

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي
معسكر

Faculté des sciences et technologie

Département d'électrotechnique

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Electrotechnique

Intitulée

Contribution à l'étude de l'effet du champ électrique
pulsé haute tension sur les produits végétaux pour les
applications industrielles des agro-ressources

Présentée par : BAGHDAD Abdelkader

Soutenue, le 25 / 09 /2025

Devant le jury :

Président	BENMIMOUN Youcef	Professeur	Université de Mascara
Encadreur	EL KEBIR Abdelkader	Professeur	Université de Mascara
Co-Encadreur	MILOUDI Kaddour	MCA	Université de Mascara
Examineur	OUIDDIR Rabah	Professeur	Université de USTO-MB
Examineur	LAROUCI Benyekhlef	MCA	Université K.M de Ouargla
Examineur	BENABBOUN Adel	MCA	Université de Mascara

Année Universitaire : 2024- 2025

Remerciement

Ce travail de thèse a été réalisé au Laboratoire de recherche des sciences et techniques de l'eau (LSTE) à l'Université de Mascara en collaboration avec le Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologiques et la Géomatique (LRSBG).

J'exprime toute ma profonde reconnaissance au Professeur ELKEBIR Abdelkader et Dr. MILOUDI Kaddour pour m'avoir proposé ce sujet de thèse, encadré et conseillé tout au long de ces années. Leurs qualités humaines et intellectuelles ont contribué à l'achèvement de ce travail.

J'exprime toute ma gratitude au professeur BENMIMOUN Youcef pour avoir accepté à la fois d'examiner mon travail et de présider le jury de thèse ; au professeur OUIDDIR Rabah, au Dr. BENABOUN Adel et Dr. LAROUCI Benyekhlef qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse.

Je souhaite également remercier mes collègues et amis du laboratoire.

Un grand merci à ma famille pour leur amour et leur encouragement. Leur confiance en moi m'a permis de surmonter les défis de cette aventure. Un remerciement spécial à ma femme, mes frères, mes enfants et mes amis qui ont été d'un soutien inestimable durant ces années. Leur encouragement m'a permis de surmonter les défis et d'atteindre cet objectif.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à cette recherche. Sans leur aide et leur soutien, ce travail n'aurait pas été possible.

Merci à tous.

Table des matières

Introduction générale.....	1
1 Générateurs haute tension.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Génération de hautes tensions alternatives	5
1.2.1 Paramètres caractéristiques.....	6
1.2.2 Circuits de transformateurs de test	6
1.2.3 Génération de haute tension avec circuits résonants	7
1.2.4 Générateur de Tesla	8
1.3 Génération de hautes tensions continues	9
1.3.1 Paramètres caractéristiques.....	9
1.3.2 Circuit redresseur demi-période	9
1.3.3 Circuits multiplicateurs de tension	11
1.3.3.1 Circuit des cascades de Greinacher	11
1.3.3.2 Générateurs électrostatiques	13
1.4 Générateurs d'impulsions	15
1.4.1 Paramètres caractéristiques.....	15
1.4.2 Circuit de base	17
1.4.3 Circuits capacitifs	18
1.4.4 Générateurs de Marx	19
1.4.5 Réseau de formation d'impulsions.....	20
1.4.6 Lignes de formation d'impulsions.....	21
1.4.7 Générateurs d'impulsions	24
1.4.8 Générateurs à stockage inductif.....	25
1.4.9 Générateurs d'impulsions conçues avec des MOSFET.....	26
1.4.9.1 Alimentation pulsée utilisant des MOSFET parallèles.....	26
1.4.9.2 Alimentation pulsée utilisant des MOSFET séries.....	28
1.4.10 Générateur d'impulsions utilisant des IGBT.....	31
1.4.11 Générateur d'impulsions inductif.....	32
1.4.12 Générateur utilisant des composants de stockage d'énergie	33
1.5 Conclusion	35
2 Equipement du traitement par champ électrique pulsé	37
2.1 Introduction.....	37
2.2 Champ électrique pulsé.....	37
2.3 Contexte historique	39
2.4 Électroporation.....	43
2.5 Mécanisme d'action du CEP.....	45
2.6 Equipements du traitement par CEP	47
2.6.1 Générateur d'impulsions haute tension	48
2.6.2 Chambre de traitement.....	49
2.6.2.1 Chambres de traitement statiques	50
2.6.2.2 Chambres de traitement continu	52
2.6.3 Système de contrôle.....	54
2.7 Paramètres importants du processus du CEP	54
2.7.1 Intensité du champ électrique	54
2.7.2 Durée du traitement	55
2.7.3 Nombre d'impulsions.....	56
2.7.4 Forme de l'impulsion.....	56

2.7.5	Energie consommée par l'aliment lors du traitement par CEP	60
2.7.6	Température des aliments lors du traitement par CEP	62
2.7.7	Conductivité.....	63
2.8	Conclusion	64
3	Applications industrielles du champ électrique pulsé.....	65
3.1	Introduction.....	65
3.2	Pasteurisation par CEP.....	65
3.3	Traitement de la canne à sucre par CEP	66
3.4	Extraction de jus de luzerne par CEP	67
3.5	Désinfection de l'eau par CEP.....	70
3.6	Inhibition microbienne et enzymatique par CEP	72
3.7	Extraction de polyphénols par CEP	74
3.8	Extraction de pigments et colorants alimentaires	76
3.9	Extraction des composés phytochimiques	77
3.10	Émulsion dans un champ électrique pulsé bidirectionnel	79
3.11	Extraction de l'huile de sésame par CEP	82
3.12	Extraction d'huile de tournesol par CEP	83
3.13	Traitement du jus de carotte par CEP.....	85
3.14	Extraction par pressage et CEP de fruits et de légumes	87
3.15	Extraction par chauffage ohmique et CEP de betterave sucrière	89
3.16	Extraction du jus des tranches de pomme par CEP.....	90
3.17	Extraction de polyphénols du thé par CEP.....	91
3.18	Application du CEP pour la bioraffinerie	93
3.19	Extraction du glutathion par CEP.....	96
3.20	Application du CEP dans la transformation des kiwis.....	97
3.21	Application du CEP au traitement d'ovoproduits	100
3.22	Conclusion.....	101
4	Conception et simulation de deux générateurs HT	103
4.1	Introduction.....	103
4.2	Conception d'un générateur haute tension DC	103
4.2.1	Circuit multiplicateur de tension	103
4.2.1.1	Circuit doubleur de tension Greinacher.....	103
4.2.1.2	Multiplicateur COCKCROFT-WALTON.....	104
4.2.2	Critères de conception	108
4.2.2.1	Sélection de condensateur	108
4.2.2.2	Sélection de diodes	108
4.2.3	Schéma de circuit.....	109
4.2.4	Simulation et travaux expérimentaux	111
4.2.4.1	Circuit d'alimentation AC variable (0-230 V)	111
4.2.4.2	Circuit du générateur haute tension DC	114
4.3	Conception d'un générateur haute tension d'impulsion	119
4.3.1	Simulation et travaux expérimentaux	120
4.3.1.1	Schéma général du générateur d'impulsions haute tension	120
4.3.2	Construction du générateur.....	123
4.4	Conclusion	126
5	Application du CEP sur les produits végétaux.....	127
5.1	Introduction.....	127
5.2	Huiles essentielles	127
5.3	Procédés d'extraction des huiles essentielles	128
5.3.1	Techniques d'extraction conventionnelles	128

5.3.1.1	Distillation à la vapeur.....	128
5.3.1.2	Hydrodistillation.....	129
5.3.1.3	Extraction Soxhlet	129
5.3.1.4	Pressage à froid.....	130
5.3.1.5	Extraction par solvant.....	130
5.3.2	Techniques d'extraction non conventionnelles.....	131
5.3.2.1	Extraction par fluide supercritique	131
5.3.2.2	Extraction assistée par micro-ondes	132
5.3.2.3	Extraction assistée par ultrasons.....	133
5.3.2.4	Extraction assistée par enzyme.....	133
5.3.2.5	Extraction de liquide sous pression	134
5.3.2.6	Extraction par champ électrique pulsé.....	134
5.4	Principaux travaux antérieurs de l'effet du CEP sur les HEs	135
5.4.1	Effet sur le rendement de l'HE de <i>rose (Rosa damascena Mill.)</i>	135
5.4.2	Effets du CEP sur le rendement de l'HE de <i>rose</i>	137
5.4.3	Application du CEP sur l'extraction de l'HE de <i>Marrubium vulgare</i>	138
5.4.4	Application du CEP pour l'extraction de l'HE d' <i>Artemisia herba alba</i>	139
5.4.5	Effet du CEP sur l'HE d'eucalyptus, de romarin et de thym	140
5.4.6	Application du CEP pour l'extraction de HE de <i>Mentha Spicata L.</i>	142
5.4.7	Application du CEP pour l'extraction de HE de <i>Lavande</i>	143
5.5	Application du CEP pour l'extraction de l'huile essentielle de <i>Basilic</i>	144
5.5.1	Matériel végétal	144
5.5.2	Protocole d'extraction.....	145
5.5.3	Protocole de traitement par CEP	146
5.5.4	Analyse par la méthode spectrophotométrie d'absorption.....	147
5.5.5	Résultats et discussion.....	147
5.5.5.1	Rendement en huile essentielle par la méthode conventionnelle	147
5.5.5.2	Effet du CEP sur le rendement d'extraction de HE	148
5.5.5.3	Effet du CEP sur l'absorption de l'HE de basilic	149
5.6	Conclusion	151
	Conclusion générale	152
	Bibliographie.....	154

Introduction générale

Introduction générale

Pour des raisons économiques et environnementales, plusieurs industries notamment les industries agro-alimentaires et chimiques sont confrontées au défi de l'utilisation des nouvelles technologies pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Les méthodes de traitement non thermique suscitent un intérêt croissant dans l'industrie, qui reconnaît leur potentiel pour remplacer ou compléter les méthodes traditionnelles de traitement thermique. Pour répondre aux besoins des différentes industries qui doivent satisfaire à la fois les demandes économiques changeantes et le respect de l'environnement tout en restant mondialement compétitives, les technologies innovantes conduisent à une meilleure utilisation des matières premières et de l'énergie.

Récemment, les technologies d'énergie pulsée, notamment les champs électriques pulsés (CEP, PEF : Pulsed Electric Fields en anglais) ont commencé à être activement utilisées dans l'industrie. Le champ électrique pulsé est un traitement qui implique l'application d'impulsions haute tension à courant continu pendant de très courtes périodes, dans la plage de microsecondes à millisecondes, à travers un matériau placé entre deux électrodes (Dobrev et al., 2013; Toepfl et al., 2006). Cette technologie s'est révélée être une méthode efficace pour la perméabilisation irréversible des membranes cellulaires dans les tissus végétaux et animaux sans augmentation significative de la température de l'échantillon et nécessitant un fonctionnement à faible coût (Toepfl et al., 2006). Ce procédé, connu sous le nom d'électroporation, donne lieu à diverses applications dans différents domaines tels que la médecine, la transformation alimentaire et l'agriculture (Jeong et al., 2024; Qu et al., 2023; Shorstkii et al., 2023).

Des générateurs d'énergie pulsée compacts, à puissance crête modérée et fonctionnement répétitif, ont été développés pour contrôler la distribution du champ électrique. Les progrès récents réalisés dans de nombreux composants des systèmes d'alimentation pulsée – batteries, condensateurs, inducteurs et systèmes de charge – ont permis d'appliquer la technologie de l'alimentation pulsée de manière économique aux environnements commerciaux et industriels (Mansson, 1999).

La technologie de CEP s'est développée rapidement, ce qui a donné lieu à de nombreux projets de recherche et de développement. Beaucoup des rapports ont démontré les avantages de l'application du CEP qui comprend une bonne efficacité d'extraction ainsi qu'un rendement

élevé pour une consommation d'énergie minimale à basse fréquence (Dymek et al., 2014; Fincan & Dejmek, 2002). L'application réussie de la technologie CEP suggère une alternative au traitement thermique conventionnel des produits alimentaires liquides tels que les jus de fruits, le lait et les œufs liquides (Raso et al., 2022). La perméabilité des membranes cellulaires par CEP contribue à améliorer l'extraction des agents nutritifs et des métabolites antioxydants des produits agricoles (Takaki et al., 2021).

Contexte de l'étude :

Les agro-ressources sont les végétaux qui fournissent des composés de base nécessaires à l'industrie, notamment les huiles essentielles (HEs) pour les industries agroalimentaire, pharmaceutique et parfumerie, biocarburants, engrais organiques graisse, coton, laine et fibres végétales. Elles ont un impact significatif sur l'environnement grâce à des pratiques telles que l'utilisation de pesticides et d'engrais d'origine chimique, qui peuvent entraîner une pollution de l'eau et perturber les écosystèmes. L'interaction entre les agro-ressources et l'environnement présente des défis importants, notamment dans le contexte de la pollution, de l'épuisement des ressources et de la dégradation écologique (Bulut & Gökalp, 2022). La résolution de ces problèmes nécessite une approche multidimensionnelle qui met l'accent sur les technologies alternatives. Dans une perspective de développement durable, ces procédés alternatifs auront alors pour principal verrou technologique la suppression des solvants organiques durant le procédé. De nos jours, une activité économique considérable se développe tant pour les arômes artificiels que naturels, et la recherche d'une production élevée et variée pose le problème de valorisation de nouvelles espèces végétales et de mise en œuvre de procédés d'extraction plus efficaces.

La flore Algérienne est caractérisée par sa diversité florale: Méditerranéenne et Saharienne, estimée à plus de 3000 espèces appartenant à plusieurs familles botaniques. Ces espèces sont pour la plupart spontanées avec un nombre non négligeable (Ozenda, 1983). Ces plantes aromatiques sont, donc, à l'origine de produits à forte valeur ajoutée (huiles essentielles, extraits, résines...) qui présentent un potentiel économique important.

Les huiles essentielles sont utilisées dans le secteur agricole comme substituts naturels aux pesticides et herbicides de synthèse (Bolouri et al., 2022) et comme insecticides écologiques en raison de leur impact minimal sur l'environnement (Popescu et al., 2024). De plus, les huiles essentielles jouent un rôle dans la prévention de la germination avant récolte de cultures comme le blé et l'orge, contribuant ainsi à l'amélioration du rendement et de la qualité de l'agriculture (Bolouri et al., 2022). Elles ont des applications dans des secteurs tels que la pharmacie,

l'alimentation et les cosmétiques en raison de leurs propriétés antimicrobiennes, antioxydantes, anti-inflammatoires, antivirales et aromatiques (Al-Refaie et al., 2023; Salanță & Cropotova, 2022; Sharma et al., 2023). Des recherches indiquent que les huiles essentielles ont la capacité de se biodégrader en composés non toxiques (Assadpour et al., 2024). De plus, leurs composants peuvent servir de compléments alimentaires bénéfiques, favorisant potentiellement la croissance du bétail (Wike et al., 2024).

Objectifs :

Les techniques traditionnelles d'extraction de ces substances naturelles à partir des plantes nécessitent d'importantes adaptations afin de réduire les risques pour la santé, la sécurité et l'environnement. En conséquence, la recherche de produits et de procédés alternatifs plus respectueux de l'homme et de son environnement occupe une place primordiale en recherche et développement.

Le champ électrique pulsé est considéré comme une technologie verte et non thermique car elle évite ou réduit considérablement les changements préjudiciables des propriétés sensorielles et physiques des aliments, et en raison de ses besoins réduits en énergie et en solvant (Feng et al., 2022; Hernández-Corroto et al., 2023; Tintchev et al., 2012).

L'application de champs électriques pulsés à un système alimentaire ou végétal suscite depuis peu l'intérêt des chercheurs du monde entier, car elle permet d'éviter ou de réduire considérablement les altérations des propriétés sensorielles et physiques des aliments. Sur le plan économique, le CEP permet de réduire les coûts de traitement en minimisant la consommation d'énergie et en préservant la qualité des produits (Miloudi et al., 2022) ce qui peut prolonger la durée de conservation et réduire les déchets (Jeong et al., 2024). Il est également reconnu pour son efficacité, sa durabilité, sa faible production de chaleur et sa capacité à préserver la qualité des huiles extraites (Oey et al., 2022).

L'objectif de cette étude est d'examiner l'impact du traitement par CEP sur les caractéristiques quantitatives et qualitatives des produits traités. Elle décrit le mécanisme du traitement CEP et son effet sur les caractéristiques quantitatives et qualitatives des aliments. Cette étude souligne l'importance du CEP pour l'extraction de divers composés de la matrice végétale, tels que les huiles essentielles. Un système de traitement par CEP est développé pour générer une tension d'impulsion. Il est composé essentiellement des générateurs haute tension DC (à courant continu) et d'impulsion.

Cette thèse est divisée en cinq chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui donnera un aperçu sur les générateurs haute tension, les techniques de génération des impulsions haute tension et ensuite, nous détaillerons les nouvelles technologies utilisées et les méthodes spéciales. Dans le deuxième chapitre, nous détaillerons l'équipement et les méthodes employés pour le traitement par champ électrique pulsé ainsi que les différents facteurs opérationnels et biologiques du traitement par CEP. Le troisième chapitre présentera les applications industrielles du champ électrique. Les caractéristiques de performance du CEP seront ensuite présentées. Le quatrième chapitre sera consacré à la conception des générateurs haute tension du laboratoire, les montages pratiques des circuits et les résultats obtenus. Et, le cinquième chapitre apportera l'étude d'une nouvelle technologie proposée dans ce travail, le traitement par champ électrique pulsé pour l'extraction des huiles essentielles à partir des matières premières végétales.

Générateurs haute tension

1 Générateurs haute tension

1.1 Introduction

La technologie de la haute tension est un domaine du génie électrique dont les principes scientifiques se trouvent essentiellement dans la physique et qui, par ses applications, est intimement lié à la pratique industrielle. Elle s'intéresse aux phénomènes physiques et aux problèmes techniques associés aux hautes tensions. Les ingénieurs en systèmes électriques s'intéressent aux hautes tensions, principalement pour le transport d'énergie, et ensuite pour tester leurs équipements.

La génération de la haute tension doit être réalisée en laboratoire d'essais. Dans de nombreux laboratoires d'essais, la source d'énergie principale est la basse tension (400 V triphasé ou 230 V monophasé, à 50 Hz). L'isolation étant généralement testée, les impédances impliquées sont extrêmement élevées (de l'ordre de $M\Omega$). Par conséquent, les tests de haute tension ne nécessitent généralement pas une puissance élevée. Des méthodes spéciales peuvent donc être utilisées, qui ne sont pas applicables à la génération de haute tension dans les applications de forte puissance (Lucas, 2001).

1.2 Génération de hautes tensions alternatives

Les laboratoires requièrent des tensions alternatives élevées pour les expériences et les essais en courant alternatif, ainsi que pour la plupart des circuits de génération de tensions continues et de choc élevées. Les transformateurs d'essai généralement utilisés à cet effet ont une puissance nominale considérablement inférieure et des rapports de transformation souvent bien plus élevés que les transformateurs de puissance. Le courant primaire est généralement fourni par des transformateurs de régulation alimentés par le secteur ou, dans des cas particuliers, par des générateurs synchrones (Kind, 2013).

La plupart des essais et expériences avec des tensions alternatives élevées nécessitent une connaissance précise de la valeur de la tension. Cette exigence ne peut généralement être satisfaite que par des mesures du côté haute tension de l'alimentation ; diverses techniques de mesure des tensions alternatives élevées ont été conçues à cet effet (Kind, 2013; Wadhwa, 2007).

1.2.1 Paramètres caractéristiques

La forme de $u(t)$ pour les tensions alternatives élevées s'écarte souvent considérablement de la sinusoïde. En ingénierie haute tension, la valeur de crête $\hat{U}$ et la valeur efficace (r.m.s.) sont des paramètres importants :

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (1-1)$$

Pour les essais haute tension, la quantité $\hat{U}/\sqrt{2}$ est définie comme la tension d'essai. On suppose ici que l'écart entre la forme haute tension et la forme sinusoïdale ne dépasse pas la valeur admissible. Pour une forme sinusoïdale pure, $\hat{U}/\sqrt{2} = U_{rms}$ (Kind, 2013).

1.2.2 Circuits de transformateurs de test

Les transformateurs destinés à générer des tensions d'essai alternatives élevées ont généralement une extrémité de leur enroulement haute tension mise à la terre. Cependant, de nombreux circuits destinés à générer des tensions continues et des tensions de choc élevées nécessitent des transformateurs à enroulements complètement isolés.

La figure 1.1 illustre deux circuits de base pour transformateurs d'essai. La longueur des flèches de tension indique l'intensité de la contrainte sur l'isolation entre l'enroulement haute tension H et l'enroulement d'excitation E ou le noyau de fer F. L'enroulement entièrement isolé peut être mis à la terre si nécessaire à l'une des deux bornes ou à la prise médiane, comme illustré ; dans ce dernier cas, la tension de sortie sera symétrique par rapport à la terre (Kind, 2013).

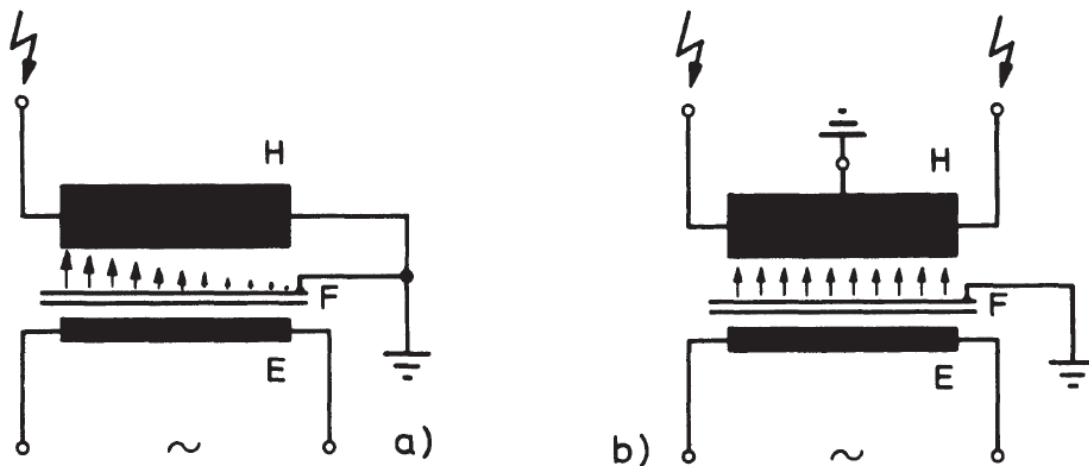


Figure 1.1 : Circuits de transformateur d'essai à un étage (Kind, 2013)
a) Pôle seule isolé ; b) Enroulement entièrement isolé

Pour générer des tensions supérieures à quelques centaines de kV, les transformateurs mono-étages conformes à la figure 1.1 sont désormais rarement utilisés ; pour des raisons économiques et techniques, on utilise plutôt une connexion en série des enroulements haute tension de plusieurs transformateurs.

Dans une telle configuration en cascade (Figure 1.2), chaque transformateur doit être isolé pour des tensions correspondant à celles des étages inférieurs. Les enroulements d'excitation des transformateurs de tous les étages, à l'exception du plus bas, fonctionnent à potentiel élevé.

Les enroulements d'excitation E des étages supérieurs sont alimentés par les enroulements de couplage K des étages immédiatement inférieurs, H est l'enroulement haute tension. Chaque étage, à l'exception du supérieur, doit être constitué de transformateurs à trois enroulements. La puissance transportée par chaque enroulement est indiquée sur la figure 1.2 en termes de multiples de P.

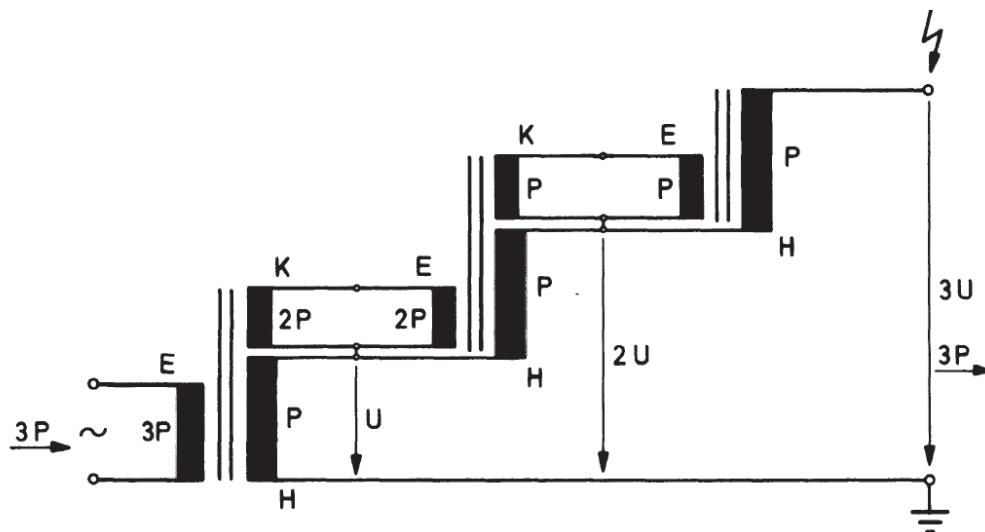


Figure 1.2 : Transformateur de test en cascade à trois étages

Des transformateurs d'essai en montage en cascade ont déjà été réalisés pour des tensions supérieures à 2 MV.

1.2.3 Génération de haute tension avec circuits résonants

Le circuit résonant série formé par l'inductance et la capacité de l'objet à tester peut-être exciter par un transformateur de tension secondaire relativement faible. Les circuits résonants sont particulièrement avantageux lorsque l'objet testé présente une capacité élevée, par exemple un câble haute tension. L'avantage principal d'un tel circuit est que la tension de sortie s'écarte peu d'une sinusoïde et que, grâce à ses caractéristiques, la puissance réactive requise pour l'objet testé est presque entièrement compensée (Kind, 2013).

Le transformateur Tesla, du nom de son inventeur, appartient également à la classe des circuits résonants. Ce circuit comprend un circuit oscillant primaire et un circuit oscillant secondaire en couplage magnétique faible. Les décharges périodiques du condensateur primaire via un éclateur provoquent des oscillations à haute fréquence, généralement comprises entre 10^4 et 10^5 Hz (Kind, 2013).

En fonction des caractéristiques du circuit choisi et du rapport de transformation entre l'enroulement secondaire et l'enroulement primaire, des tensions supérieures à 1 MV ont été générées avec des transformateurs Tesla (Kind, 2013).

1.2.4 Générateur de Tesla

Le transformateur Tesla (Figure 1.4) est un autre moyen de stockage capacitif. Il s'agit d'un transformateur résonant où $L_1C_1 = L_2C_2$, les deux côtés du transformateur résonnant ainsi à la même fréquence (Vinitha, 2008).

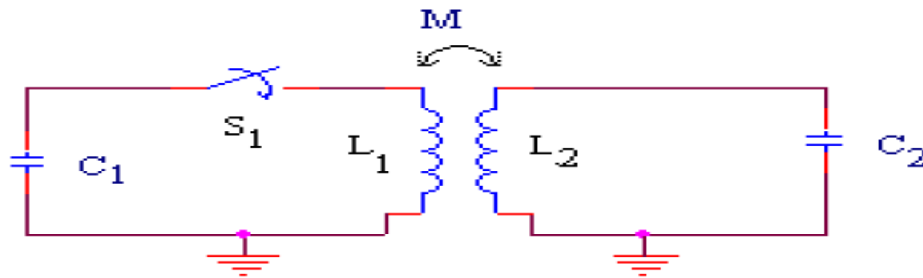


Figure 1.4 : Schéma d'un transformateur Tesla

La tension de sortie V_{C2} est donnée par :

$$V_{c2} = \frac{V_0}{2} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} [\cos(\frac{\omega t}{\sqrt{1-k}}) - \cos(\frac{\omega t}{\sqrt{1+k}})] \quad (1-2)$$

Où :

- V_0 est la tension de charge ;
- ω est la fréquence de résonance des circuits primaire et secondaire ;
- k est le coefficient de couplage du transformateur, l'amortissement est négligé.

Pour un coefficient de couplage élevé, $k > 0,9$, le temps jusqu'à la tension de crête peut être approximé comme suit :

$$\tau \approx \frac{\pi \sqrt{1-k}}{\omega} \quad (1-3)$$

1.3 Génération de hautes tensions continues

Les hautes tensions continues ont de nombreuses applications en laboratoire, dans les tests d'isolation de dispositifs à forte capacité, comme les condensateurs ou les câbles, et les recherches fondamentales en physique des décharges et en comportement diélectrique. Parmi les applications techniques, on trouve la génération de rayons X, les précipitateurs, la pulvérisation de peinture et le revêtement par poudre.

Les méthodes de génération de hautes tensions continues les plus courantes utilisent le redressement de hautes tensions alternatives, souvent par multiplication de tension ; des générateurs électrostatiques sont également utilisés. Les hautes tensions continues sont généralement mesurées à l'aide d'un diviseur résistif ou de voltmètres électrostatiques (Kind, 2013).

1.3.1 Paramètres caractéristiques

La tension d'essai continue est définie comme la valeur moyenne arithmétique :

$$\overline{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (1-4)$$

Les fluctuations périodiques de la tension continue entre la valeur de crête $\hat{U}$ et la valeur minimale $U_{\min}$ sont données en termes d'amplitude d'ondulation :

$$\delta U = \frac{1}{2} (\hat{U} - U_{\min}) \quad (1-5)$$

L'expression $\frac{\delta U}{\overline{U}}$ est appelée « facteur d'ondulation ». Parfois, en fonction du mode de fonctionnement de certaines méthodes de mesure, la valeur efficace U_{eff} est citée. Pour une tension continue bien lissée, $\frac{\delta U}{\overline{U}} \ll 1$, et nous avons (Kind, 2013):

$$\overline{U} \approx \hat{U} \approx U_{\text{eff}} \quad (1-6)$$

1.3.2 Circuit redresseur demi-période

Le circuit le plus simple pour la génération d'une tension continue élevée est le redressement demi-période illustré à la figure 1.5. Une charge R est alimentée par un transformateur haute tension T via un redresseur V. Nous supposons que la tension secondaire $u_T(t)$ du

transformateur est une sinusoïde et que le redresseur est idéal, c'est-à-dire avec une résistance directe nulle et un courant inverse nul.

Les figures 1.5b et 1.5c montrent la forme de la tension aux bornes de la charge pour des conditions de régime permanent pour des circuits avec et sans condensateur de lissage C, indiqué par une ligne pointillée.

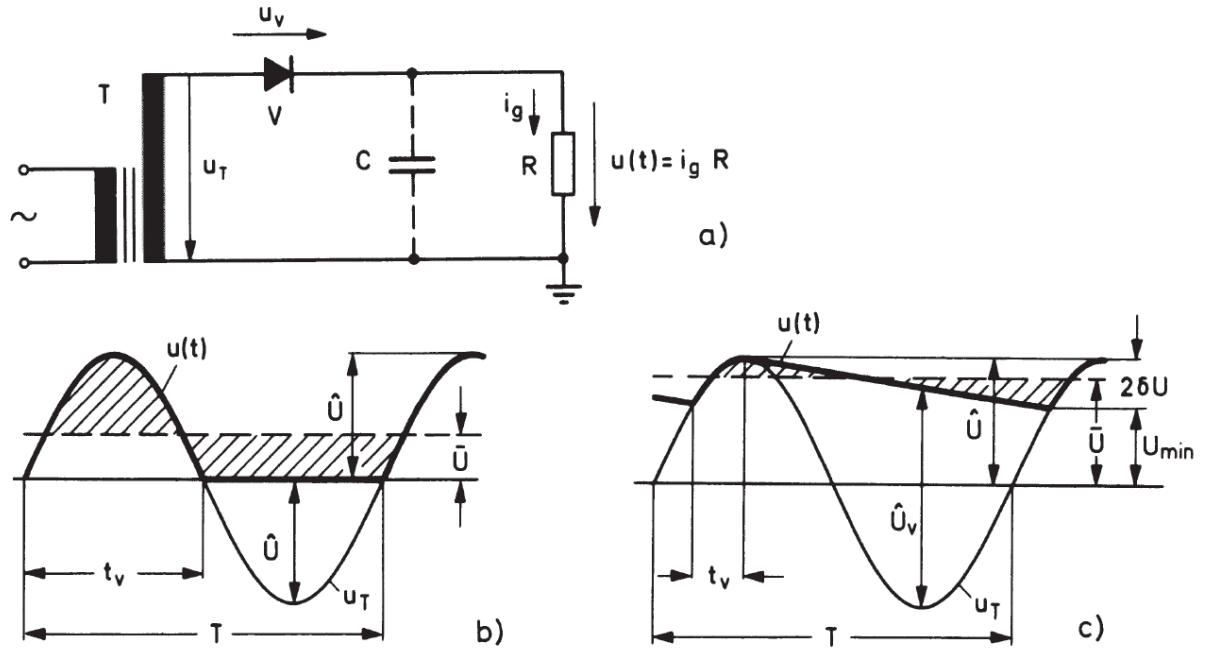


Figure 1.5 : Redressement demi-période avec éléments de circuit idéaux
a) Circuit ; b) Courbe de tension de sortie sans condensateur de lissage C ;
c) Courbe de tension de sortie avec condensateur de lissage C

Le circuit sans le condensateur de lissage C donnera une tension continue pulsée avec les valeurs caractéristiques suivantes :

$$\hat{U} = \hat{U}_T ; \bar{U} = \frac{1}{\pi} \hat{U} ; U_{eff} = \frac{1}{2} \hat{U} \quad (1-7)$$

La période de conduction t_v du redresseur est égale à la moitié de la période T de la tension alternative. La tension inverse crête aux bornes du redresseur, en sens inverse, est :

$$\hat{U}_V = \hat{U}_T \quad (1-8)$$

Pour le circuit avec le condensateur de lissage C, on obtient une tension continue lissée avec ondulation résiduelle. On obtient :

$$\hat{U} = \hat{U}_T ; \bar{U} \approx \hat{U} - \delta U \quad (1-9)$$

Plus le lissage de la tension est bon, plus la période t_v de circulation du courant est courte. Ainsi, pendant la période de conduction du redresseur, seule une courte impulsion de courant direct circule à chaque fois, la tension inverse crête étant :

$$\hat{U}_v \approx 2\hat{U}_T \quad (1-10)$$

En se référant à la Figure 1.5c, la valeur d'ondulation peut être facilement calculée. Lorsque :

$$t_v \ll T = \frac{1}{f} \text{ et } \delta U \ll \bar{U} \quad (1-11)$$

La courbe de décharge exponentielle du condensateur C pendant la période de blocage de V peut alors être remplacée par une droite. À partir de la variation de charge du condensateur de lissage pendant la période de blocage, on obtient :

$$2\delta UC \approx \int_0^T i_g dt = T \bar{I}_g \quad (1-12)$$

$$\delta U \approx \bar{I}_g \frac{1}{2fC} \quad (1-13)$$

En redressement à période complète, les intervalles de temps entre les recharges successives, et donc l'ondulation à δU , sont réduits de moitié. Les méthodes habituelles pour réduire l'ondulation dans les circuits redresseurs consistent à augmenter la taille du condensateur de lissage et la fréquence. En laboratoire, des fréquences allant jusqu'à environ 10 kHz sont fréquemment utilisées et des facteurs d'ondulation de quelques pour cent sont courants. Avec des filtres à plusieurs étages et/ou une compensation électronique de l'ondulation, des facteurs d'ondulation de l'ordre de 10^{-5} peuvent être obtenus (Kind, 2013; Wadhwa, 2007).

1.3.3 Circuits multiplicateurs de tension

Les circuits multiplicateurs les plus utilisés ont en commun de ne pouvoir fournir que des courants relativement faibles et ne sont donc pas adaptés aux applications à courant élevé, comme le transport de courant continu haute tension (Kind, 2013).

1.3.3.1 Circuit des cascades de Greinacher

Ce circuit, suggéré en 1920 par H. Greinacher et également connu sous le nom de multiplicateur de Cockroft-Walton, est la méthode la plus répandue pour la génération de très hautes tensions continues. Il s'agit d'une extension du circuit doubleur de Greinacher.

Un circuit à trois étages est illustré à la figure 1.6 à titre d'exemple ; de nombreux circuits pratiques ne comprennent que les éléments représentés en gras. Les tensions indiquées s'appliquent à des éléments de circuit idéaux et à vide. Pour obtenir une chute de tension plus uniforme, il est utile de choisir une capacité C_0 de l'unité la plus basse égale à deux fois C_1 , celle des condensateurs situés au-dessus. L'empilement de condensateurs, composé des éléments C_2 en série, sert, entre autres, de condensateur de lissage. Les caractéristiques de charge d'une cascade peuvent être déduites de celles du circuit redresseur demi-période de la figure 1.5 (Kind, 2013; Wadhwa, 2007).

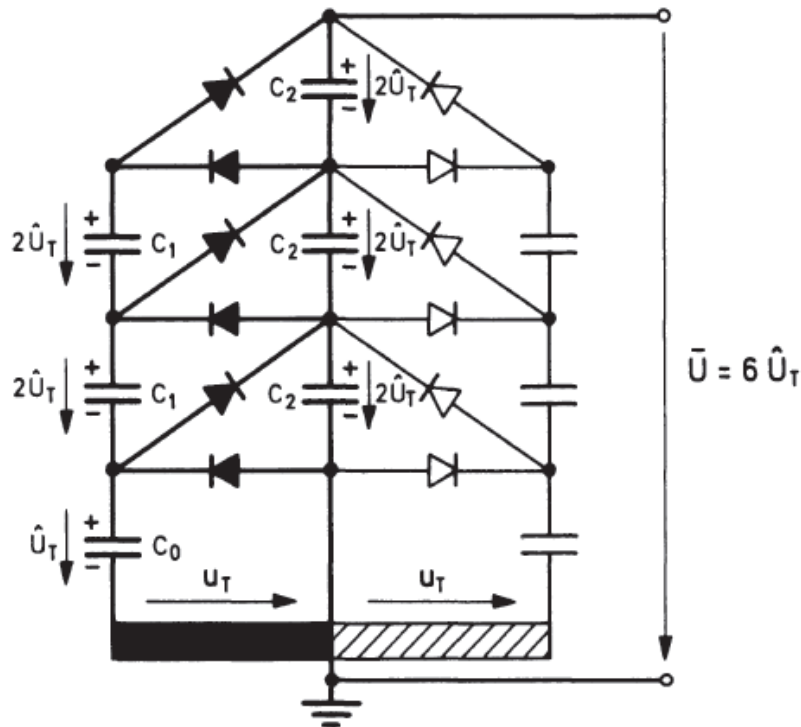


Figure 1.6 : Circuit en cascade Greinacher (à vide) (Kind, 2013)

Le circuit multi-étages asymétrique simple présente une ondulation relativement élevée (δU) et une chute de tension (ΔU) sous charge, même à fréquence d'entrée élevée ; cette situation s'aggrave avec l'augmentation du nombre d'étages. L'extension du circuit à une cascade Greinacher symétrique, en incluant les lignes fines illustrées à la figure 1.6, réduit l'ondulation et la chute de tension, offrant ainsi des avantages considérables (Kind, 2013).

Les cascades Greinacher ont été construites pour des tensions de 5 MV ; les capacités de courant typiques des configurations de test sont de l'ordre de 10 mA (Kind, 2013).

1.3.3.2 Générateurs électrostatiques

Dans les générateurs électromagnétiques, les conducteurs parcourus par le courant se déplacent contre les forces électromagnétiques qui agissent sur eux. Dans les générateurs électrostatiques, le mouvement des particules chargées électriquement se produit contre les forces électrostatiques qui agissent sur elles (Kind, 2013).

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique est présenté par la figure 1.7.

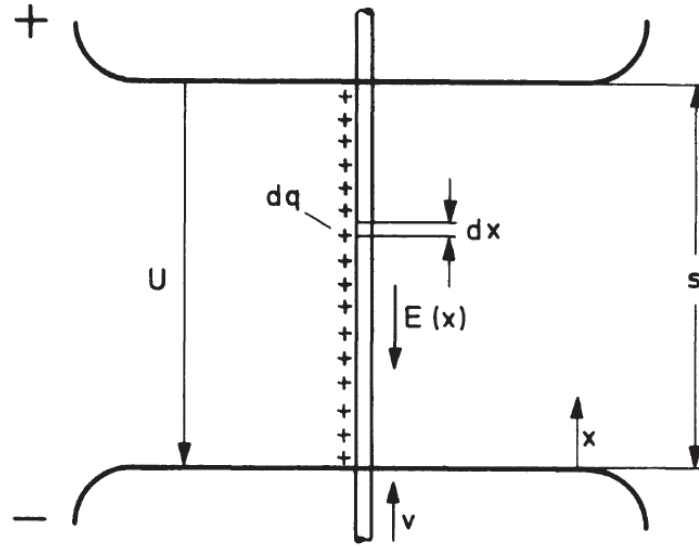


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement des générateurs électrostatiques (Kind, 2013)

Une ceinture isolée de largeur b et de densité de porteurs de charge σ est suspendue dans le champ électrique $E(x)$ entre deux électrodes espacées de s . La charge sur une bande de hauteur dx est donnée par :

$$dq = \sigma b dx \quad (1-14)$$

La force agissant sur l'ensemble de la courroie est :

$$F = \int_0^s dF = \int_0^s E(x) dq = \sigma b \int_0^s E(x) dx \quad (1-15)$$

Si la courroie est déplacée à vitesse constante $v = dx/dt$ contre cette force, la puissance mécanique nécessaire est :

$$P = Fv = \sigma bv \int_0^s E(x) dx \quad (1-16)$$

Nous avons :
$$I = \frac{dq}{dt} = \sigma bv \quad (1-17)$$

Et :
$$U = \int_0^s E(x) dx \quad (1-18)$$

On constate que la puissance mécanique nécessaire à l'entraînement est égale à la puissance électrique délivrée IU.

Le type de générateur électrostatique le plus courant est le générateur à courroie, conçu en 1931 par R.I. van de Graaff, dont le principe de fonctionnement est illustré à la figure 1.8. Une courroie isolée passe sur des rouleaux et est chargée électrostatiquement par un dispositif d'excitation. Une configuration d'électrodes fortement inhomogène est utilisée à cet effet ; les porteurs de charge formés par ionisation par collision au niveau de l'électrode pointue sont piégés par la courroie lors de leur trajet vers l'électrode opposée. Une configuration similaire à l'extrémité haute tension permet de décharger la courroie. Si un autre dispositif d'excitation de polarité opposée est prévu au niveau haute tension pour le côté descendant de la courroie, on obtient un courant deux fois plus important (Kind, 2013).

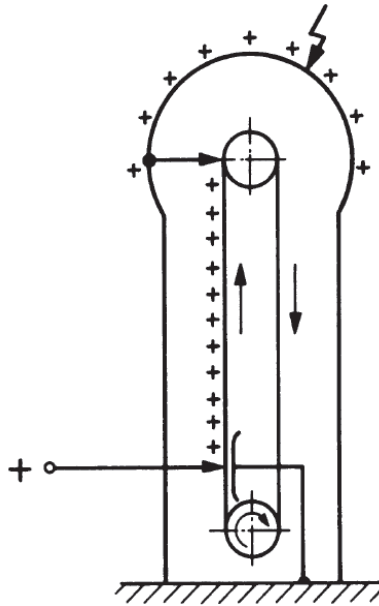


Figure 1.8 : Générateur d'appels Van de Graaff (Kind, 2013)

Des générateurs à courroie de type réservoir sous pression ont déjà été construits pour des tensions supérieures à 10 MV, où des courants inférieurs à 1 mA sont courants. Au lieu d'une courroie isolée, on peut également utiliser des liquides hautement isolants ou des matériaux solides pulvérulents comme porteurs de charge électrique (Kind, 2013).

1.4 Générateurs d'impulsions

L'objectif fondamental d'une alimentation pulsée est de convertir une impulsion d'entrée de faible puissance crête et de longue durée en une impulsion de forte puissance crête et de courte durée. Pour ce faire, les composants suivants sont nécessaires : une alimentation haute tension, un dispositif de stockage d'énergie, un étage de compression d'impulsions, un étage d'adaptation d'impédance, un commutateur et enfin la charge (Grenier, 2006).

Les tensions d'impulsion sont nécessaires aux essais haute tension pour simuler les contraintes dues aux surtensions externes et internes, ainsi que pour l'étude fondamentale des mécanismes de claquage. Elles sont généralement générées par la décharge de condensateurs haute tension via des éclateurs de commutation sur un réseau de résistances et de condensateurs, faisant souvent appel à des circuits multiplicateurs de tension. La valeur crête des tensions d'impulsion peut être déterminée à l'aide des éclateurs ou, mieux encore, mesurée par des circuits électroniques associés à des diviseurs de tension.

L'instrument de mesure le plus important pour les tensions d'impulsion est toutefois l'oscilloscope cathodique, qui permet de déterminer la caractéristique temporelle complète de la tension à l'aide de diviseurs de tension ; un convertisseur analogique-numérique peut parfois être utilisé à la place de l'oscilloscope (Kind, 2013).

1.4.1 Paramètres caractéristiques

En technologie haute tension, une impulsion de tension unipolaire unique est appelée tension d'impulsion ; trois exemples importants sont présentés à la figure 1.9, en référence aux paramètres caractéristiques possibles. La variation temporelle, ainsi que la durée de la tension d'impulsion, dépendent du mode de génération.

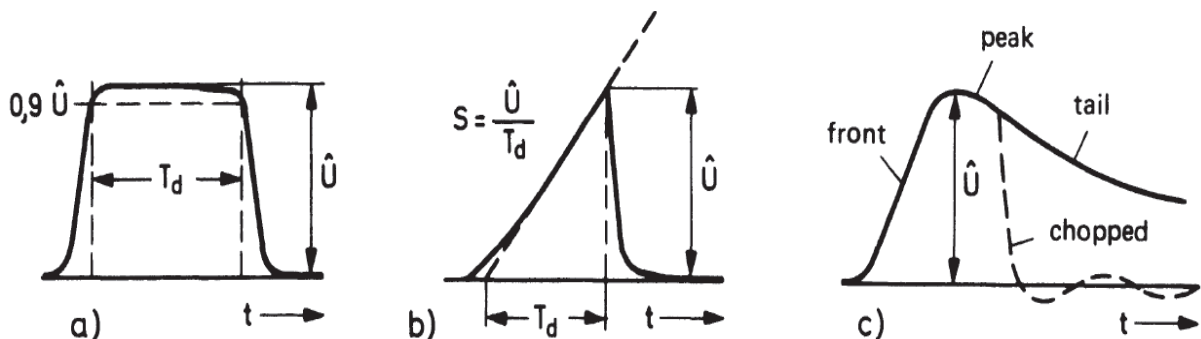


Figure 1.9 : Exemples de tensions d'impulsion (Kind, 2013)

a) Tension d'impulsion rectangulaire ; b) Tension d'impulsion cunéiforme ; c) Tension d'impulsion exponentielle double

Pour les expériences de base, on utilise souvent des tensions d'impulsion rectangulaires, qui augmentent brusquement jusqu'à une valeur quasi constante, ainsi que des tensions d'impulsion en forme de coin, caractérisées par une montée aussi linéaire que possible jusqu'au claquage, et décrites simplement par la pente S (Kind, 2013).

À des fins de test, des tensions d'impulsion exponentielles doubles ont été normalisées ; sans oscillation notable, elles atteignent rapidement un maximum, la valeur de crête $\hat{U}$, et chutent finalement moins brusquement jusqu'à zéro. Si un claquage, intentionnel ou non, se produit dans le circuit haute tension pendant l'impulsion, entraînant un effondrement soudain de la tension, on parle alors de tension d'impulsion hachée. Le hachage peut se produire au front, au pic ou à la queue de la tension d'impulsion. Le phénomène transitoire ainsi induit est principalement responsable des oscillations illustrées à la figure 1.9c (Kind, 2013).

Pour les surtensions consécutives à la foudre, le temps nécessaire pour atteindre la valeur crête est de l'ordre de $1\ \mu\text{s}$; on les appelle surtensions atmosphériques ou externes. Les tensions générées en laboratoire pour les simuler sont appelées tensions d'impulsion de foudre. Pour les surtensions internes, résultant des commutations dans les réseaux haute tension, le temps nécessaire pour atteindre la valeur crête est d'au moins $100\ \mu\text{s}$ environ (Kind, 2013).

Leur reproduction en laboratoire est assurée par des tensions d'impulsion de commutation ; celles-ci ont approximativement la même forme que les tensions d'impulsion de foudre, mais durent beaucoup plus longtemps (Kind, 2013).

Dans le cas de tensions d'impulsion à des fins de test, la forme de la tension est déterminée par certains paramètres temporels pour le front et la queue, comme indiqué dans la figure 1.10. La forme réelle du front des tensions d'impulsion de foudre étant souvent difficile à mesurer, la droite $O_1 S_1$ passant par les points A et B est introduite comme construction auxiliaire sur le front, afin de caractériser ce dernier. Le temps T_s jusqu'au front, ainsi que le temps T_r jusqu'à la demi-valeur, soit le temps entre O_1 et le point C, sont ensuite déterminés. En général, on utilise des tensions d'impulsion de foudre de forme 1,2/50, ce qui signifie une tension d'impulsion avec $T_s = 1,2\ \mu\text{s} \pm 30\%$ et $T_r = 50\ \mu\text{s} \pm 20\%$.

Les courbes des tensions d'impulsion de foudre présentent souvent des oscillations à haute fréquence superposées, dont l'amplitude ne peut pas dépasser $0,05\ \hat{U}$ dans la région du coup de foudre. On suppose dans ce cas que la fréquence des oscillations est d'au moins $0,5\ \text{MHz}$, sinon la valeur maximale réellement observée de la tension est prise comme valeur de crête de la tension d'impulsion de foudre (Kind, 2013).

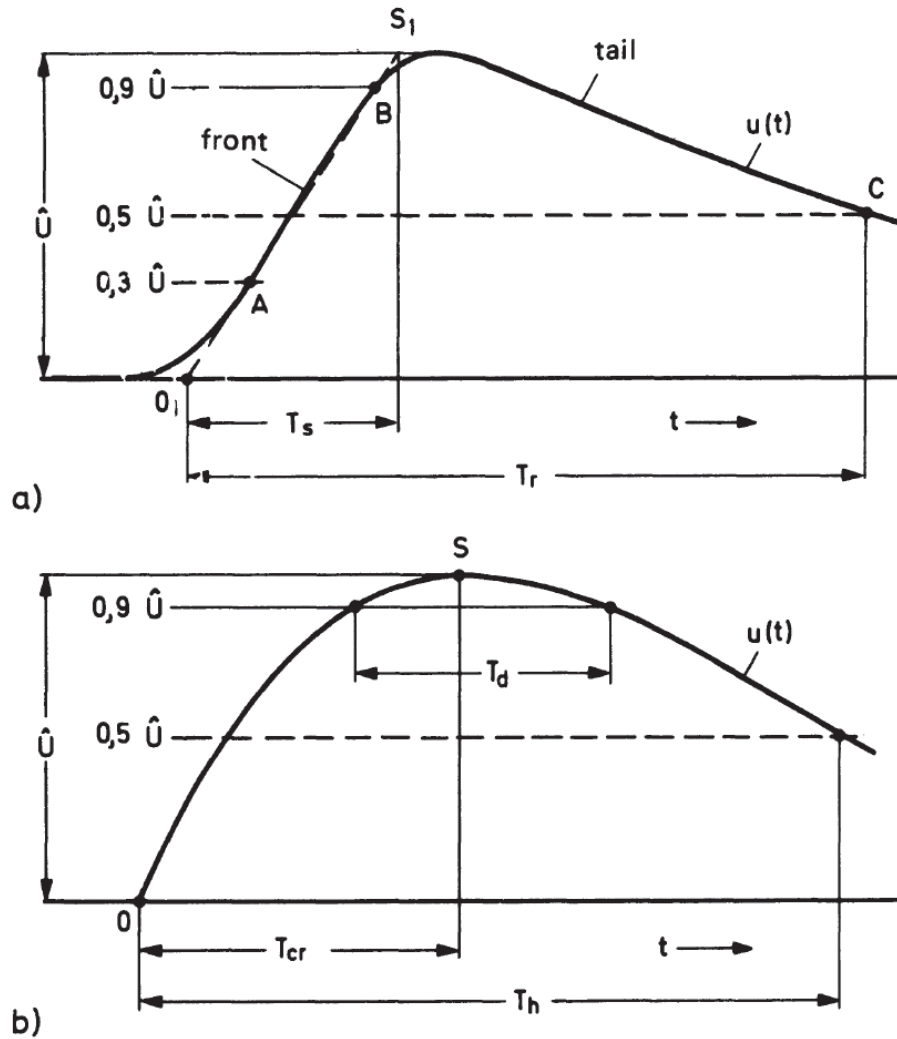


Figure 1.10 : Paramètres caractéristiques des tensions d'impulsion d'essai standard

a) Tension d'impulsion de foudre

b) Tension d'impulsion de commutation (Kind, 2013)

1.4.2 Circuit de base

Les générateurs d'impulsions utilisent le stockage d'énergie électrique, soit dans un champ électrostatique, soit dans un champ magnétique, et déchargent ensuite toute cette énergie stockée dans la charge. Pour réaliser cette décharge, un interrupteur est nécessaire. Il peut être fermé pour former un circuit fermé pour la décharge et ouvert pendant le temps nécessaire à la reconstitution de l'énergie stockée avant l'impulsion suivante. Un schéma simple d'un circuit de décharge est présenté par la figure 1.11 (Vinitha, 2008).

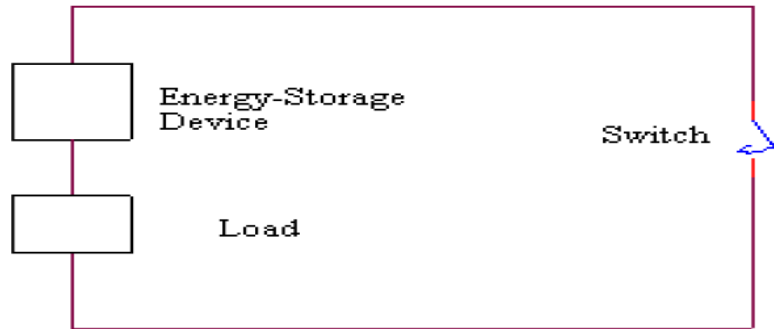


Figure 1.11 : Circuit de décharge de base d'un générateur d'impulsions (Vinitha, 2008)

1.4.3 Circuits capacitifs

La figure 1.12 présente les deux circuits de base les plus importants, appelés « circuit a » et « circuit b », utilisés pour la génération des tensions impulsionnelles. Le condensateur d'impulsion C_s est chargé à la tension continue U_0 via une résistance de charge élevée, puis déchargé par l'amorçage de l'éclateur F . La tension d'impulsion souhaitée $u(t)$ apparaît aux bornes du condensateur de charge C_b . Les circuits (a) et (b) diffèrent : dans un cas, la résistance de décharge R_e est connectée avant la résistance d'amortissement R_d , et dans l'autre, derrière celle-ci (Kind, 2013).

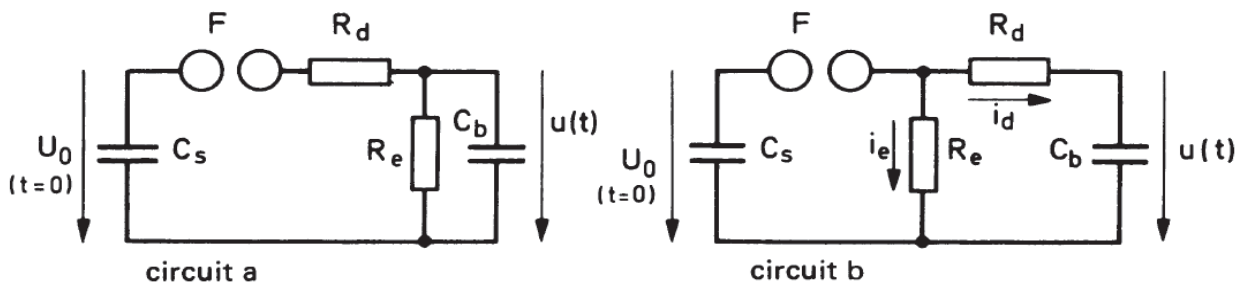


Figure 1.12 : Schémas de base des circuits de tension impulsionnelle (Kind, 2013)

La valeur des éléments du circuit détermine la forme de la courbe de tension d'impulsion. Le principe de fonctionnement de ces deux circuits peut être facilement compris grâce aux considérations simples suivantes. Le court temps d'apparition du front de charge nécessite une charge rapide du C_b jusqu'à la valeur de crête $\hat{U}$, tandis que le long temps d'apparition du front de charge nécessite une décharge lente. Ceci est obtenu par $R_e \gg R_d$.

Immédiatement après l'allumage de F à $t = 0$, presque la pleine tension de charge U_0 apparaît à travers la combinaison série de R_d et C_b dans les deux circuits. Plus la valeur de l'expression $R_d C_b$ est petite, plus la tension $u(t)$ atteint rapidement sa valeur maximale. La valeur maximale $\hat{U}$ ne peut être supérieure à celle déterminée par la répartition de la charge initialement disponible $U_0 C_s$ sur $C_s + C_b$ (Kind, 2013).

L'énergie d'impulsion transformée lors d'une décharge est alors :

$$W = \frac{1}{2} C_s U_0^2 \quad (1-19)$$

Si la tension de charge la plus élevée possible est substituée à U_0 dans cette expression, nous obtenons l'énergie d'impulsion maximale comme paramètre caractéristique important du générateur d'impulsion haute tension (Kind, 2013).

1.4.4 Générateurs de Marx

Pour des exigences de tension supérieures à 100 kV, un générateur de Marx est couramment utilisé. Le générateur de Marx de base a été inventé par Erwin Marx en 1923. Comme illustré à la figure 1.13, il est composé d'un groupe de condensateurs C , chargés en parallèle depuis l'alimentation d'entrée V_s via la résistance de charge r_c . La commutation s'effectue grâce aux éclateurs entre les étages, dont la tension de claquage est légèrement supérieure à V_s . L'impulsion HT se forme lorsque la tension de claquage en cascade des éclateurs se produit lors de la connexion des condensateurs chargés en série. Pour que la tension de claquage en cascade se produise, le premier éclateur est déclenché intentionnellement, exposant le second éclateur à une tension de $2V_s$, le forçant à conduire. Le processus se poursuit jusqu'à ce que tous les éclateurs soient court-circuités, ce qui provoque une impulsion de tension de NV_s appliquée à la charge R (Elgenedy, 2018).

Le générateur d'impulsions de base de Marx génère des impulsions unipolaires. Si des impulsions bipolaires sont requises, une autre source similaire alimentée par $-V_s$ est utilisée et la charge est connectée en différentiel entre les deux sorties de la source. Les résistances de charge constituent l'élément de contrôle du générateur de Marx. Si des impulsions plus rapides et plus courtes sont requises, les résistances de charge sont réduites.

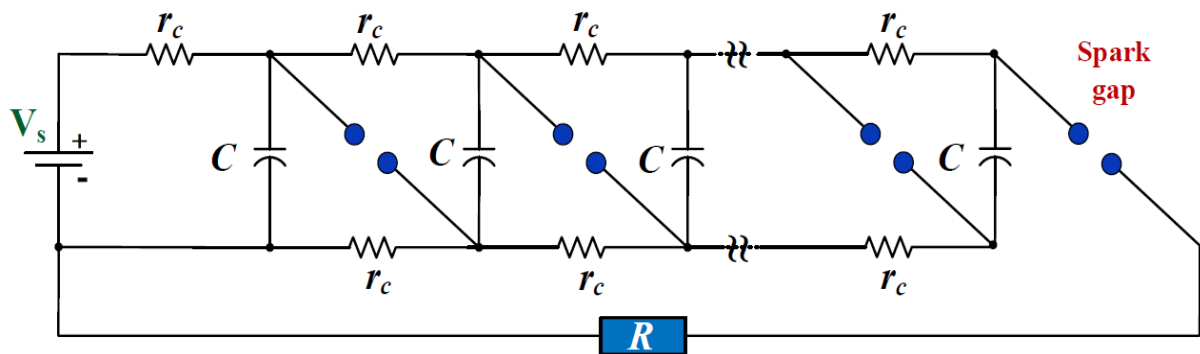


Figure 1.13 : Générateur de Marx classique (Elgenedy, 2018).

1.4.5 Réseau de formation d'impulsions

La nature de l'impulsion haute tension (HT) générée dans un générateur Marx est exponentielle. Si des impulsions quasi rectangulaires sont requises, un réseau de formation d'impulsions (PFN) peut être utilisé (Elgenedy, 2018).

Les caractéristiques fondamentales du circuit de décharge sont entièrement déterminées par les éléments qui le composent : le réseau de formation d'impulsions (PFN), le commutateur et la charge (Figure 1.14). Le réseau de formation d'impulsions a pour double fonction de stocker exactement la quantité d'énergie nécessaire à une impulsion unique et de la décharger dans la charge sous la forme d'une impulsion de forme spécifique. Certains générateurs d'impulsions sont appelés « pulsars de type ligne », car le dispositif de stockage d'énergie est essentiellement une ligne de transmission à constantes localisées. Ce composant du « pulsar de type ligne » sert non seulement de source d'énergie électrique pendant l'impulsion, mais aussi d'élément de mise en forme de l'impulsion, appelé réseau de formation d'impulsions (Vinitha, 2008).

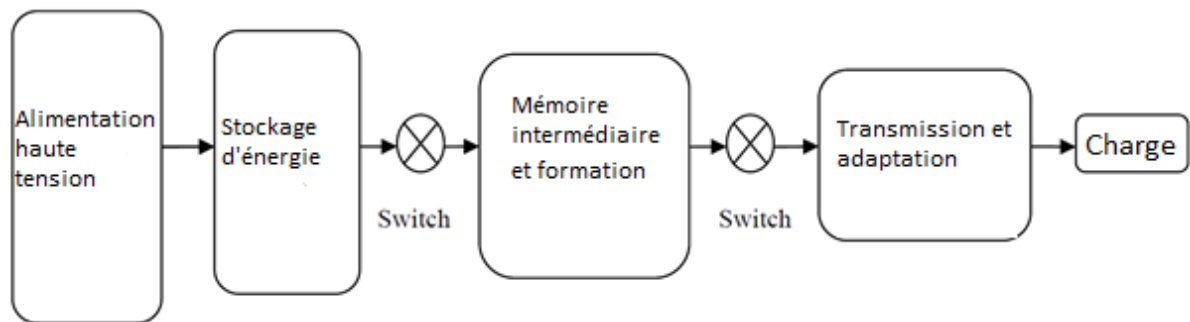


Fig.1.14 : Schéma d'un générateur de puissance pulsée (Kind, 2013)

L'énergie peut être stockée chimiquement, mécaniquement ou électriquement. Les réseaux dans lesquels l'énergie est stockée dans un champ électrostatique (capacitif) sont appelés réseaux alimentés en tension ; les réseaux dans lesquels l'énergie est stockée dans un champ magnétique (inductif) sont appelés réseaux alimentés en courant (Vinitha, 2008).

Une ligne de transmission sans perte chargée produit une impulsion d'énergie rectangulaire si elle est connectée, via un commutateur idéal, à une résistance pure d'amplitude égale à l'impédance caractéristique de la ligne. Cependant, en raison de certaines pertes et de commutateurs non idéaux, nous n'obtenons pas une forme d'onde purement rectangulaire (Vinitha, 2008).

Le réseau de formation d'impulsions est constitué de sections LC en cascade, comme illustré à la figure 1.16, connectées à une source de tension d'entrée V_s . Après avoir stocké l'énergie

dans les branches LC , un interrupteur HT est fermé sur la charge après déconnexion de l'alimentation d'entrée, de sorte que la tension d'impulsion requise est délivrée (Elgenedy, 2018). L'impédance du réseau est :

$$Z_o = \sqrt{L/C} \quad (1-20)$$

Où : Z_o est l'impédance caractéristique de PFN.

La durée d'impulsion est calculée à partir de :

$$t_p = 2N\sqrt{LC} \quad (1-21)$$

Où : t_p est la durée de l'impulsion générée.

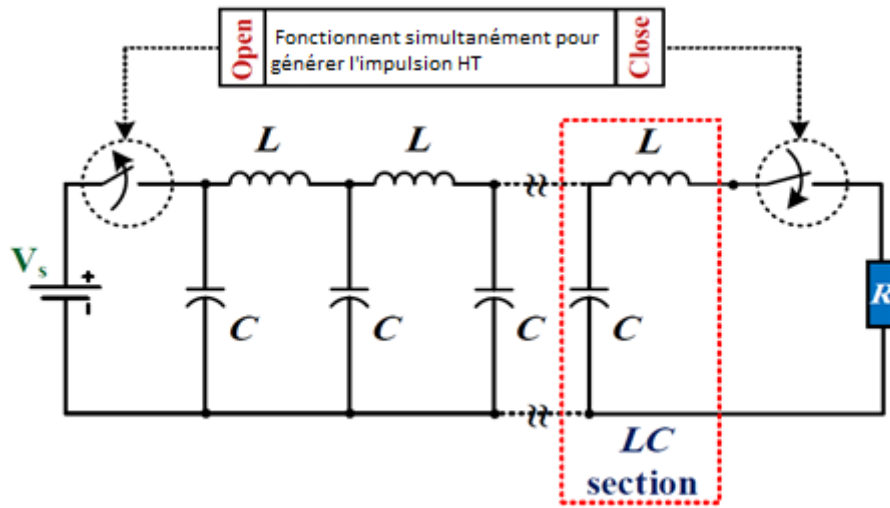


Fig.1.16 : Disposition PFN classique (Elgenedy, 2018)

Le PFN présente l'avantage d'une structure simple et de la capacité à générer une forme d'onde quasi rectangulaire. Ses principales limitations sont la plage de largeur d'impulsion limitée (un ajustement de la valeur LC est nécessaire lorsque des caractéristiques d'impulsion différentes sont requises) et le pic d'impulsion généré est deux fois inférieur à celui de l'alimentation d'entrée en raison d'une exigence d'adaptation de charge ($R = |Z_o|$). Afin d'augmenter la tension de crête de l'impulsion, le PFN peut être composé de plusieurs étages en cascade, en association avec un générateur de Marx. Les fronts d'impulsion peuvent être accentués en laissant le composant inducteur à noyau se saturer (Elgenedy, 2018).

1.4.6 Lignes de formation d'impulsions

Les impulsions électriques brèves ont de nombreuses applications en physique et en génie électrique. Les impulsions électriques ont trouvé des applications en génétique, oncologie,

immunologie et biologie cellulaire. Ces applications nécessitent souvent que les impulsions aient une forme carrée, c'est-à-dire des temps de montée t_r et de descente t_f rapides. Bien qu'il existe de nombreuses façons de générer ces impulsions brèves, la ligne de formation d'impulsions est l'une des techniques les plus simples et peut être utilisée même à des tensions d'alimentation pulsées extrêmement élevées. Il existe de nombreuses variantes de la méthode de formation d'impulsions de base, qui repose sur l'utilisation d'une seule longueur de ligne de transmission et d'un commutateur rapide. Une méthode simple pour produire une impulsion de tension consiste à décharger un condensateur. Parmi les lignes de formation d'impulsions, la ligne à une seule extrémité a été utilisée dans cette recherche (Vinitha, 2008).

De courtes tensions d'impulsion rectangulaires peuvent être générées avec des dispositifs de stockage d'énergie de type ligne de transmission. Dans un montage fréquemment utilisé, un câble haute tension est chargé à une tension continue (U_0) via une résistance élevée, puis déchargé à travers un éclateur à sphère sur un câble initialement non chargé, à l'extrémité duquel est connecté l'objet à tester (Kind, 2013).

La durée de l'impulsion de tension qui se développe aux bornes de l'objet à tester est deux fois supérieure au temps de transit de l'onde progressive du câble de charge ; sa valeur crête dépend de l'impédance de l'objet à tester et est, au mieux, égale à U_0 . Dans un autre circuit, des condensateurs haute tension sont branchés sur un câble à retard court-circuité à son extrémité, dont la longueur effective peut être facilement modifiée pour obtenir des tensions d'impulsion de durées variables (Kind, 2013).

La multiplication de tension peut également être réalisée temporairement à l'aide d'un dispositif de stockage d'énergie de type ligne de transmission ; le montage est en principe conçu de telle sorte que les sauts de potentiel causés par les ondes progressives sur plusieurs lignes s'additionnent au niveau de l'objet testé (Kind, 2013).

Le schéma de principe d'un générateur d'impulsions basé sur une seule ligne de formation d'impulsions est illustré à la figure 1.17. Une ligne de transmission de longueur l est chargée à un potentiel V par une alimentation CC, généralement via une résistance ou une inductance, dont l'impédance est suffisamment élevée pour limiter le courant de charge au maximum correspondant à la puissance de sortie spécifiée de l'alimentation. Une alimentation de charge par condensateur ne peut également être utilisée que si le temps de récupération du commutateur est au moins aussi rapide que le temps de réponse de l'alimentation. Il est important que l'impédance de sortie de l'alimentation et l'impédance de charge soient grandes par rapport à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission Z_0 (Vinitha, 2008).

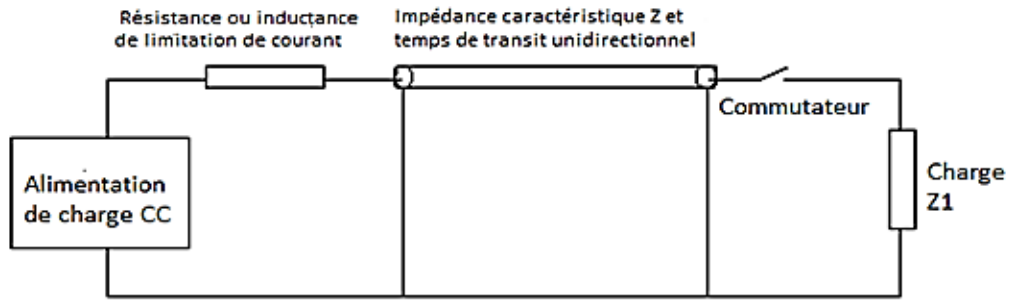


Figure 1.17 : Une ligne de formation d'impulsions de base (Vinitha, 2008)

Une fois la ligne chargée, l'interrupteur est fermé et la ligne peut se décharger dans la charge Z_L . Dans cette description, on suppose que l'impédance de la charge Z_L est purement résistive. Comme la source d'énergie stockée pour l'impulsion est une ligne de transmission, plutôt qu'un simple condensateur, une impulsion rectangulaire est générée dans la charge, dont la durée est égale à deux fois le temps de transit qu'un échelon de tension mettrait à se propager le long de la ligne d'une extrémité à l'autre.

Les densités de stockage d'énergie des champs électriques et magnétiques sont :

- Énergie électrique :

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (1-22)$$

- Énergie magnétique :

$$W_M = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \quad (1-23)$$

Où : E et B sont respectivement les champs électrique et magnétique.

En choisissant des paramètres raisonnables comme : $\epsilon_r=10$; $E = 10^8 \text{ V/m}$; $B = 10 \text{ T}$; $\mu = \mu_0$;

Résultats en : $W_E \approx 4.4 \times 10^5 \text{ J / m}^3$ et $W_M \approx 4 \times 10^7 \text{ J / m}^3$

La vitesse de propagation d'un tel échelon v_p est donnée par :

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} W_M \quad (1-24)$$

Où :

- μ_r : perméabilité relative de la ligne,
- ϵ_r : permittivité relative du matériau diélectrique isolant de la ligne,
- c = vitesse de la lumière.

En supposant que μ_r est égal à l'unité, la vitesse de propagation est donnée par :

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-25)$$

La durée de l'impulsion t_p générée est donnée par :

$$t_p = \frac{2l}{v_p} = 2\delta \quad (1-26)$$

Il est important que les temps de fermeture et d'ouverture de l'interrupteur soient bien inférieurs à la durée de l'impulsion à générer. Pour les impulsions de courte durée, il est également important de minimiser l'inductance parasite L_s de la partie du circuit reliant la sortie de la ligne à la charge (Vinitha, 2008).

1.4.7 Générateurs d'impulsions

Un montage avec deux dispositifs à lignes parallèles, suggéré par A. D. Blumlein en 1941, permet de doubler la tension. Ce générateur Blumlein peut être construit comme un conducteur à double couche, par exemple, dont l'électrode centrale est chargée à une extrémité en U_0 par rapport aux deux électrodes extérieures. Si une paire d'électrodes au début de la ligne est court-circuitée, l'onde de décharge qui en résulte provoque un saut de tension de $2 U_0$ au niveau de l'objet testé connecté entre les électrodes extérieures à l'extrémité de la ligne. Les générateurs de ce type ont fait leurs preuves notamment dans les applications de physique des plasmas.

Une amélioration de cette méthode a finalement conduit au développement de « générateurs spiralés », capables de produire des impulsions de tension triangulaires d'une durée pouvant atteindre 100 ns, leur amplitude est un grand multiple de la tension de charge. Pour générer des tensions d'impulsion de commutation avec des temps de crête de l'ordre de la milliseconde, on peut également utiliser, outre les générateurs d'impulsions habituels, des transformateurs d'essai à excitation impulsionnelle (Kind, 2013).

Une augmentation brutale de la tension dans l'enroulement d'excitation entraîne un phénomène transitoire entre le transformateur et les condensateurs côté haute tension. La tension produite par ces derniers est utilisée comme tension d'impulsion de commutation. Pour l'excitation impulsionnelle, l'alimentation peut provenir du secteur alternatif ou de condensateurs chargés. Ces deux méthodes ont fait leurs preuves en pratique et sont illustrées par leur schéma de principe à la figure 1.18a. La figure 1.18b montre des exemples d'impulsions haute tension possibles (Kind, 2013).

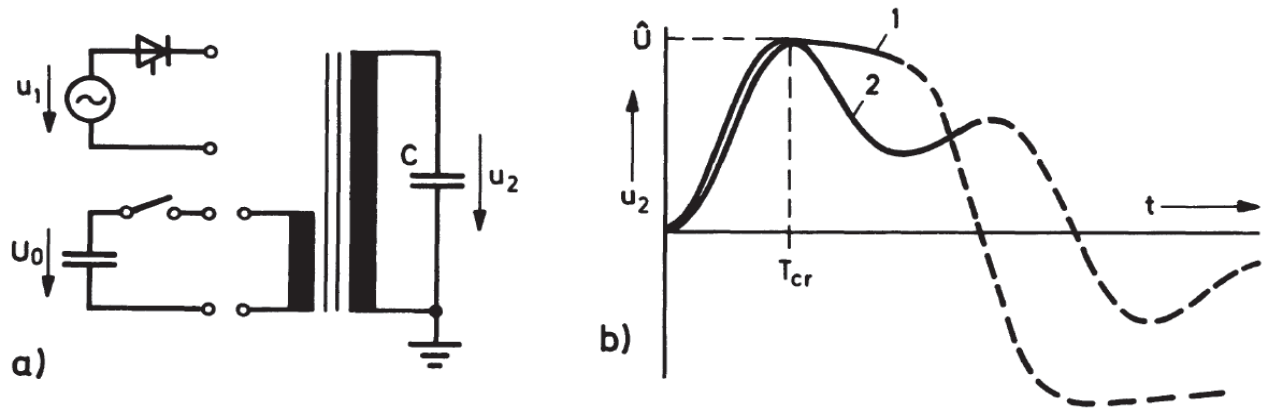


Figure 1.18: Génération de tensions impulsionnelle de commutation à l'aide de transformateurs de test

a) Schéma de principe pour l'excitation du réseau et des condensateurs

b) Courbes de tension pour différents dispositifs de commutation

1 - Thyristor 2 - Interrupteur mécanique (Kind, 2013)

La variation temporelle de la courbe jusqu'à la valeur de crête U prend la forme $(1 - \cos \omega t)$, qui peut être décrite par le circuit équivalent d'un circuit résonant série pour ce montage expérimental. Ici, le transformateur est remplacé par son inductance de fuite L_s ; les capacités côté haute tension sont représentées par C . En supposant une source de tension stable dans l'enroulement d'excitation, pour un faible amortissement du circuit, le temps jusqu'à la crête est estimé à :

$$T_{cr} \cong \pi \sqrt{L_s C} \quad (1-27)$$

La courbe de tension après le pic reste plus ou moins constante si un redresseur à découpage est utilisé dans le circuit d'excitation, par exemple un thyristor. Un interrupteur sans redressement, par exemple un interrupteur mécanique, produit une tension de sortie oscillante. La partie en pointillés de la courbe représentée sur la figure est déterminée par le comportement de magnétisation non linéaire du noyau de fer (Kind, 2013).

1.4.8 Générateurs à stockage inductif

L'autre grande caractéristique des générateurs d'impulsions nanosecondes est le stockage d'énergie inductif. Un générateur utilisant le stockage capacitif peut être considéré comme un amplificateur de courant, tandis que les générateurs utilisant le stockage inductif sont des amplificateurs de tension.

Ainsi, la densité énergétique d'un système de stockage inductif peut être jusqu'à deux ordres de grandeur supérieure à celle d'un système capacitif. Le circuit de base d'un générateur inductif est illustré dans la figure 1.19.

L'inductance est chargée à partir d'un générateur de courant avec une impédance interne R_g tandis que l'interrupteur S_1 est fermé et l'interrupteur S_2 est ouvert. Le courant traversant l'inducteur atteint une valeur maximale $\frac{I_0 R_g}{(R_g + R)}$. La constante de temps τ_L pour la charge est $L/(R_g + R)$. Si le courant de charge I_0 est important, la charge de l'inducteur doit se produire rapidement et le temps de stockage doit être court, sinon la perte d'énergie dans la résistance des enroulements de l'inducteur et du commutateur devient inacceptable importante et l'efficacité globale des systèmes diminue. Pour obtenir une charge rapide de l'inducteur, la source de courant doit avoir une impédance élevée et une puissance importante (Vinitha, 2008).

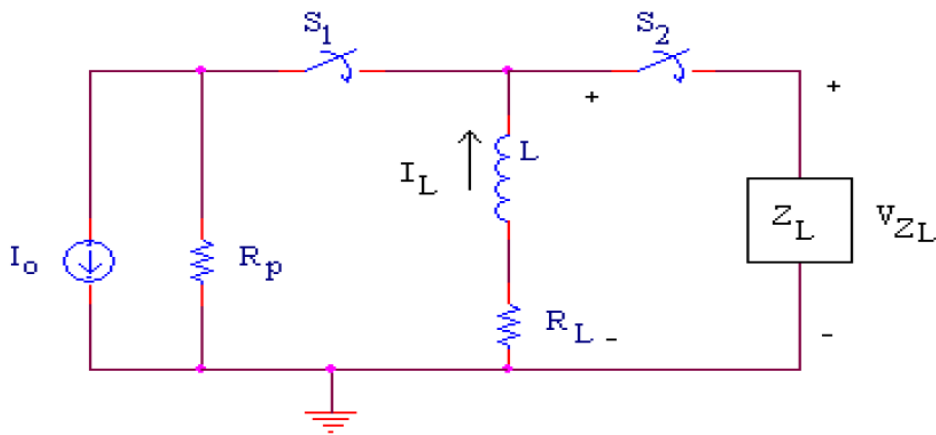


Figure 1.19 : Circuit d'un générateur inductif de base (Vinitha, 2008)

1.4.9 Générateurs d'impulsions conçues avec des MOSFET

1.4.9.1 Alimentation pulsée utilisant des MOSFET parallèles

Cette alimentation capable de produire des impulsions carrées contrôlables d'amplitudes allant jusqu'à 1 500 V et de largeurs de quelques centaines de nanosecondes en courant continu.

Cette alimentation pulsée utilise un circuit de commande pour piloter un, deux ou trois MOSFET en parallèle. Les MOSFET sont faciles à utiliser en parallèle, même sans résistance série sur la borne de source, car ils ont un coefficient de température positif. Autrement dit, lorsque la température du MOSFET augmente, sa résistance à l'état passant augmente également. Cela permet de garantir une répartition uniforme du courant de charge entre les MOSFET. Par exemple, si un MOSFET commence à absorber plus de courant, il chauffe et, par conséquent, sa résistance à l'état passant augmente. Cette augmentation de la résistance à l'état passant réduit le courant traversant le MOSFET (Grenier, 2006).

L'utilisation de plusieurs MOSFET en parallèle vise à diminuer la résistance effective à l'état passant des commutateurs. Lorsque la résistance de la charge est faible, la tension de l'impulsion de sortie peut être considérablement réduite. En effet, l'augmentation du courant due à la faible résistance entraîne une chute de tension plus importante aux bornes de la résistance à l'état passant du MOSFET ($5,5 \Omega$), ce qui réduit la tension aux bornes de la charge (Grenier, 2006).

S'il était possible de réduire la valeur de la résistance à l'état passant, la chute de tension aux bornes du commutateur diminuerait. En mettant en parallèle des MOSFET, la résistance équivalente à l'état passant diminue, ce qui réduit la perte de tension aux bornes du commutateur et permet à une tension plus importante d'apparaître aux bornes de la charge. En connectant deux ou trois MOSFET en parallèle, la résistance effective à l'état passant peut être réduite respectivement de moitié ou d'un tiers (en supposant que les MOSFET aient des valeurs identiques de résistance à l'état passant) (Grenier, 2006).

La figure 1.20 illustre le schéma de l'alimentation pulsée à MOSFET parallèle (Grenier, 2006). L'alimentation pulsée comprend un circuit de commande de MOSFET, un circuit de protection de grille pour protéger le MOSFET, jusqu'à trois MOSFET 1500 V parallèles (2SK3748), un condensateur de stockage d'énergie ($8 \mu\text{F}$), une source CC haute tension et la charge (Cuvette ou chambre de traitement). Dans la figure 1.20, la cuvette est modélisée comme une résistance en parallèle avec un condensateur (Grenier, 2006) .

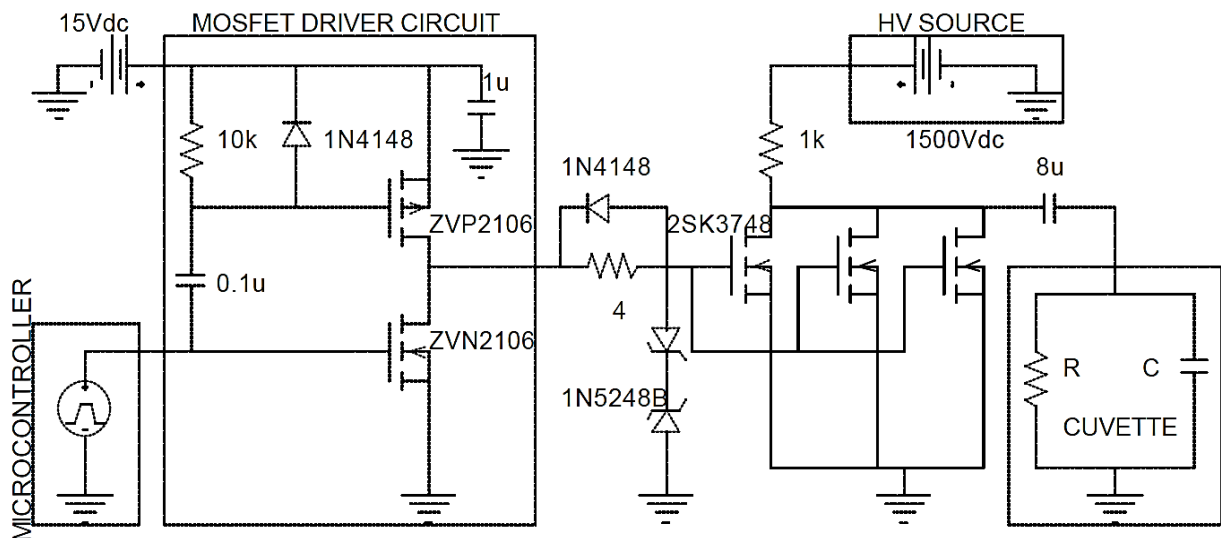


Figure 1.20 : Schéma de circuit de l'alimentation pulsée avec MOSFET en parallèle (Grenier, 2006)

Le pilote du MOSFET est alimenté par une source de 15 VCC et reçoit une entrée du microcontrôleur, modélisée à la figure 1.20 comme une source de tension pulsée. L'impulsion

de sortie du pilote est envoyée à la grille du MOSFET via une résistance de limitation de courant qui protège le MOSFET en amortissant les oscillations de tension pendant la phase de mise en conduction. Une résistance de $4\ \Omega$ a été utilisée, car la résistance de grille supplémentaire augmente les temps de commutation du MOSFET et ralentit la charge de sa capacité grille-source (C_{gs}) (Grenier, 2006).

Une diode est placée en antiparallèle à la résistance de grille, permettant au courant de la contourner afin de désactiver le MOSFET plus rapidement. La diode 1N4148 a été choisie pour son temps de recouvrement inverse rapide de 4 ns. Les deux diodes Zener ont une tension Zener de 18 V, ce qui maintient la tension grille-source dans une plage de sécurité de ± 18 V. La tension grille-source du MOSFET ne doit pas dépasser ± 20 V car elle pourrait endommager l'oxyde de grille, ce qui est la cause la plus courante de défaillance dans un MOSFET de puissance (Grenier, 2006).

La source haute tension charge le condensateur de stockage d'énergie de $8\ \mu\text{F}$ via la résistance de $1\ \text{k}\Omega$ pendant que les MOSFETs sont bloqués. Lorsque les MOSFETs sont activés, le condensateur se décharge via l'interrupteur et la charge, produisant une impulsion de tension négative aux bornes de la charge. La capacité du condensateur de stockage d'énergie est un paramètre important du circuit, car elle influence le temps de charge complète du condensateur, le nombre d'impulsions par seconde pouvant être délivrées à la charge et l'amplitude de tension maximale pouvant être maintenue pendant toute la durée de l'impulsion (Grenier, 2006).

Le temps nécessaire à un condensateur pour se charger complètement augmente linéairement avec sa capacité ; cependant, une capacité plus importante permet de stocker davantage d'énergie. Une capacité plus importante est préférable lorsqu'une seule impulsion longue est nécessaire, tandis qu'une capacité plus faible est plus appropriée si plusieurs impulsions plus courtes sont nécessaires. La tension nominale du condensateur doit être supérieure à 1 500 V afin de garantir une marge de sécurité par rapport à la tension maximale du MOSFET. Pour cette alimentation pulsée, le condensateur de $8\ \mu\text{F}$ a été évalué à 2 000 V (Grenier, 2006).

1.4.9.2 Alimentation pulsée utilisant des MOSFET séries

Cette alimentation capable de produire des impulsions carrées contrôlables avec des amplitudes allant jusqu'à 3 000 V et des largeurs de quelques centaines de nanosecondes.

Les MOSFET utilisés étant calibrés pour 1 500 V et dépassant cette valeur, ils peuvent être endommagés. Deux MOSFET ont donc été connectés en série. Cette connexion permet de partager la tension, ce qui permet de doubler la tension totale appliquée. Cette alimentation

pulsée utilise un circuit de commande pour piloter deux MOSFET connectés en série, ce qui réduit le nombre de composants et simplifie l'agencement de la carte. Le circuit de commande du MOSFET, le circuit de protection de grille, les sources d'alimentation et la charge sont identiques à ceux utilisés dans l'alimentation pulsée à MOSFET parallèle de la figure 1.20. Le schéma du circuit de l'alimentation pulsée est présenté dans la figure 1.21 (Grenier, 2006).

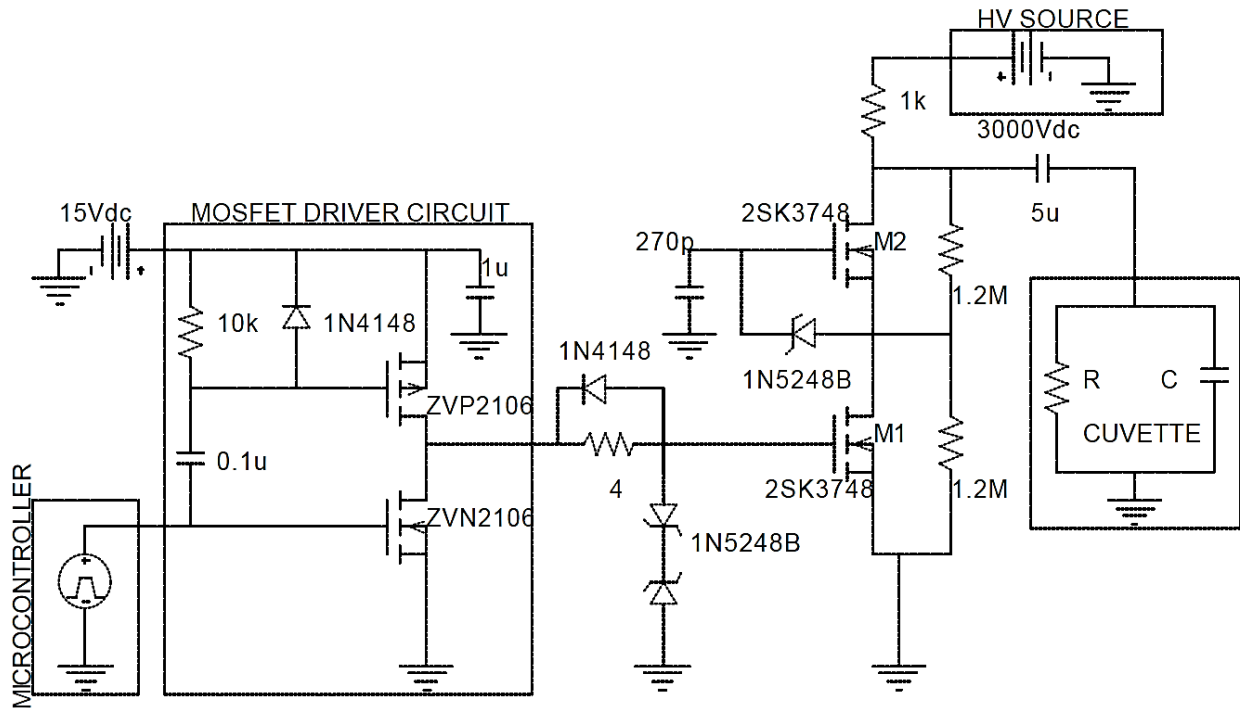


Figure 1.21 : Schéma de circuit de l'alimentation pulsée avec MOSFET en série (Grenier, 2006)

La conception de la connexion série des MOSFET repose sur les concepts présentés dans. Elle utilise une technique côté grille qui exploite les capacités internes du MOSFET pour synchroniser les signaux de grille. Cette technique a permis une mise en marche rapide et équilibrée des MOSFET série sans dispositif d'équilibrage de tension côté charge supplémentaire, tel qu'un circuit d'amortissement. Cette conception utilise un seul pilote de MOSFET et un condensateur supplémentaire placé entre la grille du second MOSFET (C_{gate}) et la masse. Le bon fonctionnement du circuit repose sur la division de tension entre la capacité grille-source effective et C_{gate} (Grenier, 2006).

Les MOSFET 2SK3748 présentent une capacité d'entrée et de transfert inverse de 800 pF et 90 pF respectivement. Les variations de tension du drain du MOSFET M1 et de la grille du MOSFET M2 sont respectivement de 1 500 V et 18 V. La capacité de la diode Zener est de 210 pF. L'utilisation de ces valeurs donne une capacité grille-source effective de 8 600 pF et une

valeur C_{gate} de 105 pF. L'analyse des circuits révèle que ce condensateur de grille doit être conçu pour au moins 1 500 V. Un condensateur de 270 pF, calibré à 3 kV, a été choisi pour le circuit, car il a été démontré expérimentalement qu'une augmentation de la valeur C_{gate} à 270 pF permettait un partage dynamique de la tension plus équilibré (Grenier, 2006).

Les résistances shunt placées entre les bornes drain-source des MOSFET assurent un partage de tension égal lorsque les MOSFET ne conduisent pas. Pour obtenir un partage de tension égal lorsque les MOSFET ne conduisent pas, le courant dans les résistances shunt doit être supérieur au courant de fuite des MOSFET (Grenier, 2006).

De plus, la puissance nominale des résistances a dû être prise en compte lors de la conception. Les faibles résistances devaient être dimensionnées à une puissance plus élevée, car elles laissaient passer davantage de courant. Outre les pertes accrues du circuit à faibles résistances, les résistances de forte puissance seraient plus coûteuses, plus difficiles à trouver, plus grandes et présenteraient une inductance parasite plus importante, ce qui entraîne des dépassements et des oscillations plus importants dus à la commutation rapide (Grenier, 2006).

Compte tenu de ces contraintes de conception, des résistances de 1,2 M Ω et 2 W ont été utilisées dans ce circuit. Le courant résultant de 1,25 mA circulant à travers les résistances shunt est suffisamment supérieur au courant de drain de tension de grille zéro de 100 mA des MOSFET, pour assurer un partage de tension égal (Grenier, 2006).

Enfin, deux points supplémentaires doivent être soulignés. Premièrement, la tension nominale du condensateur de stockage d'énergie a dû être augmentée au-delà de 3 000 V, car il s'agit de la tension de fonctionnement maximale du circuit. Compte tenu de la disponibilité, un condensateur de 5 μ F, calibré à 3,5 kV, a été utilisé. Deuxièmement, des MOSFET ont été utilisés dans le circuit plutôt que des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT). Outre des temps de commutation plus rapides et une fréquence de commutation élevée, les MOSFET sont des dispositifs à porteurs majoritaires ; ils ne nécessitent donc pas d'évacuation de charges stockées avant la mise hors tension (Grenier, 2006).

En revanche, les IGBT sont des dispositifs à porteurs minoritaires qui nécessitent l'évacuation de charges avant la mise hors tension. Par conséquent, il a été démontré que les MOSFET connectés en série se désactivent presque simultanément, tandis que les IGBT peuvent potentiellement se désactiver séquentiellement (Grenier, 2006).

1.4.10 Générateur d'impulsions utilisant des IGBT

Ce type de générateur d'impulsions haute tension est composé d'un transformateur élévateur de tension, piloté par de transistors bipolaires à grille isolée haute tension (IGBT). Ces nouveaux IGBT sont des puces de silicium encapsulées individuellement, destinées aux applications à puissance pulsée. Ces puces de silicium sont généralement conditionnées en grands modules pour les entraînements de moteurs de locomotives et autres applications de traction similaires. Les IGBT sont de types discret Powerex QIS4506001 et la diode discrète QRS4506001, tous deux d'une tension nominale de 4 500 V/60 A, issus d'applications à service continu. Et sont capables de supporter des courants supérieurs à 1 kA en fonctionnement pulsé (Giesselmann et al., 2005).

La figure 1.22 présente le schéma général du générateur d'impulsions haute tension. La topologie de base du circuit est un circuit hacheur CC qui pilote l'enroulement primaire d'un transformateur HT. Le transformateur multiplie la tension par 20 et charge une section de câble coaxial haute tension (HT) via une résistance pour éviter les oscillations. Le câble coaxial HT constitue une source d'énergie pulsée de type ligne de transmission, d'une impédance de 50 Ω . Il est capable de produire une impulsion carrée avec des temps de montée et de descente inférieurs à la nanoseconde (ns) (Giesselmann et al., 2005).

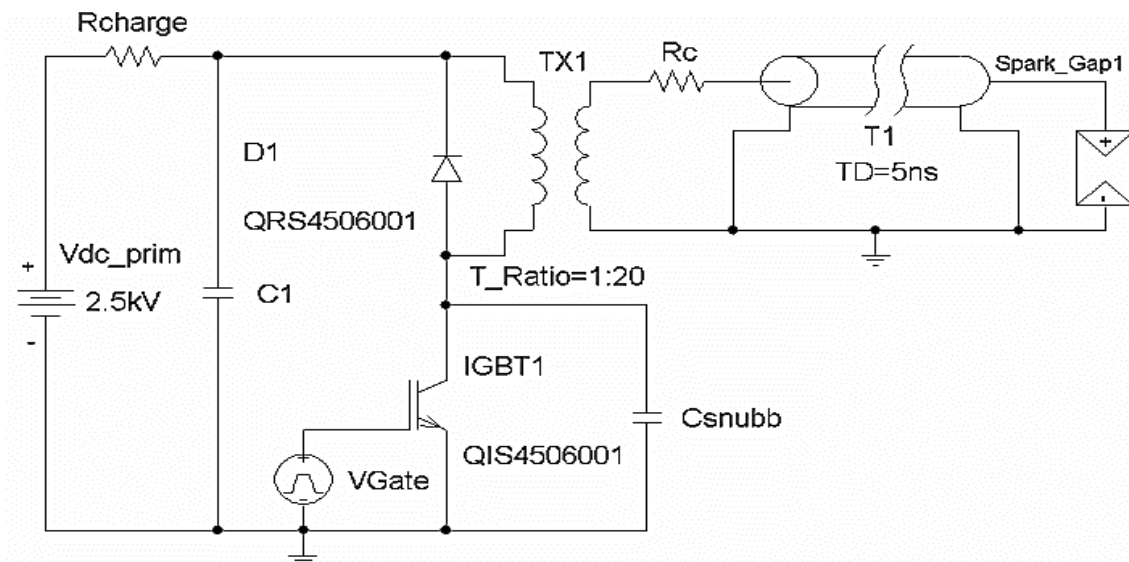


Figure 1.22 : Schéma du générateur d'impulsions haute tension avec IGBT HT (Giesselmann et al., 2005)

La ligne de transmission sert de source pour étudier les phénomènes de contournement ultra-rapides sur les surfaces diélectriques. Comme les processus de contournement se développent

à l'échelle de temps ns et sub-ns, la ligne de transmission est une source idéale pour ces études, pour les raisons suivantes :

- Si une décharge se produit, la ligne de transmission peut délivrer une surtension très rapide, permettant au processus de claquage de se développer pleinement et d'être facilement détectable.
- Une fois le claquage pleinement développé, le contenu énergétique de la ligne de transmission est rapidement épuisé (en environ 10 ns) et les dommages causés par un arc électrique à la surface diélectrique sont évités (Giesselmann et al., 2005).

Ce générateur d'impulsions utilise plusieurs étages de conditionnement de puissance et de compression d'impulsions pour générer une impulsion haute tension ultracourte à partir d'une source de tension basse puissance de 2,5 kV. Initialement, une combinaison de condensateurs, regroupés sous le nom de « C1 » sur la figure 1.22, est chargée par la source de tension primaire.

Ce réseau de condensateurs peut se décharger en quelques μ s et délivrer des courants de décharge pulsés supérieurs à 1 kA. La décharge du réseau de condensateurs est contrôlée par l'IGBT1 haute tension. Lorsque l'IGBT1 est désactivé, le courant dans l'enroulement primaire commute vers la diode haute tension D1. Pendant la décharge du réseau de condensateurs, le transformateur élévateur augmente la tension et charge le câble coaxial, constituant ainsi une source d'alimentation distribuée capable de produire des impulsions rectangulaires ultrarapides pour les études de contournement de surface (Giesselmann et al., 2005).

1.4.11 Générateur d'impulsions inductif

La production de micro-ondes de forte puissance impose des exigences spécifiques aux générateurs d'impulsions. Le temps de montée et la longueur d'impulsion doivent respecter certaines limites. Ce générateur a été conçu pour maîtriser et interrompre des courants importants. Des techniques de commutation impliquant des courants importants sont nécessaires pour maintenir des coûts faibles pour les transformateurs. Ceci est particulièrement important pour les générateurs d'impulsions basés sur des stockages d'énergie magnétiques intermédiaires. Le générateur d'impulsions haute tension inductif basé sur un système de résonance est équipé de stockages d'énergie capacitifs primaires et secondaires, comme illustré à la figure 1.23. Un transformateur élévateur à noyau d'entrefer sert de stockage d'énergie intermédiaire (Bernhoff & Leijon, 2007).

Les interrupteurs d'ouverture pour les courants élevés sont généralement difficiles à construire, et l'interrupteur utilisé a permis de couper un courant continu de 1,8 kA à une

cadence de 300 A/ μ s. Le générateur est équipé d'un transformateur élévateur de tension, d'une ligne de transmission comme stockage d'énergie magnétique intermédiaire, et les stockages d'énergie primaire et secondaire sont capacitifs (Bernhoff & Leijon, 2007).

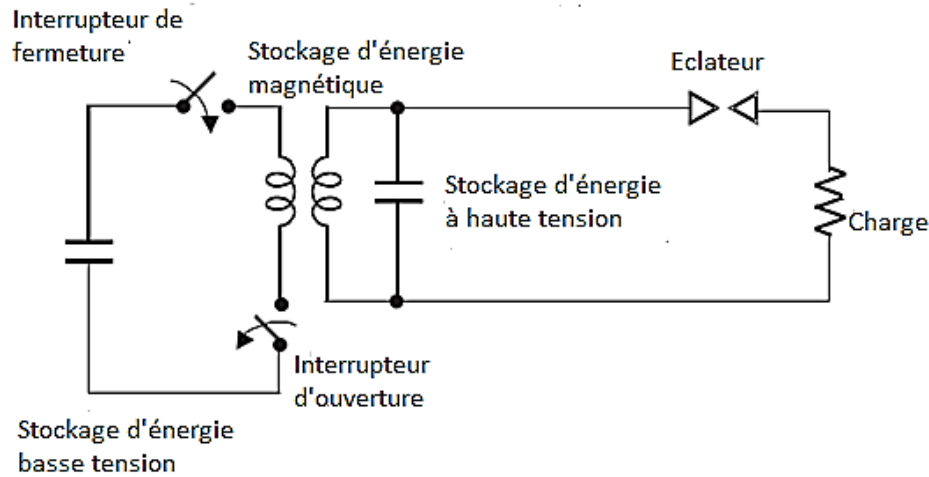


Figure 1.23 : Générateur d'impulsions utilisant un transformateur comme stockage d'énergie intermédiaire (Bernhoff & Leijon, 2007).

Un circuit de résonance LC est combiné à trois interrupteurs à vide en série comme interrupteur d'ouverture côté primaire du transformateur. La décharge de la batterie de condensateurs dans l'enroulement primaire du transformateur introduit une oscillation sinusoïdale de 200 Hz sur le courant primaire. Les contacts mobiles des interrupteurs à vide sont actionnés mécaniquement et des arcs stables se forment lors de l'ouverture des entrefers. Lorsque le courant sinusoïdal de 200 Hz atteint son premier maximum, le petit circuit de résonance LC est déclenché et le courant atteint une nouvelle fréquence de 25 kHz.

La grande amplitude et la fréquence élevée générées par le circuit de résonance LC entraînent un passage par zéro du courant primaire. Lorsque le courant passe par zéro, l'arc se désionise et le courant est coupé. L'objectif de ce générateur d'impulsions est de se familiariser avec les défis liés à la mise à l'échelle du système pour des performances supérieures (Bernhoff & Leijon, 2007).

1.4.12 Générateur utilisant des composants de stockage d'énergie

La figure 1.24 présente le schéma d'un générateur d'impulsions bipolaires haute tension, comprenant une source d'alimentation V , un composant de stockage d'énergie comprenant des inductances L_{11} , L_{12} , L_{13} et des condensateurs C_{11} , C_{12} et C_{13} , un ensemble d'interrupteurs U_{11} et U_{12} , un transformateur T_{11} et une charge dotée d'une ou plusieurs chambres de traitement d'impulsions haute tension (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

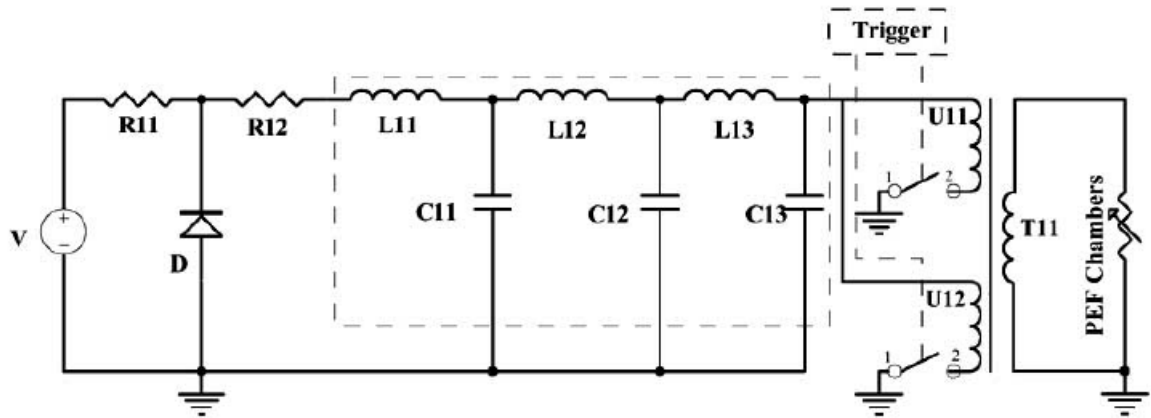


Figure 1.24 : Schéma de circuit d'un générateur d'impulsions utilisant des composants de stockage d'énergie et un transformateur (Pourzaki & Mirzaee, 2009)

La source d'alimentation V du circuit est une source d'alimentation continue. Deux résistances de charge $R11$ et $R12$ ainsi qu'une diode de protection D sont optionnellement représentées pour l'isolation et la protection. Le composant de stockage d'énergie illustré à la figure (5) est un réseau de formation d'impulsions (PFN). Pendant la période de charge du composant de stockage d'énergie, ses condensateurs sont chargés jusqu'à la tension secteur de la source d'alimentation V (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

Un ensemble de deux interrupteurs $U11$ et $U12$ est fermé périodiquement pour décharger le composant de stockage d'énergie. À chaque fois, un seul interrupteur est fermé et participe à la décharge du PFN, tandis que l'autre reste ouvert. Les interrupteurs $U11$ et $U12$ sont de préférence des dispositifs de commutation normalement ouverts qui ne se ferment que lors d'un actionnement, comme par exemple des thyratrons (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

Le PFN contrôle, par l'intermédiaire d'un dispositif de déclenchement, la décharge d'énergie et facilite la réouverture des interrupteurs jusqu'à ce que l'énergie stockée dans le PFN soit transférée à une charge de chambres de traitement par impulsions haute tension et que le courant traversant le commutateur soit nul (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

Les interrupteurs $U11$ et $U12$ sont de préférence mis à la terre ; par conséquent, les circuits de commande correspondants n'ont pas besoin d'être maintenus à la tension de fonctionnement. Dans tous les modes de réalisation, les interrupteurs $U11$ et $U22$ sont déclenchés par un dispositif de déclenchement (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

Cependant, les interrupteurs $U11$ et $U12$ peuvent également être déclenchés par un système de contrôle informatique, tel qu'un système de contrôle maître de traitement par impulsions haute tension, configuré avec une fréquence, une tension et des rapports cycliques spécifiques.

De plus, les caractéristiques de la forme d'onde peuvent être réglées ou ajustées manuellement, en temps réel ou par ordinateur grâce à un système de rétroaction, régulant ainsi l'ensemble du processus de traitement par impulsions haute tension. De plus, dans tous les modes de réalisation, la charge 104 comprend au moins une chambre de traitement par impulsions haute tension et, de préférence, entre 2 et 8 chambres (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

La figure 1.25 illustre un autre mode de réalisation du système générateur d'impulsions bipolaires haute tension de la présente invention. Son fonctionnement est similaire à celui de la figure 1.24. En résumé, la source d'alimentation V charge le condensateur de stockage d'énergie C61 via les diodes D61 à D64 et les inductances L61 et L62. Le dispositif de déclenchement provoque la décharge périodique du condensateur de stockage d'énergie C61 par les interrupteurs U61 et/ou U62, via le transformateur d'impulsions T62, vers les chambres de traitement d'impulsions haute tension de la charge (Pourzaki & Mirzaee, 2009).

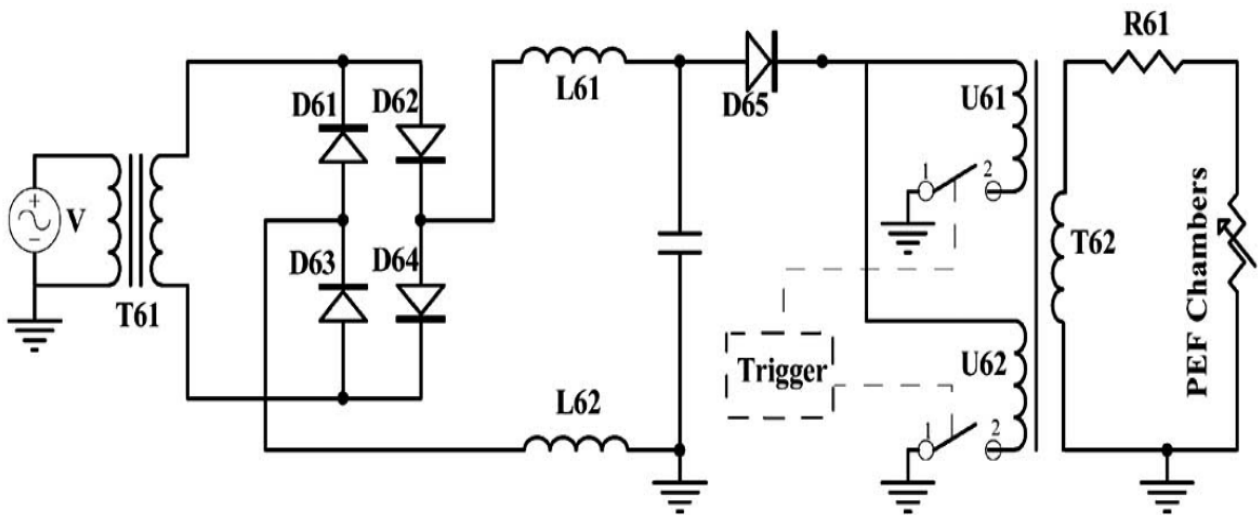


Figure 1.25 : Schéma de circuit d'un générateur d'impulsions utilisant un transformateur à cône et des diodes de redressement (Pourzaki & Mirzaee, 2009)

1.5 Conclusion

Les générateurs haute tension sont des composants essentiels de nombreux systèmes électriques. Ils sont conçus pour convertir une entrée basse tension en sortie haute tension, essentielle pour alimenter les appareils nécessitant une haute tension. Ces générateurs sont couramment utilisés dans les centrales électriques, les équipements médicaux et la recherche scientifique.

En ingénierie haute tension, une tension d'impulsion est généralement une tension unidirectionnelle qui monte rapidement sans oscillations notables, jusqu'à une valeur de crête,

puis redescend plus lentement jusqu'à zéro. Une onde d'impulsion complète est une onde qui développe sa forme d'onde complète sans amorçage ni perforation, tandis qu'une onde hachée est une onde dans laquelle un amorçage se produit, entraînant une chute de tension extrêmement rapide. Cette chute rapide peut avoir de graves conséquences sur les équipements.

Il existe plusieurs types de générateurs haute tension, chaque type possède une conception et des principes de fonctionnement qui lui sont propres, mais ils ont tous pour objectif commun de convertir efficacement une basse tension d'entrée en haute tension de sortie.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la production de haute tension par un générateur, notamment sa conception, la qualité des composants utilisés et le rendement de la source d'alimentation. Les chercheurs explorent de nouveaux matériaux et technologies pour améliorer les performances et l'évolutivité des générateurs haute tension en vue de futures applications.

Equipement du traitement par champ électrique pulsé

2 Equipement du traitement par champ électrique pulsé

2.1 Introduction

Les champs électriques pulsés (CEP) sont des outils essentiels dans divers domaines, allant des applications radar à la bio-encrassement, en passant par la décontamination bactérienne et la guérison du cancer. En général, toutes les applications de puissance pulsée sont pilotées ou accompagnées par des champs électromagnétiques, mais dans de nombreuses applications, ces champs ne sont qu'un instrument permettant de transformer l'énergie électrique en d'autres formes d'énergie. La commercialisation de la technologie du CEP a attiré l'attention des acteurs de l'industrie agroalimentaire et des autorités réglementaires qui souhaitent satisfaire la demande des consommateurs en produits frais.

2.2 Champ électrique pulsé

L'objectif fondamental de tous les systèmes d'alimentation pulsée est de convertir une entrée de faible puissance et de longue durée en une sortie de forte puissance et de courte durée. L'alimentation pulsée est un système dans lequel l'énergie stockée est déchargée sous forme d'énergie électrique dans une charge, en une seule impulsion courte ou en impulsions courtes à fréquence de répétition réglable. Il existe de nombreux types de générateurs d'impulsions haute tension (plusieurs centaines de volts) disponibles dans le commerce, de l'ordre de la nanoseconde (temps de montée < quelques nanosecondes). Ces générateurs varient considérablement en fonction des exigences de la charge et des paramètres de performance tels que la tension de sortie, le temps de montée, la largeur d'impulsion et le temps de descente. Ces générateurs diffèrent également par la conception du circuit (capacitif ou inductif) et le type de commutateur (Vinitha, 2008).

Une impulsion est caractérisée par sa forme (Figure 2.1), c'est-à-dire par ses temps de montée et de descente, ainsi que par la durée et la planéité de sa zone de plateau. Généralement, la durée totale des impulsions de forte puissance considérées dans cette recherche est exprimée en nanosecondes (Vinitha, 2008).

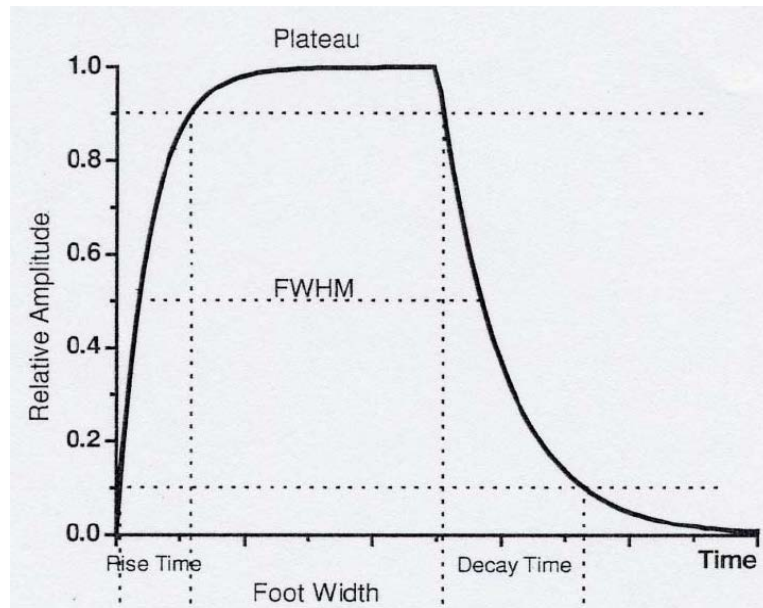


Figure 2.1 : Forme d'onde d'impulsion (Vinitha, 2008)

Le temps de montée d'une impulsion peut être défini comme le temps nécessaire à la tension pour passer de 10 % à 90 % de sa valeur finale. Le temps de descente, ou temps de décroissance, est défini comme le temps nécessaire à la tension pour passer de 90 % à 10 %. Les temps de montée et de descente d'une impulsion dépendent de l'évolution de l'impédance de charge. La durée d'une impulsion peut être définie comme la durée à 90 % de son amplitude crête. Le produit de la tension et du courant d'impulsion est la puissance d'impulsion. La puissance crête d'une impulsion est la valeur maximale du produit de la tension et du courant. Ainsi, pour les impulsions rectangulaires, la puissance crête et la puissance d'impulsion sont identiques, mais pour les impulsions de forme irrégulière, la puissance crête est supérieure à la puissance d'impulsion (Vinitha, 2008).

Le choix de l'impédance interne du générateur d'impulsions dépend de l'impédance de la charge, de la puissance de l'impulsion et de considérations pratiques relatives aux éléments du circuit. L'adaptation d'impédance entre les générateurs et la charge est primordiale dans certains cas, notamment pour une utilisation optimale de l'énergie disponible et la production d'une forme d'impulsion particulière (Vinitha, 2008).

Les impulsions électriques nanosecondes ont des niveaux de puissance instantanée élevés, de l'ordre du mégawatt, mais en raison de la très courte durée de l'impulsion, l'énergie délivrée aux cellules ou aux tissus est très faible, de l'ordre de quelques nanojoules par cellule, ce qui réduit l'effet thermique sur les cellules et les tissus (Vinitha, 2008)

2.3 Contexte historique

Le terme « électricité » vient du latin *electricus*, qui signifie « ambre », et a été introduit au début du XVIIIe siècle par le scientifique britannique Gilbert en 1600 pour décrire les effets de l'attraction produite par le frottement de l'ambre (Sitzmann et al., 2016).

L'impact de l'électricité sur les organismes biologiques, leur croissance, leur végétation et leur germination, a suscité une attention soutenue pendant des siècles. Il y a plus d'un siècle, les premières applications, qui ont suscité un vif intérêt pendant des siècles, pour réchauffer les aliments et tuer les microbes ont également été observées. À cette époque, des phénomènes intéressants, intrigants et obscurs ont été observés lors d'études sur le traitement des matières biologiques par différents types d'électricité (électricité statique, courants électriques continus ou alternatifs et électricité pulsée) (Sitzmann et al., 2016).

Au milieu du XXe siècle, le traitement par champ électrique pulsé (CEP) pour la transformation des produits alimentaires et agricoles a commencé à être utilisé. La découverte fondamentale du phénomène d'électroporation et la compréhension des mécanismes de rupture électrique des membranes ont joué un rôle révolutionnaire dans ce domaine (Sitzmann et al., 2016). À la fin du XIXe siècle, les effets bactéricides du courant électrique continu et alternatif ont été étudiés pour la première fois en 1890 (Töpfl, 2006).

Dans les années 1920, un procédé appelé « Electropure » a été introduit en Europe et aux États-Unis. L'une des premières tentatives d'utilisation de l'électricité pour la pasteurisation du lait et pour améliorer la santé des consommateurs a été réalisée par l'application d'un courant alternatif de 220 à 420 V dans une chambre de traitement à électrodes en carbone. La méthode était fondamentalement thermique, utilisant le chauffage direct du lait par énergie électrique (effet Joule). La chambre électrique était constituée d'un tube rectangulaire et d'électrodes de carbone opposées. Le lait était préchauffé à 52 °C, puis chauffé électriquement à 71 °C et maintenu à cette température pendant 15 secondes (Töpfl, 2006).

Il est à noter que le premier rapport expérimental sur l'électroporation est apparu probablement en 1958 par Stampfli et que pratiquement à la même époque, les différents groupes expérimentaux Doeverspeck en 1960, Lazarenko et Reshetko en 1968 et Zagorul'ko, en 1958 ont commencé les premières applications du CEP pour le traitement des produits alimentaires. Les premières expériences d'application du CEP pour la destruction des micro-organismes ont été rapportées dans les années 1960 par Hamilton et Sale en 1967. Plus tard, dans les années 1970, des expériences fondamentales sur la rupture électrique des membranes

biologiques ont été réalisées par Neumann et Rosenheck en 1972, Zimmermann, Schulz et Pilwat en 1973 et le concept d'électroporation membranaire a été fondé théoriquement en 1996 par Weaver et Chizmadzhev (Sitzmann et al., 2016).

Une cinquantaine d'usines étaient en activité jusque dans les années 1950, desservant environ 50 000 consommateurs. Seules quelques recherches ont rapporté une inactivation microbienne inférieure au point de mort thermique (Töpfl, 2006). Cette technique a été reconnue comme une étape de pasteurisation sûre dans six États américains. Les unités étaient principalement fournies par Trumbull Electric Manufacturing Co (Töpfl, 2006).

En raison de la hausse des coûts de l'énergie et de la concurrence des nouvelles technologies de conservation thermique douces, ces installations ont été remplacées. Il a fallu attendre les années 1980 pour que le chauffage ohmique soit relancé et que certaines applications industrielles de cette technologie soient réalisées, notamment la pasteurisation des œufs liquides ou la transformation des produits à base de fruits.

Récemment, l'application du chauffage ohmique, également appelé traitement par champ électrique modéré, a également retenu l'attention dans le domaine du prétraitement avant séchage, extraction et expression, ou de la réduction de la consommation d'eau pendant le blanchiment (Töpfl, 2006).

La première application de courants pulsés à haute tension a été rapportée en 1960 dans le but d'induire une mutation artificielle. Il a observé une destruction microbienne partielle, dépendante de l'intensité du traitement contre *Streptococcus lactis* (une bactérie), et a remis en culture les survivants pour détecter des mutations (Töpfl, 2006).

Des travaux expérimentaux pionniers sur l'application de champs électriques pulsés à la transformation des aliments ont été rapportés par l'ingénieur allemand Heinz Doevenspeck, qui a donné lieu à un brevet en 1960, décrivant l'application de champs électriques pulsés à la désintégration cellulaire des aliments afin d'améliorer la séparation des phases (Töpfl, 2006).

La croissance microbienne a été évitée grâce à un traitement par impulsions de 6 kV déchargeant un condensateur de 2,5 μ F. En soumettant des cellules d'E. coli à des champs électriques pulsés, il a été constaté qu'une application de champs électriques de faible intensité (« impulsions douces », inférieures à 2 kV/cm) entraînait une croissance accrue, tandis qu'une intensité accrue du champ électrique entraînait la mort cellulaire (« impulsions fortes ») (Töpfl, 2006). Un traitement des tissus de poisson a révélé une séparation améliorée des phases solide et liquide, une alimentation ultérieure de la bouillie de poisson traitée au CEP a entraîné une

digestibilité de 100 % contre 97 % pour la farine de poisson conventionnellement disponible (Töpfl, 2006).

Une unité typique de traitement PEF des aliments se compose d'un générateur d'impulsions haute tension et d'une chambre de traitement où le milieu est exposé au champ électrique. Le brevet de Doevenspeck en 1960 décrit la configuration d'un modulateur d'impulsions et d'une chambre de traitement fonctionnant en continu. En général, la puissance pulsée est générée par la décharge répétée de l'énergie stockée dans une batterie de condensateurs via un interrupteur haute tension ; des tubes interrupteurs à mercure ont été suggérés (Töpfl, 2006).

Après avoir exploré empiriquement les mécanismes fondamentaux et les effets des champs électriques pulsés sur les cellules biologiques dans les années 1960, cette technique a été étudiée au niveau universitaire bien plus tard. Les développements ont divergé entre les effets réversibles et irréversibles de l'électroporation.

Dans les années 1980, le groupe de recherche dirigé par Hülshager a développé des modèles mathématiques pour décrire l'inactivation microbienne par CEP, en fonction de l'intensité du champ électrique et de la durée du traitement. Un générateur d'impulsions de 10 kV a été développé, déchargeant une capacité de 1 μF à travers un éclateur avec une fréquence de répétition d'une impulsion en 5 s. La chambre de traitement était constituée d'un tube de verre cylindrique fermé par deux électrodes rondes en laiton plaqué or. Le champ maximal était limité à 20 kV/cm, avec un espacement des électrodes de 5 mm et une surface d'électrode de 8 cm² (Töpfl, 2006).

Aux États-Unis, Dunn, Hofmann et Bushnell ont étudié les applications du CEP dès 1982. En 1987, Dunn et Pearlman ont déposé un brevet, attribué à Maxwell Laboratories, San Diego, États-Unis, décrivant un appareil permettant de prolonger la durée de conservation des produits alimentaires liquides. Des chambres de traitement par lots et en continu ont été proposées, suivies d'un brevet ultérieur de Bushnell en 1996 (Töpfl, 2006). Depuis 1988, l'impact de l'intensité de traitement requise pour divers microbes a été étudié et comparé entre les modes de traitement par lots et en continu (Töpfl, 2006).

Au Japon, en 1980, Sakarauchi et Kondo ont rapporté les effets létaux de champs électriques élevés sur les micro-organismes, en utilisant une chambre de traitement à plaques parallèles en forme de disque avec des électrodes en platine. Un générateur d'impulsions de 2 kV a été utilisé. En 1988, Mizuno et Hori ont rapporté la destruction de cellules vivantes par haute tension, en utilisant des électrodes à plaques parallèles, à aiguille, à fil-cylindre et à tige-tige (Töpfl, 2006).

Un système d'éclateur rotatif a été utilisé pour la génération d'impulsions, fonctionnant à une tension de crête de 20 kV et à une fréquence de répétition de 25 Hz. L'étude de l'efficacité de différentes géométries de chambre de traitement a révélé une inactivation maximale lors de l'utilisation d'électrodes en forme de pointe-pointe et de la production d'une décharge en arc (Töpfl, 2006).

Depuis les années 1990, l'application du CEP dans la transformation des produits alimentaires et agricoles gagne en popularité par les travaux des groupes de Barbosa-Canovas en 1998, Gulyi en 1994 et Knorr en 1994 (Sitzmann et al., 2016).

De nos jours, le CEP est considéré comme un traitement non thermique très prometteur, permettant d'éviter les altérations indésirables des aliments, contrairement à d'autres techniques, telles que les procédés thermiques, chimiques et enzymatiques dans les travaux de Raso et Heinz en 2006, Vorobiev et Lebovka en 2008 (Sitzmann et al., 2016). Parmi les nombreux exemples d'applications du CEP pour l'inactivation des micro-organismes, on peut citer l'intensification des opérations de séparation, d'extraction, de pressage, de congélation, de diffusion et de séchage. Les technologies assistées par CEP sont intéressantes pour diverses applications dans les secteurs de l'alimentation, de la médecine, de la pharmacie, des cosmétiques et des biocarburants (Sitzmann et al., 2016).

De nombreuses études sur les différentes applications du traitement CEP dans l'industrie alimentaire ont été publiées ces dernières décennies. En 1996, l'Association japonaise de recherche et développement pour l'application des technologies électroniques à l'industrie alimentaire a été fondée. Elle rend compte des activités menées dans le domaine de la conservation des aliments par CEP et de la transformation de la viande. Les travaux ont été menés par Mitsubishi et l'Université de technologie de Toyohashi (Sitzmann et al., 2016).

Depuis 1992, l'Université de technologie de Berlin (Knorr) et l'Université d'État de Washington (Barbosa-Cánovas et Swanson) ont effectué des travaux de recherche dans ce domaine, suivies par l'Université d'État de l'Ohio (Zhang) en 1994. Les premières revues de la technologie ont été publiées dans les années 1990, un premier livre CEP a été publié en 1999 par Barbosa-Cánovas (Töpfl, 2006).

En 1995, Pure Pulse Technologies, filiale de Maxwell Laboratories, a développé un système de traitement continu appelé CoolPure, permettant de traiter jusqu'à 2 000 l/h. À des fins de recherche, un système pilote, CoolPure Jr., était disponible, fonctionnant à un débit de 6 à 10 l/h et avec une intensité de champ maximale de 50 kV/cm. Une brochure de Pure Pulse décrivait

les deux technologies non thermiques : PureBright (lumière pulsée) et CoolPure (CEP). La même année, la Food and Drug Administration (FDA) a émis une lettre de non-objection concernant l'utilisation de la technologie CEP pour la conservation des aliments ; en 1996, le traitement des œufs liquides a été approuvé sous certaines conditions (Töpfl, 2006).

Aux États-Unis, en 1997, une collaboration entre l'OSU, la WSU, l'EPRI et l'armée américaine a été initiée (Mermelstein, 1998), et une série d'ateliers PEF ont été organisés en 1997-1998. Des protocoles pour les tests de provocation microbienne ont été élaborés et un système PEF de laboratoire a été conçu. Les aspects techniques requis pour le CEP ont été examinés par Zhang en 1995 (Töpfl, 2006).

Un atelier européen sur la technologie du CEP a été organisé en 1998. Depuis 1998, un prototype de PurePulse, qui a ensuite cessé ses activités et a été réintégré à Maxwell, a été installé à l'Université de Technologie de Berlin et a servi à de nombreux travaux de recherche sur l'application du CEP aux tissus végétaux jusqu'en 2005. Parallèlement, Angersbach, Heinz et Knorr ont conçu leurs propres générateurs d'impulsions et chambres de traitement à l'Université de Technologie de Berlin depuis 1997, année du lancement d'un projet national sur l'applicabilité du CEP à l'extraction de l'amidon de pomme de terre. Ce projet a également suscité l'intérêt du centre de recherche de Karlsruhe, où un groupe de travail dirigé par Bluhm et Schultheiss étudiait les effets du CEP sur les tissus végétaux. À partir d'un modèle électrophysique de cellules biologiques, Angersbach a développé une technique permettant de déterminer la perméabilité cellulaire et a défini un indice de désintégration cellulaire publié en 1997 et 1999. Les premiers rapports sur l'amélioration du séchage ont été publiés par Angersbach et Knorr en 1997 et Rastogi en 1999. À l'Université de Technologie de Berlin, depuis 1999, Volker Heinz a développé et réalisé un prototype combinant champs électriques pulsés et haute pression jusqu'à 200 MPa (Töpfl, 2006).

2.4 Électroporation

L'électroporation est le processus consistant à appliquer des champs électriques pulsés à des cellules biologiques afin d'induire une perméabilité de la membrane cellulaire. Ce processus peut être réversible ou irréversible selon que la perméabilité est temporaire et susceptible de se refermer, ou permanente et provoque la rupture de la membrane (Grenier, 2006).

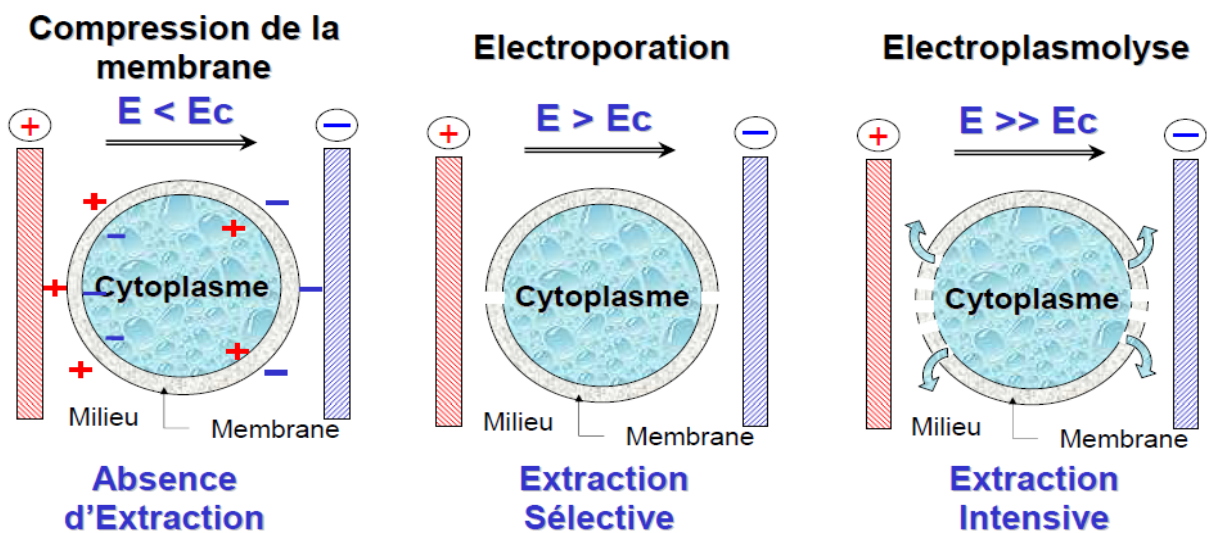
Les premières étapes importantes de l'application du CEP au traitement des matrices biologiques remontent à une cinquantaine d'années. À cette époque, différents groupes ont observé que le traitement par CEP induisait une rupture électrique des membranes cellulaires,

appelée électroporation. Cette capacité du CEP à induire l'électroporation cellulaire a été utilisée pour tuer des micro-organismes. Par la suite, différentes théories de l'électroporation membranaire ont été élaborées et l'application du CEP pour induire des instabilités mécaniques, hydrodynamiques, osmotiques et viscoélastiques a été démontrée, permettant ainsi de développer de nouveaux procédés (Barba et al., 2015).

Cependant, les mécanismes de création et l'origine de ces pores ne sont pas entièrement compris et restent controversés. Une explication du processus d'électroporation est qu'une augmentation de la tension transmembranaire entraînerait la création d'une voie aqueuse temporaire à travers la membrane (Grenier, 2006) .

La figure 2.2 illustre le principe d'électroporation. Zimmermann (2005) a proposé un autre modèle d'électroporation, basé sur la compression électromécanique de la membrane cellulaire. Le champ électrique pulsé crée une attraction de charges opposées induites sur les membranes interne et externe, créant ainsi une force de compression. Si l'intensité et la durée du champ sont suffisamment élevées, la force de compression peut rendre la bicouche lipidique perméable au milieu (Grenier, 2006).

La largeur d'impulsion et l'intensité du champ électrique sont deux paramètres très importants et la capacité de les contrôler dans différentes plages est une propriété utile d'une alimentation pulsée (Grenier, 2006). L'ouverture des pores lors de l'électroporation permet l'insertion de médicaments ou de gènes dans la cellule .



E_c : intensité critique du champ électrique pour électroporation

$E_c = 0.1- 10 \text{ kV/cm}$ pour un tissu végétal, $E_c = 20- 60 \text{ kV/cm}$ pour des microorganismes

Figure 2.2 : Electroporation/Electroperméabilisation (Vorobiev & Lebovka, 2008b)

Des impulsions d'une durée de 100 ms et d'une intensité de champ électrique de 100 kV/m se sont révélées efficaces pour administrer des médicaments aux cellules de mammifères ; tandis que des impulsions de 20 ms et 5 kV/m se sont révélées efficaces pour la gérance de gènes. Si l'intensité du champ électrique dépasse la résistance critique au claquage, la membrane sera irréversiblement endommagée et la cellule mourra. Des impulsions de l'ordre de la microseconde, avec des intensités de champ électrique de l'ordre de quelques dizaines de mégavolts par mètre, ont été rapportées comme capables de tuer des bactéries dans l'eau et les aliments liquides. Récemment, la capacité à contrôler la durée d'impulsion de l'ordre de la nanoseconde a fait l'objet d'une attention accrue, car des impulsions de l'ordre de la nanoseconde et d'intensité de champ électrique de l'ordre de plusieurs mégavolts par mètre sont capables de manipuler les structures internes de la cellule biologique, un processus connu sous le nom d'électromanipulation intracellulaire. De plus, les impulsions nanosecondes pourraient être utilisées pour des applications allant de la thérapie génique à l'induction sélective de l'apoptose et à l'inhibition de la croissance tumorale (Grenier, 2006) .

De nombreux paramètres d'impulsion, tels que l'intensité du champ électrique, la largeur et la forme de l'impulsion, le temps de montée, le nombre d'impulsions par seconde et l'intervalle de temps entre les impulsions, influencent le processus d'électroporation. Cependant, les paramètres les plus importants pour une électroporation efficace sont la largeur et l'intensité du champ électrique. De plus, un temps de montée rapide est également bénéfique pour les applications nécessitant des impulsions inférieures à la nanoseconde (Grenier, 2006) .

L'essentiel est que les paramètres d'impulsion soient hautement contrôlables afin d'obtenir une taille et une population de pores optimales, et d'éviter la rupture de la membrane cellulaire, entraînant des dommages irréversibles à la cellule. (Grenier, 2006).

2.5 Mécanisme d'action du CEP

La cellule est isolée de l'environnement extérieur par sa membrane. Cette membrane, ou paroi cellulaire, contient des composés diélectriques. Lorsqu'un champ électrique est appliqué à la cellule, ces composés diélectriques se transforment en entités chargées et se déplacent vers l'électrode opposée (Naliyadhara et al., 2022).

Le dépôt d'ions de charges opposées de part et d'autre de la membrane entraîne la génération d'un potentiel transmembranaire d'environ 10 mV. Le mouvement des ions dans la membrane cellulaire crée une contrainte électromécanique à l'intérieur de celle-ci. Pour ce faire, un champ électrique externe (E_e) supérieur au seuil du champ électrique critique (E_c) (amplitude

maximale du champ électrique jusqu'à laquelle la perméabilité à la membrane cellulaire ne se produit pas) doit être appliqué afin d'assurer la perméabilité à la membrane cellulaire.

Chaque cellule possède un champ électrique critique différent. Cela dépend en grande partie de la taille et de la forme de la cellule, de l'orientation de la paroi cellulaire par rapport au champ électrique et de la conductivité électrique du liquide cellulaire. Si le champ électrique externe est inférieur au champ électrique critique ($E_e < E_c$), aucune poration ne se produit. Il y a poration réversible si le champ électrique externe est identique ou légèrement supérieur au champ électrique critique ($E_e > E_c$). Dans le cas d'une poration réversible, une poration temporaire se produit en présence d'un champ électrique et, après la suppression de ce champ, la membrane cellulaire retrouve sa structure d'origine. La poration réversible est très utile en biologie moléculaire car elle permet d'introduire certaines substances chimiques dans le plasma cellulaire. En revanche, une poration irréversible ou permanente ne se produit (Figure 2.3) que lorsque l'intensité du champ électrique externe est très supérieure au champ électrique critique ($E_e \gg E_c$). Cette théorie de la rupture cellulaire est connue sous le nom de théorie de la rupture diélectrique (Naliyadhara et al., 2022).

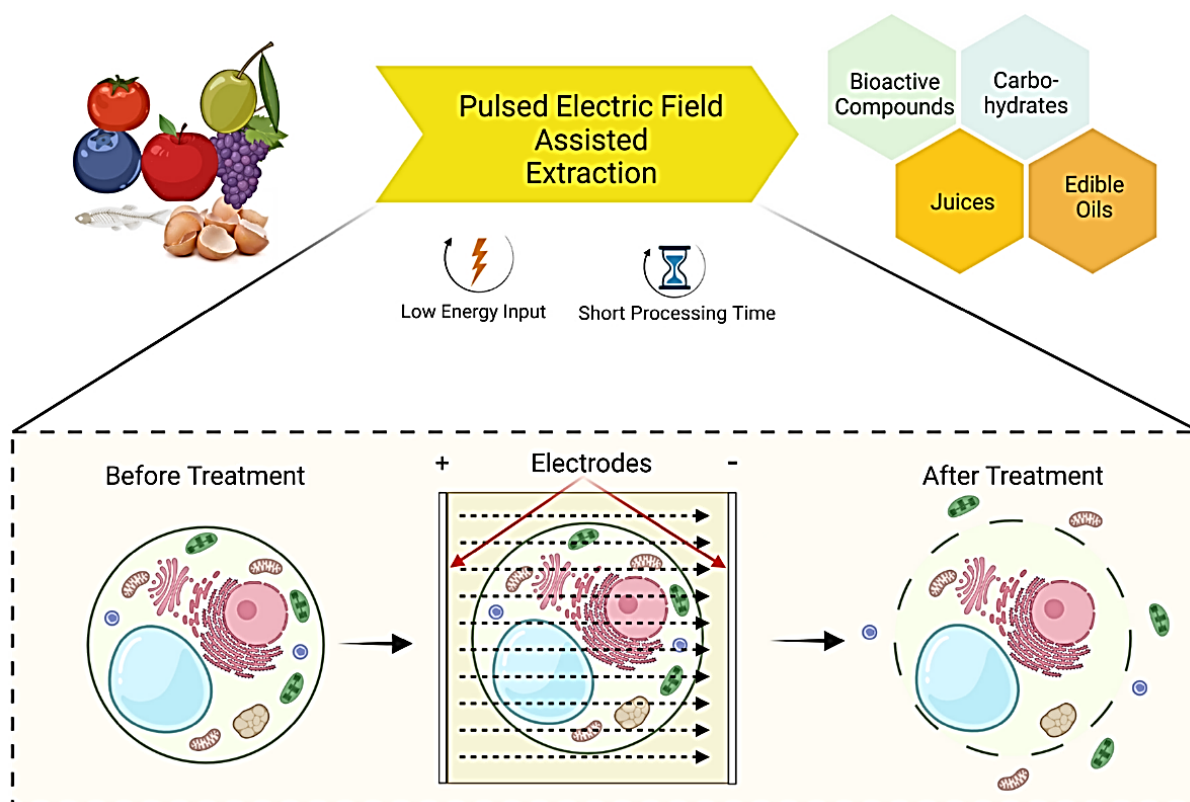


Figure 2.3 : Mécanisme d'action du champ électrique pulsé (CEP) (Naliyadhara et al., 2022)

L'électroporation irréversible de la membrane cellulaire due à l'application d'un champ électrique élevé entraîne une perte d'intégrité cellulaire et une perte de fluides cellulaires ; le

CEP aide à extraire des composés précieux des fruits, des oléagineux et d'autres matières premières ainsi que des déchets agricoles (Naliyadhara et al., 2022).

2.6 Equipements du traitement par CEP

L'équipement pour le traitement par CEP se compose de trois éléments principaux : un générateur d'impulsions haute tension, une chambre de traitement et un système de contrôle (Figure 2.4). Le premier élément important est le générateur d'impulsions haute tension, qui joue un rôle crucial dans le traitement par CEP, notamment en stockant l'énergie électrique, en générant des impulsions et en délivrant diverses formes d'ondes (Naliyadhara et al., 2022).

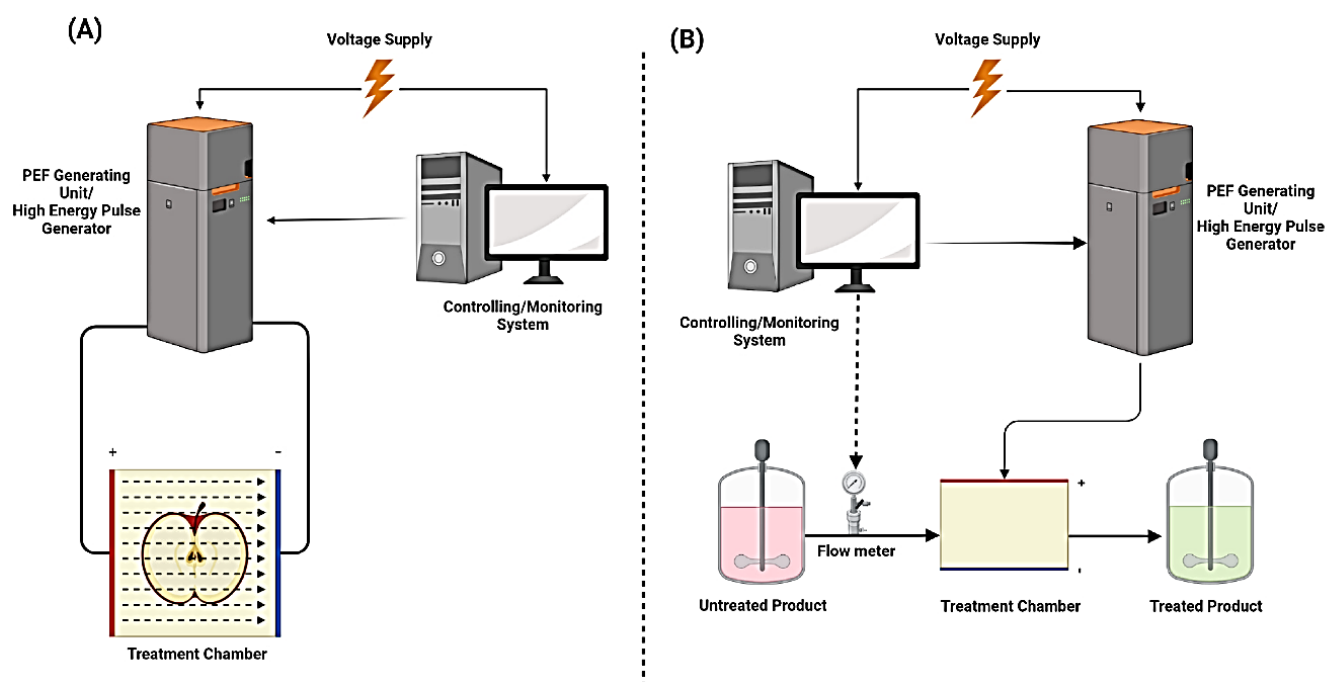


Figure 2.4 : Installation de l'équipement pour le traitement par CEP du produit :

(A) Procédé par lots (statique) ; (B) Procédé continu (Naliyadhara et al., 2022)

Les impulsions de champ électrique sont généralement appliquées sous forme d'ondes carrées, à décroissance exponentielle ou oscillatoires. L'impulsion carrée minimise l'absorption d'énergie dans les aliments et est plus efficace que les autres types d'impulsions pour inhiber les micro-organismes. Lors du traitement par CEP, une couche de protection peut se former sur les électrodes de la chambre de traitement lorsque des molécules chargées (par exemple, des protéines) migrent à la surface des électrodes. Cette couche de protection réduit l'efficacité du traitement. Des impulsions bipolaires sont utilisées pour empêcher la formation de cette couche de protection. Les impulsions bipolaires sont probablement plus mortelles que les impulsions monopolaires, car une inversion de l'orientation ou de la polarité du champ électrique modifie

la direction des molécules chargées dans la membrane cellulaire, ce qui provoque un stress au niveau de la membrane cellulaire des micro-organismes (Min et al., 2007).

2.6.1 Générateur d'impulsions haute tension

Le générateur du CEP est composé de divers composants électriques tels que des condensateurs, des inducteurs, des résistances, des transformateurs et des interrupteurs de puissance. Cette partie est la plus coûteuse du système CEP et une conception optimale est nécessaire pour rendre la technologie CEP plus viable économiquement (Naliyadhara et al., 2022).

L'alimentation à courant continu (DC) charge la batterie de condensateurs à la tension souhaitée. Grâce à ce dispositif, le courant alternatif (50-60 Hz) du réseau électrique est converti en courant alternatif (AC) haute tension, puis redressé en courant continu haute tension. Selon la tension requise, la génération de cette haute tension continue peut-être assurée par différents dispositifs, le plus souvent des transformateurs et des redresseurs. L'énergie fournie par l'alimentation est stockée temporairement dans le(s) condensateur(s), puis transmise très rapidement, sous forme d'impulsions, à l'alimentation pour générer l'intensité de champ électrique nécessaire (De Vito, 2006).

La puissance nominale totale de l'alimentation limite le nombre maximal de charges et de décharges du condensateur dans un intervalle de temps donné. De plus, la puissance requise par l'alimentation pour charger la batterie de condensateurs dépend de la résistance électrique de la résistance de charge ainsi que de la taille et du nombre de condensateurs chargés : un condensateur plus grand nécessitera plus de temps et/ou de puissance pour se charger qu'un condensateur plus petit. De même, une résistance de charge plus petite accélérera le processus de charge, mais augmentera la puissance requise. Une alimentation d'une puissance moyenne de l'ordre de 1,5 kW est couramment utilisée pour les équipements CEP de laboratoire (De Vito, 2006).

L'énergie stockée dans la batterie de condensateurs W_c dépend de sa capacité C_0 et de la tension de charge U :

$$W_c = \frac{1}{2} C_0 U^2 \quad (2-1)$$

Un condensateur de faible capacité peut stocker moins d'énergie qu'un condensateur de plus grande capacité lorsque les deux sont chargés au même niveau. En raison des pertes, seule une partie de cette énergie est transférée aux échantillons alimentaires (De Vito, 2006).

La décharge de l'énergie stockée dans le(s) condensateur(s) s'effectue par la fermeture de l'interrupteur, grâce à l'application d'un signal de déclenchement haute tension. L'interrupteur est le composant le plus important et le plus délicat du générateur d'impulsions. Il doit pouvoir fonctionner de manière fiable à puissance et fréquence de répétition élevées.

La conception des générateurs d'impulsions nécessite l'intégration d'un système de contrôle pour protéger l'appareil contre les défaillances imprévues pendant le traitement. En effet, les composants électriques, et en particulier le commutateur, peuvent être gravement et irréversiblement endommagés lors du traitement d'échantillons alimentaires présentant une résistivité trop élevée ou trop faible, par rapport aux limites de résistivité autorisées par le circuit électrique. Par exemple, si la résistivité de l'échantillon alimentaire est trop faible, l'intensité du courant traversant l'échantillon augmentera, ce qui peut provoquer une surchauffe de l'interrupteur, et non de l'aliment, à moins qu'un dispositif de limitation de courant ne soit installé dans le circuit (De Vito, 2006).

Pour résoudre ce problème, une résistance est généralement ajoutée au circuit en série avec la chambre de traitement. Un aliment présentant une résistivité élevée maintient une tension élevée aux bornes de l'interrupteur. Ainsi, pour protéger le dispositif, une résistance de dérivation est ajoutée au circuit en parallèle avec la chambre de traitement (De Vito, 2006).

2.6.2 Chambre de traitement

L'autre composant majeur d'une unité CEP est la chambre de traitement, utilisée pour transférer des impulsions de tension électrique aux aliments. Elle se compose essentiellement de deux électrodes. Pour des raisons de sécurité, il est généralement préférable de connecter une électrode à la source de tension (c'est-à-dire au générateur d'impulsions) et l'autre à la terre.

Cependant, des systèmes à électrodes flottantes (c'est-à-dire toutes deux connectées au générateur d'impulsions) sont également utilisés. Un matériau isolant maintient les électrodes en position fixe et forme la chambre contenant les aliments à traiter. L'isolant agit comme une entretoise entre les électrodes, protège les aliments des effets indésirables des électrodes et, plus important encore, minimise les pertes ohmiques (De Vito, 2006).

Les chambres de traitement peuvent être statiques (par lots) ou continues. Les chambres statiques sont principalement utilisées dans les études en laboratoire pour les traitements CEP de produits liquides et solides. Les chambres continues, quant à elles, conviennent mieux aux applications pilotes et industrielles (De Vito, 2006; Min et al., 2007) .

De plus, les matériaux choisis pour constituer la chambre de traitement doivent être lavables (nettoyage en place) ou auto-lavables et chimiquement inertes vis-à-vis des aliments. Selon les différents choix, plusieurs chambres de traitement statiques ont été proposées pour traiter à la fois les aliments liquides et solides (De Vito, 2006).

Les électrodes constituent l'élément essentiel de la chambre de traitement, qui se présentent généralement sous trois configurations différentes : coaxiale, parallèle et coplanaire. Une conception sanitaire des équipements de traitement doit être adoptée pour répondre aux exigences de qualité, ce qui implique des caractéristiques telles que des matériaux électrochimiquement inertes et de qualité alimentaire, facilement nettoyables et stérilisables. Auparavant, le carbone (graphite) était utilisé comme matériau d'électrode, mais sa durée de vie était plus courte. En raison de leur nature inerte et de leur conductivité supérieure, les métaux précieux comme l'or et le platine pourraient constituer un choix optimal pour les électrodes, mais ils peuvent facilement augmenter le coût du système CEP (Naliyadhara et al., 2022).

L'acier inoxydable représente le choix le plus approprié pour les électrodes et a été largement utilisé. De plus, l'utilisation d'autres matériaux électrochimiques inertes, tels que le carbone, l'or, le platine et les oxydes métalliques, a été utilisée pour les électrodes ou leurs surfaces. L'utilisation d'électrodes en carbone-laiton a été également utilisée. Les matériaux isolants utilisés sont : le polyéthylène, le polypropylène ; le nylon ; le polysulfone ; le plexiglas (De Vito, 2006).

Plusieurs géométries d'électrodes ont été proposées :

- Les électrodes à plaques parallèles, espacées de peu, fournissent un champ électrique uniforme et constituent le choix le plus pratique pour les chambres de dosage.
- Les électrodes en forme de disque et à bords arrondis peuvent minimiser l'amplification du champ électrique et réduire ainsi le risque de claquage diélectrique.
- Les surfaces polies des électrodes réduisent le risque de claquage diélectrique des aliments à traiter.
- Outre les plaques parallèles, d'autres exemples de configurations continues sont le cylindre concentrique, le cône concentrique, le champ électrique convergé et la chambre de traitement à champ commun (De Vito, 2006).

2.6.2.1 Chambres de traitement statiques

Les chambres de traitement statiques sont généralement privilégiées pour les expériences en laboratoire. Dunn and Pearlman (1987) ont conçu une chambre circulaire à plaques parallèles

pour les traitements CEP statiques et continus, avec des électrodes en acier inoxydable et une entretoise en nylon. Zhang, Barbosa-Cánovas, et al. (1995) ont présenté une chambre de traitement CEP statique en forme de disque, dotée de deux électrodes en acier inoxydable à bords arrondis et d'une entretoise en polysulfone ou en plexiglas. Cette conception de chambre pouvait supporter des intensités de champ électrique allant jusqu'à 70 kV/cm (Min et al., 2007).

Par ailleurs, le principal critère à respecter lors de la conception de la chambre de traitement est d'éviter la rupture diélectrique des aliments transformés. La rupture diélectrique consiste en la génération d'une étincelle à l'intérieur de la chambre (De Vito, 2006).

Une augmentation locale de l'intensité du champ électrique ainsi que la présence de bulles d'air peuvent provoquer une rupture diélectrique des aliments. Il convient donc d'éviter cet inconvénient :

- En choisissant une géométrie de chambre de traitement permettant une distribution optimale et uniforme du champ électrique ;
- En introduisant dans l'appareil du CEP, avant le traitement, un système de dégazage des aliments afin d'empêcher ou d'éliminer la formation de bulles d'air.

Un exemple du chambre statique est la chambre de traitement statique à fil-cylindre illustrée par la figure 2.5a. Un système d'électrodes à fil-cylindre a été utilisé dans la conception. Le diamètre intérieur de l'électrode à fil était de 20 mm, celui du fil de 1 mm et la longueur de la chambre de traitement de 110 mm, pouvant contenir 38 cm³ de liquide. L'électrode à fil était maintenue par un capuchon en plexiglas au centre du cylindre, la chambre de traitement étant montée sur l'agitateur situé au fond du cylindre. Pour améliorer la dégradation des performances, un agitateur a été utilisé pour favoriser l'agitation du liquide. Ainsi, une fois le liquide dans le cylindre efficacement agité, la capacité de survie a diminué linéairement de 104 à 105 avec l'augmentation de l'apport d'énergie. Cependant, l'agitation du liquide a entraîné un autre problème : le champ électrique était essentiellement réparti à l'intérieur de l'électrode fil-cylindre. Comme le champ électrique près de la paroi du cylindre était bien plus faible que celui près de l'électrode fil, les performances de destruction dans cette zone étaient faibles (Min et al., 2007).

Un autre exemple du chambre statique est la chambre de traitement statique pointe-pointe, dans laquelle une paire d'électrodes tiges était vissée à la chambre en Téflon et maintenue au centre de celle-ci (Figure 2.5b), a été réalisée pour étudier la destruction cellulaire par une onde de choc intense générée par une décharge d'arc. Avec un diamètre de 4 mm pour chaque

électrode pointe et une extrémité en forme de demi-sphère, la distance entre les deux électrodes était de 3 mm. Le film de nylon était à 15 mm du point de décharge, et le diamètre intérieur et la longueur du petit récipient pour l'échantillon liquide étaient respectivement de 15 mm (Min et al., 2007).

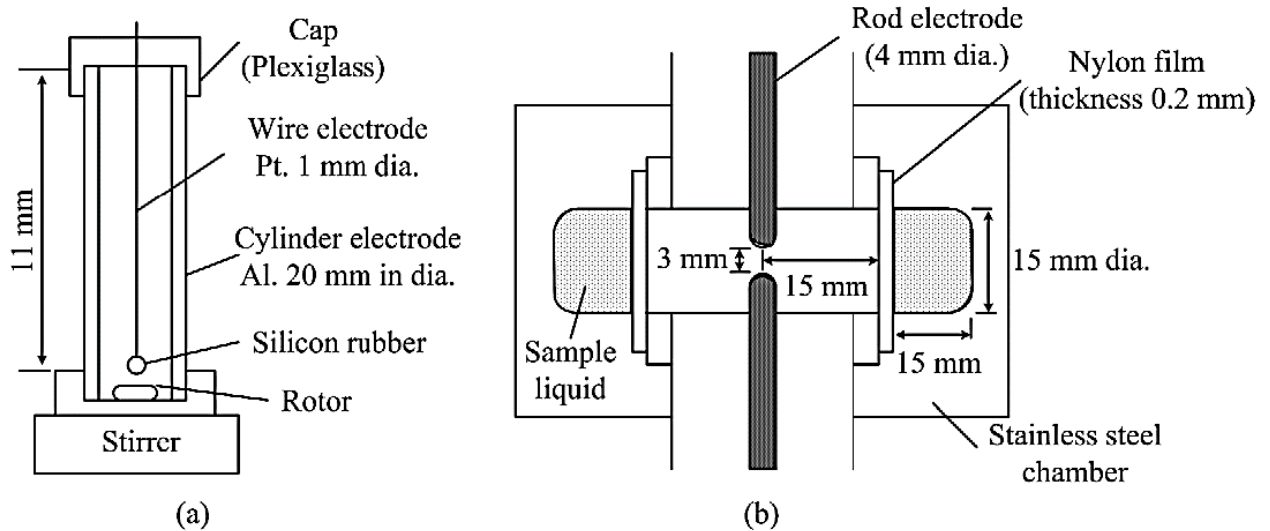


Figure 2.5 : Chambre de traitement statique
(a) Électrode fil-cylindre et (b) système d'électrode pointe-pointe (Min et al., 2007)

2.6.2.2 Chambres de traitement continu

Une chambre de traitement continu a été initialement inventée par Dunn and Pearlman (1987). La chambre était composée de deux électrodes à plaques parallèles et d'un isolant diélectrique. Les électrodes étaient séparées des aliments par des membranes conductrices en copolymères de polystyrène sulfoné et d'acide acrylique (Min et al., 2007).

Les chambres de traitement coaxiales sont actuellement largement utilisées en raison de leur simplicité de structure. Dans les chambres coaxiales, le courant électrique circule perpendiculairement au flux alimentaire et parallèlement au flux alimentaire (Min et al., 2007).

Un exemple d'une chambre de traitement continu par CEP est présenté par la figure 2.6 où une unité de traitement par CEP dans laquelle un aliment liquide était soumis à une série d'impulsions de champ électrique intense. La chambre comprenait plusieurs zones réservoirs d'électrodes de forme cylindrique, isolées électriquement les unes des autres par des éléments de séparation diélectriques, de sorte que seul le courant traverse l'aliment liquide lui-même. Il est important qu'un champ électrique sensiblement uniforme soit fourni dans toute la zone de traitement de l'aliment liquide. Dans le cas contraire, des filaments (streamer) de courant ou la formation d'arcs électriques pourraient se développer dans la zone de traitement (Min et al., 2007).

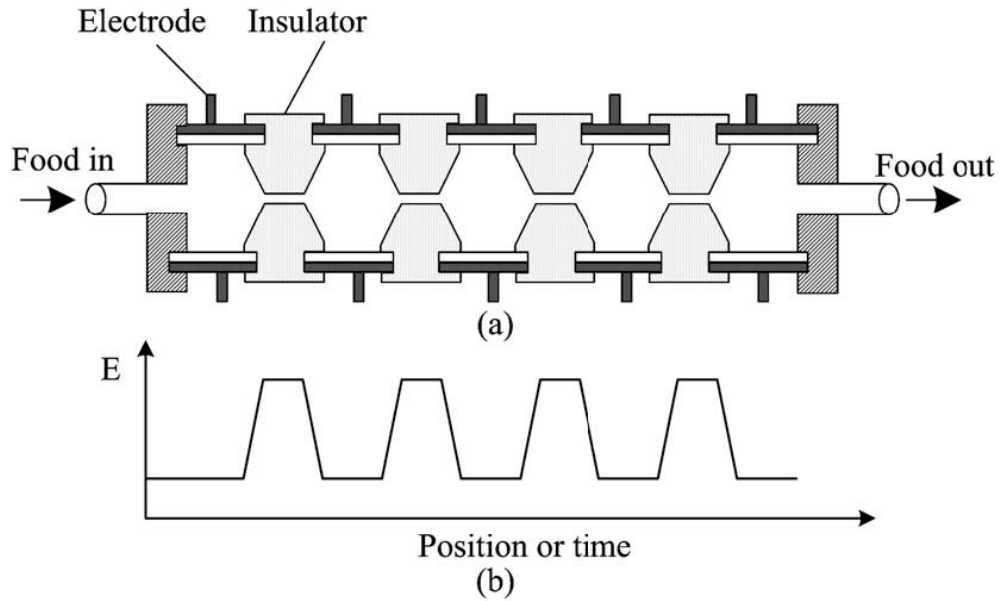


Figure 2.6 : Une chambre de traitement à courant continu et à champ électrique élevé.
(a) Chambre et (b) champ électrique en fonction du temps ou de la position comme commutation de fluide (Min et al., 2007).

Le groupe de recherche du traitement par CEP de l'Université d'État de Washington (WSU) a conçu, construit et testé une chambre à flux continu à l'échelle du laboratoire. Afin d'augmenter le temps de séjour des aliments liquides à l'intérieur de la chambre de traitement, des canaux d'écoulement à chicanes ont été ajoutés, créant un chemin tortueux pour les aliments liquides dans la zone de traitement (Figure 2.7). Le refroidissement de la chambre était assuré par circulation d'eau à une température sélectionnée à travers des chemises intégrées aux deux électrodes en acier inoxydable. Les conditions de fonctionnement prévues étaient les suivantes : volume de la chambre : 20 ou 8 cm³ ; espacement des électrodes : 0,95 ou 0,51 cm ; intensité du PEF : 35 ou 70 kV/cm ; largeur d'impulsion : 2 à 15 μ s ; fréquence de répétition des impulsions : 1 Hz ; et débit d'aliment : 1 200 ou 600 cm³/min.

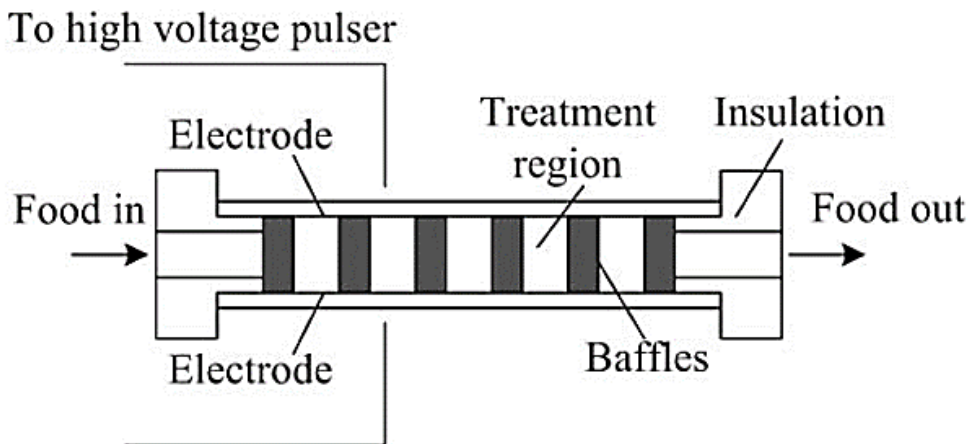


Figure 2.7 : Chambre de traitement continu WSU (Min et al., 2007)

Le débit est l'un des paramètres critiques du traitement CEP dans un procédé continu. De plus, le type d'écoulement influence également le résultat du traitement, car l'écoulement turbulent offre un meilleur transfert d'énergie qu'un écoulement laminaire. Un système de contrôle est nécessaire pour surveiller et contrôler divers paramètres du procédé, tels que l'intensité du champ électrique, le nombre et la largeur d'impulsions, le débit du produit, etc (Naliyadhara et al., 2022).

2.6.3 Système de contrôle

Les paramètres électriques et de procédé peuvent être surveillés par le système de contrôle composé de deux dispositifs principaux : un oscilloscope et une sonde de température (De Vito, 2006). L'oscilloscope mesure la tension aux bornes de la chambre de traitement et affiche la forme de la tension de sortie. Une sonde de courant connectée à la chambre de traitement et interfacée avec l'oscilloscope mesure également le courant traversant les aliments. Afin de minimiser les interférences électromagnétiques, l'oscilloscope doit être placé dans une zone blindée (De Vito, 2006). La température des échantillons est mesurée à l'aide d'une sonde thermique placée à l'intérieur de la chambre de traitement (De Vito, 2006).

2.7 Paramètres importants du processus du CEP

L'efficacité du traitement par CEP dépend des paramètres du processus, tels que l'intensité du champ électrique, le nombre, la durée ou la largeur des impulsions, leur fréquence, etc (Naliyadhara et al., 2022).

2.7.1 Intensité du champ électrique

La technologie des champs électriques pulsés (CEP) est un traitement électrique de courte durée (de quelques nanosecondes à quelques millisecondes) avec un champ électrique pulsé d'intensité comprise entre 100 et 300 V/cm et 20 à 80 kV/cm (Barba et al., 2015).

L'intensité du champ électrique est l'un des paramètres critiques du traitement par CEP. Des études ont démontré qu'avec l'augmentation de l'intensité du champ électrique, le rendement d'extraction était considérablement accru. Cela peut être dû à un apport énergétique plus élevé, qui facilite la rupture de la membrane cellulaire plus facilement qu'avec des intensités de champ électrique plus faibles (Naliyadhara et al., 2022).

À des champs électriques élevés (>20 kV/cm), elle peut constituer une alternative au traitement thermique traditionnel pour inactiver les micro-organismes altérants et pathogènes ainsi que les enzymes responsables de la qualité, avec l'avantage de conserver ou de modifier

au minimum les propriétés sensorielles, nutritionnelles et bénéfiques pour la santé des produits alimentaires liquides (Barba et al., 2015).

2.7.2 Durée du traitement

Lors d'un traitement CEP, l'aliment est placé entre deux électrodes formant une chambre de traitement et des impulsions répétées de haute tension sont appliquées à travers le système afin de rompre la membrane. Le temps de traitement, ou durée totale du traitement, est défini comme suit :

$$t = n \tau_p \quad (2-2)$$

Où : τ_p est la durée de l'impulsion et n est le nombre d'impulsions appliquées à l'aliment.

L'équation (2-1) montre que la durée du traitement augmente soit avec le nombre d'impulsions, soit avec leur durée. Il est important de noter qu'avec l'augmentation du nombre d'impulsions, la consommation énergétique totale augmente, tandis qu'avec l'augmentation de la durée d'impulsion, la température des aliments augmente (De Vito, 2006).

Lors des traitements, l'aliment est en contact étroit avec les électrodes et est donc soumis à un champ électrique. En supposant que l'échantillon soit homogène (c'est-à-dire que sa permittivité soit constante), l'intensité moyenne du champ électrique E est la suivante :

$$E = \frac{V}{d} \quad (2-3)$$

Où : V est la tension aux bornes de l'échantillon alimentaire et d la distance entre les électrodes (De Vito, 2006).

L'équation (2-3) montre qu'avec l'augmentation de l'écartement, une tension plus élevée est nécessaire pour obtenir le champ électrique souhaité (c'est-à-dire le champ électrique critique correspondant à la rupture de la membrane). La conception de la chambre de traitement (c'est-à-dire la géométrie et les dimensions des électrodes) détermine une distribution plus ou moins uniforme du champ à l'intérieur de l'aliment. Plus le champ électrique est uniforme, plus le traitement sera homogène. Outre le nombre et la durée des impulsions (c'est-à-dire la durée totale du traitement), un traitement CEP est défini par d'autres paramètres électriques tels que la forme et la fréquence de répétition des impulsions, c'est-à-dire le nombre d'impulsions par seconde (De Vito, 2006).

2.7.3 Nombre d'impulsions

Le nombre d'impulsions (N) correspond au nombre total d'impulsions appliquées pendant le traitement par CEP. C'est un paramètre crucial ; le traitement par CEP utilise principalement une série d'impulsions. Diverses études ont montré que le rendement d'extraction augmente avec le nombre d'impulsions. Lorsqu'une impulsion électrique est appliquée, elle reste au maximum de son amplitude pendant un intervalle de temps donné, appelé durée d'impulsion (t_p) ou largeur d'impulsion, car il est bien connu que la durée d'impulsion varie de quelques nanosecondes à quelques millisecondes dans le traitement par CEP.

2.7.4 Forme de l'impulsion

Les impulsions électriques peuvent être générées avec différentes formes d'onde, notamment à décroissance exponentielle, carrées et oscillantes. De plus, elles peuvent être de polarité constante (impulsions monopolaires) ou alternées (impulsions bipolaires). Les impulsions à décroissance exponentielle monopolaires et les impulsions carrées monopolaires et bipolaires sont les plus courantes dans l'application du CEP en technologie alimentaire (De Vito, 2006).

Dans une impulsion monopolaire à décroissance exponentielle (Figure 2.8), la tension aux bornes de la chambre de traitement augmente rapidement jusqu'à une valeur de consigne V_0 , puis décroît lentement avec le temps t , conformément à l'équation suivante :

$$V(t) = V_0 \exp^{-(t/\tau)} \quad (2-4)$$

Où : V_0 est la tension de charge initiale de la batterie de condensateurs et τ est la constante de temps définie comme :

$$\tau = RC \quad (2-5)$$

Où : R et C sont respectivement la résistance de charge et C est la capacité totale du circuit.

La résistance des électrodes est négligeable par rapport à celle de l'échantillon alimentaire. De même, la capacité de l'échantillon alimentaire est négligeable par rapport à celle du ou des condensateurs. On peut donc supposer que :

$$\tau = R_f C_0 \quad (2-6)$$

Où : R_f est la résistance alimentaire et C_0 est la capacité de la batterie de condensateurs.

Pour une impulsion exponentielle, la durée de l'impulsion τ_p est approximativement égale à 5τ (De Vito, 2006).

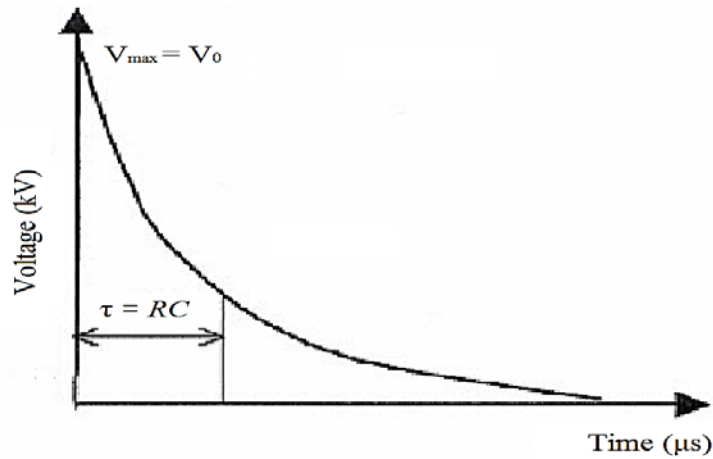


Figure 2.8 : Impulsion à décroissance exponentielle (De Vito, 2006)

Étant donné que la constante de temps représente le temps pendant lequel la tension aux bornes des électrodes diminue de la valeur initiale V_0 à V_0/e ou à 37 % de V_0 , on peut supposer que toute l'énergie de l'impulsion est délivrée pendant la première constante. Par conséquent, plusieurs chercheurs ont considéré la constante de temps τ comme la durée réelle de l'impulsion. D'autres chercheurs utilisent plutôt la durée totale de l'impulsion (De Vito, 2006).

En théorie, la génération d'une impulsion carrée nécessite une ligne de transmission. L'utilisation d'une ligne de transmission pour générer des impulsions carrées pose deux problèmes. Premièrement, il est difficile et peu pratique d'adapter l'impédance de l'aliment à l'impédance caractéristique de la ligne de transmission. De plus, la ligne de transmission réelle (c'est-à-dire un câble coaxial) n'est pas adaptée aux impulsions courtes (durée de l'ordre de la microseconde) (De Vito, 2006). Ces problèmes peuvent être surmontés grâce à un PFN composé de réseaux de condensateurs et d'inductances, dans lequel les sections inductances-condensateurs imitent la ligne de transmission (Figure 2.9) (De Vito, 2006).

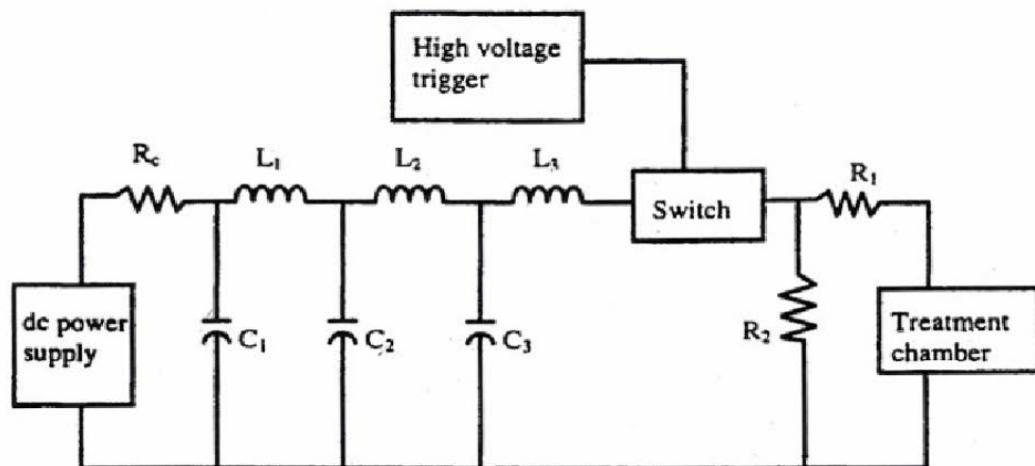


Figure 2.9 : Circuit générateur d'impulsions à onde carrée (De Vito, 2006)

Lors d'une impulsion carrée, la tension aux bornes des électrodes augmente jusqu'à atteindre une tension de crête constante pendant toute la durée de l'impulsion. Ainsi, un champ électrique constant est appliqué aux aliments. En pratique, cette condition n'est garantie que lorsque l'impédance du réseau générateur d'impulsions correspond à celle des aliments à traiter. En pratique, cela est très difficile, surtout pour les chambres à faible résistance ($< 50 \Omega$) (De Vito, 2006). La forme d'onde est alors déformée (Figure 2.10) et une pseudo-impulsion carrée est produite. La forme d'impulsion réelle se rapproche de la forme idéale lorsque l'impédance de la chambre de traitement et du PFN sont égales (De Vito, 2006).

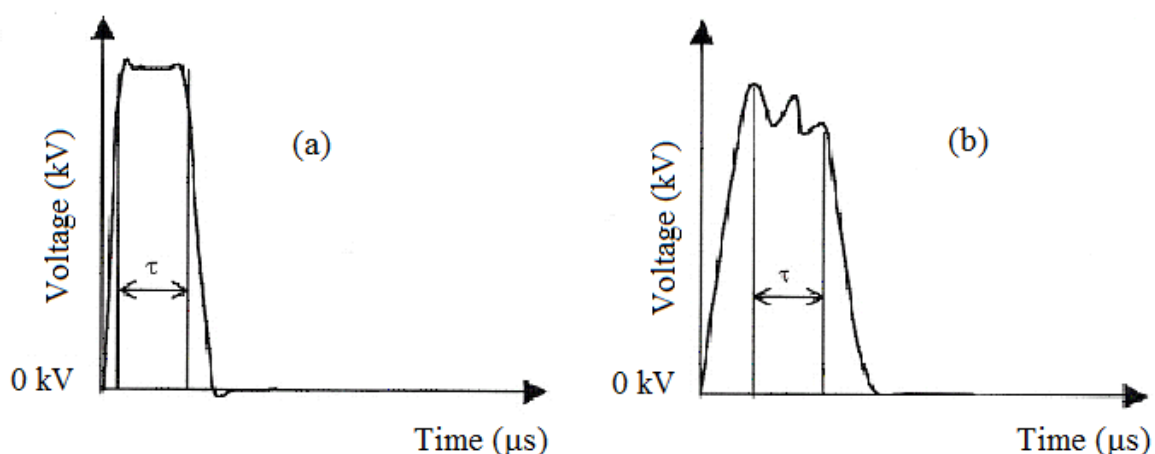


Figure 2.10 : a) Impulsion carrée. b) Impulsion pseudo-carrée (De Vito, 2006)

En raison de leur simplicité et de leur flexibilité (par exemple, la durée des impulsions peut varier en fonction des condensateurs de décharge du PFN), plusieurs générateurs d'impulsions exponentielles ont été conçus et utilisés pour étudier l'inactivation des bactéries et des enzymes, ainsi que la perméabilisation des tissus végétaux (De Vito, 2006).

Bien que le PFN produisant des impulsions carrées soit plus complexe et plus coûteux que le circuit à impulsions exponentielles, les impulsions carrées sont plus efficaces pour la perméabilisation cellulaire. C'est pourquoi des générateurs d'impulsions carrées ont également été utilisés dans des applications CEP (De Vito, 2006).

En utilisant plusieurs commutateurs dans les mêmes configurations de circuit de base, il est possible de générer des impulsions bipolaires. En raison de leur coût élevé, les impulsions bipolaires n'ont pas été étudiées de manière approfondie. Une étude sur l'inactivation de micro-organismes dans les aliments liquides par différentes formes d'onde a démontré que les impulsions bipolaires étaient plus efficaces que les impulsions monopolaires, offrant l'avantage d'une consommation d'énergie minimale, d'un dépôt réduit de solides à la surface des électrodes et d'une électrolyse réduite des aliments (De Vito, 2006).

La forme de l'impulsion influence également les résultats des applications de champs électriques pulsés. Par conséquent, des alimentations pulsées capables de contrôler de nombreux paramètres d'impulsion importants sur une large plage et de fournir certaines formes d'impulsion, quelle que soit la conductivité du milieu, sont hautement souhaitables (Grenier, 2006)

Les impulsions électriques présentent différentes formes d'onde : carrée, carrée bipolaire, à décroissance exponentielle, bipolaire à décroissance exponentielle et double exponentielle (Figure 2.11) (Naliyadhara et al., 2022).

Les impulsions à décroissance exponentielle sont les moins puissantes, car elles délivrent un champ électrique d'intensité élevée pendant une durée très courte. En revanche, dans les impulsions carrées, l'intensité du champ électrique reste élevée plus longtemps que dans les impulsions à décroissance exponentielle, ce qui renforce l'efficacité des impulsions carrées. Les impulsions carrées sont comparativement plus coûteuses à produire que les impulsions à décroissance exponentielle. On distingue deux formes d'onde : monopolaire et bipolaire. Dans les impulsions bipolaires, l'érosion des électrodes est réduite grâce à l'échange continu de cathode et d'anode, ce qui réduit le dépôt de charge. L'efficacité des impulsions carrées mono et bipolaires sur la cellule a fait l'objet d'une controverse (Naliyadhara et al., 2022).

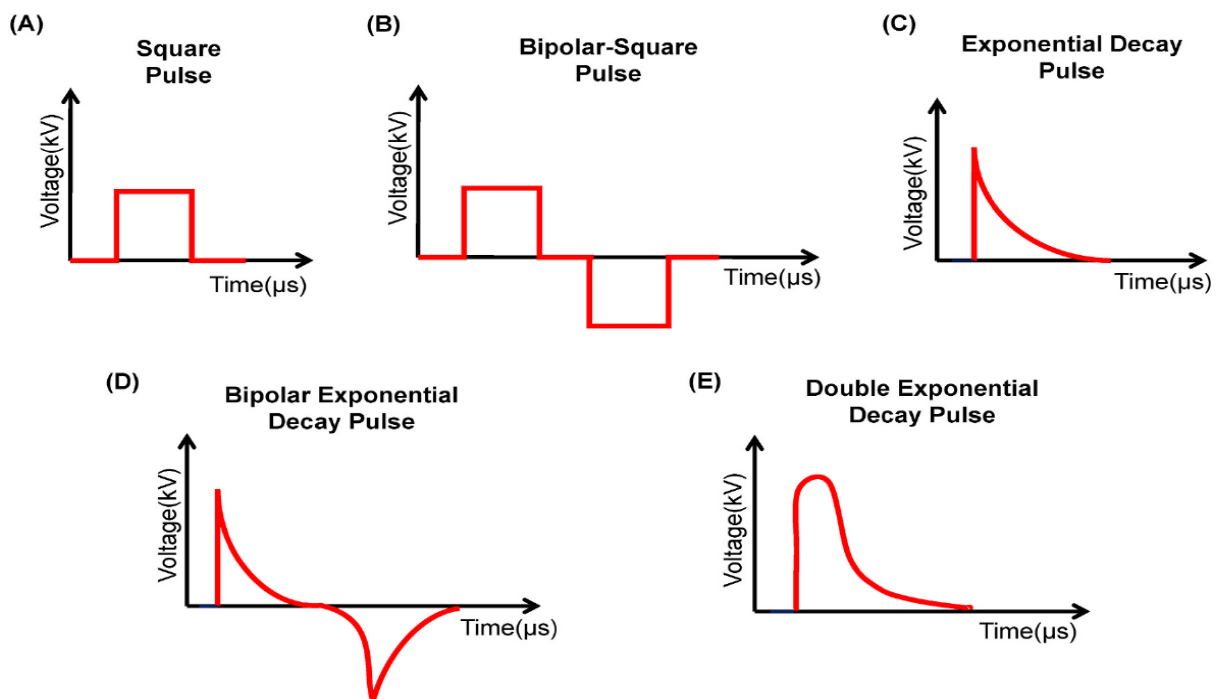


Figure 2.11 : Différents types de formes d'ondes électriques utilisées dans le traitement du CEP: (A) Impulsion carrée ; (B) Impulsion carrée bipolaire ; (C) Impulsion à décroissance exponentielle ; (D) Impulsion à décroissance exponentielle bipolaire ; (E) Impulsion à décroissance exponentielle double (Naliyadhara et al., 2022).

Des études antérieures ont montré que les impulsions carrées bipolaires sont plus efficaces que les impulsions carrées monopolaires sur les cellules microbiennes en milieu liquide. Des auteurs ont démontré que les dommages importants causés par les impulsions carrées bipolaires peuvent être dus aux changements fréquents de polarité des électrodes, et que ces changements périodiques de polarité provoquent un stress au niveau de la membrane cellulaire, aggravant les dommages cellulaires. Des résultats similaires, obtenus dans une autre étude, ont indiqué que les impulsions carrées bipolaires étaient plus efficaces pour inactiver les micro-organismes présents dans le lait (Naliyadhara et al., 2022). Une étude récente a montré que les impulsions carrées monopolaires étaient plus efficaces que les impulsions carrées bipolaires pour l'extraction de composés cellulaires à partir de cellules de microalgues (Naliyadhara et al., 2022).

Ces résultats concordent avec la littérature existante, où les chercheurs ont constaté que les impulsions monopolaires sont plus efficaces que les impulsions bipolaires pour inactiver les micro-organismes présents dans le jus de pomme. Lors de l'application d'une impulsion carrée bipolaire, après la première impulsion, la charge résiduelle sur la membrane est annulée ou neutralisée par l'application d'impulsions consécutives de polarité opposée, ce qui entraîne la neutralisation de la charge sur la membrane cellulaire, rendant ainsi la perméabilité de celle-ci difficile (Naliyadhara et al., 2022).

2.7.5 Energie consommée par l'aliment lors du traitement par CEP

La consommation énergétique d'un traitement par CEP est un paramètre important pour le maintien des caractéristiques non thermiques du traitement. Ce paramètre dépend du nombre d'impulsions n et de l'énergie délivrée à chaque impulsion W_p :

$$W = W_p n \quad (2-7)$$

L'énergie W_p dissipée à chaque impulsion est :

$$W = \int_0^{\tau_p} p(t) dt \quad (2-8)$$

Où $p(t)$ est la puissance instantanée et l'instant $t = 0$ correspond à la fermeture de l'interrupteur. La puissance instantanée $p(t)$ est définie comme suit :

$$p(t) = u(t) i(t) \quad (2-9)$$

Où : $u(t)$ est la tension instantanée aux bornes des électrodes et $i(t)$ est le courant instantané traversant l'échantillon alimentaire dans la chambre de traitement.

Ainsi, l'équation (2-8) devient :

$$W_p = \int_0^{\tau_p} u(t)i(t)dt \quad (2-10)$$

Comme le montre l'équation (2-10), l'énergie d'un traitement CEP est déterminée par les propriétés de l'échantillon (résistivité/conductivité, taille) et les caractéristiques de l'impulsion (forme d'onde, largeur, tension de crête).

Par rapport aux impulsions exponentielles, les impulsions carrées permettent d'optimiser la consommation d'énergie, car la perméabilisation et/ou la dégradation irréversible des cellules ne se produisent qu'à une valeur seuil du champ électrique (De Vito, 2006).

En effet, les impulsions à décroissance exponentielle présentent une longue traîne avec un champ électrique faible, pendant laquelle seule la chaleur est générée dans l'aliment, sans effet bactéricide et/ou perméabilisant. En revanche, l'impulsion carrée maintient une tension de crête plus longtemps que l'impulsion à décroissance exponentielle (De Vito, 2006).

Comme les deux formes d'onde provoquent la dégradation des cellules, les impulsions carrées permettent des économies d'énergie (Figures 2.12 et 2.13) (De Vito, 2006).

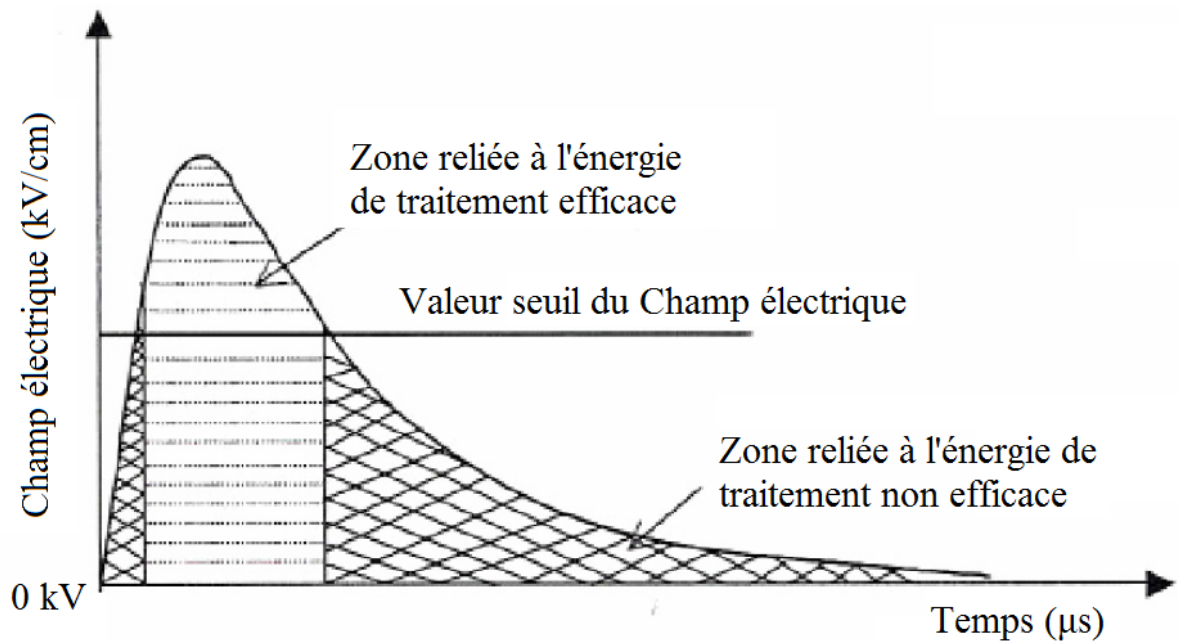


Figure 2.12 : Énergie effective d'une impulsion à décroissance exponentielle du CEP

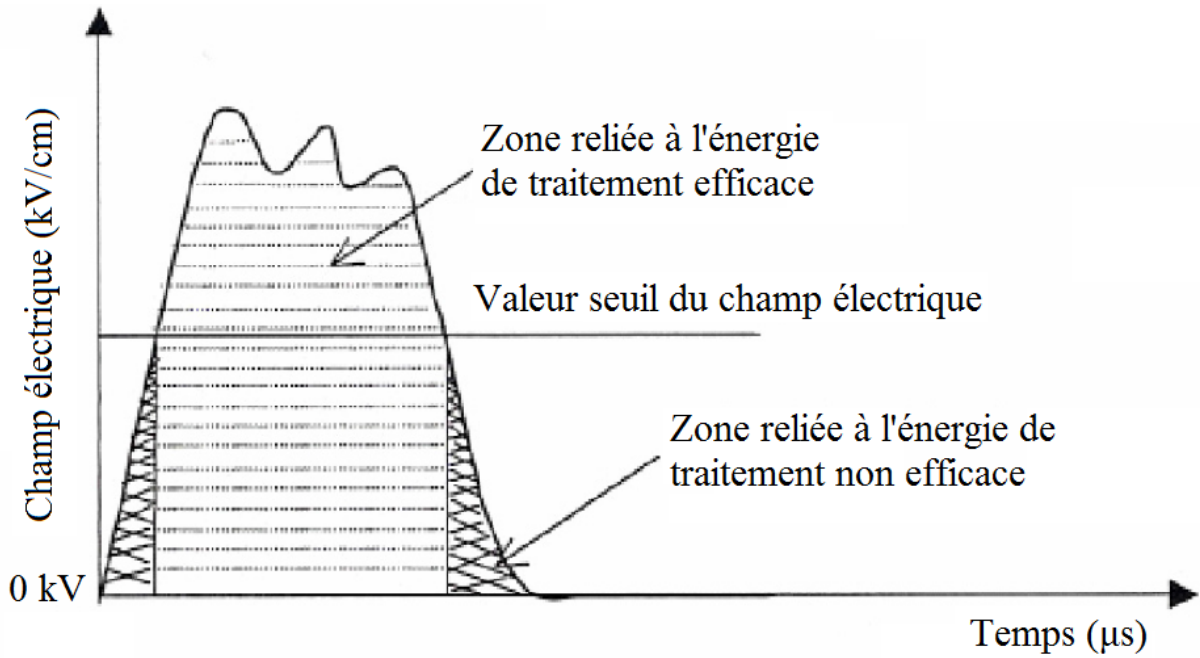


Figure 2.13 : Énergie effective d'une impulsion pseudo-carrée du CEP (De Vito, 2006)

Le plus souvent, l'énergie spécifique ou densité énergétique Q est prise en compte dans la littérature et définie comme suit :

$$Q = \frac{W_p}{v} \quad (2-11)$$

Où : v est le volume de la chambre de traitement.

D'autres chercheurs font référence à l'énergie par unité de masse de l'échantillon Q_m :

$$Q_m = \frac{W_p}{m_f} = \frac{W_p}{\rho_f v_f} \quad (2-12)$$

Où : m_f , ρ_f et v_f sont respectivement la masse, la densité et le volume de l'échantillon alimentaire (De Vito, 2006).

2.7.6 Température des aliments lors du traitement par CEP

L'énergie électrique totale absorbée (W) est libérée dans l'aliment sous forme de chaleur par effet Joule, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'échantillon. Par conséquent, lorsque la durée d'impulsion est élevée, la chambre de traitement doit être équipée d'un système de refroidissement afin de maintenir la température de l'échantillon en dessous d'une valeur acceptable compte tenu des caractéristiques non thermiques du CEP.

L'augmentation maximale de température ΔT après chaque impulsion peut être calculée par un bilan énergétique à condition que toute l'énergie soit fournie à l'échantillon en l'absence de pertes externes (c'est-à-dire qu'aucun refroidissement ne soit fourni) :

$$W_p = m_f C_p \Delta T \quad (2-13)$$

Où : C_p est la chaleur spécifique de l'aliment dans la chambre de traitement.

La mesure de ΔT doit être utilisée pour déterminer l'énergie dissipée dans l'échantillon alimentaire, mais la mesure de ce paramètre n'est pas toujours possible et souvent imprécise. En pratique, l'équation (2-13) est utilisée pour calculer l'augmentation de température de l'échantillon traité. En introduisant la densité énergétique libérée à chaque impulsion Q et le nombre d'impulsions délivrées à l'aliment n , l'augmentation de température est donnée par (Barsotti et al., 1999; De Vito, 2006) :

$$\Delta T = \frac{nQ}{C_p} \quad (2-14)$$

2.7.7 Conductivité

L'énergie spécifique totale est définie comme un paramètre intégré qui implique l'influence du champ électrique, du temps de traitement et de la résistance électrique de la chambre de traitement, qui dépend de ses dimensions et de la conductivité du milieu de traitement. Lorsqu'une impulsion est appliquée, il se produit un effet de chauffage par effet Joule qui augmente sa température et, par conséquent, la conductivité électrique. Cet incrément pourrait modifier la largeur d'impulsion et l'intensité du champ électrique (Miloudi, 2018).

Les paramètres critiques du produit comprennent la conductivité électrique, la densité, la viscosité, le pH et l'activité de l'eau. Des informations sur les propriétés physiques des aliments sur une large plage de température sont nécessaires pour trouver des conditions optimales de traitement de CEP et concevoir des unités de traitement. Le traitement par CEP est le plus efficace pour l'inhibition microbienne des aliments à faible conductivité électrique. L'augmentation de la conductivité électrique d'un milieu de traitement entraîne une diminution de l'inhibition des microorganismes à apport d'énergie constant (Miloudi, 2018).

Une faible conductivité électrique augmente la différence de conductivité électrique entre un milieu et un cytoplasme microbien. Cette différence accrue de conductivité électrique affaiblit la structure membranaire des microorganismes en raison d'un flux accru de substances ioniques à travers la membrane pendant les traitements de CEP. La conductivité électrique la

plus faible a provoqué l'intensité de champ électrique la plus élevée et, par conséquent, a abouti à la plus grande efficacité dans l'inhibition microbienne. La température à l'intérieur des chambres de traitement CEP augmente pendant les traitements. Une faible conductivité électrique des aliments entraîne un petit changement de température pendant le traitement par CEP (Miloudi, 2018).

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, les différents facteurs opérationnels et biologiques du traitement par champ électrique pulsé ont été présentés. Ces facteurs comprennent l'intensité du champ électrique, la forme d'onde d'impulsion, le matériau de l'électrode, la taille de la cellule microbienne, ainsi que la température et la conductivité de la suspension microbienne. Cependant, une meilleure compréhension des effets de la forme d'onde d'impulsion sur le procédé du CEP sera bénéfique et importante pour optimiser les systèmes de traitement par CEP.

Le développement de concepts pour l'évaluation des intensités de traitement et la comparaison de différentes conceptions de chambres de traitement sera nécessaire, sur la base des paramètres clés abordés, afin d'établir des procédures expérimentales standard. La nécessité de déterminer la température dans la chambre de traitement CEP, en plus de la mesure de la température moyenne de sortie, est un élément essentiel d'une bonne pratique expérimentale. L'ajustement et l'optimisation des étapes de traitement associées seront essentiels pour contrôler et maximiser les effets bénéfiques du CEP.

Applications industrielles du champ électrique pulsé

3 Applications industrielles du champ électrique pulsé

3.1 Introduction

Le développement de semi-conducteurs de puissance a amélioré les performances des dispositifs de commutation rapides et de forte puissance. Les progrès du développement de tous les générateurs de puissance pulsée à semi-conducteurs sont passés en revue, en mettant l'accent sur les applications environnementales. Ces dernières années, la recherche et le développement d'applications industrielles pratiques de puissance pulsée répétitive ont été menés à l'aide d'un commutateur à semi-conducteur et d'un commutateur magnétique. De plus, les applications des décharges de puissance pulsée aux domaines environnementaux ont été étudiées. Parmi les exemples, on peut citer la décomposition de gaz nocifs, la production d'ozone, le traitement des proliférations d'algues par plasmas de décharge dans l'eau et le recyclage du béton. Dans ces applications, un fonctionnement répétitif et une longue durée de vie sont également nécessaires pour les générateurs d'énergie pulsée (Akiyama et al., 2007).

3.2 Pasteurisation par CEP

Des recherches ont été menées pour produire des circuits générateurs et des ondes pulsées à haut rendement. La technologie du champ électrique pulsé (CEP) permet de démontrer ce résultat. Le circuit RLC présente un rendement supérieur à celui du circuit RC. Son rendement maximal est compris entre 40 et 50 %, contre seulement 38 % pour le circuit RC. Le schéma de principe qui vise à générer une impulsion haute tension à l'aide d'un transformateur HT et d'un microcontrôleur est illustré à la figure 3.1. Le microcontrôleur IC8535 a été utilisé comme unité de contrôle pour le dispositif du CEP. Ce microcontrôleur permet de réduire le nombre de composants externes et le coût (Putri et al., 2010).

Un microcontrôleur est un contrôleur qui génère une fréquence fixe et une tension d'impulsion constante. Il est également équipé de minuteries. Celles-ci peuvent être configurées pour transmettre le temps de traitement au clavier et limiter les périodes d'activation et de désactivation des composants de commutation. Les impulsions sont générées par le microcontrôleur grâce à la méthode PWM (modulation de largeur d'impulsion). Le microcontrôleur envoie une impulsion d'onde de bloc au composant de commutation.

De cette façon, le dispositif CEP peut être contrôlé et le temps de traitement peut être réglé à l'aide d'un circuit intégré IC8535. Ce temps de traitement est réglable depuis le clavier et

affiché sur un écran LCD (écran à cristaux liquides). Le pilote reçoit l'impulsion produite par le microcontrôleur et est utilisé pour piloter les composants de commutation (Putri et al., 2010).

Ces derniers utilisent un transistor de puissance et un transformateur OT comme commutateurs de connexion entre le transformateur HT et le microcontrôleur, qui sert de régulateur (Putri et al., 2010).

Le transformateur HT est un transformateur élévateur de tension. La tension de sortie du transformateur HT se présente sous la forme d'une impulsion haute tension, qui dépend de l'impulsion de sortie du circuit de commutation. L'impulsion haute tension produite est ensuite connectée à deux électrodes placées dans la chambre de traitement (Putri et al., 2010).

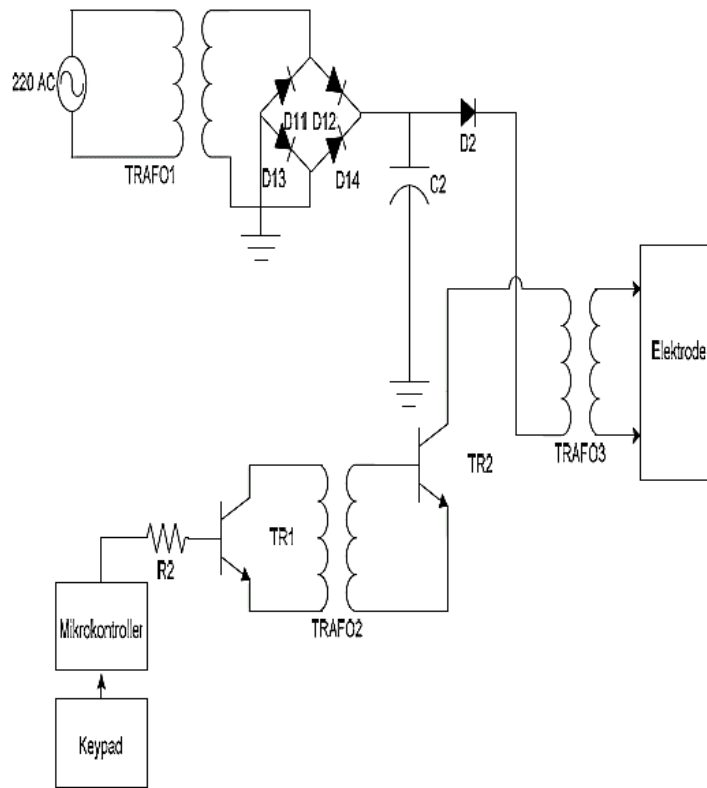


Figure 3.1 : Schéma du générateur d'impulsions haute tension (Putri et al., 2010)

3.3 Traitement de la canne à sucre par CEP

L'effet des impulsions de champ électrique élevé sur la désintégration cellulaire de la canne à sucre a été étudié par Kuldiloke et al. (2008). La canne à sucre a été traitée à différentes intensités de champ (4 à 5 kV) et nombre d'impulsions (10 à 80 impulsions à 4 et 5 kV).

Le rendement en jus ainsi que le transfert de masse de l'échantillon prétraité par CEP ont été mesurés et comparés à ceux de l'échantillon chauffé (20 min, 70 °C) ou non traité. Les résultats

ont montré qu'un traitement par CEP à 4 à 5 kV permettait une désintégration efficace des cellules de canne à sucre (Kuldiloke et al., 2008).

Le transfert de masse des échantillons traités par CEP était comparable à celui de l'échantillon traité thermiquement. Le rendement en jus de l'échantillon après pressage des échantillons prétraités par CEP était supérieur (74,5 % à 5 kV, 20 impulsions) à celui de l'échantillon traité thermiquement (73,2 %) et nettement supérieur à celui de la canne à sucre non traitée (65,5 %). La consommation énergétique pour la désintégration de la canne à sucre par CEP (17 kJ/kg à 5 kV et 20 impulsions) était dix fois inférieure à celle du traitement thermique (171 kJ/kg). De plus, la désintégration cellulaire par CEP était plus rapide (1 min à 0,5 impulsion/s et 30 impulsions) que par désintégration thermique (20 min à 70 °C).

Les spécifications de l'équipement (Figure 3.2) étaient les suivantes : Transformateur haute tension 15 kV, 400 W ; Capacité haute tension 6 kV, 28 μF ; Éclateur haute tension ; Chambre de traitement 375 ml (L x H x l = 15 x 2,5 x 10 cm). La forme d'impulsion utilisée dans cette étude présentait une décroissance exponentielle (Kuldiloke et al., 2008).

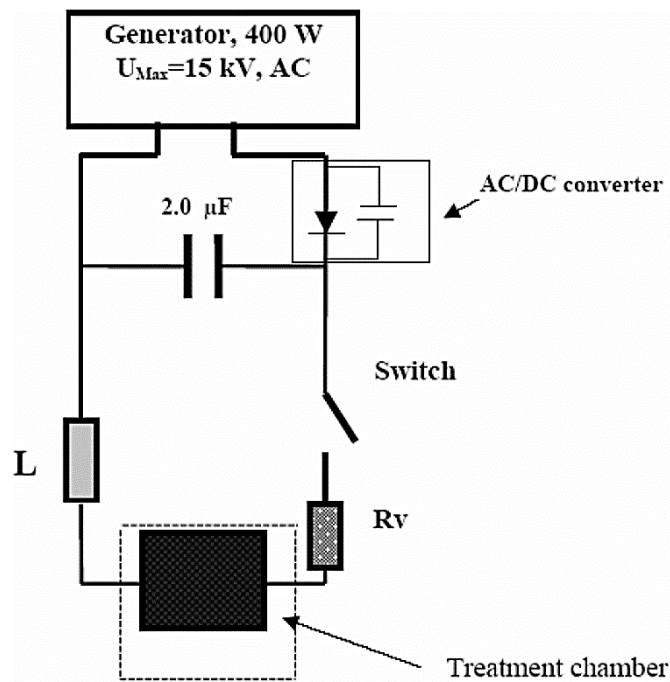


Figure 3.2 : Schéma de principe pour le traitement de la canne à sucre par CEP (Kuldiloke et al., 2008)

3.4 Extraction de jus de luzerne par CEP

Le jus de *luzerne* est reconnu pour ses hautes qualités nutritionnelles, notamment en termes de protéines brutes (15 à 20 %), de vitamines (A, D, E, K, C, B1, B2, B6, B12, niacine, acide

pantothénique, etc.) et de minéraux comme le phosphore, le calcium, le soufre, le magnésium, etc (Gachovska et al., 2006).

Gachovska et al. (2006) avaient pour objectif par cette étude d'évaluer l'effet d'un traitement par champ électrique pulsé (CEP) sur l'extraction de jus de luzerne. Des feuilles de luzerne ont été hachées au boyeur-mélangeur. Des échantillons de 40 g de luzerne hachée ont été traités par CEP en utilisant 200 impulsions à une fréquence de 1 hertz, et ce en deux successions. Chaque traitement de CEP a été suivi d'une application de pression de 2 ou de 4 MPa. La protéine blanche a été séparée de la protéine verte et la teneur en minéraux des diverses composantes des échantillons a été déterminée. Le traitement par CEP a augmenté de 38% l'extraction du jus des feuilles de luzerne en comparaison des échantillons traités par pression seulement. La matière sèche, la teneur en protéines et la teneur en minéraux des échantillons traités par CEP furent significativement ($P < 0.05$) plus élevées que pour les échantillons de luzerne traités par pression seulement. Le traitement de la luzerne par CEP a augmenté l'extraction de la protéine blanche (Gachovska et al., 2006).

Les étapes de pressage (Figure 3.3) et de traitement par champ électrique pulsé (Figure 2.13) ont été réalisées dans la même chambre de traitement. Ce type de configuration devrait être plus adapté à une application industrielle.

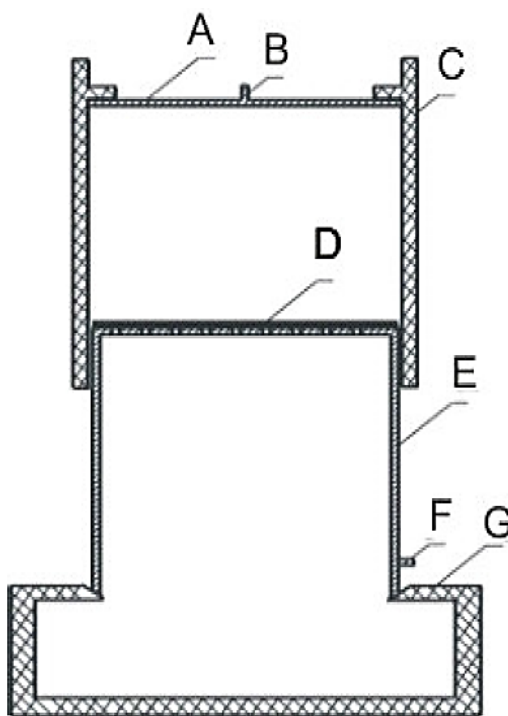


Figure 3.3 : Schéma de la chambre de traitement et de pressage par CEP

Dans la figure 3.3, on note : A - Base du disque en acier inoxydable (électrode supérieure), B - Sortie de connexion électrique sur l'électrode du disque, C - Cylindre en plastique, D - Tamis en acier inoxydable, E - Piston cylindrique perforé en acier inoxydable (électrode inférieure), F - Sortie de connexion électrique sur l'électrode cylindrique, G - Récipient en plastique pour la collecte du jus exprimé. Pendant le pressage, le piston repose sur le récipient à jus (G). Le cylindre en plastique (C) contenant les échantillons est poussé à travers le piston pour extraire le jus.

Le traitement par champ électrique pulsé de la purée de luzerne a été réalisé à l'aide d'un générateur de champ électrique pulsé. Le circuit du générateur est illustré à la figure 3.4. Un autotransformateur variable a été utilisé pour alimenter le circuit. La tension d'entrée a été réglée par l'autotransformateur pour obtenir une fréquence d'impulsion de 1 Hz. La tension a ensuite été transformée par un transformateur haute tension et redressée par une diode haute tension. La résistance servait à limiter le courant traversant la batterie de condensateurs servant à stocker l'énergie. La tension de traitement initiale appliquée à la chambre de traitement dépendait de la distance entre la sphère en acier inoxydable de 15 mm de diamètre et le dispositif de décharge.

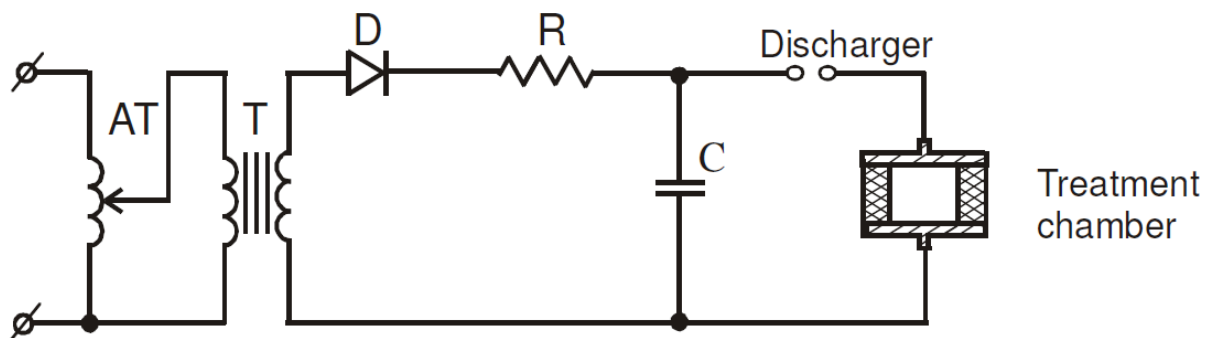


Figure 3.4 : Schéma de circuit électrique du générateur de champ électrique pulsé utilisé pour traiter la purée de luzerne.

Pour le traitement CEP, la première étape de pressage mécanique a été précédée de l'application d'un champ électrique de 200 impulsions avec un condensateur de 1 μF chargé de 6 kV. La distance entre les électrodes de traitement était de 40 mm. Cet écart a été réduit à environ 10 mm après la première étape de pressage. Un traitement par CEP supplémentaire a été appliqué avant la deuxième étape de pressage. Tous les traitements (pressage et PEF) ont été réalisés en 25 minutes (Gachovska et al., 2006).

3.5 Désinfection de l'eau par CEP

Les micro-organismes en suspension dans l'eau peuvent être détruits par l'application de champs électriques de courte durée et de forte intensité. Un dispositif de traitement de l'eau haute tension de 50 Hz a été présenté par Johnstone and Bodger (2001) .

L'alimentation à découpage haute tension est beaucoup plus petite, légère et moins coûteuse à fabriquer que son homologue 50 Hz. La fréquence plus élevée utilisée dans l'alimentation à découpage est électriquement plus stable et les électrodes sont donc beaucoup plus résistantes aux arcs électriques. L'alimentation à découpage ne nécessite pas de piège à air avant les électrodes, alors que cela est essentiel pour le dispositif à 50 Hz. L'absence de zones mortes de faible champ électrique dans l'alimentation à découpage permet de réduire le temps d'exposition, et donc la puissance. La plupart des expériences décrites dans cette étude ont utilisé un temps d'exposition de 1,3 ms, tandis que le traitement à 50 Hz utilise 17 ms. Cette réduction de 92 % du temps d'exposition équivaut à une réduction de 92 % de l'énergie consommée par unité de volume d'eau. La réduction de l'énergie nécessaire au traitement de l'eau peut contribuer à réduire les coûts d'exploitation, mais aussi permettre de traiter une eau à conductivité plus élevée.

Une alimentation à découpage haute tension (SMPS) a été construite, fournissant une valeur efficace maximale de 3 kV CC haché à 17 kHz (Figure 3.5).

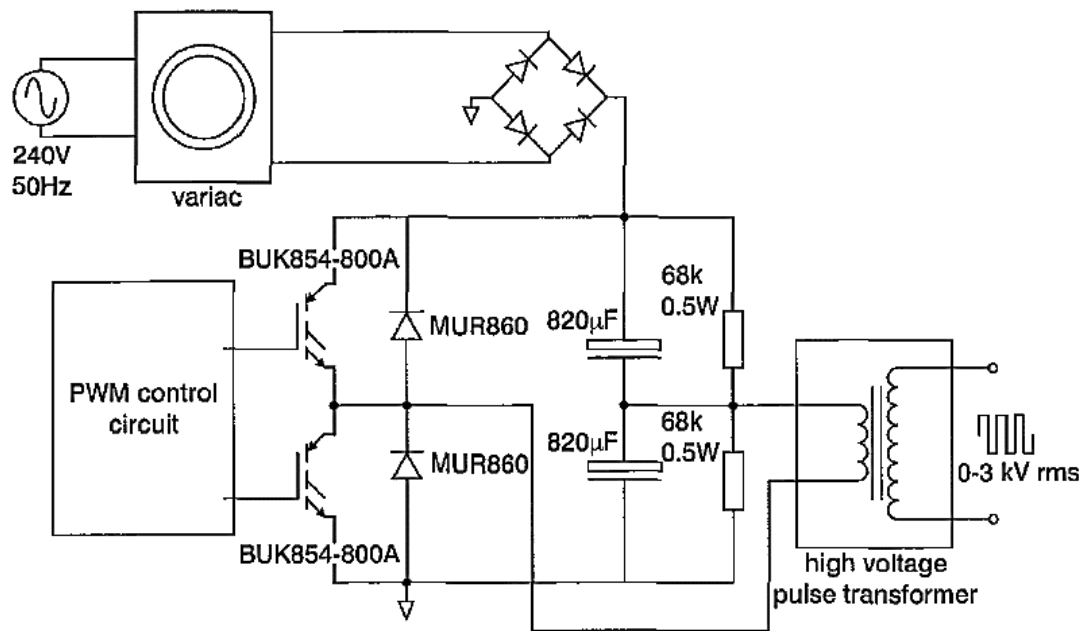


Figure 3.5 : Alimentation à découpage haute tension (Johnstone & Bodger, 2001)

Un variac a été utilisé pour fournir une entrée variable monophasée à 50 Hz (0-230V). L'alimentation à découpage redresse la tension d'entrée pour fournir un bus CC de 0-320 V. Deux commutateurs IGBT (BUK854-800A) fonctionnant en demi-pont hachent le bus CC. L'onde hachée de 17 kHz qui en résulte est transmise à un transformateur d'impulsions élévateur pour multiplier son amplitude par 9,4. L'onde hachée de 0 à 3 kV est appliquée directement à la chambre d'électrode. La puissance nominale de l'alimentation à découpage est de 400 VA.

Une chambre d'électrode a été construite à partir d'une barre d'acier inoxydable de 5 mm. Ces électrodes ont été insérées dans une pièce usinée en plastique acétal, avec un trou de 5 mm de diamètre percé perpendiculairement à l'axe de l'électrode. Les surfaces des électrodes ont été polies et les bords légèrement ébavurés afin de réduire les irrégularités susceptibles de provoquer des contraintes de champ électrique élevées.

Les suspensions bactériennes ont été ajoutées à 1,2 litre d'eau déionisée et forcée à travers la chambre d'électrodes par une petite pompe submersible (Figure 3.6). Une vanne réglable en ligne permettait de faire varier le débit. Des échantillons traités et non traités ont été prélevés immédiatement à la sortie de la chambre d'électrodes. Pour chaque échantillon, l'intensité du champ électrique et le débit ont été ajustés à la valeur correcte (Johnstone & Bodger, 2001).

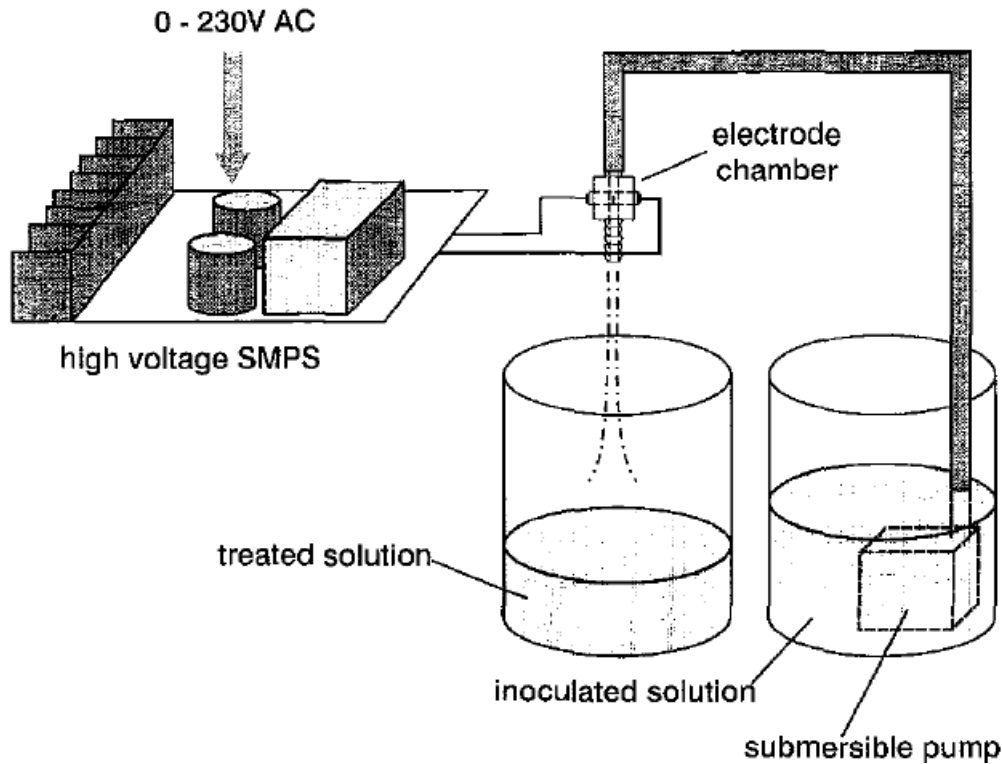


Figure 3.6 : Schéma du banc expérimental (Johnstone & Bodger, 2001)

3.6 Inhibition microbienne et enzymatique par CEP

Le traitement par CEP améliore significativement la sécurité microbiologique et la stabilité des aliments, tout en réduisant les altérations de leurs propriétés nutritionnelles et sensorielles. Des systèmes de traitement par CEP sont disponibles pour la production commerciale d'aliments traités. Le champ électrique pulsé a également été étudié comme méthode d'amélioration de l'efficacité de l'extraction du contenu cellulaire des matières végétales (Min et al., 2007).

La figure 3.7 illustre les schémas de circuit d'un générateur d'impulsions à l'échelle de laboratoire, d'une usine pilote et d'un générateur d'impulsions à l'échelle commerciale respectivement. Le système CEP à l'échelle du laboratoire et un modèle ultérieur de systèmes CEP à l'échelle de l'usine pilote étaient basés sur une conception brevetée (Zhang, QIN, et al., 1995) utilisant des commutateurs à pont en H à semi-conducteurs couplés à un transformateur d'impulsions de sortie. La tension nominale des systèmes de laboratoire est de 15 kV et celle des systèmes pilotes de 35 kV, tous deux avec une forme d'impulsion carrée bipolaire (Min et al., 2007).

Les facteurs déterminant l'efficacité de l'inhibition microbienne par le CEP peuvent être classés en paramètres de traitement, paramètres du produit et caractéristiques microbiennes.

- 1) Paramètres de traitement : Les principaux paramètres de traitement qui influencent l'inhibition microbienne par le CEP sont l'intensité du champ électrique, la durée du traitement par CEP, la largeur et la forme de l'impulsion et la température de traitement. En général, plus l'intensité de chacun de ces paramètres augmente, plus l'inhibition microbienne par le CEP augmente. Une relation log-linéaire entre l'intensité du champ électrique et l'inhibition d'*Escherichia coli* a été rapportée. À intensité de champ électrique constante, le taux d'inhibition microbienne par le CEP augmente avec la durée du traitement par CEP.
- 2) Paramètres du produit : Les paramètres critiques du produit comprennent la conductivité électrique, la densité, la viscosité, le pH et l'activité de l'eau. Des informations sur les propriétés physiques des aliments sur une large plage de températures sont nécessaires pour trouver les conditions optimales et concevoir des unités de traitement par CEP.
- 3) Caractéristiques microbiennes : Les bactéries sont généralement plus résistantes au CEP que les levures (Min et al., 2007).

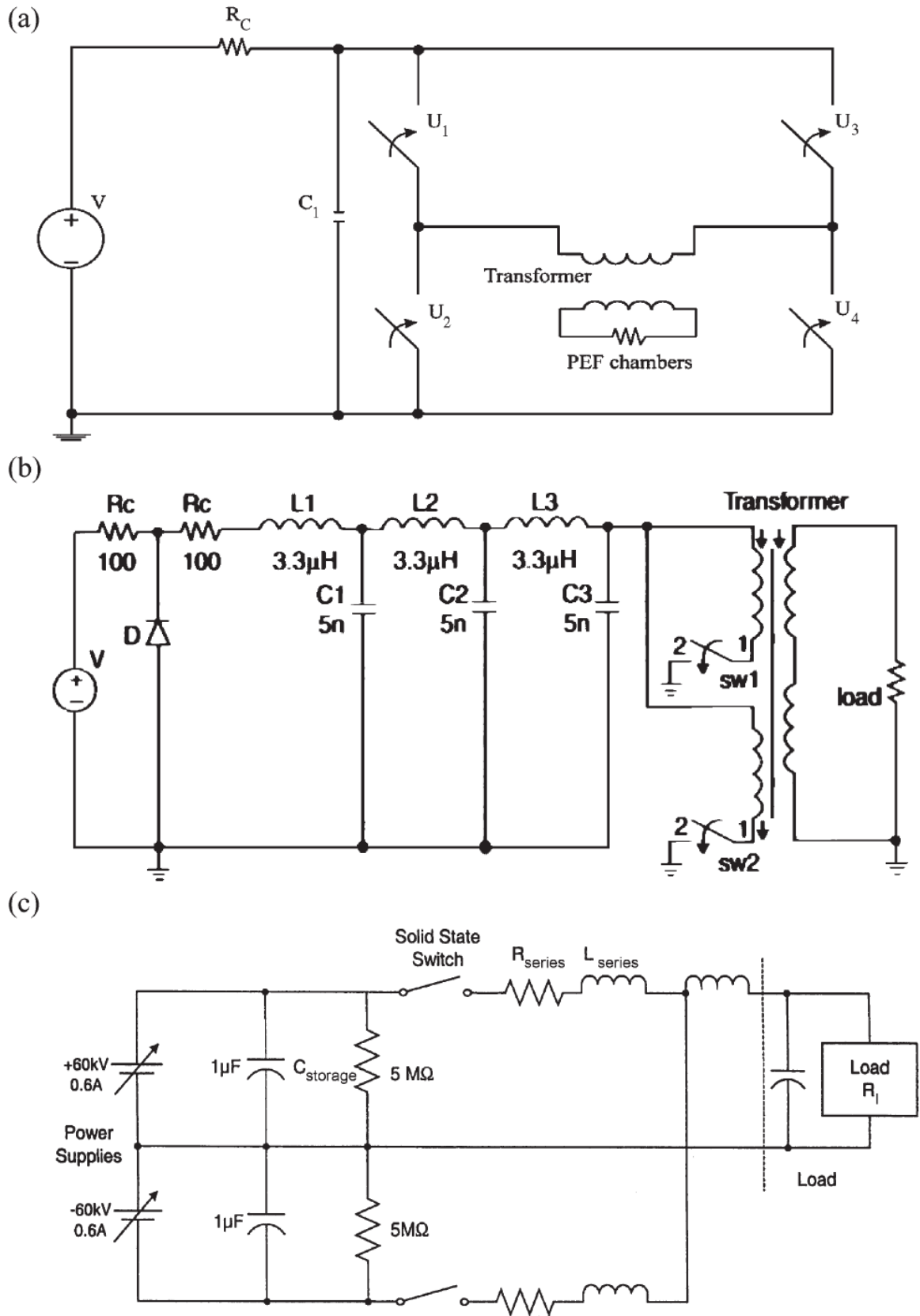


Figure 3.7 : Schémas de circuits pour (a) un générateur d'impulsions à l'échelle de laboratoire, (b) un générateur d'impulsions à l'échelle d'une usine pilote et (c) un générateur d'impulsions à l'échelle commerciale. R , C , U et L représentent respectivement une résistance, un condensateur, un commutateur et une inductance (Min et al., 2007).

Le générateur d'impulsions à l'échelle commerciale a fourni des impulsions carrées bipolaires avec une tension de crête maximale de ± 60 kV et un courant de crête maximal de 600 A dans plusieurs chambres de traitement pendant le traitement par CEP.

Les alimentations de 60 kV chargeaient des condensateurs de stockage partiellement déchargés par une série de commutateurs à semi-conducteurs pour former des impulsions bipolaires carrées. La fréquence de répétition maximale du générateur d'impulsions était de 2 000 pps (1PPS : 1 pulse par seconde (le plus courant)) (Min et al., 2007).

3.7 Extraction de polyphénols par CEP

Le marc de raisin est un sous-produit et résidu solide obtenu lors de la fabrication du jus de raisin., composé de pellicules, de pépins et de rafles de raisin. Il contient des quantités importantes de composés bioactifs, riche en fibres alimentaires, en polyphénols, offre des perspectives de valorisation dans divers secteurs, notamment l'agroalimentaire, la cosmétique et la pharmacie (Kurcubić et al., 2024; Lopes et al., 2025).

La combinaison de la densification et du traitement CEP a été appliquée à du marc de raisin à faible humidité relative, sans ajout de liquide conducteur. Les paramètres optimaux du traitement CEP (intensité du champ $E = 1,2 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$; apport énergétique $W = 18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; masse volumique $\rho = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) ont augmenté la teneur en polyphénols totaux, quelle que soit la température d'extraction. Les résultats ont montré la nature sélective du traitement par CEP dans l'extraction des anthocyanes et ouvrent ainsi de nouvelles perspectives pour la production d'extraits de compositions biochimiques variées.

La concentration en composés phénoliques totaux obtenue après traitement par CEP a montré que cette technique est pertinente pour une utilisation industrielle, car elle permet de réduire la quantité de solvant et le temps d'extraction.

Pour estimer l'indice de perméabilisation cellulaire Z, un échantillon de marc de raisin réassemblé ($150 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$) a été placé dans une chambre de traitement. Cette chambre est un récipient en polypropylène dans lequel sont insérées deux électrodes en acier inoxydable, espacées de 1,25 cm. La cellule de traitement CEP a été placée sous un analyseur de texture (modèles TA-XT Plus et TA-HDi, Stable Microsystems, Surrey, Royaume-Uni) afin de surveiller les paramètres de compression du marc de raisin.

Différentes pressions, comprises entre 0 et 10 bars, ont été appliquées au marc de raisin afin d'évaluer l'effet de la densité ρ , comprise entre $0,6$ et $1,3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, sur l'efficacité du CEP.

Les électrodes ont été connectées au générateur CEP (Hazemeyer, Saint-Quentin, France) capable de délivrer une tension maximale de 5 kV sous un courant de 1 kA, produisant des impulsions unipolaires de forme rectangulaire (Figure 3.8). Une série de N trains d'impulsions a été appliquée jusqu'à l'obtention de l'énergie souhaitée. Chaque série comprenait n impulsions de durée t_i et d'intervalle de temps Δt entre le début de deux impulsions consécutives. Les valeurs des paramètres suivantes ont été utilisées dans les expériences CEP : $E = 0\text{--}3 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, $n = 200\text{--}2000$, $N = 20\text{--}200$, $t_i = 100 \pm 1 \text{ }\mu\text{s}$, $\Delta t_i = 100 \text{ ms}$.

Les données expérimentales (courant (I), tension (U), t_i , Δt_i , n) ont été collectées à l'aide d'un enregistreur de données (Nemo, IME Messgeräte GmbH, Allemagne) et d'un logiciel (Agilent VEE Pro, Agilent Technologies).

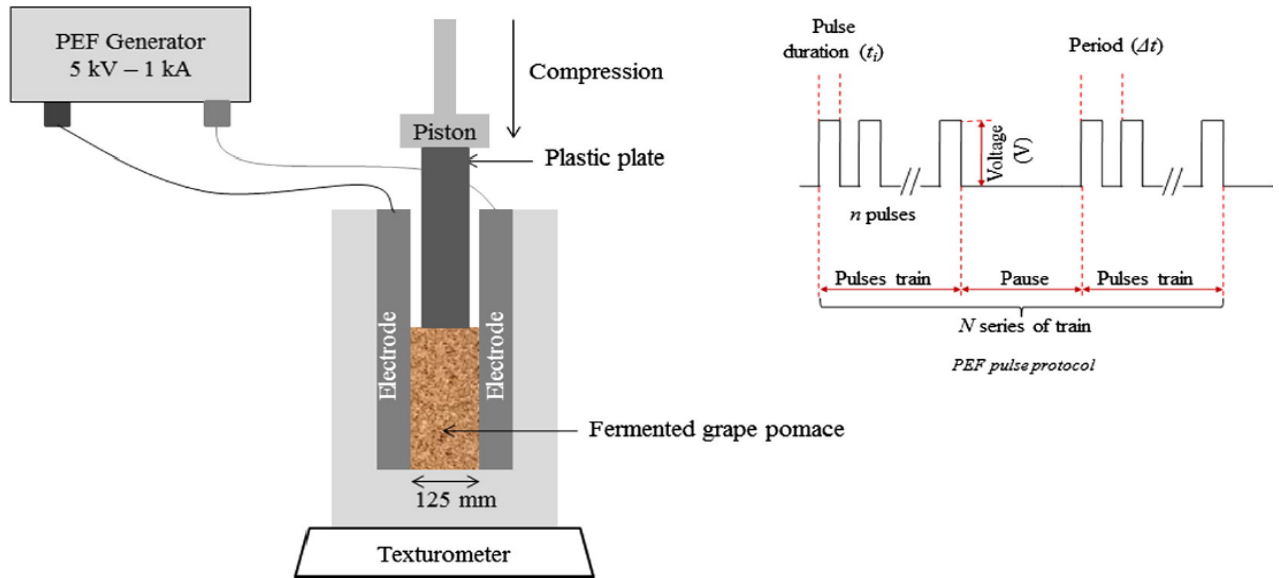


Figure 3.8 : Dispositif expérimental du CEP pour le traitement du marc de raisin (Brianceau et al., 2015)

La consommation d'énergie électrique (W , $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) du traitement par CEP a été calculée comme suit :

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n U \cdot I_i \cdot t_i}{m} \quad (3-1)$$

Où : U est la tension CEP (V), I est l'intensité du courant (A), t_i est la durée de l'impulsion (s) et m est la masse de matière première humide (kg) (Brianceau et al., 2015).

La température a été mesurée à l'aide d'un thermocouple revêtu de Téflon (Thermocoax, Suresnes, France) inséré dans l'échantillon (précision de mesure $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$).

L'augmentation de température était inférieure à 3 °C après le traitement par CEP. La conductivité a été mesurée lors de deux séries d'impulsions consécutives avec un LCR-mètre U1733C (Agilent Technologies) à une fréquence de 1 kHz. Le degré de lésion tissulaire a été estimé à partir de l'indice de perméabilisation Z basé sur la conductivité électrique :

$$Z = \frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_d - \sigma_u} \quad (3-2)$$

Où : σ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) est la conductivité électrique mesurée périodiquement de l'échantillon, et les indices « u » et « d » désignent respectivement les conductivités électriques des échantillons non traités et complètement endommagés. La valeur de σ_d a été estimée à partir des mesures de conductivité électrique des tissus endommagés par un traitement par CEP à $E = 3,0 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, appliqué de manière répétée jusqu'à obtention d'une conductivité constante de l'échantillon (Brianceau et al., 2015).

3.8 Extraction de pigments et colorants alimentaires

Les colorants sont largement utilisés dans la fabrication des aliments et des boissons. Face à la demande croissante des consommateurs pour des produits naturels, le marché alimentaire mondial remplace les colorants artificiels par des alternatives naturelles. Cependant, ces substituts posent encore problème en raison de leur coût de production élevé et de leur faible stabilité chimique et physique. De plus, les pigments naturels sont très sensibles aux procédés d'extraction conventionnels, tels que les contraintes thermiques, mécaniques et chimiques (Bocker & Silva, 2022).

À cet égard, la technologie du champ électrique pulsé (CEP) s'est imposée comme une alternative non thermique prometteuse pour la récupération et la production de colorants naturels à partir de matrices alimentaires. Son mécanisme d'action sur les structures cellulaires par électroporation constitue une solution intelligente pour surmonter les difficultés liées à la production de colorants naturels. Dans ce contexte, ce travail présente l'extraction assistée par CEP de pigments et colorants naturels, tels que les anthocyanes (rouge-bleu-violet), les bétalaïnes (rouge), les caroténoïdes (jaune-orange-rouge) et les chlorophylles (vert) d'origine végétale (Bocker & Silva, 2022).

L'équipement utilisé pour le traitement par CEP comprend un générateur d'impulsion haute tension, une chambre de traitement, un serpentin de refroidissement (non commun à tous les équipements) et un système de contrôle et de surveillance externe. La figure 3.9 présente les composants de base du système du CEP. Les traitements consistent à appliquer sur la matrice

alimentaire des impulsions énergétiques répétitives, allant de 20 à 80 kV/cm (haute intensité) ou de 0,1 à 0,3 kV/cm (faible intensité), pendant une courte durée (Bocker & Silva, 2022).

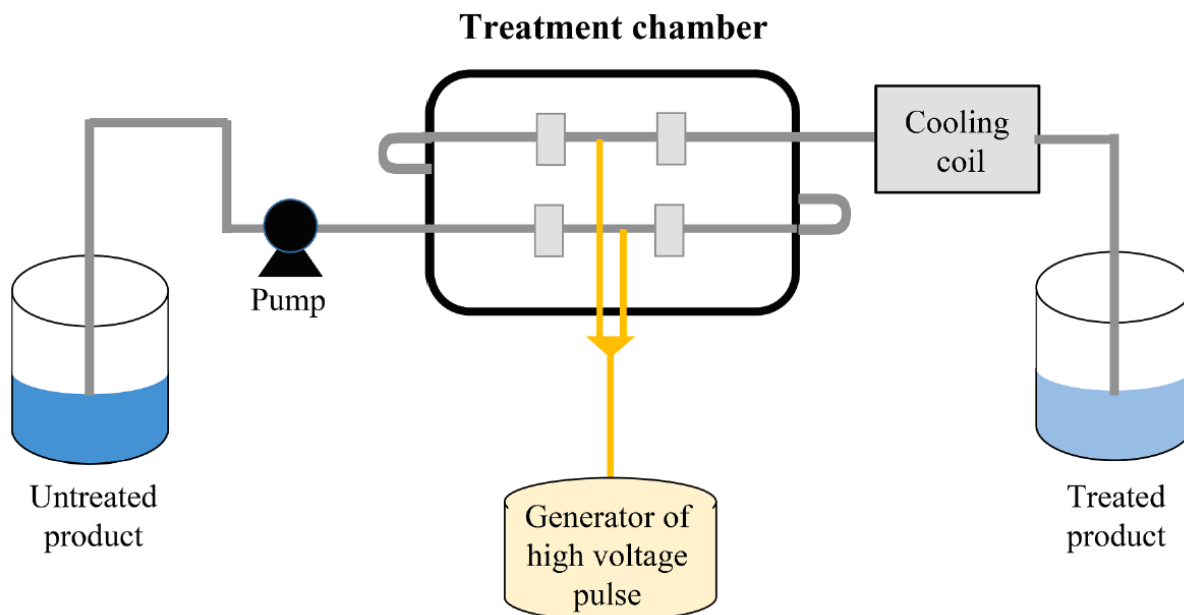


Figure 3.9 : Composants de base du système de champ électrique pulsé (Bocker & Silva, 2022)

L'intégration de techniques d'extraction permet de réduire l'énergie nécessaire à l'extraction des pigments naturels. Des conditions d'extraction à faible énergie permettent de mieux préserver les pigments sensibles à la chaleur, au pH et à la lumière. La technologie du CEP augmente le transfert de masse des pigments par électroporation, évitant ainsi leur dégradation thermique. Le procédé assisté par CEP offre un rendement d'extraction plus élevé et une meilleure efficacité énergétique, avec des temps d'extraction plus courts, une quantité de solvant plus faible et des températures plus basses (Bocker & Silva, 2022).

3.9 Extraction des composés phytochimiques

Les différentes parties d'une plante (graines, fruits, fleurs, feuilles, tiges et racines) contiennent de nombreux composés biologiquement actifs appelés « phytoconstituants », composés de composés phénoliques, de minéraux, d'acides aminés et de vitamines. Les techniques conventionnelles d'extraction de ces phytoconstituants présentent plusieurs inconvénients, notamment de faibles performances, de faibles rendements, une utilisation accrue de solvants, des temps de traitement longs et des sous-produits dégradables thermiquement. En revanche, les technologies d'extraction non thermiques modernes et avancées, telles que le champ électrique pulsé (CEP), facilitent et optimisent l'identification, la

caractérisation et l'analyse des ingrédients bioactifs. Parmi les autres avantages du CEP, on peut citer sa rentabilité, sa réduction du temps d'utilisation et de la consommation de solvants, ainsi que l'amélioration des rendements. Cette étude porte sur les applications du CEP pour l'obtention de composants bioactifs, d'huiles essentielles, de protéines, de pectine et d'autres substances importantes à partir de diverses parties de la plante. De nombreuses études compilées dans le cadre de la présente évaluation ont conclu que le CEP constituait la meilleure solution pour extraire les phytoconstituants utilisés dans les industries agroalimentaire et pharmaceutique. L'extraction assistée par CEP permet d'obtenir un rendement plus élevé, d'utiliser moins de solvants et d'énergie, et de gagner beaucoup de temps par rapport aux méthodes d'extraction traditionnelles. La conception de l'extraction PEF doit être suffisamment sûre et efficace pour prévenir la dégradation des composés phytochimiques et des huiles.

Ces dernières années, l'extraction continue par CEP a été appliquée avec succès en laboratoire pour obtenir des arêtes de poisson, du jus de brocoli, des coquilles d'œufs, du jus de tomate, etc. Cette technologie a été appliquée dans l'industrie jusqu'à présent. La figure 3.10 illustre le système d'extraction continue par CEP (Ranjha et al., 2021).

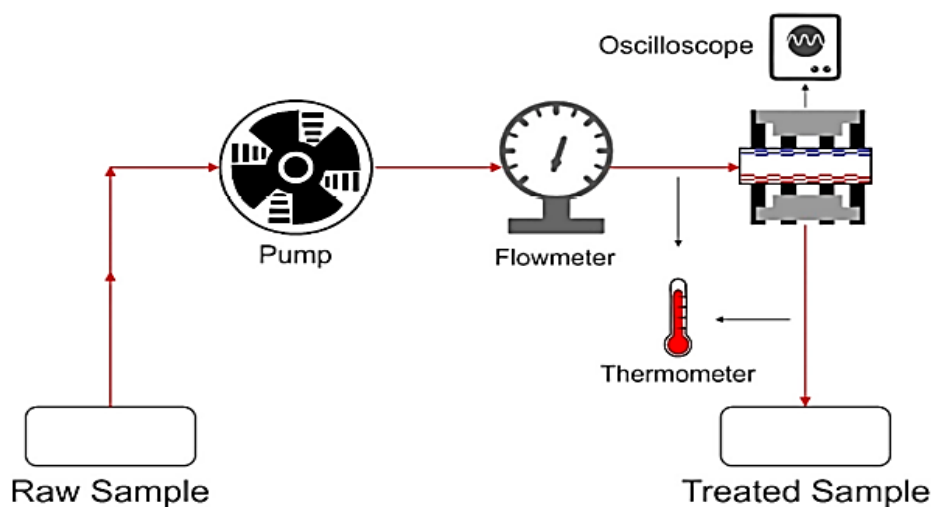


Figure 3.10 : Système d'extraction continue par champ électrique pulsé (Ranjha et al., 2021)

Un système d'extraction continue par CEP typique comprend un générateur d'impulsions haute tension, une chambre de traitement, un système de manutention de produit adapté et divers équipements de surveillance et de contrôle. L'oscilloscope peut lire directement la tension de sortie (jusqu'à 40 kV de tension d'impulsion) et la fréquence est réglable (40-3000 Hz). Pendant l'extraction continue par CEP, le mélange de solvants est pompé dans la chambre de traitement par une pompe péristaltique à vitesse constante. Le serpentin de refroidissement est maintenu à une température de 25 °C dans un bain-marie contrôlé par un thermostat pendant

l'extraction. Les chambres de traitement coaxiales sont actuellement largement utilisées en raison de leur simplicité de configuration (Ranjha et al., 2021).

À l'échelle industrielle, la technologie d'extraction continue par CEP a montré des résultats prometteurs concernant le taux d'extraction des phytoconstituants. L'efficacité du système d'extraction par CEP dépend non seulement des paramètres de traitement, mais aussi de la nature du solvant et de la composition de l'échantillon. Les propriétés physicochimiques recherchées comprennent la taille, la forme, le pH, la conductivité, etc. Cependant, la taille et la position du composant extrait dans le cytoplasme cellulaire ou les vacuoles sont également des facteurs importants. Il est important de noter que le CEP a permis d'obtenir des rendements potentiels pour des éléments très recherchés, tels que des enzymes, des pigments et des nutriments provenant de micro-organismes tels que les bactéries, les levures et les algues (Ranjha et al., 2021).

3.10 Émulsion dans un champ électrique pulsé bidirectionnel

L'agrégation de gouttelettes d'huile dans une émulsion huile-eau (H/E) par champ électrique pulsé est une nouvelle tentative d'amélioration de la séparation huile-eau. Le comportement d'enchaînement et d'agrégation des gouttelettes d'huile dans une émulsion H/E sous champ électrique pulsé bidirectionnel (CEPB) a été étudié afin de séparer pour la première fois les gouttelettes d'huile de la phase aqueuse. Le CEPB a induit l'agrégation des gouttelettes d'huile et leur formation en trois formes d'agrégats : chaîne de gouttelettes d'huile, amas d'huile et chaînes d'amas d'huile. L'effet d'agrégation des gouttelettes d'huile sous tension, fréquence et rapport cyclique du CEPB a été exploré en évaluant la taille et le temps de formation des amas. Il a été découvert que la tension du CEPB pouvait accélérer l'agrégation des gouttelettes d'huile, mais que cet effet était atténué par l'augmentation de la fréquence du CEPB. Le meilleur état d'agrégation des gouttelettes d'huile sous différents rapports cycliques a été obtenu avec un rapport cyclique de 70 %. Par conséquent, l'effet d'agrégation microcosmique des gouttes d'huile dans une émulsion H/E sous CEPB pourrait être utilisé pour estimer les performances de désémulsification et l'effet de séparation de l'émulsion H/E (Ren & Kang, 2019).

Le schéma du dispositif expérimental est présenté par la figure 3.11. Le dispositif expérimental comprend une cuve d'émulsion H/E (a) équipée d'un agitateur (b), une seringue en verre (c), une cellule carrée en plexiglas ($40 \times 40 \times 10$ mm, épaisseur de paroi : 1 mm) (d) avec deux mini-électrodes en titane (38×12 mm, épaisseur : 1 mm) (e), une caméra CCD haute vitesse (f) connectée à un système d'analyse d'images microscopique (g), une alimentation

pulsée (h), une pompe d'influx (i), un récipient rectangulaire en plexiglas ($65 \times 30 \times 110$ mm, épaisseur : 1 mm) (k) avec deux plaques d'électrodes en titane (90×25 mm, épaisseur : 1 mm) (j), une règle (l) et un réservoir de récupération d'eau (m).

L'émulsion contenue dans la cuve d'émulsion H/E (a) est maintenue homogène par agitation. Avant les expériences, les deux mini-électrodes en titane (e) ont été insérées dans les fentes de la cellule carrée en Perspex (d) à une distance de 30 mm. De la même manière, les deux plaques d'électrodes en titane (j) ont été insérées dans les fentes du récipient rectangulaire en Perspex (k) à une distance constante de 60 mm.

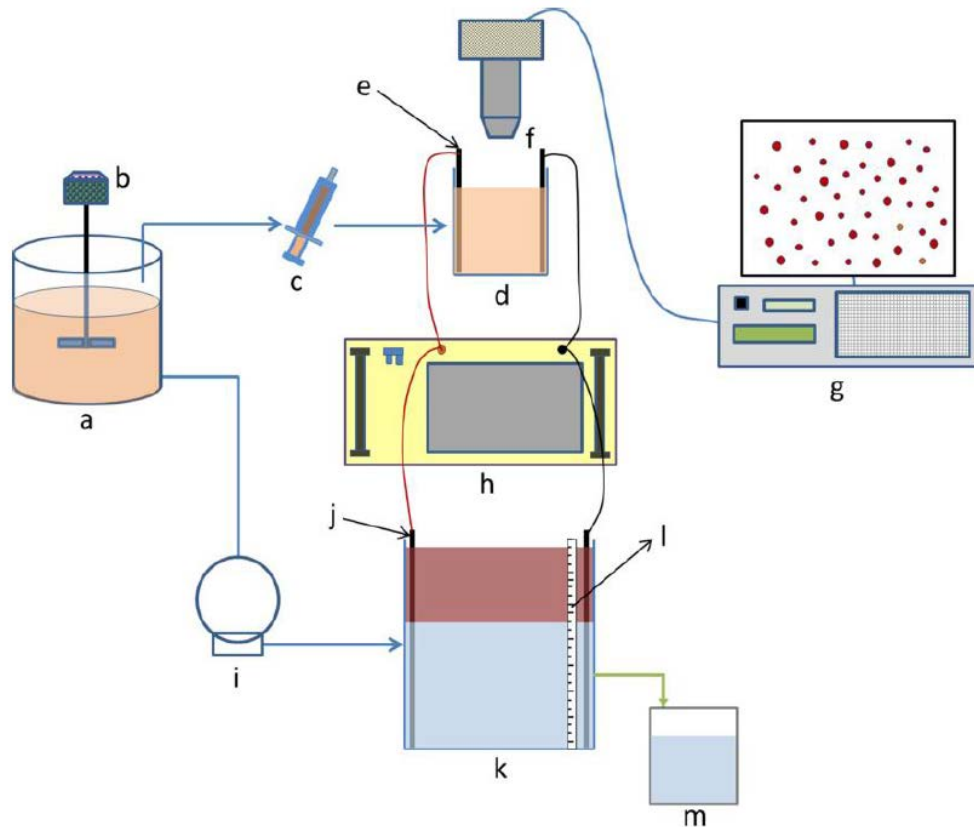


Figure 3.11 : Schéma du dispositif expérimental : cuve d'émulsion H/E (a), agitateur (b), seringue en verre (c), cellule carrée en Perspex (d), paire de mini-électrodes en titane (e), caméra CCD haute vitesse (f), système d'analyse d'images du microscope (g), alimentation pulsée (h), pompe d'entrée (i), paire de plaques d'électrodes en titane (j), récipient rectangulaire en Perspex (k), règle (l) et réservoir de collecte d'eau (m) (Ren & Kang, 2019).

Deux groupes d'expériences ont été menés pour explorer le comportement d'agrégation des gouttelettes d'huile et les performances de désémulsification de l'émulsion H/E dans l'étude, respectivement. Pour les expériences sur le comportement d'agrégation des gouttelettes d'huile dans l'émulsion H/E, la caméra CCD haute vitesse (f) a d'abord été fixée directement au-dessus

de la cellule rectangulaire en Perspex (d) et connectée au système d'analyse d'images du microscope (g). La mise au point du microscope est restée inchangée pendant les expériences.

Ainsi, le comportement des gouttelettes d'huile à la même profondeur dans la cellule rectangulaire en Perspex a été mesuré dans chaque expérience. Ensuite, les deux mini-électrodes en titane (e), dont la feuille de gauche servait d'anode et la feuille de droite de cathode, ont été connectées aux bornes de sortie de l'alimentation électrique (h) par des fils de cuivre. Ensuite, 3 ml d'émulsion H/E ont été prélevés à partir de l'émulsion initiale, maintenue stable et uniforme. L'émulsion a été injectée au centre de la cellule rectangulaire en Perspex (d) à l'aide d'une seringue en verre (c) (Ren & Kang, 2019).

Il n'y a pas eu de mélange supplémentaire de la solution après l'injection dans la cellule. L'émulsion initiale est restée stable et uniforme et peut être conservée pendant deux semaines. La durée du CEPB n'était que de 2 heures par expérience. Par conséquent, la solution après injection dans la cellule rectangulaire en Perspex est restée stable et uniforme pendant l'effet du CEPB. Ensuite, l'alimentation pulsée (h) a été activée et les valeurs de tension, de fréquence et de rapport cyclique ont été définies. La caméra CCD haute vitesse (f) et le système d'analyse d'images du microscope (g) ont ensuite commencé à filmer le mouvement des gouttelettes d'huile dans l'émulsion (Ren & Kang, 2019).

La mesure du comportement d'agrégation des gouttelettes d'huile a été réalisée en focalisant les gouttelettes d'huile sur une couche fixe à l'intérieur de l'émulsion dans la cellule à l'aide du microscope. L'émulsion initiale étant maintenue stable et uniforme par agitation, l'émulsion dans la cellule était également stable et uniforme. Les gouttelettes d'huile à différentes profondeurs de l'émulsion dans la cellule, y compris à la surface, étaient réparties uniformément et observées au microscope. Par conséquent, le comportement des gouttelettes d'huile dans les différentes couches de l'émulsion dans la cellule était identique sous CEP. Les gouttelettes d'huile dans la couche fixe à l'intérieur de l'émulsion peuvent représenter le volume total de la cellule (Ren & Kang, 2019).

Dans les expériences de désémulsification de l'émulsion H/E, la plaque d'électrode en titane de gauche (anode) et la plaque de droite (cathode) (j) ont été connectées respectivement aux sorties positive et négative de l'alimentation pulsée (h) par des fils de cuivre. Ensuite, 150 ml d'émulsion H/E ont été pompés dans le récipient rectangulaire en Perspex (k) par la pompe d'entrée (i). Pendant la désémulsification de l'émulsion H/E, l'épaisseur de la couche d'eau d'encrage a été mesurée à l'aide de la règle (l) fixée sur la surface extérieure du récipient rectangulaire en Perspex (k). Ensuite, le liquide clair après traitement au fond du récipient

rectangulaire en Perspex a été déversé dans le réservoir de collecte d'eau (m) pour mesurer la turbidité. Chaque expérience de désémulsification a duré 2 h (Ren & Kang, 2019).

Le CEPB pouvait induire l'enchaînement et l'agrégation des gouttelettes d'huile dans l'émulsion H/E, ce qui faisait passer les gouttelettes d'une dispersion aléatoire et uniforme à une disposition ordonnée. Lors de l'action du CEPB, les gouttelettes d'huile s'agglutinaient et prenaient trois formes d'agrégats : chaîne de gouttelettes d'huile, amas d'huile et chaînes d'amas d'huile. Trois stades distincts d'agrégation par interaction goutte-goutte ont été observés et résumés : formation de chaîne de gouttelettes d'huile, formation d'amas d'huile et formation de chaîne d'amas d'huile (Ren & Kang, 2019).

Les paramètres CEPB optimaux pour la désémulsification de l'émulsion H/E sont : une tension CEPB de 1 000 V, une fréquence de 25 Hz et un rapport cyclique de 70 % dans les conditions expérimentales (Ren & Kang, 2019).

3.11 Extraction de l'huile de sésame par CEP

Le sésame (*Sesamum indicum* L.) en raison de sa teneur élevée et de l'excellente qualité de son huile a été proposé comme une source importante de nutrition humaine. L'objectif de l'étude est d'évaluer l'effet de l'application d'un traitement par champ électrique pulsé (CEP) à différentes intensités (1-2 kV/cm) et nombre d'impulsions (10, 30 et 50) avant l'extraction par pression à froid. Le rendement maximal d'extraction d'huile (40,03 %) a été observé à 2 kV/cm et 50 impulsions. En augmentant l'intensité du champ de 1 à 2 kV/cm et le nombre d'impulsions (10, 30 et 50), la stabilité à l'oxydation et l'indice de peroxyde des huiles prétraitées avec CEP ont été améliorés. Aucun effet significatif du CEP n'a été étudié pour les échantillons prétraités et non traités. Ainsi, la combinaison du champ électrique et de l'extraction par pression à froid peut être utilisée comme une méthode pratique pour préserver la composition de l'huile de sésame brute du rancissement et pour prolonger la durée de conservation de ce produit.

À des fins de comparaison, six traitements CEP ont été appliqués aux graines de sésame avant la séparation de l'huile. Les prétraitements ont été réalisés avec différentes intensités de champ : 1 kV/cm et 10, 30 et 50 impulsions et 2 kV/cm et 10, 30 et 50 impulsions. L'échantillon non traité a servi d'échantillon témoin (Tale Masouleh et al., 2015).

La figure 3.12 présente le schéma de production des prétraitements électriques et de l'échantillon non traité (témoin). Pour le prétraitement CEP, Un système à champ électrique pulsé est équipé d'une alimentation électrique, d'une chambre de traitement composée de deux plaques parallèles en acier inoxydable espacées de 4 cm et d'un interrupteur de décharge. Pour

chaque échantillon, 1 400 g de graines ont été immergées dans 1 400 g d'eau distillée en chambre et prétraitées à différentes intensités (1 et 2 kV/cm) et selon différents nombres d'impulsions (10, 30 et 50). En raison de l'influence de la teneur en humidité des échantillons sur l'efficacité du pressage, les graines (graines prétraitées et échantillon témoin) ont été séchées à l'étuve (50 °C) pendant 35 minutes (Tale Masouleh et al., 2015).

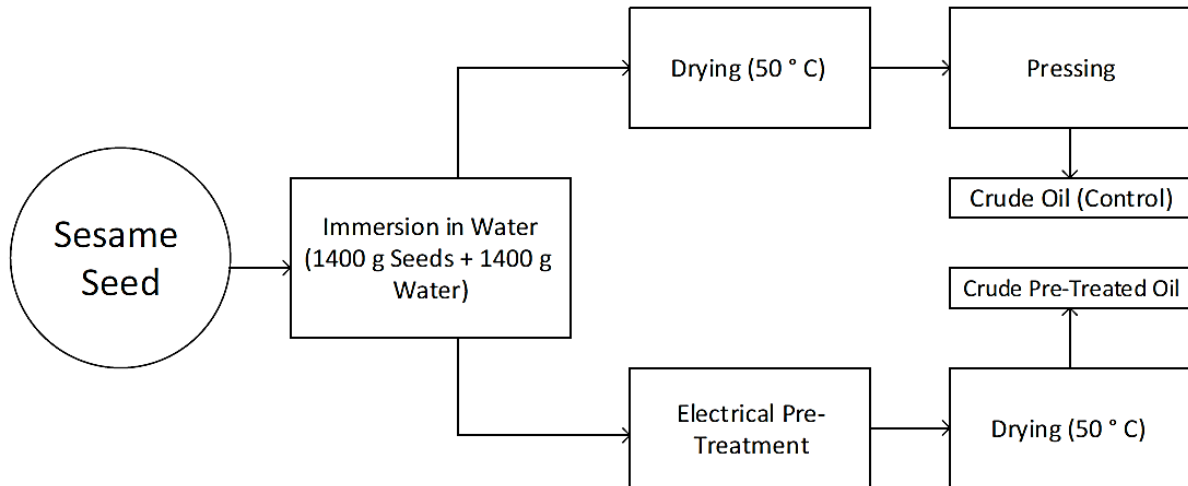


Figure 3.12 : Schéma de principe de la production d'huile de sésame (Tale Masouleh et al., 2015)

3.12 Extraction d'huile de tournesol par CEP

L'application du champ électrique pulsé (CEP) comme méthode d'intensification non thermique a été proposée pour augmenter le rendement en huile des graines de tournesol. Les traitements par CEP ont été réalisés sous différents paramètres électriques, tels que le champ électrique, la fréquence d'impulsion, la durée d'impulsion, la durée du traitement et la conductivité de l'échantillon. Le rendement en huile a augmenté de 9,1 % après traitement des graines de tournesol par variation des paramètres du CEP : durée de traitement de 30 s sous un champ électrique de 7,0 kV/cm, une fréquence de 15 Hz, une teneur en solvant de 40 % en poids et une durée d'impulsion de 30 μ s (Shorstkii et al., 2017).

Des graines de tournesol broyées ont été traitées par CEP dans une chambre diélectrique équipée de deux électrodes en titane (diamètre 40 mm). L'écartement des électrodes a été réglé à 5 mm pour atteindre un volume de traitement d'environ 16 cm³, suffisant pour obtenir la quantité d'échantillons requise pour le processus d'extraction. Des impulsions électriques carrées ont été générées par un générateur de fonctions (Agilent 33220A, Agilent Technologies, Loveland, Colorado 80537, États-Unis) et amplifiées par un amplificateur haute tension (Trek

COR-A-TROL 610D, TREK Inc, Lockport, NY 14094, États-Unis) jusqu'à 10 kV (Shorstkii et al., 2017).

La chambre a été remplie d'échantillons broyés de tournesol, et les électrodes ont été entièrement recouvertes. Des trains d'impulsions positives ont été appliqués aux échantillons. Les caractéristiques des impulsions électriques appliquées, telles que le champ électrique, la fréquence et la largeur d'impulsion, ont été surveillées à l'aide d'un oscilloscope numérique (Tektronix TDS 220) équipé d'une sonde PHV 621 (400 MHz, $\times 100$). Le dispositif expérimental est illustré à la figure 3.12 (Shorstkii et al., 2017).

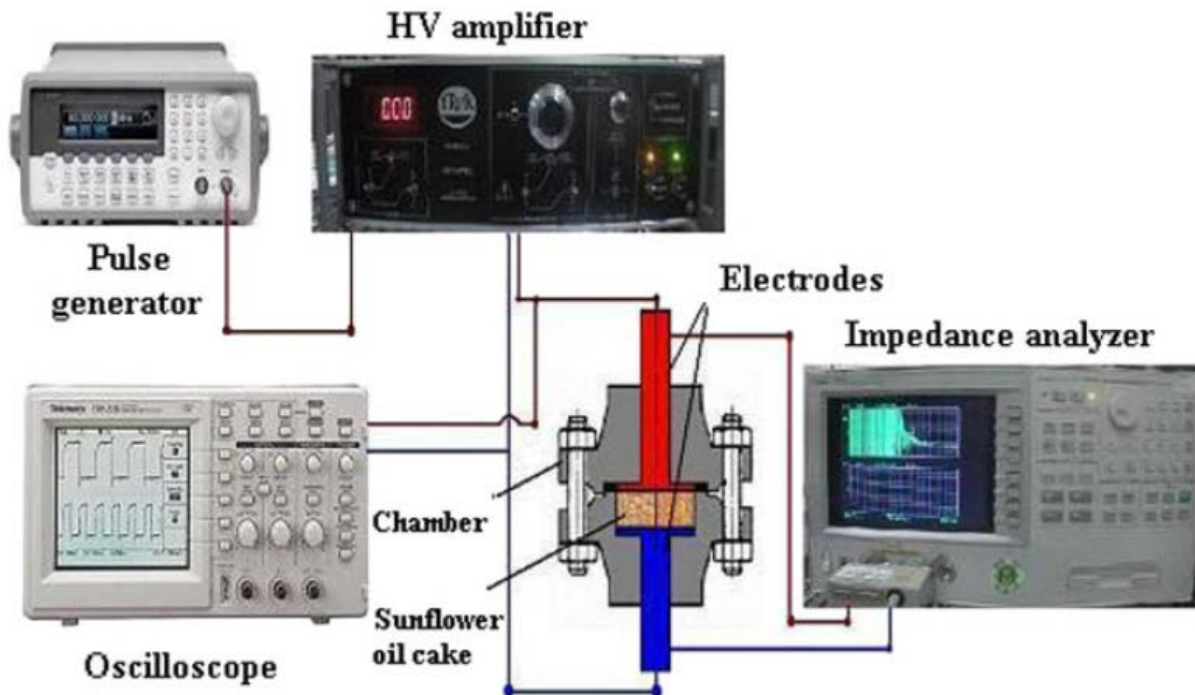


Figure 3.12 : Dispositif expérimental pour le traitement par CEP (Shorstkii et al., 2017)

Différentes variations de paramètres ont été utilisées dans cette étude (Figure 3.13). L'effet du champ électrique (1, 3, 5, 6, 7 kV/cm), de la fréquence d'impulsion (0,5, 1,5, 5, 10, 15 Hz), de la teneur en solvant (10, 20, 30, 40 et 50 % en poids), du temps de traitement (10, 30, 60, 90, 120 s) et de la largeur d'impulsion (10, 20, 30, 40, 50 μ s) sur le rendement en huile a été étudié. Le traitement par CEP a été réalisé à température ambiante, environ 20°C (Shorstkii et al., 2017).

Les résultats obtenus seront utilisés ultérieurement dans les technologies de transformation des aliments comme méthode de prétraitement pour l'extraction d'huile de graines de tournesol à grande échelle (Shorstkii et al., 2017).

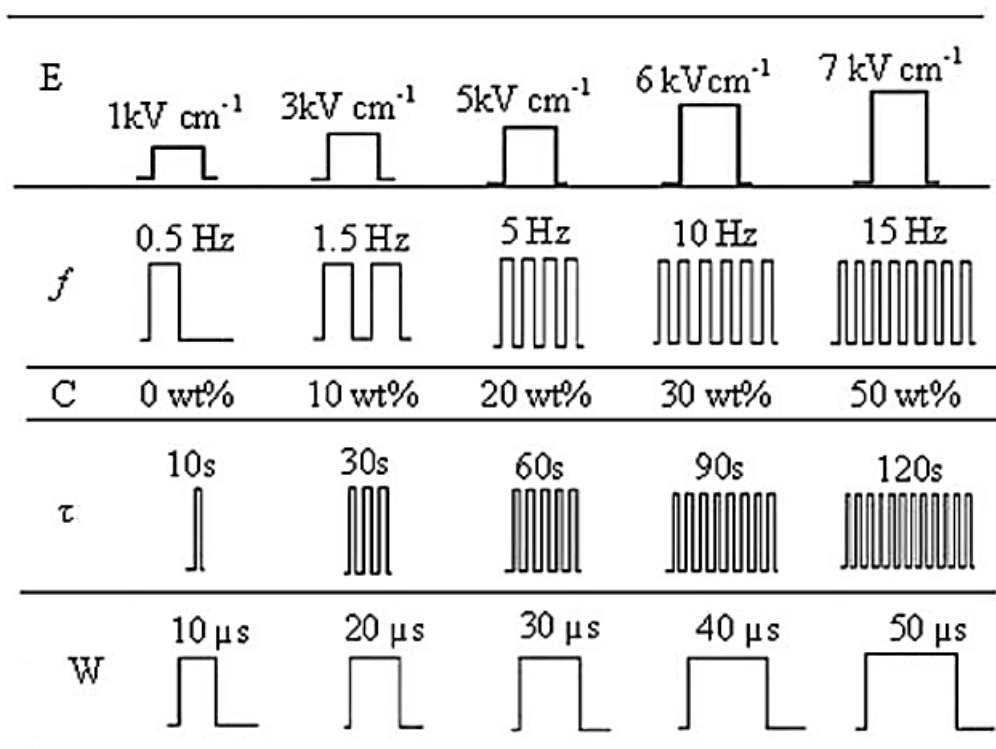


Figure 3.13 : variation des paramètres de traitement du CEP : Champ électrique (E), fréquence (f), teneur en solvant (C), temps de traitement (τ), largeur d'impulsion (W) (Shorstkii et al., 2017).

3.13 Traitement du jus de carotte par CEP

Des échantillons de jus de carotte traités par des champs électriques pulsés (CEP) d'une intensité de 25 kV/cm et des durées de traitement de $144,6 \mu\text{s}$ (CEP1) et $433,8 \mu\text{s}$ (CEP2) ainsi que par pasteurisation thermique (PT) à 90°C pendant 1 min ont été évalués pour leurs propriétés physicochimiques et leur inactivation microbienne (Xiang et al., 2014).

La technique du CEP de conservation non thermique, s'est avérée plus efficace pour préserver certaines propriétés physico-chimiques et qualitatives du jus de carotte qu'une pasteurisation thermique conventionnelle. La pasteurisation thermique a entraîné des pertes significatives en acide ascorbique, en α -carotène, en β -carotène et en lutéine, tandis que le jus traité par CEP était plus proche du témoin. Le jus traité par CEP a également mieux conservé ses propriétés physico-chimiques telles que la couleur, la viscosité et l'acidité totale que le jus pasteurisé thermiquement. Le traitement CEP2 était comparable au traitement thermique (TP) pour l'inactivation des bactéries aérobies et des moisissures dans le jus de carotte. Le traitement CEP2 permet d'obtenir un jus de carotte présentant une faible numération bactérienne aérobie, une numération nulle des moisissures et des pertes nutritionnelles minimales (Xiang et al., 2014).

Les traitements du CEP ont été réalisés sur un système continu à l'échelle du laboratoire, comme illustré à la figure 3.14. Quatre chambres de traitement à champ commun, d'un diamètre de 0,23 cm et d'une distance d'espacement de 0,29 cm, ont été connectées en série. Deux serpentins de refroidissement ont été placés avant et après chaque paire de chambres, et immergés dans un bain réfrigéré à circulation pour contrôler la température de l'échantillon.

La température a été surveillée à l'aide de thermocouples connectés à un système d'acquisition de données, qui enregistrerait la température d'entrée et de sortie de chaque paire de chambres toutes les 0,1 s pendant le traitement du CEP (Xiang et al., 2014).

La température de l'échantillon de jus a été maintenue à 25 °C. Le jus de carotte a été traité avec deux traitements CEP différents : CEP1 (largeur d'impulsion de 3,0 μ s, durée de traitement de 144,6 μ s) et CEP2 (largeur d'impulsion de 9,0 μ s, durée de traitement de 433,8 μ s) à une intensité de champ électrique de 25 kV/cm. Une impulsion bipolaire a été appliquée à une fréquence d'impulsion de 1 000 Hz. Le débit du jus de carotte a été réglé à 60 ml/min avec une pompe à vitesse variable. La forme d'onde d'impulsion, la tension et l'intensité du champ électrique dans les chambres de traitement ont été enregistrées à l'aide d'un oscilloscope numérique (THS720, Tektronix, Inc., Beaverton, Oregon). Les jus de carotte ont été collectés après chaque traitement CEP dans des bouteilles en verre stérilisées (Xiang et al., 2014).

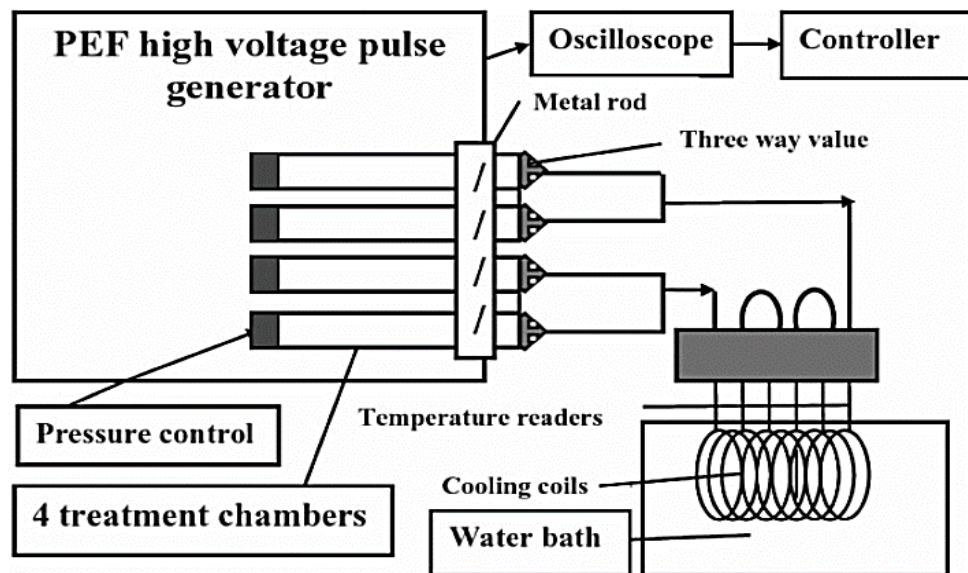


Figure 3.14 : Schéma de l'appareil de traitement du jus de carotte par CEP (Xiang et al., 2014)

Le temps de traitement du CEP (t) a été calculé en fonction du nombre d'impulsions reçues dans les chambres de traitement (N_p), qui a été obtenu à partir du temps de séjour dans une chambre (T_r) et du volume d'une chambre (V_c) (Xiang et al., 2014).

$$V_c = \pi \cdot r^2 \cdot H = 3,142 \cdot (0,115)^2 \cdot 0,29 = 0,0120503 \text{ ml} \quad (3-3)$$

Où : r est le rayon de la chambre de traitement (0,115 cm), H est la hauteur de la chambre (0,29 cm).

$$T_r(s) = \frac{V_c}{F} = 0,0120503 \text{ ml} / 1 \text{ ml} / \text{s} = 0,0120503 \text{ s} \quad (3-4)$$

Où : V_c est le volume d'une chambre de traitement (mL), F est le débit (mL/s) et le débit est de 60 mL/min.

$$N_p = T_r \cdot f = 0,0120503 \cdot 1,000 \text{ pps} = 12,0503 \text{ impulsions} \quad (3-5)$$

Où : f est la fréquence (impulsion par seconde [pps]) et est de 1 000 impulsions/s (Hz).

$$t = N_p \cdot N_c \cdot P_w \text{ (Pour une largeur d'impulsion de } 3 \mu\text{s)} \quad (3-6)$$

Où : N_c est le nombre de chambres de traitement ($N_c = 4$) et P_w est la largeur d'impulsion (μs ; des largeurs d'impulsion de 3 μs ou 9 μs ont été utilisées dans cette étude).

De l'équation (3-6), $t = 12,0503 \cdot 4 \cdot 3 = 144,6 \mu\text{s}$ (Xiang et al., 2014).

3.14 Extraction par pressage et CEP de fruits et de légumes

Le pressage ou l'expression est largement utilisé dans la production de jus de fruits et de légumes. Au cours de ce processus, le jus contenu dans les tissus végétaux est expulsé par compaction ou pressage. Différents équipements (vis, bandes, presses hydrauliques et/ou filtres-presses) et opérations de prétraitement (broyage fin de la matière première, chauffage et macération enzymatique) ont été utilisés pour faciliter l'expression des jus. Un traitement mécanique, thermique ou enzymatique intensif entraîne une dégradation des tissus végétaux, une pollution des jus et une clarification du jus en plusieurs étapes. Des travaux expérimentaux issus de nombreuses expériences en laboratoire ont montré que le prétraitement par CEP avant pressage ou une combinaison de CEP et de pressage permettait d'augmenter significativement le rendement et la qualité du jus (Barba et al., 2015).

La figure 3.15 présente un exemple de dispositif de laboratoire pour le pressage assisté par CEP. La cellule de traitement est initialement remplie de tranches. Une électrode mobile est fixée au diaphragme élastique en caoutchouc et une électrode fixe en toile métallique est installée entre le tissu filtrant et la couche de tranches. Les deux électrodes sont connectées au

générateur CEP. La pression d'air comprimé est appliquée à la couche de tranches via l'électrode mobile et le diaphragme élastique (Barba et al., 2015).

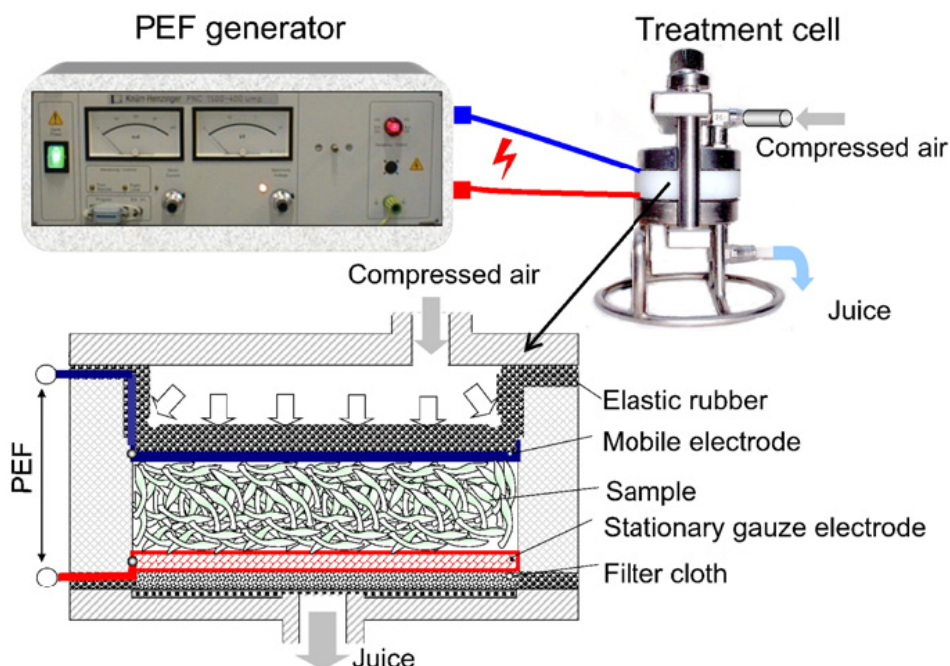


Figure 3.15 : Appareil de laboratoire pour pressage assisté par CEP (Barba et al., 2015)

Lors d'expériences menées pour tester les effets du traitement CEP avant et pendant le pressage de tranches de betterave sucrière, le pressage assisté par CEP a considérablement amélioré le rendement en jus, le portant à 43 %, 68 % et 79 %, pour des intensités de champs électriques de 215, 300 et 427 V/cm, respectivement. La consommation énergétique était de 0,6 à 1 Wh/kg pour la matière première et le jus libéré était inhomogène, moins coloré et présentait une concentration en sucre plus élevée (Barba et al., 2015).

Le traitement intermédiaire assisté par CEP des cossettes de betterave sucrière à l'aide d'un presseur multi-plaques et à cadres à l'échelle pilote (pression de 5 à 15 bars ; remplissage en particules de 4,5 à 15 kg) a également été étudié. Un rendement d'environ 80 % en jus par masse initiale de cossettes a été obtenu avant lavage. La pureté du jus obtenu par pressage assisté par CEP (96 à 98 %) s'est avérée supérieure à celle du jus non traité. Les cristaux de sucre obtenus après évaporation et cristallisation des jus traités par CEP étaient moins colorés que ceux obtenus à partir de jus d'usine. La pulpe obtenue après traitement par CEP et extraction du jus contenait 3 à 5 fois plus d'azote α -aminé et 2 à 3 fois plus de sodium et de potassium que celle obtenue à partir de pulpe d'usine (Barba et al., 2015).

3.15 Extraction par chauffage ohmique et CEP de betterave sucrière

Les effets combinés du chauffage ohmique (OH) et du traitement CEP sur l'extraction sous pression du jus de tranches de betterave sucrière de différentes tailles ont été étudiés. Un chauffage ohmique (60 V/cm, 50 Hz) a été utilisé pour atteindre différentes températures (30 à 70 °C), suivi d'un traitement CEP ($E = 600$ V/cm, $t_{CEP} = 0,04$ s). Il a été démontré que la quantité de jus extraite des râpes de betterave sucrière de petite taille ($1,5 \times 1 \times 35$ mm), moyenne taille ($6 \times 1,5 \times 35$ mm) et grossière taille ($7 \times 3 \times 35$ mm) différait selon le traitement CEP. L'association des traitements OH et CEP a produit un effet synergique significatif, favorisant l'extraction du jus de 85 à 87 %, même à partir de tranches moyennes et grossières. Cet effet synergétique reflète l'effet de l'électroporation améliorée par la température. Cependant, si la consommation d'énergie par CEP s'est avérée faible (1 à 5 kWh/t de matière première), l'OH appliqué à 40 °C pendant 10 min a consommé près de 40 kWh/t de matière première.

Le bon potentiel industriel de l'extraction de jus assistée par CEP a été confirmé en laboratoire et à l'échelle pilote grâce à une presse à bande. La figure 3.16 présente le schéma d'une presse à bande pilote CEP récemment utilisée pour la transformation de betteraves sucrières.

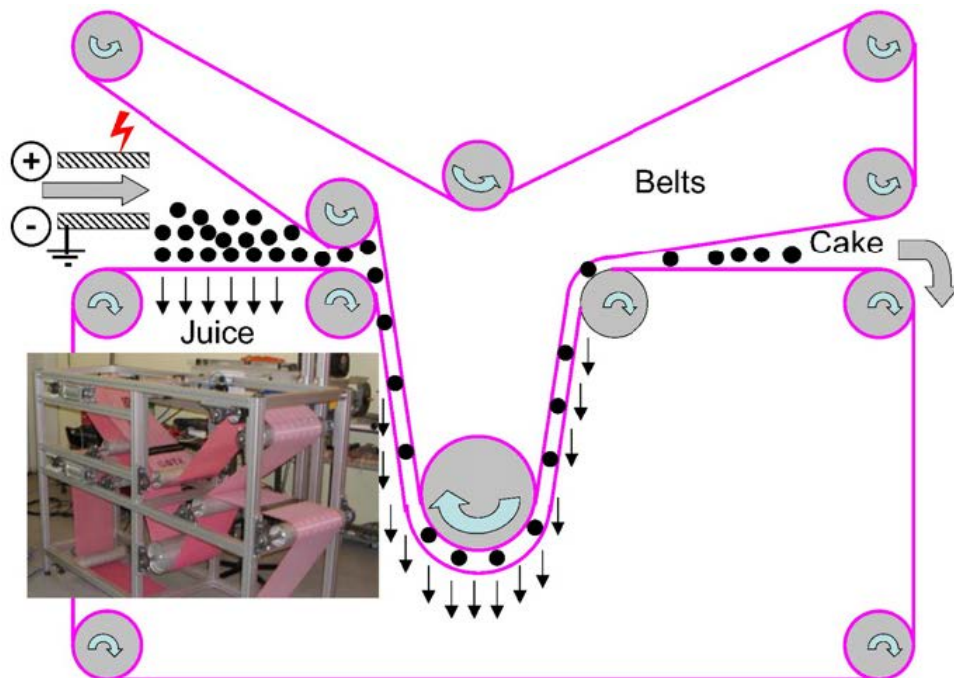


Figure 3.16 : Presse à bande pilote utilisée pour l'expression assistée par PEF à partir de betteraves sucrières par Grimi (2009) (Barba et al., 2015)

Les essais en usine pilote ont été réalisés sur des tranches de betterave sucrière de différentes tailles traitées par CEP. Les résultats obtenus ont confirmé l'amélioration du rendement et de la pureté du jus grâce au prétraitement CEP. Il a été conclu que pour atteindre un rendement maximal et une meilleure pureté du jus, la taille des particules traitées par CEP devait être optimisée (Barba et al., 2015).

3.16 Extraction du jus des tranches de pomme par CEP

Le pressage assisté par CEP a amélioré l'extraction du jus des tranches de pomme Golden Delicious. Le rendement maximal en jus a été atteint à des niveaux de consommation énergétique de 3 kJ/kg de matière première et le rendement en jus est passé de 28 à 61 % avec une pression augmentant de 1 à 30 bar. Il a été démontré qu'un préchauffage doux à 45–50 °C peut induire un ramollissement et une modification des propriétés texturales des pommes, des carottes et des pommes de terre. De plus, il a été prouvé qu'un tel conditionnement améliore la cinétique d'expression du jus. Les prétraitements thermiques et de CEP des tissus végétaux entraînent une augmentation du rendement en jus lors de l'extraction ultérieure.

Dans une autre étude, le mécanisme régissant les dommages aux tissus des pommes sous traitement combiné par pression et champ électrique pulsé (CEP) a été examiné. Des pommes McIntosh ont été utilisées pour valider un modèle mathématique. L'extraction assistée par CEP du jus de purée de pommes à $E = 1\text{--}5 \text{ kV/cm}$ et le pressage manuel à température ambiante ont été étudiés. Par rapport aux échantillons témoins, le rendement en jus a augmenté avec l'augmentation de l'intensité du champ. La composition globale, les teneurs en polyphénols et les capacités antioxydantes des pressages assistés par CEP et traditionnels étaient similaires.

La récupération assistée par CEP du jus de pomme et de carotte a été réalisée à l'aide de quatre systèmes différents : presse à bande, presse à crémaillère, filtre-presses hydraulique et décanteur. Le traitement par CEP a entraîné une augmentation du rendement en jus de pomme ($\approx 0\text{--}11 \%$) et de purée de carottes ($8\text{--}31 \%$) (Barba et al., 2015).

Le potentiel du pressage assisté par CEP de la purée de pommes a été confirmé en laboratoire et à l'échelle pilote à l'aide d'une presse à bande (Figure 3.17). Une presse à bande assistée par CEP a été utilisée pour le traitement de moût de pommes à cidre françaises pompé à travers une chambre de traitement CEP colinéaire (1000 V/cm) à un débit de 280 kg/h. Les jus ont été récupérés en continu sous une seule presse à bande. Le traitement CEP a augmenté le rendement en jus d'environ 4 %. Ces résultats ont été confirmés pour le moût de pommes à cidre françaises à l'échelle industrielle (débit de 4500 kg/h) (Barba et al., 2015).

Le traitement CEP (650 V/cm, 23,2 ms) a permis d'augmenter le rendement en jus de 5,2 %. L'économie d'énergie totale pour le pressage/séchage a été estimée à 8,6 Wh/kg de moût.

Les opérations de lavage et de diffusion d'eau sont fréquemment utilisées en complément du pressage afin d'améliorer l'extraction des composants valorisables (arômes, colorants, etc.). Les limites de ces technologies sont liées à l'utilisation de grandes quantités d'eau (le rapport $r = (\text{masse d'eau}) / (\text{masse de tranches})$ qui doit être supérieur à 3, en règle générale et à des temps de lavage longs (plus de quelques heures) (Barba et al., 2015).

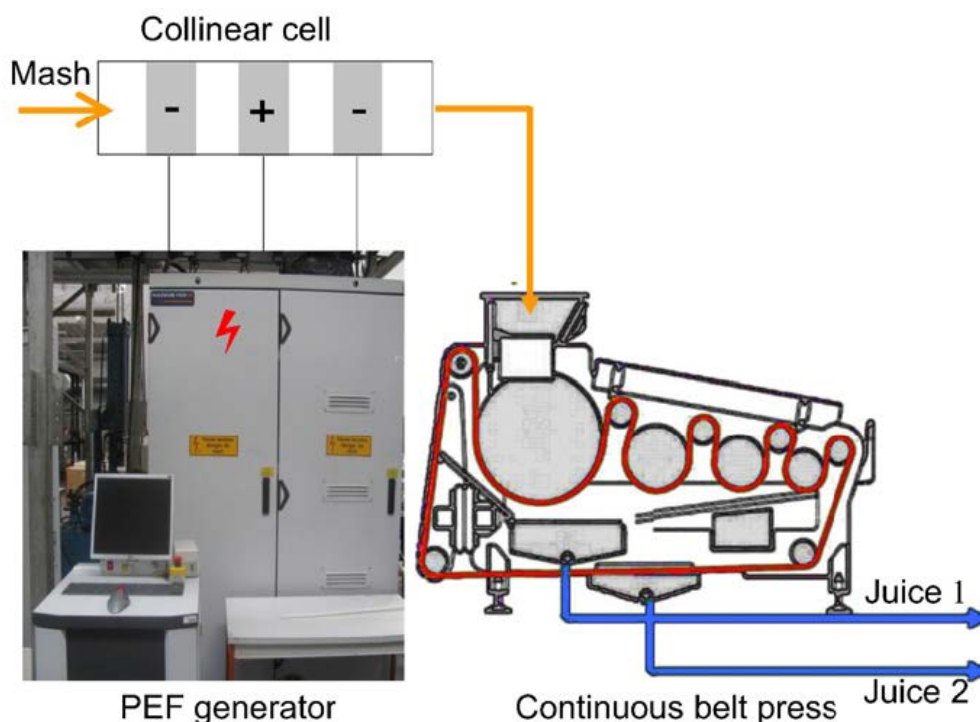


Figure 3.17 : Équipement de presse à bande assistée par CEP pour le traitement de la purée de pommes par Turk (2010) (Barba et al., 2015) .

3.17 Extraction de polyphénols du thé par CEP

L'effet du traitement par champ électrique pulsé (CEP) sur le rendement d'extraction de polyphénols à partir de feuilles de thé fraîches a été étudié (Zderic et al., 2013).

Ces travaux ont démontré l'application du CEP et ses multiples effets sur la membrane cellulaire. Différents modes de traitement CEP (intensités du champ électrique et durée totale de traitement) ont été appliqués pour étudier leur effet sur ce phénomène complexe, qui implique différents niveaux de membranes, de cellules, de structures tissulaires et de variétés végétales. Les résultats obtenus concernant le rendement d'extraction des polyphénols pourraient s'expliquer par deux processus clés : la refermeture des cellules et la diffusion du

matériel cellulaire. La quantité de polyphénols extraits des feuilles dans le milieu aqueux dépend fortement du réglage du traitement CEP. Les résultats expérimentaux ont montré que le rendement d'extraction augmente avec l'intensité du champ électrique. Un rendement d'extraction maximal de 27 % a été obtenu lorsque l'intensité du champ électrique est de 0,9 kV/cm. Cependant, lorsque l'intervalle entre les impulsions est plus long et égal à 3 s, un champ électrique de 1,1 kV/cm est nécessaire pour obtenir le même rendement d'extraction. La durée totale de traitement a été présentée comme le produit du nombre d'impulsions et de leur largeur (durée) (Zderic et al., 2013).

L'effet de la durée totale de traitement sur le rendement d'extraction a été étudié en appliquant deux intensités de champ électrique différentes, $E = 0,4$ kV/cm et $E = 0,9$ kV/cm. Les résultats expérimentaux ont montré que des impulsions plus longues, soit une durée de traitement plus longue (2,5 s), étaient plus efficaces pour un champ électrique modéré ($E = 0,4$ kV/cm). De plus, pour obtenir le même résultat (Rendement d'extraction de 27 %), mais avec une durée totale de traitement plus courte (1,5 s), un champ électrique plus élevé ($E = 0,9$ kV/cm) est requis (Zderic et al., 2013).

Le traitement par CEP a été réalisé à l'aide d'un système Nutri-Pulse NP110-60 (IXL Netherlands B.V.), composé d'une chambre de traitement CEP et d'un générateur haute tension. Les échantillons ont été placés dans la chambre de traitement entre deux électrodes en acier inoxydable, immergés dans un milieu aqueux (Figure 3.18a) (Zderic et al., 2013).

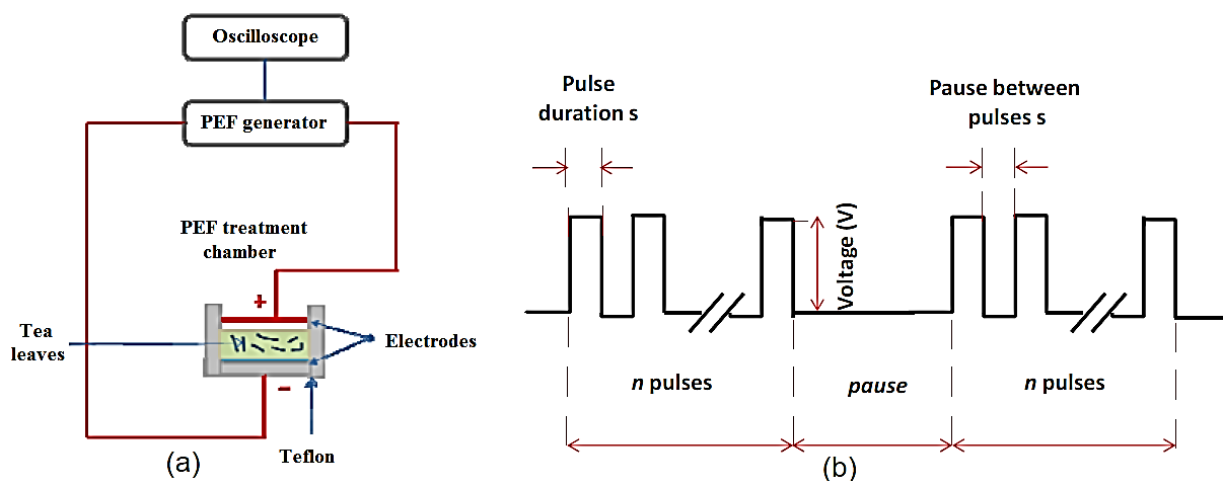


Figure 3.18 : Dispositif expérimental. (a) Schéma du système de traitement CEP, (b) Protocole d'impulsion CEP (Zderic et al., 2013)

Le milieu aqueux a été préparé avec la même conductivité que l'échantillon ($\sigma = 3,5$ mS/cm) en utilisant du NaCl comme sel. La distance entre les électrodes était de 4 cm. Après la coupe, les feuilles ont été soumises à différents traitements du CEP (Zderic et al., 2013).

Toutes les expériences ont été réalisées avec une intensité de champ électrique E comprise entre 0,1 et 1,1 kV/cm, une durée d'impulsion comprise entre 0,0001 et 0,1 s, un nombre d'impulsions N compris entre 10 et 50 et une pause entre les impulsions comprises entre 0,5 et 5 s. La durée totale du traitement a été définie comme le produit du nombre d'impulsions et de la largeur d'impulsion appliquée au système (Figure 3.18b). Outre le temps de pause entre les impulsions, l'intervalle entre deux impulsions représente le temps de relaxation (Zderic et al., 2013).

3.18 Application du CEP pour la bioraffinerie

Les applications récentes de l'énergie électrique pulsée (EEP), des champs électriques pulsés (CEP) et des décharges électriques à haute tension (DEHT), en bioraffinerie lignocellulosique ont démontré leur fort potentiel. La biomasse lignocellulosique est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine, et contient de faibles quantités de pectine, de protéines, de sucres non structuraux, de chlorophylles et de cendres (Vorobiev & Lebovka, 2017).

Les schémas existants de bioraffinage de la biomasse lignocellulosique incluent des techniques thermochimiques, physiques, chimiques et biologiques (fermentation, digestion et traitement microbien). Cependant, ces techniques nécessitent un temps de traitement long, de grandes quantités de produits chimiques et de solvants, et sont énergivores. Les techniques CEP et DEHT peuvent être utilisées efficacement pour faciliter l'hydrolyse et la fermentation, pour la production de biogaz et pour l'extraction de composés bioactifs et de composés chimiques à forte teneur ajoutée (Vorobiev & Lebovka, 2017).

La gamme de biomasses testées est encore limitée et les exemples existants incluent les biomasses ligneuses et végétales (sciure, copeaux, écorces, ensilage et panic raide), les boues et les déchets. Des résultats récents ont démontré le grand potentiel des techniques assistées par électroporation pour une valorisation efficace des déchets agro-industriels, des déchets forestiers et des boues biologiques semi-solides (Vorobiev & Lebovka, 2017).

Le traitement du CEP de copeaux de bois et de panic raide a été étudié par Kumar et al. (2011). L'appareil du CEP comprenait une alimentation haute tension, un générateur de fonctions, un circuit de commutation, un porte-échantillon et un système de mesure (Figure 3.19). Afin de quantifier l'effet du CEP sur la diffusion interne dans les tissus du bois, l'absorption du colorant rouge neutre (NR) $C_{15}H_{17}ClN_4$ a été étudiée. Les échantillons ont été

agités dans la solution aqueuse de NR et leur concentration a été testée à l'aide d'un spectrophotomètre UV-VIS (Vorobiev & Lebovka, 2017).

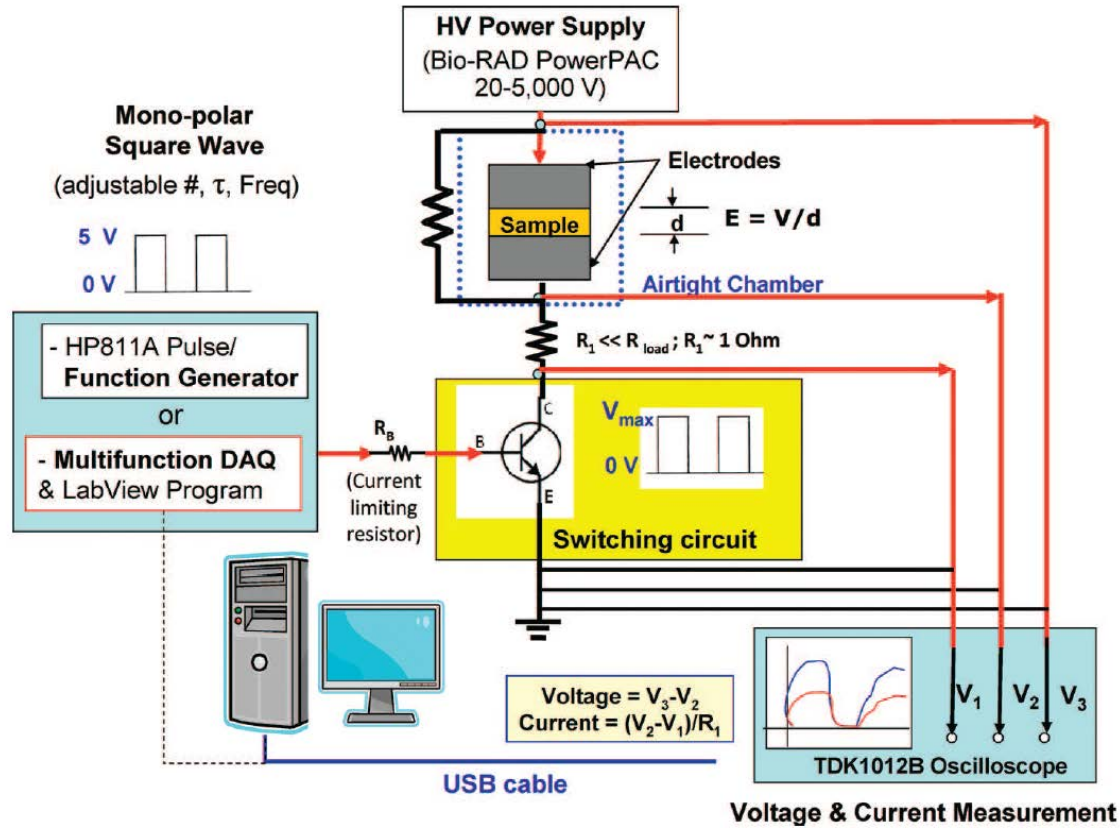


Figure 3.19 : Système de traitement par CEP pour le prétraitement de la biomasse (d'après Kumar et al. (2011)) (Vorobiev & Lebovka, 2017)

Les échantillons se sont montrés résistants aux modifications de structure à de faibles intensités de champ. Les échantillons traités à 2,5–5 kV/cm pour 2 000 et 5 000 impulsions d'une durée de 100 μ s présentent une cinétique d'absorption RM similaire à celle des échantillons non traités. Cependant, une absorption efficace d'un NR coloré a été observée lors du traitement par CEP à une intensité de champ électrique élevée ($E \geq 8$ kV/cm). Les échantillons de panic raide traités par CEP ont montré une absorption du colorant plus rapide que les échantillons frais. Des phénomènes similaires ont été observés pour les échantillons de copeaux de bois traités à $E = 10$ kV/cm. Cela peut refléter une augmentation de la porosité des échantillons traités. Après l'expérience d'absorption du colorant, la désorption du NR dans de l'eau pure déionisée a été étudiée. La désorption la plus rapide a été observée pour les échantillons traités par CEP. Il a été conclu que la perméabilisation du panic raide et des copeaux de bois par CEP peut être utilisée pour améliorer l'hydrolyse de la cellulose en sucre.

L'électroporation de biomasse lignocellulosique (ensilage de culture de prairies inondables) sous traitement du CEP (à $E = 48\text{--}96\text{ kV/cm}$) a été étudiée par Lindmark et al. (2014). La culture de prairies inondables (un mélange principalement composé d'herbe et de trèfle) est couramment utilisée dans la rotation des cultures pour fertiliser les sols en azote. Les auteurs ont évalué l'effet de l'électroporation sur le rendement en biogaz. Le traitement du CEP a été appliqué dans des expériences par lots (Figure 3.20) (Vorobiev & Lebovka, 2017).

Le traitement PEF a été appliqué avant la digestion et les résultats ont été évalués dans des expériences de digestion par lots. La majeure partie du biogaz a été produite dans les 100 premiers jours suivant la digestion. Une augmentation notable du rendement en biogaz (jusqu'à 16 %) a été observée à $E = 96\text{ kV/cm}$ avec un apport énergétique total W de 259 Wh/kg de solides volatils (Vorobiev & Lebovka, 2017).

En revanche, pour le traitement du CEP à $E = 48\text{ kV/cm}$ et le même apport énergétique, aucun effet n'a été observé. Il a été conclu que la mise en œuvre du prétraitement par CEP sur les cultures et les résidus agricoles peut être très prometteuse pour améliorer la production de biogaz à partir des terres agricoles utilisées pour la culture du substrat.

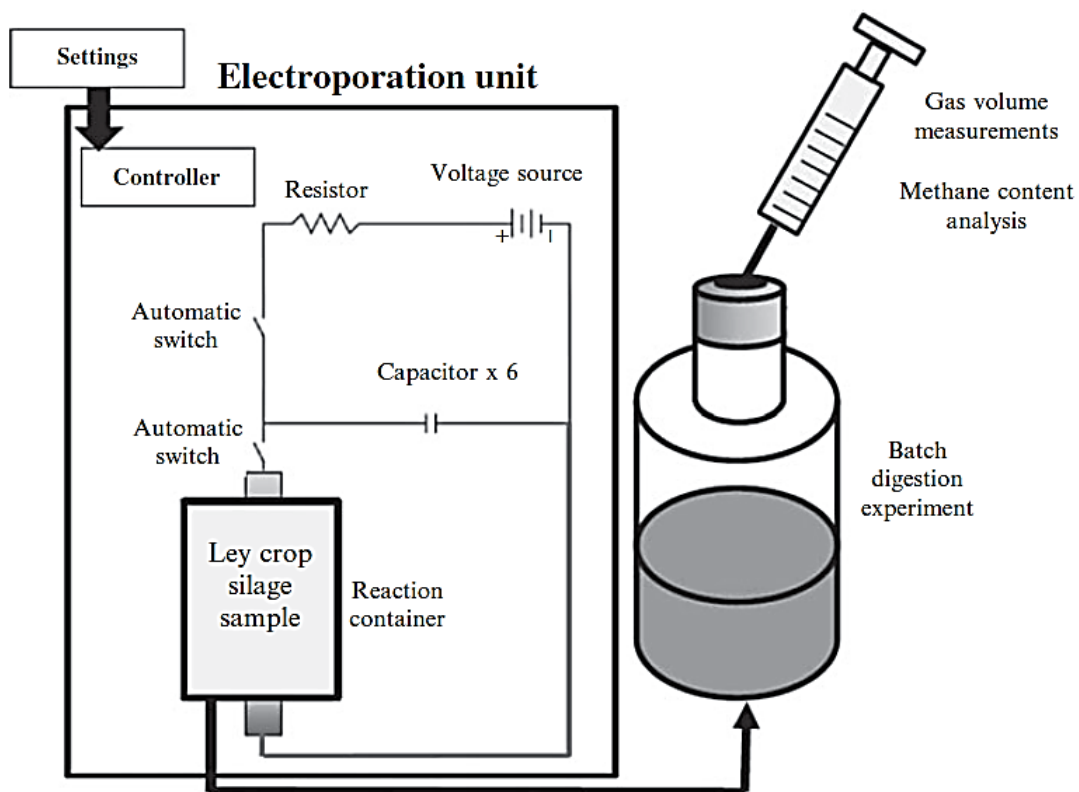


Figure 3.20 : Unité d'électroporation pour une expérience de digestion par lots d'ensilage de cultures de landes. Un récipient de réaction (100 ml) est doté d'électrodes verticales : une électrode est montée au fond et l'autre sur un couvercle. La distance entre les électrodes était de 2,5 à 5 cm (d'après Lindmark et al. (2014))(Vorobiev & Lebovka, 2017)

3.19 Extraction du glutathion par CEP

Le glutathion est un puissant antioxydant prometteur pour améliorer la transformation de divers aliments et boissons, tels que le pain. *Saccharomyces cerevisiae* est un micro-organisme essentiel à la production de glutathion. Cette étude visait à évaluer le potentiel des champs électriques pulsés (CEP) pour extraire le glutathion des cellules de *S. cerevisiae*. Les cellules de levure ont été soumises à un traitement CEP (12 kV/cm, 150 μ s), suivi d'une incubation à différents pH (4,0, 6,0 et 8,0) et températures (4 °C et 25 °C). L'extraction du glutathion et des protéines a été évaluée à différents temps d'incubation. En une heure d'incubation, les cellules de levure traitées par CEP ont libéré plus de 60 % de leur teneur totale en glutathion, quels que soient le pH et la température. Notamment, l'activité antioxydante de l'extrait obtenu a surpassé celle obtenue par destruction mécanique complète des cellules et par l'eau chaude, méthode d'extraction industrielle conventionnelle dans l'industrie du glutathion. Ces résultats suggèrent que le CEP pourrait offrir une procédure plus rapide et plus sélective, améliorant ainsi l'extraction de ce composé bioactif (Berzosa et al., 2024).

Bien que le glutathion présente un fort potentiel pour divers secteurs industriels, notamment dans l'industrie agroalimentaire, où il pourrait jouer un rôle crucial dans la préservation de la qualité des produits, son coût élevé pose des défis importants pour une application à grande échelle. L'amélioration des méthodes de production constitue une approche viable pour réduire le prix du glutathion en diminuant les coûts de production. Les résultats soulignent la capacité du CEP à extraire le glutathion tout en minimisant la co-extraction des protéines. De plus, le glutathion extrait présente une capacité antioxydante accrue, soulignant ainsi l'efficacité du CEP pour préserver la bioactivité du composé (Berzosa et al., 2024).

La biomasse de levure a été soumise à un traitement du CEP dans une chambre à flux continu utilisant un équipement CEP commercial (Vitave, Prague, République tchèque). Cet équipement peut délivrer des impulsions carrées monopolaires atteignant jusqu'à 20 kV, avec une largeur d'impulsion réglable de 500 ns à 100 μ s et une intensité de courant maximale de 500 A. Une pompe péristaltique (BVP, Ismatec, Wertheim, Allemagne) a fait circuler la biomasse de levure à un débit de $5,10 \pm 0,05$ L/h dans une chambre à électrodes parallèles en titane de 0,4 cm d'espacement, 3,0 cm de longueur et 0,5 cm de largeur. Des impulsions carrées monopolaires, d'une largeur de 3 μ s, ont été appliquées à des intensités de champ électrique de 12, 15 et 18 kV/cm et à des fréquences comprises entre 15,9 et 119,4 Hz, pour une durée totale de traitement comprise entre 20 et 150 μ s, calculée en multipliant le nombre total d'impulsions appliquées par leur largeur (Berzosa et al., 2024).

Ces traitements correspondaient à des énergies spécifiques totales comprises entre $9,6 \pm 2,9$ et $109,8 \pm 5,1$ kJ/kg de suspension de levure. La tension réelle pendant les traitements a été surveillée à l'aide d'une sonde haute tension (Tektronik, P6015A, Wilsonville, Oregon, États-Unis) connectée à un oscilloscope (Tektronik, TDS 220). Les températures de sortie, comprises entre $24,9 \pm 0,6$ et $48,7 \pm 1,1$ °C, ont été mesurées à l'aide d'un thermocouple de type K intégré au circuit (Ahlborn, Holzkirchen, Allemagne). Avant les traitements du CEP, la biomasse de levure a été tempérée à $22,0 \pm 0,5$ °C grâce à un échangeur de chaleur situé en amont de la chambre de traitement. Après le traitement du CEP, la suspension de levure a été rapidement refroidie à la température d'incubation suivante (4,0 ou 25,0 °C) en moins de 5 secondes grâce à un échangeur de chaleur situé en aval de la chambre de traitement (Figure 3.21).

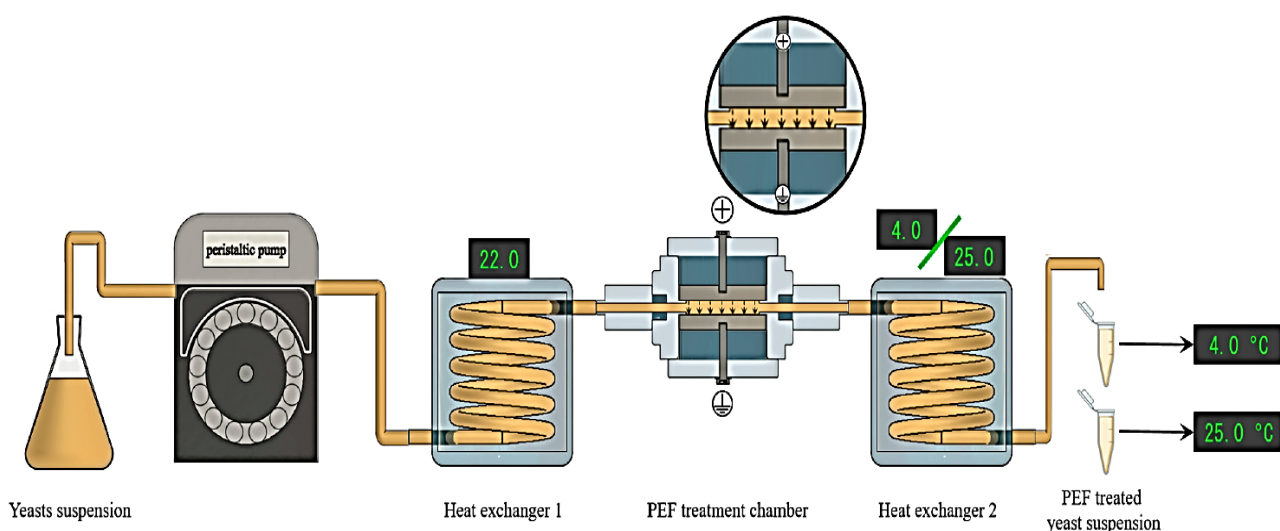


Figure 3.21 : Schéma du système de traitement du CEP à flux continu utilisé pour cette étude (Berzosa et al., 2024)

3.20 Application du CEP dans la transformation des kiwis

L'industrie de la transformation du kiwi se concentre sur la maximisation du rendement et la réduction des coûts énergétiques et des effluents, tout en maintenant une qualité élevée du produit. Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche ont montré que le prétraitement par CEP dans les conditions optimisées sélectionnées pourrait être un outil utile dans l'industrie de la transformation du kiwi (Shorstkii et al., 2023).

L'application du CEP pourrait potentiellement minimiser la consommation d'énergie, augmenter la productivité de la ligne et favoriser une valorisation plus efficace des déchets de kiwi. L'optimisation des paramètres spécifiques d'énergie et de temps de pause après le traitement a permis d'améliorer le pelage, comme en témoignent une moindre consommation

de force de pelage spécifique et une moindre perte de rendement. De plus, le CEP s'est avéré améliorer la qualité et l'efficacité des composés intracellulaires extraits de la peau et de la bagasse du kiwi (Shorstkii et al., 2023)

L'amélioration du pelage due à l'électroperméabilisation s'explique par la migration de l'eau de la région du mésocarpe sous la peau du kiwi. Cela a entraîné une différence de pression sur la peau du kiwi, réduisant la résistance superficielle et facilitant son élimination. Dans le cas des extraits de kiwi, le CEP a amélioré les attributs qualitatifs par rapport au témoin. Compte tenu des faibles besoins énergétiques du CEP (~ 1 kJ/kg de matière première), cette technologie pourrait constituer une option économiquement viable pour l'industrie de transformation du kiwi. De plus, le traitement par CEP pourrait être appliqué aux déchets d'écorces de kiwi afin d'obtenir des rendements élevés en composés phénoliques. Cette approche de valorisation représente une alternative naturelle à la synthèse chimique de composés bioactifs utilisés comme ingrédients dans les domaines alimentaire, cosmétique ou pharmaceutique. Globalement, l'application du CEP à la transformation du kiwi offre un excellent exemple de la manière dont des technologies innovantes et respectueuses de l'environnement peuvent être utilisées pour réduire les déchets et promouvoir une économie circulaire (Shorstkii et al., 2023).

Des kiwis italiens ont été achetés dans un supermarché local et triés pour garantir l'absence de défauts. Leur poids moyen était de 85,1 g. Un système CEP (PEFPilot™ Dual, Elea Vertriebs-und Vermarktungs mbH, Quakenbrück, Allemagne) doté d'une chambre en acier inoxydable, d'électrodes à plaques parallèles et d'un écartement de 10 cm a été utilisé pour l'expérience. Des kiwis entiers ont été suspendus dans l'eau du robinet et placés dans la chambre de traitement CEP. Les impulsions appliquées étaient monopolaires avec une décroissance rectangulaire. L'effet des différents traitements CEP a été évalué sur la fermeté des kiwis, leurs performances d'épluchage et leurs caractéristiques physicochimiques. Pour l'analyse physico-chimique, des réglages CEP de 4 impulsions, 1 kV/cm (intensité du champ) et 1 kJ/kg (énergie spécifique) ont été utilisés (Shorstkii et al., 2023).

Le pelage des kiwis a été réalisé mécaniquement à l'aide de l'analyseur de texture TA.XT plus (Stable Micro Systems, Godalming, Surrey, Royaume-Uni) équipé d'une lame Meullenet-Owens Razor Shear (MORS), avec une vitesse de pré-test de 1 mm/s, une vitesse d'essai de 5 mm/s et une distance définie de 14 mm. La zone prédécoupée sélectionnée sur la peau du kiwi a été retirée et une force de pelage spécifique a été calculée. La figure 3.22 illustre la procédure de pelage (Figure 3.22a) et le tissu pelé du kiwi (Figure 3.22b) (Shorstkii et al., 2023).

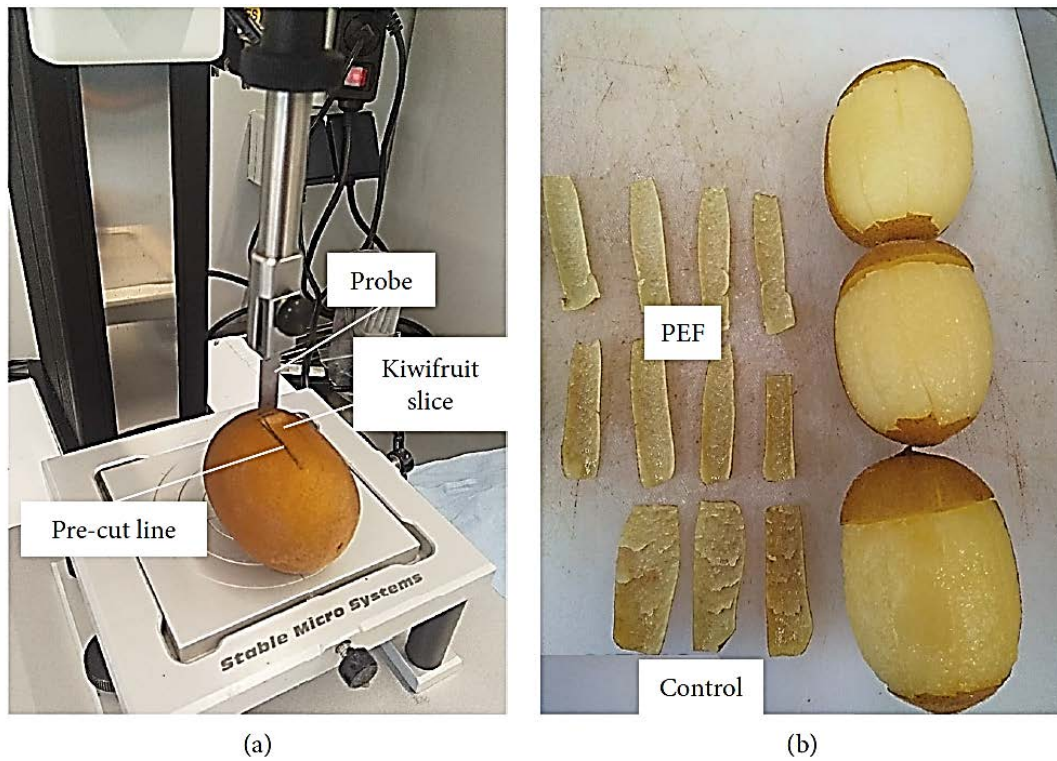


Figure 3.22 : Procédure d'épluchage des kiwis basée sur un système d'analyse de texture (a) et des fruits pelés (b) (Shorstkii et al., 2023)

L'amélioration de la pelabilité pourrait s'expliquer par la migration de l'eau depuis la région du mésocarpe sous la peau du kiwi, résultant de l'électroperméabilisation. Cette migration a entraîné une différence de pression à travers la peau du kiwi, réduisant la résistance superficielle et facilitant son élimination. Le mécanisme de migration de l'eau est illustré à la figure 3.23. Le transfert de masse interne a été activé par la pression de turgescence des cellules végétales.

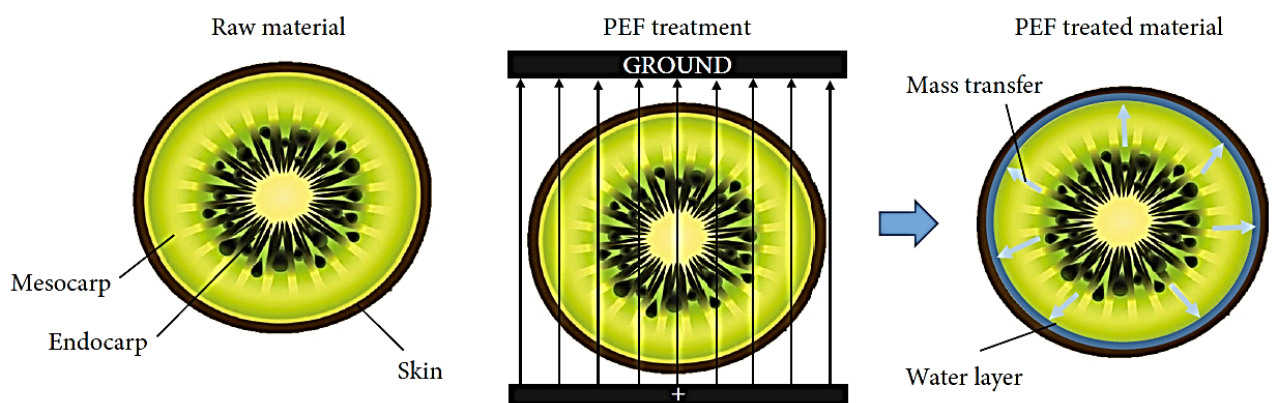


Figure 3.23 : Mécanisme de migration de l'eau dans les kiwis provoqués par CEP (Shorstkii et al., 2023)

3.21 Application du CEP au traitement d'ovoproduits

L'ovoproduit est produit obtenu à partir de l'œuf, après élimination de la coquille et des membranes. Il existe trois groupes d'ovoproduits :

- Les ovoproduits intermédiaires destinés à l'industrie agroalimentaire : œuf entier cassé homogénéisé, jaune d'œuf, blanc d'œuf, pasteurisé, additionné ou non de sucre, de sel. Ces produits sont vendus liquides, concentrés, congelés ou séchés en poudre.
- Les constituants du blanc et du jaune obtenu par fractionnement qui sont aujourd'hui l'objet de recherches visant à la production de produits spécifiques susceptibles d'intéresser la cosmétologie, la pharmacie et les biotechnologies. L'extraction du lysozyme par exemple et son utilisation bactéricide concernent, en particulier, l'industrie fromagère.
- Les ovoproduits prêts à l'emploi, nés récemment, destinés généralement à la restauration hors domicile : ce sont les œufs durs écalés, les œufs durs reconstitués en rouleaux, les omelettes précuites fraîches ou surgelées, les œufs pochés, les œufs brouillés, les omelettes déshydratées, les blancs en neige, etc (Lafon, 1999).

Le traitement par champs électriques pulsés (CEP) en continu d'ovoproduits liquides, préalablementensemencés avec une souche de *Salmonella Enteritidis*, a été étudié. Au cours de ces essais, le champ électrique, la durée d'impulsion et la fréquence variaient de 30 à 80 kV·cm⁻¹, de 50 ns à 3 µs et de 10 à 815 Hz, respectivement. Les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec une solution modèle de sulfate de sodium (28mM) et de glucose (28 mM).

La destruction de *S. Enteritidis* est au maximum de 2 réductions décimales pour les ovoproduits, contre 4 pour la solution modèle. L'énergie de réduction décimale varie entre 30 et 40 kJ·kg⁻¹ pour la solution modèle, l'ultrafiltrat de blanc d'œuf à pH 6 et l'ultrafiltrat de blanc d'œuf additionné de lysozyme ; elle est comprise entre 120 et 150 kJ·kg⁻¹ pour le blanc d'œuf, le blanc d'œuf démuçiné, et l'ultrafiltrat de blanc d'œuf à pH 9 (Jeantet et al., 2004).

L'équipement de CEP utilisé (Europulse, Cressensac, France) (Figure 3.24) fait appel à une technologie originale de commutation par éclateur pressurisé (air sec) à taux de répétition élevé associée à une structure de type ligne de formation à constantes localisées et réparties. Un ordinateur permet de programmer la durée des impulsions rectangulaires générées (50 ns à 3 µs), l'amplitude du champ électrique (30 à 80 kV·cm⁻¹), la fréquence de répétition (1 à 815 Hz), le débit (1 à 10 l.h⁻¹) et la température maximale du produit atteinte après traitement (Jeantet et al., 2004).

La cellule est équipée d'un capteur de courant et d'un diviseur résistif permettant la mesure directe du courant et de la tension appliquée par un oscilloscope numérique TDS 3012 (Tektronix, Beaverton, États-Unis) (Jeantet et al., 2004).

La partie hydraulique est composée d'une cuve à double parois pour ajuster la température du produit, couplée à une pompe péristaltique à débit variable (0 à 25 l.h^{-1}), contrôlé par une balance située en queue d'installation. La cellule de traitement se compose de deux électrodes coaxiales distantes de 2 mm . L'élévation de température due au traitement est mesurée par deux thermocouples disposés en amont et aval de la cellule. Le produit est refroidi par un échangeur de chaleur disposé immédiatement après la cellule et alimenté par de l'eau glycolée.

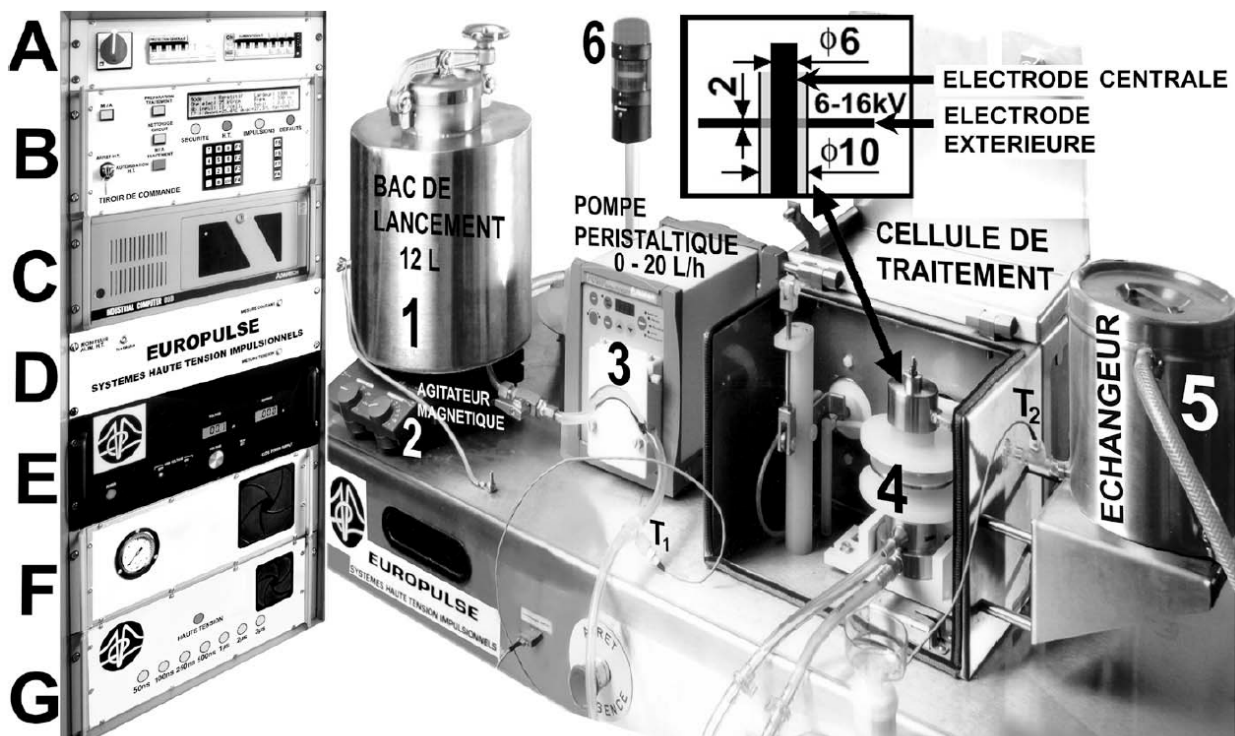


Figure 3.24 : Plate-forme pilote de traitement continu de produits liquides par CEP.

Coffret de commande et d'interface – A : alimentation électrique ; B et C : tiroir de commande et ordinateur ; D et E : moniteur et alimentation haute tension (50 kV , 2 kJ.s^{-1}) ; F : éclateur répétitif ($0 - 815 \text{ Hz}$) ; G : lignes de stockage haute tension (50 ns , 100 ns , 250 ns , 500 ns , $1 \mu\text{s}$, $2 \mu\text{s}$ et $3 \mu\text{s}$). Partie hydraulique – 1 : bac de lancement (12 L), 2 : agitateur magnétique, 3 : pompe péristaltique ($0 - 25 \text{ l.h}^{-1}$), 4 : cellule de traitement, 5 : échangeur de chaleur ; T1 et T2 : thermocouples (Jeantet et al., 2004).

3.22 Conclusion

Les caractéristiques de performance du CEP ont été présentées en se concentrant sur les priorités clés d'une application du CEP dans l'industrie. L'approche d'analyse systématique des procédés, incluant les aspects liés aux différents niveaux d'échelle et à la complexité, s'est

avérée précieuse pour révéler les aspects potentiels d'amélioration et de conception ciblée des procédés.

L'étude des effets du CEP sur les composés alimentaires était jusqu'à présent principalement axée sur les effets néfastes de la pasteurisation des liquides par CEP. Cependant, l'utilisation ciblée de champs électriques pour modifier les propriétés structurales et fonctionnelles des protéines ou des glucides semble avoir un fort potentiel pour devenir un domaine d'application prometteur pour la technologie CEP.

L'intégration du traitement CEP dans des concepts de traitement complexes nécessite la prise en compte des étapes de traitement connexes. Ceci est particulièrement pertinent pour l'application du CEP à la désintégration des matières premières végétales, car le traitement CEP sert de prétraitement aux étapes de traitement ultérieures telles que le séchage, l'extraction ou la récupération du jus.

Conception et simulation de deux générateurs haute tension

4 Conception et simulation de deux générateurs HT

4.1 Introduction

Une alimentation haute tension est un appareil conçu pour fonctionner à des niveaux de tension élevés, elle fournit une puissance précise et stable pour les applications nécessitant des milliers de volts, avec un minimum d'ondulation et de bruit.

Dans ce chapitre, le premier générateur haute tension continue proposer est basé sur le multiplicateur de tension Cockcroft-Walton, étudié dans plusieurs travaux de recherche, qui convertit le courant alternatif ou continu pulsé d'un niveau de tension faible à un niveau de tension continue plus élevé. Ce circuit électronique est constitué d'un réseau en cascade de condensateurs et de diodes. Il doit son nom à John Douglas Cockcroft (1897-1967 , physicien anglais) et Ernest Thomas Sinton Walton (1903- 1995, physicien irlandais), deux physiciens, ont partagé le prix Nobel de physique en 1951 pour leurs travaux pionniers sur la transmutation des noyaux atomiques à l'aide d'accélération artificielles de particules atomiques. Ils ont développé le premier accélérateur de particules nucléaires, le générateur Cockcroft-Walton, permettant d'accélérer les protons. La conception Cockcroft-Walton ou Geinacher est basée sur le multiplicateur série demi-onde, un doubleur de tension. Le deuxième générateur proposer est une alimentations haute tension d'impulsion nécessaires aux applications du champ électrique pulsé.

4.2 Conception d'un générateur haute tension DC

Le premier travail porte d'abord sur la conception et la simulation d'un générateur haute tension CC à huit étages en utilisant des diodes et des condensateurs en cascade Cockcroft-Walton. Ensuite, le circuit conçu et simulé, avec les composants nécessaires, servira à construire le générateur.

4.2.1 Circuit multiplicateur de tension

4.2.1.1 Circuit doubleur de tension Greinacher

Pour générer des tensions continues élevées, on utilise des circuits doubleurs de tension ou multiplicateurs de tension en cascade. L'un des circuits doubleurs les plus populaires, créé par Heinrich Greinacher (1880 -1974 , physicien suisse), est illustré à la figure 4.1 (Wadhwa, 2007).

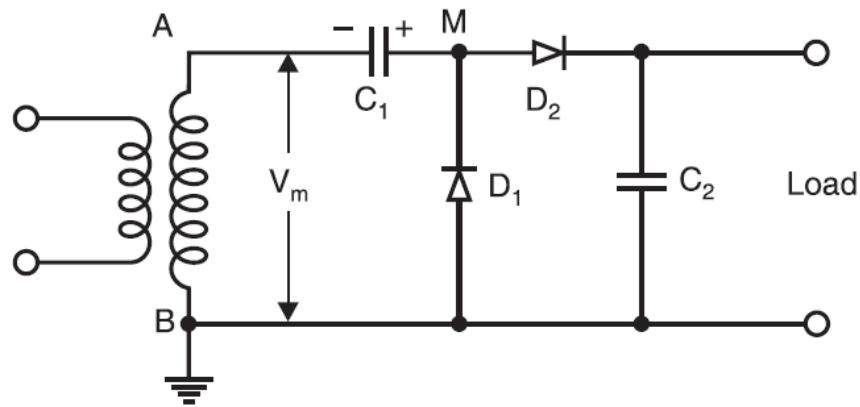


Figure 4.1 : Circuit doubleur de tension Greinacher

Supposons que B soit plus positif que A et que la diode D1 soit conductrice, chargeant ainsi le condensateur C1 à $V_{\max}$ avec la polarité indiquée sur la figure 4.1. Pendant le demi-cycle suivant, la borne A du condensateur C1 monte à $V_{\max}$ et la borne M atteint alors un potentiel de $2 V_{\max}$. Le condensateur C2 est ainsi chargé à $2 V_{\max}$ via D2. Normalement, la tension aux bornes de la charge est inférieure à $2 V_{\max}$, selon la constante de temps du circuit $C_2 R_L$.

4.2.1.2 Multiplicateur COCKCROFT-WALTON

Cockcroft-Walton est un multiplicateur de tension qui convertit le courant alternatif ou continu pulsé d'une tension basse à une tension continue plus élevée. En 1932, Cockroft et Walton ont suggéré une amélioration du circuit développé par Greinacher pour produire des tensions continues élevées. La figure 4.2 montre un circuit en cascade monophasé à plusieurs étages de type Cockcroft-Walton.

a) Fonctionnement à vide :

La partie ABM'MA est identique au circuit doubleur de tension Greinacher et la tension aux bornes de C atteint $2 V_{\max}$ lorsque M atteint une tension de $2 V_{\max}$. Lors du demi-cycle suivant, lorsque B devient positif par rapport à A, le potentiel de M chute et, par conséquent, le potentiel de N chute également, devenant inférieur au potentiel de M', ce qui charge C2 via D2. Le demi-cycle suivant, A devient plus positif et les potentiels de M et N augmentent, chargeant C'2 via D'2. Enfin, tous les condensateurs C'1, C'2, C'3, C1, C2 et C3 sont chargés.

La tension aux bornes de la colonne de condensateurs composée de C1, C2 et C3 continue d'osciller lorsque la tension d'alimentation varie. Cette colonne est donc dite oscillante. Cependant, la tension aux bornes des capacités C'1, C'2 et C'3 reste constante et est appelée colonne de lissage.

Les tensions aux bornes de M' , N' et O' sont de $2 V_{max}$, $4 V_{max}$ et $6 V_{max}$. Par conséquent, la tension aux bornes de tous les condensateurs est de $2 V_{max}$, sauf pour C_1 , où elle est uniquement de V_{max} . La tension de sortie totale est de $2n V_{max}$, où n est le nombre d'étages. Ainsi, l'utilisation de plusieurs étages disposés de la manière illustrée permet d'obtenir une tension très élevée. L'homogénéité des contraintes des éléments (condensateurs et diodes) utilisés est très avantageuse et favorise la conception modulaire de tels générateurs (Wadhwa, 2007).

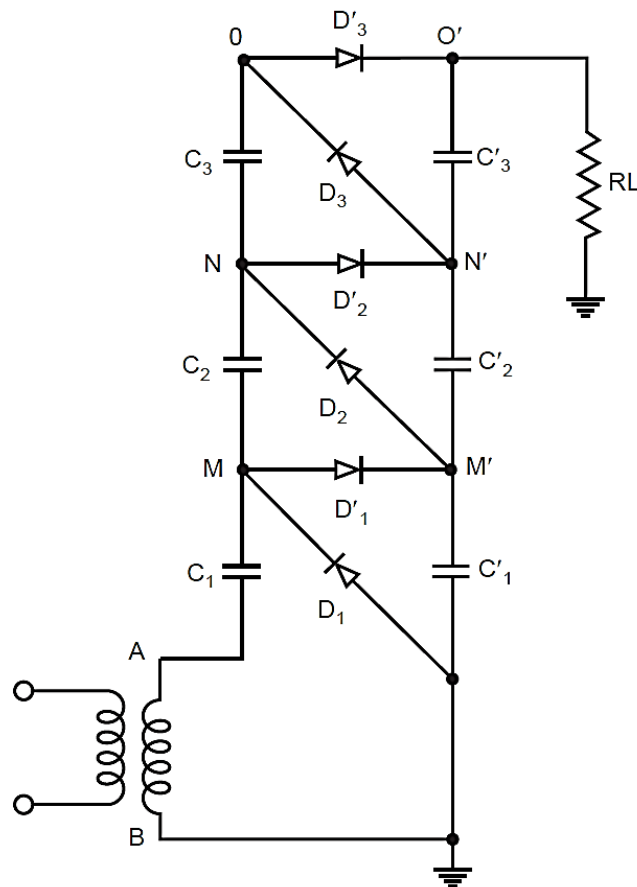


Figure 4.2: Circuit monophasé en cascade multi-étages de type Cockcroft-Walton

b) Fonctionnement en charge :

Lorsque le générateur est en charge, la tension de sortie n'atteint jamais la valeur $2n V_{max}$. De plus, l'onde de sortie est constituée d'ondulations de tension. Nous devons donc prendre en compte deux grandeurs : la chute de tension ΔV et l'ondulation δV (Wadhwa, 2007).

Supposons qu'une charge q soit transférée à la charge par cycle. Cette charge est $q = I/f = IT$ ($T = 1/f$ (période), I est la valeur moyenne du courant à la sortie CC). La charge provient de la colonne de lissage, la connexion en série de C'_1 , C'_2 , C'_3 . Si aucune charge n'était transférée

pendant T de cette pile via D1, D2, D3 vers la colonne oscillante, l'ondulation crête à crête serait simplement

$$2\delta V = IT \sum_{n=0}^n \frac{1}{C_i} \quad (4-1)$$

Pour un circuit à n étages, l'ondulation totale sera ;

$$\delta V = \frac{I}{2f} \left(\frac{1}{C_n} + \frac{2}{C_{n-1}} + \frac{3}{C_{n-2}} + \dots + \frac{n}{C_1} \right) \quad (4-2)$$

L'équation (4-2) montre clairement que, dans un circuit à plusieurs étages, les condensateurs les plus faibles sont responsables de la majeure partie de l'ondulation. Il est donc souhaitable d'augmenter la capacité des étages inférieurs. Cependant, cela est problématique dans un circuit haute tension : si la charge est importante et que la tension de charge diminue, les condensateurs les plus petits (à l'intérieur de la colonne) seraient surchargés. Par conséquent, des condensateurs de même valeur sont utilisés dans les circuits pratiques, c'est-à-dire que $C_n = C_{n-1} = \dots = C_1 = C$ et que l'ondulation est donnée par :

$$\delta V = \frac{I}{2fC} \frac{n(n+1)}{2} = \frac{In(n+1)}{4fC} \quad (4-3)$$

La deuxième quantité à évaluer est la chute de tension ΔV qui est la différence entre la tension théorique à vide $2nV_{max}$ et la tension en charge (Wadhwa, 2007).

En général, pour un générateur à n étages :

$$\Delta V_n = \frac{nI}{fC} \quad (4-4)$$

$$\Delta V = \Delta V_n + \Delta V_{n-1} + \dots + \Delta V_1 \quad (4-5)$$

Et,

$$T = \frac{2}{3}n^3 + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \quad (4-6)$$

Ici encore, les condensateurs les plus faibles contribuent le plus à la chute de tension ΔV ; il est donc avantageux d'augmenter leur capacité par paliers appropriés. Cependant, seul un doublement de C_1 est avantageux, car ces condensateurs ne doivent supporter que la moitié de la tension des autres condensateurs.

Par conséquent, ΔV_1 diminue d'une valeur nI/fC , ce qui réduit la valeur ΔV de chaque étage d'autant, soit de $n \cdot \frac{nI}{2fC}$.

Ainsi,

$$\Delta V = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3} n^3 - \frac{n}{6} \right) \quad (4-7)$$

Si $n \geq 4$, nous constatons que le terme linéaire peut être négligé et, par conséquent, la chute de tension peut être approximée à :

$$\Delta V \approx \frac{I}{fC} \cdot \frac{2}{3} n^3 \quad (4-8)$$

La tension de sortie maximale est donnée par :

$$V_{0\max} = 2nV_{\max} - \frac{I}{fC} \cdot \frac{2}{3} n^3 \quad (4-9)$$

D'après l'équation (4-9), il ressort clairement que pour un nombre d'étages, une fréquence et une capacité donnés, la tension de sortie diminue linéairement avec le courant de charge I .

Pour une charge donnée, cependant, $V_0 = (V_{0\max} - V)$ peut initialement augmenter avec le nombre d'étages n , puis atteindre une valeur maximale, puis décroître au-delà du nombre optimal d'étages. Le nombre optimal d'étages, en supposant $V_{\max}$, I , f et C constants, peut être obtenu pour la valeur maximale de $V_{0\max}$ en différenciant l'équation (4-9) par rapport à n et en l'égalant à zéro (Wadhwa, 2007).

$$\frac{dV_{\max}}{dn} = 2V_{\max} - \frac{2}{3} \frac{I}{fC} 3n^2 = 0 \quad (4-10)$$

$$\frac{dV_{\max}}{dn} = V_{\max} - \frac{I}{fC} n^2 = 0 \quad (4-11)$$

Donc,
$$n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{\max} fC}{I}} \quad (4-12)$$

En remplaçant n_{opt} dans l'équation (4-9), nous avons :

$$(V_{0\max})_{\max} = \sqrt{\frac{V_{\max} fC}{I}} \cdot \frac{4}{3} V_{\max} \quad (4-13)$$

Il convient de noter qu'en général, il est plus économique d'utiliser une fréquence élevée et une valeur de capacité plus faible pour réduire les ondulations ou la chute de tension plutôt qu'une basse fréquence et une capacité élevée (Wadhwa, 2007).

4.2.2 Critères de conception

4.2.2.1 Sélection de condensateur

La taille des condensateurs utilisés dans un circuit multiplicateur est directement proportionnelle à la fréquence du signal d'entrée. Les condensateurs utilisés dans les applications hors ligne à 50 Hz sont généralement compris entre 1,0 et 200 microfarads. Ceux utilisés dans les applications haute fréquence, par exemple à 10 kHz, sont généralement compris entre 0,02 et 0,06 microfarads (Dwivedi & Daigavane, 2011).

La tension nominale d'un condensateur est déterminée par le type de circuit multiplicateur. Le condensateur doit pouvoir supporter une tension maximale dépendant du nombre d'étages utilisés. Une bonne règle générale consiste à choisir un condensateur dont la tension nominale est environ deux fois supérieure à la tension de crête appliquée.

4.2.2.2 Sélection de diodes

Avant de sélectionner la diode, les paramètres de base du dispositif doivent être pris en compte :

a) Tension inverse de crête répétitive :

La tension inverse de crête répétitive correspond à la valeur instantanée maximale de la tension inverse aux bornes de la diode. Une tension inverse appliquée en dessous de cette valeur maximale ne produira qu'un courant de fuite négligeable dans le dispositif. En revanche, une tension supérieure à cette valeur maximale peut entraîner un dysfonctionnement du circuit, voire des dommages permanents aux composants, car un courant de fuite suffisant traversera le dispositif. Dans le cas d'un circuit multiplicateur, la tension inverse observée par chaque diode est de $2 V_{\max}$. Le dispositif doit donc être sélectionné avec un réglage de tension inverse (VRRM) d'au moins $2 V_{\max}$ (Dwivedi & Daigavane, 2011).

b) Fréquence du signal d'entrée :

Lors du choix d'une diode de redressement, la fréquence du signal d'entrée du circuit multiplicateur doit être prise en compte. Pour les signaux d'entrée symétriques, le dispositif choisi doit être capable de commuter à une vitesse supérieure aux temps de montée et de descente de l'entrée.

Un temps de recouvrement inverse trop long affectera l'efficacité et la régulation du dispositif. Dans le pire des cas, un temps de recouvrement insuffisant entraînera un échauffement du dispositif, ce qui entraînera des dommages permanents. Le temps de recouvrement inverse dépend fortement du circuit et des conditions de mesure.

La spécification du temps de recouvrement inverse doit être utilisée à des fins qualitatives et non quantitatives, car les conditions spécifiées pour la mesure reflètent rarement celles du fonctionnement réel du circuit. La diminution du flux de courant dans le circuit multiplicateur permet d'utiliser une fréquence d'entrée plus élevée. Une augmentation du flux de courant a l'effet inverse. Idéalement, la charge du réseau multiplicateur ne devrait consommer aucun courant (Dwivedi & Daigavane, 2011).

c) Courant de pointe direct (Ifsm) :

Le courant de crête nominal de surtension directe est indiqué pour la plupart des diodes de redressement. Cette valeur correspond à la valeur crête maximale d'une demi-onde sinusoïdale unique qui, superposée au courant de charge nominal du dispositif, peut être transmise sans endommager le redresseur. Cette valeur est importante compte tenu de la capacité importante associée au réseau multiplicateur. Des surtensions peuvent se développer dans les circuits redresseurs en raison des effets de charge capacitive (Dwivedi & Daigavane, 2011).

d) Courant direct (I0) :

Comme indiqué précédemment, dans un circuit multiplicateur idéal, la charge ne consomme aucun courant. Idéalement, un courant important traverse le redresseur pendant la charge du condensateur. Par conséquent, des dispositifs à très faible courant nominal (100 mA) et, dans le cas de câbles haute tension, des microampères peuvent être utilisés. Il est important de noter que le courant direct et le courant de pointe direct sont liés (Dwivedi & Daigavane, 2011).

e) Tension directe (Vf) :

En pratique, la chute de tension directe V_f du redresseur n'a pas d'effet significatif sur le rendement global du réseau multiplicateur.

4.2.3 Schéma de circuit

Pour réaliser les étapes nécessaires à la conception, à la simulation et au développement de l'alimentation CC proposée, le circuit requis pour construire le générateur haute tension CC à huit étages est illustré à la figure 4.3. Le générateur est branché directement à une source d'alimentation CA variable de 0 à 230 V et de fréquence 50 Hz, sans transformateur. Les autres

composants, condensateurs et diodes, seront choisis en fonction des critères généraux de conception.

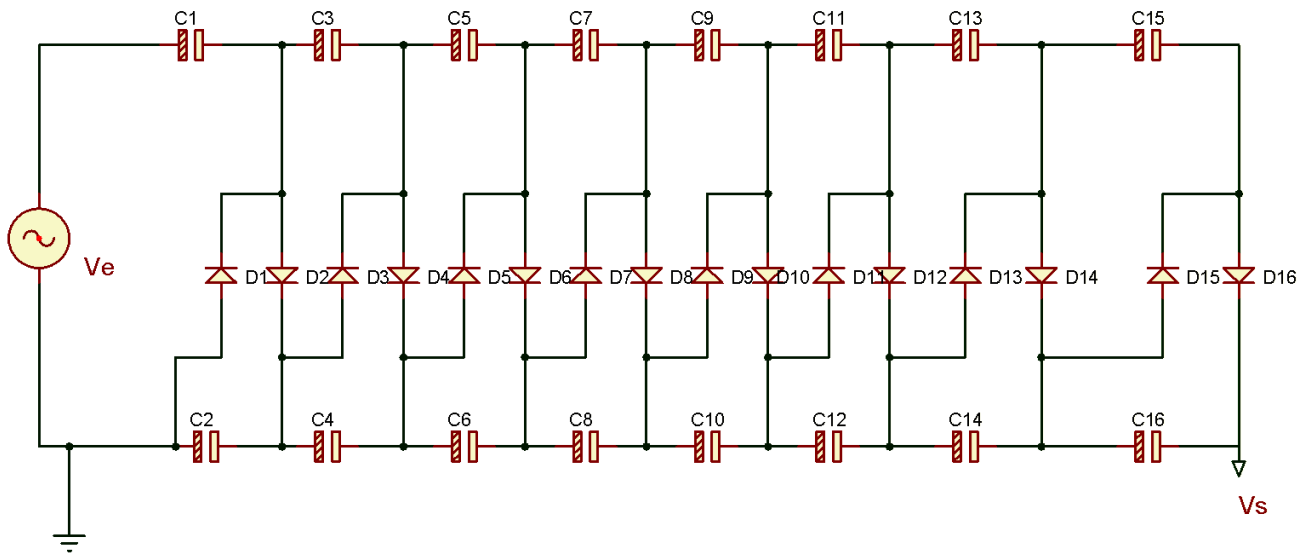


Figure 4.3 : Générateur haute tension CC à huit étages

Les condensateurs C1, C3, C5, C7, C9, C11, C13, C15 constituent la partie oscillante car la tension aux bornes de ces condensateurs varie avec le temps, tandis que les condensateurs C2, C4, C6, C8, C10, C12, C14, C16 constituent la partie de lissage puisque la tension de sortie continue est assez constante. La tension de sortie CC (V_s) est égale à deux fois la tension d'entrée crête ($V_e \text{ max}$) multipliée par le nombre d'étages. Ainsi, pour le circuit ci-dessus, une tension maximale de $V_s = 2 \times 8 \times V_e \text{ max}$ est possible. En pratique, la tension de sortie CC est nettement inférieure, surtout lorsque le nombre d'étages est élevé.

Conformément aux critères de conception généraux précédents et aux exigences pratiques du matériel, les données et spécifications des éléments sélectionnés du générateur haute tension sont présentées dans le tableau 4-1.

Tableau 4-1 : Données et spécifications des paramètres du générateur haute tension CC

Paramètre	valeur
Etages	8
Tension d'alimentation	0-230 V
Fréquence d'alimentation	50 Hz
Condensateurs	100 μF
Diodes	1N5408

4.2.4 Simulation et travaux expérimentaux

4.2.4.1 Circuit d'alimentation AC variable (0-230 V)

Les travaux de simulation ont été réalisés à l'aide du logiciel Proteus Pro 8.17 SP5. Les figures 4.4 et 4.5 présentent le schéma du circuit d'alimentation AC variable (0-230 V) et le résultat de simulation respectivement. Ce circuit délivre aussi une tension DC variable.

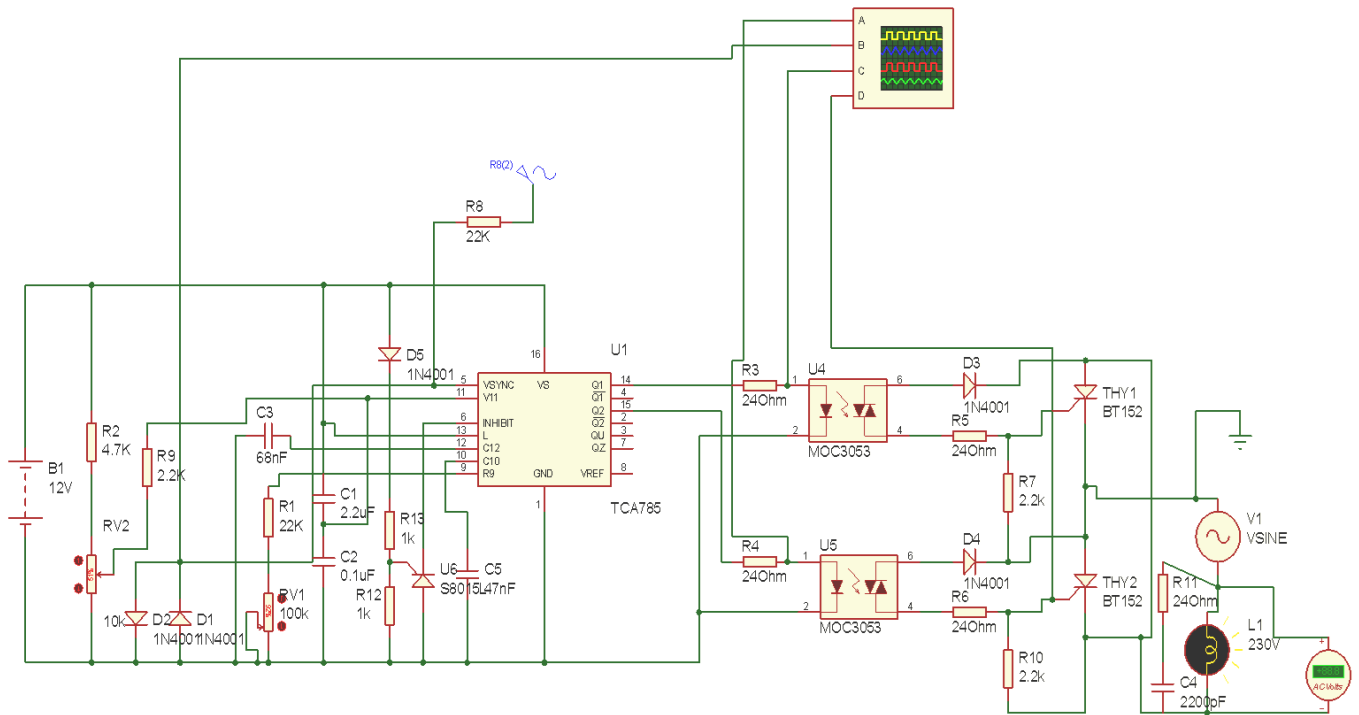


Figure 4.4 : Schéma du circuit de l'alimentation AC variable 0-230V

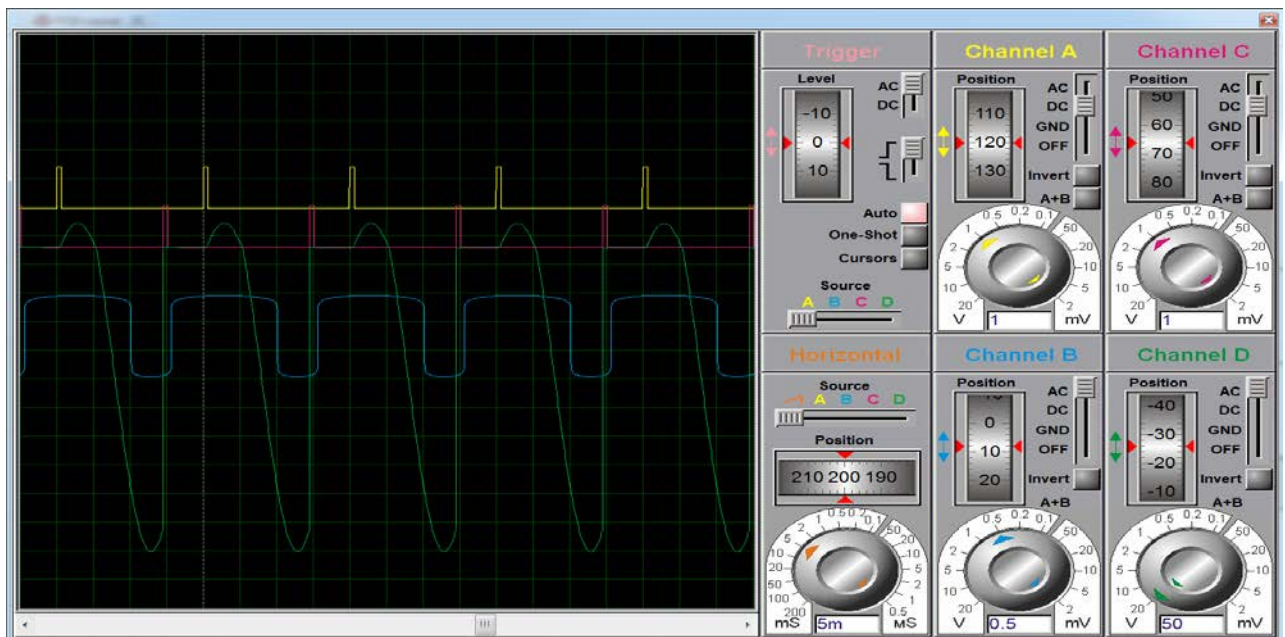


Figure 4.5 : Signaux de la simulation de l'alimentation AC variable 0-230V

Les signaux dans la figure 4.5 indiquent :

- Signal de commande de thyristor 1 (Signal en Jaune)
- Signal de commande de thyristor 2 (Signal en rouge)
- Signal de synchronisation d'amorçage des thyristors (Signal en bleu)
- Signal d'alternance négatif de sortie (Signal en vert)

La simulation du circuit de l'alimentation variable AC (0-230V) indique que pour obtenir une tension alternative variable, le générateur utilise des moyens de commutation pour commander les phases d'une source de tension alternative, générant des signaux qui actionnent des interrupteurs marche/arrêt (comme des thyristors), produisant ainsi une tension de sortie qui correspond étroitement à la tension souhaitée.

Les circuits réalisés de la commande, du circuit de puissance et de driver (pilote) de l'alimentation basse tension variable sont présentés dans les figures 4.6 et 4.7 respectivement. Le tableau 4-2 présente les composants utilisés.

Tableau 4-2 : liste des composants utilisés dans l'alimentation variable

Composants	valeurs
Résistances	100k Ω , 27k Ω , 22k Ω , 2.2k Ω , 1k Ω , 820 Ω , 330 Ω , 270 Ω .
Résistances variables	100k Ω , 10k Ω
Condensateurs	470 μ f, 47 μ f, 10 μ f, 100nf, 68nf, 47nf, 10nf.
Diodes	1N5408, 1N4007, 1N4148, LED.
Thyristors	BT152
Optocoupler	4N40, MOC3053
Circuits intégrés	TCA785 , LM7812

Le circuit présenté dans les figures 4.6 et 4.7 permet de contrôler et varier la tension de sortie et le courant AC, et elle permet aussi de convertir le courant alternatif (AC) en courant continu (DC).

Cette alimentation basse tension variable testée en laboratoire (Figure 4.8) est utilisée dans l'alimentation du générateur haute tension DC, elle a aussi plusieurs applications dans l'industrie comme dans les systèmes de contrôle de la vitesse et le couple des moteurs, pour contrôler l'intensité lumineuse dans les systèmes d'éclairage LED, et dans les systèmes automatisés pour le contrôle des processus.

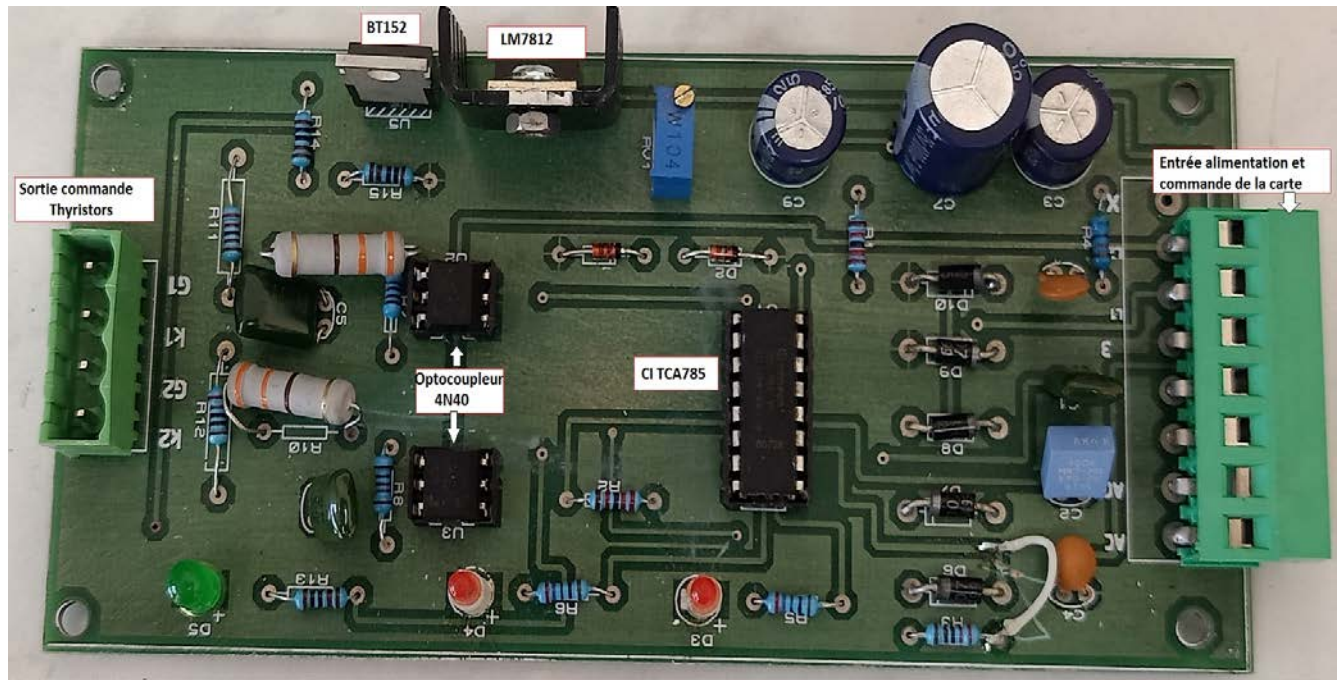


Figure 4.6 : Circuit de commande de l'alimentation AC variable 0-230V et DC variable

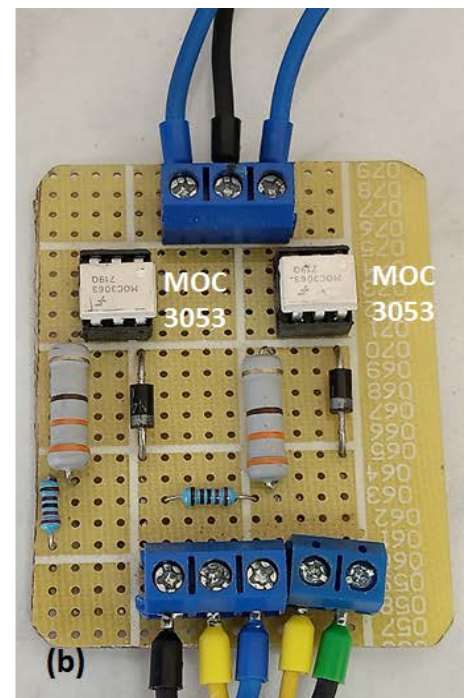
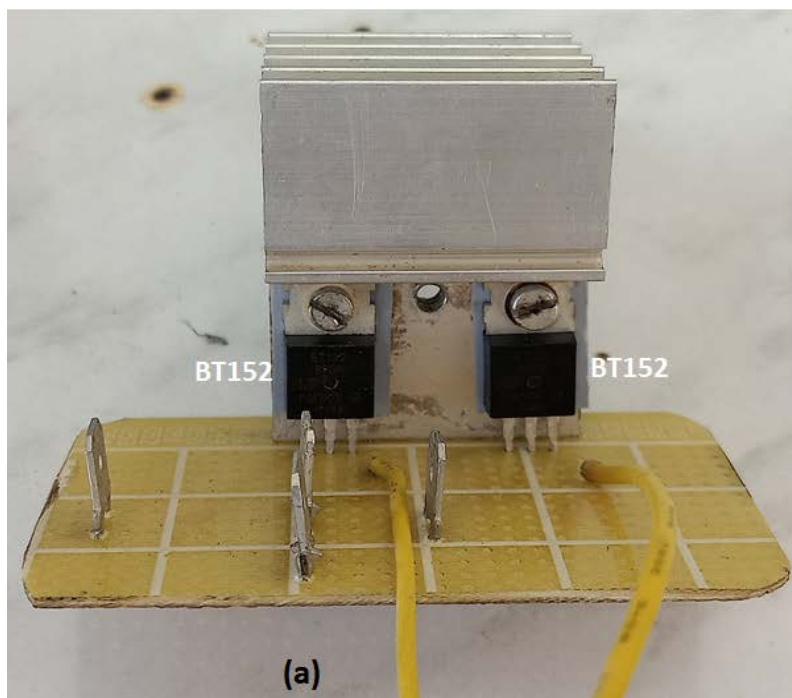


Figure 4.7 : Circuit de puissance et driver (pilote)

(a) Circuit de puissance avec thyristors BT152

(b) Circuit driver des thyristors avec photoTriac Optocoupleurs Moc 3053

Le thyristor BT152 est un redresseur commandé au silicium (SCR), est principalement utilisé dans les dispositifs électriques/électroniques nécessitant une commutation haute puissance et haute tension.

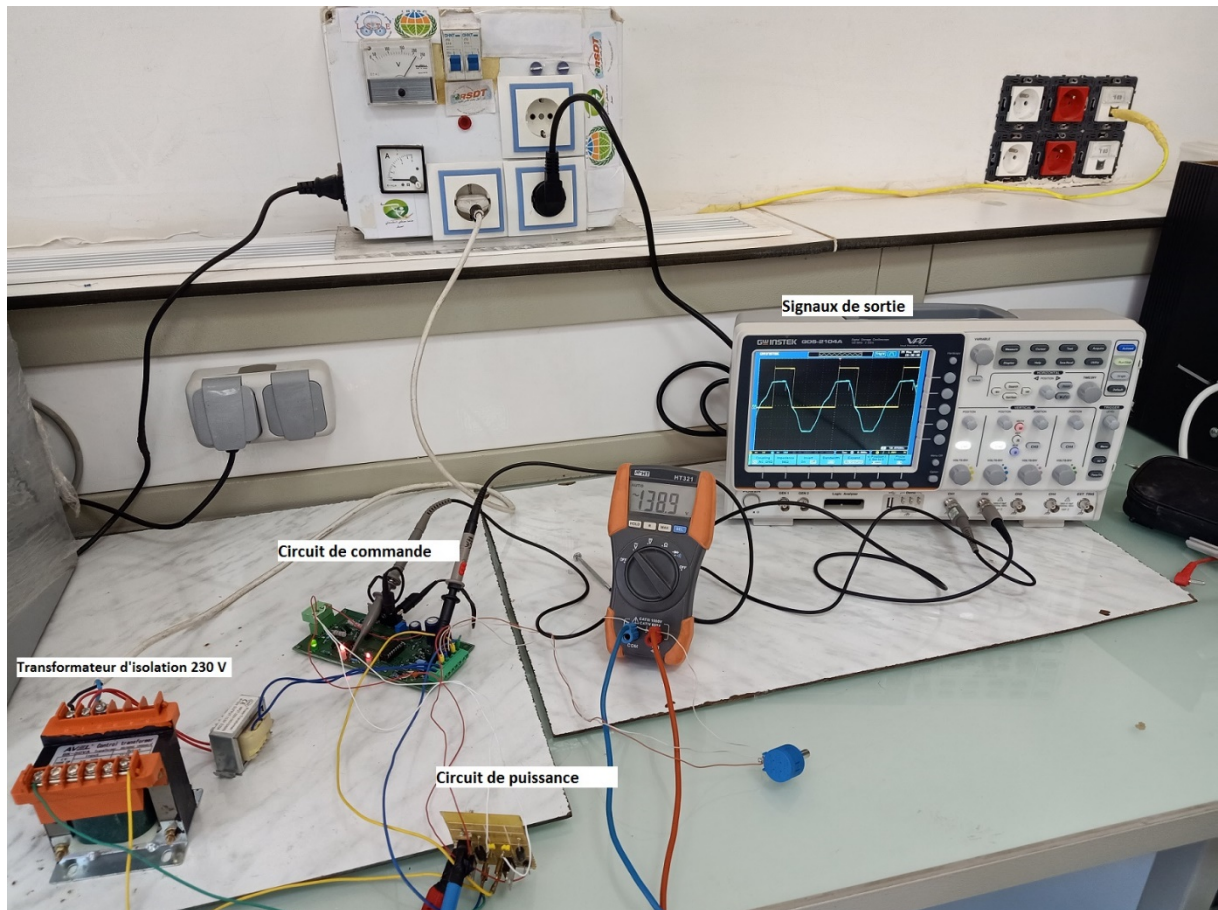


Figure 4.8 : Test de l'alimentation AC variable 0-230V

4.2.4.2 Circuit du générateur haute tension DC

La figure 4.9 présente le circuit de simulation du générateur haute tension DC à huit étages.

La tension de sortie est mesurée directement avec voltmètre haute tension et à l'aide d'un diviseur de tension résistif composé de deux résistances $R_1=47\text{M}\Omega$ et R_2 (pied du diviseur) = $47\text{k}\Omega$. La tension lue sur le voltmètre basse tension est multipliée par le rapport de division $(R_1+R_2)/R_2$ et puisque $R_1 \gg R_2$, le rapport de division est égale à 1000. Comme le montre la figure 4.9, la tension lue sur le voltmètre basse tension est de 5.2V et en multipliant par 1000, on obtient une valeur de 5,2 kV comme elle est indiquée sur le voltmètre haute tension.

La tension d'entrée du générateur haute tension DC réalisé sur la base du multiplicateur de tension Cockcroft-Walton de 08 étages a été variée de 0 à 230V et sa tension de sortie a été comparée à la tension théorique à vide qui est égale :

$$V_s = 2NV_{\text{max}} = 2.8 \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = 5,2 \text{ kV} \quad (4-14)$$

Avec : $N=8$ (nombres d'étages)

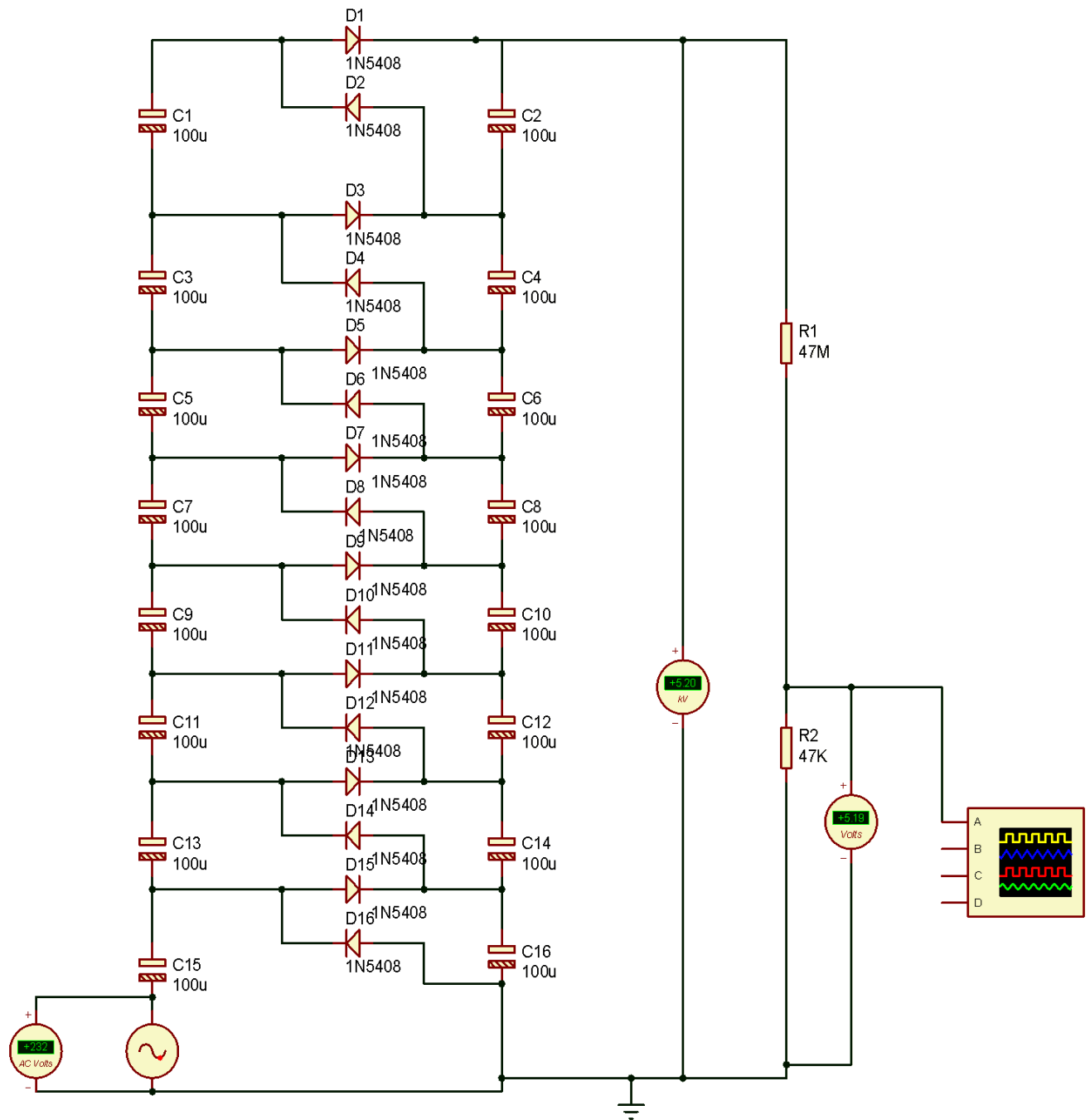


Figure 4.9 : Circuit de simulation du générateur haute tension DC à huit étages

La forme d'onde de la tension de sortie HTDC est continue, et a été obtenue par la simulation par logiciel PSIM (Figure 4.10). On remarque que la valeur de la haute tension est proportionnelle au temps de chargement des condensateurs :

- Une tension de 3.44 kV est obtenue en 2s
- Une tension de 4.6 kV est obtenue en 4s
- Une tension de 4.97 kV est obtenue en 6s
- Une tension de 5.11 kV est obtenue en 8s

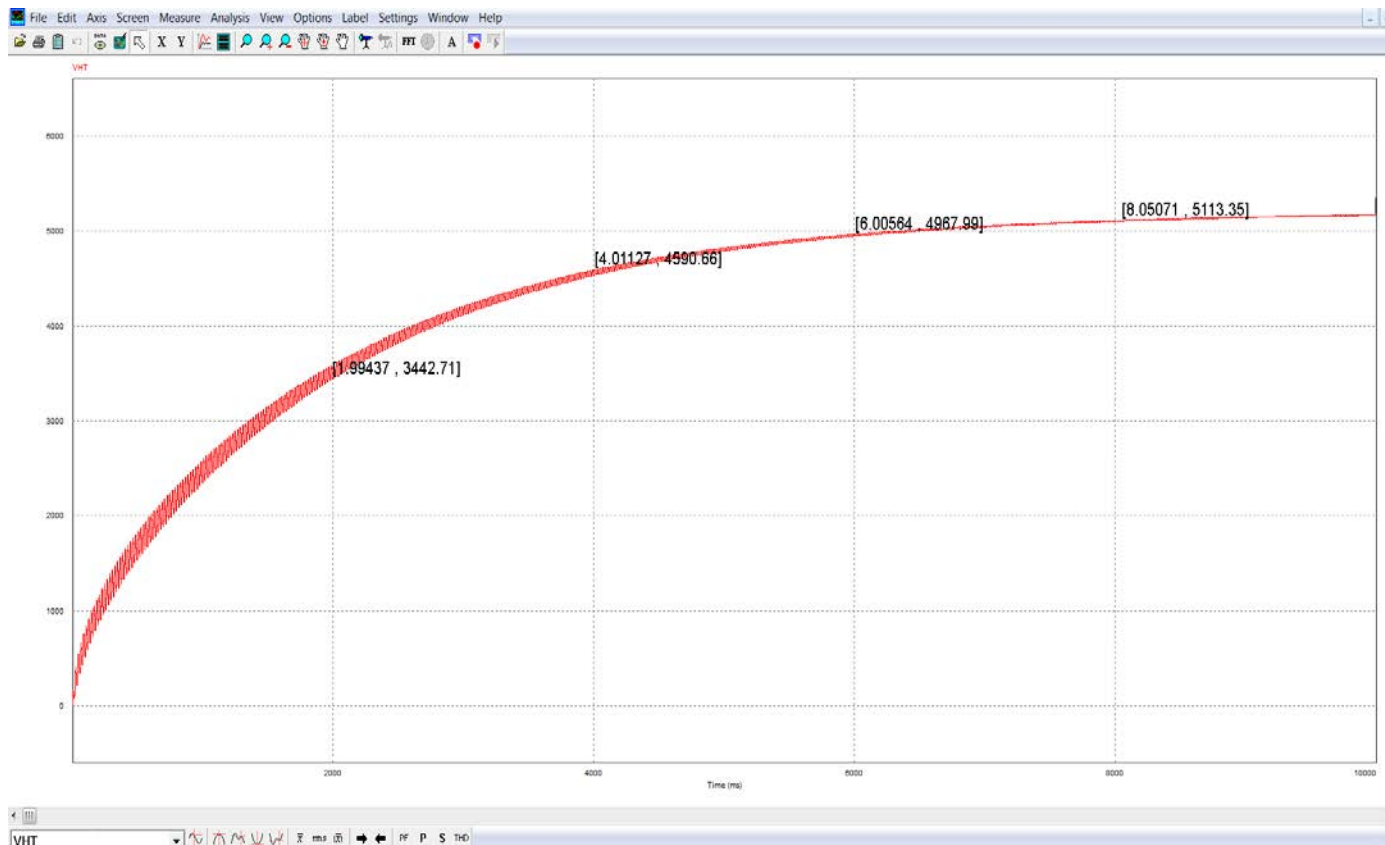


Figure 4.10 : forme d'onde et temps de chargement du générateur HT

La figure 4.11 est une photographie d'un prototype développé en laboratoire pour un circuit multiplicateur de tension Cockcroft-Walton à huit étages (8 étages). Le test du générateur est présenté par la figure 4.12, pour augmenter la tension des condensateurs, chaque condensateur ($C_1, C_2, \dots, C_{16}$) de chaque étage est constitué de deux condensateurs en série de $100\mu\text{F}/400\text{V}$.

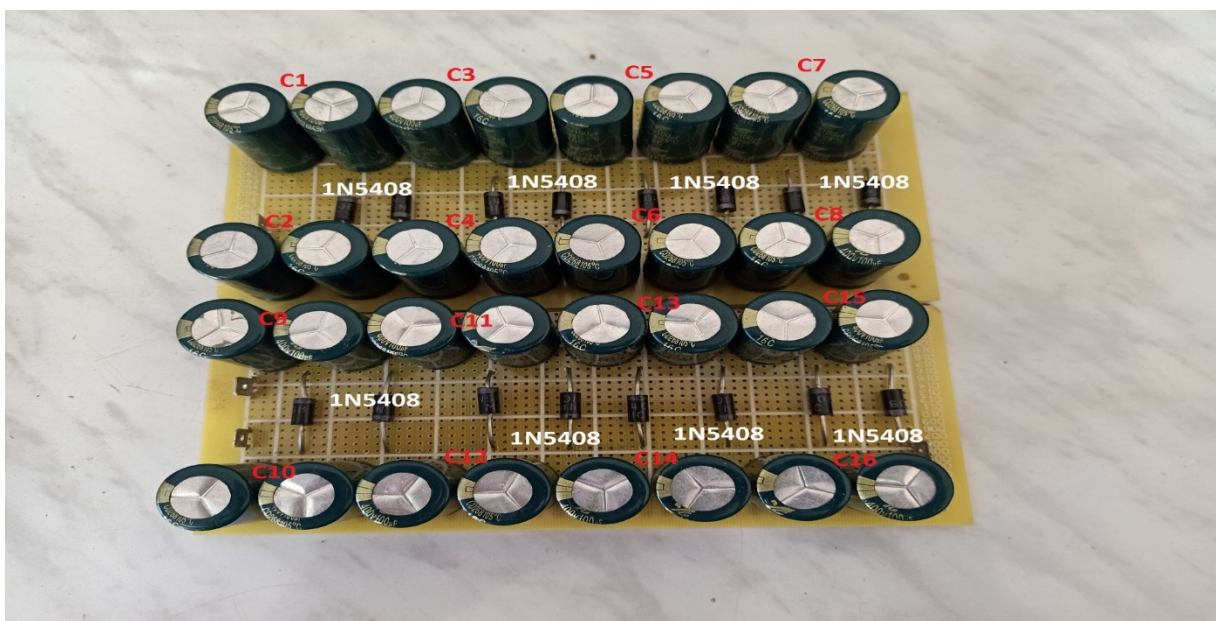


Figure 4.11 : Circuit du générateur HT à 8 étages avec condensateurs $100\mu\text{F}$ et diodes 1N5408

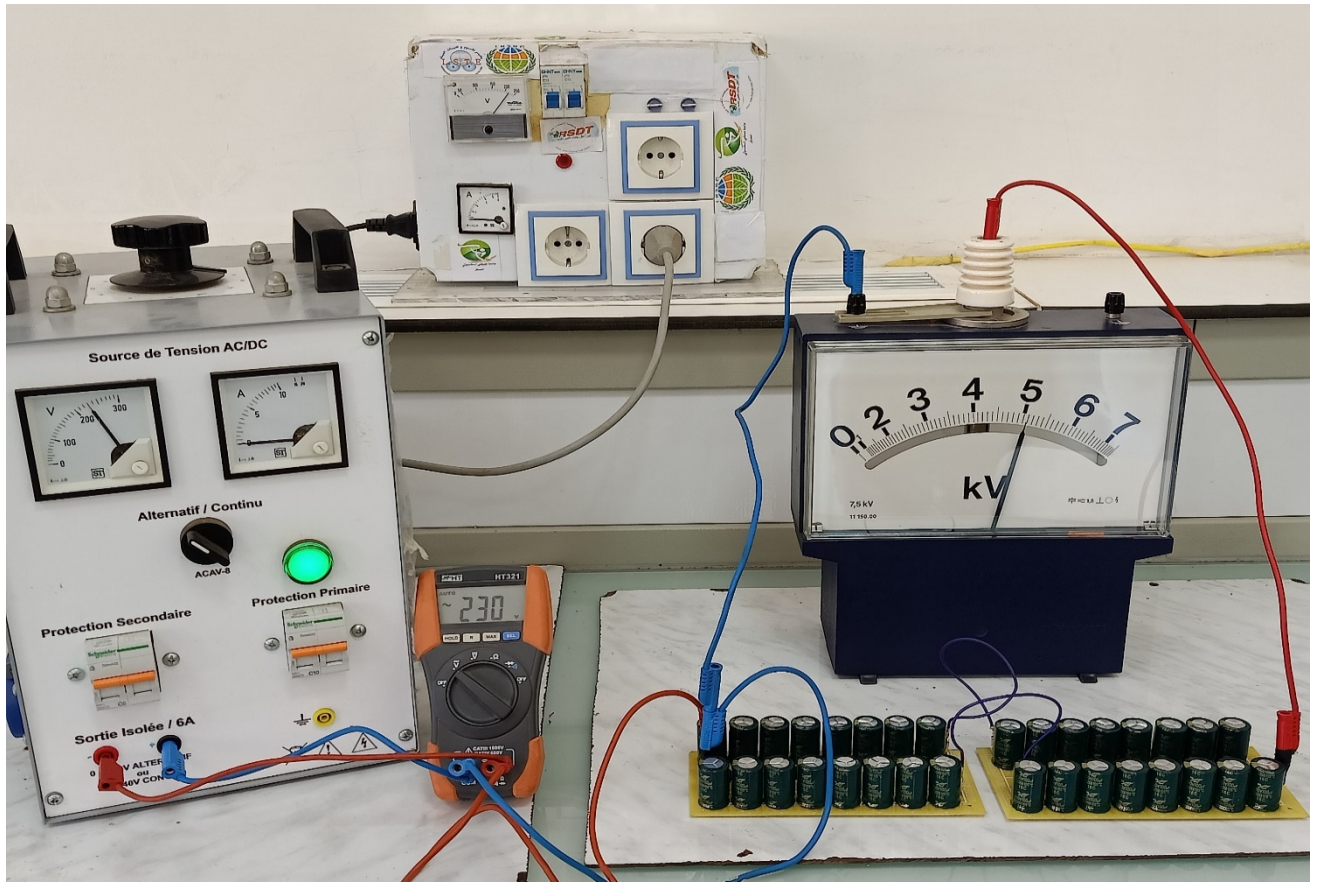


Figure 4.12 : Test du générateur haute tension DC à huit étage

La figure 4.13 présente les valeurs de la tension de sortie du générateur (expérimentale et théorique) en fonction de la tension d'entrée. On remarque que la tension réelle obtenue est proche du calcul théorique et de la simulation.

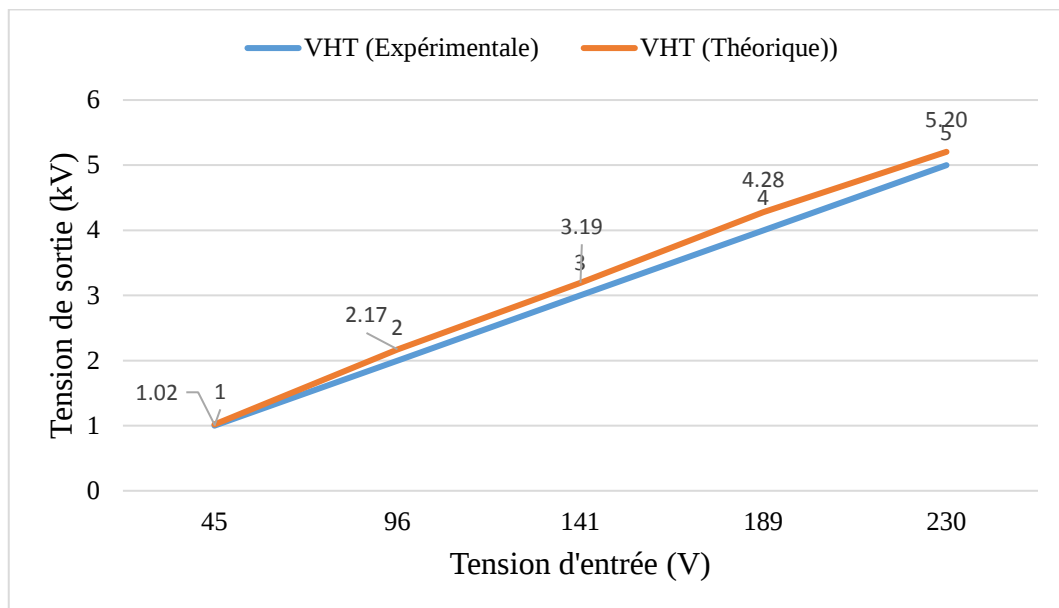


Figure 4.13 : les valeurs de la tension théorique et expérimentale

L'équation 4-8 montre que pour un nombre d'étages $n \geq 4$, la résistance maximale de la charge peut s'écrire :

$$R_L \approx \frac{2}{3fC} n^3 \quad (4-15)$$

Pour $n=8$, $f=50$ Hz et $C=50\mu\text{F}$ (02 condensateurs de $100\mu\text{F}$ en série), $R_L \approx 137\text{ k}\Omega$.

La figure 4.14 montre que la chute de tension augmente avec le courant de charge. Cela signifie que plus la charge capacitive (dans le cas des câbles HT) augmente, plus la chute de tension est importante.

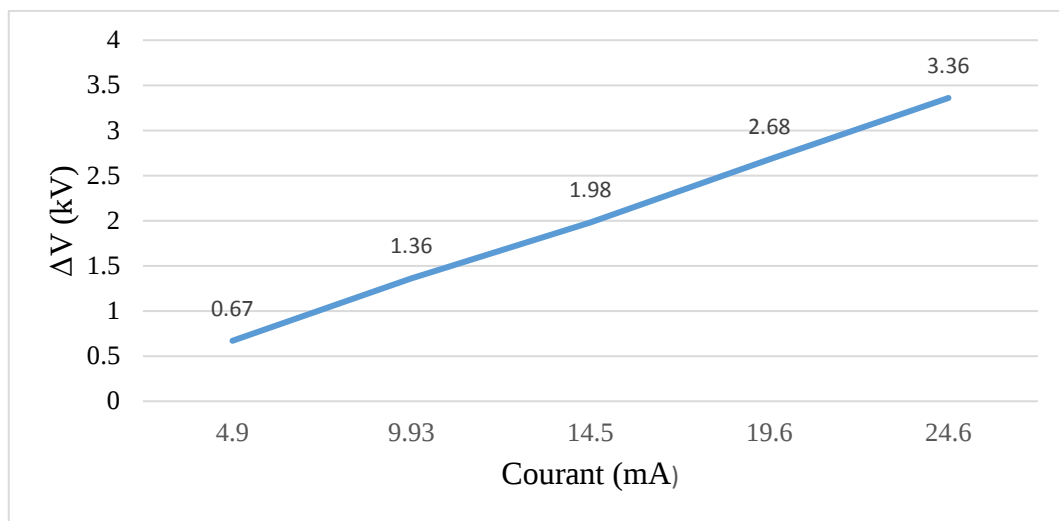


Figure 4.14 : Courant de charge en fonction de la chute de tension

La figure 4.15 illustre la caractéristique du courant de charge par rapport à la tension d'ondulation. La tension d'ondulation augmente avec le courant de charge.

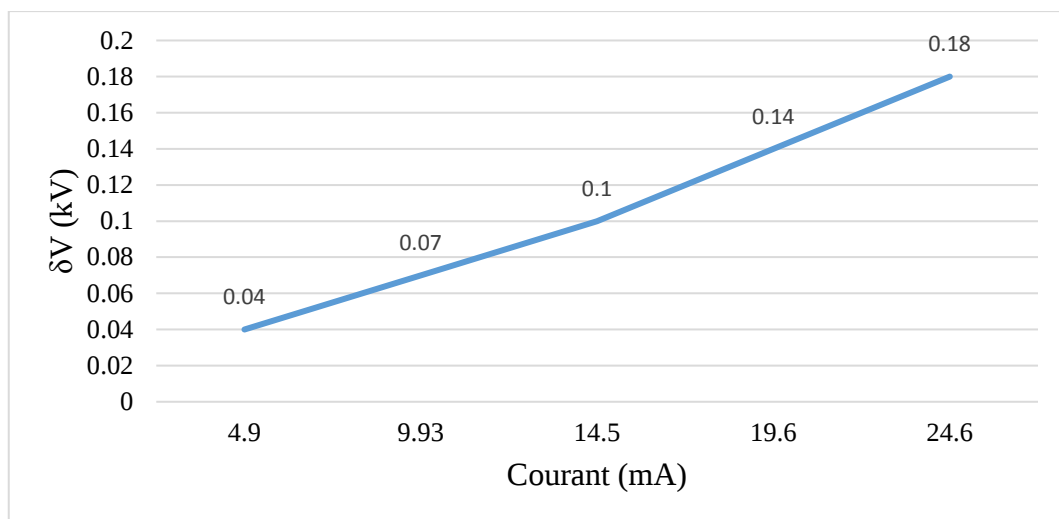


Figure 4.15 : Courant de charge en fonction de la tension d'ondulation

Le générateur haute tension DC présente la partie essentielle dans un système de traitement par champ électrique pulsé comme indique la figure 4.16. Le générateur sert à charger les condensateurs puis l'énergie stockée est restituée dans la chambre de traitement à travers l'éclateur.

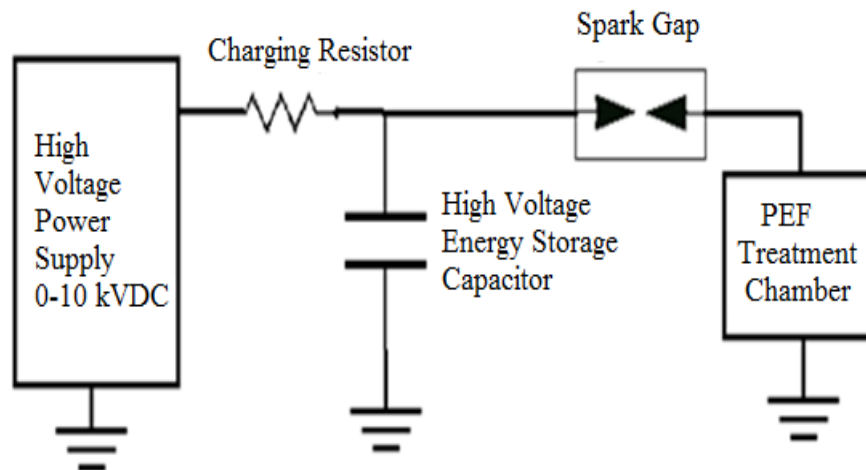


Figure 4.15 : Alimentation haute tension DC dans un système de CEP

4.3 Conception d'un générateur haute tension d'impulsion

Les IGBT sont utilisés depuis de nombreuses, ils agissent comme des interrupteurs contrôlables et reçoivent des signaux de commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour générer des tensions d'amplitude et de fréquence réglables. La conception et la fabrication d'un générateur d'impulsion haute tension font appel à de nombreuses techniques et méthodes, telles que l'utilisation d'un transformateur haute tension à noyau de ferrite. Ce générateur d'impulsion est souvent utilisé dans des applications telles que :

- Les alimentations à haute tension pour tubes néon.
- Les systèmes de soudage par points.
- Les dispositifs de décharge capacitive.
- Système de traitement par champ électrique pulsé

La méthode suivie pour la conception et la construction consiste à déterminer les paramètres principaux, à calculer les valeurs requises, à analyser le circuit par ordinateur avec logiciel Proteus Pro 8.17 SP5, puis à construire les circuits de commande et de puissance afin de l'assembler avec le circuit haute tension qui sera construit.

4.3.1 Simulation et travaux expérimentaux

4.3.1.1 Schéma général du générateur d'impulsions haute tension

La figure 4.16 présente le schéma général du générateur d'impulsions haute tension. La topologie de base du circuit est un circuit de puissance utilisant des Mosfets et un circuit de commande utilisant un circuit intégré TL494 qui commande le primaire d'un transformateur HT à noyau de ferrite. Il est capable de produire une onde carrée avec des temps de montée et de descente variables. L'étude de simulation a été réalisée avec le logiciel Proteus Pro 8.17 SP5 afin de concevoir et de contrôler les études de développement spécifiées.

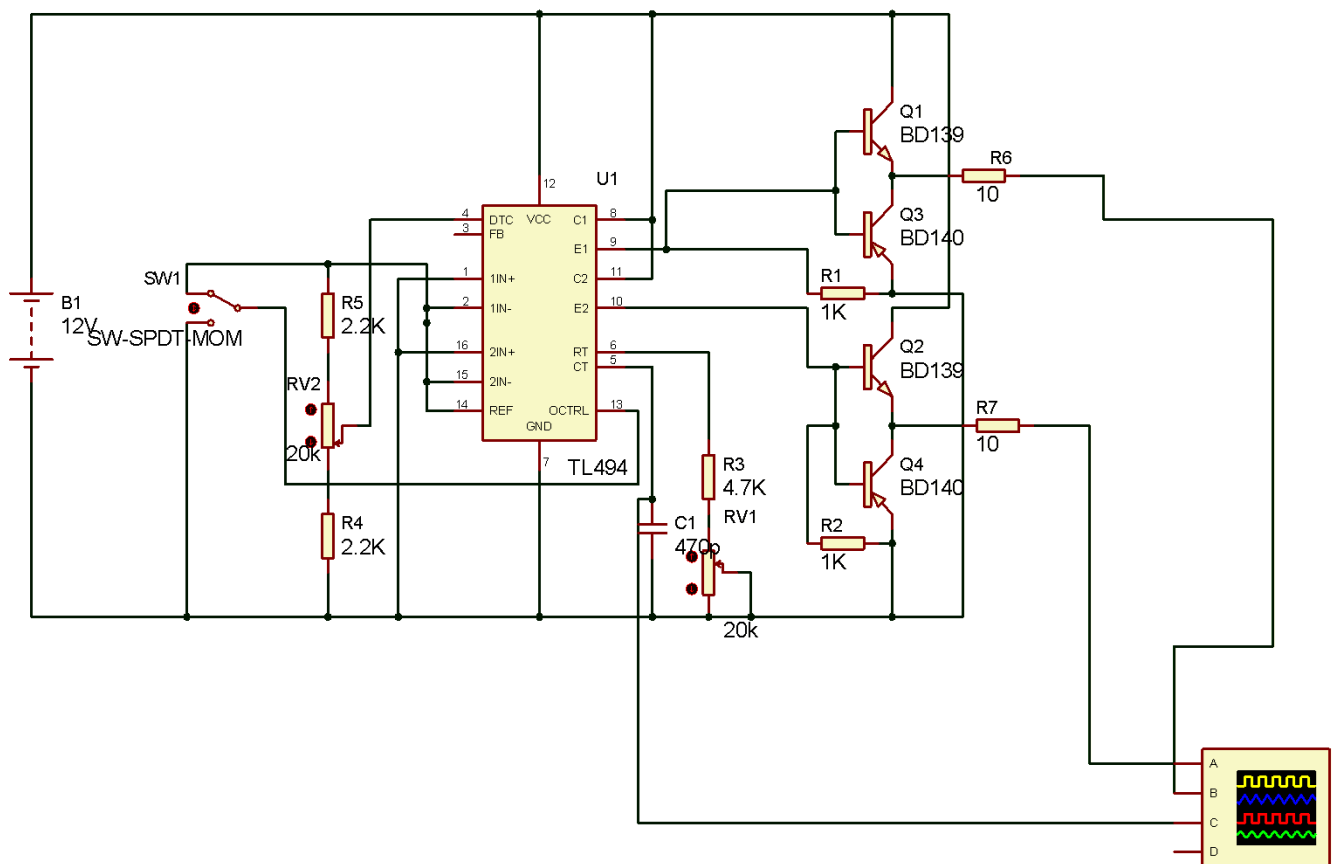


Figure 4.16 : Schéma de circuit de commande du générateur haute tension d'impulsion

L'étude de simulation a permis d'obtenir les signaux de commande et le fonctionnement du transformateur d'impulsion haute tension à la sortie du générateur. La forme d'onde de la tension d'impulsion du transformateur HT est directement liée au signal de commande des Mosfets (Figure 4.17).

Le circuit de commande du générateur haute tension d'impulsion utilise le circuit intégré TL494 comme composant principale dans le fonctionnement du circuit. Le TL494 est un contrôleur de modulation de largeur d'impulsion (PWM). Il génère des signaux PWM en

fonction des entrées de tension et de courant, ce qui permet de contrôler la puissance délivrée à la charge. Il est configuré en mode oscillateur, où il produit des impulsions carrées. Ces impulsions sont ensuite utilisées pour piloter des transistors ou des Mosfets qui amplifient le signal. Les signaux PWM contrôlent des transistors de puissance (comme des MOSFETs) qui permettent de commuter rapidement le courant à travers un transformateur. Cela transforme la tension basse en une tension haute en utilisant le transformateur haute tension et à haute fréquence à noyau de ferrite. Le transformateur joue un rôle déterminant dans l'amplification de la tension.

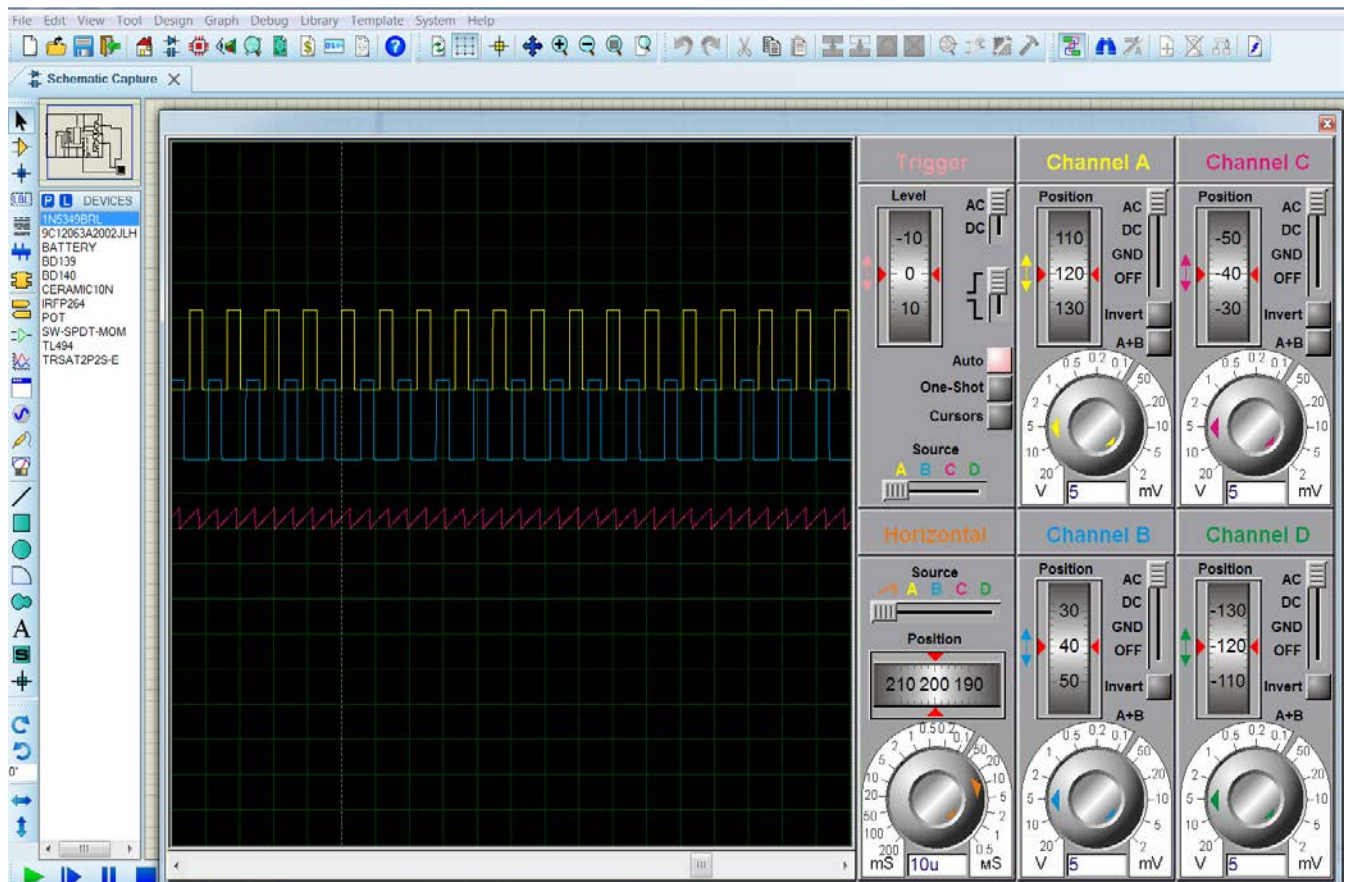


Figure 4.17 : Signaux du circuit de commande

Les signaux dans la figure 4.17 indiquent :

- Signal de commande de Mosfet1 (Signal en Jaune)
- Signal de commande de Mosfet2 (Signal en bleu)
- Signal oscillateur dans la capacité (Signal en rouge)

Les figures 4.18 et 4.19 présentent le schéma assemblé des deux parties du générateur haute tension d'impulsion et la simulation du circuit respectivement.

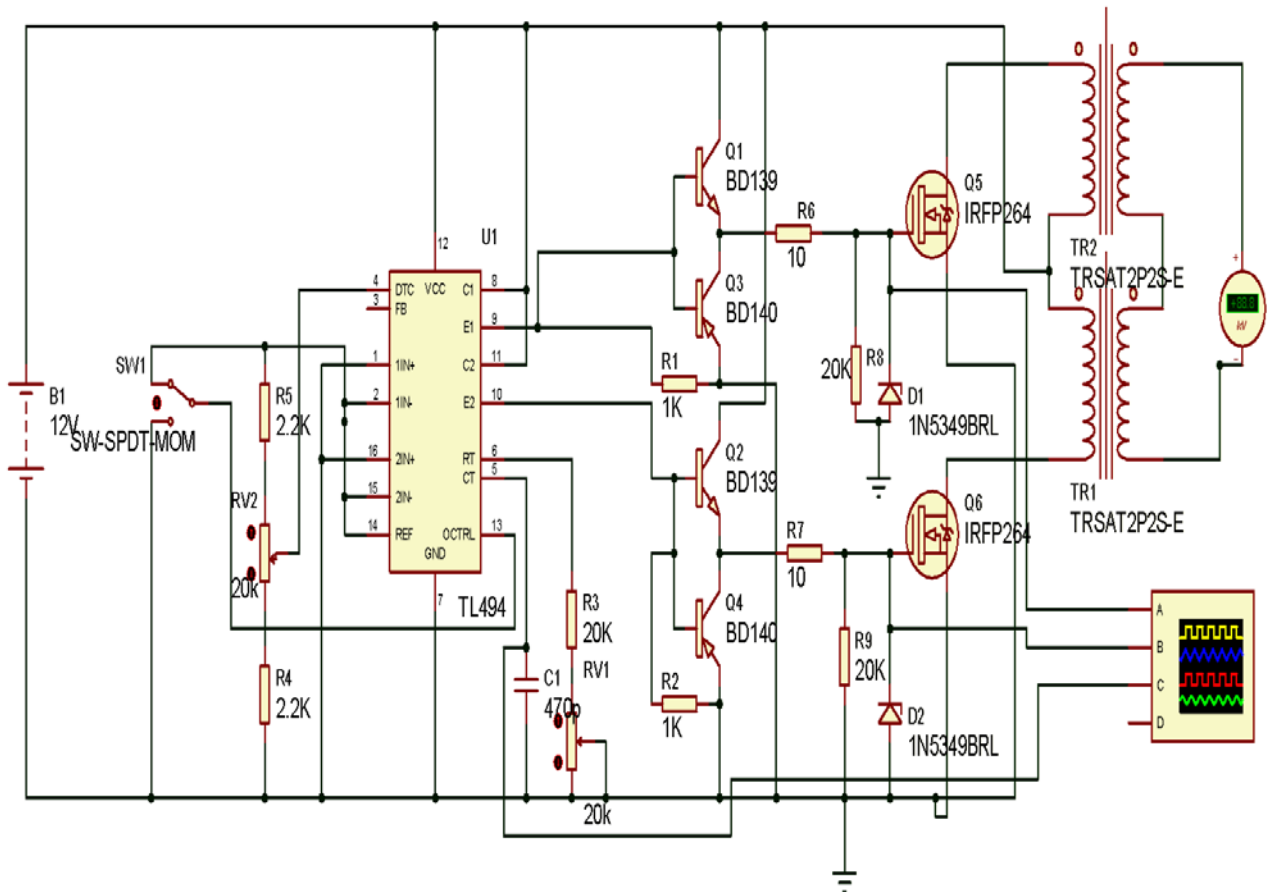


Figure 4.18 : Schéma général du générateur haute tension d'impulsion

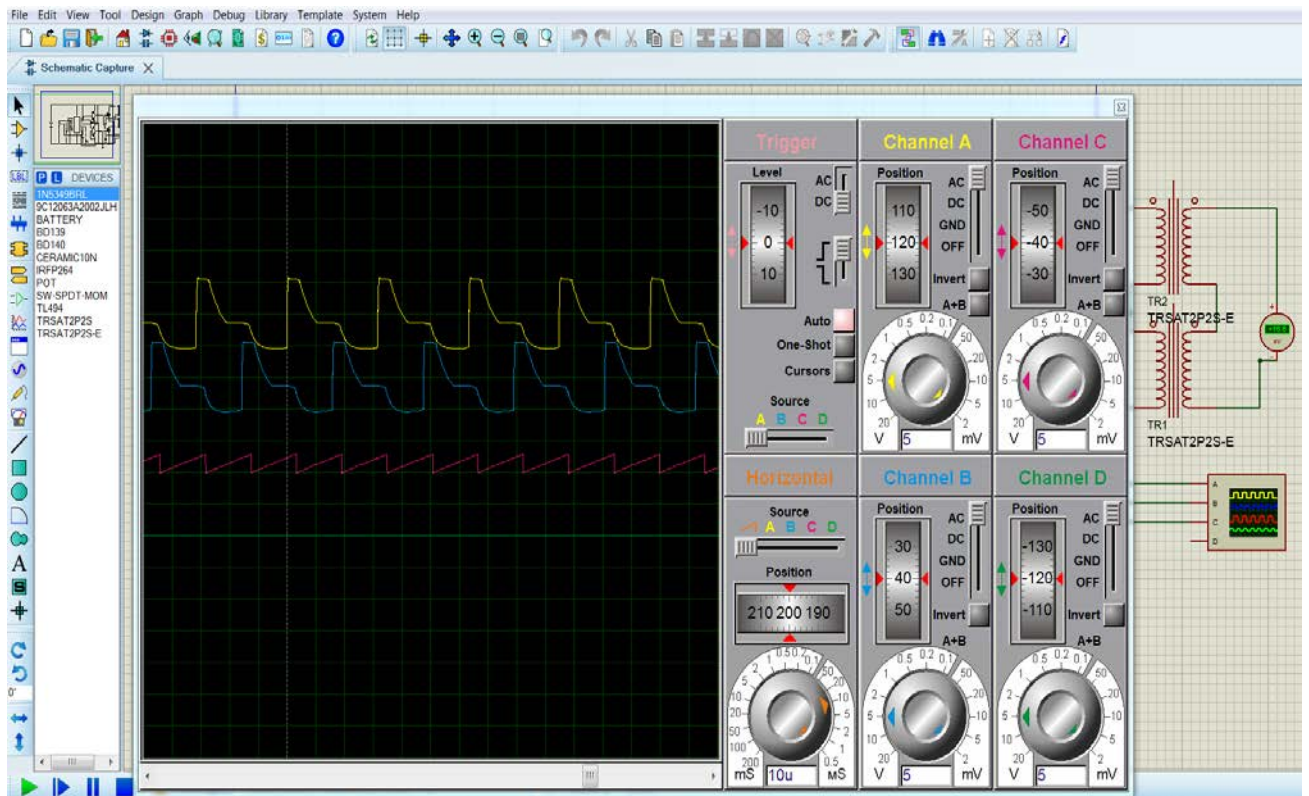


Figure 4.19 : Signaux de la simulation du générateur HT d'impulsion

Dans cette simulation, le principal paramètre qui contrôle la tension de sortie est la commande du Mosfets. Les formes d'onde sont étroitement liées au circuit TL494. La simulation montre un pic de tension de plus de 30 kV à la sortie du générateur.

Les figures 4.18 montre clairement que l'installation est composée de deux parties : le côté basse tension qui présente le circuit de commande et la partie haute tension qui présente le transformateur haute tension. Cet ensemble est donc adapté aux travaux pour le traitement par champ électrique pulsé grâce à sa légèreté, sa facilité de transport et sa simplicité d'utilisation.

4.3.2 Construction du générateur

Dans cette section, les éléments de circuit ont été choisis à la lumière des informations obtenues grâce aux calculs et aux simulations.

L'étude de développement réalisée comprend essentiellement deux étapes. La première est la phase de réalisation du circuit basse tension. Il contient un circuit de commande dans l'élément principale est le circuit intégré TL495 et un circuit de puissance qui contient les Mosfets de puissance. La deuxième phase est la partie haute tension dans l'élément principale est le transformateur haute tension à noyau de ferrite. Le tableau 4-3 présente les composants utilisés dans cette section.

Tableau 4-2 : liste des composants utilisés dans le générateur d'impulsion

Composants	valeurs
Résistances	4.7k Ω , 2.2k Ω , 1k Ω , 10 Ω
Résistances variables	20k Ω
Condensateurs	2200 μ F, 100nF, 10nF, 1nF
Diodes	1N5408, 1N4007, LED
Thyristors	BD139, BD140
Mosfets	IRFP260
Circuits intégrés	TL494, LM7812

Une fois le circuit de commande est réalisé (Figure 4.20), des mesures d'essai ont été effectuées sur différents composants. La forme d'onde de la commande obtenue est illustrée à la figure 4.21.

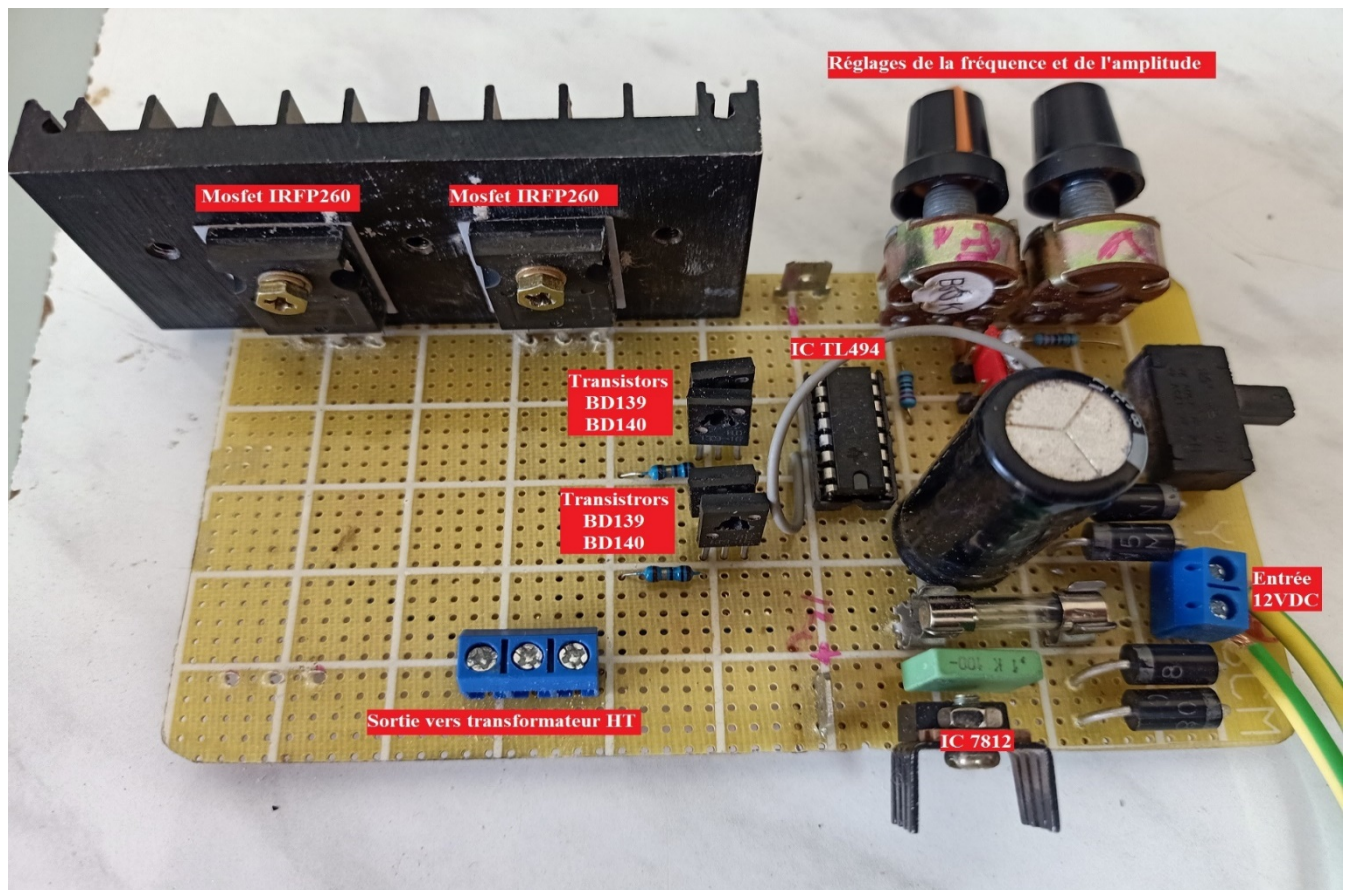


Figure 4.20 : Construction du circuit de commande et de puissance

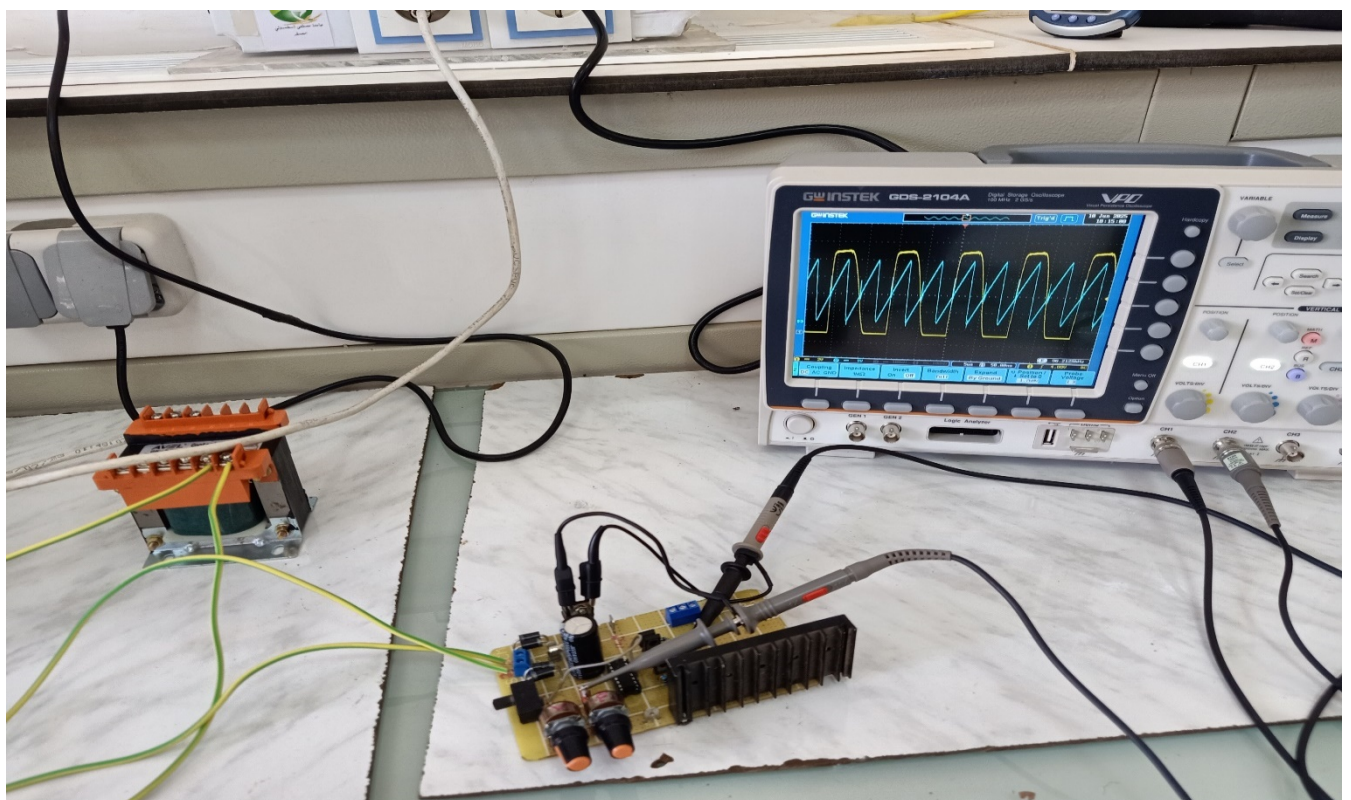


Figure 4.21 : Forme d'onde de sortie du circuit de commande obtenue sur l'oscilloscope

Les éléments du circuit nécessaires au bon fonctionnement du générateur d'impulsion sont les Mosfets et le circuit intégré TL494. Le TL494 est un circuit PWM à fréquence fixe intégrant toutes les fonctions nécessaires au contrôle des alimentations à découpage. Il est largement utilisé dans les alimentations à découpage directes asymétriques, en demi-pont et en pont complet. Ce circuit intègre toutes les fonctions nécessaires à la construction d'un circuit de contrôle à modulation de largeur d'impulsion (PWM) sur une seule puce, principalement conçue pour le contrôle des alimentations, permettant une personnalisation flexible pour des applications spécifiques.

Le Circuit global du projet de l'alimentation haute tension d'impulsion est présenté par la figure 4.21. Le transformateur élévateur haute tension a été construit à partir de deux sections de noyau de ferrite. Il eut délivré une tension au secondaire de plus de 30kV.

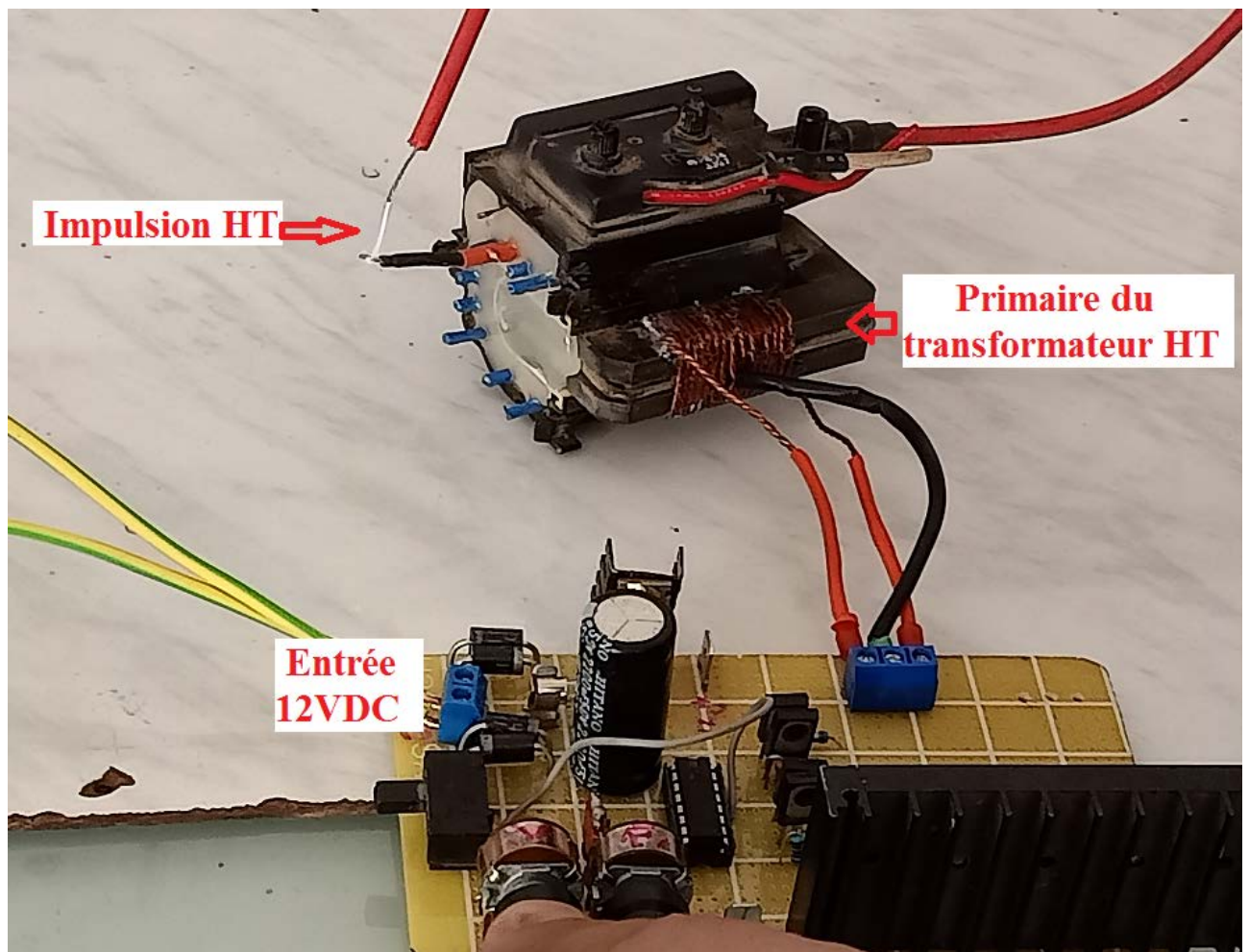


Figure 4.21 : Construction et test du générateur haute tension d'impulsion

Avant d'évaluer le circuit proposé, un ensemble de mesure de sécurité et paramètres de test de composant doit être déterminé. Ceci a été réalisé afin de garantir que l'étude de simulation

soit réalisée correctement et minutieusement, afin de résoudre efficacement les problèmes causés par les composants parasites. De plus, les propriétés de l'impulsion générée peuvent également être évaluées du point de vue de l'amplitude et de la largeur d'impulsion.

4.4 Conclusion

Un générateur haute tension à courant continu (Cockcroft-Walton) à huit étages et diodes-condensateurs en cascade a été conçu et simulé. Les réponses transitoires et stationnaires de la tension de sortie et des huit étages ont été enregistrées avec PSIM. Les performances du générateur ont été calculées, de plus, la variation de la tension de sortie, et la tension d'ondulation δv ont été représentées en fonction du courant de charge pour une charge maximale calculer en fonction du nombre d'étages, la valeur des condensateurs et la fréquence. Le générateur haute tension DC de 5kV a été fabriqué et testé avec succès en laboratoire. Les résultats de simulation et d'expérimentation concordent.

Cette étude visait aussi à développer un générateur d'impulsions adapté au Laboratoire Haute Tension pour les applications du champ électrique pulsé. La forme d'onde de la tension d'impulsion produite par le générateur d'impulsions dépend fortement des conditions de fonctionnement. L'avantage de ces deux équipements réside dans ses grandes fiabilités, ses légèretés, ses faibles coûts et ses capacités à produire différentes intensités de sortie.

Application du CEP sur les produits végétaux

5 Application du CEP sur les produits végétaux

5.1 Introduction

L'application du champ électrique pulsé (CEP) pour améliorer le rendement d'extraction des jus de fruits et légumes, réduire les temps de séchage ou améliorer l'extraction des composés intracellulaires tels que les colorants, le saccharose ou les polyphénols, a été étudiée dans des laboratoires et des laboratoires de tests à l'échelle pilote (Vorobiev & Lebovka, 2008a). Récemment, différents exemples et avantages de l'application du traitement par champ électrique pulsé (CEP) pour l'amélioration de l'extraction des tissus végétaux ont été rapportés (Barbosa-Cánovas et al., 2004; Vorobiev & Lebovka, 2008a).

Le but de ce travail dans ce chapitre était d'étudier l'effet du CEP sur la quantité et la qualité de l'huile essentielle extraite à partir des produits végétaux, cas de basilic, pour les applications industrielles. Les relations entre les paramètres électriques du CEP et l'absorption ont également été étudiées et discutées.

5.2 Huiles essentielles

Les huiles essentielles sont des substances aromatiques odorantes, volatiles, de consistance huileuse, très concentrées, appelés aussi essences aromatiques, produits et emmagasinés dans certaines cellules de matières végétales, composé de molécules sécrétées par certains arbres et certaines plantes qui lui donnent un parfum spécifique (Díaz-Reinoso et al., 2023; Lardry & Haberkorn, 2007). Elles sont produites par les plantes comme moyen de défense contre les ravageurs phytophages (Cseke & Kaufman, 1999). On estime que chaque huile contient entre 20 et 60 composants chimiques, mais certaines HE peuvent en contenir plus de 300 (de Souza Rodrigues et al., 2025).

Dans différents pays et cultures, les huiles essentielles sont utilisées pour leurs effets thérapeutiques et aromatiques, notamment en médecine traditionnelle. Dans la physiologie des plantes, les huiles essentielles jouent un rôle dans la protection antimicrobienne et permettent d'attirer ou de repousser les insectes grâce à leurs propriétés aromatiques. Grâce à cette capacité antimicrobienne, ces composés sont considérés comme potentiellement efficaces contre les agents pathogènes et ont été testés contre les bactéries des animaux destinés à la production alimentaire (de Souza Rodrigues et al., 2025).

Beaucoup de végétaux renferment des HE, mais seulement en toute petite quantité, ne permettant pas l'extraction ou en rendant le prix excessivement cher. Seules les plantes dites « aromatiques » produisent des quantités suffisantes d'HE.

5.3 Procédés d'extraction des huiles essentielles

L'huile essentielle est un produit dérivé de matières végétales, obtenu par distillation à l'eau ou à la vapeur, par extraction mécanique à partir de l'écorce d'agrumes ou par distillation sèche, par des méthodes purement physiques (ISO, 1997; Turek & Stintzing, 2013). La distillation est la méthode d'extraction la plus couramment utilisée (Richard & Multon, 1992).

Historiquement, l'extraction de ces produits a été réalisée pour la première fois par les Arabes au Moyen Âge grâce à la méthode d'hydrodistillation. Le processus d'extraction détermine la qualité du produit et la composition des huiles essentielles ; une extraction incorrecte peut interférer avec l'activité chimique et pharmacologique des composants respectifs. Actuellement, l'hydrodistillation reste la méthode la plus utilisée pour l'extraction industrielle des huiles essentielles, bien que des méthodes alternatives telles que la distillation à la vapeur, l'hydrodiffusion, l'extraction par solvant et l'extraction assistée par micro-ondes soient également employées (de Souza Rodrigues et al., 2025).

Les techniques de distillation présentent des inconvénients liés à la dégradation thermique/hydrolytique et aux pertes de certains composés volatils et thermolabiles, ainsi qu'à une consommation énergétique élevée. Lors de la distillation à la vapeur, de nombreux composés sont mieux extraits à la vapeur qu'à l'eau liquide (Díaz-Reinoso et al., 2023).

5.3.1 Techniques d'extraction conventionnelles

Les composés bioactifs des matières végétales peuvent être extraits par diverses techniques d'extraction classiques. La plupart de ces techniques reposent sur le pouvoir extractif des différents solvants utilisés et sur l'application de chaleur et/ou de mélange (Azmir et al., 2013).

5.3.1.1 Distillation à la vapeur

Il s'agit de l'une des méthodes les plus courantes pour la production à grande échelle de diverses huiles essentielles. Environ 90 % des huiles essentielles sont extraites grâce à cette technique. Cette méthode est une variante d'un système de distillation classique, où la vapeur générée interagit avec la matière végétale pour libérer la substance ciblée. Elle convient à l'extraction de composés et substances thermosensibles. Elle implique l'utilisation d'un ballon générateur de vapeur, d'un ballon de distillation, d'un condenseur et d'un récipient de réception.

Cette méthode a été officiellement employée pour l'extraction de diverses huiles essentielles d'agrumes en raison de son rendement élevé et de son économie par rapport aux autres méthodes. Elle consiste à introduire les matières végétales, principalement des feuilles ou des écorces de fruits, dans la chambre (une plaque perforée) située au-dessus de l'entrée de vapeur, sans exposer la matière végétale à une source de chaleur directe, mais plutôt à la vapeur de la chaudière. Cette étape est suivie d'une condensation dans un condenseur qui sépare les molécules huileuses de la vapeur d'eau.

Bien que cette méthode fournisse un rendement substantiel d'huile essentielle sûre et de qualité à partir de diverses matières végétales d'agrumes, les principaux inconvénients de la méthode de distillation à la vapeur sont la pression de vapeur et la dégradation thermique des composés thermolabiles, un temps d'extraction plus long et une consommation énergétique élevée, qui ont également été signalés comme induisant une hydroxylation partielle. Les inconvénients associés à cette méthode ont conduit à l'adoption de nouvelles techniques d'extraction « vertes » améliorées (Brah et al., 2024).

5.3.1.2 Hydrodistillation

L'hydrodistillation est une méthode traditionnelle d'extraction des composés bioactifs et des huiles essentielles des plantes. Elle ne fait appel à aucun solvant organique et peut être réalisée avant la déshydratation des matières végétales (Azmir et al., 2013).

Cette méthode est la plus couramment utilisée pour l'extraction des huiles essentielles. Dans cette méthode, la matière végétale est placée dans un bain-marie et portée à ébullition (généralement 100 °C) sous pression atmosphérique. Le mélange est ensuite condensé par refroidissement, puis séparé par décantation. Cette méthode est efficace pour les matières végétales dont les constituants sont hydrosolubles et thermostables à des points d'ébullition élevés, mais des températures très élevées pourraient dégrader les composants thermosensibles, affectant ainsi la qualité de l'huile essentielle (Brah et al., 2024).

5.3.1.3 Extraction Soxhlet

L'extracteur Soxhlet a été proposé pour la première fois par le chimiste allemand Franz Ritter Von Soxhlet (1879). Conçu principalement pour l'extraction des lipides, il ne se limite plus à ce seul usage. L'extraction Soxhlet est largement utilisée pour extraire des composés bioactifs précieux de diverses sources naturelles. Elle sert de modèle pour comparer de nouvelles alternatives d'extraction (Azmir et al., 2013).

En général, une petite quantité d'échantillon sec est placée dans une cartouche. La cartouche est ensuite placée dans un ballon de distillation contenant le solvant d'intérêt. Après avoir atteint le niveau de débordement, la solution du porte-cartouche est aspirée par un siphon. Ce dernier vide la solution dans le ballon de distillation. Cette solution transporte les solutés extraits dans le liquide. Le soluté reste dans le ballon de distillation et le solvant retourne au lit solide de la plante. Le processus se répète jusqu'à la fin de l'extraction (Azmir et al., 2013).

5.3.1.4 Pressage à froid

Le pressage manuel ou à froid, également appelé pressage mécanique, est l'une des plus anciennes méthodes traditionnelles d'extraction d'huiles essentielles d'agrumes en grandes quantités, avant l'apparition des appareils, méthodes et techniques scientifiques. L'huile essentielle obtenue par pressage à froid se caractérise par de fortes propriétés aromatiques, une valeur nutritionnelle élevée et une teneur élevée en constituants majeurs, car elle est exempte de tout traitement thermique ou chimique. Le pressage à froid est réalisé manuellement en pressant les couches d'écorce pour exposer les poches d'huile. L'huile est ensuite extraite des poches sous forme d'émulsion aqueuse, puis centrifugée pour obtenir l'huile essentielle séparée. Dans cette méthode, les huiles essentielles d'agrumes peuvent également être extraites des écorces de fruits à l'aide de machines à température ambiante, puis lavées à l'eau froide.

Cette méthode est considérée comme simple, rapide, écologique et peu coûteuse par rapport aux autres méthodes. Outre leur innocuité, les huiles pressées à froid possèdent également un parfum aromatique caractéristique, ce qui explique leur large application dans les industries des boissons, des cosmétiques et de la pharmacie. Cependant, la méthode de pression à froid ne convient pas aux matières végétales à faible teneur en huiles essentielles. Les huiles pressées à froid peuvent également contenir des acides gras polyinsaturés et des composants pro-oxydants qui réduisent leur stabilité à l'oxydation et leur durée de conservation (Brah et al., 2024).

5.3.1.5 Extraction par solvant

Il s'agit de la plus ancienne méthode utilisée pour obtenir un extrait brut de plantes. Elle a également été utilisée pour l'extraction d'huiles essentielles selon le principe de solubilisation des composés présents dans les cellules de diverses matières végétales à l'aide d'un solvant approprié. Les huiles essentielles extraites selon cette méthode impliquent généralement la dissolution de la matière végétale dans un solvant spécifique, et l'huile est obtenue par évaporation, puis filtration et distillation. Des solvants comme le chloroforme, l'éthanol,

l'acétone-hexane et l'acétate d'éthyle ont été utilisés pour l'extraction de diverses huiles essentielles, notamment d'agrumes (Brah et al., 2024).

Le principal problème associé à cette méthode réside dans les effets toxiques de certains solvants couramment utilisés, tels que le benzène et le dichlorométhane, ainsi que dans la perte de certains composés volatils lors de l'élimination des solvants. Par conséquent, cette méthode nécessite également de chauffer le solvant à 100 °C et ne convient donc pas à l'extraction de composants volatils et thermolabiles (Brah et al., 2024).

5.3.2 Techniques d'extraction non conventionnelles

Les principaux défis de l'extraction conventionnelle sont la durée d'extraction plus longue, la nécessité d'un solvant coûteux et de haute pureté, l'évaporation de grandes quantités de solvant, la faible sélectivité d'extraction et la décomposition thermique des composés thermolabiles (Azmir et al., 2013).

Pour surmonter ces limites, de nouvelles techniques d'extraction prometteuses sont introduites. Ces techniques sont appelées techniques d'extraction non conventionnelles ou alternatives. Parmi les plus prometteuses figurent l'extraction assistée par ultrasons, l'extraction assistée par enzymes, l'extraction assistée par micro-ondes, l'extraction assistée par champ électrique pulsé, l'extraction par fluide supercritique et l'extraction par liquide sous pression. Certaines de ces techniques sont considérées comme « vertes » car elles sont conformes aux normes de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (Azmir et al., 2013).

Ces techniques incluent la synthèse chimique moins dangereuse ; conception de produits chimiques plus sûrs, de solvants auxiliaires sûrs, conception pour l'efficacité énergétique, utilisation de matières premières renouvelables, réduction des dérivés, catalyse, conception pour prévenir la dégradation, économie atomique et analyse du temps pour la prévention de la pollution et chimie intrinsèquement plus sûre pour la prévention des accidents (Azmir et al., 2013).

5.3.2.1 Extraction par fluide supercritique

Il s'agit de l'une des méthodes complexes d'extraction d'huile essentielle à partir de matières végétales, couramment utilisées dans l'alimentation, les cosmétiques et les produits pharmaceutiques. Cette méthode utilise des gaz inoffensifs, tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le propane, le butane et d'autres gaz à l'état supercritique (à haute pression) pour extraire les huiles essentielles. Ces solvants non toxiques, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le propane, le butane et d'autres gaz, sont utilisés pour extraire l'huile essentielle à basse

température et haute pression, évitant ainsi la destruction thermique ou la décomposition des constituants volatils. Le dioxyde de carbone (CO_2) est un solvant couramment utilisé dans l'extraction par fluide supercritique (dioxyde de carbone supercritique, SC-CO_2) de l'huile essentielle d'agrumes en raison de sa faible tension superficielle, de sa diffusivité élevée, de sa viscosité et de sa basse température critique (304 K) (Brah et al., 2024).

De plus, cette méthode est qualifiée d'application technologique « verte » et a été utilisée efficacement pour extraire certains composés organiques volatils (CEO). La méthode d'extraction par fluide supercritique (SFE) est supérieure aux autres méthodes car elle est non toxique, ininflammable et nécessite une température et une pression faibles à modérées]. Cependant, le principal problème lié à l'utilisation du SC-CO_2 est sa faible polarité, ce qui affecte l'extraction des composés polaires (analytes). Par conséquent, certaines modifications doivent être apportées par l'ajout de solvants modificateurs polaires comme le méthanol ou l'éthanol pour améliorer la puissance de la solution et, par conséquent, l'efficacité de l'extraction. De plus, le procédé d'extraction SC-CO_2 implique un prétraitement de la matière végétale, incluant le broyage et le séchage, l'exposant ainsi à l'oxydation à l'air et à la dénaturation enzymatique. De plus, cette méthode est très coûteuse et sa cinétique d'extraction est lente en raison de la difficulté d'utiliser des vibrations mécaniques (Brah et al., 2024).

5.3.2.2 Extraction assistée par micro-ondes

Contrairement aux techniques d'extraction traditionnelles, l'extraction assistée par micro-ondes est maintenant largement reconnue comme un nouvel outil puissant pour l'extraction des huiles essentielles de plusieurs plantes et produits dérivés. Elle possède plus d'avantages : un temps de distillation plus court, rendement d'extraction plus élevé, une décomposition moindre des espèces cibles et de meilleurs produits à moindre coût.

L'utilisation de techniques d'extraction par micro-ondes pour obtenir des huiles essentielles à partir de plantes et d'épices est une méthode alternative intéressante et plus efficace que d'autres procédés d'extraction conventionnelle (Bousbia et al., 2009). Les premiers rapports d'application du micro-ondes pour l'extraction d'huiles essentielles ont été enregistrés dans les années 80 (Letellier & Budzinski, 1999). Craveiro et al. (1989) ont comparé ce procédé à la distillation à la vapeur d'eau, les huiles obtenues à partir des feuilles de *Lippia sidoides* ne présentaient aucune différence qualitative, mais des différences quantitatives ont été observées.

5.3.2.3 Extraction assistée par ultrasons

L'ultrason est un type particulier d'onde sonore, inaudible pour l'homme. En chimie, sa fréquence varie généralement de 20 kHz à 100 MHz. Comme les autres ondes, il traverse un milieu en créant une compression et une expansion. Ce processus produit un phénomène appelé cavitation, qui se traduit par la production, la croissance et l'éclatement de bulles. Une grande quantité d'énergie peut être produite par la conversion de l'énergie cinétique du mouvement en échauffement du contenu de la bulle (Azmir et al., 2013).

La méthode d'extraction assistée par ultrasons (UAE) a été utilisée avec succès pour les lipides, les protéines et les composés bioactifs tels que les polyphénols, la berbérine et les huiles essentielles d'agrumes. Dans l'extraction UAE, les matières végétales telles que les feuilles, les fleurs, les écorces de fruits et les graines sont trempées dans de l'eau et d'autres solvants comme l'éthanol, puis les ultrasons sont appliqués (Brah et al., 2024).

L'UAE fonctionne selon le principe de la cavitation acoustique, qui implique la production, l'expansion et la rupture de bulles remplies de vapeur gazeuse dans un liquide, ce qui facilite la rupture et la pénétration de la paroi cellulaire du tissu végétal ou du matériau d'extraction. Ce processus de cavitation induit des turbulences et une circulation de courant dans le liquide, ce qui entraîne la compression et la réfraction des bulles remplies de gaz, améliorant ainsi le taux d'extraction à température et pression ambiantes. Cette méthode d'extraction écologique est devenue l'une des méthodes les plus utilisées dans la plupart des industries en raison de ses avantages, notamment la réduction de la consommation d'énergie, de la production de chaleur, de l'utilisation de solvants, de la production de déchets, du temps de traitement, ainsi que l'augmentation du rendement et de la qualité (Brah et al., 2024).

5.3.2.4 Extraction assistée par enzyme

Certains composés phytochimiques présents dans les matrices végétales sont dispersés dans le cytoplasme cellulaire et certains composés sont retenus dans le réseau polysaccharide-lignine par des liaisons hydrogène ou hydrophobes, inaccessibles par solvant lors d'un procédé d'extraction classique. Le prétraitement enzymatique est considéré comme une méthode innovante et efficace pour libérer les composés liés et augmenter le rendement global. L'ajout d'enzymes spécifiques telles que la cellulase, l' α -amylase et la pectinase pendant l'extraction améliore la récupération en brisant la paroi cellulaire et en hydrolysant les polysaccharides structuraux et les corps lipidiques. Il existe deux approches pour l'extraction assistée par enzymes : (1) l'extraction aqueuse assistée par enzymes (EAAE) et (2) la pression à froid

assistée par enzymes (EACP). Habituellement, les méthodes EAAE ont été développées principalement pour l'extraction d'huiles de diverses graines. Dans la technique EACP, des enzymes sont utilisées pour hydrolyser la paroi cellulaire de la graine, car ce système ne dispose pas de colloïde polysaccharide-protéine, ce qui est évident en EAAE (Azmir et al., 2013).

Divers facteurs, notamment la composition et la concentration enzymatiques, la granulométrie des matières végétales, le rapport solides/eau et le temps d'hydrolyse, sont reconnus comme des facteurs clés pour l'extraction. L'extraction des antioxydants phénoliques des déchets solides de framboise a été augmentée par l'application d'enzymes lors de l'extraction hydroalcoolique, par rapport au témoin non enzymatique. Des études ont présenté la technologie enzymatique comme une alternative pour extraire des composés bioactifs à partir de sous-produits agro-industriels (Azmir et al., 2013).

5.3.2.5 Extraction de liquide sous pression

L'extraction de liquide sous pression (PLE) est désormais connue sous plusieurs noms : extraction par fluide sous pression (PFE), extraction par fluide accélérée (ASE), extraction par solvant améliorée (ESE) et extraction par solvant à haute pression (HSPE).

Le concept de PLE consiste à appliquer une pression élevée pour maintenir le solvant liquide au-delà de son point d'ébullition normal. La haute pression facilite le processus d'extraction. Les techniques d'automatisation sont la principale raison du développement croissant des techniques basées sur la PLE, ainsi que la réduction du temps d'extraction et des besoins en solvants. La technique PLE nécessite de faibles quantités de solvants grâce à la combinaison de la pression et de la température élevées, ce qui permet une extraction plus rapide. La PLE est également utile pour l'extraction de polluants organiques à partir de matrices environnementales stables à haute température. Elle a également été utilisée pour l'extraction de composés bioactifs à partir d'éponges marines (Azmir et al., 2013).

5.3.2.6 Extraction par champ électrique pulsé

Le traitement par champ électrique pulsé (CEP) a été reconnu comme utile pour améliorer les procédés de pressage, de séchage, d'extraction et de diffusion au cours de la dernière décennie (Azmir et al., 2013).

Le principe du CEP consiste à détruire la structure de la membrane cellulaire afin d'augmenter l'extraction. Lors de la suspension d'une cellule vivante dans un champ électrique, un potentiel électrique traverse sa membrane. Du fait de la nature dipolaire des molécules membranaires, le potentiel électrique sépare les molécules en fonction de leur charge dans la

membrane cellulaire. L'efficacité du traitement par CEP dépend strictement des paramètres du procédé, notamment l'intensité du champ, l'apport énergétique spécifique, le nombre d'impulsions, la température de traitement et les propriétés des matières à traiter (Azmir et al., 2013).

Le traitement CEP à un champ électrique modéré (500 et 1000 V/cm ; pendant 10^{-4} à 10^{-2} s) endommage la membrane cellulaire des tissus végétaux avec une faible augmentation de température. De ce fait, le CEP peut minimiser la dégradation des composés thermosensibles. Le CEP est également applicable aux matières végétales comme procédé de prétraitement avant l'extraction conventionnelle afin de réduire l'effort d'extraction (Azmir et al., 2013).

5.4 Principaux travaux antérieurs de l'effet du CEP sur les HEs

Les techniques traditionnelles d'extraction des huiles essentielles (HEs) nécessitent des adaptations importantes afin de réduire les coûts d'investissement, d'augmenter le rendement d'extraction, de minimiser les coûts de production et de protéger l'environnement.

Les techniques d'extraction avancées sont plus respectueuses de l'environnement, plus efficaces et offrent des rendements plus élevés que les méthodes conventionnelles qui entraînent souvent une perte de composés volatils due à une exposition prolongée à la chaleur (Azmir et al., 2013; Crescente et al., 2023). Le recours à des techniques alternatives, telles que le traitement par champ électrique pulsé (CEP), est une solution proposée pour permettre le maintien et le développement économique de cette filière (Barros et al., 2022; Hadri et al., 2023; Miloudi et al., 2022; Yajun et al., 2017).

Le CEP est appliqué aux huiles essentielles d'*eucalyptus* et de *romarin* (Barros et al., 2022), de *Mentha spicata* (Miloudi et al., 2022), de *Marrubium vulgare* (Miloudi, Hamimed, et al., 2018), de *rose* (Yajun et al., 2017), de *lavande* (Hadri et al., 2023), de fleur de *rose* (Tintchev et al., 2012) et de *Nepeta* (Dobrev et al., 2013). La qualité et la composition des huiles essentielles traitées ne sont pas affectées (Sharma et al., 2023).

5.4.1 Effet sur le rendement de l'HE de rose (*Rosa damascena* Mill.)

Afin d'améliorer le rendement en huile, relativement faible, Tintchev et al. (2012) ont appliqué des champs électriques pulsés sur des fleurs de rose fraîches avec un apport énergétique de 10 kJ/kg et de 20 kJ/kg. Une augmentation du rendement de 2 à 46 % a été observée, ainsi qu'une réduction du temps de distillation. L'application de CEP facilite les processus de diffusion dans les tissus floraux et réduit le temps de distillation de 2,5 à 1,5 heure

par rapport à un traitement conventionnel. Une augmentation du rapport alcools terpéniques/hydrocarbures de 33 % à 285 % a été observée dans l'huile de rose traitée. Afin d'élucider l'influence sur la structure des pétales, la microscopie électronique à balayage a été utilisée (Tintchev et al., 2012).

Appliquée à l'échelle industrielle, l'application de CEP permettrait d'augmenter la capacité de production et d'éviter les modifications défavorables de la composition de l'huile essentielle de *rose* dues à la fermentation. Sur la base d'une évaluation complexe du rendement, de la composition chimique et des caractéristiques olfactives des huiles obtenues, un prétraitement avec un apport énergétique de 10 kJ/kg suivi d'une distillation de 1,5 heure s'est avéré optimal. Une augmentation de 46 % du rendement a été observée ; l'huile essentielle présentait une composition équilibrée et une odeur très proche des huiles essentielles de rose standard disponibles sur le marché (Tintchev et al., 2012).

Le matériel végétal a été traité immédiatement après la récolte par distillation de l'eau dans un micro-appareil de type Clevenger. Les paramètres de distillation étaient les suivants : quantité d'échantillon : 200 g ; rapport fleurs/eau : 1:4 ; débit de distillation : 3-4 ml/min ; durée du processus : 2,5 h (Tintchev et al., 2012).

Immédiatement avant la distillation, les échantillons ont été exposés au CEP. Un système CEP pilote, développé à l'Institut allemand des technologies alimentaires (DIL), a été utilisé. Il comprend un générateur d'impulsions et une chambre de traitement. Le générateur d'impulsions a une tension de crête de 20 kV, une puissance moyenne maximale de 8 kW et une fréquence de répétition de 1 à 10 Hz. La chambre de traitement est constituée de deux électrodes à plaques parallèles espacées de 5 cm, mesurant 20 cm de long et 7 cm de haut. Les roses ont été placées dans la chambre avec un peu d'eau pour améliorer la conductance. Les traitements ont été réalisés avec une intensité de champ de 4 kV/cm et un apport d'énergie spécifique de 10 et 20 kJ/kg, respectivement. Une augmentation de température de 2 à 4 °C a été observée pendant le traitement (Tintchev et al., 2012).

Après le traitement, les pétales ont été transférés dans l'appareil de microdistillation, de l'eau a été ajoutée et la distillation a été réalisée selon les sept protocoles suivants :

1. Apport énergétique : 10 kJ/kg ; durée de distillation : 2,5 h
2. Apport énergétique : 10 kJ/kg ; durée de distillation : 0,5 h
3. Apport énergétique : 10 kJ/kg ; durée de distillation : 1,0 h

4. Apport énergétique : 10 kJ/kg ; durée de distillation : 1,5 h
5. Apport énergétique : 20 kJ/kg ; durée de distillation : 0,5 h
6. Apport énergétique : 20 kJ/kg ; durée de distillation : 1,0 h
7. Apport énergétique : 20 kJ/kg ; durée de distillation : 1,5 h

Un échantillon distillé selon les paramètres d'une distillation conventionnelle (2,5 h) a été utilisé comme référence (Tintchev et al., 2012).

5.4.2 Effets du CEP sur le rendement de l'HE de rose

Yajun et al. (2017) ont combiné les champs électriques pulsés de haute intensité (CEP) à la distillation pour extraire l'huile essentielle de rose. Trois paramètres principaux, à savoir l'intensité du champ électrique, le nombre d'impulsions et la durée de distillation, susceptibles d'influencer l'efficacité de l'extraction, ont été optimisés. Afin de démontrer la faisabilité de la méthode, l'huile obtenue dans des conditions optimales a été comparée quantitativement et qualitativement à celle obtenue par hydrodistillation conventionnelle. Le traitement CEP n'a pas eu d'influence significative sur la qualité des huiles essentielles (Yajun et al., 2017).

D'après les résultats obtenus, le traitement des fleurs de rose par CEP avant hydrodistillation permet non seulement d'améliorer le rendement maximal en huile de 50 %, mais aussi de réduire le temps de distillation de 2 h dans des conditions optimales avec une intensité de champ électrique de 20 kV/cm, un nombre d'impulsions de 8 et une durée de distillation de 2 h. Le CEP peut améliorer la libération de composés volatils des tissus floraux par les forces électrostatiques. Technologie prometteuse, le CEP offre un large champ d'application pour l'extraction de l'huile essentielle de rose et peut augmenter le rendement d'extraction de l'huile essentielle de rose (Yajun et al., 2017).

Le système de traitement du CEP comprend un générateur d'impulsions haute tension, un oscillographe, une chambre coaxiale de traitement des matières liquides et une pompe. Le générateur peut générer des impulsions triangulaires bipolaires à décroissance exponentielle d'une durée de 2 μ s. La fréquence est réglable, de 1 000 Hz à 3 000 Hz. La chambre de traitement est composée de deux électrodes en acier inoxydable, espacées de 0,1 cm, longues de 0,15 cm et de diamètre de 0,1 cm. La forme d'onde et la tension d'entrée du traitement peuvent être visualisées sur un oscillographe.

La procédure de traitement par CEP consiste à pomper les échantillons liquides vers la chambre de traitement et à les traiter en continu par un CEP adapté à l'industrie. La fréquence

et la vitesse d'écoulement ont été ajustées pour modifier l'intensité du champ électrique et le nombre d'impulsions. Lors de l'expérience, l'intensité du champ électrique variait respectivement de 10 kV/cm à 30 kV/cm et le nombre d'impulsions de 4 à 12 (Yajun et al., 2017).

Le nombre d'impulsions n est calculé comme suit :

$$n = \frac{2\pi r^2 l f}{q} \quad (5-1)$$

L'intensité du champ électrique E est calculée comme suit :

$$E = \frac{V_{pp}}{2l} \quad (5-2)$$

Le temps de traitement est calculé comme suit :

$$T = \frac{Q}{q} \quad (5-3)$$

Où : r est le rayon de l'orifice de la chambre de traitement (0,05 cm) ; l est la distance entre les deux électrodes de la chambre de traitement (0,1 cm) ; f est la fréquence (Hz) ; q est la vitesse d'écoulement (10 ml/min) ; E est l'intensité du champ électrique (kV/cm) ; V_{pp} est la tension d'entrée affichée sur l'oscilloscope (kV) ; Q est la quantité à traiter (630 ml) ; T est la durée du traitement (63 min) (Yajun et al., 2017).

5.4.3 Application du CEP sur l'extraction de l'HE de *Marrubium vulgare*

Miloudi, Hamimed, et al. (2018) ont montré que le traitement par CEP du *marrube* améliore significativement le taux d'extraction de l'huile essentielle, dans un rapport de 2 à 3.

Les feuilles de la plante ont été séchées pendant 48 h, puis coupées manuellement aux ciseaux en petits morceaux d'environ 1 à 2 cm. Pour chaque expérience, un échantillon de plante d'une masse de 20 g a été mélangé à la même quantité d'eau distillée afin d'obtenir un échantillon humide de feuilles de marrube. Le traitement CEP a été réalisé dans une chambre de traitement cylindrique en polycarbonate, comprenant deux électrodes planes parallèles en acier inoxydable, espacées de 2,5 cm, représentant l'épaisseur de l'échantillon. Le dispositif expérimental utilisé dans ce travail est composé de plusieurs éléments, dont une source de haute tension continue, un condensateur de stockage d'énergie, un éclateur et une chambre de traitement (Miloudi, Hamimed, et al., 2018).

Des échantillons humides de feuilles de marrube ont été introduits dans la chambre de traitement par CEP afin de subir des impulsions pour différentes valeurs du champ électrique E (0,8 kV/cm ; 1,6 kV/cm ; 2,5 kV/cm) et le nombre d'impulsions n (150 ; 300).

Les résultats obtenus après extraction pour $\Delta t = 30$ min et $\Delta t = 60$ min respectivement, indiquent que l'augmentation de l'intensité du champ électrique entraîne une amélioration significative du rendement d'extraction par rapport à l'échantillon témoin non traité pour la même durée de distillation. On constate que l'effet du traitement par CEP devient significatif pour une durée de distillation $\Delta t = 30$ min lorsque le champ E est maximal ($E = 2,5$ kV/cm). Cependant, la tendance s'inverse pour $\Delta t = 60$ min ; autrement dit, l'extraction optimale est obtenue lorsque le champ E est minimal ($E = 0,8$ kV/cm) (Miloudi, Hamimed, et al., 2018).

Ainsi, le taux d'augmentation maximal Δe de l'extraction est estimé comme suit :

- Pour $\Delta t = 30$ min ($E = 2,5$ kV/cm) : $\Delta e = (6,82 - 2,6 / 2,6) \times 100 = 162,3 \%$

- Pour $\Delta t = 60$ min ($E = 0,8$ kV/cm) : $\Delta e = (6,55 - 3,91 / 3,91) \times 100 = 67,5 \%$

5.4.4 Application du CEP pour l'extraction de l'HE d'*Artemisia herba alba*

Les résultats de Miloudi, Tilmatine, et al. (2018) indiquent une bonne influence du CEP sur le rendement de HE avec réduction du temps d'extraction. Les rendements d'extraction obtenues, par exemple étant de 2.05 % pour seulement 30 min de distillation après un traitement par PEF (3kV/cm, n=100) soit 03 fois plus d'une extraction traditionnelle. Ce résultat aura sans doute un impact socio-économique majeur.

En outre, ils ont remarqué que le traitement par CEP accélère le processus de distillation qui est une caractéristique importante en cas d'extraction à l'échelle industrielle. Selon les résultats obtenus, une période de distillation $\Delta t = 30$ min est suffisante pour provoquer même plus d'extraction que $\Delta t = 60$ min. Le taux maximal d'augmentation de l'extraction pour *Artemisia* est estimé à : Pour $\Delta t = 30$ min ($E = 2$ kV/cm) : 158.82%, et Pour $\Delta t = 60$ min ($E = 2$ kV/cm) : 152.42 %. De plus, le rendement d'extraction augmente avec le champ électrique pendant une durée de distillation de 30 min et vice versa pendant 60 min (Miloudi, Tilmatine, et al., 2018).

Des échantillons humides d'*Artemisia* de masse $m = 20$ g ont été placés dans la chambre de traitement et traité du CEP pour différentes valeurs de champ électrique E (1 kV / cm, 2kV / cm, 3 kV / cm) et nombre d'impulsion n (100;200 ;300). Ce travail expérimental a été réalisé pour deux valeurs différentes de la durée du processus de distillation Δt (30 min et 60 min) (Miloudi, Tilmatine, et al., 2018).

5.4.5 Effet du CEP sur l'HE d'eucalyptus, de romarin et de thym

Barros et al. (2022) ont étudié l'impact de l'application de champs électriques pulsés (CEP) comme prétraitement pour l'extraction des HE de feuilles d'eucalyptus, de romarin et de thym. Le premier prétraitement CEP a été appliqué aux feuilles d'eucalyptus et de romarin deux semaines après la récolte, avec un champ électrique de 2 kV/cm et une énergie spécifique d'environ 10 kJ/kg. L'extraction des HE a ensuite été réalisée par hydrodistillation (HD), avec des temps de distillation de 30 et 60 min. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les échantillons prétraités au CEP et après 30 min de distillation, avec une tendance à la hausse du rendement moyen d'extraction d'environ 17 % et 11 % pour l'eucalyptus et le romarin, respectivement, par rapport à l'absence de CEP. La composition des huiles essentielles extraites d'eucalyptus a été analysée pour déterminer leur teneur phénolique totale (TPC). Les échantillons prétraités au CEP ont montré une extraction de polyphénols plus élevée, atteignant 30 % après 30 min de distillation. Enfin, l'optimisation du prétraitement au CEP a également été étudiée afin de maximiser la quantité d'huiles essentielles extraites des feuilles de thym sèches, tout en minimisant la consommation d'énergie, pour différents temps de distillation. Cette étude a montré que, pour cette matière végétale, un champ électrique de 1 kV/cm avec 0,4 kJ/kg et une distillation de 30 min, après application du CEP, permettait d'obtenir un rendement d'extraction jusqu'à 40 % supérieur à celui de la méthode conventionnelle.

Le traitement du CEP a été appliqué en mode discontinu dans la chambre de traitement composée d'un récipient en plastique et de deux électrodes en acier. Les feuilles des plantes ont été préalablement hachées dans un kit Bimby® (Vorwerk, Wuppertal, Allemagne), puis introduites dans la chambre de traitement du CEP avec une petite quantité d'eau pour permettre le passage du courant. Les impulsions haute tension ont été appliquées par un générateur pulsé commercial EPULSUS®-PM1A-10 (d'EnergyPulse Systems, Lisbonne, Portugal) capable de délivrer des impulsions positives de 1 μ s à 200 μ s jusqu'à 10 kV et 200 A, avec des fréquences de répétition de 1 Hz à 200 Hz, pour une puissance de sortie moyenne maximale de 3 kW.

Le générateur d'impulsions est basé sur un générateur de Marx à semi-conducteurs, où plusieurs condensateurs de type n sont d'abord chargés en parallèle à partir d'une tension U_{dc} relativement faible, puis connectés en série avec la charge, appliquant environ nU_{dc} . Ce générateur, basé sur une décharge capacitive directe, peut délivrer des impulsions quasi rectangulaires, indépendamment de l'impédance de charge, à condition que l'énergie stockée dans le générateur soit bien supérieure à l'énergie d'impulsion, ce qui est le cas dans cette application.

Pour appliquer avec succès le CEP, il est important de connaître et de définir certains de ses paramètres, tels que l'intensité du champ électrique, E (kV/cm), le temps de traitement, t_{CEP} (μ s), et l'énergie spécifique, W_s (kJ/kg), qui sont également utilisés à des fins de comparaison avec les résultats de différents auteurs. L'intensité du champ électrique peut être donnée par l'équation (5-4), où U (kV) est la tension appliquée et d (cm) la distance entre les électrodes.

$$E = \frac{U}{d} \quad (5-4)$$

Le champ électrique est appliqué en n impulsions discrètes, avec une largeur d'impulsion définie, t_{on} (μ s), correspondant à un temps de traitement donné par :

$$t_{CEP} = n.t_{on} \quad (5-5)$$

Où chaque impulsion a une énergie, W_p (J), de :

$$W_p = U.I.t_{on} \quad (5-6)$$

Considérant que I (A) est l'amplitude du courant d'impulsion (Barros et al., 2022).

Pour cette étude spécifique, le mélange à l'intérieur de la chambre de traitement est composé d'eau et de matières végétales, avec une conductivité électrique σ (mS/cm), qui peut varier légèrement pendant le traitement, à mesure que les matières végétales s'infusent dans l'eau. En raison de cette légère variation pendant le traitement, il est important d'utiliser une valeur moyenne pour σ , car elle influencera l'amplitude du courant d'impulsion, donnée par :

$$I = \frac{U.A_e.\sigma}{d} \quad (5-7)$$

Où A_e (cm²) correspond à la surface de l'électrode utilisée. L'énergie totale appliquée W_t (J), pendant la durée du traitement, est donnée par :

$$W_t = n.W_p \quad (5-8)$$

Et l'énergie spécifique appliquée, peut être calculée par :

$$W_s = \frac{W_t}{V.\rho} \quad (5-9)$$

Considérant que V (mL) est le volume de la chambre de traitement utilisée et que ρ (kg/L) est la masse volumique approximative du mélange, où, par souci de simplicité, on a supposé

qu'elle était identique à celle de l'eau. L'augmentation de température, ΔT (°C), due à l'application du CEP, peut être calculée comme suit :

$$\Delta T = \frac{W_s}{C_p} \quad (5-10)$$

Où C_p est la capacité thermique spécifique (kJ/(kg.°C)) du matériau traité, qui a été supposée être similaire à l'eau, 4,18 kJ/(kg.°C) (Barros et al., 2022).

5.4.6 Application du CEP pour l'extraction de HE de *Mentha Spicata L.*

Miloudi et al. (2022) ont étudié l'impact du traitement par champ électrique pulsé (CEP) sur l'extraction de l'huile essentielle de *Mentha spicata.L* (quantité et qualité). Le rendement élevé avec une réduction significative de l'énergie et du temps d'extraction a été déterminé. Les résultats ont montré que le rendement maximal obtenu par hydrodistillation conventionnelle est de 0,94 % en 120 min de distillation. Presque le même rendement de 0,90 % a été obtenu après l'application du CEP (2 kV/cm, 200 impulsions) en seulement 60 min de distillation et une réduction d'environ 50 % de l'énergie utilisée. L'analyse par chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (GC/MS) de *M. spicata* a montré que la qualité de l'huile n'était pas affectée par le traitement par CEP. Français Les principaux composants étaient présents, notamment la carvone (31,07 % ; 33,09 % avec CEP), suivie du limonène (13,84 %, 15,26 % avec CEP), de l'eucalyptol (5,17 %, 5,80 % avec CEP), du dihydrocarvéol (1,74 %, 2,11 % avec CEP), du caryophyllène (1,46 %, 1,28 % avec CEP), du germacrène D (1,23 %, 1,39 % avec CEP) et de la fenchone (1,14 %, 1,09 % avec CEP) (Miloudi et al., 2022).

Dans l'étude, les résultats expérimentaux ont montré que le rendement en huile essentielle de *Mentha spicata* augmentait après l'application du CEP selon trois paramètres : l'intensité du champ, le nombre d'impulsions et la durée de distillation. Le rendement obtenu par la méthode conventionnelle (sans traitement CEP) était de 0,94 % en 120 min de distillation, tandis qu'avec le CEP, nous avons obtenu presque la même quantité d'huile (0,90 %) en seulement 60 min, soit la moitié du temps de distillation par la méthode conventionnelle pour les mêmes conditions opératoires. Le traitement CEP pourrait être proposé comme méthode alternative pour intensifier l'extraction des huiles essentielles dans l'industrie, en particulier pour les plantes à faible rendement (Miloudi et al., 2022).

L'analyse GC-MS a indiqué que la qualité de l'huile essentielle obtenue après le traitement CEP ne s'est pas dégradée, sa composition chimique étant quasiment identique à celle obtenue avec la méthode conventionnelle. L'huile essentielle de *M. spicata L.* possède d'importantes

propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires, ce qui permet à cette plante d'être considérée comme un additif potentiel dans les produits alimentaires et pharmaceutiques (Miloudi et al., 2022).

Le traitement par CEP a été réalisé à l'aide d'un système conçu et fabriqué par le laboratoire. Ce système produit des impulsions à décroissance exponentielle sous une haute tension $U = 6$ kV. La fréquence des impulsions a été maintenue constante à 1 Hz. Le schéma du système de traitement par CEP est équipé d'une alimentation haute tension réglable, de condensateurs de stockage d'énergie ($4 \mu\text{F} \pm 5 \%$, 3 000 V CC, 115 A), d'un interrupteur de décharge et d'une chambre de traitement composée de deux électrodes planes et parallèles en acier inoxydable, espacées de 1,5 cm (Miloudi et al., 2022).

Les échantillons ont ensuite été soumis à un traitement par CEP sous une intensité de champ électrique de 1 kV/cm et 2 kV/cm, avec des impulsions à décroissance exponentielle de 100 et 200 impulsions. La température du milieu de traitement a été mesurée à l'aide d'un thermomètre numérique avant et après le traitement, et les variations de température ont toujours été inférieures à 2 °C. Les effets de l'intensité du champ électrique (1 et 2 kV/cm), du nombre d'impulsions (100 et 200) et du temps de distillation (30 et 60 min) sur le rendement en huile essentielle ont été ensuite examinés (Miloudi et al., 2022).

5.4.7 Application du CEP pour l'extraction de HE de *Lavande*

L'étude de Hadri et al. (2023) visait à analyser l'effet du champ électrique pulsé (CEP) sur l'augmentation du rendement d'extraction de l'huile essentielle de *lavande* (*Lavandula angustifolia* Mill.). Le CEP a été appliqué pour améliorer la perméabilisation par électroporation des membranes biologiques, et l'extraction de l'huile essentielle a été réalisée par hydrodistillation. L'influence du niveau de tension, du nombre d'impulsions et de la durée de la distillation a été étudiée. Les résultats ont révélé une amélioration significative du processus d'extraction avec la méthode proposée, à mesure que la quantité d'huile essentielle traitée par CEP augmentait. De plus, le prétraitement par CEP entraîne une réduction significative du temps de distillation. De plus, l'analyse physicochimique de l'huile essentielle en conditions de stress montre une plus grande stabilité.

Le traitement par CEP à 1 kV/cm, 100 impulsions, s'est avéré efficace pour l'extraction des huiles essentielles de *Lavandula angustifolia*, avec une réduction de la consommation d'énergie d'environ 50 %. Le rendement d'extraction après traitement CEP était de 3,045 % en 30 minutes de distillation, tandis qu'un rendement quasiment identique (2,953 %) était obtenu en 60

minutes de distillation par la méthode conventionnelle. Cette étude montre que 60 minutes constituaient la durée optimale de distillation pour extraire le maximum d'huiles essentielles de *Lavandula angustifolia* après traitement CEP. Pour une durée de distillation identique (60 minutes), le rendement obtenu par la méthode conventionnelle est inférieur de 35 % à celui obtenu après traitement CEP. L'analyse GC-MS a démontré la bonne qualité des huiles essentielles obtenues après traitement CEP, car elles contiennent les principaux composés déterminants pour leurs propriétés pharmacologiques et leur application industrielle. La composition variable de l'HE de *Lavandula angustifolia* suggère que cette plante pourrait exercer diverses activités biologiques et antioxydantes. L'évaluation de l'activité antioxydante de *Lavandula angustifolia*, réalisée par les deux méthodes, a montré une activité antioxydante élevée. Les résultats obtenus dans cette étude démontrent que le CEP pourrait être une technologie appropriée pour améliorer le rendement des HE, économiser de l'énergie et ouvrir de nouvelles perspectives pour leur application industrielle (Hadri et al., 2023).

Le système de traitement par CEP comprend une source haute tension continue ($U = 10 \text{ kV}$), une chambre de traitement, un éclateur et un condensateur de stockage d'énergie. L'alimentation haute tension charge tous les condensateurs jusqu'à ce que l'éclateur claque, provoquant ainsi une tension brutale (choc) appliquée à la charge (chambre de traitement où est déposé l'échantillon). L'échantillon de 60 g, contenant de l'eau, est placé entre les électrodes et soumis à un champ électrique d'intensité $E = U/d$ (U = tension, d = distance entre les électrodes). Le rapport eau/matériau est de 3:1 (mL:g). La chambre de traitement utilisée est constituée de deux électrodes parallèles en acier inoxydable, espacées de $d = 1,5 \text{ cm}$, ce qui représente l'épaisseur de l'échantillon. L'extraction par hydrodistillation a été réalisée à l'aide d'un appareil de type Clevenger, normalisé selon la Pharmacopée européenne (Hadri et al., 2023).

5.5 Application du CEP pour l'extraction de l'huile essentielle de *Basilic*

5.5.1 Matériel végétal

L'huile essentielle de *basilic* (HEB), dérivée d'*Ocimum basilicum*, est un produit polyvalent aux applications industrielles variées. l'huile essentielle de *basilic* est utilisée dans les emballages alimentaires pour prolonger la durée de conservation grâce à ses propriétés antimicrobiennes (Amor et al., 2021). De plus, les traitements à l'HEB sur les tomates ont montré une réduction de la croissance microbienne et un maintien de la qualité pendant le stockage, démontrant ainsi son potentiel comme conservateur naturel (Ionica et al., 2022) . Son

application dans les filières fruitières contribue à maintenir la qualité des fruits et à réduire leur altération (Tangpao et al., 2022).

Les propriétés aromatiques de l'huile essentielle de *basilic* en font un choix populaire pour aromatiser les aliments. Son utilisation pour rehausser le goût et l'arôme des produits alimentaires est bien documentée, contribuant à sa demande dans l'industrie agroalimentaire (Alexandre et al., 2021). En agriculture, l'huile essentielle de *basilic* est utilisée comme pesticide et fongicide naturel. Il a démontré son efficacité contre les champignons et les parasites des entrepôts, offrant une alternative écologique aux produits chimiques de synthèse (Torre et al., 2021). Son activité répulsive contre les insectes comme les cafards souligne encore son utilité dans la lutte antiparasitaire (Nour et al., 2022).

5.5.2 Protocole d'extraction

Le *basilic* (*O. basilicum* L.) est une plante herbacée annuelle cosmopolite aux usages variés (Torre et al., 2021). Le *basilic* (*Ocimum* L.) (famille des Lamiacées) est connu pour son arôme et son goût agréable. On y trouve 50 à 60 espèces largement répandues dans le monde entier (Mulugeta et al., 2024).

La teneur (%) en huile essentielle dépend des caractéristiques de chaque génotype de *basilic* et des conditions de culture, telles que l'apport en nutriments, mais en général, elle varie entre 0,07 et 1,9 % de la masse sèche. Des facteurs tels que le temps de distillation peuvent influencer à la fois la production et la qualité chimique des huiles essentielles, affectant ainsi également leurs propriétés biologiques (Torre et al., 2021).

Les feuilles de *basilic* séchées utilisées dans l'étude ont été achetées auprès d'un herboriste de Mascara (nord-ouest de l'Algérie) en juillet 2024. Pour éviter la perte de substances volatiles, le broyage a été évité, comme observé et indiqué dans plusieurs recherches (Adaşoğlu et al., 1994; Reverchon et al., 1995). La distillation a été effectuée sur le même lot de matériel.

Des échantillons de feuilles de *basilic* séchées ont été soumis à une hydrodistillation à l'aide d'un appareil de type Clevenger normalisé selon la Pharmacopée européenne. Plusieurs distillations ont été réalisées en faisant bouillir 30 g de matière végétale séchée dans de l'eau pendant 60 minutes dans un ballon de 2 litres. Les huiles essentielles extraites ont été collectées, stockées dans des récipients en verre ambré et conservées au réfrigérateur à 4 °C jusqu'à leur utilisation.

Le rendement d'extraction des huiles essentielles est déterminé par le rapport entre la masse d'huile essentielle extraite (m) et la masse totale de matière végétale traitée (M), exprimé comme suit :

$$Y (\%) = (m / M) \times 100 \quad (4-1)$$

5.5.3 Protocole de traitement par CEP

Les traitements CEP ont été réalisés à l'aide d'un système conçu et fabriqué par le laboratoire. Le système CEP (Figure 4.1) comprend un générateur d'impulsions et une chambre de traitement. Le générateur d'impulsions est conçu pour fonctionner à une tension de crête de 6 kV, générant des impulsions à décroissance exponentielle à partir de condensateurs de stockage d'énergie ($4 \mu\text{F} \pm 5 \%$, 3 000 V_{CC}, 115 A) à une fréquence de 1 Hz. La chambre de traitement est constituée d'un récipient rectangulaire contenant deux électrodes plates et parallèles en acier inoxydable, espacées de 1,5 cm, longues de 20 cm et hautes de 7 cm. Elles sont exposées à un champ électrique d'intensité calculée par l'équation :

$$E = U/d \quad (4-2)$$

Où : U : tension, d : distance entre les électrodes

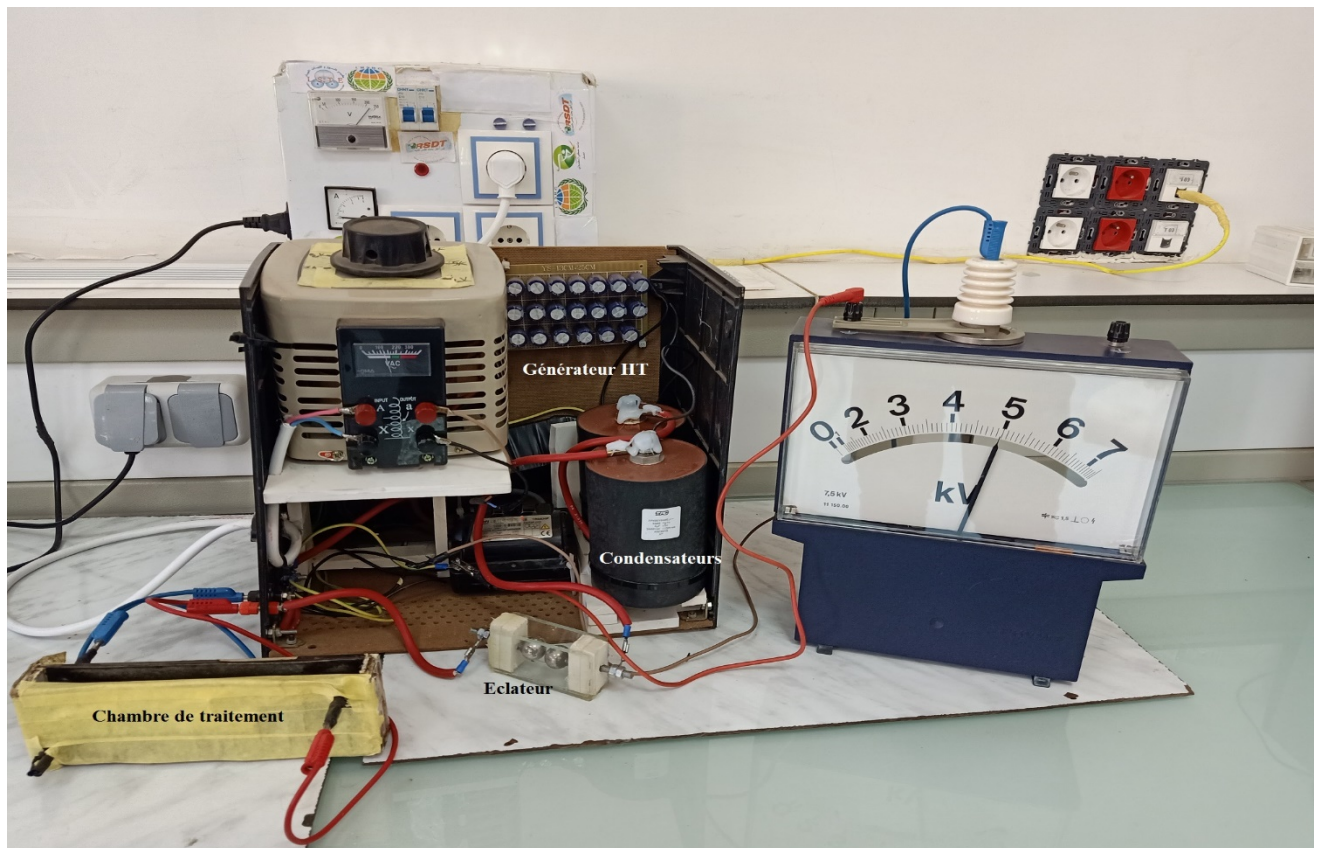


Figure 4.1 : Système de champ électrique pulsé par Miloudi et al. (2022)

De plus, les parois des électrodes ont été recouvertes d'un matériau isolant thermique pour éviter les pertes de chaleur, bien que le haut de la chambre soit ouvert. Immédiatement avant la distillation, les échantillons ont été exposés au CEP. Un échantillon de 30 g avec de l'eau a été placé dans la chambre de traitement. Le traitement a été effectué à une intensité de champ de 2 kV.cm^{-1} sur la base des résultats antérieurs et un apport d'énergie spécifique de 5 kJ.kg^{-1} , 10 kJ.kg^{-1} et 50 kJ.kg^{-1} dans lesquels les plantes aromatiques traitées par CEP ont amélioré leur rendement en huile essentielle. Le rapport eau/matériau était de 3:1 (mL:g). La variation de température de l'échantillon après l'application du CEP n'a pas dépassé 1°C ; l'échantillon non traité a été considéré comme échantillon témoin. Toutes les expériences ont été répétées 3 fois et les effets du CEP sur le rendement en huile essentielle ont été examinés.

5.5.4 Analyse par la méthode spectrophotométrie d'absorption

L'analyse spectrophotométrique a été réalisée à l'aide du spectrophotomètre JENWAY IC 6400. Le spectrophotomètre d'absorption a une plage de fonctionnement de 320 à 950 nm. La méthode spectrophotométrique d'analyse des huiles essentielles utilise l'absorption de la lumière monochromatique, ce qui augmente considérablement la précision de l'analyse. Selon la méthode décrite par Huet (1976), 0,25 g d'huile essentielle de basilic est prélevé et dilué dans 100 ml d'éthanol à 95 %. Cela crée une solution vraie qui respecte la loi de Beer, permettant des mesures d'absorbance fiables. La méthode est applicable aux mélanges et aux solutions incolores. L'analyse nécessite une faible quantité de solution. Elle présente une sensibilité élevée, avec une erreur instrumentale négligeable et permet de détecter des concentrations d'huile essentielle aussi faibles que 0,008 mg (Semenova et al., 2017) . Le principal avantage de la méthode spectrophotométrique UV est sa facilité d'utilisation, sa sécurité, sa rapidité et son faible coût. Ce qui le rend bien adapté comme approche analytique initiale (Piao et al., 2020; Teeka et al., 2014).

5.5.5 Résultats et discussion

5.5.5.1 Rendement en huile essentielle par la méthode conventionnelle

Dans la présente étude, le rendement d'extraction de l'huile essentielle de *basilic* obtenue par hydrodistillation conventionnelle était de 0,63 % après 60 min de distillation. Les rendements obtenus dans d'autres travaux étaient de 0,57 % (Zeković et al., 2015), 0,4 % de *basilic* de Bosnie (Stanojevic et al., 2017) et 0,76 % (Torre et al., 2021) après 120 min de distillation. Nos résultats sont en accord avec ceux de (Yaldiz & Camlica, 2021) qui ont rapporté que la teneur en HE de *basilic* d'origines diverses variait de 0,04 à 1,07 %. D'autres études ont montré que le

rendement en huile essentielle de *basilic* variait de 0,25 à 1,06 % (Karaca et al., 2017), de 0,75 à 0,84 % (Arabaci & Bayram, 2004) et de 0,41 % à 0,65 % (Antić et al., 2019).

Les variétés de *basilic* connues pour leurs rendements en huile essentielle les plus élevés étaient de 1,00 % pour la variété « Italiano », de 0,90 % pour la variété « Fraganza », et de moins de 0,57 % pour la variété « Manolo » (Silvestre & Pauletti, 2022). La quantité d'huile essentielle de feuilles de *basilic* obtenue dans la présente étude se situait dans la fourchette rapportée pour le basilic dans toutes les études citées précédemment. Le rendement en huile essentielle de *basilic* est influencé par plusieurs facteurs clés, notamment les conditions de stress abiotique, les méthodes de fertilisation, les variations génétiques et les conditions environnementales. La compréhension de ces facteurs peut aider à optimiser la culture du *basilic* pour la production d'huile essentielle (El Gohary et al., 2023; Kumar et al., 2024).

5.5.5.2 Effet du CEP sur le rendement d'extraction de HE

Sur la base des résultats expérimentaux, l'intensité du champ électrique pulsé de 2 kV.cm⁻¹ avec des apports d'énergie spécifique de 5 kJ.kg⁻¹, 10 kJ.kg⁻¹ et 50 kJ.kg⁻¹ et un temps de distillation de 60 min ont été utilisés. L'effet de différentes méthodes (hydrodistillation conventionnelle et hydrodistillation combinée avec CEP) sur le rendement en huile essentielle de *basilic* est illustré dans la Figure 4.2. En général, le rendement en HE des feuilles de *basilic* a été influencé et augmenté après un traitement par champ électrique pulsé.

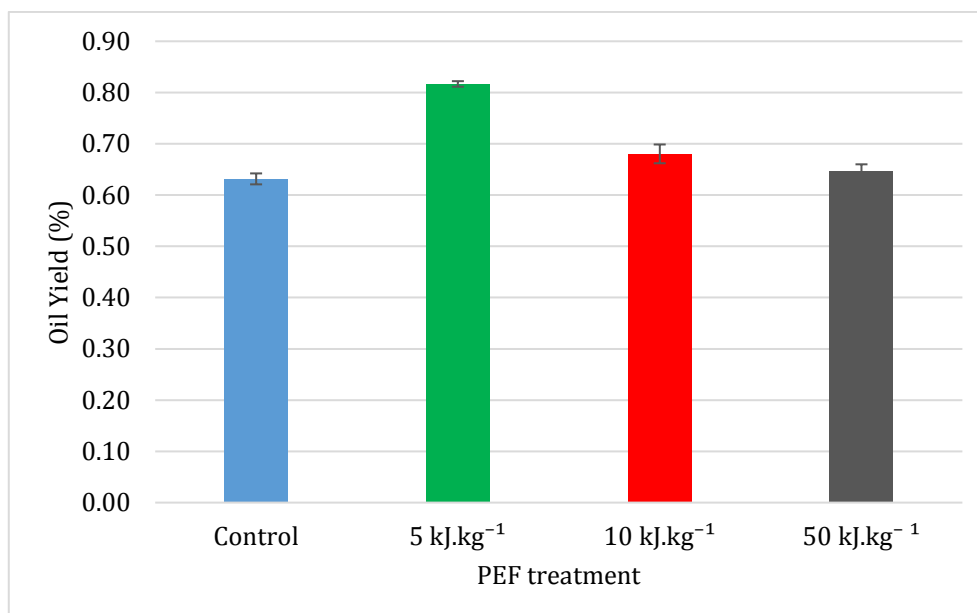


Figure 4.2 : Effet du CEP sur le rendement en HE de *basilic* (Baghdad et al., 2025)

Comme le montre la Figure 4.2, le rendement en HE de *basilic* obtenu par la méthode conventionnelle (témoin) est passé de 0,63 % à 0,82 % après un traitement CEP à 2,0 kV/cm⁻¹ et 5 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique totale, avec une augmentation de 30,16 % pour le même temps de distillation (60 min). Après l'application du CEP, la perméabilité du matériau intracellulaire augmente, ce qui améliore le transfert de masse et favorise l'extraction des huiles essentielles selon la littérature (Angersbach et al., 2000; Vorobiev & Lebovka, 2011; Zimmermann et al., 1974).

L'augmentation de l'intensité du PEF de 5 kJ.kg⁻¹ à 10 kJ.kg⁻¹ puis à 50 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique totale n'a pas eu d'impact significatif sur l'augmentation du rendement d'extraction de l'huile essentielle de basilic. Cependant, des diminutions de 17,07 % et 20,73 % ont été observées lorsque l'intensité du CEP de 2 kV.cm⁻¹ est passée de 5 kJ.kg⁻¹ à 10 kJ.kg⁻¹ puis à 50 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique totale respectivement. Ces résultats ont prouvé que le traitement de matières végétales à des intensités CEP très élevées entraîne des pertes de quantité d'huile en raison de dommages aux membranes cellulaires pendant le traitement qui augmentent la vaporisation de l'huile volatile comme indiqué par (Miloudi, Hamimed, et al., 2018; Tintchev et al., 2012; Yajun et al., 2017). Nous avons également observé une diminution non significative du rendement en EO de 0,68 % à 0,65 % lorsque l'intensité du CEP augmentait de 10 kJ.kg⁻¹ à 50 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique totale.

5.5.5.3 Effet du CEP sur l'absorption de l'HE de basilic

L'évaluation de la qualité des huiles essentielles par des techniques d'absorption fait appel à des méthodologies avancées qui améliorent la précision et l'efficacité. Ces techniques analysent les interactions de la lumière avec les huiles afin de déterminer leurs propriétés d'absorption, fournissant des informations essentielles pour l'évaluation de la qualité (Semenova et al., 2017).

L'absorbance de différents échantillons d'huile essentielle de basilic traités et non traités au CEP (témoin) a été mesurée par spectrophotomètre conformément à la littérature (Brlek et al., 2021; Lafhal et al., 2016; Predoi et al., 2018; Teeka et al., 2014).

La figure 4.3 montre que l'absorbance de l'huile essentielle de basilic traitée par un CEP de 2 kV.cm⁻¹, 5 kJ.kg⁻¹ et 10 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique était supérieure à celle de l'huile essentielle d'un échantillon de référence (témoin).

Nous avons également observé que l'intensité du CEP a un effet sur l'absorbance de l'huile essentielle. Dans ce cas, l'absorbance de l'huile essentielle d'un échantillon traité par un CEP de 2 kV.cm⁻¹ et 10 kJ.kg⁻¹ d'énergie spécifique était supérieure à celle d'un échantillon traité par

un CEP de 2 kV.cm^{-1} et 5 kJ.kg^{-1} d'énergie spécifique. La capacité élevée d'absorption d'huile essentielle signifie que le matériau peut absorber et retenir efficacement une quantité importante d'huile essentielle dans sa structure, améliorant ainsi ses propriétés antibactériennes et thérapeutiques, et prolongeant le temps de libération de l'huile pour une efficacité prolongée selon la littérature (Numan et al., 2019; Radomski et al., 2021; Samfira et al., 2015).

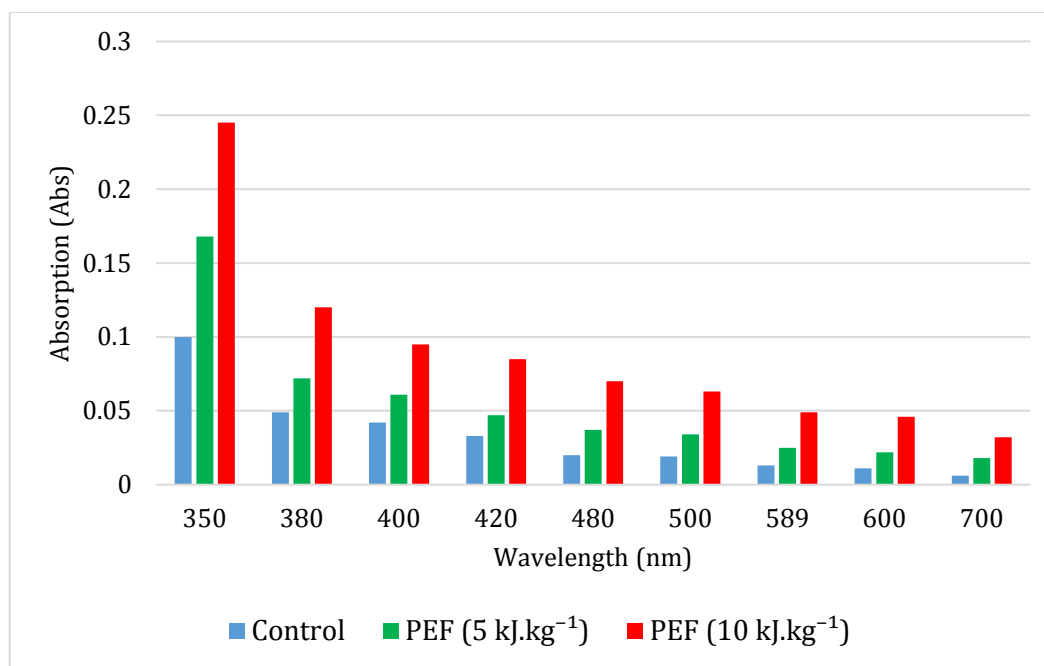


Figure 4.3 : Effet du CEP sur l'absorption de HE de *basilic*, plage 350–700 nm (Baghdad et al., 2025)

Dans la Figure 4.4, il a été observé que l'absorbance de l'échantillon traité avec un CEP de 2 kV.cm^{-1} et 50 kJ.kg^{-1} d'énergie spécifique a une valeur faible par rapport à l'échantillon de référence et aux deux autres échantillons traités avec CEP de 2 kV.cm^{-1} , 5 kJ.kg^{-1} et 10 kJ.kg^{-1} d'énergie spécifique respectivement. Cela signifie que le traitement de l'HE de basilic avec des CEP à très haute énergie spécifique a provoqué une dégradation de l'HE due à l'oxydation et à la polymérisation. Ce changement d'absorbance peut entraîner une réduction de la stabilité, ce qui peut réduire considérablement la durée de conservation, rendant les huiles essentielles moins efficaces et potentiellement dangereuses pour les consommateurs, comme le rapportent plusieurs auteurs (Al-Harrasi et al., 2022; Numan et al., 2019; Samfira et al., 2015; Turek & Stintzing, 2013).

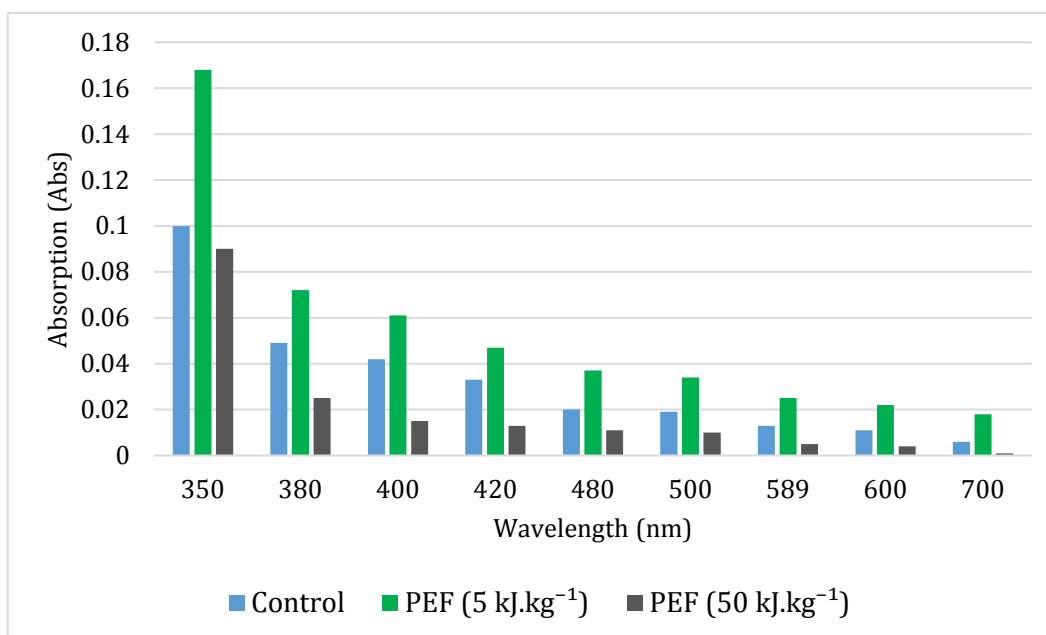


Figure 4.4 : Effet du CEP sur l'absorption de HE de *basilic* (Baghdad et al., 2025)

Les résultats des valeurs d'absorbance des huiles essentielles à la longueur d'onde standard $\lambda = 589,3$ nm (qui est la longueur d'onde standard utilisée) sont présentés dans la figure 4.5.

Une absorbance élevée, comme dans le cas de l'huile essentielle de *basilic* traitée avec un CEP de 2 kV.cm^{-1} et une énergie spécifique de 10 kJ.kg^{-1} , indique que l'échantillon possède un pouvoir réducteur élevé (Gholivand et al., 2010). À mesure que le pouvoir réducteur d'une substance augmente, l'absorption de la lumière par l'échantillon s'améliore. Cependant, la diminution de l'absorbance reflète l'inhibition de l'oxydation qui peut être observée sous l'action des antioxydants, comme dans le cas de l'huile essentielle traitée avec un CEP de 2 kV.cm^{-1} et une énergie spécifique de 50 kJ.kg^{-1} , selon la littérature (Chitprasert & Ngamekaue, 2017; Efrati et al., 2014; Zahra & Susanti, 2023).

5.6 Conclusion

Cette étude a démontré que le traitement par champ électrique pulsé augmente efficacement le rendement d'extraction de l'huile essentielle de basilic. Une amélioration de l'extraction a été observée pour tous les traitements CEP appliqués avec un apport énergétique allant jusqu'à certaines valeurs. L'extraction des huiles essentielles par la méthode conventionnelle a donné un rendement de 0,63 %, tandis que le meilleur rendement était de 0,82 % après un traitement CEP de 2 kV.cm^{-1} et une énergie spécifique de 5 kJ.kg^{-1} en 60 minutes de distillation. Un traitement CEP de 2 kV.cm^{-1} et une énergie spécifique totale de 5 kJ.kg^{-1} a été suffisant pour améliorer l'extraction des huiles essentielles de basilic.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ces études portant sur le traitement par champ électrique pulsé s'inscrivent dans la continuité des recherches visant à développer des technologies vertes dans l'industrie. Les études publiées de cette thèse ont montré des résultats prometteurs, annonçant l'avènement de la nouvelle technologie de puissance pulsée dans le traitement de la matière première végétale pour l'extraction des huiles essentielles. L'ensemble des simulations réalisées et nos résultats expérimentaux nous permettent de conclure que le CEP améliore significativement le rendement de l'extraction.

Dans cette recherche, deux alimentations haute tension DC et pulsée, utilisées dans des expériences d'électroporation, ont été conçues et fabriquées. Le contrôle précis des paramètres d'impulsion étant important pour les applications de champs électriques pulsés, notamment pour l'optimisation d'un procédé. Des expériences de traitement par CEP ont été réalisées à l'aide d'un système conçu et fabriqué par le laboratoire. Le générateur d'impulsions est conçu pour fonctionner à une tension de crête de 5 kV, générant des impulsions à décroissance exponentielle à partir de condensateurs de stockage d'énergie à une fréquence de 1 Hz.

L'étude expérimentale a été menée pour étudier les variations qualitatives et quantitatives de l'application d'un champ électrique pulsé (CEP) sur l'extraction de l'huile essentielle de *basilic*. Cette méthode est présentée comme une technique non thermique pour perméabiliser les membranes des tissus végétaux, améliorant ainsi le rendement et l'efficacité de l'extraction. Des niveaux d'énergie CEP optimaux peuvent améliorer considérablement le rendement en huile sans compromettre la qualité, ce qui en fait une technique précieuse pour les applications industrielles. Après traitement par CEP d'une intensité de 2 kV.cm^{-1} , d'une énergie spécifique de 5 kJ.kg^{-1} et d'une distillation de 60 minutes, le rendement en huile essentielle (HE) de *basilic* est passé de 0,63 % (témoin) à 0,82 %, soit une augmentation de 30,16 %. Cependant, lorsque les feuilles de *basilic* ont été traitées avec un CEP à très haute énergie spécifique (50 kJ.kg^{-1}), une augmentation non significative du rendement en HE par rapport au témoin a été observée. La consommation d'énergie relativement faible et la vitesse de traitement permises par la technique CEP représentent un atout majeur pour le traitement des matières premières végétales. L'étude de l'effet du champ électrique pulsé (CEP) sur l'absorbance de l'HE de *basilic* a révélé une augmentation de l'absorption des huiles essentielles lors de l'application du CEP à des énergies spécifiques modérées. Une absorbance élevée, comme dans le cas de l'huile

essentielle de basilic traitée avec un CEP de 2 kV.cm^{-1} et une énergie spécifique de 10 kJ.kg^{-1} , indique que l'échantillon a un pouvoir réducteur élevé.

Les résultats de l'analyse spectrométrique obtenus dans cette étude montrent que le CEP a des effets variables sur l'absorption des huiles essentielles de basilic. D'après nos résultats, le CEP a permis une augmentation de l'absorption, ce qui joue un rôle important dans l'évaluation de la qualité des huiles essentielles. Un traitement par champ électrique pulsé (CEP) dans des conditions optimisées pour l'extraction des huiles essentielles peut minimiser la consommation d'énergie, augmenter la productivité et améliorer la qualité.

Le développement de concepts pour l'évaluation des intensités de traitement et la comparaison de différentes conceptions de chambres de traitement sera nécessaire, sur la base des paramètres clés abordés, afin d'établir des procédures expérimentales standard. L'intégration du traitement du CEP dans des concepts de traitement complexes nécessite la prise en compte des étapes de traitement connexes. Ceci est particulièrement pertinent pour l'application du CEP à la désintégration des matières premières végétales, car le CEP sert de prétraitement aux étapes de traitement ultérieures telles que le séchage, l'extraction ou la récupération du jus. La prise en compte des propriétés texturales, de la granulométrie et de la taille des cellules des différentes matières premières est essentielle pour évaluer le potentiel de l'application du CEP à l'amélioration des procédés de transfert de masse, notamment pour accroître la récupération du jus des purées de fruits et légumes. L'ajustement et l'optimisation des étapes de traitement seront essentiels pour contrôler et maximiser les effets bénéfiques du CEP.

Les recherches futures devraient se concentrer sur l'adaptation du CEP à une utilisation industrielle, en optimisant des paramètres tels que la longueur d'impulsion, la fréquence et l'intensité du champ électrique. Comprendre son impact sur la composition chimique, la bioactivité et la stabilité est crucial pour les applications pharmaceutiques, cosmétiques et alimentaires.

Pour les générateurs d'énergie pulsée destinés aux applications agro-alimentaires, il est important de concevoir une sortie haute tension répétitive avec une amplitude de tension et des formes d'onde optimales, afin de délivrer une puissance pulsée modérée aux matières végétales et charges biologiques.

Bibliographie

Bibliographie

- Abenoza, M., Benito, M., Saldaña, G., Álvarez, I., Raso, J., & Sánchez-Gimeno, A. (2013). Effects of pulsed electric field on yield extraction and quality of olive oil. *Food and Bioprocess Technology*, 6, 1367-1373. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0817-6>
- Adaşoğlu, N., Dinçer, S., & Bolat, E. (1994). Supercritical-fluid extraction of essential oil from Turkish lavender flowers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 7(2), 93-99. [https://doi.org/10.1016/0896-8446\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/0896-8446(94)90045-0)
- Akiyama, H., Sakugawa, T., Namihira, T., Takaki, K., Minamitani, Y., & Shimomura, N. (2007). Industrial applications of pulsed power technology. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation*, 14(5), 1051-1064.
- Al-Harrasi, A., Bhatia, S., Kaushik, D., Ahmed, M. M., Anwer, K., & Sharma, P. (2022). Quality Control of Essential Oils. In *Role of Essential Oils in the Management of COVID-19* (pp. 169-177). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003175933-13>
- Al-Refaie, D., Mehryar, G. F., & Shahein, M. (2023). Functional Role of Essential Oils as Antimicrobial and Antioxidant Agents in Food Industry: A Review. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 19(1), 70-88. <https://doi.org/10.35516/jjas.v19i1.1237>
- Alexandre, S., Vital, A. C. P., Mottin, C., do Prado, R. M., Ornaghi, M. G., Ramos, T. R.,...do Prado, I. N. (2021). Use of alginate edible coating and basil (*Ocimum spp*) extracts on beef characteristics during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 58, 3835-3843. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04844-1>
- Amor, G., Sabbah, M., Caputo, L., Idbella, M., De Feo, V., Porta, R.,...Mauriello, G. (2021). Basil essential oil: Composition, antimicrobial properties, and microencapsulation to produce active chitosan films for food packaging. *Foods*, 10(1), 121. <https://doi.org/10.3390/FOODS10010121>
- Angersbach, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2000). Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 1(2), 135-149. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(00\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(00)00010-2)
- Antić, M. P., Jelačić, S. C., & Knudsen, T. M. Š. (2019). Chemical composition of the essential oils of three *Ocimum basilicum* L. cultivars from Serbia. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(2), 347-351. <https://doi.org/10.15835/nbha47111250>
- Arabaci, O., & Bayram, E. (2004). The effect of nitrogen fertilization and different plant densities on some agronomic and technologic characteristic of *Ocimum basilicum* L.(Basil). *Journal of Agronomy*, 3(4), 255-262. <https://doi.org/10.3923/ja.2004.255.262>
- Assadpour, E., Can Karaça, A., Fasamanesh, M., Mahdavi, S. A., Shariat-Alavi, M., Feng, J.,...Jafari, S. M. (2024). Application of essential oils as natural biopesticides; recent advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(19), 6477-6497. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2170317>
- Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K., Mohamed, A., Sahena, F.,...Omar, A. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of food Engineering*, 117(4), 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>

- Baghdad, A., Elkebir, A., Miloudi, K., Kherbouche, F., Benmimoun, Y., & Hamimed, A. (2025). Effect of pulsed electric field on yield and absorption of Basil essential oil. *Journal of Agriculture and Applied Biology*, 6(2), 210-221.
- Barba, F. J., Parniakov, O., Pereira, S. A., Wiktor, A., Grimi, N., Boussetta, N.,...Witrowa-Rajchert, D. (2015). Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food research international*, 77, 773-798. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>
- Barbosa-Cánovas, G. V., Tapia, M. S., & Cano, M. P. (2004). *Novel food processing technologies*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780203997277>
- Barros, M., Redondo, L., Rego, D., Serra, C., & Miloudi, K. (2022). Extraction of essential oils from plants by hydrodistillation with pulsed electric fields (PEF) pre-treatment. *Applied Sciences*, 12(16), 8107. <https://doi.org/10.3390/app12168107>
- Barsotti, L., Merle, P., & Cheftel, J. (1999). Food processing by pulsed electric fields. I. Physical aspects. *Food Reviews International*, 15(2), 163-180.
- Bernhoff, A. L. J. I. H., & Leijon, M. (2007). Inductive high voltage pulse generator based on resonance system. *Journal of Electrical Engineering*, 58(1), 19-25.
- Berzosa, A., Marín-Sánchez, J., Álvarez, I., Sánchez-Gimeno, C., & Raso, J. (2024). Pulsed Electric Field Technology for the Extraction of Glutathione from *Saccharomyces cerevisiae*. *Foods*, 13(12), 1916. <https://doi.org/10.3390/foods13121916>
- Bocker, R., & Silva, E. K. (2022). Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices. *Food Chemistry: X*, 15, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100398>
- Bolouri, P., Salami, R., Kouhi, S., Kordi, M., Asgari Lajayer, B., Hadian, J., & Astatkie, T. (2022). Applications of essential oils and plant extracts in different industries. *Molecules*, 27(24), 8999. <https://doi.org/10.3390/molecules27248999>
- Bousbia, N., Vian, M. A., Ferhat, M. A., Meklati, B. Y., & Chemat, F. (2009). A new process for extraction of essential oil from Citrus peels: Microwave hydrodiffusion and gravity. *Journal of food Engineering*, 90(3), 409-413. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.034>
- Brah, A. S., Obuah, C., & Adokoh, C. K. (2024). Innovations and modifications of current extraction methods and techniques of citrus essential oils: a review. *Discover Applied Sciences*, 6(9), 460. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06100-z>
- Brianceau, S., Turk, M., Vitrac, X., & Vorobiev, E. (2015). Combined densification and pulsed electric field treatment for selective polyphenols recovery from fermented grape pomace. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 29, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.07.010>
- Brllek, I., Ludaš, A., & Sutlović, A. (2021). Synthesis and spectrophotometric analysis of microcapsules containing immortelle essential oil. *Molecules*, 26(8), 2390. <https://doi.org/10.3390/molecules26082390>
- Bulut, S., & Gökalp, Z. (2022). Agriculture and environment interaction. *Current Trends in Natural Sciences*, 11(21), 372-380. <https://doi.org/10.47068/ctns.2022.v11i21.041>
- Chitprasert, P., & Ngamekaue, N. (2017). Stability enhancement of *Ocimum Sanctum* Linn. essential oils using stearic acid in aluminum carboxymethyl cellulose film-coated

- gelatin microcapsules. *Journal of food science*, 82(6), 1310-1318. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13738>
- Craveiro, A., Matos, F., Alencar, J., & Plumel, M. (1989). Microwave oven extraction of an essential oil. *Flavour and Fragrance Journal*, 4(1), 43-44. <https://doi.org/10.1002/ffj.2730040110>
- Crescente, G., Bouymajane, A., Cascone, G., Squillaci, G., Morana, A., & Moccia, S. (2023). Essential Oils: An Overview of Extraction Methods and Food Applications. *Current Nutraceuticals*, 4(1). <https://doi.org/10.2174/2665978604666230601104713>
- Cseke, L. J., & Kaufman, P. (1999). How and why these compounds are synthesized by plants. *Natural products from plants*, 37-90.
- de Souza Rodrigues, H. L., Kolosowski, I. M. M., Benevides, V. P., Saraiva, M. M., & Junior, A. B. (2025). Essential oils used in the poultry industry: would it be an effective green alternative against *Salmonella* spp. dissemination and antimicrobial resistance? *The Microbe*, 100248. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100248>
- De Vito, F. (2006). *Application of Pulsed Electric Field (PEF): Techniques in Food Processing* [Thèse de doctorat, Université de Salerne, Italie].
- Díaz-Reinoso, B., Rivas, S., Rivas, J., & Domínguez, H. (2023). Subcritical water extraction of essential oils and plant oils. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 36, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101332>
- Dobrev, A., Tintchev, F., Dzheurmanski, A., & Toepfl, S. (2013). Effect of pulsed electric fields on distillation of essential oil crops. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, 66, 1255-1260. https://www.researchgate.net/publication/267030771_Effect_of_pulse
- Dunn, J., & Pearlman, J. (1987). Methods and apparatus for extending the shelf life of fluid food products. *Patent Number US Patent 4,695,472*.
- Dwivedi, C. K., & Daigavane, M. B. (2011). Multi-purpose low cost DC high voltage generator (60 kV output), using Cockcroft-Walton voltage multiplier circuit. *International Journal of Science and Technology Education Research*, 2(7).
- Dymek, K., Dejme, P., & Galindo, F. G. (2014). Influence of pulsed electric field protocols on the reversible permeabilization of rucola leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 7, 761-773. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1067-y>
- Efrati, R., Natan, M., Pelah, A., Haber, A., Banin, E., Dotan, A., & Ophir, A. (2014). The effect of polyethylene crystallinity and polarity on thermal stability and controlled release of essential oils in antimicrobial films. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(11). <https://doi.org/10.1002/APP.40309>
- El Gohary, A. E., Hendawy, S. F., Hussein, M. S., Elsayed, S. I., Omer, E. A., & El-Gendy, A. E.-N. G. (2023). Application of Humic Acid and Algal Extract: An Eco-friendly Strategy for Improving Growth and Essential Oil Composition of Two Basil Varieties under Salty Soil Stress Conditions. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 26(1), 32-44. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2023.2173023>
- Elgendy, M. A. (2018). *High-voltage pulse generators incorporating modular multilevel converter sub-modules* [Thèse de doctorat, University of Strathclyde].

- Feng, Y., Yang, T., Zhang, Y., Zhang, A., Gai, L., & Niu, D. (2022). Potential applications of pulsed electric field in the fermented wine industry. *Frontiers in Nutrition*, 9, 1048632. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1048632>
- Fincan, M., & Dejmek, P. (2002). In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 223-230. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00079-1)
- Gachovska, T., Ngadi, M., & Raghavan, G. (2006). Pulsed electric field assisted juice extraction from alfalfa. *Canadian Biosystems Engineering*, 48, 3.
- Gholivand, M. B., Rahimi-Nasrabadi, M., Batooli, H., & Ebrahimabadi, A. H. (2010). Chemical composition and antioxidant activities of the essential oil and methanol extracts of *Psammogeton canescens*. *Food and Chemical Toxicology*, 48(1), 24-28. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.09.007>
- Giesselmann, M., Palmer, B., Neuber, A., & Donlon, J. (2005). High voltage impulse generator using HV-IGBTs. 2005 IEEE Pulsed Power Conference,
- Grenier, J. (2006). *Design of a MOSFET-based pulsed power supply for electroporation* [thèse de doctorat, University of Waterloo].
- Grimi, N. (2009). *Vers l'intensification du pressage industriel des agroressources par champs électriques pulsés: étude multi-échelles* [Thèse de doctorat, Compiègne, France].
- Hadri, A. M., Benmimoun, Y., Miloudi, K., Bouhadda, Y., Elsayed, S. T., & Hamimed, A. (2023). Effect of pulsed electric field treatment on the extraction of essential oil from lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.). *International Journal of Biology and Biotechnology*, 20, 37-46. <https://ijbbku.com/20-1-23.php>
- Hernández-Corroto, E., Marina, M. L., & García, M. C. (2023). Application of high-voltage electrical discharges to the recovery of phenolic compounds from winery wastes. In *Processing of Food Products and Wastes with High Voltage Electrical Discharges* (pp. 95-119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95403-7.00006-4>
- Huet, R. (1976). L'ISO adopte l'indice CD. *Revue Fruits ISHS*, 31(1), 67-68. <https://revues.cirad.fr/index.php/fruits/issue/view/3880>
- Ionica, M. E., Tutulescu, F., & Bită, A. (2022). Development of basil essential oil (BEO) as a novel alternative to prolong the storage of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Agriculture*, 12(12), 2135. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122135>
- ISO. (1997). *Matières premières aromatiques d'origine naturelle -vocabulaire*. <https://www.iso.org/fr/standard/16866.html>
- Jeantet, R., Mc Keag, J. R., Fernández, J. C., Grosset, N., Baron, F., & Korolczuk, J. (2004). Traitement d'ovoproduits en continu par champs électriques pulsés. *Science des Aliments*, 24, 137-158.
- Jeong, S.-H., Lee, H.-B., & Lee, D.-U. (2024). Effects of Pulsed Electric Field on Meat Tenderization and Microbial Decontamination: A Review. *Food Science of Animal Resources*, 44(2), 239. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2023.e82>
- Johnstone, P., & Bodger, P. (2001). Applications of a high-voltage SMPS in water disinfection. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 148(2), 41-45. <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20010297>

- Karaca, M., Kara, Ş. M., & Özcan, M. M. (2017). Bazı fesleğen (*Ocimum basilicum* L.) popülasyonlarının herba verimi ve uçucu yağ oranının belirlenmesi. *Ordu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 160-169.
- Kind, D. (2013). *An introduction to high-voltage experimental technique: textbook for electrical engineers*. Springer-Verlag.
- Kuldiloke, J., Eshtiaghi, M. N., Neatpisarnvanit, C., & Uan-On, T. (2008). Application of high electronic field pulses for sugar cane processing. *CURRENT APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 8(2), 75-83.
- Kumar, A., Sharma, N., Kumar, A., Kumar, D., Jnanesha, A., Gupta, A. K.,...Lal, R. (2024). Differential responses of genotype× environment interaction on Agronomic interventions affect the yield and quality of essential oil of interspecific basil hybrid of *Ocimum basilicum* L.× *Ocimum kilimandscharicum*. *Ecological Genetics and Genomics*, 30, 100217. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2024.100217>
- Kumar, P., Barrett, D. M., Delwiche, M. J., & Stroeve, P. (2011). Pulsed electric field pretreatment of switchgrass and wood chip species for biofuel production. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(19), 10996-11001. <https://doi.org/10.1021/ie200555u>
- Kurćubić, V. S., Stanišić, N., Stajić, S. B., Dmitrić, M., Živković, S., Kurćubić, L. V.,...Mašković, J. (2024). Valorizing Grape Pomace: A Review of Applications, Nutritional Benefits, and Potential in Functional Food Development. *Foods*, 13(24), 4169. <https://doi.org/10.3390/foods13244169>
- Lafhal, S., Vanloot, P., Bombarda, I., Kister, J., & Dupuy, N. (2016). Identification of metabolomic markers of lavender and lavandin essential oils using mid-infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, 85, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2016.04.004>
- Lafon, P. (1999). *L'oeuf et les ovoproduits* (Vol. Réf : F7010 v1). Ed. Techniques Ingénieur.
- Lardry, J.-M., & Haberkorn, V. (2007). L'aromathérapie et les huiles essentielles. *Kinésithérapie, la revue*, 7(61), 14-17. [https://doi.org/10.1016/S1779-0123\(07\)70308-X](https://doi.org/10.1016/S1779-0123(07)70308-X)
- Letellier, M., & Budzinski, H. (1999). Microwave assisted extraction of organic compounds. *Analusis*, 27(3), 259-270. <https://doi.org/doi.org/10.1051/analusis:1999116>
- Lindmark, J., Lagerkvist, A., Nilsson, E., Carlsson, M., Thorin, E., & Dahlquist, E. (2014). Evaluating the effects of electroporation pre-treatment on the biogas yield from ley crop silage. *Applied biochemistry and biotechnology*, 174, 2616-2625. <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1213-7>
- Lopes, J. d. C., Madureira, J., Margaça, F. M., & Cabo Verde, S. (2025). Grape Pomace: A Review of Its Bioactive Phenolic Compounds, Health Benefits, and Applications. *Molecules*, 30(2), 362. <https://doi.org/10.3390/molecules30020362>
- Lucas, J. R. (2001). High voltage engineering. *Sri Lanka*.
- Mansson, C. (1999). Pulsed power technology and applications-Scandinavia. *EPRI, Palo Alto, CA*.
- Miloudi, K. (2018). *Contribution à l'étude de l'extraction des huiles essentielles par champ électrique pulsé haute tension* [Thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes, Algérie].

- Miloudi, K., Hamimed, A., Benmimoun, Y., Bellebna, Y., Taibi, A., & Tilmatine, A. (2018). Intensification of essential oil extraction of the *Marrubium vulgare* using pulsed electric field. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(3), 811-824. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1484820>
- Miloudi, K., Hamimed, A., Bouhadda, Y., Benmimoun, Y., Belhouala, K., & Benarba, B. (2022). Impact of pulsed electric field treatment for extracting essential oil from *Mentha Spicata* L. *International Journal of Electrochemical Science*, 17(8), 220829. <https://doi.org/10.20964/2022.08.41>
- Miloudi, K., Tilmatine, A., BENMIMOUN, Y., HAMIMED, A., TAIBI, A., & BELLEBNA, Y. (2018). Intensification of Essential Oil Extraction of *Artemisia herba alba* Using Pulsed Electric Field. 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM),
- Min, S., Evrendilek, G. A., & Zhang, H. Q. (2007). Pulsed electric fields: processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35(1), 59-73. <https://doi.org/10.1109/TPS.2006.889290>
- Mulugeta, S. M., Gosztola, B., & Radácsi, P. (2024). Diversity in morphology and bioactive compounds among selected *Ocimum* species. *Biochemical Systematics and Ecology*, 114, 104826. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104826>
- Naliyadhara, N., Kumar, A., Girisa, S., Daimary, U. D., Hegde, M., & Kunnumakkara, A. B. (2022). Pulsed electric field (PEF): Avant-garde extraction escalation technology in food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 122, 238-255. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.019>
- Nour, A. H., İdris, A. A., Ishag, O., & Nour, A. (2022). Chemical Composition and Repellent Activity of Methyl Cinnamate-Rich Basil (*Ocimum basilicum*) Essential Oil. *Journal of the Turkish Chemical Society Section A: Chemistry*, 9(4), 1277-1284. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1108807>
- Numan, N. H., Hussein, K., Sadkhan, A. K., & AL-Nuwab, M. A. (2019). Characterization of Some Natural Oils Used for Medical Purposes by Ultraviolet–Visible spectroscopy. *journal of the college of basic education*, 25(105), 36-44. <https://doi.org/10.35950/CBEJ.V25I105.4753>
- Oey, I., Giteru, S., & Leong, S. Y. (2022). Methods and protocols for pulsed electric fields treatment of foods. In *Emerging Food Processing Technologies* (pp. 1-29). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2136-3_1
- Ozenda, P. (1983). Flore du Sahara. Deuxième édition du CNRS. Paris, 622p.
- Piao, X., Zhang, L., Zhang, S., & Yi, F. (2020). Nematicidal action of microencapsulated essential oil of flesh fingered citron. *Journal of Chemistry*, 2020(1), 7934605. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/7934605>
- Popescu, I. E., Gostin, I. N., & Blidar, C. F. (2024). An Overview of the Mechanisms of Action and Administration Technologies of the Essential Oils Used as Green Insecticides. *AgriEngineering*, 6(2), 1195-1217. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020068>
- Pourzaki, A., & Mirzaee, H. (2009). New high voltage pulse generators. *Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering)*, 2(1), 65-76.

- Predoi, D., Groza, A., Iconaru, S. L., Predoi, G., Barbuceanu, F., Guegan, R.,...Cimpeanu, C. (2018). Properties of basil and lavender essential oils adsorbed on the surface of hydroxyapatite. *Materials*, 11(5), 652. <https://doi.org/10.3390/ma11050652>
- Putri, R. I., Syamsiana, I. N., & Hawa, L. C. (2010). Design of high voltage pulse generator for pasteurization by pulse electric field (PEF). *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2, 916-923. <https://doi.org/10.7763/ijcee.2010.v2.252>
- Qu, H., Wang, Y., Wang, B., & Li, C. (2023). Pulsed electric field treatment of seeds altered the endophytic bacterial community and promotes early growth of roots in buckwheat. *BMC microbiology*, 23(1), 290. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2695450/v1>
- Radomski, F. A. D., de Araujo Duarte, C., Ribeiro, E., & de Sá, E. L. (2021). Optical Investigation of Essential Oils Using Absorbance and Photoluminescence. *Applied Spectroscopy*, 75(9), 1136-1145. <https://doi.org/10.1177/0003702821989694>
- Ranjha, M. M. A., Kanwal, R., Shafique, B., Arshad, R. N., Irfan, S., Kieliszek, M.,...Roobab, U. (2021). A critical review on pulsed electric field: A novel technology for the extraction of phytoconstituents. *Molecules*, 26(16), 4893. <https://doi.org/10.3390/molecules26164893>
- Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2>
- Ren, B., & Kang, Y. (2019). Aggregation of oil droplets and demulsification performance of oil-in-water emulsion in bidirectional pulsed electric field. *Separation and Purification Technology*, 211, 958-965. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.053>
- Reverchon, E., Porta, G. D., & Senatore, F. (1995). Supercritical CO₂ extraction and fractionation of lavender essential oil and waxes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(6), 1654-1658. <https://doi.org/10.1021/jf00054a045>
- Richard, H., & Multon, J.-L. (1992). *Les arômes alimentaires [Food aromas]*. Technique & Documentation-Lavoisier Paris, France.
- Salanță, L. C., & Crotova, J. (2022). An Update on Effectiveness and Practicability of Plant Essential Oils in the Food Industry. *Plants*, 11(19), NA-NA. <https://doi.org/10.3390/plants11192488>
- Samfira, I., Rodino, S., Petrache, P., Cristina, R., Butu, M., & Butnariu, M. (2015). Characterization and identity confirmation of essential oils by mid infrared absorption spectrophotometry. *Dig. J. Nanomater. Biostruct*, 10(2), 557-566. <https://www.semanticscholar.org/paper/CHARACTERIZATION-AND-IDENTITY-CONFIRMATION-OF-OILS-Samfira-Rodino/ed2685fe327a5f8c2449f343c9f74555f45f1e15>
- Semenova, E., Presnyakova, V., Goncharov, D., Goncharov, M., Presnyakova, E., Presnyakov, S.,...Kolesnikova, S. (2017). *Spectrophotometric method for quantitative measuring essential oil in aromatic water and distillate with rose smell* Journal of Physics: Conference Series, 784 (1) 012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/784/1/012053>
- Sharma, A., Kumar, V., Mittal, C., Rana, V., Dabral, K., & Parveen, G. (2023). Role of Essential Oil Used Pharmaceutical Cosmetic Product. *Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 2(3), 147-157. <https://doi.org/10.55544/jrasb.2.3.19>
- Shorstkii, I., Mirshekarloo, M. S., & Koshevoi, E. (2017). Application of pulsed electric field for oil extraction from sunflower seeds: electrical parameter effects on oil yield. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12281.

- Shorstkii, I., Stuehmeier-Niehe, C., Sosnin, M., Mounassar, E. H. A., Comiotto-Alles, M., Siemer, C., & Toepfl, S. (2023). Pulsed Electric Field Treatment Application to Improve Product Yield and Efficiency of Bioactive Compounds through Extraction from Peels in Kiwifruit Processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2023(1), 8172255. <https://doi.org/10.1155/2023/8172255>
- Silvestre, W. P., & Pauletti, G. F. (2022). Evaluation of extraction yield and chemical composition of the essential oil of five commercial varieties of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(10), 44-50. <https://doi.org/10.18226/25253824.v6.n10.06>
- Sitzmann, W., Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2016). Applications of electricity and specifically pulsed electric fields in food processing: Historical backgrounds. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.09.021>
- Stanojevic, L. P., Marjanovic-Balaban, Z. R., Kalaba, V. D., Stanojevic, J. S., Cvetkovic, D. J., & Cakic, M. D. (2017). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activity of basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20(6), 1557-1569. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2017.1401963>
- Takaki, K., Takahashi, K., Hayashi, N., Wang, D., & Ohshima, T. (2021). Pulsed power applications for agriculture and food processing. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 5(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s41614-021-00059-9>
- Tale Masouleh, Z., Asadollahi, S., & Eshaghi, M. (2015). Effects of pulsed electric fields as a pre-treatment on yield extraction and some quality properties of sesame oil. *International Journal of Review in Life Sciences*, 5(10), 1100-1104.
- Tangpao, T., Charoimek, N., Teerakitchotikan, P., Leksawasdi, N., Jantanasakulwong, K., Rachtanapun, P.,...Ruksiriwanich, W. (2022). Volatile organic compounds from basil essential oils: plant taxonomy, biological activities, and their applications in tropical fruit productions. *Horticulturae*, 8(2), 144. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020144>
- Teeka, P., Chaiyasat, A., & Chaiyasat, P. (2014). Preparation of poly (methyl methacrylate) microcapsule with encapsulated jasmine oil. *Energy Procedia*, 56, 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.147>
- Tintchev, F., Dobрева, A., Schulz, H., & Toepfl, S. (2012). Effect of pulsed electric fields on yield and chemical composition of rose oil (*Rosa damascena* Mill.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 15(6), 876-884. <https://doi.org/10.1080/0972060X.2012.10662589>
- Toepfl, S., Mathys, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Potential of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields for energy efficient and environmentally friendly food processing. *Food Reviews International*, 22(4), 405-423. <https://doi.org/10.1080/87559120600865164>
- Töpfl, S. (2006). *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food-and Bioprocessing—Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis* [Thèse de doctorat, Université technique de Berlin].
- Torre, R., Pereira, E. A. D., Nascimento, R. V., Guedes, T. F., de Souza Faria, P. R., de Souza Alves, M., & de Souza, M. A. A. (2021). Agroecological approach to seed protection using basil essential oil. *Industrial Crops and Products*, 171, 113932. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2021.113932>

- Turek, C., & Stintzing, F. C. (2013). Stability of essential oils: a review. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 12(1), 40-53. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12006>
- Turk, M. (2010). *Vers une amélioration du procédé industriel d'extraction des fractions solubles de pomme à l'aide de technologies électriques* [Thèse de doctorat, Compiègne, France].
- Vinitha, D. (2008). *Effects of nano-second Pulsed Electric Fields (nsPEF) on human prostate cancer cell line-LNCaP* [Thèse de doctorat, University of Missouri-Columbia].
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2008a). *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials* (Vol. 5996). Springer.
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2008b). Pulsed-electric-fields-induced effects in plant tissues: fundamental aspects and perspectives of applications. *Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials*, 39-81.
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2011). Pulse electric field-assisted extraction. *Enhancing extraction processes in the food industry*, 25-84. <https://doi.org/10.1201/b11241-3>
- Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2017). Application of pulsed electric energy for lignocellulosic biorefinery. In *Handbook of electroporation* (pp. 2843-2861).
- Wadhwa. (2007). *High Voltage Engineering* New Age International (P) Ltd., Publishers.
- Wike, N. Y., Olaniyan, O. T., Adetunji, C. O., Adetunji, J. B., Akinbo, O., Adetuyi, B. O.,...Nathaniel, M. O. (2024). Application of essential oil in livestock production. In *Applications of Essential Oils in the Food Industry* (pp. 285-292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-98340-2.00030-4>
- Xiang, B., Sundararajan, S., Mis Solval, K., Espinoza-Rodezno, L., Aryana, K., & Sathivel, S. (2014). Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties and microbial inactivation of carrot juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38(4), 1556-1564. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12115>
- Yajun, Z., Changmei, X., Susu, Z., Guangming, Y., Ling, Z., & Shujie, W. (2017). Effects of high intensity pulsed electric fields on yield and chemical composition of rose essential oil. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 295-301. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171003.3153>
- Yaldiz, G., & Camlica, M. (2021). Agro-morphological and phenotypic variability of sweet basil genotypes for breeding purposes. *Crop Science*, 61(1), 621-642. <https://doi.org/10.1002/csc2.20391>
- Zahra, A., & Susanti, I. (2023). Review Development of Essential Oil Nano Preparation Formulations to Pharmacological Activity. *J. Pharm. Sci.*, 6(2), 381-387. <https://doi.org/10.36490/journal-jps.com.v6i2.95>
- Zderic, A., Zondervan, E., & Meuldijk, J. (2013). Breakage of cellular tissue by pulsed electric field: extraction of polyphenols from fresh tea leaves. 11th International Conference on Chemical and Process Engineering (ICheap-11), June 02-05, 2013, Milan, Italy,
- Zeković, Z. P., Filip, S. Đ., Vidović, S. S., Adamović, D. S., & Elgndi, A. M. (2015). Basil (*Ocimum basilicum* L.) essential oil and extracts obtained by supercritical fluid extraction. *Acta periodica technologica*(46), 259-269. <https://doi.org/10.2298/APT1546259Z>

- Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G. V., & Swanson, B. G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of food Engineering*, 25(2), 261-281. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00030-D](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00030-D)
- Zhang, Q., QIN, B. L., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V., & Swanson, B. G. (1995). Inactivation of E. coli for food pasteurization by high-strength pulsed electric fields. *Journal of Food Processing and Preservation*, 19(2), 103-118. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1995.tb00281.x>
- Zimmermann, U. (2005). Electrical breakdown, electroporabilization and electrofusion. *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, Volume 105*, 175-256. <https://doi.org/10.1007/BFb0034499>
- Zimmermann, U., Pilwat, G., & Riemann, F. (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophysical journal*, 14(11), 881-899. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(74\)85956-4](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(74)85956-4)

Résumé :

Des recherches récentes ont démontré l'efficacité de l'application d'un champ électrique pulsé dans l'industrie. Cette efficacité est obtenue par électroporation, un processus qui produit des pores dans la membrane cellulaire biologique lorsqu'il est soumis à des impulsions haute tension. Des niveaux d'énergie optimaux peuvent considérablement améliorer le rendement en huile sans compromettre la qualité, ce qui en fait une technique précieuse pour les applications industrielles. L'effet de l'application de traitements par champ électrique pulsé sur des feuilles de basilic pour l'extraction d'huiles essentielles a été étudié dans cette recherche. Après un traitement par champ électrique pulsé d'une intensité de 2 kV.cm^{-1} , une énergie spécifique de 5 kJ.kg^{-1} et une distillation de 60 minutes, le rendement en huile essentielle de *basilic* est passé de 0,63 % (témoin) à 0,82 %, soit une augmentation de 30,16 %. Cependant, lorsque les feuilles de basilic ont été traitées à très haute énergie spécifique (50 kJ.kg^{-1}), une augmentation non significative du rendement en huile essentielle par rapport au témoin a été observée. Cette étude expérimentale présente les résultats concernant l'effet du traitement par champ électrique pulsé sur l'absorbance de *basilic*. L'étude nous a permis de constater une augmentation de l'absorption des huiles essentielles lors de l'application du champ électrique pulsé à des énergies spécifiques modérées. Ceci est important pour le contrôle qualité, un facteur essentiel pour l'utilisation des huiles essentielles dans diverses applications.

Mots clés : Champ électrique pulsé (CEP) ; Haute tension ; Produits végétaux ; ; Agro-ressources ; Extraction ; Intensification

ملخص:

وقد أثبتت الأبحاث الحديثة فعالية تطبيق المجال الكهربائي النبضي في الصناعة. يتم تحقيق هذه الكفاءة من خلال عملية الكهرومسامية، وهي عملية تنتج مساماً في غشاء الخلية البيولوجية عند تعرضها لنبضات عالية الجهد. يمكن لمستويات الطاقة المثالية أن تعمل على تحسين إنتاج الزيت بشكل كبير دون المساس بالجودة، مما يجعلها تقنية قيمة للتطبيقات الصناعية. تم في هذا البحث دراسة تأثير تطبيق معاملات المجال الكهربائي النبضي على أوراق الريحان لاستخلاص الزيوت العطرية. بعد المعالجة بحقل كهربائي نبضي بشدة 2 كيلو فولت.سم-1، وطاقة نوعية 5 كيلوجول.كجم-1، وتقطير لمدة 60 دقيقة، ارتفع محصول زيت الريحان العطري من 0.63% (المجموعة الضابطة) إلى 0.82%، بزيادة قدرها 30.16%. ومع ذلك، عندما عولجت أوراق الريحان بطاقة نوعية عالية جداً (50 كيلوجول.كجم-1)، لوحظت زيادة غير معنوية في إنتاج الزيت العطري مقارنة بالمجموعة الضابطة. تقدم هذه الدراسة التجريبية النتائج المتعلقة بتأثير معالجة المجال الكهربائي النبضي على امتصاص الريحان. وقد أتاحت لنا الدراسة ملاحظة زيادة في امتصاص الزيوت العطرية عند تطبيق المجال الكهربائي النبضي عند طاقات نوعية معتدلة. وهذا مهم لمراقبة الجودة، وهو عامل حاسم في استخدام الزيوت الأساسية في تطبيقات مختلفة.

الكلمات المفتاحية: المجال الكهربائي النبضي (CEP)؛ الجهد العالي؛ المنتجات النباتية؛ ؛ الموارد الزراعية؛ إستخلاص؛ تكثيف