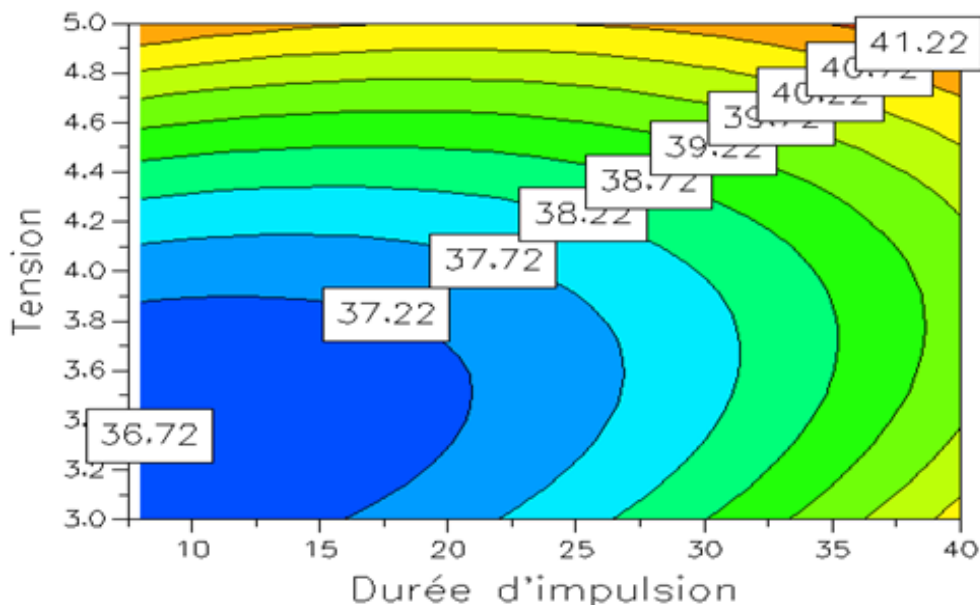


Fig.3.29. Courbes iso-réponses obtenues de la masse du jus en fonction des facteurs V et T pour n=100 (chambre 2D)

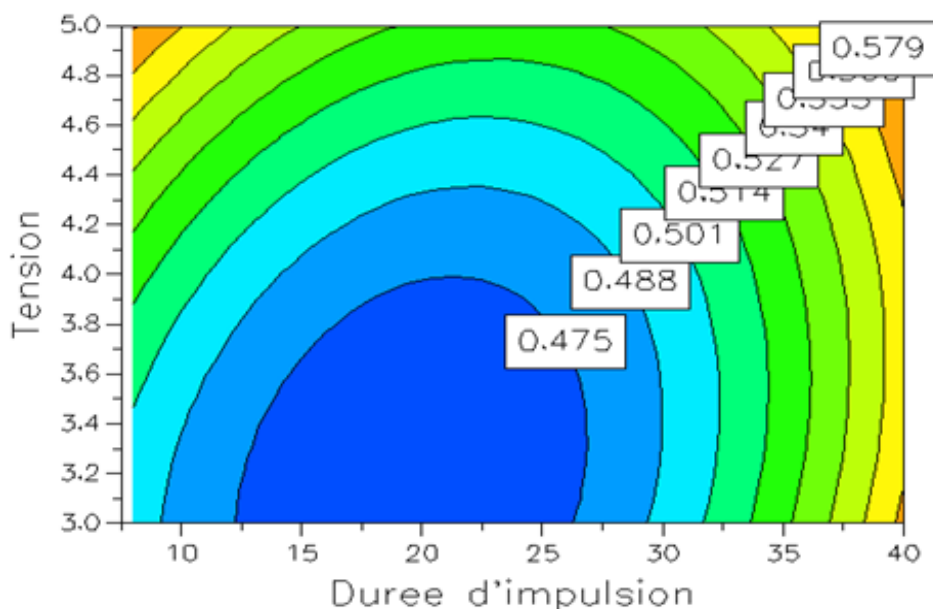


Fig.3.30. Courbes iso-réponses obtenues de l'absorbance en fonction des facteurs V et T pour n=100 (chambre 2D)

On peut constater que le meilleur rendement en termes de masse de jus pour une masse égale à 40.2 g, a été obtenu avec la plus grande tension (5kV) et cela pour 70 et 90 impulsions. Ce résultat vient confirmer encore une fois que le facteur « tension » reste le facteur qui a le plus d'influence et que le nombre d'impulsions doit être bien choisie. Car, on a remarqué qu'un nombre trop faible ne peut en aucun cas assurer un bon traitement de l'aliment, alors que s'il est trop élevé, ceci provoquera une diminution significative du rendement ainsi qu'une perte d'énergie.

Les résultats des contours iso-réponses pour l'absorbance, vont dans le même sens que ceux obtenus précédemment. Etant donné qu'un rendement maximal a été obtenu avec une tension de 5kV et des durées d'impulsions comprises entre 70 et 90 impulsions.

De même que pour la configuration 1D, le meilleur rendement du procédé d'extraction, c'est-dire celui correspondant à une masse de 41.22 g avec une absorbance en bétanine de 0.579 a été obtenu pour des valeurs respectives de tension et de durée d'impulsions élevées, égales à 5 kV et de 40 μ s.

3.3.2.3. Discussions

Les résultats du plan expérimental factoriel fractionnaire correspondant à ceux des deux configurations des chambres 1D et 2D, conduisent chacun à un modèle mathématique validé.

En effet, on a pu constater que la tension appliquée est le facteur le plus important et le plus influent dans le procédé de prétraitement par CEP du jus de betterave. Quant à La durée des impulsions, cette dernière doit assurer une électroporation efficace des tissus biologiques de l'aliment à traiter. Cependant une durée trop longue peut provoquer un échauffement de l'aliment et donc perturber le traitement par CEP, Ce qui peut être considéré comme étant un traitement non-thermique. Même chose pour le nombre d'impulsions dont les valeurs les plus efficaces sont celles comprises entre 70 et 90 impulsions. Toutefois un nombre trop élevé peut engendrer une perte d'énergie.

En comparant les résultats des plans expérimentaux factoriels fractionnaires des deux chambres de traitement 1D et 2D, on peut constater une nette amélioration pour les électrodes à deux dimensions. Et pour mieux illustrer cette différence, le tableau 3.4 présente une comparaison des points optimaux obtenus pour chaque chambre de traitement.

Tableau.3.4. Comparaison des points optimaux obtenus pour les chambres 1D et 2D

		1D	2D	
Facteurs	Tension (kV)	8	4.92	Différence en %
	Nombre d'impulsions	80	73	
	Durée d'impulsion (μs)	35,89	8	
Sorties	Masse de jus (g)	32,76	40,47	+ 23,53
	Absorbance en bétanine	0,42	0,55	+ 30,95
	Energie (joules)	1828	170	- 90,7

On peut constater que pour les mêmes conditions expérimentales, le meilleur rendement est celui obtenu avec la chambre de traitement 2D. En effet, on remarque, une nette augmentation correspondant à des valeurs de 23,53 % de la masse du jus et de 30,95 % de l'absorbance en bétanine par rapport à celles enregistrées avec la chambre 1D.

On remarque aussi que les paramètres de traitement utilisés pour la chambre 2D sont moins importants par rapport à ceux de la chambre 1D. Puisqu'ils nous ont permis d'avoir une économie d'énergie très importante de 90,7 %.

L'explication est simple, l'aliment est mieux exposé au CEP dans une chambre de traitement avec des électrodes à deux dimensions. Car, il faut bien le préciser que les lignes de distribution du champ électrique y sont beaucoup plus importantes et sont dirigées dans les deux directions de l'espace inter-électrodes.

Ce résultat est très important car il prouve encore une fois que la distribution du champ électrique pour le traitement à CEP est un paramètre non négligeable, et qui doit être pris en considération afin d'améliorer l'efficacité de la technologie CEP.

3.4 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre, présenté une étude expérimentale du procédé d'extraction du jus de betterave par CEP. Deux chambres de traitement de forme parallélépipédiques en plexiglas ont été réalisées, avec pour chacune une configuration d'électrode différente. La première configuration est en une seule dimension (1D) et la deuxième, en deux dimensions (2D).

Durant ce travail, la méthodologie des plans d'expériences a été utilisée. Un plan factoriel fractionnaire a été établi pour chaque configuration. Les résultats des deux plans ont été validés conduisant ainsi à des modèles mathématiques qu'on a utilisé pour l'analyse et la prédiction. Pour les mêmes conditions expérimentales, un meilleur rendement en termes de quantité de jus a été obtenu avec la chambre de traitement qui utilise des électrodes à deux dimensions 2D, avec une économie d'énergie importante. Ce résultat prouve que la distribution de champ électrique de traitement est un paramètre très important et qui doit être pris en considération afin d'améliorer le rendement de la technologie CEP.

Chapitre 4

Analyse Expérimentale des Chambres de Traitement Coaxiales Cylindriques

Chapitre 4 : Analyse Expérimentale des Chambres de Traitement Coaxiales Cylindriques

4.1. Introduction

Lors du précédent chapitre, on a pu constater que le procédé d'extraction par CEP est un processus multifactoriel. Ce qui implique que le développement de cette technologie passe avant tout par l'analyse de l'influence de chaque facteur. De plus, les résultats préliminaires précédents ont déjà montré l'utilité d'avoir un champ électrique important qui permet l'electroporation des tissus biologiques des aliments à traiter. Aussi, on a vu que la durée d'impulsion doit être suffisante pour un bon traitement mais ne doit pas être trop longue afin d'éviter tout échauffement du produit. Par ailleurs, le nombre d'impulsions doit être optimisé afin de ne pas utiliser trop d'énergie. Encore, faut-il le préciser que l'étude précédente nous a surtout permis de prouver que la distribution du champ électrique dans la chambre de traitement est un autre paramètre à prendre en considération afin d'améliorer le rendement des procédés d'extraction par CEP.

Ainsi, dans ce chapitre, on va s'intéresser à un autre facteur qui peut aussi avoir une influence sur le rendement, à savoir la distance inter-électrodes dans la chambre de traitement. Pour cela, trois chambres de traitement statiques cylindriques ont été utilisées, avec pour chacune d'elle une distance inter-électrodes différente.

Le recours à la méthodologie des plans d'expériences pour faire une étude expérimentale comparative des trois chambres cylindriques était plus que nécessaire. L'objectif étant d'analyser l'effet de la distance inter-électrodes sur le rendement de prétraitement CEP sur l'extraction du jus de betterave.

4.2. Chambres de traitement utilisées

Comme déjà cités auparavant, trois chambres de traitement de formes cylindriques coaxiales ont été utilisées dans ce travail. Chaque chambre est constituée de deux électrodes cylindriques, l'une reliée à la haute tension et l'autre à la masse, et entre lesquels, on place l'aliment à traiter.

Durant toutes les expériences effectuées, et ce quelle que soit la chambre de traitement, le champ appliqué a été maintenu constant et égale à 2 kV/cm. Pour cela, on a varié la tension en fonction de la distance D , ce qui donne : $V = 2$ kV pour $D = 1$ cm, $V = 4$ kV pour $D = 2$ cm et $V = 6$ kV pour $D = 3$ cm, comme cela est montré dans la figure 4.1.

La figure 4.2 est une photographie des trois chambres de traitement utilisées.

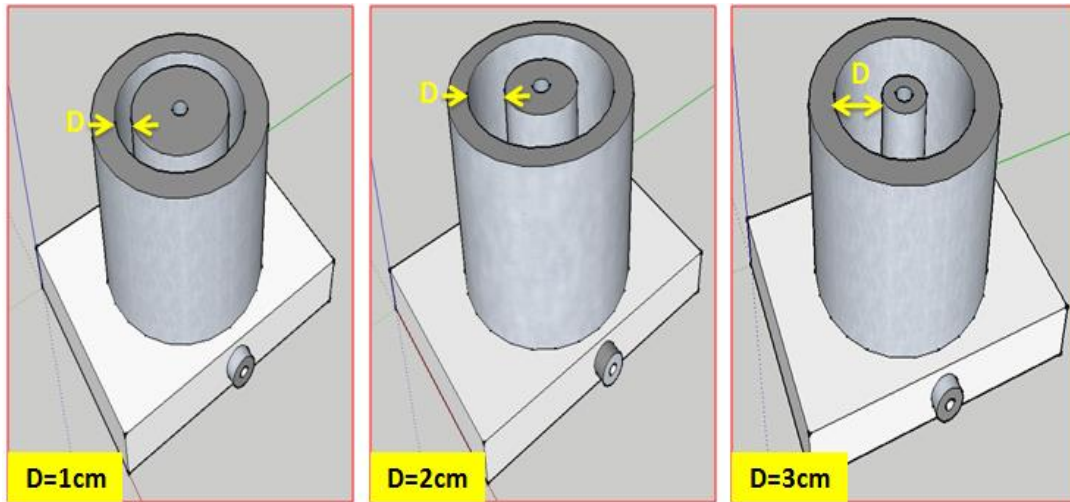


Fig.4.1. Schéma descriptif des 3 chambres de traitement avec les dimensions



Fig.4.2. Photographie des trois chambres cylindriques utilisées
(1: $D = 1 \text{ cm}$; 2: $D = 2 \text{ cm}$ et 3: $D = 3 \text{ cm}$)

4.3. Modélisation expérimentale du traitement CEP des trois chambres cylindriques

Comme ce fût le cas dans le précédent chapitre, et pour modéliser le travail expérimental, on a eu aussi recours à la méthodologie des plans d'expériences. Le but étant d'analyser l'effet de la distance inter-électrodes dans les procédés de traitement par CEP dans le domaine agroalimentaire.

4.3.1. Etude paramétrique

Le procédé d'extraction du jus de betterave a été utilisé afin d'évaluer le rendement des trois chambres de traitement cylindriques.

L'étude paramétrique consiste à faire des expériences préliminaires afin de délimiter les intervalles d'étude des différents facteurs.

Toutes les expériences ont été réalisées en maintenant certains facteurs constants durant toute l'étude, tels que :

- Masse de l'échantillon de betterave râpé 120g
- Pression d'extraction constante $P = 50 \text{ kg/cm}^2$
- Durée totale de la pression mécanique $\Delta t = 300 \text{ s}$
- Fréquence de répétition d'impulsion $f = 1 \text{ Hz}$
- Champ électrique $E = 2 \text{ kV/cm}$

Les facteurs variables sont :

- Nombre d'impulsions n
- Durée d'impulsion $T (\mu\text{s})$
- Distance inter-électrodes (cm)

Les réponses sont :

- Masse de jus extraite (g)
- Absorbance de la bétanine
- Energie du traitement CEP (Joule)

Afin de définir l'intervalle d'étude de ces trois facteurs, une série d'expériences ainsi que des essais préliminaires qui ont été effectués tout en variant un facteur à la fois, sont présentés dans la prochaine section. Ainsi, les résultats obtenus vont par la suite, nous permettre de déterminer l'intervalle d'étude de chaque facteur.

4.3.1.1. Analyse de l'influence du nombre d'impulsions

Le principe des « expériences-un-facteur-à-la-fois » est simple. Car, il nous permet de varier un facteur tout en gardant les autres fixes. Dans cette partie, on a opté pour le facteur « nombre d'impulsions » tout en gardant la durée des impulsions ainsi que la distance inter-électrodes constants.

La figure 4.3 présente la variation de la masse de jus extrait et de l'absorbance en fonction du nombre d'impulsions.

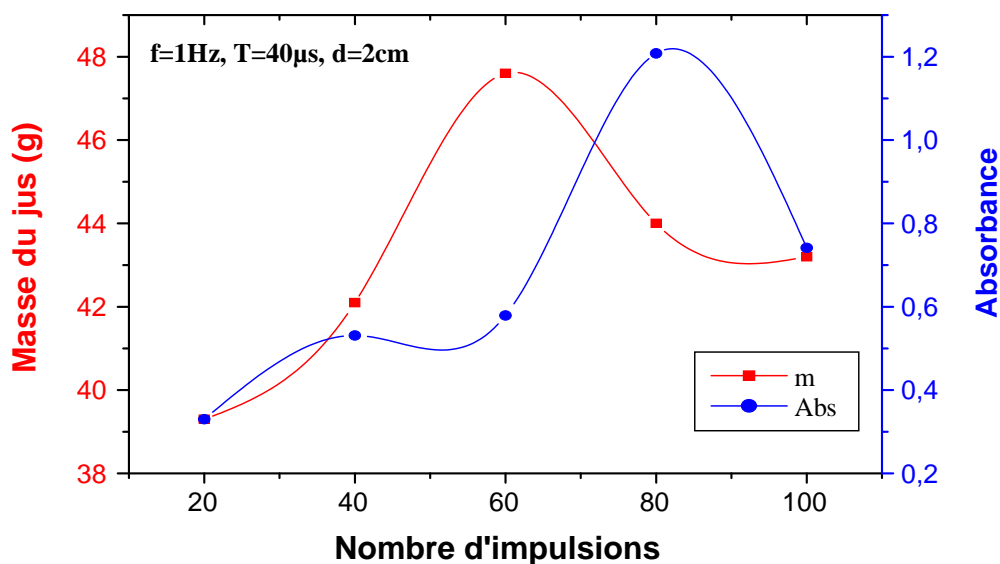


Fig.4.3. Variation de la masse de jus et de l'absorbance en fonction du nombre d'impulsions

On peut facilement constater, que la masse de jus extrait augmente de façon proportionnelle avec le nombre d'impulsions jusqu'à une valeur de $n = 60$. Tandis qu'au-delà de cette valeur, le rendement dire celui de la masse diminue. On peut clairement distinguer une zone de traitement efficace pour le nombre d'impulsions, celle-ci est comprise entre 40 et 80 impulsions.

La courbe de variation de l'absorbance en fonction du nombre d'impulsions est identique à celle de la masse de jus. Ainsi, l'absorbance augmente jusqu'à $n=80$, puis c'est l'effet inverse qui se produit.

On remarque donc que l'absorbance ainsi que la masse de jus extrait sont proportionnels au nombre d'impulsions jusqu'à une valeur seuil. Ceci peut être expliqué par le fait qu'un nombre d'impulsions élevé provoque un excès d'énergie fournie à l'aliment, ce qui par la suite influe négativement sur le taux d'extraction de jus. Cela peut être dû au déclenchement thermique produit dans l'aliment.

4.3.1.2. Analyse de l'influence de la durée de l'impulsion

Selon le principe déjà décrit précédemment, la masse de jus ainsi que l'absorbance en bétanine ont été mesurées pour différentes durées d'impulsion, tout en gardant le nombre d'impulsions et la distance inter-électrodes fixes.

La figure 4.4 présente la variation de la masse de jus et de l'absorbance en fonction de la durée d'impulsions.

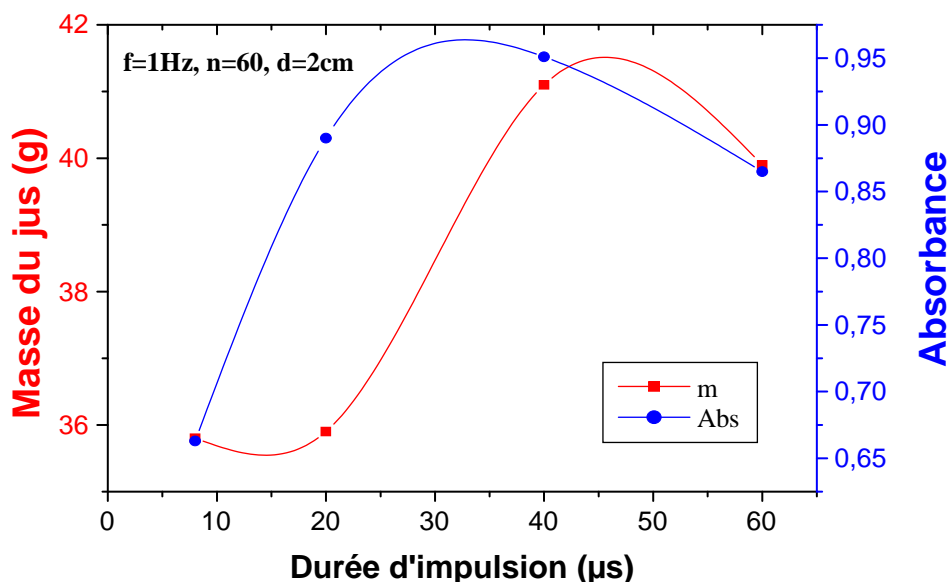


Fig.4.4. Variation de la masse de jus et de l'absorbance en fonction de la durée d'impulsion

On peut constater que la masse et l'absorbance en bétanine du jus extrait, augmentent presque proportionnellement avec la durée des impulsions jusqu'à $T=40\mu s$. Après $T=60\mu s$, on remarque une légère baisse du rendement.

On peut expliquer cette baisse par l'échauffement que peut provoquer l'exposition de l'aliment au CEP pendant de longues durées de traitement. Cet échauffement est très néfaste pour l'aliment. En effet, une température élevée provoque l'évaporation d'eau que contient le jus et ainsi diminuer le rendement d'extraction. Elle peut aussi détériorer la qualité nutritive de l'aliment.

4.3.1.3. Analyse de l'influence de la distance inter-électrodes

Vu le nombre limité de la valeur de l'intervalle inter-électrodes (3 en tout), il sera étudié lors de la modélisation expérimentale avec la méthodologie des plans d'expériences. En effet, les trois chambres cylindriques utilisées ne permettent d'avoir que trois distances inter-électrodes différentes 1cm, 2cm et 3cm.

4.3.1.4. Choix des intervalles d'étude

Comme pour le chapitre précédent, un plan expérimental factoriel fractionnaire a été réalisé afin d'identifier le point optimal (n_0 , T_0 et D_0); les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies pour chacune des trois variables d'entrée : nombre d'impulsions (n_{min} , n_{max}), durée de l'impulsion (T_{min} , T_{max}) et distance inter-électrodes (D_{min} , D_{max}).

A partir des résultats des expériences précédentes de type “un facteur à la fois” qui ont été effectuées, les intervalles d’étude des trois facteurs ont été définis comme suit :

- Nombre d'impulsions n ; $n_{\min} = 40$ et $n_{\max} = 80$
- Durée de l'impulsion T (μs); $T_{\min} = 20 \mu\text{s}$ et $T_{\max} = 60 \mu\text{s}$
- Distance inter-électrodes D (cm); $D_{\min} = 1 \text{ cm}$ et $D_{\max} = 3 \text{ cm}$.

Les points centraux (n_C , T_C et D_C) selon les expériences préliminaires que nous avons effectuées, sont calculés comme suit:

$$n_C = (n_{\max} + n_{\min})/2 = (80 + 40)/2 = 60 \quad (4.1)$$

$$T_C = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = \frac{60 + 20}{2} = 40 \mu\text{s} \quad (4.2)$$

$$D_C = \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2} = \frac{3 + 1}{2} = 2 \text{ cm} \quad (4.3)$$

4.3.2. Résultats du plan CCF pour les trois chambres cylindriques

Les résultats expérimentaux du plan CCF sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau.4.1. Résultats expérimentaux du plan CCF

Exp.N°	Facteurs d'entrée			Sorties		
	n	T (μs)	D (cm)	m (g)	Abs	W(J)
1	40	20	1	34,30	1,03	32
2	80	20	1	37,40	1,28	64
3	40	60	1	41,16	1,21	96
4	80	60	1	42,70	0,71	192
5	40	20	3	46,70	0,48	288
6	80	20	3	53,50	0,57	576
7	40	60	3	49,80	1,21	864
8	80	60	3	54,30	0,52	1728
9	40	40	2	41,70	0,99	256
10	80	40	2	43,10	0,71	512
11	60	20	2	48,50	0,63	192
12	60	60	2	48,10	0,62	576
13	60	40	1	42,00	1,34	96
14	60	40	3	52,80	0,76	864
15	60	40	2	48,20	0,70	384
16	60	40	2	48,20	0,70	384
17	60	40	2	48,20	0,70	384

La qualité prédictive des modèles de la masse de jus, l'absorbance et l'énergie, est satisfaisante puisque les valeurs de coefficient Q^2 et R^2 présentées dans la figure

4.5 sont proches de 100%. Par conséquent, les modèles sont validés et peuvent être utilisés pour l'analyse et la prédiction.

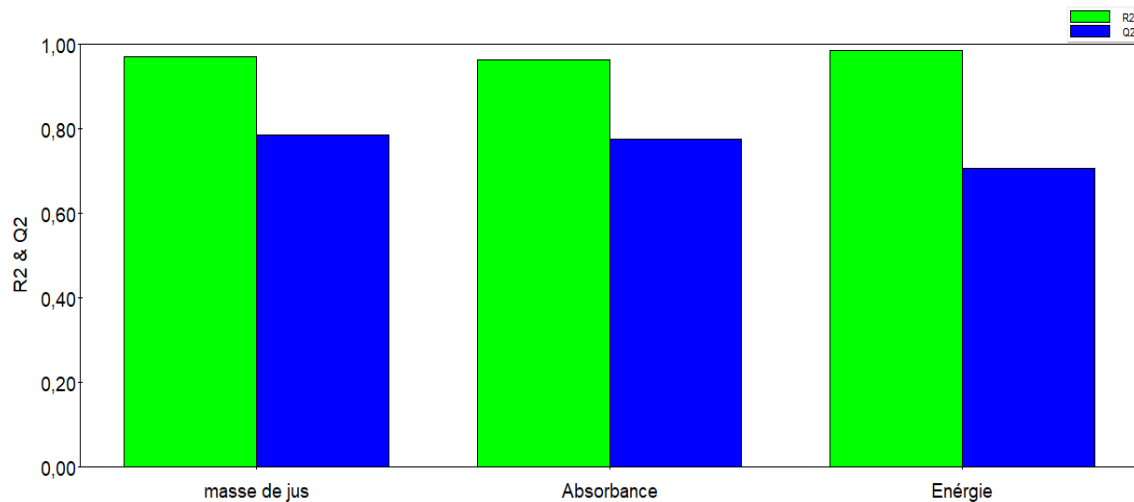


Fig.4.5. Critères de validation des modèles mathématiques

Les modèles mathématiques respectifs de la masse de jus extrait, de l'absorbance et de l'énergie en fonction des facteurs étudiés sont donnés par MODDE 5.0 tel que :

$$m = 47,46 + 1,73 n + 1,56 T + 5,95 d - 4,50 n^2 \quad (4.4)$$

$$Abs = 0,7 - 0,11 n - 0,2 d - 0,17 T^2 + 0,25 d^2 - 0,19 n * T + 0,13 T * d \quad (4.5)$$

$$W = 384 + 153,6 n + 230,4 T + 384 d + 80 n * T + 128 n * d + 192 T * d \quad (4.6)$$

A partir de ces modèles mathématiques, les tracés des effets de chaque facteur sur la réponse, sont illustrés dans les figures 4.6, 4.7 et 4.8.

On constate que pour la masse de jus extrait, c'est la distance inter-électrodes qui est de loin le facteur qui a le plus d'influence sur la réponse. Par conséquent, on déduit que pour la même valeur du champ électrique, des valeurs élevées de la distance inter-électrodes permettent d'avoir un meilleur rendement en termes de quantité de jus. Ceci peut être expliqué par le fait que l'aliment qui est placé dans une chambre ayant un espace inter-électrodes large. Ce qui lui permettra d'être mieux exposé au CEP et donc bénéficier d'un traitement meilleur.

Le nombre et la durée des impulsions influent aussi positivement sur la quantité du jus extrait, mais à un degré moindre par rapport à la distance inter-électrodes. L'effet des interactions entre les trois facteurs est nul.

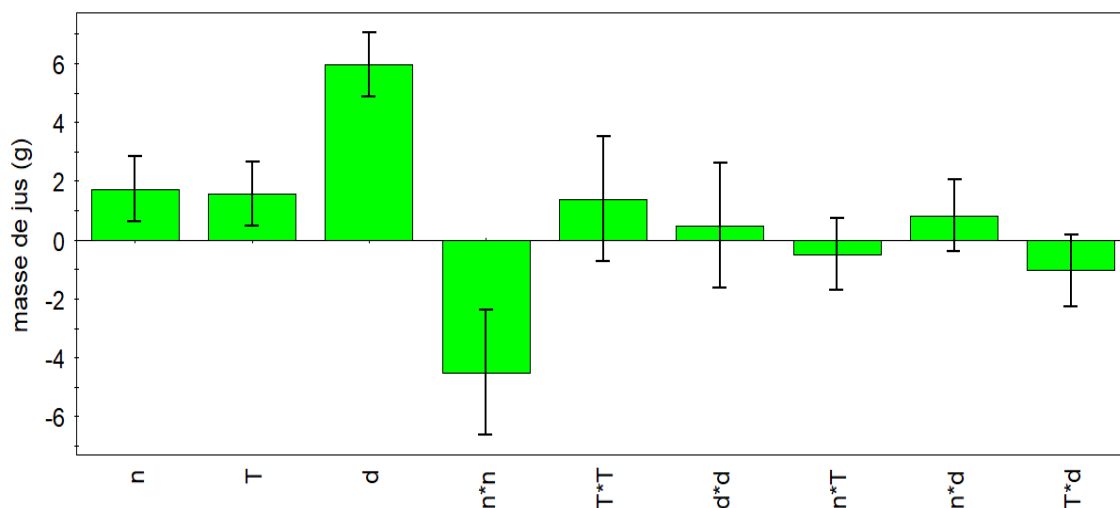


Fig.4.6. Tracé des effets des facteurs du modèle de la masse de jus

Pour l'absorbance, le tracé du degré d'influence des facteurs montre que la distance inter-électrodes est aussi le facteur le plus significatif mais de façon négative. En effet, l'absorbance en bétanine du jus extrait diminue pour des distances élevées. Etant donné que ces dernières nous ont déjà montré, qu'elles permettent une augmentation des quantités de jus extrait. Ceci peut engendrer une augmentation du taux d'eau dans le jus de betterave, vu que ce dernier est très riche en eau (plus de 70 %), ce qui réduit l'absorbance en bétanine du jus.

L'effet du nombre d'impulsion est d'une importance moindre mais toujours négatif sur cette réponses. Alors que celui de la durée des impulsions est non significatif on peut même dire nul. Cependant, les interactions de la durée d'impulsion avec le nombre d'impulsion et la distance inter-électrodes sont significatives et ont respectivement un effet négatif et positif sur la réponse.

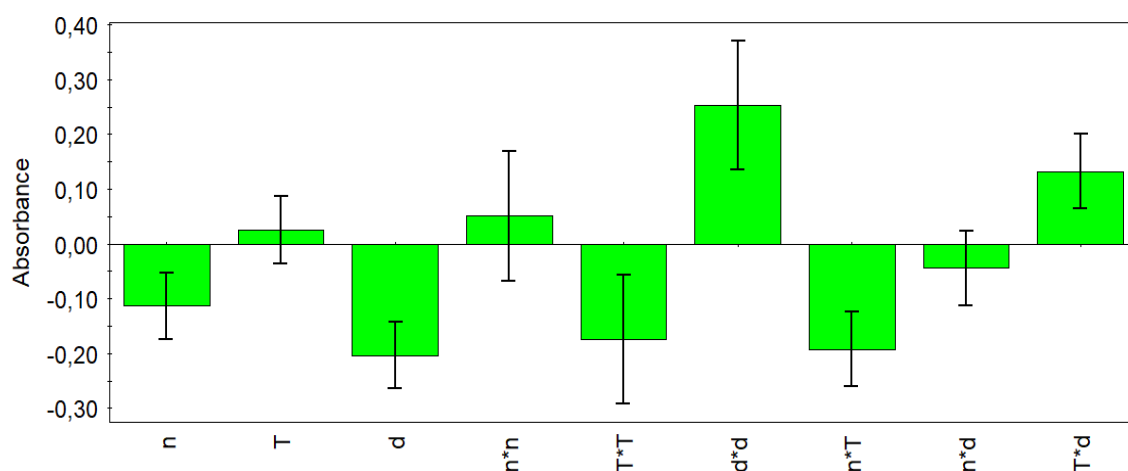


Fig.4.7. Tracé des effets des facteurs du modèle de l'absorbance

En ce qui concerne l'énergie, le tracé du degré d'influence des facteurs montre que les trois facteurs influent positivement sur la réponse. La distance inter-électrodes

est le facteur le plus influent, ce qui est logique. Car, pour garder le champ électrique constant (2 kV/cm), il a fallu à chaque fois qu'on utilise des grandes distances, augmenter la tension. Comme pour l'absorbance, les interactions de la durée d'impulsion avec le nombre d'impulsion et la distance inter-électrodes sont significatives et ont un effet positif sur la réponse.

Les effets du modèle mathématique de l'énergie sont tous significatifs et positifs pour n, T et D car l'énergie délivrée pendant le traitement CEP est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{1}{2} n C V^2 \quad (4.7)$$

Plus élevées sont les valeurs de n, T (donc C) et D (donc V), plus grande est l'énergie consommée.

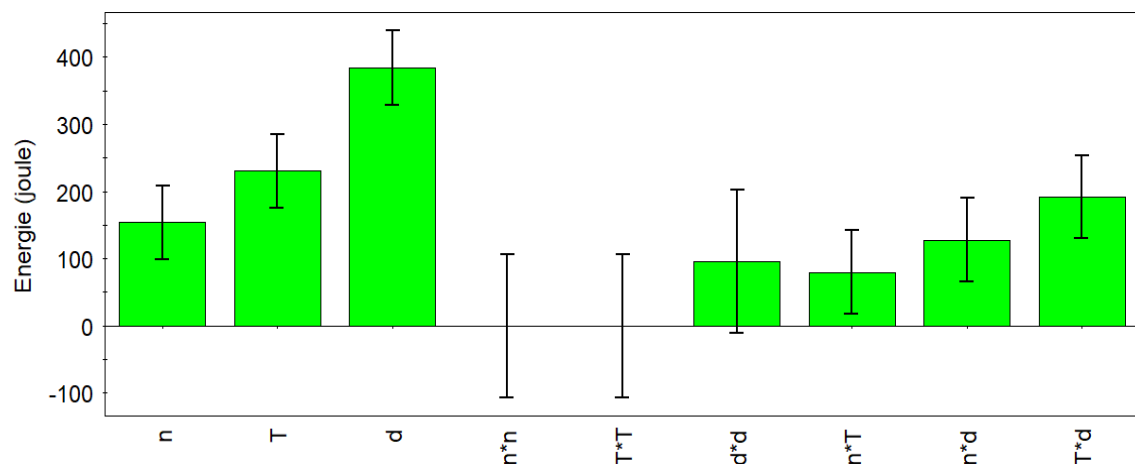


Fig.4.8. Tracé des effets des facteurs du modèle de l'énergie

Selon ce modèle, l'optimum du processus proposé par MODDE 5.0 qui donne les valeurs optimales des facteurs pour obtenir un rendement maximal du procédé d'extraction est présenté par les figures 4.9 et 4.10.

La figure 4.9 présente les valeurs optimales des facteurs analysés, qui permettent d'obtenir un rendement maximal en termes de quantité de jus extrait et de son absorbance en bétanine, sans tenir compte de l'énergie consommée dans le traitement par CEP.

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit		Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	nombre d'impulsions	Free		40	80	1	masse de jus	Maximize	1	52,9587	54,8589	
2	Durée d'impulsion	Free		20	60	2	Absorbance	Maximize	1	1,28245	1,3654	
3	Distance inter-électrodes	Free		1	3	3	Énergie	Exclude				

Iteration:	5002	Iteration slider:	
------------	------	-------------------	--

	1	2	3	4	5	6	7	8	
	nombre d'impulsions	Durée d'impulsion	Distance inter-électrodes	masse de jus	Absorbance	Énergie	iter	log(D)	
1	42,0121	53,0308		1	40,1132	1,2896	51,1155	5001	1,4847
2	48,3156	59,9765		3	53,0773	1,0159	1074,71	5001	0,9693
3	75,6281	25,4816		1	39,0764	1,289	42,7501	5000	1,543
4	48,2977	59,972		3	53,0699	1,0162	1074,3	5002	0,9686
5	48,2771	59,999		3	53,0671	1,0166	1074,43	5000	0,9679
6	75,6281	25,4816		1	39,0764	1,289	42,7501	5000	1,543
7	48,2854	59,9949		3	53,0695	1,0164	1074,51	5000	0,9682
8	48,2767	59,9999		3	53,0672	1,0166	1074,44	5000	0,9679

Fig.4.9. Valeurs optimales proposées par MODDE 5.0 (Sans tenir compte de l'énergie)

Ainsi, le rendement maximal du procédé donné par le logiciel MODDE 5.0 avec une masse de jus de 53,06 g et une absorbance en bétanine de 1,01 a été obtenu pour un nombre d'impulsion de 48, une durée d'impulsion de 60 μs et une distance inter-électrodes de 3 cm. L'énergie consommée dans ce cas est de 1074,43 joules.

Le même raisonnement peut être fait pour la figure 4.10, qui présente les valeurs optimales des facteurs analysés pour obtenir un rendement maximal en termes de quantité de jus extrait et de son absorbance en bétanine, pour une consommation minimale de l'énergie du traitement par CEP.

	Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit		Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	nombre d'impulsions	Free		40	80	1	masse de jus	Maximize	1	52,9587	54,8589	
2	Durée d'impulsion	Free		20	60	2	Absorbance	Maximize	1	1,28245	1,3654	
3	Distance inter-électrodes	Free		1	3	3	Énergie	Minimize	1		79,0394	85,4405

Iteration:	5001	Iteration slider:	
------------	------	-------------------	--

	1	2	3	4	5	6	7	8	
	nombre d'impulsions	Durée d'impulsion	Distance inter-électrodes	masse de jus	Absorbance	Énergie	iter	log(D)	
1	42,1339	52,8179		1	40,1145	1,2896	51,9412	5000	1,3085
2	48,2328	59,9875		3	53,0488	1,0175	1073,42	5001	3,9058
3	75,6276	25,4759		1	39,0765	1,289	42,7221	5000	1,3669
4	48,2738	59,946		3	53,0564	1,0168	1073,38	5001	3,9058
5	48,2361	59,9938		3	53,0511	1,0174	1073,59	5001	3,906
6	75,6276	25,4759		1	39,0765	1,289	42,7221	5000	1,3669
7	48,2369	59,9918		3	53,051	1,0174	1073,57	5000	3,9059
8	48,2357	59,993		3	53,0508	1,0174	1073,57	5001	3,9059

Fig.4.10. Valeurs optimales proposées par MODDE 5.0 (Avec minimisation de l'énergie)

Ainsi, le rendement maximal du procédé donné par le logiciel MODDE 5.0 avec une masse de jus de 40,11 g et une absorbance en bétanine de 1,28 a été obtenu pour un nombre d'impulsion de 42, une durée d'impulsion de 52 μs et une distance inter-électrodes de 1 cm. L'énergie consommée dans ce cas est de 51,94 joules.

A titre comparatif, les valeurs optimales proposées pour les deux cas (avec et sans énergie), sont représentées dans le tableau 4.2.

Tableau.4.2. Comparaison entre les valeurs optimales données par MODDE 5 avec et sans minimisation de l'énergie

Facteurs et réponses	Avec considération de l'énergie	Sans considération de l'énergie
Nombre d'impulsions	42	48
Durée d'impulsion (μs)	52	60
Distance inter-électrodes (cm)	01	03
Masse de jus (g)	40,11	53,06
Absorbance	1,28	1,01
Energie (joule)	51,94	1074,43

On peut constater qu'une prise en compte de l'énergie pour optimiser le procédé d'extraction permet certes d'avoir une économie d'énergie significative mais avec un rendement inférieur. En effet, l'optimisation avec une énergie minimale a permis d'obtenir un rendement maximal de la masse de jus égal à 40,11 g et une absorbance en bétanine égale à 1,28, ce qui représente 12,95 g par rapport à celui où l'énergie n'a pas été prise en considération. Autre remarque très importante, le meilleur rendement du procédé d'extraction du jus de betterave traité par CEP a été obtenu avec la distance inter-électrodes la plus élevée (3 cm) mais avec une consommation d'énergie importante. Par contre, pour la plus petite distance inter-électrodes (1 cm), c'est un rendement moyen qui a été obtenu mais avec une consommation d'énergie beaucoup plus faible.

Les courbes de prédiction de la variation de la masse de jus et de l'absorbance en fonction des trois facteurs choisis sont respectivement présentées dans les figures 4.11 et 4.12.

Les courbes de prédiction de la masse de jus confirment les résultats précédents, à savoir que la distance inter-électrodes est le facteur le plus important. En effet, on constate une grande augmentation de la quantité du jus extraite prédite pour une distance inter-électrodes de 3 cm (53g) par rapport à une distance de 1 cm (42g). On peut donc déduire que pour un champ électrique constant la masse de jus est pratiquement proportionnelle à la distance inter-électrodes. En ce qui concerne, le nombre d'impulsions, on remarque que l'optimum de la masse de jus prédite a été obtenu avec 60 impulsions, alors qu'une diminution du rendement est observée pour 80 impulsions. Ce qui nous a conduit à opter pour un choix optimal du nombre des impulsions afin d'éviter un effet négatif sur la réponse et un excès d'énergie. Enfin, on remarque que la masse de jus prédite est proportionnelle à la durée d'impulsion, même si cette dernière reste un facteur peu significatif.

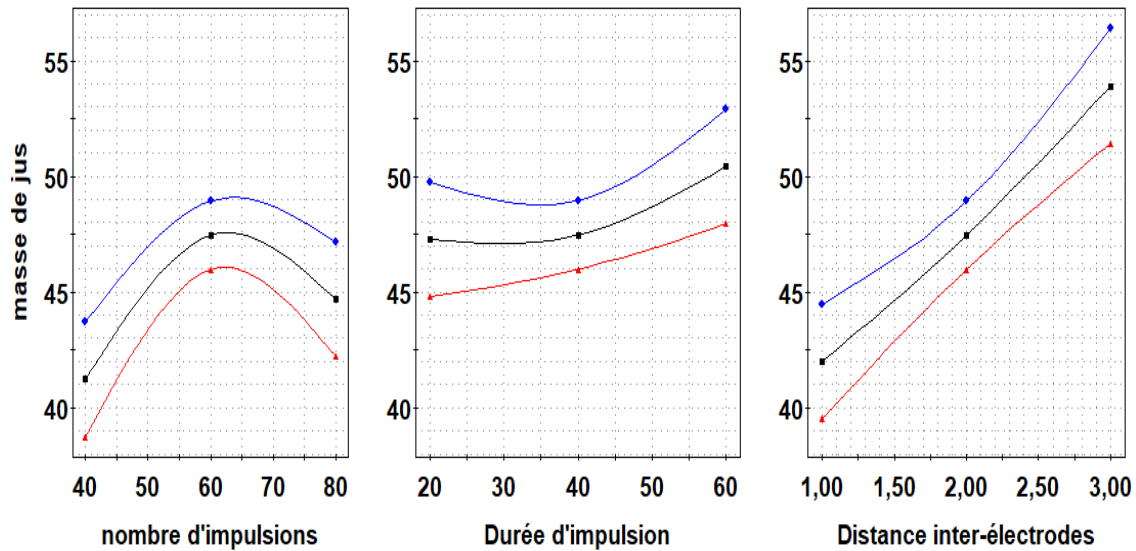


Fig.4.11. Courbes de prédiction de la masse de jus extrait

D'après les courbes de l'absorbance prédite montrées à la figure 4.12, on peut constater que contrairement à la masse du jus, l'absorbance en bétanine du jus extrait est inversement proportionnelle avec la distance inter-électrodes et le nombre d'impulsions. Ceci peut être expliqué par le fait que le jus de betterave contient une grande quantité d'eau, donc l'augmentation de la masse de jus entraîne une augmentation de la quantité d'eau et donc une légère diminution de la concentration en bétanine. Comme pour la masse de jus, nous remarquons que la durée d'impulsion est un facteur peu significatif sur la réponse.

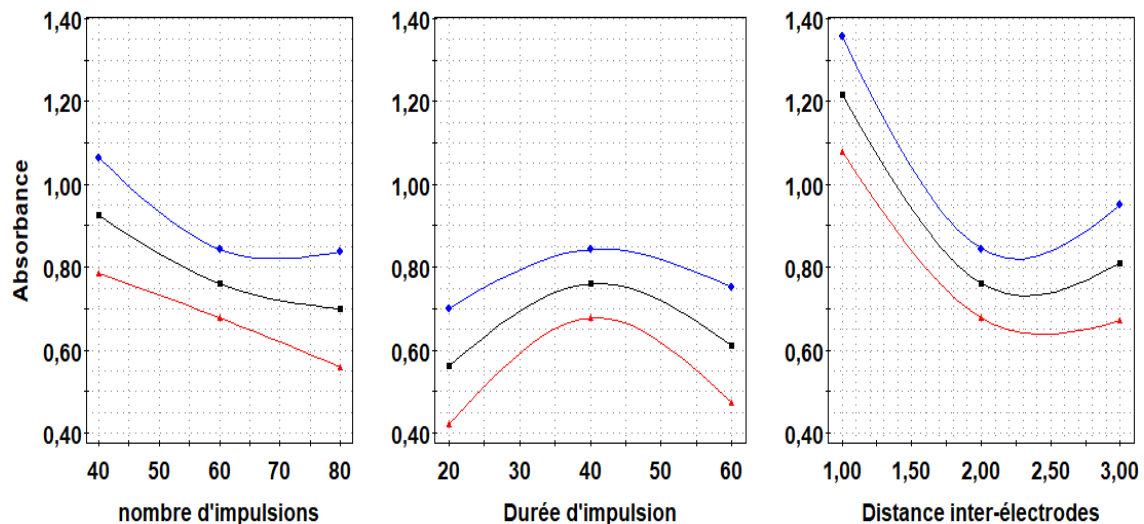


Fig.4.12. Courbes de prédiction de l'absorbance

Les figures 4.13 et 4.14 montrent les contours d'iso-réponses respectifs obtenus avec le présent modèle pour la masse de jus extrait et de l'absorbance, et ce pour une durée d'impulsion $T = 40 \mu s$.

On peut constater que le rendement maximal en termes de masse de jus qui est de 52,8g, a été obtenu avec la plus grande distance inter-électrodes (3cm) et un nombre d'impulsions compris entre 55 et 75. Ceci confirme que pour une certaine valeur de champ électrique fixe, plus la distance inter-électrodes est grande plus le rendement en termes de quantité de jus est meilleur. De plus, le nombre d'impulsion doit être bien choisie afin d'assurer un bon traitement et d'éviter tout excès ou perte d'énergie.

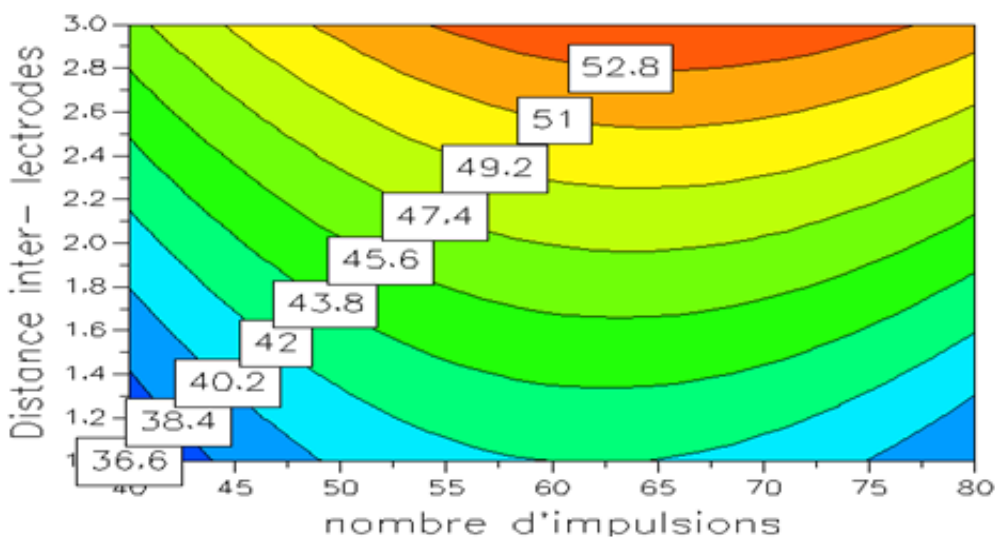


Fig.4.13. Courbe iso-réponses des facteurs V et n obtenues pour la masse de jus (T= 40 μs)

Pour l'absorbance, un rendement maximal de 1,2 a été obtenu avec la plus faible distance inter-électrodes (1 cm) et un nombre d'impulsions compris entre 40 et 48 (Fig.4.14).

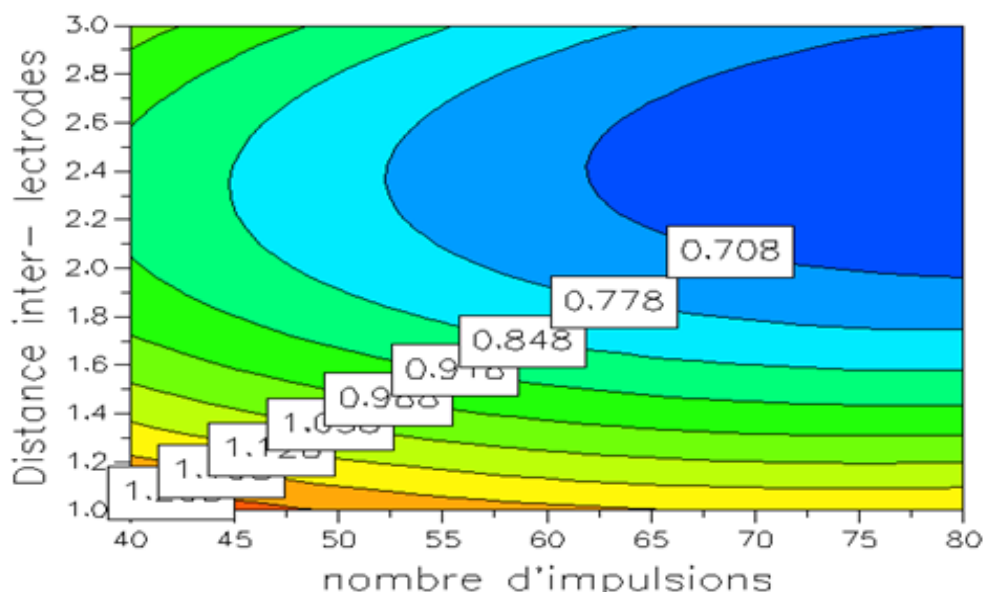


Fig.4.14. Courbe iso-réponses des facteurs V et n obtenues pour l'absorbance (T= 40 μs)

Les figure 4.15 et 4.16 montrent respectivement les contours d'iso-réponses obtenus avec le présent modèle pour la masse de jus extrait et l'absorbance, pour un nombre d'impulsions $n=60$.

Le même constat, peut se faire pour le cas de la masse du jus, pour laquelle une valeur optimale de 54.3 g a été obtenue avec une distance inter-électrodes de 3 cm et une durée d'impulsion comprise entre 50 et 60 μ s.

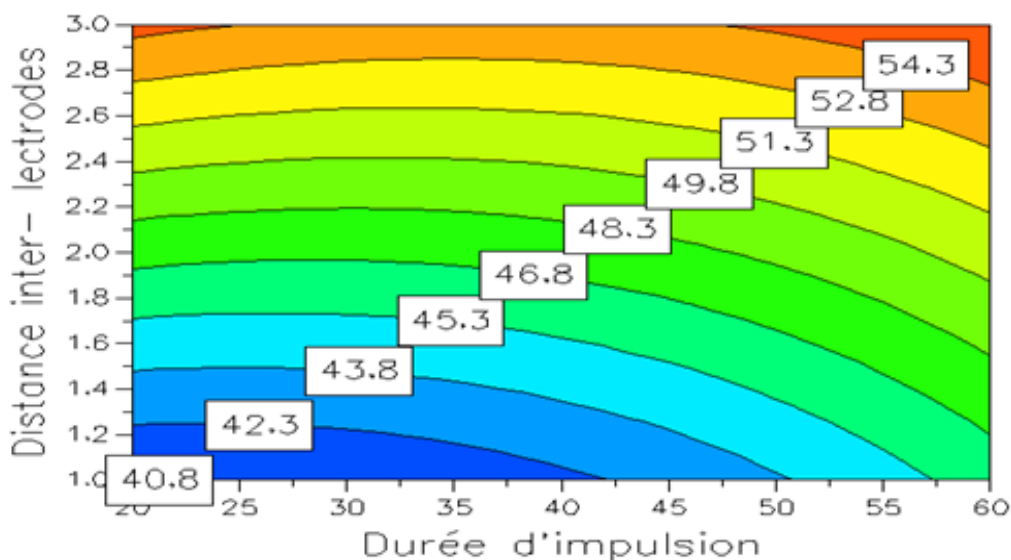


Fig.4.15. Courbe iso-réponses des facteurs V et T obtenues pour la masse de jus ($n = 60$)

Alors que pour l'absorbance c'est avec la chambre de traitement qui possède la plus petite distance inter-électrodes de 1 cm que le meilleur rendement (1,15) a été obtenu.

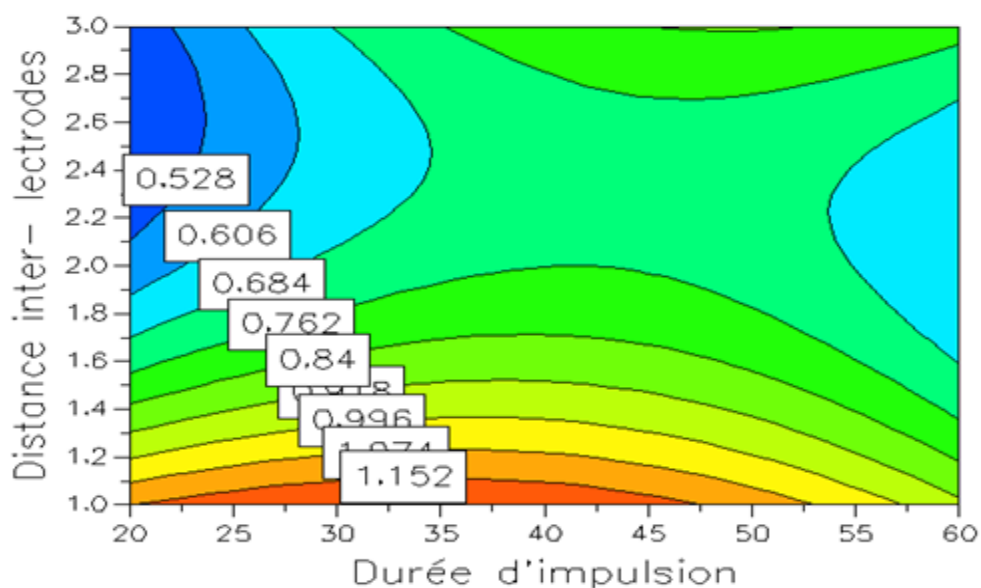


Fig.4.16. Courbe iso-réponses des facteurs V et T obtenues pour l'absorbance ($n = 60$)

Les résultats montrés par les courbes de prédiction ainsi que les contours iso-réponses ont confirmé que la masse de jus est pratiquement proportionnelle à la distance inter-électrodes. En effet, l'utilisation de la chambre de traitement ayant une distance inter-électrodes $D = 3$ cm, a permis d'avoir une augmentation de la quantité de jus extraite en dépit d'une diminution minimale de l'absorbance en bétanine.

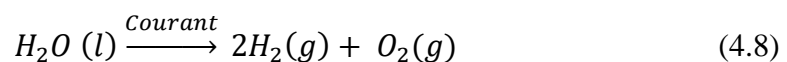
Du fait que dans un procédé d'extraction, la quantité de jus extraite est la réponse la plus importante, et que la technologie de traitement par CEP est essentiellement utilisée pour augmenter la quantité de jus extrait. On peut dire que les résultats obtenus ne peuvent que confirmer que l'utilisation des chambres de traitement avec des distances inter-électrodes élevées améliore le rendement du traitement par CEP.

Et dire encore que d'après les différentes interprétations et analyses des résultats obtenus que ce sont les facteurs de traitement de CEP qui sont pratiquement proportionnels au rendement de jus extrait jusqu'à une valeur seuil à partir de laquelle une augmentation d'un facteur provoque un excès de l'énergie fournie à l'aliment, ce qui influe par la suite négativement sur le taux d'extraction de jus. Cela peut être dû par le déclenchement thermique produit dans l'aliment, ce qui nous amène à proposer des hypothèses suivantes expliquant la diminution de rendement en jus :

1) Probabilité de l'évaporation des molécules d'eau contenues dans le tissu de la carotte sous l'effet de la température.

2) Les interactions chimiques de molécules qui composent le tissu de la carotte avec les molécules d'eau (H_2O) (phénomène d'hydrolyse des protéines, des acides nucléiques ou des polysaccharides...) catalysées par des enzymes sous l'effet de la température présente dans l'aliment.

3) L'électrolyse de l'eau est un procédé électrolytique qui décompose l'eau en dioxygène et dihydrogène gazeux avec l'aide de courant électrique généré lors de traitement par CEP. Le courant électrique dissocie la molécule d'eau (soit H_2O) ce qui donne l'équation de décomposition par électrolyse suivante :



Par conséquent, un choix approprié des valeurs des facteurs de traitement pour l'extraction de jus est indispensable pour éviter toute élévation de la température et permettre un traitement efficace pour un résultat optimal. Ainsi donc, la technologie de CEP est une technologie de traitement athermique.

4.4. Conclusion

Une étude expérimentale du procédé d'extraction du jus de betterave par CEP a été présentée dans ce chapitre. Pour cela, trois chambres de traitement statiques de forme cylindrique avec des distances inter-électrodes différentes ont été utilisées. Le but étant de déterminer l'influence de la distance inter-électrodes dans les procédés d'extraction par CEP.

La méthodologie des plans d'expériences a été utilisée dans ce travail par l'élaboration d'un plan factoriel fractionnaire où la distance inter-électrodes d a été considérée comme facteur.

Les résultats du plan CCF réalisé sont satisfaisants, puisque cela nous conduit à des modèles mathématiques validés. Pour les mêmes conditions expérimentales, la chambre de traitement avec la plus grande distance inter-électrodes a permis d'avoir le meilleur rendement en termes de quantité de jus extrait. Alors que celle ayant la plus petite distance entre les électrodes c'est surtout une économie considérable d'énergie mais avec un rendement faible en termes de masse de jus.

Le chapitre suivant sera consacré pour la réalisation d'un générateur de CEP à base de semi-conducteurs.

Chapitre 5

Réalisation de Générateur de Marx à Semi-conducteurs

Chapitre 5 : Réalisation de Générateur de Marx à Semi-conducteurs

5.1. Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance, les appareils à semi-conducteurs deviennent de plus en plus adaptés à l'application de puissance pulsée. Ils pourraient fournir aux systèmes de puissance pulsés une compacité, une fiabilité, un taux de répétition élevé et une longue durée de vie. Le développement des générateurs de puissance pulsés utilisant des semi-conducteurs est une solution pour remédier à certaines limites des composants conventionnels, et permet une adaptation de la technologie de puissance pulsée à l'échelle industrielle et commerciale. Cependant, les dispositifs de commutation à semi-conducteurs tels que le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) ne sont actuellement disponibles que jusqu'à quelques kilos volts. La plupart des systèmes à impulsions nécessitent des tensions plus élevées.

Le présent travail est relatif au développement de générateurs de Marx. Car, leur principal avantage est d'amplifier la tension, ce qui permet d'atteindre des niveaux de tension très élevées. Pour cela, deux générateurs ont été réalisés.

Un générateur de Marx de tension négative a été développé au niveau du *laboratoire de biocybernétique de la faculté de génie électrique de l'Université de Ljubljana* (Slovénie). En effet, Un prototype à quatre étages a été construit en utilisant des IGBTs de 1200 V et des condensateurs de 10 μF .

Un autre Générateur de Marx de tension positive a été réalisé au niveau du *Laboratoire du Groupe de Recherche des Puissances Pulsées GIA²P², Institut d'Ingénierie de Lisbonne ISEL (Portugal)*. Il comprend trois étages et a été construit en utilisant des IGBTs de 1200 V et des condensateurs de 1 μF . Ces deux générateurs sont polyvalents vu que plusieurs paramètres peuvent être contrôlés et qu'on peut faire varier tels que le niveau de tension, la fréquence et la largeur d'impulsion.

5.2. Principe du Générateur de Marx

Le principe de la production d'énergie pulsée est d'abord de stocker l'énergie électrique dans un condensateur de stockage, et de la délivrer en un temps bref à une charge en utilisant un commutateur. Le générateur de Marx est un circuit unique destiné à la multiplication de la tension, et son fonctionnement est basé sur la charge des condensateurs (C) en parallèle et leur décharge en série dans la charge. La topologie du circuit est représentée sur la figure 5.1. Cet arrangement a été à l'origine proposé par Erwin Otto Marx en 1923. Le générateur Marx est un circuit destiné à la multiplication de la tension, dans lequel les éclateurs (S) sont généralement utilisés

comme commutateurs et des résistances (R) comme isolateurs. Malheureusement, ce type de générateur est peu utilisé puisqu'il présente certains inconvénients comme celui d'avoir un faible taux de répétitions, une courte durée de vie et surtout son inefficacité.

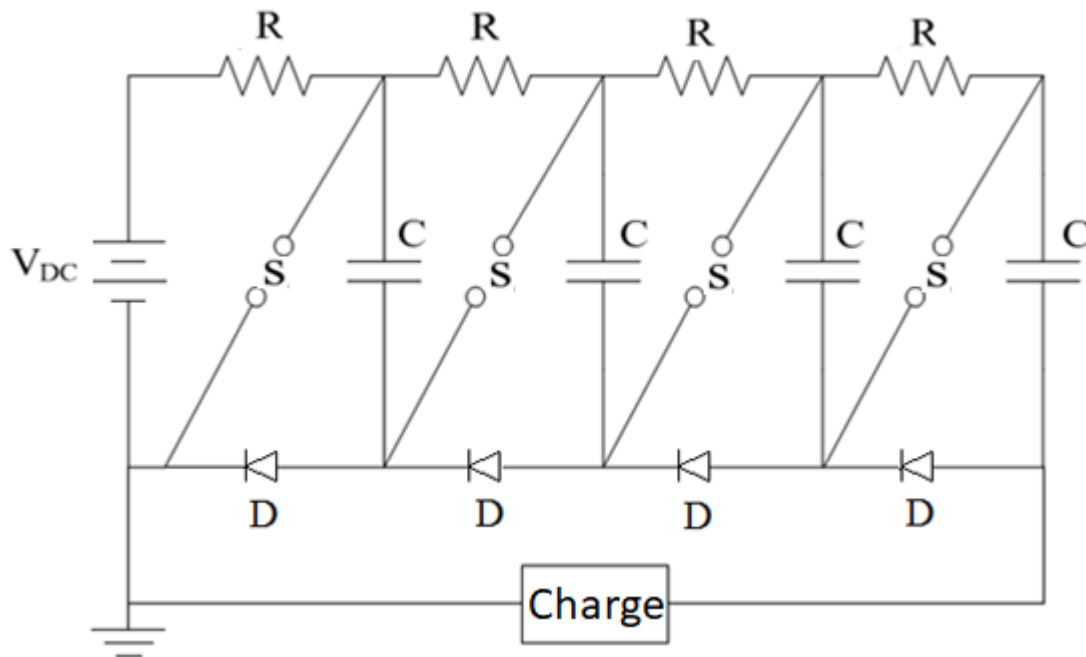


Fig.5.1. Schéma de principe du générateur de Marx

Le développement qu'a connu le domaine de l'électronique de puissance ces dernières années, a rendu possible la réalisation de générateurs de Marx à base de semi-conducteurs.

5.3. Réalisation d'un Générateur de Marx de tension négative à base de semi-conducteurs

Il se compose de trois parties (figure 5.2):

1. Partie de commande
2. Partie Pilote des IGBTs
3. Circuit de puissance



Fig.5.2. Différentes parties du Générateur de Marx à tension négative réalisé

5.3.1. Partie de commande

La partie de commande qui est souvent à base de microcontrôleur, émet des signaux rectangulaires qui assurent la commutation des IGBT à travers les pilotes (Drivers). Toutefois, dans notre cas, on a utilisé un générateur de fonction.

5.3.2. Partie pilote des IGBTs

Chaque semi-conducteur été muni d'un petit circuit, dont le rôle principal n'est pas seulement d'assurer l'alimentation du pilote avec une tension de 15V mais aussi permettre la transmission du signal de commande délivré par le générateur de fonction qui sera ensuite utilisé pour la commutation des IGBTs.

Il faut préciser que dans le but d'avoir une bonne protection, on a eu recours à une isolation galvanique pour le circuit proposé vu que deux circuits électriques ou plus sont connectés, alors que leurs masses doivent être à des potentiels différents. C'est pour cela, et pour mieux assurer ce type d'isolation entre les parties de commande et de puissance, que deux isolations distinctes ont été utilisées. L'une optique et une autre à base d'un convertisseur DC-DC comme c'est représenté dans les figures 5.3 et 5.4.

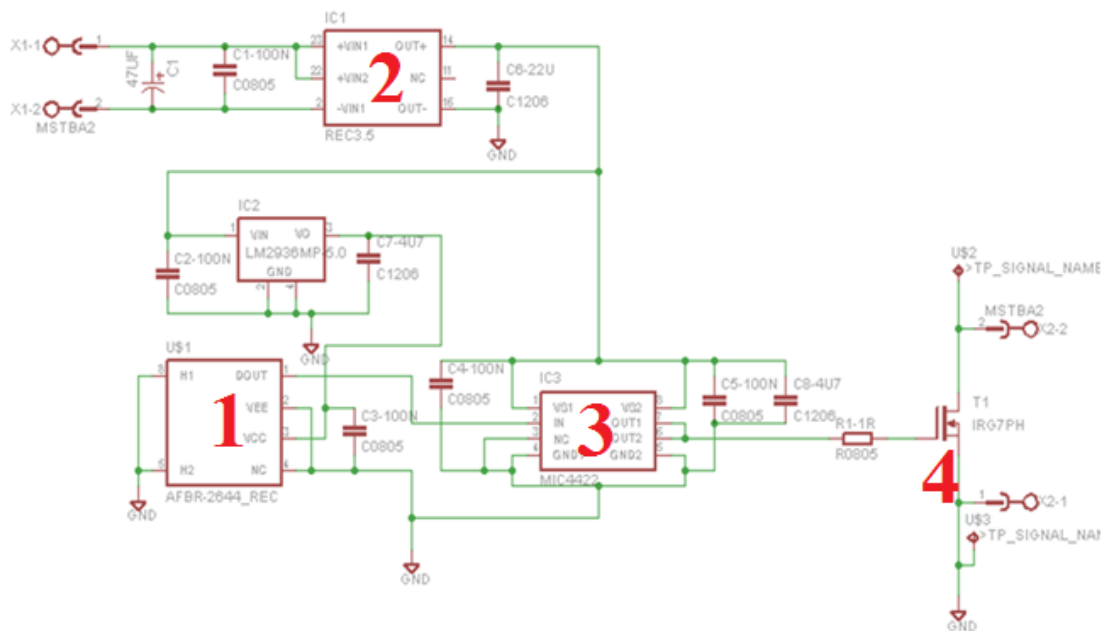


Fig.5.3. Schéma du circuit pilote des IGBTs



Fig.5.4. Circuit pilote des IGBTs

1- Fibre optique (Récepteur), 2- Convertisseur DC-DC, 3- Pilote de l'IGBT (Driver) 4- IGBT

5.3.3. Circuit de puissance

Afin de charger les condensateurs en série, deux configurations différentes ont été testées. L'une utilisant des résistances et l'autre des IGBTs. Les deux configurations sont présentées ci-dessous.

5.3.3.1. Charge des condensateurs en utilisant des résistances

La topologie utilisée est présentée sur la figure 5.5. Chaque étage du générateur comporte une résistance R , une diode D_c , un IGBT T_d et un condensateur C .

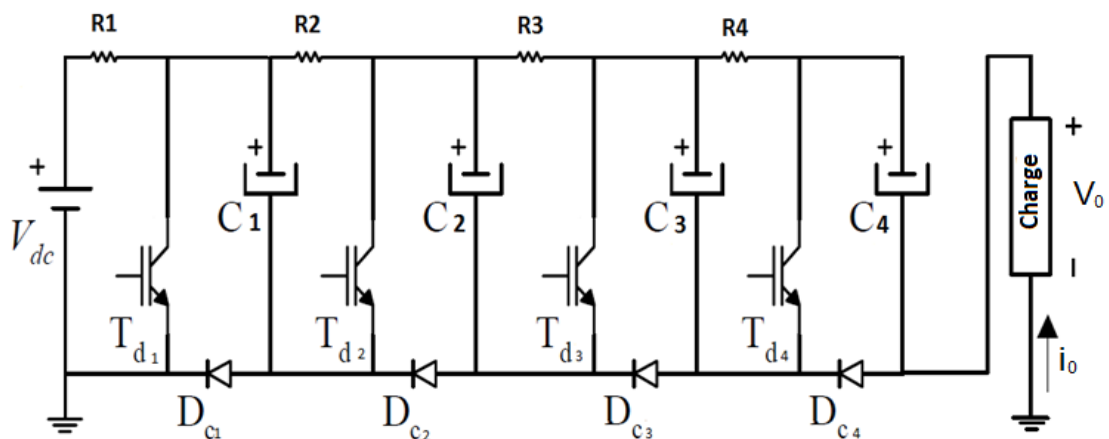


Fig.5.5. Générateur de Marx de tension négative utilisant des résistances pour charger les condensateurs

Lors de la phase de charge, les IGBTs ($T_{d1,2,3,...}$) sont ouverts, les condensateurs ($C_{1,2,3,...}$) sont connectés en parallèle et se charge avec la même tension V_{dc} à travers les résistances ($R_{1,2,3,...}$), comme présenté dans le schéma de la figure 5.6.

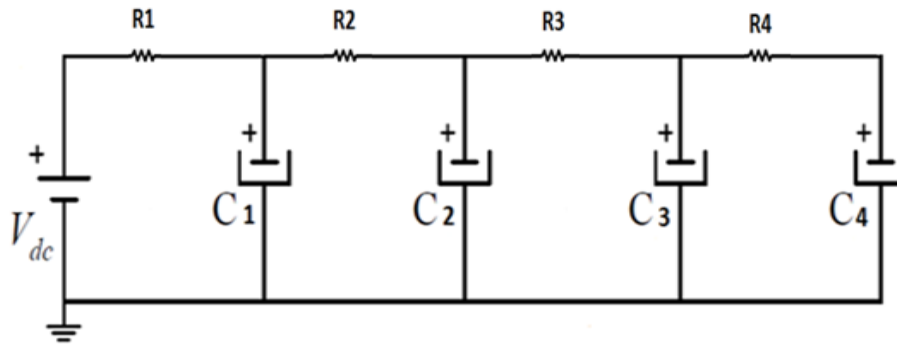


Fig.5.6. Charge des condensateurs en parallèle à travers les résistances (R_1 , R_2 , R_3 et R_4)

S'en suit l'étape de décharge, celle-ci est déclenchée dès que les IGBTs (T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} et T_{d4}) se ferment, comme montré dans le schéma de la figure 5.7, permettant la décharge en série des condensateurs vers la charge à travers la masse, ce qui explique pourquoi l'impulsion de sortie est négative.

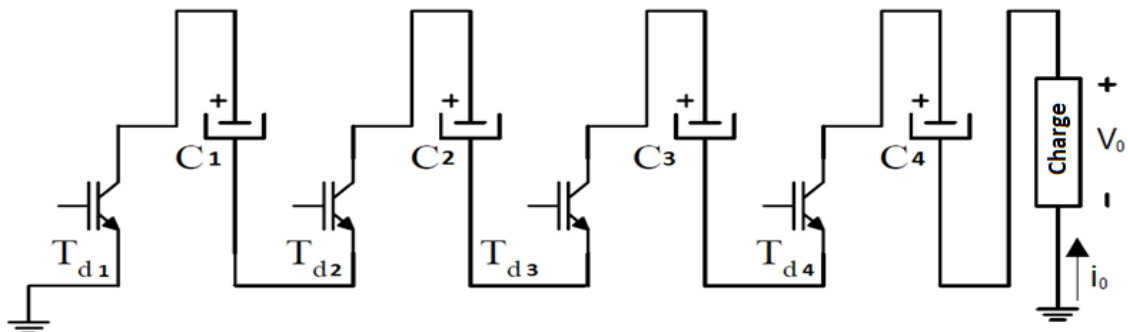


Fig.5.7. Décharge des condensateurs en série à travers les IGBTs (T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} et T_{d4})

La figure 5.8 représente une photographie du générateur de Marx réalisé, avec la configuration utilisant les résistances pour charger les condensateurs.

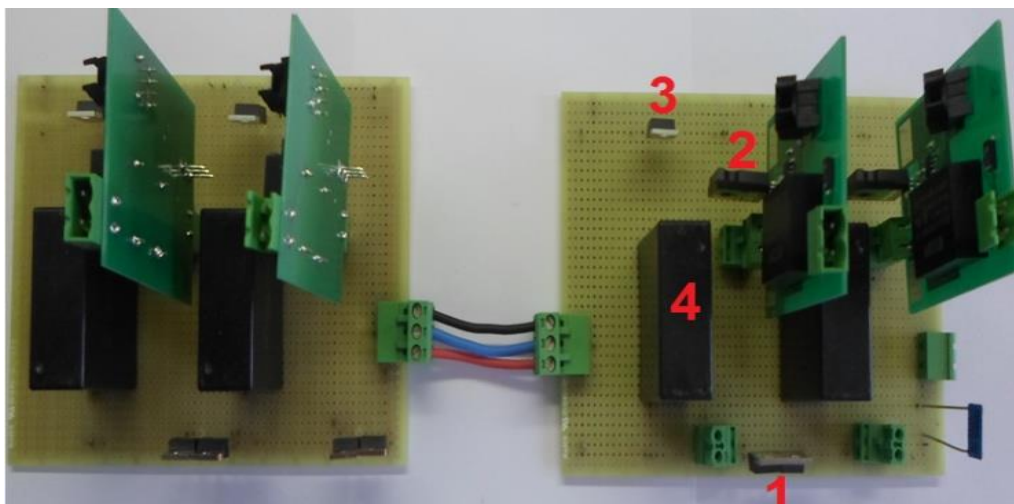


Fig.5.8. Générateur de Marx de tension négative réalisé utilisant des résistances pour charger les condensateurs (les quatre étages)

1- Résistance R, 2- Module IGBT (T_d), 3- Diode D_c , 4- Condensateur C

5.3.3.2. Charge des condensateurs en utilisant des IGBTs

La topologie utilisée est présentée sur la figure 5.9. Chaque étage du générateur comporte deux IGBTs (un pour la charge T_c et un autre pour la décharge T_d) une diode D_c et un condensateur C .

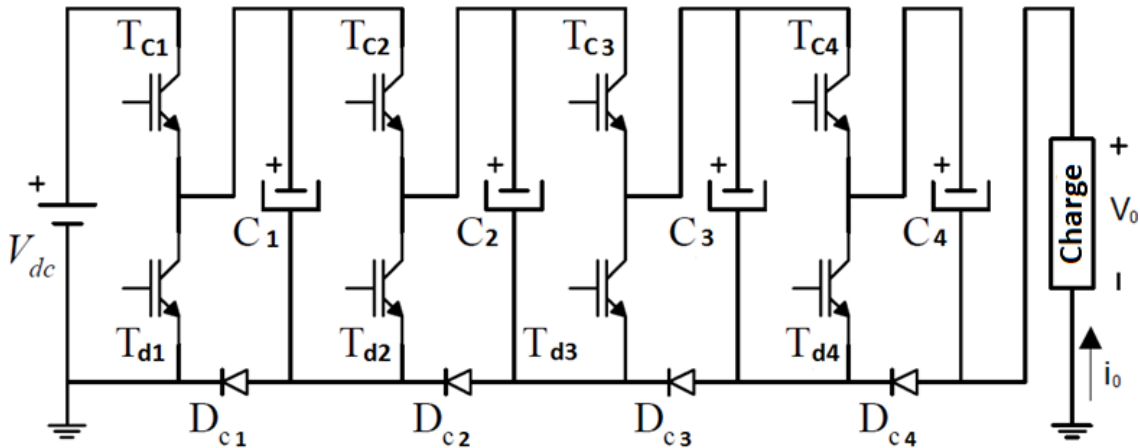


Fig.5.9. Générateur de Marx de tension négative utilisant des IGBTs pour charger les condensateurs

Lors de la phase de charge, les IGBTs T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} et T_{c4} sont fermés alors que T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} et T_{d4} sont ouverts, ce qui permet la connexion en parallèle des condensateurs (C_1 , C_2 , C_3 et C_4) qui se chargent avec la même valeur de tension V_{dc} , comme le montre le schéma de la figure 5.10.

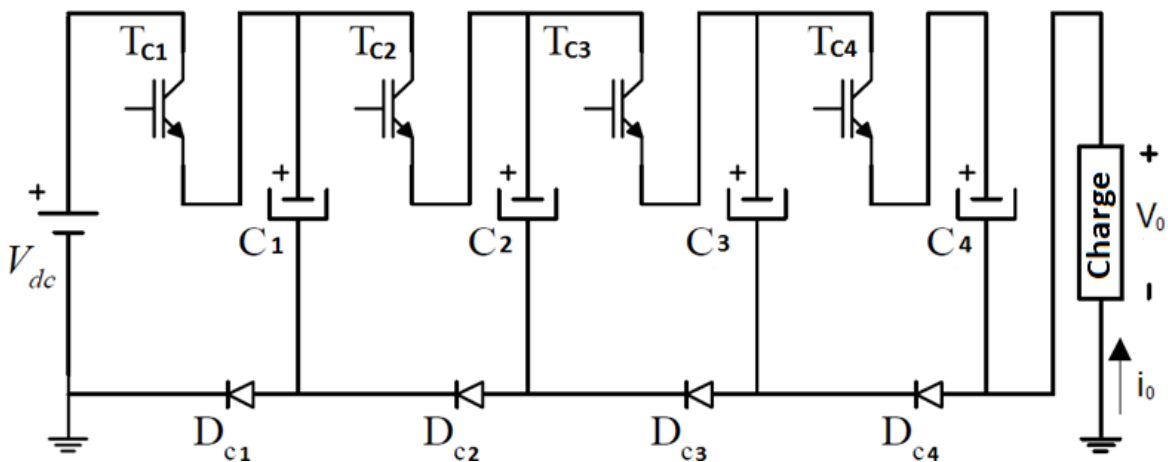


Fig.5.10. Charge des condensateurs en parallèle à travers les IGBTs (T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} et T_{c4})

La phase de décharge est un peu plus compliquée par rapport à celle décrite pour la première configuration. En effet, les IGBTs de charge (T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} et T_{c4}) s'ouvrent et les IGBTs de décharge (T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} et T_{d4}) se ferment, ce qui permet aux condensateurs de se décharger en série selon le même schéma de la première configuration présenté dans la figure 5.7. A noter qu'il faudrait qu'il y ait un temps de

retard entre l'ouverture des IGBTs de charge et la fermeture des IGBTs de décharge afin d'éviter l'apparition de court-circuit dans le générateur.

La figure 5.11 représente une photographie du générateur de Marx réalisé, avec la configuration utilisant les IGBTs pour charger les condensateurs.

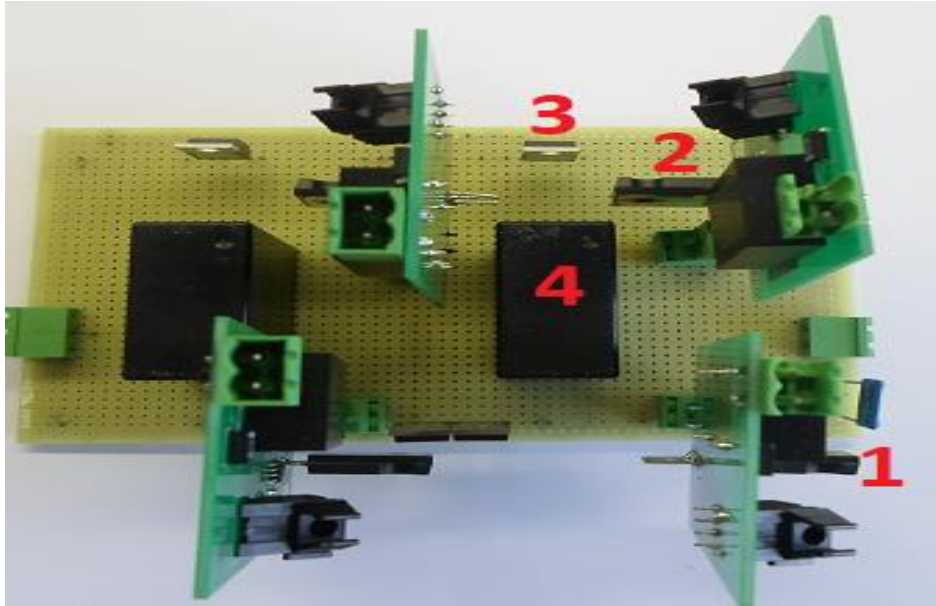


Fig.5.11. Générateur de Marx de tension négative réalisé utilisant des IGBTs pour charger les condensateurs (les deux premiers étages)
 1- Module IGBT (T_c), 2- Module IGBT (T_d), 3- Diode D_c , 4- Condensateur C

5.3.4. Résultats expérimentaux

Un prototype de laboratoire du circuit de générateur de Marx, avec quatre étages a été construit en utilisant des IGBT 1200V et des condensateurs de $10 \mu\text{F}$.

Ainsi, et afin de charger les condensateurs, deux différentes configurations ont été testées. L'une utilisant des résistances alors que dans l'autre, on y a ajouté à chaque étage, des modules d'IGBT amovibles. Leur rôle étant d'éliminer automatiquement les résistances en permettant ainsi aux condensateurs de se charger à travers eux.

Ce générateur est capable de fournir des impulsions de haute tension négatives qui peuvent atteindre jusqu'à 3,6 kV et une largeur d'impulsion de $30 \mu\text{s}$. Évidemment et pour des raisons de sécurité, on s'est limité à 900 V par étage. Le principal avantage du générateur Marx est la multiplication de tension. En effet, l'amplitude de l'impulsion est égale à la tension d'entrée V_{dc} multiplié par le nombre d'étages n du générateur ($V = -n V_{dc}$).

La figure 5.12 présente la forme de l'impulsion de sortie du générateur de Marx réalisé pour différentes valeur de tension d'alimentation V_{dc} (200V, 400V, 600V et 900V).

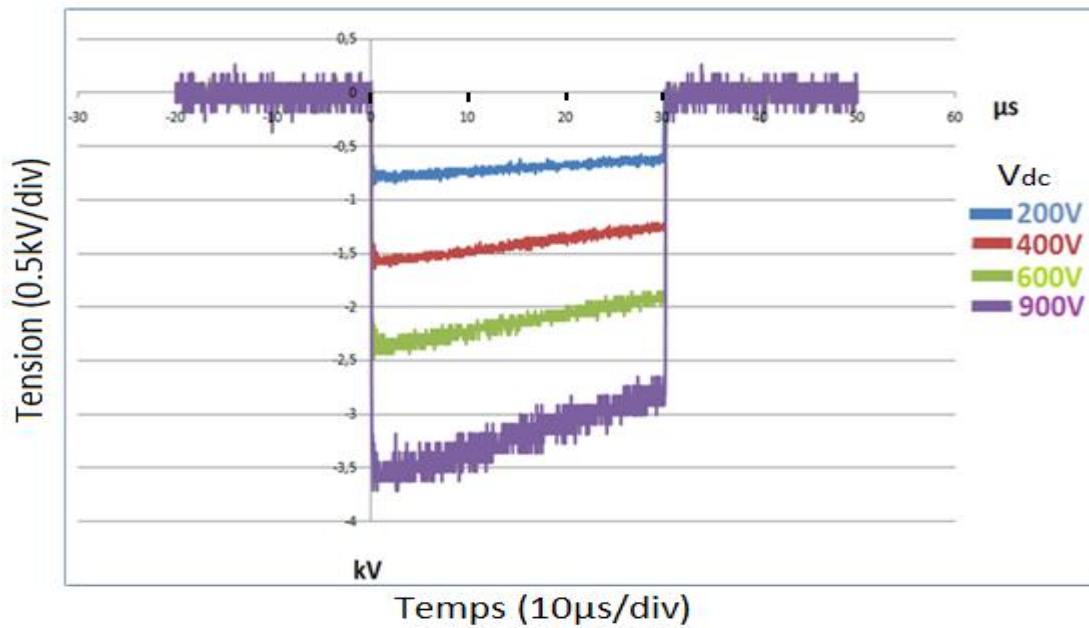


Fig.5.12. Forme de l'impulsion délivrée par le générateur de Marx réalisé

Et pour mieux montrer la différence qui existe entre les deux configurations utilisées lors de charge des condensateurs c'est-à-dire soit par le biais de résistances ou bien des IGBTs, les oscillogrammes de la tension aux bornes de l'un des condensateurs du générateur de Marx réalise ainsi que son impulsion de sortie, sont respectivement présentés dans les figures 5.13 et 5.14.

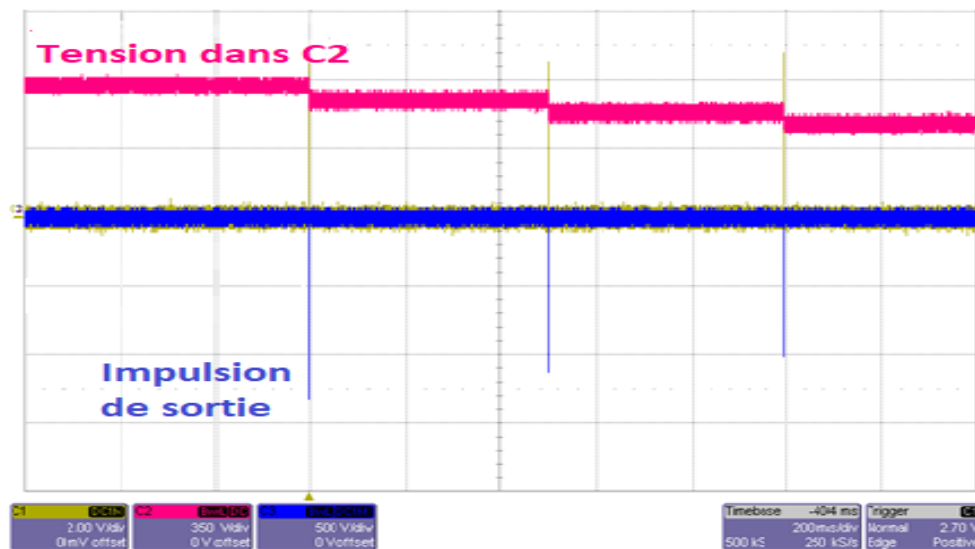


Fig.5.13. Oscillogramme de la tension aux bornes du condensateur C_2 et de l'impulsion de sortie pour le générateur de Marx utilisant les résistances pour charger les condensateurs

En ce qui concerne la première configuration, on peut constater que la tension au borne du condensateur C_2 n'est pas stable et diminue progressivement. Ce qui peut conduire à une chute de tension de l'impulsion de sortie. Ceci est expliqué par le fait que le condensateur n'a pas assez de temps pour être chargé à sa valeur maximale en raison de la chute de tension au borne de la résistance.

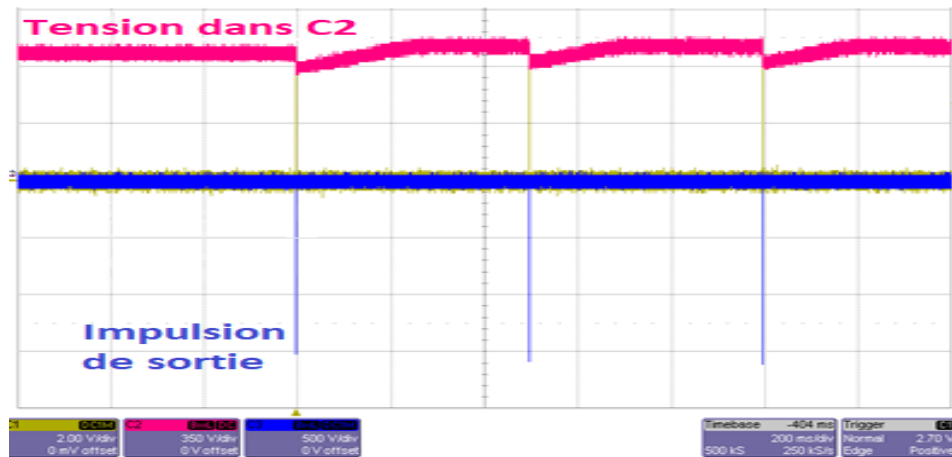


Fig.5.14. Oscillogramme de la tension aux bornes du condensateur C_2 et de l'impulsion de sortie pour le générateur de Marx utilisant les IGBTs pour charger les condensateurs

Contrairement à la première configuration, on peut constater que grâce à l'utilisation des IGBTs pour la charge des condensateurs, il y a eu une nette amélioration des signaux. En effet, cela est dû à une charge rapide des condensateurs grâce à la commutation très brève des IGBTs. Ceci se traduit par l'obtention d'une tension de sortie d'impulsions stables ainsi que des impulsions uniformes.

Enfin et bien que la première configuration soit plus économique en termes de coût de réalisation, les résultats obtenus ont montré que pour obtenir un bon fonctionnement du générateur de Marx avec des impulsions uniformes. Il est préférable d'utiliser des semi-conducteurs aussi bien pour la décharge que de la charge des condensateurs.

5.4. Réalisation d'un Générateur de Marx de tension positive à base de semi-conducteurs

La topologie du générateur Marx positif est représentée sur la figure 5.15. Chaque étage contient un condensateur, deux IGBTs et une diode. Comme pour le générateur de Marx négatif, il y a deux modes de fonctionnement: charge et décharge. Les condensateurs C_i sont chargés en parallèle à partir d'une alimentation de tension continue (U_{dc}), à travers des IGBTs T_{ci} et des diodes D_{ci} puis déchargés en série dans une charge par les IGBTs T_{di} pour générer des impulsions positives. Le générateur Marx est un circuit multiplicateur de tension, en effet la tension de sortie est égale à la tension d'entrée (U_{dc}) multipliée par le nombre d'étages.

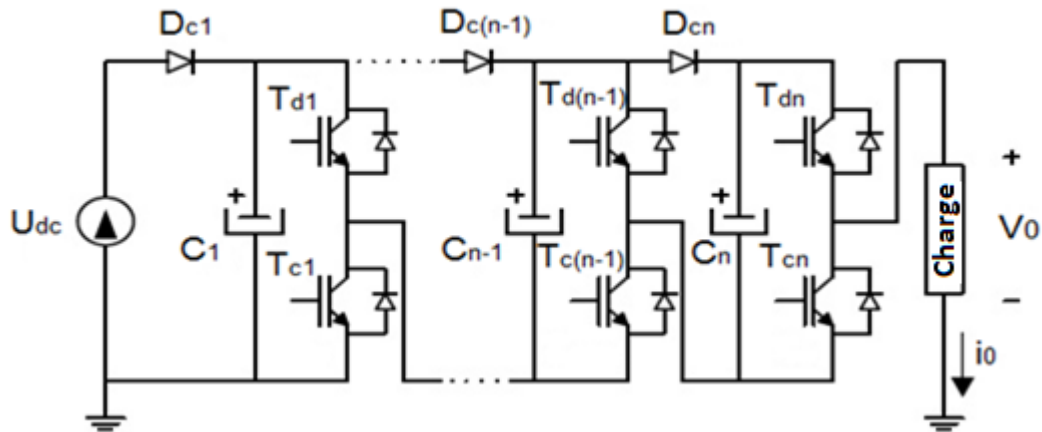


Fig.5.15. Topologie du Générateur de Marx de tension positive à base de semi-conducteurs

Afin d'assurer le charge des condensateurs, les IGBTs de charge (T_{ci}) doivent être fermés et ceux du décharge (T_{di}) ouverts. Ainsi, les condensateurs sont connectés en parallèle et se charge avec la tension d'entrée U_{dc} comme montré dans la figure 5.16.

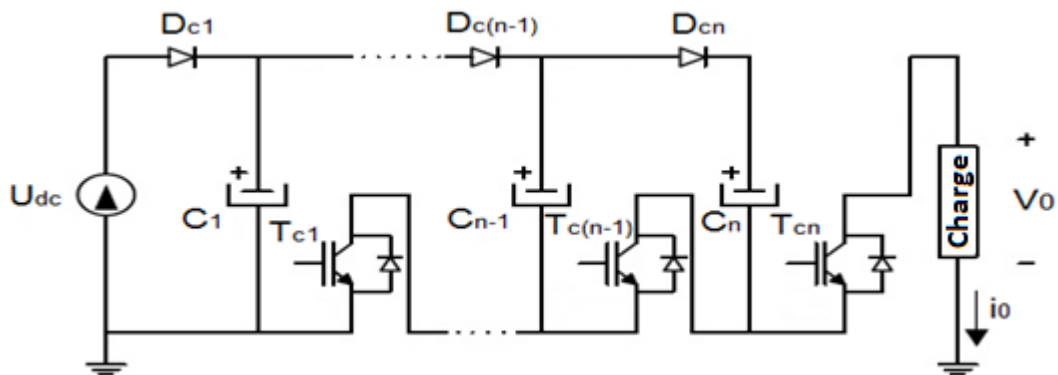


Fig.5.16. Charge en parallèle des condensateurs C_i du Générateur de Marx de tension positive

Pour la décharge des condensateurs, l'inverse se produit. En effet, les IGBTs de charge s'ouvrent et ceux de décharge se ferment. Cette fois-ci, les condensateurs sont connectés en série et se décharge vers la charge comme montré dans la figure 5.17.

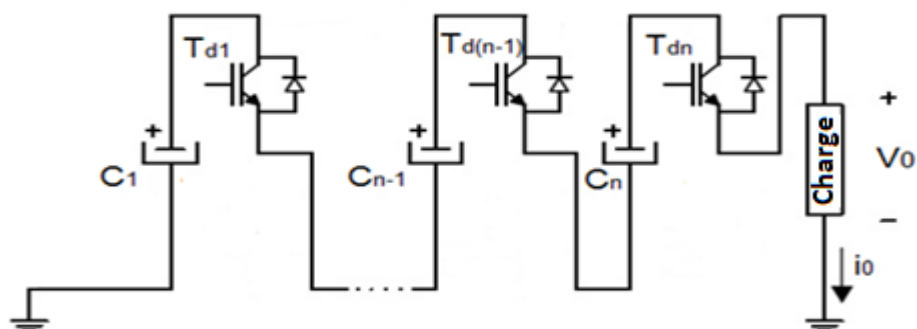


Fig.5.17. Décharge en série des condensateurs C_i du Générateur de Marx de tension positive

5.4.1. Système de commande

Le système de commande utilisé se compose de trois parties : le logiciel de programmation du microcontrôleur (MPLAB IDE v8.92), le dispositif de programmation (MPLAB ICD2) et enfin le circuit de commande comme le montre la figure 5.18.

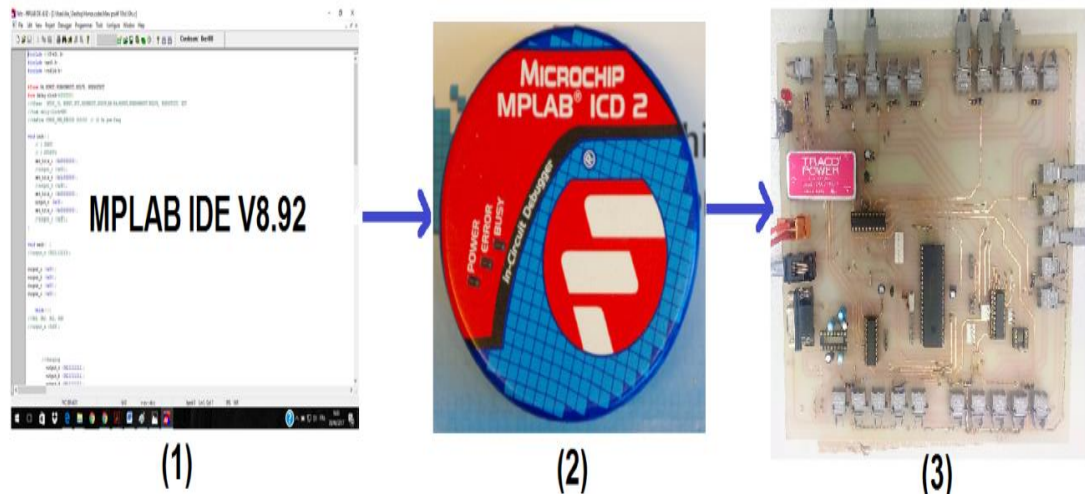


Fig.5.18. Système de commande du Générateur de Marx de tension positive
1- Logiciel MPLAB IDE V8.92, 2- MPLAB ICD2, 3- Circuit de commande

5.4.1.1. Logiciel de programmation MPLAB IDE

Dans le but de développer des applications pour les microcontrôleurs "Microchip" ainsi que pour les contrôleurs de signaux numériques, le logiciel MPLAB IDE qui fonctionne sous n'importe quel système d'exploitation que ce soit Windows, Mac OS ou bien Linux, a été utilisé. C'est ce qu'on appelle un environnement de développement intégré (IDE). Car, il permet non seulement d'obtenir un environnement intégré unique pour développer des codes pour les microcontrôleurs intégrés mais aussi la programmation des PICs dans différentes langages (Assembleur, C...). Notons que la version MPLAB IDE v8.92, est celle qui a été utilisés dans ce travail de thèse.

5.4.1.2. Programmeur MPLAB ICD2

Le MPLAB ICD2 est en même temps, un débogueur interrompu et un programmeur de Microchip. L'ICD 2 se connecte au PC de l'ingénieur via USB ou RS-232, et à l'appareil à travers ICSP.

L'ICD 2 prend en charge la plupart des périphériques PIC et dsPIC des familles PIC10, PIC12, PIC16, PIC18, dsPIC, rPIC et PIC32, et permet l'exécution à pleine vitesse des codes de programme. Aux points d'arrêts, la mémoire de données et de programme, peut être lue et modifiée à l'aide de l'IDE MPLAB. Le micro logiciel de l'ICD 2 peut à chaque fois, être mis à jour sur le terrain à l'aide de l'IDE MPLAB.

L'ICD 2 peut être utilisé pour effacer, programmer ou reprogrammer la mémoire du programme PIC MCU, pendant que l'appareil est installé sur le matériel cible, en utilisant ICSP. Des tensions de l'appareil cible de 2,0 V à 6,0 V sont prises en charge.

5.4.1.3. Description du circuit de commande utilisé

Un circuit de contrôle (figure 5.19) déjà réalisé au laboratoire a été utilisé pour notre générateur Marx de tension positive. Il comprend un microcontrôleur (PIC18F4431) qui a été programmé pour délivrer les signaux de contrôle (charge et décharge) des trois étages du générateur de Marx réalisé. Ces signaux sont ensuite inversés à travers un inverseur, et finalement transmis au circuit de puissance via la fibre optique.

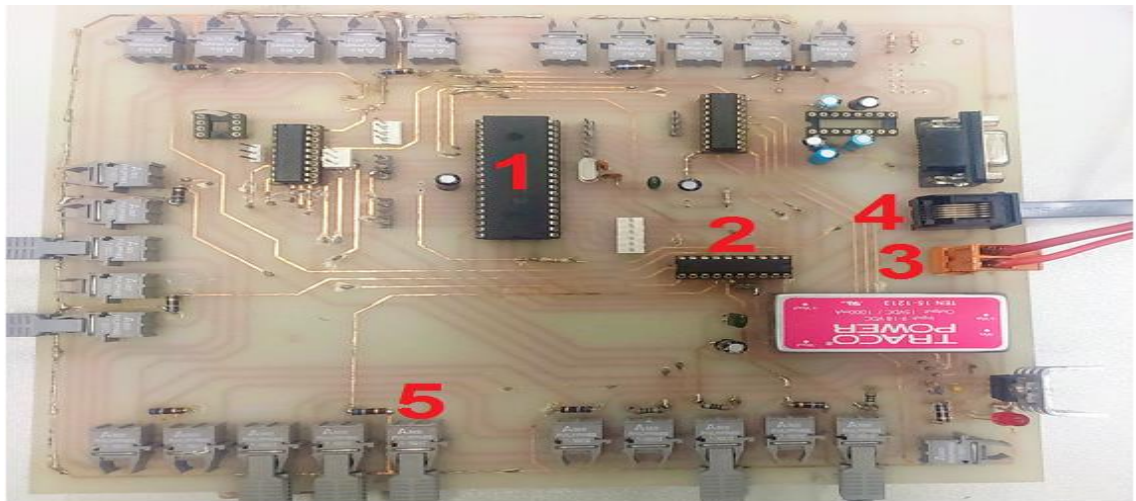


Fig.5.19. Circuit de commande utilisé

1- Pic 18F4431, 2- Inverseur, 3- Borne d'alimentation, 4- Fiche du programmeur,
5- Fibre optique émetteur T-1521Z

5.4.2. Techniques utilisées pour l'isolation

En plus de l'isolation galvanique assurée par l'utilisation de la fibre optique pour la transmission des signaux de commandes vers le circuit de puissance qui a été utilisé dans la réalisation du générateur de Marx négatif, on a fait appel à d'autres techniques d'isolation dans la réalisation du Générateur de Marx de tension positive.

5.4.2.1. Circuit "Bootstrap"

L'amorçage de l'IGBT se fait avec une valeur de tension comprise entre 12 V et 15 V et qui sera appliquée entre la grille et l'émetteur de l'IGBT. On a vu que chaque étage du Générateur de Marx de tension positive comporte deux IGBTs, donc il faut fournir cette tension d'amorçage pour les deux IGBTs. Elle doit être fournie par le pilote des IGBTs (Driver) via une alimentation de tension continue interne V_{DD} .

Mais le problème qui se pose dans le cas de la configuration adoptée pour le Générateur de Marx de tension positive, est que les deux IGBTs (T_c et T_d) n'ont pas la même masse. En effet, l'émetteur de T_d est connecté au collecteur de T_c , c'est pour cela qu'il est nécessaire d'appliquer deux tensions isolées l'une par rapport à l'autre afin d'assurer la commutation des IGBTs de charge et de décharge.

Afin de remédier à ce problème, la technique Bootstrap a été utilisée. Le circuit Bootstrap (figure 5.20) se compose d'un condensateur C_{BOOT} , d'une diode D_{BOOT} et d'une résistance R_{BOOT} . Lors de la phase de charge des condensateurs C_i , les IGBTs de charge T_c se ferment et ceux de la décharge T_d sont ouverts, la tension d'amorçage de l'IGBT T_c se fait directement via la source de tension V_{DD} , au même temps, le condensateur C_{BOOT} se charge à travers R_{BOOT} et D_{BOOT} . Lors de la phase de décharge des condensateurs C_i , les IGBTs de décharge T_d se ferment et ceux de charge T_c s'ouvrent, ce qui provoque la décharge du condensateur C_{BOOT} qui fournit ainsi la tension d'amorçage de l'IGBT T_d .

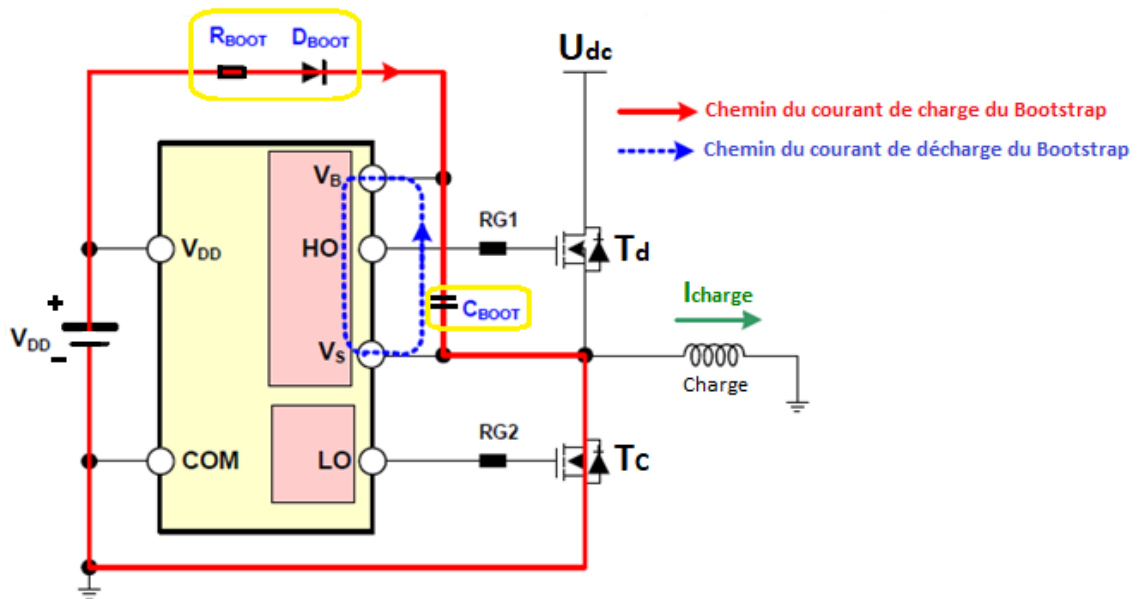


Fig.5.20. Principe de fonctionnement du circuit Bootstrap

5.4.2.2. Technique chaîne de diodes

Chaque étage du générateur Marx contient une partie qui doit être alimentée par une basse tension. Dans notre circuit, des tensions de 15 V (Driver et IGBTs) et 5 V (inverseur et récepteur de la fibre optique) doivent être fournies.

Pendant la phase de charge des condensateurs, les étages du générateur ont la même masse, alors que durant la phase de décharge, chaque étage aura une masse différente. Il est donc nécessaire d'alimenter les étages tout en assurant l'isolation entre eux. Cependant, il n'est pas concevable d'utiliser une alimentation DC pour chaque étage.

Pour parer à cela, plusieurs techniques ont été développées, parmi lesquelles on peut citer l'utilisation des transformateurs comme montré dans la figure 5.21. Le principe est de leur fournir une tension bipolaire générée par un pont complet (pour éviter la saturation des transformateurs), et tout en sachant que le primaire et le secondaire ne sont pas connectés électriquement, chaque tension de ce dernier est alors redressée et alimente un étage du générateur de Marx. Malgré son efficacité, cette topologie est compliquée et coûteuse.

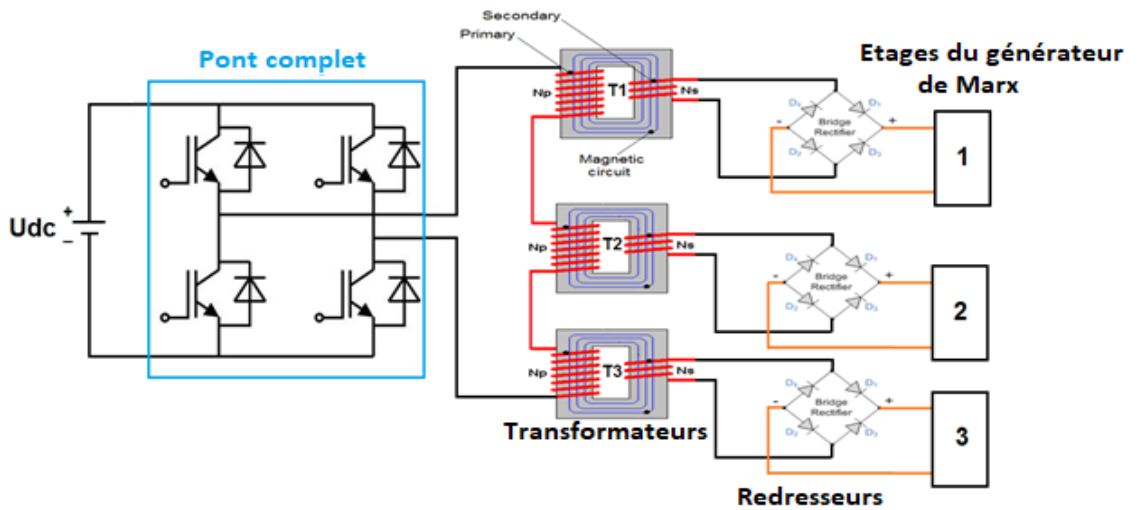


Fig.5.21. Utilisation de transformateurs pour alimenter les étages du générateur de Marx

Dans le présent travail, une autre technique a été utilisée, qui a l'avantage d'être simple et peu coûteuse. En effet, le circuit utilisé est appelé circuit chaîne de diodes "String diodes", et est à base de diodes et des condensateurs. La figure 5.22 présente l'utilisation de cette technique d'isolation dans un générateur de Marx de tension positive à deux étages.

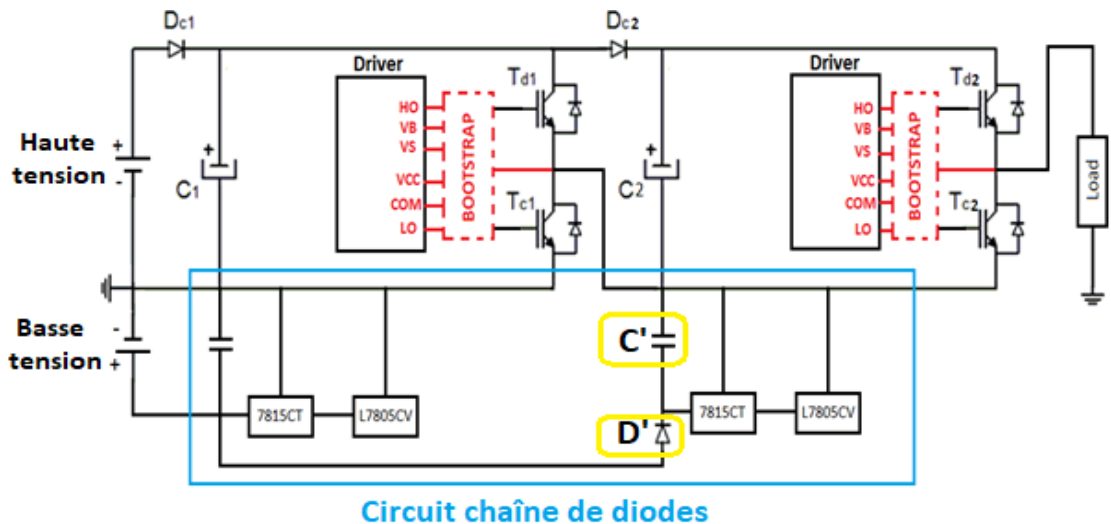


Fig.5.22. Utilisation du circuit chaîne de diodes pour alimenter les étages du générateur de Marx

Pendant le mode de charge, les IGBTs Tc1 et Tc2 sont fermés, ainsi les deux étages ont la même masse et sont donc alimentés par l'alimentation basse tension, qui chargera au même temps le condensateur C' à travers la diode D' comme montré dans la figure 5.23.

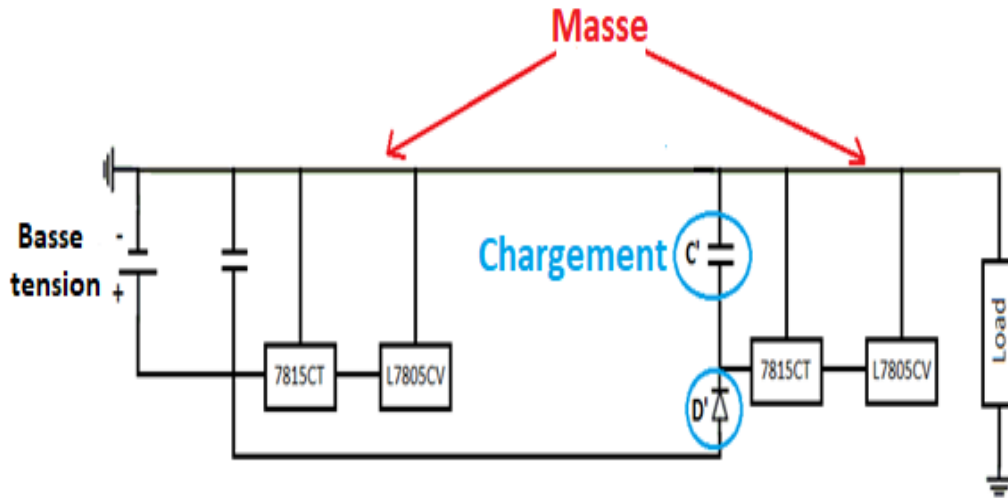


Fig.5.23. Fonctionnement du circuit chaîne de diodes lors de la phase de charge

Lors de la phase de décharge, les IGBTs Tc1 et Tc2 sont ouverts, ainsi les deux étages n'ont plus la même masse. De ce fait, l'alimentation basse tension continuera à alimenter seulement le premier étage du générateur de Marx, alors que le condensateur C' se décharge pour alimenter le deuxième étage comme montré dans la figure 5.24.

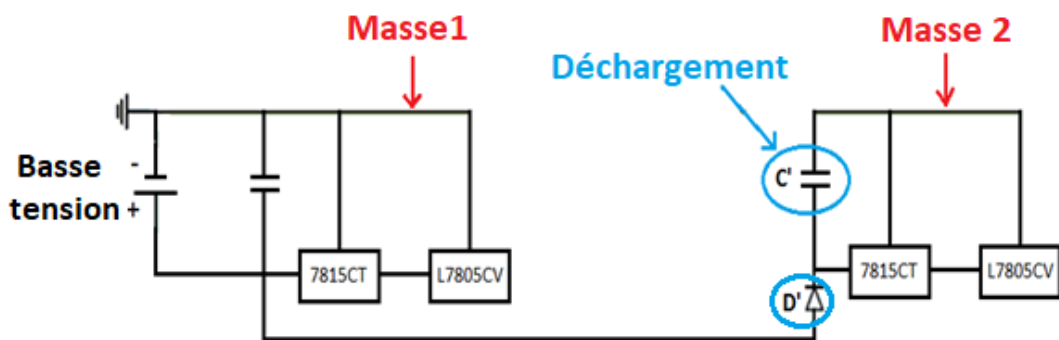









Fig.5.24. Fonctionnement du circuit chaîne de diodes lors de la phase de décharge

5.4.3. Liste des composants

Selon les besoins du circuit de puissance, une liste contenant les composants les plus essentiels à la réalisation du Générateur de Marx de tension positive à trois étages a été établie. Cette liste est présentée dans le tableau 5.1, avec le type, le rôle et les références de ces composants.

Tableau 5.1 Liste des composants pour le circuit de puissance

Composants	Rôles	References
Régulateur de tension	Les composants a circuit intégré utilisés dans le circuit de puissance doivent être alimentés par des tensions de 5 ou 15 V, deux régulateurs de tension sont utilisés pour assurer la régulation de ces deux tensions.	 L7805CV 7815CT
Fibre optique récepteur	Le récepteur de la fibre optique assure la transmission des signaux délivrés par le circuit de commande vers le circuit de commande.	 HFBR-2521Z
Inverseur	Le circuit de commande utilisé inverse les signaux délivrés par le Pic. Des inverseurs sont utilisés afin d'avoir la forme initial des signaux de commandes.	 SN74LS04N
Driver (pilote des IGBTs)	Le driver assure la commutation des semi-conducteurs.	 IR2213
IGBT	Des IGBTs supportant 1,2 kV sont utilisés comme commutateurs.	 K15N120
Diode à commutation rapide	Plusieurs diodes de 1,2 kV sont utilisées pour diverses fonctions.	 D09E120
Condensateur haute tension	Des condensateurs haute tension (1,6 kV) sont utilisés comme élément de stockage de l'énergie électrique.	 940C16W1K-F

5.4.4. Réalisation du circuit imprimé

Une fois que la topologie et la liste des composants définies, le circuit de puissance a trois étages a été dessiné sous le logiciel ISIS (Proteus) comme le montre la figure 5.25. Chaque étage contient une fibre optique récepteur, un inverseur, un circuit chaîne de diodes, un driver munit d'un circuit Bootstrap, deux IGBTs et un condensateur HT.

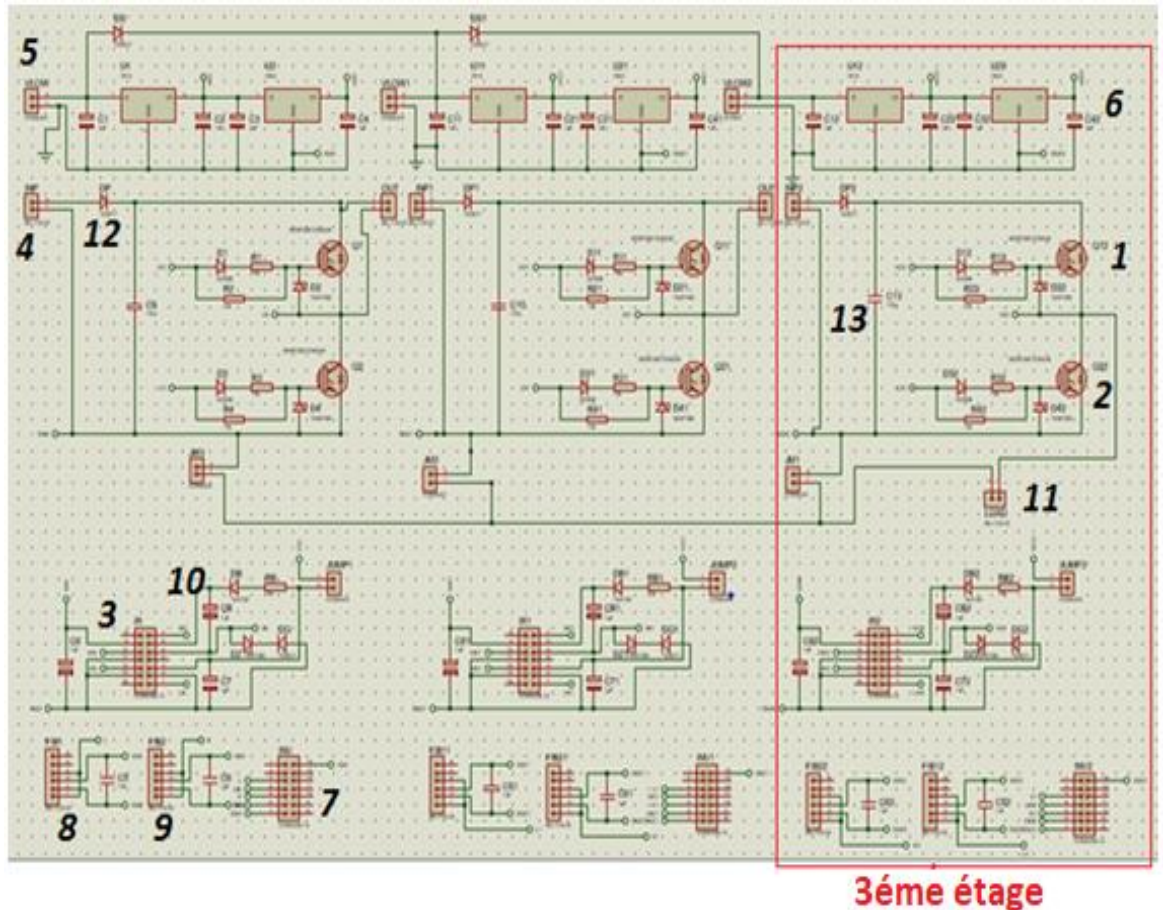


Fig.5.25. Générateur de Marx a trois étages dessiné sous ISIS

- 1- IGBT de charge Tc, 2- IGBT de décharge, 3. Driver IR2213, 4- Borne d'alimentation HT, 5- Borne d'alimentation BT, 6- Circuit chaîne de diodes, 7- inverseur,
- 8-9- Fibre optique récepteur, 10- Circuit Bootstrap, 11- Sortie (Charge), 12- diode HT, 13- Condensateur HT

Le circuit imprimé du générateur a ensuite été conçu sur une carte de dimension 9 × 24 cm, avec le Logiciel ARES comme montré dans la figure 5.26.

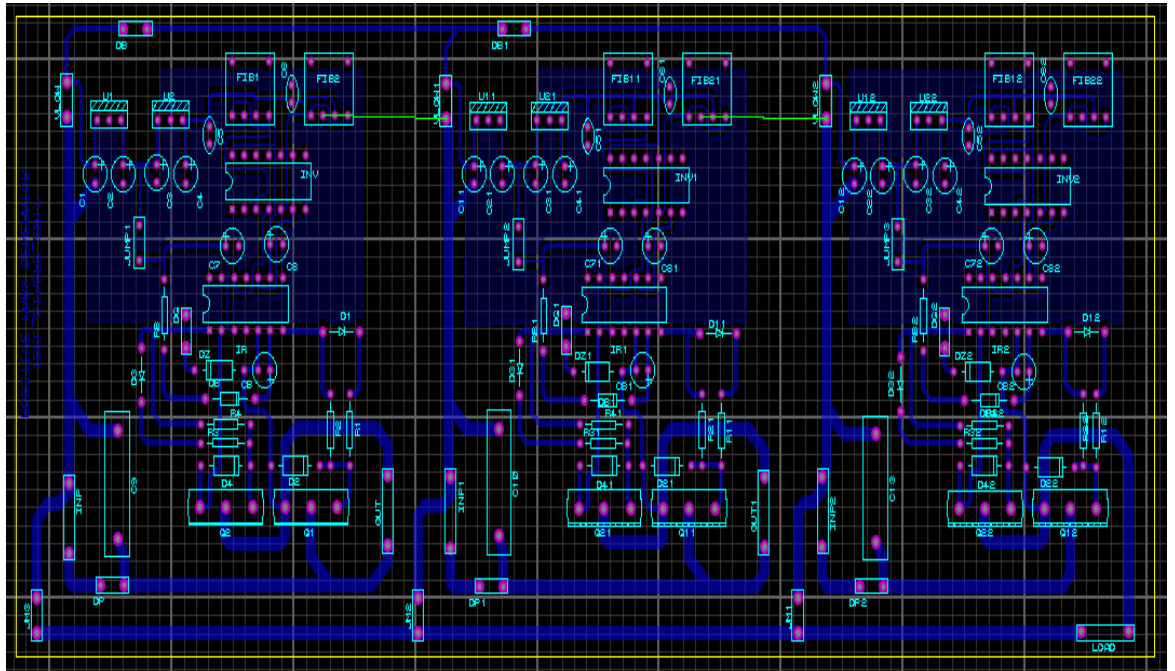


Fig.5.26. Circuit imprimé du générateur de Marx a trois étages dessiné sous ARES

Finalement, une fois le circuit imprimé prêt, les composants ont été placés et fixés à l'aide d'un fer à souder. Les figures 5.27 et 5.28 représente respectivement les faces supérieure et inférieure du générateur de Marx réalisé.

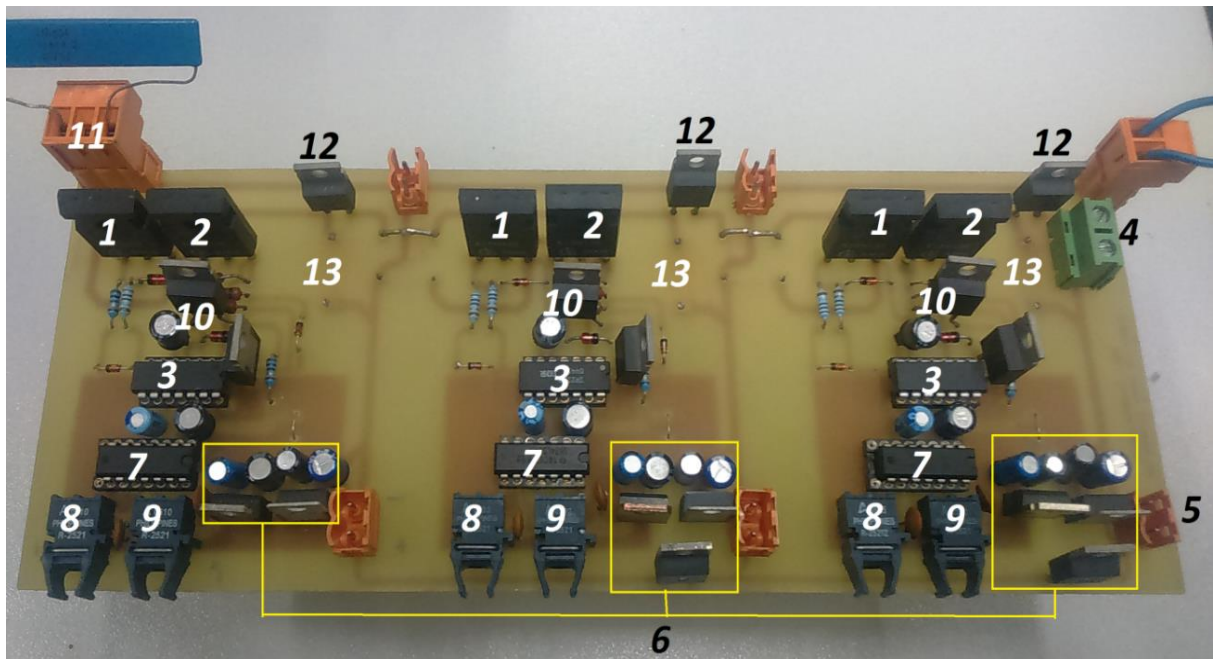


Fig.5.27. Générateur de Marx réalisé (face supérieure)

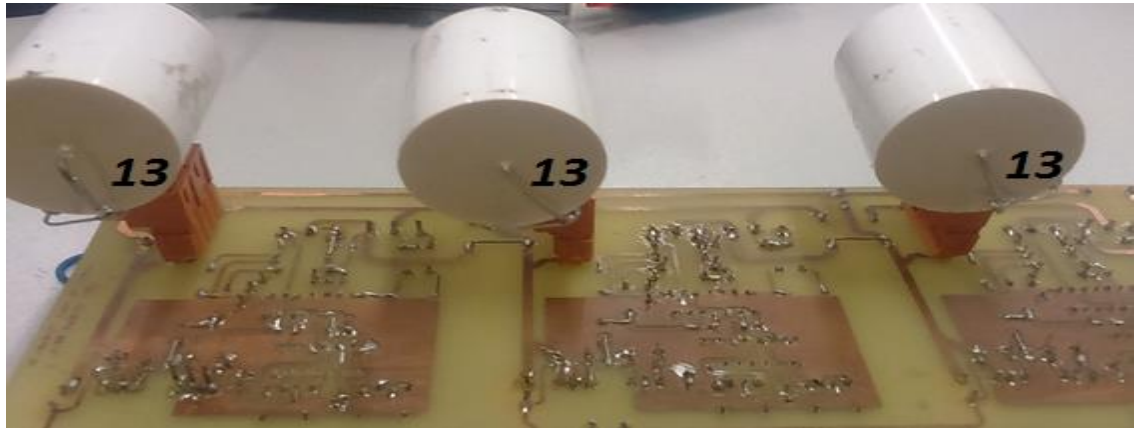


Fig.5.28. Générateur de Marx réalisé (face inférieure)

5.4.5. Mise en marche du Générateur de Marx de tension positive réalisé

La mise en marche du Générateur de Marx de tension positive à trois étages réalisé, a nécessité l'utilisation de l'équipement suivant qui est présenté sur la figure 5.29.

- Alimentation de tension continue (AX502 Metrix) utilisée pour alimenter le circuit de commande ;
- Alimentation de tension continue (GPR-6030) utilisée pour alimenter la partie basse tension du circuit de puissance ;
- Alimentation de haute tension continue (TDK-Lambda) utilisée pour charger les condensateurs haute tension ;
- Sonde haute tension qui permet de recueillir les signaux haute tension ;
- Oscilloscope (Tektronix TDS2024) pour visualiser les différents signaux et impulsions.



Fig.5.29. Equipement utilisé pour la mise en marche du générateur réalisé

Les composants électroniques utilisés dans le circuit de puissance permettent d'atteindre une tension maximale de 1,2 kV par étage. Pour des raisons de sécurité, le générateur de Marx a été testé avec une tension maximale de 1 kV. Le Générateur de Marx de tension positive à trois étages réalisé fonctionne ainsi avec succès et délivre des impulsions carrées positives avec une multiplication par trois de la tension d'entrée.

Le générateur réalisé offre la possibilité de varier les différents paramètres des impulsions (fréquence, amplitude, largeur...etc). La figure 5.30 présente quelques impulsions de 1 kHz obtenus avec des amplitudes (300 V, 1 kV et 1,5 kV) et des largeurs (10 μ s, 20 μ s et 30 μ s) différentes.

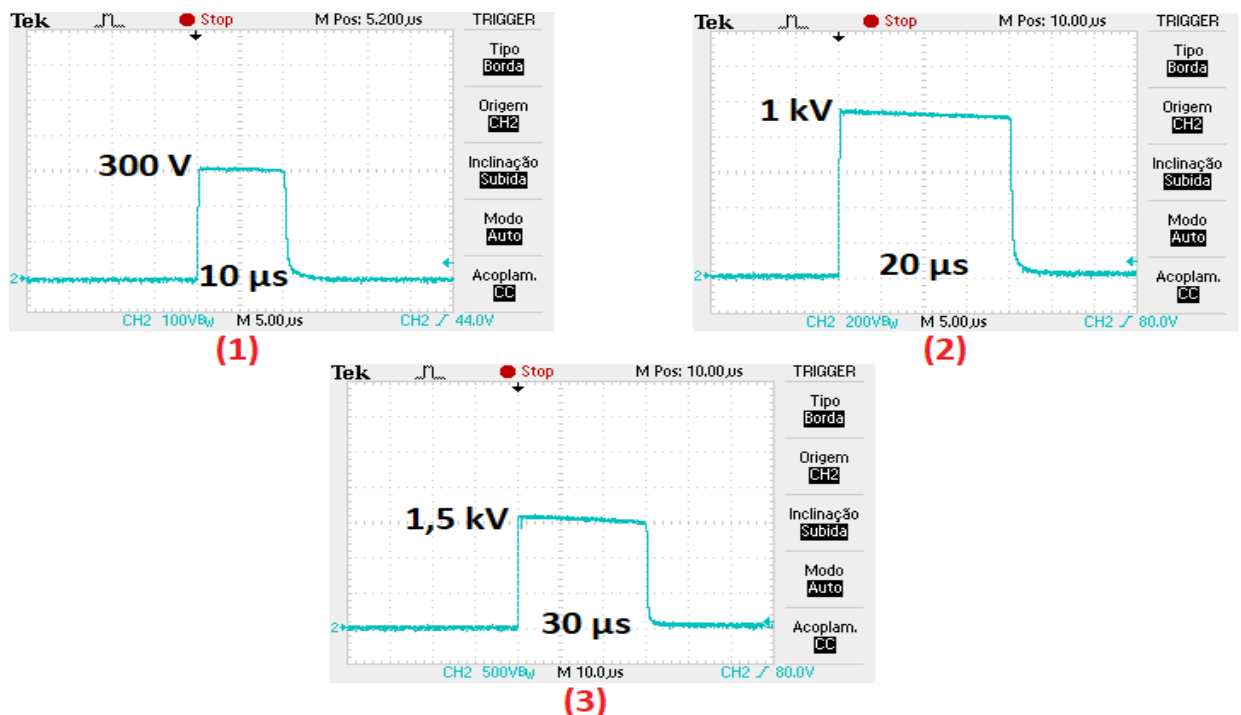


Fig.5.30. Impulsions de sorties délivrées par le générateur réalisé

Impulsion 1 : $V = 300 \text{ V}$ et $T = 10 \mu\text{s}$ (100 V/div et 5 μ s/div)

Impulsion 2 : $V = 1000 \text{ V}$ et $T = 20 \mu\text{s}$ (200 V/div et 5 μ s/div)

Impulsion 3 : $V = 1500 \text{ V}$ et $T = 30 \mu\text{s}$ (500 V/div et 10 μ s/div)

5.4. Conclusion

Deux générateurs de puissance pulsée à base de semi-conducteurs ont été réalisés dans ce travail. Ces deux générateurs sont de type Marx, qui est un circuit destiné à la génération d'impulsions carrées et présente l'avantage d'amplifier la tension d'entrée.

Le premier est un générateur de Marx de tension négative. Un prototype de laboratoire à quatre étages capables de fournir des impulsions de tension carrées négatives qui peuvent atteindre jusqu'à 3,6 kV a été construit en utilisant des IGBT de 1200 V et des condensateurs de 10 μ F. Deux configurations de charge de

condensateurs ont été testées, analysées et comparées. Les résultats obtenus ont montré que la charge des condensateurs est plus rapide en utilisant des IGBTs au lieu de résistances. C'est pourquoi, il est préférable d'utiliser des IGBTs pour obtenir des impulsions courtes uniformes et répétitives.

Un second Générateur de Marx de tension positive a été réalisé. Un prototype de laboratoire à trois étages capables de générer des impulsions de tension carrées positives qui peuvent atteindre jusqu'à 3 kV a été construit en utilisant des IGBT de 1200 V et des condensateurs de 1 μ F.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit porte essentiellement sur la modélisation expérimentale et l'optimisation du prétraitement CEP pour une intensification de l'extraction de jus. On a vu que la technologie de traitement par champ électrique pulsé est une technique de traitement non thermique utilisée notamment dans le domaine agroalimentaire. Cette technique consiste à soumettre les aliments à un champ électrique de très forte intensité mais de durée d'impulsion brève. Elle est considérée comme étant une technologie volumétrique, c'est à dire qu'elle n'agit pas uniquement en surface mais dans tout le volume de l'aliment traité.

L'effet d'un champ électrique sur les cellules animales ou végétales est appelé électroporation, et comme son nom l'indique provoque la création de pores au niveau de la membrane cellulaire ce qui augmente sa perméabilité. L'électroporation est utilisée pour améliorer le processus de l'extraction de substance liquide et aussi détruire les pathogènes et réduire la dégradation par des microorganismes des aliments. La durée de conservation des aliments est ainsi augmentée sans les effets indésirables des méthodes traditionnelles thermiques (par exemple pasteurisation thermique). Elle est également utilisée pour augmenter le rendement des procédés d'extraction de jus, comme on a pu le voir avec le procédé d'extraction du jus de betterave décrit dans cette thèse.

Nos travaux ont été divisés en deux axes de recherche différents. La première partie concerne le développement des chambres de traitement par CEP. Ces dernières représentent un élément très important des techniques de traitement par CEP. En effet, le produit alimentaire est placé à l'intérieur de la chambre, entre deux électrodes. Il existe deux types de chambres de traitement: statiques et dynamiques.

Une nouvelle chambre de traitement statique de forme parallélépipède en plexiglas a été réalisée. Elle a été conçue de façon à ce que le champ électrique soit appliqué suivant deux directions (appelée chambre 2D) contrairement aux chambres classiques où il est appliqué dans un seul sens (chambre 1D). Afin de tester l'efficacité de cette nouvelle configuration, une étude expérimentale comparative a été faite avec une chambre classique sur le procédé d'extraction du jus de betterave par CEP. Il faut noter que pour appuyer cette étude, le recours à la méthodologie des plans d'expériences a été plus que nécessaire. Les résultats obtenus dans ce cas montrent qu'un meilleur rendement en termes de quantité de ainsi qu'une importante économie d'énergie, ont été obtenus pour la chambre de traitement 2D. Ce résultat est expliqué par le fait que la distribution de champ électrique suivant deux sens est meilleure et occupe plus de volume par rapport à une distribution suivant un seul sens. Cette nouvelle configuration est d'un intérêt significatif, ce qui ouvre un axe de recherche intéressant dans le but d'améliorer l'efficacité de la technologie CEP.

Une autre étude expérimentale comparative suivant la méthodologie des plans d'expérience a été faite pour trois chambres de traitement statiques cylindriques. Le but est d'analyser l'effet de la distance inter-électrodes sur le rendement du procédé d'extraction par CEP. Les résultats obtenus ont montré que les grandes distances inter-électrodes permettent d'avoir un meilleur rendement. Ceci a été expliqué par le fait que l'aliment est mieux exposé dans une chambre de traitement ayant une grande distance inter-électrodes.

Le deuxième axe de recherche de cette thèse réside dans l'utilisation de l'électronique de puissance pour la réalisation de générateur de champ pulsé. En effet, deux générateurs pulsés à base de semi-conducteurs ont été réalisés. Le premier est un générateur de Marx négatif à quatre étages, capables de délivrer des impulsions de haute tension négative de forme carrée. Pour ce générateur, deux configurations de chargement des condensateurs (avec IGBT et résistance) ont été utilisées et testées. Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que le chargement par IGBT est beaucoup plus rapide que celui par résistance et permet d'avoir des impulsions carrées plus uniformes. Un second générateur pulsé de type Marx positif à trois étages a été réalisé, il génère des impulsions de haute tension positive de forme carrée. Ces deux générateurs ont l'avantage d'être des circuits multiplicateurs de tension, c'est à dire que la tension d'entrée est multipliée par le nombre d'étages, ce qui permet d'atteindre des niveaux de tensions élevés. Aussi ce type de générateur nous permet de contrôler et varier les paramètres des impulsions (fréquence, amplitude, durée ...etc.).

Perspectives d'avenir

Le travail effectué dans le cadre de cette thèse a permis d'ouvrir quelques perspectives envisageables dans l'avenir :

- Développement des procédés d'extraction des huiles essentielles par CEP à partir des plantes locales.
- Etude de simulation et un calcul du champ électrique approprié pour la chambre 2D sera une démarche importante dans le cadre de développement de nouvelles chambres de traitement plus efficaces.
- Développement et réalisation de générateurs pulsés à base de semi-conducteurs.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] Olga A. Cueva

“Pulsed electric field influences on acid tolerance, bile tolerance, protease activity and growth characteristics of lactobacillus acidophilus LA-K”.

Thèse de Doctorat, École Panaméricaine D'agriculture Zamorano, Mai 2009.

[2] Kambiz Shamsi

“Effects of Pulsed Electric Field Processing on Microbial, Enzymatic and Physical Attributes of Milk and the Rennet-Induced Milk Gels”

Thèse de Doctorat, School of Applied Sciences College of Science, Engineering and Technology RMIT University, December 2008.

[3] Kirthy Reddy et Penchalaraju

“Pulsed Electric Field Technology in Food Processing Industry-A Review”

International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 3 Issue 7, 2014.

[4] Jihene Ben Ammar Kaidi

“Etude de l'effet des champs électriques pulsés sur la congélation des produits végétaux”

Thèse de Doctorat, Université de technologie Compiègne, 2 novembre 2011.

[5] Stefan Toepfl

“Pulsed Electric Field food treatment - scale up from lab to industrial scale”

11th International Congress on Engineering and Food (ICEF11), Procedia Food Science 1, p. 776 – 779, 2011.

[6] Barbosa-Cánovas

“Preservation of foods with pulsed electric fields”

Academic Press, Food science and technology, San Diego, 1999.

[7] Roodenburg, B., et al

“Metal release in a stainless steel pulsed electric field system. Part I. Effect of different pulse shapes; theory and experimental method”

Innovative Food Science & Emerging Technologies Vol. 6, No. 3, p. 327-336, 2005.

[8] S.T. PAI et Qi Zhang

“Introduction to high power pulse technology”

Advanced series in electrical and computer engineering, Vol 10, 1995.

[9] K. Okamura, S. Kuroda et M. Maeyama

“Development of the high repetitive impulse voltage generator using semiconductor switches”

12th Pulsed Power Conference, Digest Of technical Papers, Vol. 2, pp. 27-30, 1999.

[10] Tatsuro Sakamoto and Hidenori Akiyama

“Solid-State Dual Marx Generator With a Short Pulse width”

IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 41, No. 10, October 2013.

[11] Matej Reberšek, Damijan Miklavcic

“Advantages and Disadvantages of Different Concepts of Electroporation Pulse Generation”

AUTOMATIKA Vol. 52, No. 1, pp. 12–19, 2011.

[12] Ratna Ika Putri, Ika Noer Syamsiana and La Choviya Hawa

“Design of High Voltage Pulse Generator for Pasteurization by Pulse Electric Field”

International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 5, pp 916-917, 2010.

[13] F. Lacassie

“Contribution à l'étude de la génération d'impulsions hyperfréquences de grandes puissances par photoconducteurs activés par laser”

Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, N° 295, p. 304, 1996.

[14] Jérôme BAC

“Contribution à l'étude et à la réalisation commutateurs et de générateurs haute tension transitoires”

Thèse de Doctorat, Université de PAU, 12 juillet 2005.

[15] E. Neumann, M. Schaefer-Ridder, Y. Wang, et P. Hofschneider

“Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields”

The EMBO Journal 1 (7): 841–5, 1982.

[16] L. Gunn

“Transfer of Episomal and Integrated Plasmids from Saccharomyces cerevisiae to Escherichia coli by electroporation”

Electroporation Protocols for Microorganisms, pp. 55-66, 1995.

[17] Luc Schrive

“Traitement de suspensions biologiques complexes par champs électriques pulsés - étude des mécanismes de transfert d'énergie”

Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 6 décembre 2004.

[18] Gilles Touya

“Contribution à l'étude expérimentale des décharges électriques dans l'eau et des ondes de pression associées”

Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 10 avril 2003.

[19] Maged E.A. Mohamed and Ayman H. Amer Eissa

“Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology”

Structure and Function of Food Engineering, chapter 11, 2012.

[20] Pramod Kumar Singh, Sunil Kumar, Pavan Kumar and Z.F. Bhat

“Pulsed light and pulsed electric field emerging non-thermal decontamination of meat”

American journal of food technology, ISSN 1557-4571, 2012.

[21] Kambiz Shamsi and Frank Sherkat

“Application of pulsed electric field in non-thermal processing of milk”

Asian Journal of Food and Agro-Industry, vol. 2, No. 3, pp. 216-244, 2009.

[22] Ho SY and Mittal GS

“Electroporation of cell membranes: a review”

Critical Reviews in Biotechnology, vol. 16, No. 4, pp. 349-62, 1996.

[23] Marie-Amélie De Ménorval

“Etude de la perméabilisation de la membrane plasmique et des membranes des organites cellulaires par des agents chimiques et physiques”

Thèse de Doctorat, Université Paris Sud, 25 novembre 2013.

[24] Saad EL AMARI

“Développement et caractérisation de générateur optoélectronique d'impulsions de champ électrique nanoseconde et subnanoseconde de forte”

Thèse de Doctorat, Université De Limoges, 14 Décembre 2011.

[25] Laurent Pecastaing

“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, 7 décembre 2001.

[26] CHATROUX D., LAUSENAZ Y., VILLARD J.-F., GARNIER L., LAFORE D.

“Power switch: the standard small components strategy – From the stateof-the-art to future trends”

Proc. Power Conversion, pp. 199-207, 1999.

[27] Pierre LEFRANC

“Étude, conception et réalisation de circuits de commande d’IGBT de forte puissance”

Thèse de Doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon ,30 novembre 2005.

[28] B. JAYANT BALIGA

“Trends in power semiconductor devices”

IEEE Transactions On Electronics Devices, tome 43, no 10, p. 1717–1731, Octobre 1996.

[29] Florent Rochette

“Etude et caractérisation de l’influence des contraintes mécaniques sur les propriétés du transport électronique dans les architectures MOS avancées”

Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 26 Septembre 2008.

[30] Serge Pittet

“Modélisation physique d’un transistor de puissance IGBT - traînée en tension à l’enclenchement”

Thèse de Doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2005.

[31] Humberto Vega-Mercado, M. Marcela Gongora-Nieto, Gustavo V. Barbosa-Canovas and Barry G. Swanson

“Pulsed Electric Fields in Food Preservation”

Handbook of Food Preservation, Second Edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2007.

[32] Maciej Gryś, Zbigniew Madeja and Włodzimierz Korohoda

“Decreasing the thresholds for electroporation by sensitizing cells with local cationic anesthetics and substances that decrease the surface negative electric charge” Cellular and molecular biology letters, Vol 19, pp. 65-76, 2014.

[33] Q. Zhang, G. V. Barbosa-Canovas and B. G. Swanson

“Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization”

Journal of Food Engineering, Vol. 25, pp. 261-281, 1995.

[34] B. Petit, M. Ritz et M. Federighi

“Nouveaux traitements physiques de conservation des aliments”

École Nationale Vétérinaire de Nantes, UMR 1014 Hygiène des Aliments INRA/ENVN, B.P. 40706, F-44307 Nantes.

[35] Roman Buckow, Pascal Baumann, Stefanie Schroeder and Kai Knoerzer

“Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilization”

Journal of Food Engineering, Vol. 105, pp. 545–556, 2011.

[36] M. S. Bretscher

“The Molecules of the Cell Membrane”

Scientific American, vol. 253, no. 4, p. 100–08, 1985.

[37] Amar TAMRA

“Spectroscopie diélectrique Hyper Fréquence de cellules individualisées sous electroporation”

Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 9 mars 2017.

[38] Thi Dan Thao VU

“Contribution à la modélisation du comportement électromagnétique de milieux biologiques exposés à des impulsions de champ électrique nanosecondes”

Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 13 décembre 2012.

[39] Sophie KOHLER

“Contribution au développement et à la dosimétrie multi-échelles de dispositifs pour l'exposition de cellules biologiques à des impulsions électriques nanosecondes et subnanosecondes de haute intensité”

Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 15 novembre 2013.

[40] E. Neumann, M. Schaefer-Ridder, Y. Wang, et P. H. Hofschneider

“Gene transfer into mouse lymphoma cells by electroporation in high electric fields”

EMBO Journal, vol. 1, No. 7, pp. 841–845, 1982.

[41] Pothakamury U. R., Monsalve-Gonzales A., Barbosa Canovas G. V. And Swanson B. G.

“Inactivation of Escherichia Coli and Staphilococcus Aureus in model foods by pulsed electric field technology”

Food Research International, Vol. 28, pp. 167-171, 1995.

[42] Grahl T and Markl H

“Killing of microorganisms by pulsed electric fields”

Application of microbiological technologies, Vol. 45, pp. 148-157, 1996.

[43] Chunlan Jiang, Rafael V. Davalos and John C. Bischof

“A Review of Basic to Clinical Studies of Irreversible Electroporation Therapy”

IEEE Transactions On Biomedical Engineering, Vol. 62, No. 1, pp. 4-20, 2015.

[44] D. Miklavcic, G. Pucihar, A. Lebar, J. Krmelj, et L. Towhidi

“The Pulse Intensity-duration dependency for Cell Membrane Electroporation”

Advanced electroporation techniques in biology and medicine, 2010.

[45] Mykola Shynkaryk

“Influence de la perméabilisation membranaire par champ électrique sur la performance de séchage des végétaux”

Thèse de Doctorat, Université De Technologie De Compiègne, 4 Mai 2007.

[46] Nabil Grimi

“Vers l'intensification du pressage industriel des agrossources par champs électriques pulsés : étude multi-échelles”

Thèse de Doctorat, Université De Technologie De Compiègne, 10 décembre 2009.

[47] P. T. Vernier, Y. Sun, L. Marcu, S. Salemi, C. M. Craft, et M. A. Gundersen

“Calcium bursts induced by nanosecond electric pulses”

Biochemical and biophysical research communications, vol. 310, No. 2, pp. 286–295, 2003.

[48] F. M. Andre

“Efficiency of high-and low-voltage pulse combinations for gene electrotransfer in muscle, liver, tumor, and skin”

Human gene therapy, Vol. 19, No. 11, pp. 1261–1272, 2008.

- [49] A. M. Lebar et D. Miklavčič
"Cell electropermeabilization to small molecules in vitro: control by pulse parameters"
Radiol, Vol. 35, No. 3, pp. 193–202, 2001.
- [50] J. Rubinsky, G. Onik, P. Mikus, et B. Rubinsky
"Optimal parameters for the destruction of prostate cancer using irreversible electroporation"
The Journal of urology, Vol. 180, No. 6, pp. 2668–2674, 2008.
- [51] T. B. Napotnik, M. Reberšek, T. Kotnik, E. Lebrasseur, G. Cabodevila, et D. Miklavčič
"Electropermeabilization of endocytotic vesicles in B16 F1 mouse melanoma cells"
Medical and Biological Engineering and Computing, Vol. 48, No. 5, pp. 407–413, 2010.
- [52] F. Hamdi
"Interaction champ électrique cellule : conception de puces microfluidiques pour l'appariement cellulaire et la fusion par champ électrique pulsé"
Thèse de Doctorat, Université Paris Sud, 29 novembre 2013.
- [53] Y. Tamzali, L. Borde, M. P. Rols, M. Golzio, F. Lyazrhi, and J. Teissie
"Successful treatment of equine sarcoids with cisplatin electrochemotherapy: a retrospective study of 48 cases"
Equine Vet. J., vol. 44, No. 2, pp. 214–220, 2012.
- [54] S. Orlowski, J. Belehradek, C. Paoletti, and L. M. Mir
"Transient electropermeabilization of cells in culture"
Biochem. Pharmacol., vol. 37, No. 24, pp. 4727–4733, 1988.
- [55] L. M. Mir, O. Tounekti, and S. Orlowski
"Bleomycin: revival of an old drug"
Gen. Pharmacol., vol. 27, No. 5, pp. 745–748, 1996.
- [56] O. Tounekti, G. Pron, J. Belehradek, and L. M. Mir
"Bleomycin, an apoptosis-mimetic drug that induces two types of cell death depending on the number of molecules internalized"
Cancer Res., Vol. 53, No. 22, pp. 5462–5469, 1993.
- [57] Céline Dejoye Tanzi
"Eco-Extraction et Analyse de lipides de micro-algues pour la production d'algo carburant"
Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 12 Novembre 2013.
- [58] T.K. Gachovska, M.O. Ngadi and G.S.V. Raghavan
"Pulsed electric field assisted juice extraction from alfalfa"
CANADIAN BIOSYSTEMS ENGINEERING, Vol. 48 ,2006.
- [59] Yashwant Kumar, Krishna Kumar Patel and Vivek Kumar
"Pulsed Electric Field Processing in Food Technology"
IJESTA, Volume 01, No.2, Feb 2015.
- [60] Satyendra Kumar, Nidhi Agarwal and Pramod K. Raghav
"Pulsed Electric Field Processing Of Foods - A Review"
IJERME, Vol. 1, No. 1, pp. 111-118, 2016.
- [61] Josselin Moreau
"Purification des eaux haute cadence par champs électriques pulsés"
Process Alimentaire Magazine, 4 Février 2008.

[62] Yassine Bellebna

“Contribution à l’étude de l’application du champ électrique pulsé dans le domaine agroalimentaire”

Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, Décembre 2014.

[63] A. Krasnykh

“A sold state Marx type modulator for driving a TWT”

Power Modulator Symposium, 2000.

[64] Thomas Maysonnave

“Etude d’un système d’amplification de puissance de type multiplicateur de courant dynamique sur l’installation SPHINX du CEA Gramat”

Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays De L’Adour, 20 décembre 2013.

[65] Mohamad Kenaan

“Développement d’applicateurs pour étudier le comportement des cellules biologiques soumises à des impulsions électromagnétiques ultracourtes”

Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 25 octobre 2010.

[66] L. Barsotti, P. Merle et J.C. Cheftel

“Traitement des aliments par champs électriques pulsés : 1-Aspects physiques”

Sci. Alim., Vol. 18, pp. 583-601, 1998.

[67] Margot Lamarque

“Intérêt de la clairance hépatique au vert d’indocyanine par le moniteur Limon-R dans la prédiction d’une insuffisance hépatocellulaire post hépatectomie”

Thèse de Doctorat, Université Victor Segalen - Bordeaux 2, 02 juillet 2014.

[68] Jacques Goupy

“Pratiquer les plans d’expériences”

Collection : Technique et ingénierie, Dunod, 2005.

[69] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikström, and S. Wold

“Design of Experiments, Principles and Applications”

Learnways AB, Stockholm, Sweden, 2000.

[70] G. Taguchi

“System of Experimental Designs”

Kraus International Publications, New York, 1987.

[71] MODDE 5.0, User guide and tutorial, Umetrics (1999).

Publications
et
Communications

Publications et Communications

[72] **H. Bermaki**, M. Ziane , A. Semmak, Y. Bellebna, H. Belhassaini, A. Tilmatine
“Experimental analysis of monoaxial and biaxial pulsed electric field treatment chambers for food processing”

Carpathian Journal Of Food Science And Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 43-50, 2017.

[73] **H. Bermaki**, A. Semmak, M. Rebersek, Y. Bellebna, D. Micklavcic, A. Tilmatine
“Development of a Marx-type PEF generator using IGBT switches”

The 1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields, Portoroz, Slovenia, 06-10 September 2015.

[74] K. Miloudi, **H. Bermaki**, A. Semmak, Y. Benmimoun, A. Tilmatine
“Set-Point Identification of a PEF System For Juice Extraction”

The 1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields, Portoroz, Slovenia, 06-10 September 2015.

[75] A. Semmak, **H. Bermaki**, Y. Bellebna, K. Miloudi, C. Gomis, A. Tilmatine
“Extraction of pigments from PEF pretreated local microalgae”

The 1st World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields, Portoroz, Slovenia, 06-10 September 2015.

[76] **H. Bermaki**, A. Semmak, M. Rebersek, Y. Bellebna, D. Micklavcic, A. Tilmatine
“A solid state high voltage-pulsed electric field generator for application in food processing”

The 4th International Conference on Electrical Engineering, Boumerdes, Algeria, 13-15 December 2015.

Résumé

L'utilisation de l'électricité dans le traitement des aliments a été introduite au début des années 1900. La technologie des champs électriques pulsés (CEP) est une méthode non-thermique de traitement des aliments qui utilise de courtes impulsions d'électricité. En effet, selon le mécanisme de Zimmermann, l'application d'un champ électrique externe sur une cellule provoque la création de pores au niveau de la membrane ce qui augmente la perméabilité de la cellule. Ceci ouvre la voie à de nombreuses applications du CEP dans le domaine agroalimentaire.

Le travail présenté dans cette thèse apporte une contribution du moins considérable au développement des chambres de traitement par CEP. Ainsi des études expérimentales suivant la méthodologie des plans d'expérience ont été présentées afin d'analyser les effets de la distribution du champ électrique et de l'espace inter-électrodes sur le traitement par CEP.

On s'est aussi intéressé à la réalisation des générateurs pulsés à base de semi-conducteurs. Dans cette optique, deux générateurs de Marx à base d'IGBT ont été réalisés et testés avec succès.

Abstract

The use of electricity in food processing was introduced in the early 1900s. Pulsed Electric Field (PEF) technology is a non-thermal method of food processing that uses short pulses of electricity. Indeed, according to the mechanism of Zimmermann, the application of an external electric field on a cell causes the creation of pores at the membrane which increases the permeability of the cell. This paves the way for many PEF applications in the food industry.

The work presented in this thesis makes a considerable contribution to the development of PEF treatment chambers. Thus, experimental studies following the experimental design methodology were presented in order to analyze the effects of the electric field distribution and the inter-electrode space on the PEF treatment.

We have also been interested by the realization of pulsed generators based on semiconductors. Therefore, two Marx generators have been successfully realized and tested.

ملخص

استخدام الكهرباء في التصنيع الغذائي بدأ في وقت مبكر من عام 1900. تكنولوجيا الحقول الكهربائية النبضة هي طريقة غير حرارية تستخدم في مجال الصناعات الغذائية وتعتمد على استعمال نبضات قصيرة من الكهرباء. في الواقع، وفقا لآلية زيمرمان، وتطبيق حقل كهربائي خارجي على خلية يسبب إنشاء المسام في الغشاء مما يزيد من نفاذية الخلية. وهذا يفتح المجال أمام العديد من التطبيقات في قطاع الأغذية الزراعية.

العمل المقدم في هذه الأطروحة يجعل مساهمة صغيرة في تطوير غرف المعالجة. حيث تم تقديم بعض الدراسات التجريبية تبعا لمنهجية التصميم التجريبي من أجل تحليل آثار توزيع المجال الكهربائي والمساحة بين الأقطاب الكهربائية على العلاج بالحقول الكهربائية النبضة.

وكان هناك اهتمام أيضا بصناعة مولدات نبضة قائمة على أشباه الموصلات حيث تم انجاز وتفعيل مولدين نابضين من نوع ماركس.