

Rapport de pré-projet

Conception d'un système électronique d'électroporation

Auteurs : **Manuel SORIN / Ezzobeir TARCHOULI**

Référent technique: **M. PASQUIER**

Client : **M. DEBUSSAY**

Référent industriel: **M. CHAZELLE**

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui nous ont apporté leur aide dans notre démarche de recherche sur le sujet, tant par les documents qu'elles ont pu nous transmettre que par leurs expériences qu'elles ont su partager. En ce sens, nous adressons des remerciements particuliers à Mr. DEBUSSAY, Mr. PASQUIER et Mr. CHAZELLE pour le temps qu'ils nous ont accordé ainsi que pour les renseignements transmis, qui nous auront été d'une grande utilité dans notre étude.

Manuel et Ezzobeir

Résumé

Le projet de conception d'un électroporateur a été proposé par le département Génie Biologique de Polytech Clermont-Ferrand au département Génie Electrique de Clermont-Ferrand, dans le cadre du projet industriel, projet se déroulant pendant la 2ème et 3ème année d'étude du Génie Electrique.

Le but de ce projet est de réaliser un dispositif d'électroporation, procédé de génie biologique permettant la conception de cellules génétiquement modifiées. Ce procédé requiert la décharge d'une haute tension, durant un temps précis, dans un milieu liquide rempli de cellules, et rentre donc dans le cadre d'une problématique de Génie Electrique.

Nous avons divisé ce projet en plusieurs tâches. La première a été la génération de la haute tension, partie fondamentale du projet. Nous avons donc choisi un modèle théorique, que nous avons ensuite réalisé à échelle réduite, afin d'en valider le principe. Il a ensuite fallu se concentrer sur les condensateurs, qui vont permettre la décharge de la tension dans le milieu cellulaire. En effet, ces condensateurs, très spécifiques et extrêmement coûteux, sont également un des points centraux du projet. Après la revue d'appel d'offre, nous avons décidé avec le client de se limiter à un, voire deux condensateurs au lieu de trois, car cela reviendrait trop cher et dépasserait le budget du projet.

Abstract

The project of the conception of an electronic electroporator was offered by the Biological engineering Department of Polytech Clermont-Ferrand, to the Electrical engineering Department of Polytech Clermont-Ferrand, within the industrial project course, during the second and third year of study in Electrical engineering.

The purpose of this project is to develop a device capable of doing an electroporation, process of biological engineering used to produce genetically modified cells. This process requires an electrical shock, during a certain period, in a liquid medium containing cells, and is definitely an Electrical engineering problematic.

We have divided this project in multiple tasks. The first task was the creation of the electrical shock, an essential feature of the project. Therefore we chose a theoretical model, which we then have built, at a reduced scale, in order to validate the theoretical model. After that, we had to work on the capacitors, which will allow the electrical shock in the liquid medium. This capacitors are extremely specific and expensive, are also a key feature of the project. After the offer's presentation, we decided with the client that it would be better to use just one or two capacitors, instead of three, because it would be too expensive and would exceed the budget of the project.

Contenu

Contenu	5
Introduction	6
I. Description du problème	7
1. Le procédé biologique de l'électroporation	7
2. Le produit utilisé actuellement par le client	9
3. Fonctions et contraintes du cahier des charges	10
II. Description de la solution technique proposée	13
1. La méthode FlyBack	13
2. Avantages de la méthode FlyBack	15
III. Etude détaillée de la solution proposée	17
1. Synoptique	17
2. Etude théorique de la méthode FlyBack	18
3. Résultat de la simulation	22
4. Test à petite échelle	24
5. Estimation des coûts	25
Conclusion	27
Webographie et bibliographie	29
Annexes	30

Introduction

Dans le cadre du projet industriel de Génie Electrique, le département Génie biologique de l'école nous a confié le projet de conception d'un système électronique d'électroporation.

L'électroporation est un procédé microbiologique qui permet d'appliquer une tension électrique sur un mélange cellulaire afin de rendre les membranes cellulaires poreuses et par conséquent pouvoir y introduire de l'ADN. Notre objectif est de concevoir un appareil qui génère la haute tension et qui respecte les modes de fonctionnement déterminés par les protocoles du procédé. Il doit également contenir une partie commande pour permettre à l'utilisateur de manipuler l'appareil, et assurer la sécurité de l'utilisateur en tout temps.

Notre client, M. Debussay, professeur au département génie biologique, souhaite avoir un prototype du système qui répond à un cahier des charges spécifique : il doit être moins cher que les appareils du commerce et doit pouvoir fonctionner pour plusieurs types de mélanges cellulaires dans de bonnes conditions.

Dans cette phase de pré-projet, nous nous sommes focalisés sur la partie puissance du prototype, à savoir la génération de la haute tension.

Dans la suite du rapport, nous commencerons par expliquer le problème et détailler les fonctions et les contraintes du cahier des charges, nous expliquerons ensuite notre démarche et notre solution technique. Finalement, nous exposerons notre avancement sur la partie génération de la haute tension qui comprend une étude théorique globale et les tests et les simulations réalisés sur notre montage électronique.

I. Description du problème

Dans cette première partie, nous allons mettre le projet dans son environnement contextuel d'une manière générale.

Il est nécessaire d'expliquer d'abord ce qu'est le procédé biologique de l'électroporation, car cela représente la finalité de notre projet.

Nous expliquerons ensuite les inconvénients et les limites du produit utilisé actuellement par le département de génie biologique afin de pouvoir percevoir la différence entre la solution que nous proposons et celle utilisée actuellement.

Finalement dans cette partie, nous détaillerons les spécifications et les contraintes du cahier des charges.

1. Le procédé biologique de l'électroporation

L'électroporation est un procédé de génie biologique consistant à insérer des éléments dans les cellules afin d'en modifier le code génétique et donc de créer des organismes génétiquement modifiés.

Le principe physique du dispositif est le suivant :

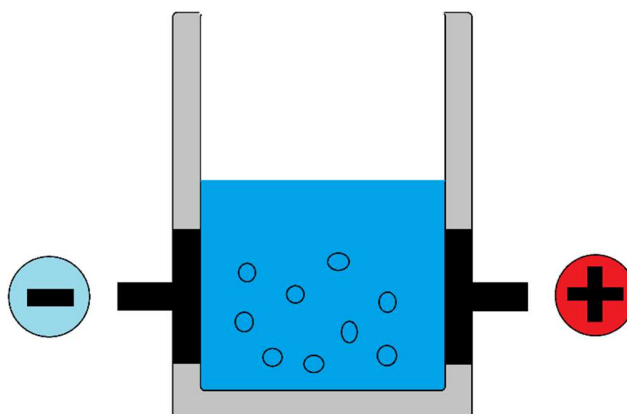


Figure 1 : Milieu liquide contenant les cellules, avec des électrodes de part et d'autre

On dispose les cellules dans un milieu liquide, chargé en ions, inséré dans un flacon disposant de part et d'autres d'électrodes. Une fois ce dispositif mis en place, on vient appliquer une haute tension (de l'ordre du kV) aux bornes des électrodes, tension délivrée par un condensateur chargé au préalable. Le flacon se comportant comme une résistance, on obtient ainsi une décharge de type RC :

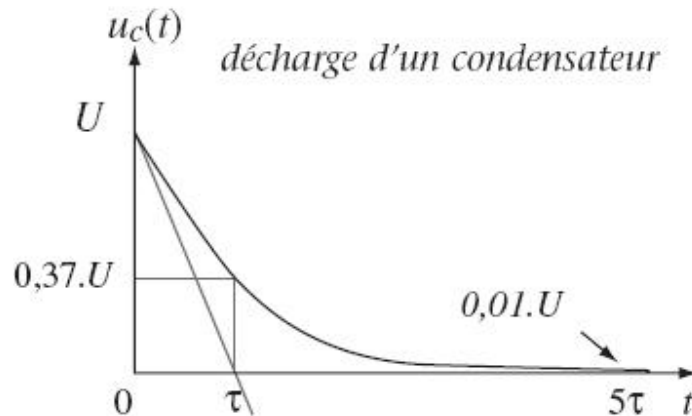


Figure 2 : Décharge d'un condensateur dans une résistance

Ainsi, on va pouvoir contrôler la tension d'entrée (U), et en fonction du condensateur et de la résistance, contrôler le temps de décharge ($\tau = R.C$, avec τ de l'ordre de quelques ms).

An niveau cellulaire, le fonctionnement est le suivant :

Electroporation

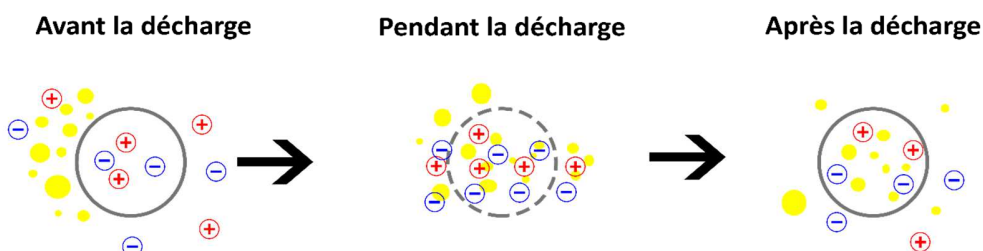


Figure 3 : Schéma au niveau cellulaire

Avant la décharge :

La membrane de la cellule est intacte. Les éléments extérieurs (ici en jaune) circulent librement dans le milieu liquide. Il y a également des ions (symboles + et – ici) qui circulent dans le milieu et à l'intérieur de la cellule.

Pendant la décharge :

La haute tension rend la membrane cellulaire poreuse. De plus, la circulation du courant électrique dans le milieu entraîne la circulation des ions vers les électrodes, disposées à l'extérieur du flacon. Cette circulation d'ions va entraîner les éléments extérieurs à l'intérieur de la cellule.

Après la décharge :

La membrane de la cellule se reconstitue, et on obtient ainsi une cellule avec des éléments extérieurs dans son système. On pourra ensuite récupérer les cellules génétiquement modifiées et les utiliser pour toutes les applications d'organismes génétiquement modifiés.

2. Le produit utilisé actuellement par le client

Le produit utilisé actuellement dans le procédé d'électroporation par le département de Génie Biologique est l'électroporateur E.Coli Pulsar fabriqué par la société Bio-Rad.

Contenant une seule capacité de 10 μF , cet appareil ne permet de réaliser qu'un seul protocole d'électroporation, celui de l'électroporation sur des bactéries. En effet, les mélanges cellulaires auxquels on souhaite appliquer le procédé définissent les caractéristiques électriques du montage électronique et plus particulièrement la valeur de la résistance impliquée dans l'équation $\tau = R.C$. Avec un appareil contenant une seule capacité on ne peut donc pas modifier le temps de décharge, et pour respecter le temps $\tau = 5 \text{ ms}$ demandé dans le protocole, on ne peut utiliser que des mélanges dont la résistance est proche de celle du milieu utilisé pour les bactéries.

Ce produit présente également l'inconvénient d'avoir un prix trop élevé, son prix sur le marché est de **2500 €**.

Il existe néanmoins sur le marché un appareil qui permet d'effectuer plusieurs protocoles. Il s'agit du **produit Gene Pulsar Xcell**, mais dont le prix dépasse largement le budget dédié à ce projet :

Gene Pulser Xcell Main Unit #1652666



100/240 V, 50/60 Hz, main module of the Gene Pulser Xcell electroporation system

Prix catalogue: €6050,00

Quantité:

[Ajouter au panier](#)

[la liste privilégiée](#)

[devis](#)

Description	Spécifications
Waveform	Exponential or square
Voltage, V	200–3,000
Capacitance, μF	10, 25, 50
Sample resistance, Ω	20 minimum at 200–2,500 V; 600 minimum at 2,500–3,000 V
Square-wave timing	0.05–5 ms pulse duration in 0.05 ms increments, 1–2 pulses, 5 sec minimum interval
Dimensions (W x D x H), cm	Main unit: 31 x 30 x 14
Weight, kg	Main unit: 6.6

Figure 4 : Prix et caractéristique du produit existant

Pour conclure, les inconvénients des produits existants sur le marché sont principalement leurs prix élevés et les limites que présentent certains d'entre eux.

3. Fonctions et contraintes du cahier des charges

L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à définir clairement les fonctions et les contraintes exigées que doit respecter le produit final pour satisfaire les besoins d'un client.

La fonction principale de notre produit est d'appliquer une décharge électrique de haute tension sur le mélange cellulaire.

Cependant, le client exige un certain nombre de fonctions et de contraintes que le produit doit respecter.

Certaines fonctions sont exigées par la nature même du procédé biologique, tandis que d'autres représentent des mesures de sécurité pour l'utilisateur de l'appareil.

Le tableau suivant représente le cahier des charges fonctionnel qui contient les fonctions et les contraintes, nous les expliquerons en détail par la suite :

Fonction/ Contrainte	Type	Nature	Critère	Niveau	Flexibilité
F1	Fonction	Générer la haute tension	Commande	[1000 V, 2500 V] par pas de 100V réglage par bouton poussoir	+/- 10 V
F2	Fonction	Choix des capacités	Adaptabilité, commande	3 valeurs de capacités : 10,25 et 50 uF par commutateur	au moins une capacité
F3	Fonction	Pouvoir relancer le process	Contrôle	bouton poussoir	1 seul
F5	Fonction	Afficher le temps de décharge	Mesure	ms	+/- 0,5 ms
F6	Fonction	Afficher un message d'avertissement	Protection	message écran lcd	lisibilité, fiable
C1	Contrainte	Faire un prototype à moindre coût	Coût	[500 €, 1000 €]	+/- 100€
C2	Contrainte	Respecter le temps de décharge par rapport au protocole d'électroporateur du marché	Temps	5ms	+/- 1 ms
C3	Contrainte	Ne pas dépasser 3 pulses	Contrôle	blocage au bout de 3 demandes de décharge	non
C4	Contrainte	Protéger l'utilisateur	Protection	électrocution	non

Figure 5 : Cahier des charges fonctionnel

Analyse du cahier des charges :

Les fonctions :

- Génération de la haute tension : Cette fonction représente la fonction principale du système. L'utilisateur doit pouvoir commander la tension à appliquer qui est comprise entre 1000 V et 2500 V. Il doit pouvoir également régler la tension par pas de 100 V en appuyant sur un bouton poussoir.
- Choix des capacités : Le système doit permettre à l'utilisateur de choisir entre trois capacités de valeurs respectives de 10, 25 et 50 μF , et ce, en agissant sur un commutateur. La solution de trois capacités est la solution idéale souhaitée par le client. Cependant, le coût du produit final, comme on le verra par la suite, est étroitement lié aux coûts des capacités. Notre système doit donc avoir au minimum une capacité et au maximum trois capacités.

- Relancer le processus : Cette fonction de contrôle doit permettre à l'utilisateur de relancer le processus en appuyant une seule fois sur un bouton poussoir.
- Affichage du temps de décharge : Le système doit afficher, à chaque manipulation, le temps de décharge concernant le protocole en cours. Il est à noter que la valeur affichée du temps de décharge n'est jamais précise, le cahier des charge accepte alors une tolérance de 0.5 ms.
- Affichage d'un message d'avertissement : Cette fonction assure la sécurité de l'utilisateur. En cas de dysfonctionnement, l'appareil doit avertir l'utilisateur en affichant un message sur l'écran LCD. Le message doit être clair et lisible.

Les contraintes :

- Le coût : Le coût de l'appareil ne doit pas dépasser 1000 €.
- Le respect du temps de décharge : La décharge électrique doit respecter la valeur du temps de décharge qui est de 5ms avec une tolérance de 1 ms.
- Ne pas dépasser 3 pulses : Le système ne doit pas permettre à l'utilisateur de lancer plus de 3 fois consécutives le processus de décharge sur une même fiole. Cette contrainte n'accepte aucune tolérance.
- Protection de l'utilisateur : Il faut prendre en considération, pendant la conception du prototype toutes les mesures de sécurité afin d'éviter tout risque d'électrocution.

II. Description de la solution technique proposée

L'objectif de cette partie est de présenter globalement notre démarche et les solutions proposées.

Le projet a été décomposé dès le début en deux parties :

- Une partie puissance : cette partie concerne le circuit électronique qui permet de réaliser la fonction principale de notre système, à savoir générer une haute tension et l'appliquer sur un mélange cellulaire.
- Une partie commande : cette partie concerne la commande du système par l'utilisateur, elle doit permettre de réaliser toutes les fonctions de commande du cahier des charges.

Dans la phase de pré-projet, nous nous sommes concentrés sur la partie puissance du système. Notre objectif a d'abord été de réaliser la génération de la haute tension, avant de valider les autres fonctions et contraintes du cahier des charges.

Vous trouverez en annexe le WBS et le GANTT, regroupant les tâches du projet qui concerne chacune de ces deux compositions.

1. La méthode FlyBack

Un générateur de haute tension est un dispositif qui permet de produire une tension électrique qui doit être, selon les normes européenne, supérieure à 1000 V.

Il existe cependant plusieurs techniques qui permettent de générer la haute.

Les techniques les plus répandues partent du principe d'élever une faible tension, continue ou alternative, par le biais d'un transformateur élévateur de tension.

La méthode dite à découpage FlyBack exploite ce principe. Elle permet de charger un condensateur à partir d'une faible tension continue.

Le schéma suivant illustre le circuit électrique de la méthode FlyBack :

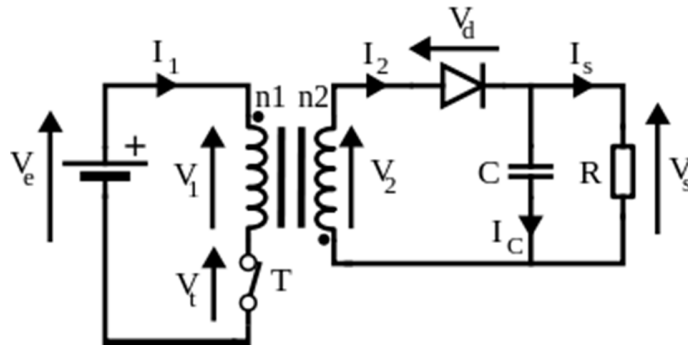


Figure 6 : Montage FlyBack classique

Le montage est composé d'un transformateur dont la partie primaire est liée à la source de tension, et la partie secondaire est liée à un condensateur en parallèle avec la résistance de sortie.

Le principe de la méthode flyback consiste à élever la tension continue d'entrée V_e en une tension de sortie V_s . Cette dernière est en fonction de la tension d'entrée V_e et des autres paramètres du circuit :

n_1 : Le nombre de spires au primaire

n_2 : Le nombre de spires au secondaire

L_1 : l'inductance au primaire

L_2 : l'inductance au secondaire

C : la capacité

α : Le rapport cyclique de l'interrupteur commandé T .

Dans notre cas, le montage utilisé pour élever la tension est légèrement différent du montage classique : au début la résistance n'est pas branchée parallèlement au condensateur. On stocke d'abord l'énergie électrique équivalente à la haute tension souhaitée dans le condensateur, puis on branche la résistance en fermant un interrupteur afin de décharger ladite énergie dans la résistance.

La résistance dans notre cas n'est rien d'autre que la fiole contenant le mélange cellulaire.

Le schéma suivant représente le schéma électrique FlyBack que nous allons étudier par la suite :

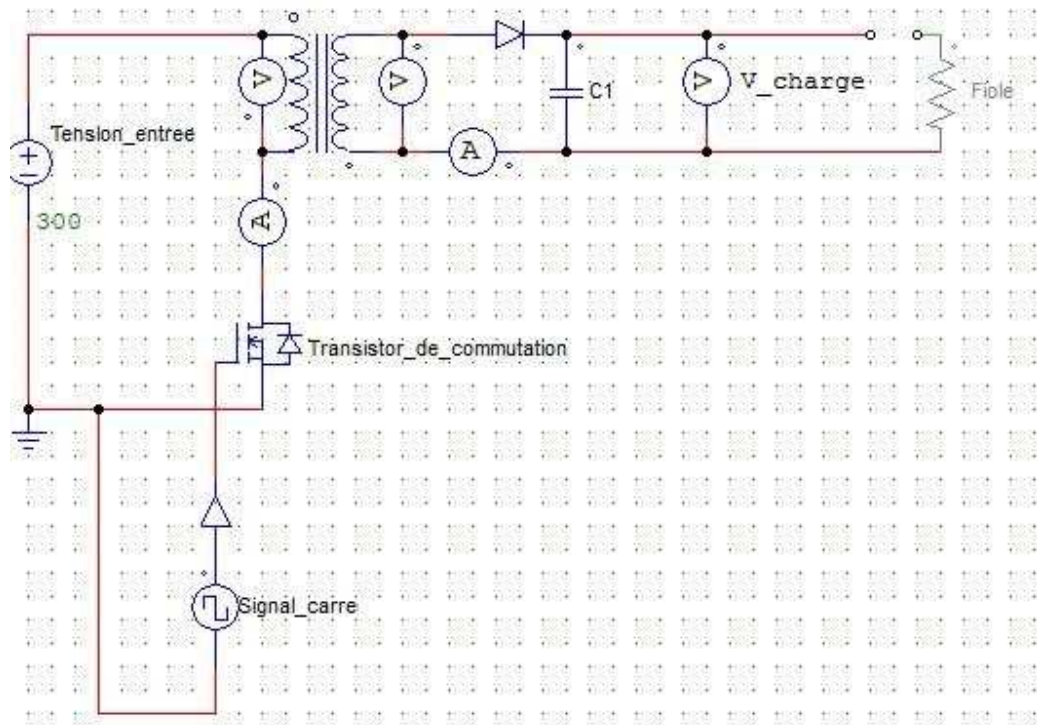


Figure 7 : Montage FlyBack étudié

2. Avantages de la méthode FlyBack

Il existe d'autres techniques pour élever la tension, parmi lesquelles le doubleur de Shenkel, qui permet également de multiplier la tension d'entrée et présente l'avantage d'avoir un coût très faible.

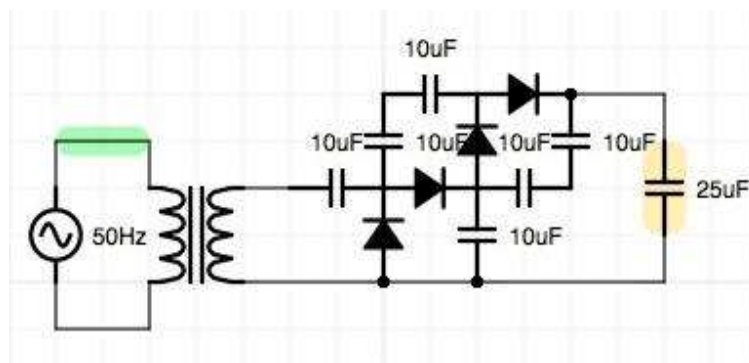


Figure 8 : Doubleur de Shenkel

Ce montage qui est une alimentation à double alternance, permet d'avoir une tension de sortie qui est égale à 2^n fois la tension entrée, avec n le nombre d'étage du circuit.

Notons qu'un étage est formé d'une capacité en parallèle avec une diode.

Le principal inconvénient de cette méthode est que le réglage de la tension de sortie nécessite la modification du circuit : ajout ou élimination d'un étage.

Nous avons donc choisi le montage Flyback non seulement parce qu'il permet une montée rapide de la tension, mais aussi parce qu'il permet d'augmenter ou diminuer la tension en jouant simplement sur l'un des paramètres du circuit.

III. Etude détaillée de la solution proposée

Dans cette partie, l'objectif est de présenter une description détaillée de la solution technique proposée.

Nous présenterons tout d'abord le synoptique de notre système qui servira de récapitulatif des différentes fonctions qu'il doit assurer.

Ensuite, nous détaillons les résultats de l'étude théorique du système, nous les comparons aux résultats obtenus par l'outil simulation PSim.

Nous exposerons également les résultats de test obtenus sur un circuit FlyBack à petite échelle. Finalement, nous proposerons trois variantes de la solution accompagnées d'une estimation de coût.

1. Synoptique

Le schéma synoptique suivant permet de situer la fonction de la génération de la haute tension, par rapport aux autres fonctions du système. Il montre également le lien entre chacune de ces fonctions :

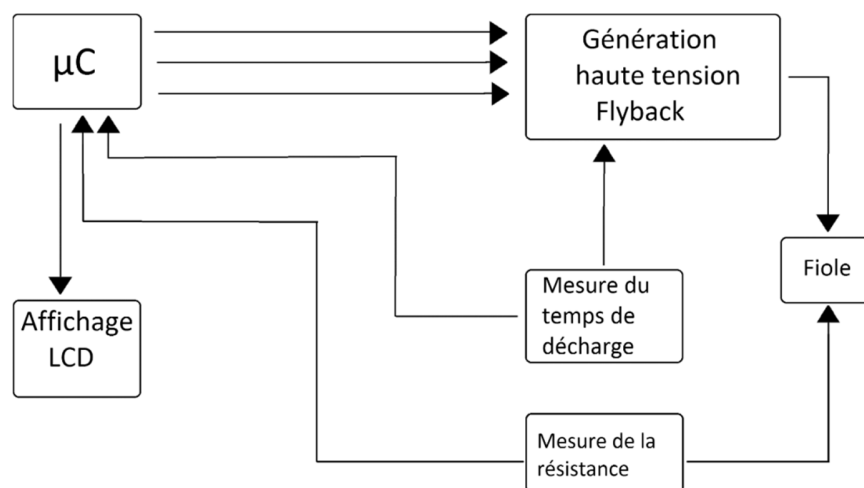


Figure 9 : Synoptique global du système

2. Etude théorique de la méthode FlyBack

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser au stockage de l'énergie électrique dans le condensateur. L'objectif est d'étudier théoriquement le montage afin de voir quels sont les paramètres sur lesquels on peut jouer pour élever la tension de sortie.

Le montage qui sera étudié est celui de la figure 7(cf page 15 du rapport).

Le signal carré dans le montage permet de commander le transistor de commutation.

Le signal possède une période T et un rapport cyclique α .

Pendant la phase : $t \in [0, \alpha T]$ le transistor est passant, tandis que pendant la phase $[\alpha T, T]$ le transistor est bloqué. Les deux phases sont périodiquement alternées.

Nous allons étudier respectivement les deux phases afin de décrire les phénomènes électriques et magnétiques ayant lieu.

Phase n° 1 : $t \in [0, \alpha T]$:

Durant cette phase, le transistor est passant.

La partie primaire du circuit est équivalente au schéma suivant :

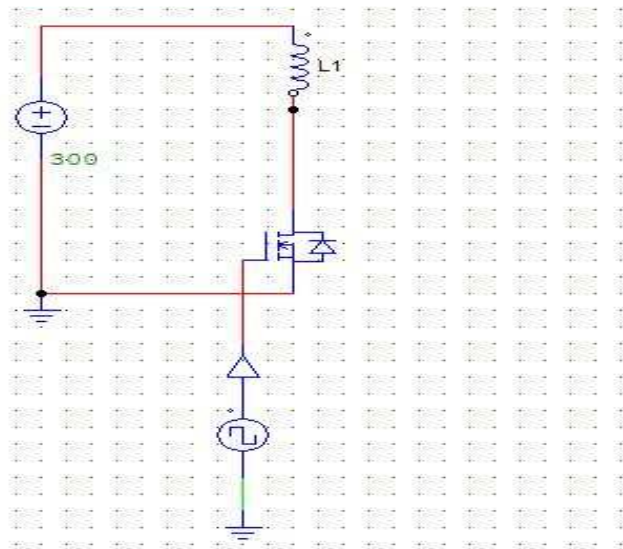


Figure 10 : Schéma équivalent de la partie primaire durant la première phase

On a alors, en négligeant l'effet de la résistance de la bobine, l'équation suivante :

$$E = L1 \frac{di1}{dt}$$

Ou encore :

$$i1(t) = \frac{E}{L1} t$$

Avec :

E : La tension d'entrée

L1 : l'inductance primaire du transformateur

t : Le temps

Le courant au primaire a donc la forme suivante :

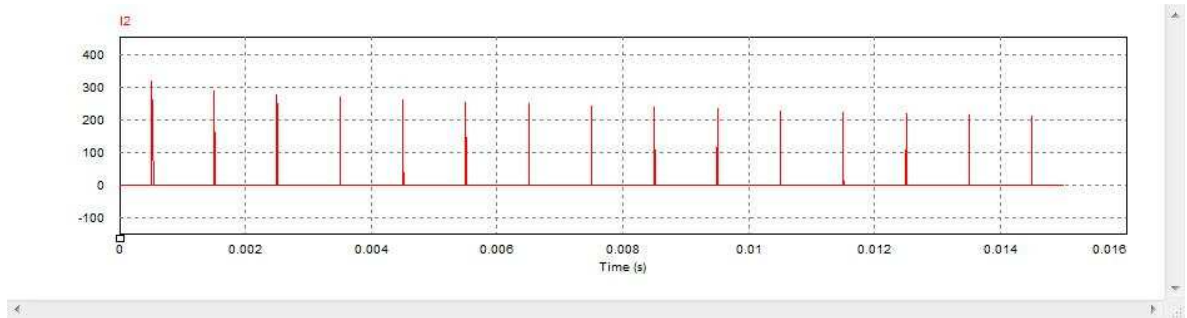


Figure 11 : Forme du courant au primaire

Phase n°2 : $t \in [\alpha T, T]$:

Durant cette phase, le transistor de commutation est bloqué. La démagnétisation au niveau du transformateur est caractérisée par la continuité du flux magnétique à l'instant αt que l'on peut exprimer par la relation suivante :

$$R\Phi = n_1 \cdot i1(\alpha T) = n_2 \cdot i2(\alpha T)$$

Avec :

R : La reluctance

Φ : Le flux magnétique

n_1 : Le nombre de spires au niveau du primaire

n_2 : Le nombre de spire au niveau du secondaire

$i_1 (\alpha T)$: le courant au primaire à l'instant αT

$i_2 (\alpha T)$: le courant au secondaire à l'instant αT

On a donc :

$$i_2 (\alpha T) = \frac{n_1}{n_2} i_1 (\alpha T)$$

Ou encore :

$$i_2 (\alpha T) = \frac{n_1}{n_2} \frac{E}{L_1} \alpha T$$

Durant la deuxième phase, le circuit dans la partie secondaire est équivalent à :

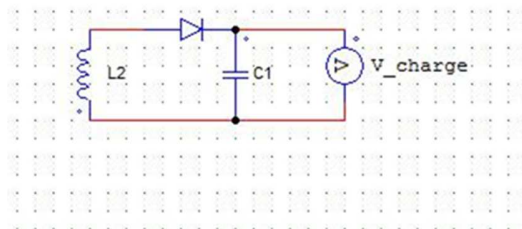


Figure 12 : Schéma équivalent du circuit secondaire durant la deuxième phase

On a donc :

$$U_C(t) = -L_2 \frac{di_2(t)}{dt}$$

Sachant que $i_2(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$

On retrouve l'équation suivante :

$$U_C(t) + L_2 \cdot C \frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} = 0$$

En résolvant cette équation, et en prenant comme conditions initiales :

$$U_C(\alpha T) = 0$$

$$i_2(\alpha T) = \frac{n_1}{n_2} \frac{E}{L_1} \alpha T$$

On retrouve alors :

$$U_C(t) = \frac{n_1}{n_2} \frac{E}{L_1} \alpha T \sqrt{L_2 \cdot C} \sin\left[\frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C}}(t - \alpha T)\right]$$

Entre $[\alpha T, T]$, la tension aux bornes du condensateur croît sinusoïdalement

Pour les autres phases : $[(\alpha+1)T, 2T]$, $[(\alpha+2)T, 3T]$, $[(\alpha+3)T, 3T]$, ... la tension aux bornes du condensateur augmentera de la même manière mais en conservant la valeur précédente. Il y'aura donc à chaque phase une valeur constante à prendre en considération dans le calcul.

La variation de la tension aux bornes du condensateur aura théoriquement cette forme :

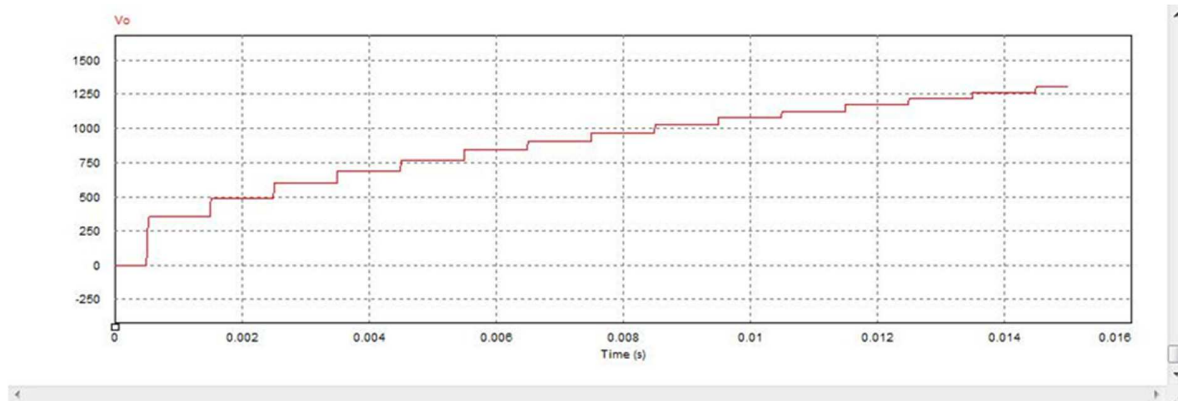


Figure 13 : Variation de la tension aux bornes du condensateur

Il est à noter que le calcul fait précédemment n'a pas pris en considération les faibles résistances que contiennent les bobines du primaire et du secondaire. Les résultats seront

légèrement différents si on les prend en considération. En effet, la solution de l'équation différentielle entre les instants T et αT sera une fonction exponentielle ; mais cela n'aura pas d'impact sur les valeurs de tension atteintes. Nous obtiendrons à peu près la même figure.

Cette étude théorique nous a permis de déterminer les paramètres sur lesquels il faut jouer pour élever ou diminuer la tension. En effet, il est clair que d'après l'équation obtenue, la tension aux bornes du condensateur dépend directement du rapport cyclique. En jouant sur ce paramètre, nous pourrions régler la tension que nous souhaitons appliquer aux bornes du milieu cellulaire.

3. Résultat de la simulation

Afin de vérifier les résultats de l'étude théorique, nous avons simulé le circuit FlyBack sur l'outil de simulation PSIM.

Cette étape, qui précède la réalisation du circuit, permet d'analyser les variations de courants et de tensions et de voir l'effet des modifications faites sur les différentes variables du circuit.

Les résultats obtenus valident globalement l'étude théorique. Il est à noter que l'étude théorique n'a pas pris en considération les résistances qui s'ajoutent aux inductances dans le circuit. Cela n'a pas une grande influence sur les résultats.

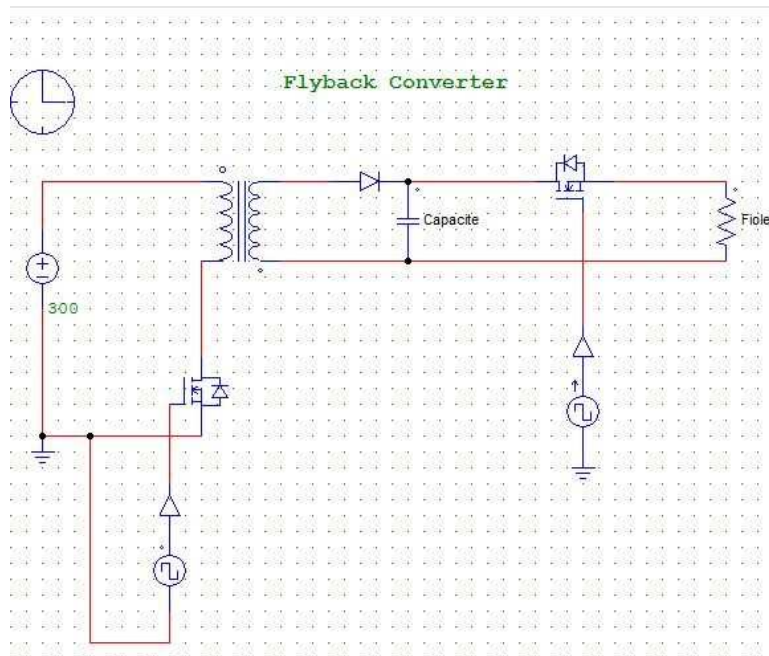


Figure 14 : Circuit réalisé sur le logiciel PSIM

Résultats obtenus :

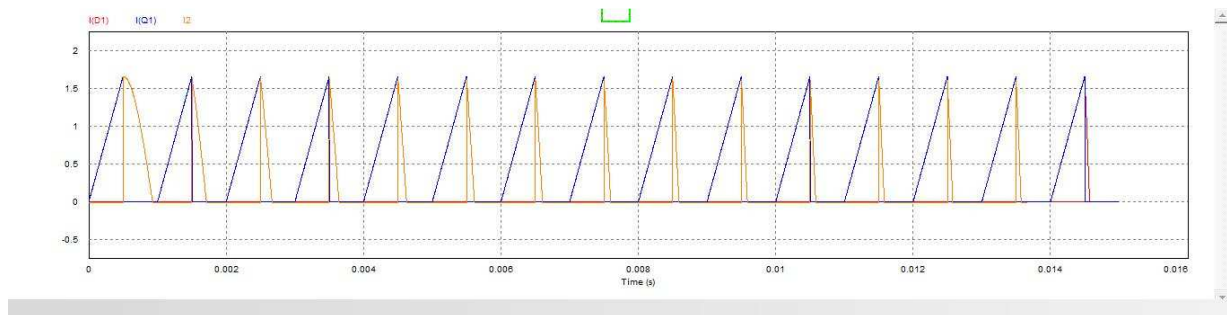


Figure 15 : Simulation des courants primaire (bleu) et secondaire (orange)

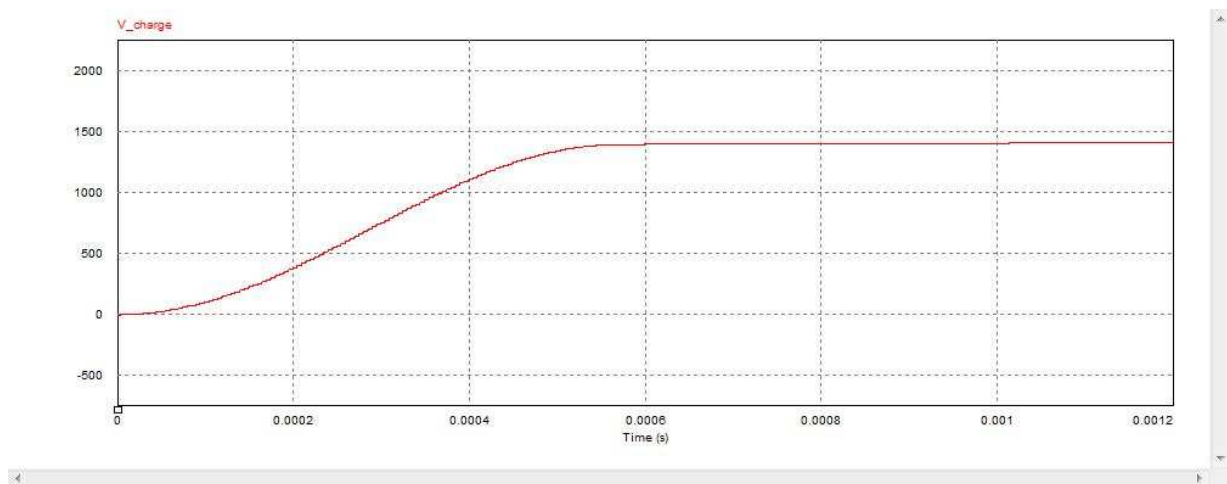


Figure 16 : Simulation de la tension aux bornes du condensateur

Nous remarquons que le montage Flyback permet d'élever la tension aux bornes du condensateur à 1500 V, tout en évitant des pics de courants importants au niveau du primaire et du secondaire.

4. Test à petite échelle

La réalisation du circuit FlyBack à une échelle réduite est une étape fondamentale pour la réalisation du système.

Ceci consiste à réaliser le circuit électronique FlyBack, mais avec des composants qui ne correspondent pas aux dimensions réelles.

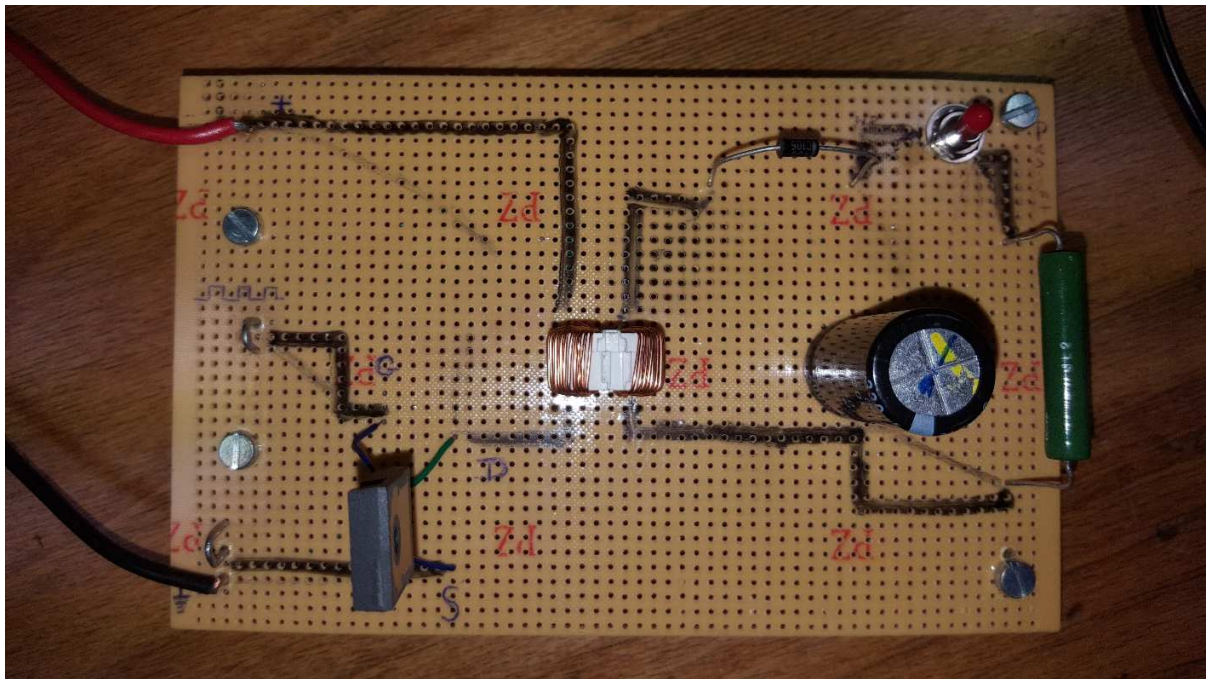


Figure 17 : Circuit FlyBack à échelle réduite

Le circuit est composé de :

- Une source de tension continue de 10 V
- Un transistor MOSFET
- Un transformateur de rapport égal à 1
- Un condensateur de capacité de l'ordre de la centaine de μFarad
- Une résistance de sortie

Ce test nous a permis de valider globalement le fonctionnement de notre système. Nous avons réussi à régler la tension de sortie en multipliant la tension d'entrée par quatre, et ce, en jouant uniquement sur le rapport cyclique, ce qui valide les résultats de notre étude théorique.

La réalisation à une échelle réelle nécessite le choix de la capacité et le dimensionnement des autres composants. Cela a été l'objet de la revue d'appel d'offre durant laquelle nous avons proposé à notre client les différentes solutions possibles en relation avec le choix de la capacité à charger.

La prochaine étape sera donc le dimensionnement des composants et la réalisation du circuit FlyBack à échelle réelle.

5. Estimation des coûts

Le coût du produit final dépend du coût du matériel électronique utilisé. Il est étroitement lié aux coûts des condensateurs capables de supporter la haute tension car ce sont les composants électroniques ayant le coût le plus élevé. Le coût du reste des composants est estimé à 200 euros.

Nous proposons alors à notre client trois solutions qui diffèrent en termes de nombre de condensateurs utilisés.

Première solution : Avoir trois condensateurs de valeurs 10,25 et 50 μF :

C'est la solution qui répond au mieux aux exigences du client, mais qui est également celle qui a le coût le plus élevé.

Le coût d'un seul condensateur varie entre 300 et 400 euros. Le coût total du produit pourra s'élever alors à 1400 euros.

Deuxième solution : Mettre plusieurs capacités de 1 μF en parallèle :

L'objectif est de diminuer le coût. En effet, le prix d'un condensateur de 1 μF est de 15 à 20 euros, cela fait un coût total variant entre 950 et 1200 euros. En mettant 50 condensateurs en parallèle, nous pourrions alors avoir les valeurs des capacités souhaitées.

Cette solution présente désormais un inconvénient : Il y aura plus d'encombrements dans le circuit électronique.

Troisième solution : N'utiliser qu'une seule valeur de capacité :

Dans cette solution, l'utilisateur n'aura pas le choix entre 3 valeurs de capacités mais qu'une seule. Le coût de cette solution varie entre 500 et 600 euros.

En optant pour cette solution, on réussit à diminuer largement le coût. Néanmoins, on ne peut effectuer qu'un seul protocole de test.

Le tableau suivant récapitule les avantages et les inconvénients de chacune des trois solutions :

Fonctions	Solution 1 : Utiliser 3 capacités	Solution 2 : Utiliser plusieurs capacités en parallèle	Solution 3 : Utiliser une seule capacité
F1 : Générer la haute tension	Montage FlyBack	Montage FlyBack	Montage FlyBack
F2 : choisir entre 3 valeurs de capacités	Chosir entre trois condensateurs de valeurs: 10, 25 ou 50 uF	Mettre plusieurs condensateurs de 1uF en parallèle	Une seule capacité de: 10, 25 ou 50 uF
F3 : Relancer le process			
F5 : Afficher le temps de décharge			
F6 : Afficher un message d'avertissement			
Avantages	Encombrement réduit	Moins coûteuse	Coût faible
		Possibilité d'avoir une précision meilleure pour le temps de décharge	Encombrement réduit
Inconvénients	Très coûteuse	Encombrement	Moins de protocoles de tests possibles
	Temps de décharge moins précis		Temps de décharges moins précis

Figure 18 : Avantages et inconvénients des solutions proposées

Conclusion

Nous avons déterminé la méthode choisie pour réaliser la haute tension, et nous avons réalisé le test à petite échelle de cette solution. Nous avons donc trouvé une solution technique valable pour la génération de la haute tension. Il va maintenant falloir réaliser ce montage à échelle réelle, afin d'établir les caractéristiques du montage.

Nous allons également devoir trouver les condensateurs nécessaires au montage, et réaliser la partie commande de l'électroporateur.

Ce projet nous a permis de découvrir la gestion de projet industriel, et les démarches nécessaires au bon fonctionnement d'un projet. Nous avons également pu améliorer nos compétences techniques, et élargir notre spectre de compétences.

Table des illustrations

Figure 1 : Milieu liquide contenant les cellules, avec des électrodes de part et d'autre	7
Figure 2 : Décharge d'un condensateur dans une résistance	8
Figure 3 : Schéma au niveau cellulaire.....	8
Figure 4 : Prix et caractéristique du produit existant	10
Figure 5 : Cahier des charges fonctionnel.....	11
Figure 6 : Montage FlyBack classique.....	14
Figure 7 : Montage FlyBack étudié.....	15
Figure 8 : Doubleur de Shenkel.....	15
Figure 9 : Synoptique global du système	17
Figure 10 : Schéma équivalent de la partie primaire durant la première phase.....	18
Figure 11 : Forme du courant au primaire.....	19
Figure 12 : Schéma équivalent du circuit secondaire durant la deuxième phase.....	20
Figure 13 : Variation de la tension aux bornes du condensateur.....	21
Figure 14 : Circuit réalisé sur le logiciel PSIM.....	22
Figure 15 : Simulation des courants primaire (bleu) et secondaire (orange).....	23
Figure 16 : Simulation de la tension aux bornes du condensateur	23
Figure 17 : Circuit FlyBack à échelle réduite	24
Figure 18 : Avantages et inconvénients des solutions proposées.....	26

Webographie et bibliographie

Sites Internet visités

<http://www.larmand.fr>

https://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_8.pdf

<http://www.epsic.ch/cours/electronique/techn99/elnthcircuit/cidectxt.html>

https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Flyback

<http://fr.rs-online.com/web/p/condensateurs-polypropylene/9084237/>

<http://fr.rs-online.com/web/p/condensateurs-papier/8716343/>

<http://fr.rs-online.com/web/c/passifs/condensateurs/condensateurs->

[polypropylene/#esid=4294645056&applied-](http://fr.rs-online.com/web/c/passifs/condensateurs/condensateurs-polypropylene/#esid=4294645056&applied-)

[dimensions=4291386495,4291386539,4292693577,4292901158,429413370](http://fr.rs-online.com/web/c/passifs/condensateurs/condensateurs-polypropylene/#esid=4294645056&applied-dimensions=4291386495,4291386539,4292693577,4292901158,429413370)

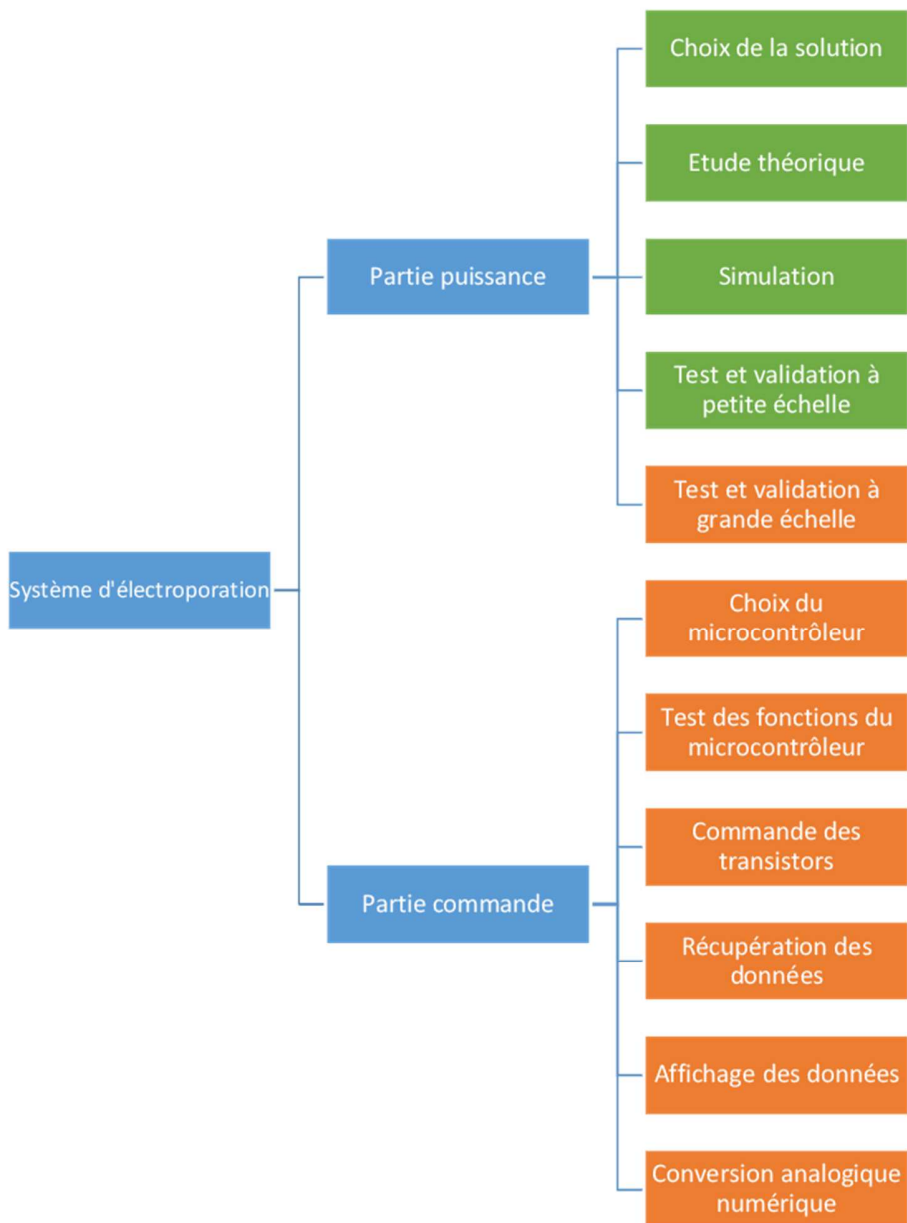
[8,4294137199,4294137346](http://fr.rs-online.com/web/c/passifs/condensateurs/condensateurs-polypropylene/#esid=4294645056&applied-8,4294137199,4294137346)

Thèse utilisée

J.Y. LE CHENADEC, Alimentations à découpages: Etude, choix et dimensionnement des alimentations à découpage usuelles.

Annexes

WBS :



Gantt :

2017 Conception d'un système électronique d'électroporation

