

**Hogere Zeevaartschool Antwerpen**  
**Mécanique Navale**

# **Récupération de l'énergie mécanique des vagues à l'aide de polymères électroactifs**

Benjamin Nayral

Mémoire présenté pour  
l'obtention du titre de  
Bachelor en mécanique navale

Promoteur : Tim Cools

Année académique : 2021-2022



# Remerciements :

Ma gratitude s'adresse tout d'abord à mon promoteur, Monsieur Tim Cools, qui m'a soutenu dans le choix de mon sujet et qui m'a offert l'opportunité de réaliser cette étude. Merci à lui de m'avoir accompagné lors de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également tous les professeurs de l'école supérieure de navigation d'Anvers qui m'ont accompagné et correctement formé pendant ces trois années d'études.

Un chaleureux merci à mes parents qui ont su m'accompagner et m'encourager pendant ce travail d'étude.

Enfin, je tiens à remercier ma compagne qui a su faire preuve de patience et qui m'a soutenu lors de ces longues journées de travail.

# Avant-Propos :

Lors de mon bachelor en génie électrique et informatique industrielle, j'avais fait le choix de me spécialiser en écologie. Ayant pris conscience des énergies qui nous entourent, j'avais alors réalisé un prototype de récupération d'énergie mécanique à l'aide de matériaux piézoélectriques.

C'est avec l'école supérieure de navigation d'Anvers que l'idée de faire évoluer ce prototype dans le domaine maritime est alors apparue comme une évidence. Ce mémoire va donc porter sur la récupération de l'énergie mécanique des vagues à l'aide des polymères électroactifs.

Ces polymères possèdent des propriétés similaires aux matériaux piézoélectriques, mais sont capables de se déformer de façon bien plus importante. Les polymères électroactifs représentent une technologie idéale à la récupération d'énergie mécanique. N'ayant besoin d'aucun composant mécanique ou hydraulique, ils n'ont pas de problèmes de corrosion et ne sont pas à risque pour la vie marine.

Les difficultés à la réalisation de ce mémoire n'ont pas manqué. Il aura fallu associer de nombreuses connaissances acquises lors de ces trois années de bachelor en mécanique navale. Mais également découvrir une technologie que nous n'avons pas étudié en cours et dont les études sont complexes, récentes, et peu nombreuses. Un long travail de recherche et de compréhension a donc été nécessaire en amont de ce mémoire.

Cette étude se veut être une contribution à l'avancée des technologies écologiques liées au domaine maritime. Elle aura pour but de montrer théoriquement que l'utilisation des polymères électroactifs est possible pour récupérer l'énergie mécanique des vagues.

# Résumé :

Ce mémoire a pour objectif de montrer qu'il est possible de récupérer l'énergie mécanique des vagues à l'aide de polymères électroactifs. Plus précisément, nous allons étudier un système de tubes composés d'élastomères diélectriques associés aux navires de la marine marchande. Le défi sera alors de créer un système capable d'être installé sur n'importe quel navire, même après sa construction. Nous allons alors imaginer un système composé de trois couches de matériaux entièrement déformables. Une couche dite « active » en polymère électroactif sera prise en sandwich entre deux couches d'électrodes en graisse carbonée. Le choix du polymère électroactif se sera porté sur la famille des silicones, plus précisément sur le Sylgard 184. Cependant, un mixe de plusieurs élastomères diélectriques semble être le meilleur choix. Ce système sera protégé et enveloppé par un tube en polyéthylène chlorosulfoné. La forme et la position de celui-ci seront alors discutées, car des facteurs limitant en conditions réelles vont survenir. Tels que la stabilité du navire ou encore l'hydrodynamisme. Nous avons également calculé théoriquement la capacité de récupération d'énergie de ce système en fonction de sa déformation, ainsi que son coût et la rentabilité économique qu'il propose. Tous ces résultats théoriques sont prometteurs.

**Mots clefs** : Energie mécanique, Vagues, Navire, Marine marchande, Polymère électroactif, Elastomère diélectrique, Stabilité, Hydrodynamisme, Récupération d'énergie, Rentabilité économique.

# Abstract:

The objective of this thesis is to show that it is possible to harvest the mechanical energy from waves using electroactive polymers. We will study a device of tubes composed of dielectric elastomers associated with merchant navy ships. The challenge will be to create a device that can be installed on any ship, even after its construction. We will then imagine a system composed of three layers of fully deformable materials. An "active" layer of electroactive polymer will be placed between two layers of electrodes made of carbon conductive grease. The choice of the electroactive polymer will be based on the silicone family, more specifically, on Sylgard 184. However, a mix of several dielectric elastomers seems to be the best choice. This system will be protected and wrapped by a chlorosulfonated polyethylene tube. The shape and position of the tube will be discussed. Indeed, limiting factors in real conditions of use will arise. Such as the stability of the vessel or the hydrodynamism. We have also calculated theoretically the energy harvesting capacity of this system according to its deformation. As well as its cost and the economic efficiency that it proposes. All these theoretical results are promising.

**Keywords:** Harvest, Mechanical energy, Waves, Ships, Merchant navy, Electroactive polymer, Dielectric elastomer, Stability, Hydrodynamism, Energy harvesting, Economic efficiency.

# Table des matières

1. Introduction .....	1
2. Prototypes.....	3
2.1 Body Energy Harvesting .....	3
2.2 Energie Naturelle.....	4
3. Les polymères électroactifs .....	8
3.1 Qu'est-ce qu'un polymère électroactif ? (EAP) .....	8
3.2 Les familles de polymères électroactifs .....	9
3.3 Électrostriction et effet Maxwell.....	12
3.4 Elastomère Diélectrique : fonction générateur .....	14
4. Les électrodes .....	16
4.1 Choix des électrodes.....	16
5. Les limites des polymères électroactifs.....	19
5.1 Limites de fonctionnement .....	19
6. Le phénomène d'auto-cicatrisation .....	21
6.1 Définition .....	21
7. Choix de l'élastomère diélectrique .....	23
7.1 Quel DEG choisir ?.....	23
8. Calculs théoriques .....	26
8.1 Energie récupérable .....	26
8.2.1 Modélisation théorique .....	31
8.2.2 Calculs théoriques avec notre DEG .....	35
8.2.3 Discussion des résultats .....	44
8.3 Études Expérimentales réalisées.....	46
8.3.1 Composé de Polyuréthane.....	47
8.3.2 Polymère P(VDF–TrFE–CFE).....	50

9. Étude économique .....	55
9.1 Calcul des coûts .....	55
9.2 Calcul de rentabilité .....	62
10. Limites du système .....	66
10.1 Forme du système .....	66
10.2 Stabilité du navire .....	68
10.3 Hydrodynamisme .....	72
10.4 Problèmes pratiques .....	73
10.5 Durée de vie .....	76
11. Conclusion .....	78
Liste des Annexes .....	83
Annexe 1 .....	84
Annexe 2 .....	85
Annexe 3 .....	86
Annexe 4 .....	87
Annexe 5 .....	88
Annexe 6 .....	89
Annexe 7 .....	90

# Liste des figures :

Figure 1 : Prototypes de semelles récupératrices d'énergie [1] .....	3
Figure 2 : Prototype de BEH au genou [1] .....	4
Figure 3 : Energie des vagues dans le monde [2] .....	4
Figure 4 : Différents prototypes de récupération d'énergie houlomoteur [3] .....	5
Figure 5 : Wave Energy Converter Prototype [1] .....	6
Figure 6 : Différents prototypes de systèmes en polymères électroactifs [4] .....	7
Figure 7: Tableau des familles de polymères [5 ] .....	9
Figure 8 : Tableau étayé des familles de polymères [6] .....	11
Figure 9 : Représentation de l'électrostriction [7] .....	12
Figure 10 : Schéma du cycle énergétique d'un élastomère diélectrique en mode générateur [8] .....	15
Figure 11 : Récapitulatif des types d'électrodes [1] .....	18
Figure 12 : Expérience de l'auto-cicatrisation [9] .....	22
Figure 13 : Caractéristiques de différentes familles de polymères électroactifs [1] .	24
Figure 14 : Avantages & inconvénients de différentes familles de polymères électroactifs [1] .....	25
Figure 15: Etapes de conversion [5] .....	26
Figure 16 : Puissance générée en fonction de la déformation - Expérience de SBM Offshore [10] .....	27
Figure 17 : Photo d'un Zodiac (Hors-bord semi-rigide) [12] .....	31
Figure 18 : Image 3D d'un navire marchand équipé d'un boudin en DEG (Source : travail personnel) .....	32
Figure 19 : Schéma Déformations biaxiales [5] .....	33
Figure 20 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 100m	

/ 3000V (Source : Propre travail).....	36
Figure 21 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 100m	
/ 6000V (Source : Propre travail).....	37
Figure 22 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 200m	
/ 3000V (Source : Propre travail).....	38
Figure 23 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 200m	
/ 6000V (Source : Propre travail).....	39
Figure 24 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 300m	
/ 3000V (Source : Propre travail).....	40
Figure 25 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 300m	
/ 6000V (Source : Propre travail).....	41
Figure 26 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et de la taille du navire - Tension 3000V (Source : Propre travail) .....	42
Figure 27 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et de la taille du navire - Tension 6000V (Source : Propre travail) .....	43
Figure 28 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et $V_{min}$ – Navire de 300m (Source : Propre travail).....	43
Figure 29 : Installation expérimentale de l'étude [13].....	47
Figure 30 : Puissance récupérée théorique & expérimentale en fonction de la résistance [13].....	48
Figure 31 : Influence de la fréquence sur la permittivité diélectrique [13].....	49
Figure 32 : Illustration de l'expérience [14] .....	50
Figure 33 : Comparaison du courant récupéré en fonction de la fréquence et des matériaux utilisés [14] .....	52
Figure 34 : Comparaison de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence et des matériaux utilisés [14].....	53

<b>Figure 35 : Comparaison de la puissance récupérée en fonction de la résistance et des matériaux utilisés [14] .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 36 : Schéma stabilité du navire [15] .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure 37 : Influence des forces G et B [15] .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 38 : Schéma de représentation du métacentre [16] .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 39 : Estimation de l'énergie contenue en fonction du type de vague et de sa fréquence [21] .....</b>	<b>73</b>
<b>Figure 40 : Sillage de Kelvin [17].....</b>	<b>74</b>

# Liste des tableaux :

Tableau 1 : Calcul volume Sylgard 184.....	56
Tableau 2 : Calcul volume électrodes.....	57

# Liste des abréviations :

EAP : Electroactive polymer

PEA : Polymère électroactif

BEH : Body Energy Harvesting

DE : Dielectric Elastomer

DEG : Dielectric Elastomer Generator

DEA : Dielectric Elastomer Actuator

PTO : Power Take Off

Ws : Watt-seconde

Wh : Watt-heure

kWh : kilo Watt-heure

HFO : Heavy Fioul Oil

# Liste des symboles :

$E_S$  : énergie récupérée par le système

$E_{REPOS}$  : énergie stockée au repos

$E_{ETIRE}$  : énergie stockée lors de la déformation

$C_{max}$  : capacitance maximale

$C_{min}$  : capacitance minimale

$V_{max}$  : tension maximale

$V_{min}$  : tension minimale

$\epsilon_0$  : permittivité du vide ( $= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ )

$\epsilon_r$  : permittivité diélectrique relative (du matériau)

$x_1, x_2, x_3$  : dimensions initiales du DEG, selon les axes respectifs longueur, largeur et épaisseur.

$\lambda_1, \lambda_2$  et  $\lambda_3$  : rapports d'extension entre la longueur finale et initiale de l'axe désigné du DEG (selon les axes respectifs longueur, largeur et épaisseur)

$\lambda_{max}$  : rapport d'extension maximal que peut subir le matériau

$Q$  : charge électrique

# Chapitre 1

## Introduction

Les derniers rapports écologiques de nos scientifiques sont plus qu'alarmants et nous n'avons presque plus de temps pour réduire nos émissions de CO<sub>2</sub>. Avec 90 % des échanges mondiaux faits par voie maritime, notre industrie pèse énormément sur l'environnement et est considérée comme l'une des plus polluantes au monde.

Cet argument devrait suffire pour essayer de réduire le plus possible l'empreinte carbone de la marine marchande. De nombreuses solutions existent, car l'énergie est présente tout autour de nous, que ce soit le soleil, le vent ou les vagues, nos navires baignent littéralement dans un océan d'énergie.

La seule problématique est le rendement économique de toutes ces solutions "vertes". Le rendement énergétique des panneaux solaires n'est pas suffisant car nous ne possédons pas encore les bons matériaux. L'éolien est intéressant mais trop imprévisible. Alors que les vagues, dont on tire l'énergie "houlomotrice" représentent enfin l'espoir d'une énergie verte et rentable. De nombreux projets sont en cours de développement : colonnes d'eau oscillantes, flotteurs oscillants, batteurs inversés, réservoirs à pistons, etc. S'agissant principalement de prototypes mécaniques installés au bord des côtes, aucun n'est pour l'instant applicable à nos navires.

J'ai alors commencé par réfléchir à un principe similaire que l'on pourrait associer à nos vaisseaux. Avec toujours le même principe, utiliser le mouvement des vagues pour faire bouger un piston qui entraînerait un fluide et ainsi alimenter une turbine pour produire de l'électricité. Comme par exemple, des « ailes flottantes », constituées de flotteurs avec une forme hydrodynamique situés le long de la coque ou encore des hydrofoils pivotants verticalement. De nombreuses idées s'offraient à moi, mais je rencontrais toujours le même problème, d'une part le rendement qui ne

serait peut-être pas suffisant par rapport à la résistance hydrodynamique. Mais d'autre part l'utilisation de pièces mécaniques et hydrauliques exposées à l'éprouvante vie marine, qui entraînerait corrosion et maintenances.

C'est dans un souci de répondre aux problématiques de rendement énergétique, économique, de maintenance, mais aussi d'ergonomie que je me suis dirigé vers les polymères électroactifs. Cette technologie récente possède des propriétés similaires aux piézoélectriques, mais avec des capacités de déformation bien supérieures. Un système de tubes déformables composés de cette matière que l'on pourrait installer sur n'importe quel navire et ce, à n'importe quel moment de leur vie. Résistant à de grandes déformations et ne possédant aucune pièce mécanique ou hydraulique, ce système serait alors parfait pour résister à la rigueur imposée par la vie marine.

Nous allons donc étudier la question de l'installation d'un tel système sur des navires marchands. Pour ce faire, nous allons analyser les différents matériaux nécessaires à la réalisation de ce projet, puis étudier la rentabilité et le rendement théorique de ce système. Enfin, nous analyserons les facteurs limitants qu'un tel projet rencontrerait dans la réalité. Ce mémoire aura alors pour objectif de déterminer si la récupération d'énergie mécanique des vagues est possible et rentable à l'aide de ces polymères électroactifs.

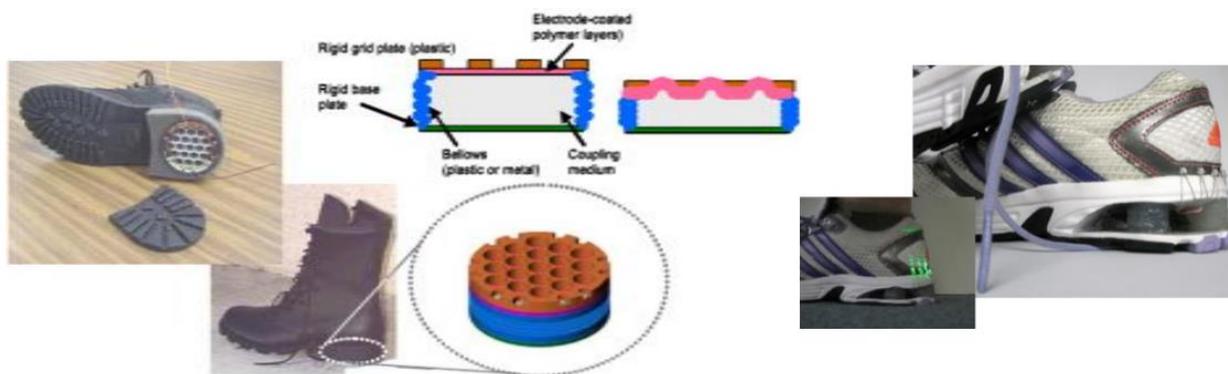
# Chapitre 2

## Prototypes

### 2.1 Body Energy Harvesting

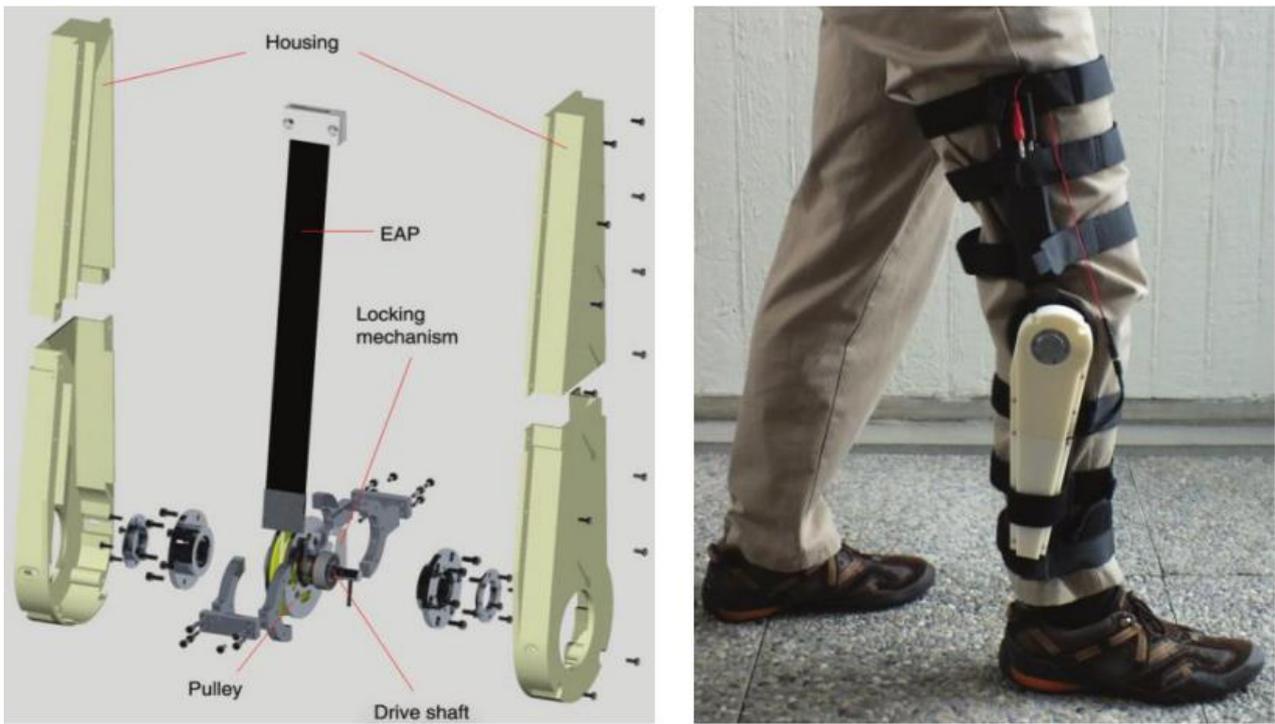
Les recherches menées sur la récupération d'énergie mécanique à l'aide de polymères électroactifs sont variées et prometteuses.

Au début de leur création les polymères électroactifs avaient pour objectif d'être des muscles artificiels. C'est donc dans cette logique que les premiers prototypes de récupération d'énergie étaient liés au corps humain. Les BEH (Body Energy Harvesting) représentent l'application de ces polymères à la récupération d'énergie mécanique produite par le corps humain. Généralement situés au niveau des genoux ou des pieds, ce sont les premiers prototypes à avoir vus le jour. Les auteurs, Pelrine et Al, ont estimé l'énergie récupérée à 1 W par pas.



**Figure 1 : Prototypes de semelles récupératrices d'énergie [1]**

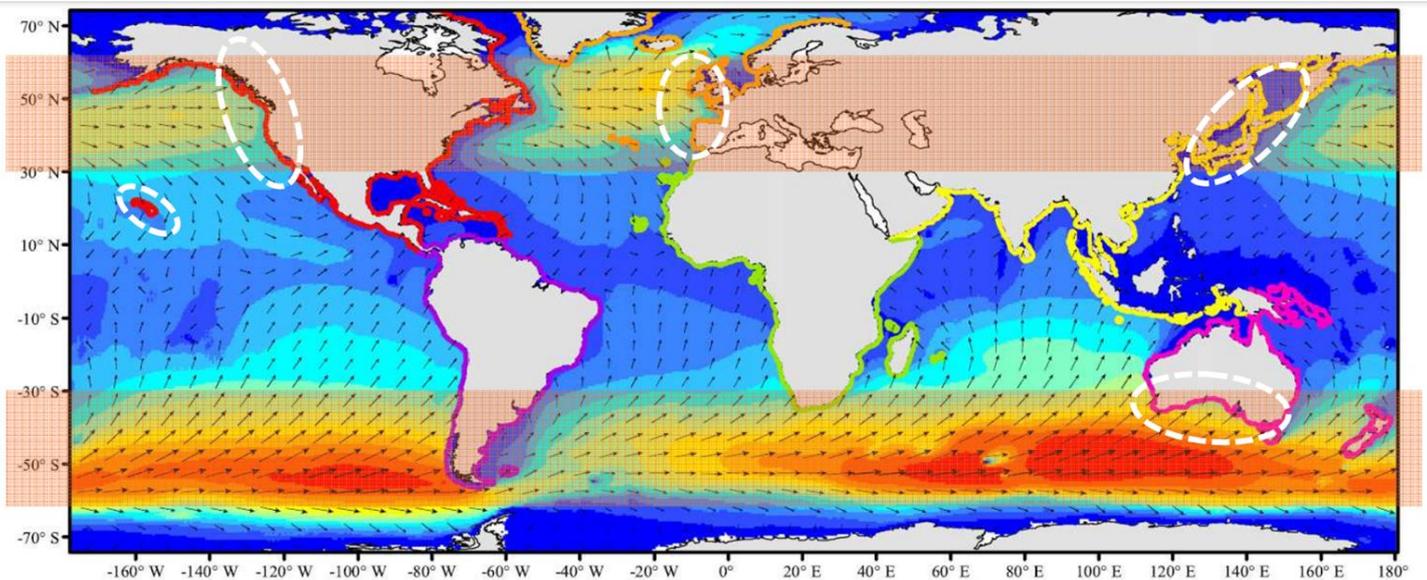
Dans cette même lignée de BEH ont suivi des prototypes de conversion d'énergie du mouvement du genou. Couplé directement à une batterie ou un appareil électronique, ce système est capable de produire de l'énergie sans demander un effort supplémentaire de la part du porteur. Ici, les auteurs ont déclaré une production de 18,525  $\mu\text{J}$  par pas.



**Figure 2 : Prototype de BEH au genou [1]**

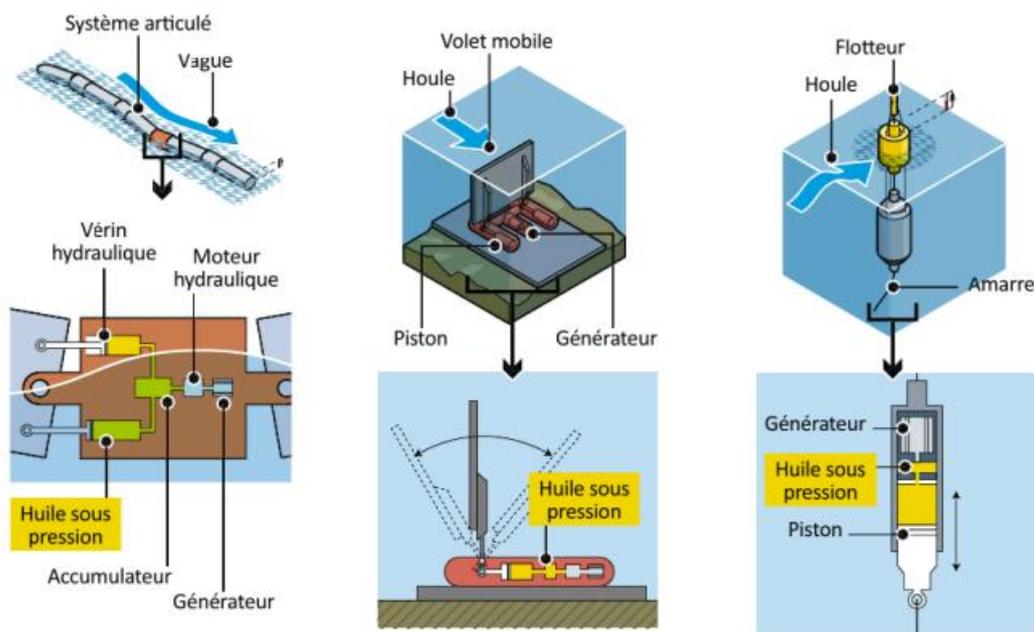
## 2.2 Energie Naturelle

Mais le principe de récupération d'énergie via les polymères électroactifs s'est ensuite diversifié aux autres sources de déformations mécaniques, comme le vent et l'eau. En ce qui concerne l'eau, nos océans regorgent abondamment d'énergie mécanique.



**Figure 3 : Energie des vagues dans le monde [2]**

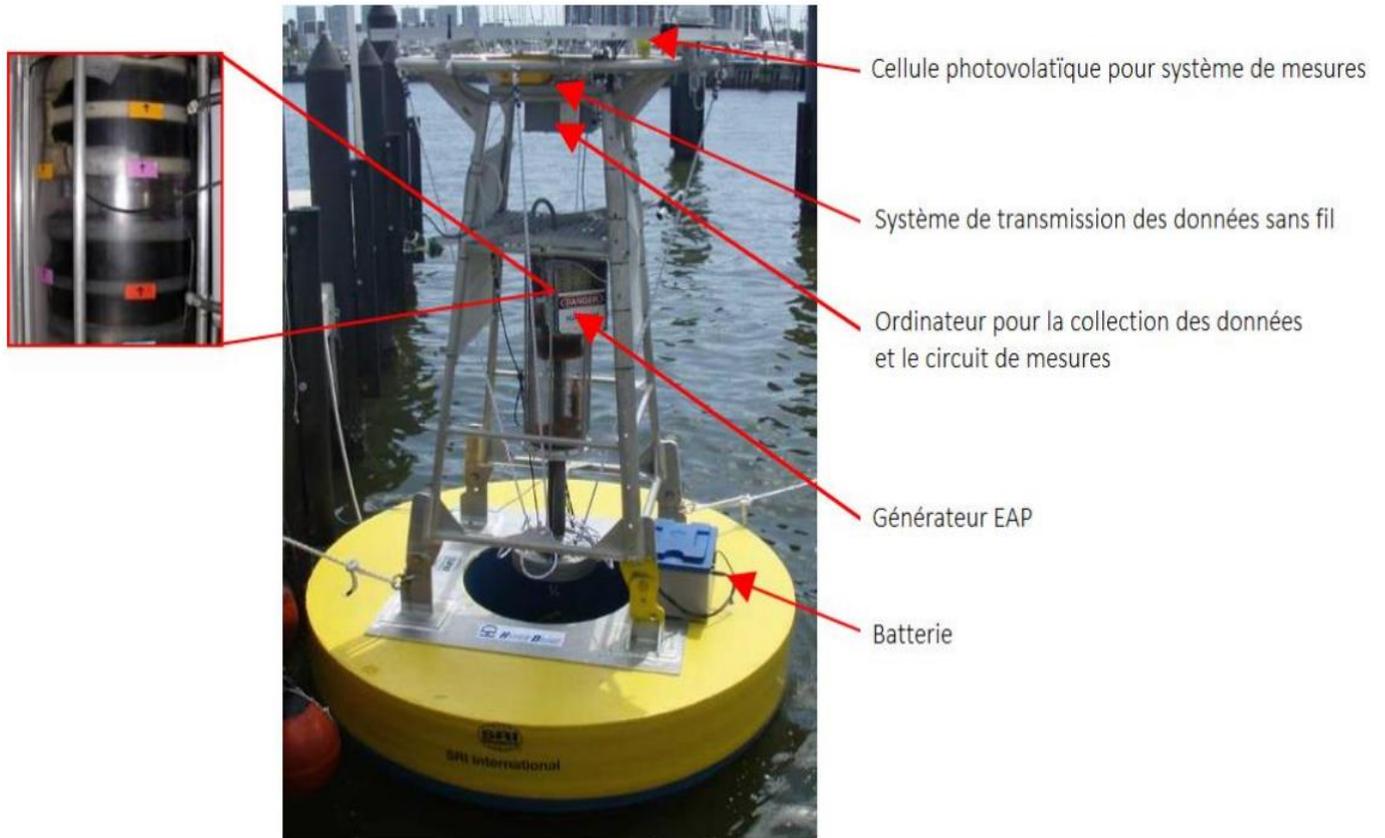
L'hydrolien est bien évidemment le potentiel le plus exploité aujourd'hui, mais de nombreuses solutions de récupération d'énergie des vagues (houlomoteur) sont en train de voir le jour. Comme par exemple, des vérins qui compriment des circuits fermés d'huiles sous l'action des vagues, des systèmes de turbines hydrauliques actionnées par la pression de l'eau, des pompes immergées actionnées par des différences de pression provoquée par la houle. Nombreuses sont les innovations pour récupérer l'énergie des vagues.



**Figure 4 : Différents prototypes de récupération d'énergie houloMOTEUR [3]**

Cependant, ces systèmes conventionnels comportent des désavantages et des limites liées à leurs structures rigides. Leurs coûts de maintenance sont élevés ainsi que leurs coûts de construction. Sans compter qu'ils ne sont pas adaptés à de longues périodes d'exposition à la vie marine.

C'est pourquoi la récupération d'énergie houloMOTEUR à l'aide de polymères électroactifs commence à intéresser les grandes entreprises. Pas de pièces mécaniques complexes, pas d'entretien régulier, système flexible et silencieux, le tout avec une grande capacité d'absorption. Cette nouvelle génération de récupérateur d'énergie est une technologie prometteuse. Le tout premier prototype a été réalisé en 2008 en Floride par l'équipe Chiba :



**Figure 5 : Wave Energy Converter Prototype [1]**

Peu d'informations sont fournies au sujet de ce prototype, mais il a été établi qu'avec une faible houle (vagues de 10cm), ce système était capable de générer une puissance moyenne entre 0,5 et 1,2 W.

Depuis, de nombreux prototypes similaires ont vu le jour. Tous plus prometteurs les uns que les autres et suivant le même principe : récupérer l'énergie houlomotrice à l'aide d'un matériau en polymère électroactif.



Anaconda (Towing Tank, Solent University, UK)



AWS-III Cassette Structure (Orkney, UK)



M3 Wave DMP (Oregon, USA)



Bombora mWave (Model Test Basin, AMC, Australia)



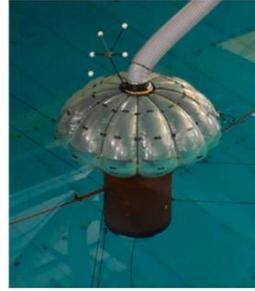
Poly-A-OWC (FloWave Ocean Energy Research Facility, UK)



SBM S3 (Ecole Centrale de Nantes, France)



Wave Carpet (Berkeley TAFLab, University of California, USA)



SQ1 (Plymouth COAST Laboratory, UK)



Circular Sea-Clam (Loch Ness, UK)

**Figure 6 : Différents prototypes de systèmes en polymères électroactifs [4]**

# Chapitre 3

## Les polymères électroactifs

### 3.1 Qu'est-ce qu'un polymère électroactif ? (EAP)

Nous connaissons tous les matériaux piézoélectriques, comme le Quartz par exemple, qui ont deux propriétés indissociables : la première est de se déformer sous l'action d'un champ électrique. Et la seconde, sa réciproque, est de créer un champ électrique lorsqu'on le déforme.

Les polymères électroactifs (Electroactive Polymers EAP en anglais), quant à eux, possèdent les mêmes propriétés mais avec des avantages non-négligeables. Commençons par rappeler ce qu'est un polymère.

Un polymère est une chaîne de molécules semblables appelées monomères. En fonction du type de molécule utilisé le polymère aura des propriétés différentes, il pourra être pliable et modelable, tout comme il pourra être dur et cassant.

Un polymère électroactif est alors un polymère dont la chaîne de monomère réagit aux stimulations électriques. Avec le temps et les recherches ces polymères sont devenus bien plus complexes, combinant plus de matériaux et augmentant ainsi la conductivité et la capacité de déformations de ceux-ci.

Leurs fonctions principales étaient à la base d'agir comme actionneurs ou capteurs. Mais en atteignant dans les années 1990 une capacité de déformation de 380 % les EAP ont commencé à trouver leurs rôles dans le développement de la robotique ainsi que dans les muscles artificiels.

## 3.2 Les familles de polymères électroactifs

Il existe deux grandes familles de polymères électroactifs, les polymères électroniques et les polymères ioniques. La grande différence entre ces deux familles est leur mode d'actionnement. Les polymères électroniques s'activent grâce à un champ électrique alors que les polymères ioniques s'actionnent par une diffusion d'ions au sein du matériau. Chaque famille de polymère électroactif présente ses avantages et ses inconvénients. Il est important de savoir que la famille électronique sera utilisée pour des énergies ou des forces de haute densité. Alors que la famille ionique sera utilisée pour des applications nécessitant une faible tension d'activation.

Famille	Avantages	Inconvénients
Électronique	<p>Force générée importante</p> <p>Temps de réponse court</p> <p>Fonctionne aux conditions ambiantes</p> <p>Durée de vie assez importante</p>	<p>Champ d'actionnement élevé (20 à <math>150MV.m^{-1}</math>)</p> <p>Sens de déformation unique pour les couplages quadratiques</p>
Ionique	<p>Déplacements importants</p> <p>Champ d'actionnement faible (<math>10MV.m^{-1}</math>)</p> <p>Sens de déformation en fonction de la polarité de l'alimentation</p>	<p>Temps de réponse lent</p> <p>Faible force générée</p> <p>Conditions de fonctionnement particulières (humide ...)</p> <p>Couplage électromécanique faible</p>

**Figure 7: Tableau des familles de polymères [5]**

Dans ces familles, on retrouve différents types de polymères électroactifs :

**Les polymères électroactifs diélectriques** : ils agissent comme un condensateur à capacité variable et sont capables de très grandes déformations. Pour effectuer des mouvements ils ont besoin de recevoir des forces électrostatiques localisées entre deux électrodes. Ils n'ont pas besoin de puissance pour se maintenir dans une position, mais nécessitent un certain voltage pour effectuer un mouvement (environ une centaine de volts).

**Les polymères ferroélectriques** : ils peuvent maintenir une polarisation électrique permanente. Un champ électrique externe sera alors en mesure d'inverser ou d'alterner cette polarisation. Ici ils ne nous seront pas utiles et seront plutôt utilisés en tant que transducteurs acoustiques ou actionneurs électromécaniques grâce à leur réponse piézoélectrique intrinsèque.

**Les polymères électroactifs ioniques** : ce type de polymère se déformera grâce au déplacement des ions de l'extérieur vers l'intérieur du polymère. Contrairement aux polymères électroactifs diélectriques, ils ne nécessiteront que de quelques volts pour s'actionner mais également d'une plus grande puissance électrique. Ils auront également besoin d'une énergie électrique pour être maintenus en position lorsqu'ils sont utilisés comme actionneurs.

Il existe encore beaucoup d'autres types, voici donc un tableau récapitulatif des différents polymères électroactifs que l'on peut retrouver :

	Nom	Principe physique	Exemple de matériau
Famille électronique	Polymère ferroélectrique	Matériau qui possède un moment dipolaire permanent, à l'échelle des domaines élémentaires.	- piézoélectrique : PZT, PVDF - électrostriction : P(VDF-TrFE), P(VDF-TrFE-CTFE)
	Electret	Matériau ayant une polarisation électrique quasi permanente après exposition à un fort champ électrique ou après injection de charges.	- PP ou PTFE et ses copolymères chargés
	Élastomère diélectrique	Matériau fonctionnant sur le principe d'une capacité variable : effet électrostatique.	- polyacrylate - silicone
	Elastomère électrostrictif greffé	Matériau ferroélectrique type électrostrictif qui a la particularité d'être composé d'une matrice flexible et d'un polymère greffé sous forme cristalline.	- matrice : copolymère du chlorotrifluoroéthylène ou trifluoroéthylène - grèffe : P(VDF-TrFE)
	Papier électroactif	Matériau de type papier composé d'une multitude de particules (fibre naturelle) formant un réseau et combinant des propriétés piézoélectriques à une migration ionique.	- cellulose prise en sandwich entre deux électrodes métalliques : or, platine
Famille ionique	Gel ionique	Matériau qui devient dense (concentration) ou gonflé (étirement) lors du passage d'un environnement acide à un environnement alcalin.	- polyacrylonitrile
	Composite ionique (IPMC)	Matériau qui se courbe en réponse à un champ électrique par migration ionique au sein d'une membrane sélective d'ions .	- membrane sélective : Nafion ou Flemion - électrode : or, platine
	Polymère conducteur ionique (CP)	Matériau sujet à des réactions d'oxydoréduction qui induisent des variations de volume.	-CP : polypyrrone, polyaniline
	Nanotubes de carbone (CB)	Matériau dont la balance électronique entre nanotubes et électrolyte est modifiée par injection de charges, ce qui induit des changements de dimensions.	
	Fluide électrorhéologique	Matériau sujet à des migrations de particules qui fait varier les propriétés rhéologiques du fluide comme la viscosité	- LID 3554 de ER Fluid developments Ltd

**Figure 8 : Tableau étayé des familles de polymères [6]**

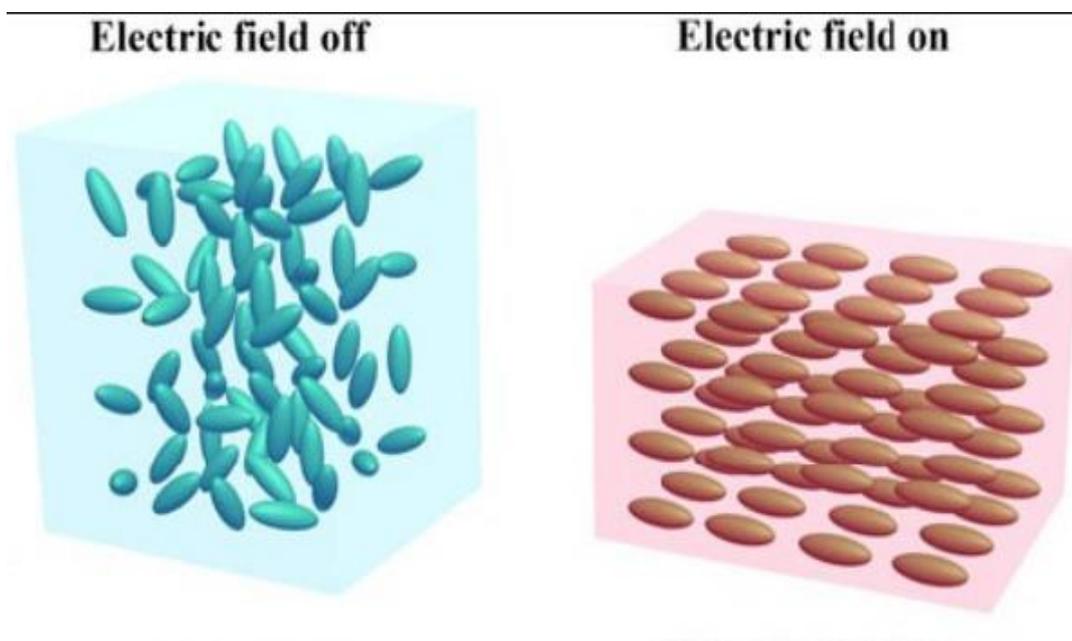
Dans ce mémoire nous allons nous concentrer sur les polymères électroactifs électroniques. Plus précisément sur les élastomères diélectriques nommés DE (Dielectric Elastomers). Ils sont généralement utilisés comme actionneurs, capteurs, mais surtout pour notre expérience : comme générateurs.

### 3.3 Électrostriction et effet Maxwell

Nos élastomères diélectriques sont régis par deux phénomènes que nous devons alors expliquer : l'électrostriction et l'effet Maxwell.

L'électrostriction est un phénomène simple à comprendre, il s'agit de la propriété d'un matériau diélectrique à se déformer sous l'effet d'un champ électrique. Il est important de différencier l'électrostriction et l'effet de piézoélectrique inverse, qui est un effet linéaire dont la déformation est proportionnelle au champ électrique.

Alors que l'électrostriction est une déformation proportionnelle au carré du module du champ électrique, elle par l'orientation des dipôles présents dans le matériau lorsque l'on y applique un champ électrique :



**Figure 9 : Représentation de l'électrostriction [7]**

L'effet Maxwell représente l'attraction entre les charges opposées de deux électrodes qui se font face. De cette attraction résulte une pression mécanique sur ces électrodes. A cause de cet effet, on pourra alors observer une réduction de l'énergie de sortie, car la déformation du système sera limitée par cette pression.

Cet effet représente également la relaxation d'un empilage de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques de nature différente. C'est-à-dire le temps de rétablissement de la neutralité électrique de ces couches de matériaux.

### 3.4 Elastomère Diélectrique : fonction générateur

Sous-famille des polymères électroactifs, les élastomères diélectriques sont les matériaux parfaits pour notre projet. Ce sont des polymères aux propriétés élastiques, capables d'une très grande déformation, qui peuvent convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Ce matériau est en train de devenir très convoité par les industriels pour ses capacités de production d'électricité en plus de ses nombreuses autres applications.

L'énergie récupérable avec ces élastomères diélectriques est d'environ  $3 \text{ J.g}^{-1}$ , c'est-à-dire 100 fois plus qu'avec un polymère piézoélectrique. Faciles d'utilisation grâce à leurs transmissions mécaniques directes, ces générateurs peuvent fournir une forte densité d'énergie tout en ayant une masse et un encombrement réduit. Ils offrent un rendement excellent et fonctionnent avec un large éventail de fréquences. Ils sont particulièrement performants sur de larges déplacements (comme ceux offerts par l'énergie des vagues) et surtout sont composés de matières non-toxiques. Ce qui est un point très important lorsque l'on veut adapter ce type de technologie à nos navires.

**Le fonctionnement** : le mode de fonctionnement "générateur" va donc produire de l'électricité en plusieurs étapes. Avant tout, il faut savoir que notre élastomère diélectrique, que nous appellerons "couche active" est située entre deux couches d'électrodes. Au début du cycle, notre élastomère diélectrique est au repos. Lorsque l'on y impose une énergie mécanique, il va s'étirer, sa surface va augmenter et son épaisseur va diminuer.

Cette déformation va alors appliquer une tension à notre DE et des charges vont apparaître au niveau de nos électrodes. Puis lorsque l'énergie mécanique diminue, la résilience élastique de la membrane va rétablir la forme initiale de notre DE. C'est lors de ce mouvement que la charge électrique accumulée va être poussée vers l'électrode. C'est à ce moment que la production d'électricité aura lieu. Puis à chaque déformation ce cycle recommence.

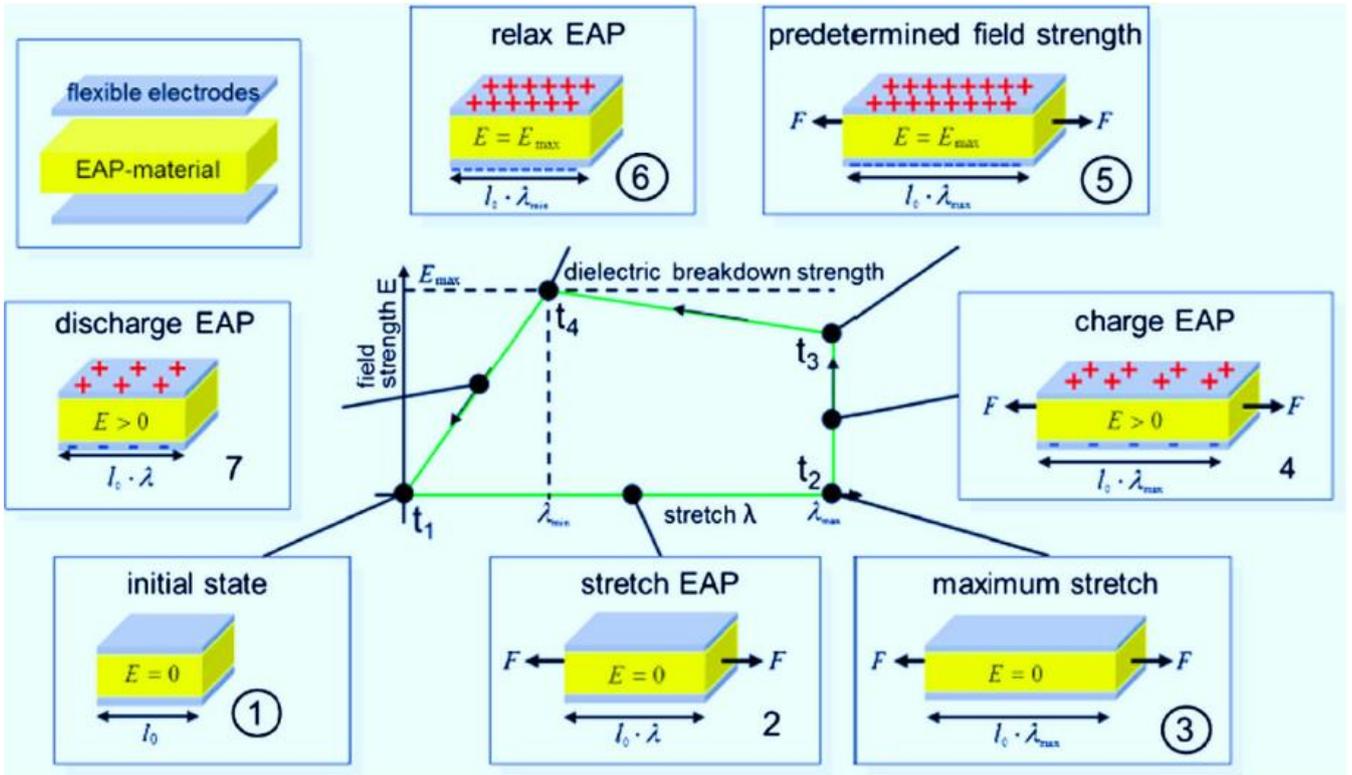


Figure 10 : Schéma du cycle énergétique d'un élastomère diélectrique en mode générateur [8]

# Chapitre 4

## Les électrodes

### 4.1 Choix des électrodes

Notre élastomère diélectrique sera enveloppé entre deux couches d'électrodes. On nommera notre DEG la couche "active", car c'est la couche qui produira l'électricité. De plus, on dira que cette couche est prise « en sandwich » entre nos électrodes.

Ces électrodes jouent un rôle capital dans notre projet, car elles doivent remplir de nombreuses fonctions. Tout d'abord, si le matériau que nous utilisons est hautement déformable, alors nos électrodes doivent être le plus souple possible et imposer un minimum de contraintes à celui-ci. Elles doivent pouvoir se déformer sans perte de conductivité et pouvoir résister à des courants élevés. Ces électrodes devront être capables de garder un champ électrique uniforme sur toute la surface de contact avec la couche active. Il faudra également qu'elles aient une bonne conductivité et qu'elles puissent être facilement intégrées au système. De plus, il faut garder en tête que notre projet sera utilisé en mer sur de longues périodes et qu'il devra répéter tout au long de sa vie le même cycle. Il va donc falloir utiliser des électrodes capables de conserver ces propriétés sur le long terme.

Le choix du type d'électrode va alors être primordial pour notre projet et il va falloir prendre en compte deux caractéristiques très importantes : le courant de fuite et le travail de sortie. Le courant de fuite représente le courant qui va "s'échapper" de notre installation au travers d'un chemin non prévu, par exemple le courant qui s'écoule d'un transistor à l'état bloqué.

Le travail de sortie, quant à lui, est l'énergie nécessaire pour arracher un électron du métal vers un point donné. Il est important de noter que pour diminuer les courants de fuite il nous faudra un travail de sortie le plus élevé possible.

Il y a deux familles d'électrodes souples, celles constituées de graisses conductrices (composés d'argent, de carbone ou de graphite) et les électrodes métalliques (or, cuivre, argent, etc.). L'avantage des électrodes constituées de graisse est bien évidemment leur capacité à se déformer. Cependant, elles possèdent un grand désavantage : la migration du produit conducteur, qui provoquera une perte de conductivité.

En ce qui concerne les électrodes métalliques, le premier candidat auquel on pense est l'or. Ce métal noble offre un bon travail de sortie et est parfait pour limiter les courants de fuite. Mais malheureusement, il est beaucoup trop rigide pour l'utilisation que nous voulons en faire.

Type d'électrode	Points forts	Points faibles	Possibilité de mettre en forme de grandes surfaces
Graisse de carbone	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robustesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epaisseur homogène</li> <li>• Huile non réticulée</li> </ul>	Oui
Poudres seules	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilité de mise en forme</li> <li>• Pas de contrainte sur la couche active</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adhérence faible</li> </ul>	Oui
Electrodes fines en métal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible épaisseur</li> <li>• Conductivité élevée</li> <li>• Possibilité de créer des motifs</li> <li>• Possibilité d'auto réparation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible déformation</li> <li>• Module d'Young élevé</li> <li>• Coût</li> </ul>	Non
Electrodes corruguées et hors plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmente la plage de déformation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déformation uniaxiale pour les corrugations</li> </ul>	Non si dépôt métal
Polymères conducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductivité élevé</li> <li>• Performance si additifs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module élevé</li> <li>• Migration d'éléments possible si additifs</li> <li>• Faible plage de température</li> </ul>	Oui
Composites DE/charges métalliques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible résistance surfacique et grandes déformations avec nanofils</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rigidité avec particules microniques</li> <li>• Coût</li> </ul>	Oui
Composites DE/charges carbonées	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité d'obtenir des propriétés électriques (optimisation la dispersion des charges et du seuil de percolation)</li> <li>• Possibilité de créer des motifs</li> <li>• Possibilité d'auto-réparation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compromis entre conductivité et rigidité mécanique</li> </ul>	Oui
Métal liquide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductivité élevée</li> <li>• Pas de contrainte sur la couche active</li> <li>• Possibilité de recombinaison</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût</li> </ul>	Non
Implantation ionique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible résistance surfacique</li> <li>• Grandes déformations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût</li> </ul>	Non
Textiles conducteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriétés électriques satisfaisantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epaisseur élevée et non homogène</li> <li>• Non adaptés aux EAP</li> </ul>	Oui

**Figure 11 : Récapitulatif des types d'électrodes [1]**

La meilleure solution à ce jour est une graisse qui ne comprend pas les désavantages précédemment exposés. C'est une graisse d'argent créée par la société CircuitWorks nommée CW7100. Elle assure une déformation de 100 % sans perte de conductivité importante (résistance de 1 Ohm) et ne se détériore pas avec le temps. Son plus grand avantage reste surtout la facilité à la déposer sur notre système. C'est donc la solution que nous choisirons pour notre mémoire.

# Chapitre 5

## Les limites des polymères électroactifs

### 5.1 Limites de fonctionnement

Durant sa vie, notre projet sera exposé à subir de nombreuses perturbations, que ce soit un choc à la suite d'une collision avec un navire ou un quai, la violence d'une tempête ou encore des dysfonctionnements électroniques. Il y aura donc des limites à son bon fonctionnement que nous allons prendre en compte.

#### **La rupture Mécanique :**

Notre polymère est choisi de façon à ce que sa déformation puisse varier entre 10 et 300 %, mais ce n'est pas pour autant qu'il est indestructible. Un choc ou un frottement un peu trop violent avec un quai ou un autre navire viendrait endommager la structure du matériau. Une fissure dans notre système conduirait alors à un claquage électrique (ou rupture diélectrique).

#### **La rupture diélectrique :**

Appelée aussi claquage électrique, ce phénomène se produit quand un isolant subi un champ électrique plus important que ce qu'il ne peut supporter. Un arc électrique va alors se former, ce qui aura pour conséquence de créer un court-circuit entre les deux électrodes. Dans le cadre de notre projet, ce type de rupture surviendra lorsque notre élastomère diélectrique subira une tension de polarisation dépassant la limite de tension de claquage. Il sera donc primordial d'utiliser un élastomère avec une limite de tension de claquage élevée.

### **L'instabilité électromécanique :**

Ce phénomène d'instabilité survient lorsque la contrainte de Maxwell (dont nous avons déjà parlé) appliquée à notre élastomère est supérieure à sa force élastique. Il en résulte alors un champ électrique local très élevé qui conduira à un claquage électrique ainsi qu'à la diminution drastique de l'épaisseur du matériau. Le champ électrique étant très localisé, le claquage surviendra à un niveau inférieur à la limite de claquage électrique de notre élastomère.

La température et la variation de la permittivité relative sont des paramètres qui vont influencer cette instabilité. Mais ce phénomène va surtout limiter les très grandes déformations.

### **Délamination entre électrode et couche active :**

Avec le temps et les cycles de compressions, il pourrait arriver que l'électrode et la couche active se dissocient. C'est pourquoi nous avons choisi le type d'électrode CW7100. Ce type d'électrode de graisse va nous permettre d'éviter ce problème au cours du temps.

# Chapitre 6

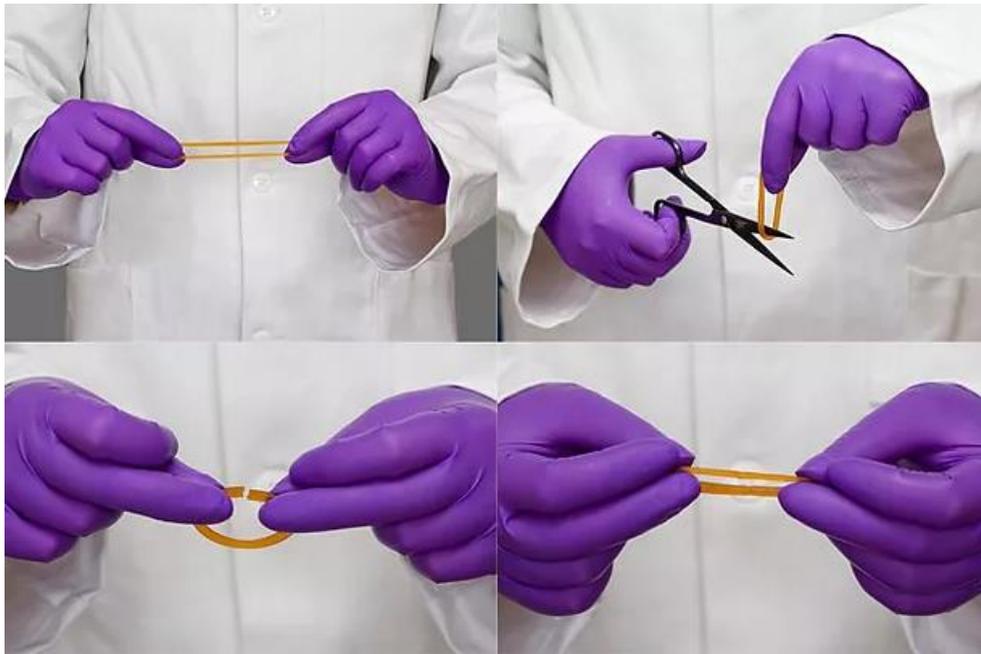
## Le phénomène d'auto-cicatrisation

### 6.1 Définition

Le risque le plus élevé de défaillance reste de loin le claquage électrique dont nous venons de parler. C'est pourquoi avant d'arriver au stade du choix de notre polymère, nous devons discuter du phénomène d'auto-cicatrisation. Cette capacité à se réparer seul est une capacité que possèdent certains polymères. Dans le cadre de notre projet, avec des systèmes installés pendant de longues périodes sur un navire, il devient très intéressant d'avoir un polymère ayant cette capacité.

Avant tout, il faut définir la différence entre l'auto-cicatrisation (qui concerne notre polymère) et l'auto-réparation qui va concerner nos électrodes. L'auto-réparation va définir la capacité à isoler un défaut afin de continuer à fonctionner. Alors que l'auto-cicatrisation va être la capacité du matériau à se régénérer après une dégradation tout en conservant ses propriétés initiales. Physiquement, le polymère va reformer les liaisons chimiques qui se sont rompues.

La société Arkema a commercialisé en 2008 un élastomère capable de s'auto-cicatriser grâce à des liaisons intermoléculaires liées à un agent auto-cicatrisant. Le résultat est impressionnant, on peut observer le matériau se faire découper puis se réparer seul après un contact. La seule condition est une déformation légère des deux surfaces séparées. Ce qui dans notre cas sera possible par l'action des vagues. Voici la démonstration de la société Arkema :



**Figure 12 : Expérience de l'auto-cicatrisation [9]**

Nous arrivons à l'étape du choix de notre polymère et il sera alors primordial qu'il possède cette capacité d'auto-cicatrisation, de façon répétitive, sur une longue période, sans défauts de fonctionnement et de façon efficace.

# Chapitre 7

## Choix de l'élastomère diélectrique

### 7.1 Quel DEG choisir ?

Nous devons désormais sélectionner un type d'élastomère diélectrique qui répondra aux attentes d'un tel projet. Afin de sélectionner le bon type de DEG nous allons d'abord rappeler les propriétés dont nous aurons besoin :

- Faible module de Young
- Bonne permittivité relative
- Limite de tension de claquage élevée
- Faibles courants de fuite
- Bonne résistance à la déformation (pour éviter les ruptures mécaniques)
- Auto-cicatrisation

De plus, il va falloir que notre DEG possède une bonne stabilité chimique, c'est-à-dire en équilibre chimique avec son environnement. Et donc qu'il gardera son nombre de molécules et d'atomes inchangé lorsqu'il est plongé dans son milieu.

Il va aussi falloir qu'il ait une stabilité thermique, ce qui veut dire qu'il doit éviter toute détérioration de sa structure en fonction des températures. Notre DEG devrait alors avoir une stabilité thermique entre des températures de -10 à 50 degrés. Car nos navires ne navigueront jamais dans des eaux dépassants ces températures.

Dans les recherches menées sur les élastomères diélectriques, il en ressort le plus souvent quatre grandes familles : les polymères fluorés, les polyacrylates, les polyuréthanes et enfin les silicones. L'université de Lyon et le laboratoire G2Elab ont effectués des mesures très intéressantes sur les propriétés de différents élastomères diélectriques. Voici les résultats qu'ils ont obtenus :

Famille de polymère	Grade commercial	$e$ ( $\mu\text{m}$ )	$\epsilon_{rupture}$ (%)	$Y$ (MPa)	$\epsilon_r$	$E_B$ (V/ $\mu\text{m}$ )	Réf.
Polyacrylate	VHB 4910	250	> 600	1-2	4,7 @ 1 kHz	25	[15,22]
	VHB 4905	498	879	0,04 @ 50 %	4,5 @ 1 Hz	31	[15]
Polyuréthane	TPU LPT 4210 UT50	50	421	3,36 @ 50 %	6,0 @ 1 Hz	218	[15]
	Bayfol EA102	50	300	1,44 @ 50 %	7,1 @ 1 Hz	130	[15]
Silicone	Formule déposée	45	422	0,25 @ 50 %	2,4	80	[15]
	Elastosil RT 625	20-30	1 160*	0,2*	2,51* @ 1 Hz	50	[22]
	Sylgard 186	20-30	1 300*	0,7	2,8 @ 1 kHz	144	[10]
	Sylgard 184	70-80*	137*	2,2*	2,39* @ 1 Hz	27**	*
Fluoro-élastomère P(VDF-TrFE)	Solvane 250	300	525	800 @ 50 %	14	250	[15]

**Figure 13 : Caractéristiques de différentes familles de polymères électroactifs [1]**

Et voici en complément, toujours tiré de la même étude, un tableau regroupant les avantages et inconvénients de ces différentes familles :

	Points forts	Points faibles
Polyacrylates	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Performance de l'actuation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stabilité thermique</li> <li>• Temps de réponse long</li> <li>• Fluage</li> <li>• Sensibilité à l'humidité élevée</li> </ul>
Polyuréthanes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimie très versatile</li> <li>• Stabilité thermique</li> <li>• Permittivité élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module d'Young élevé</li> </ul>
Silicones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module d'Young faible</li> <li>• Elasticité</li> <li>• Temps de réponse rapide</li> <li>• Stabilité thermique</li> <li>• Stabilité temporelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible permittivité</li> </ul>
Fluoro-élastomères	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permittivité élevée</li> <li>• Stabilité thermique</li> <li>• Stabilité chimique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Module d'Young très élevé</li> <li>• Actuation faible</li> </ul>

**Figure 14 : Avantages & inconvénients de différentes familles de polymères électroactifs [1]**

Il semble évident à l'aide de ces deux tableaux que la famille des silicones est la plus adaptée pour répondre aux besoins de notre projet. Plus précisément le Sylgard 186 ou le Sylgard 184.

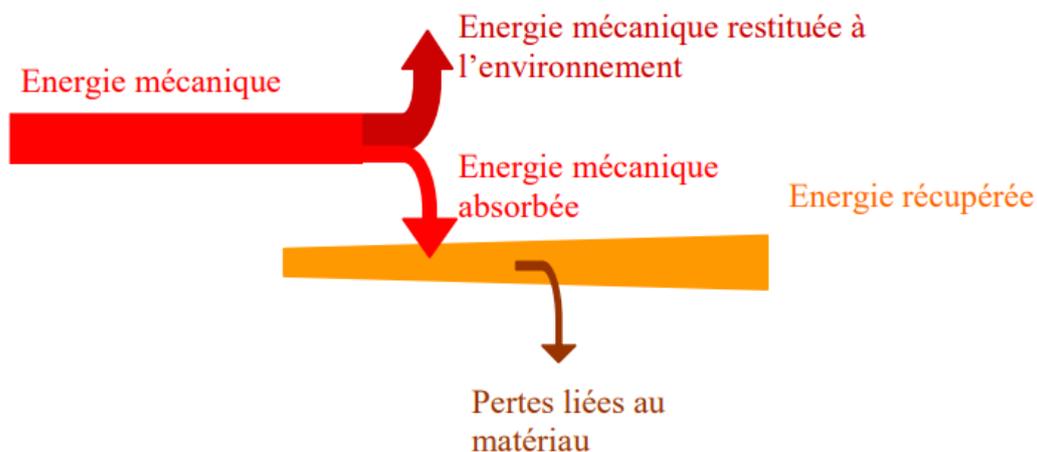
Leur seul défaut apparent est une faible permittivité, heureusement le monde de la chimie nous permet d'apporter des modifications à ces matériaux et ainsi de gommer leurs désavantages. En effet la plupart des matériaux étudiés ne sont pas purs à 100 %, le grand avantage de cette science est de pouvoir améliorer et modifier la structure des polymères. Nous verrons plus tard dans ce mémoire qu'il est possible d'utiliser des mixtures de polymères pour essayer de créer un matériau qui répond au mieux aux différents besoins.

# Chapitre 8

## Calculs théoriques

### 8.1 Energie récupérable

Pour modéliser l'énergie récupérée il faut prendre en compte plusieurs facteurs.

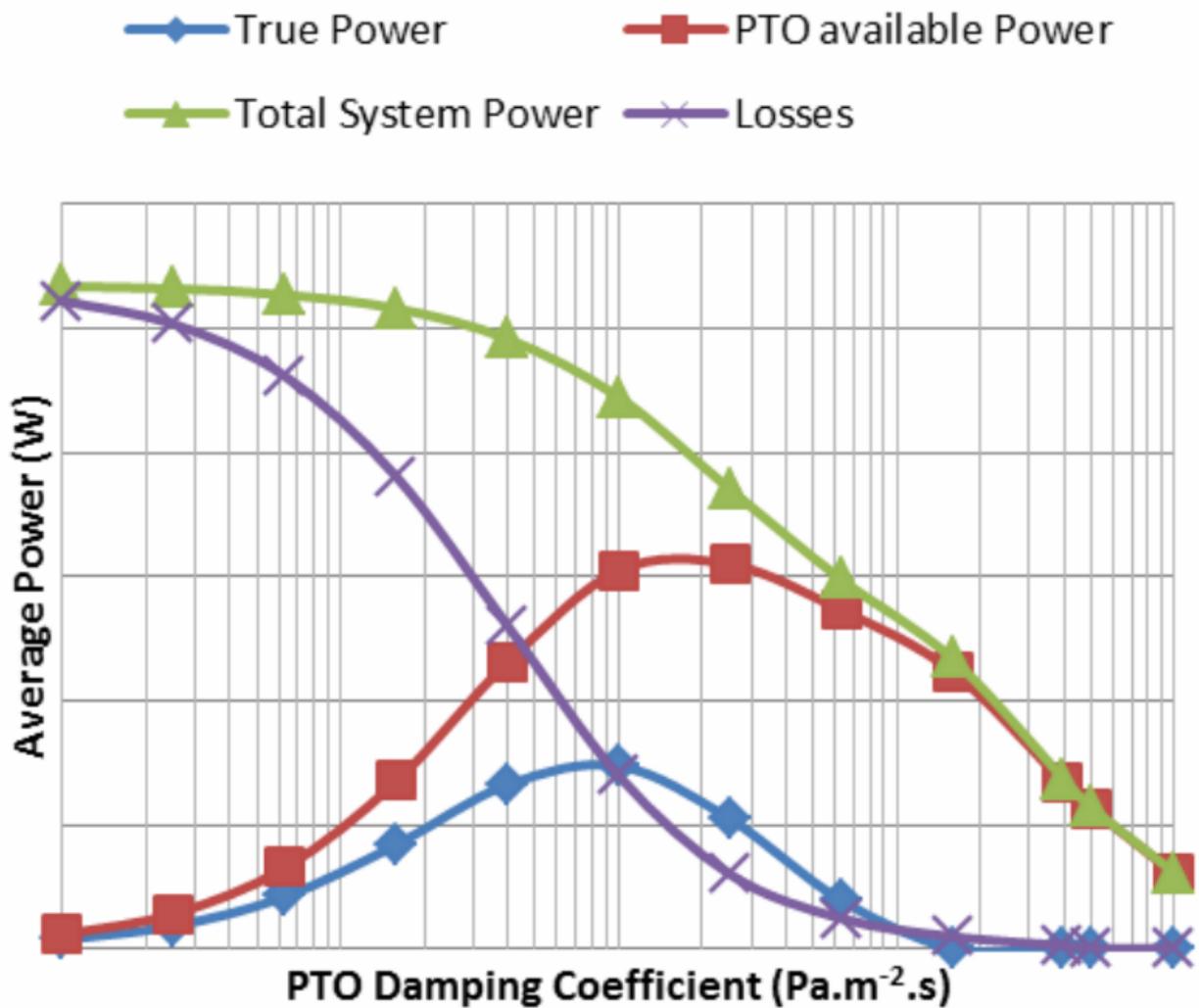


**Figure 15: Etapes de conversion [5]**

Il faut imaginer notre système, tout autour d'un navire. Le mouvement de la mer n'étant pas régulier, l'énergie produite ne sera jamais constante. En plus de la mer, il faut prendre en compte deux phénomènes très importants lorsque l'énergie mécanique sera absorbée. Le premier concerne les pertes visqueuses dues à notre élastomère diélectrique. On ne peut rien y faire et elles seront différentes en fonction du type de DEG utilisé. Il est donc important de garder en mémoire ce facteur lors de l'élaboration du polymère et c'est pourquoi on utilisera généralement un mixe (entre Sylgard 184 / 186 ou d'autres éléments).

Le second facteur important est la capacité de conversion d'énergie de notre polymère électroactif. Ce facteur dépendra donc du type de polymère utilisé, mais aussi du taux de déformation appliquée au matériau. Si la déformation est inférieure à 10 %, la puissance récupérée sera perdue en chaleur, et ce, à cause des courants de fuites.

Voici une expérimentation menée par la société SBM Offshore sur l'effet de la déformation d'un polymère électroactif en fonction de la puissance qu'il génère :



**Figure 16 : Puissance générée en fonction de la déformation - Expérience de SBM Offshore [10]**

L'axe des abscisses "PTO Damping Coefficient" (PTO pour Power Take Off) représente la perte d'énergie en fonction de la déformation de notre DEG. La ligne verte avec les triangles représente la quantité d'énergie totale disponible dans notre système.

La courbe rouge représente l'énergie mécanique récupérable, en bleu l'énergie récupérée en fonction des pertes de la courbe violette.

On constate donc qu'une déformation trop faible entraîne de très grandes pertes. Une déformation minimale est alors nécessaire afin de produire de l'énergie. À l'inverse, on peut aussi lire qu'une déformation trop grande va réduire de façon importante la quantité d'énergie récupérable. Ce graphique nous montre donc qu'un système tel que nous voulons créer possède une zone de fonctionnement optimale et des zones limites de déformation. Cette zone de fonctionnement optimale dépendra alors du type de DEG utilisé.

Pour ce qui est de la quantité théorique d'énergie récupérée par notre élastomère diélectrique, il faut garder en tête que notre système n'est pas un générateur au sens propre du terme. Il ne va pas générer de l'énergie uniquement grâce à la déformation mécanique, mais il va multiplier l'énergie qui lui est attribuée grâce à la déformation mécanique. Le système fonctionne à peu près comme une capacité, il va donc nécessiter une source de tension initiale pour pouvoir multiplier cette énergie. Pour les calculs théoriques nous allons alors appliquer deux tensions différentes afin d'en observer l'influence sur les résultats.

On va maintenant utiliser quelques formules pour calculer l'énergie récupérable d'un tel système pour chaque cycle de déformation. Tout d'abord :

$$E_S = E_{REPOS} - E_{ETIRE} \quad (1) \quad [11]$$

Avec  $E_S$  l'énergie récupérée,  $E_{REPOS}$  l'énergie stockée au repos et  $E_{ETIRE}$  l'énergie stockée lors de la déformation.

On écrira alors la formule suivante :

$$E_S = E_{REPOS} - E_{ETIRE} = \left(\frac{1}{2} * C_{min} * V_{max}^2\right) - \left(\frac{1}{2} * C_{max} * V_{min}^2\right) \quad (1.2) [11]$$

Avec  $C_{min}$  la capacitance minimale et  $V_{max}$  la tension maximale du DEG, lors de la phase de repos. Et avec  $C_{max}$  la capacitance maximale et  $V_{min}$  la tension minimale du DEG lors de la phase d'étirement.

Ensuite, pour pouvoir calculer la capacitance minimale et maximale nous allons utiliser deux autres formules.

$$C_{min} = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * x_1 * x_2}{x_3} \quad (2.1) [11]$$

$$C_{max} = \frac{\epsilon_0 * \epsilon_r * \lambda_1 * x_1 * \lambda_2 * x_2}{\lambda_3 * x_3} \quad (2.2) [11]$$

Avec :

$\epsilon_0$  = permittivité du vide =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>

$\epsilon_r$  = permittivité diélectrique relative de notre DEG = 2,39 (sans unité)

$x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  = Les dimensions initiales du DEG, selon les axes respectifs longueur, largeur et épaisseur.

$\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  = Les rapports d'extension, selon les axes respectifs longueur, largeur et épaisseur. C'est-à-dire le rapport entre la longueur finale et initiale de l'axe désigné.

La formule (1.2) est valable dans le cas d'un fonctionnement à tension continue.

Dans la pratique, nous travaillerons en fonctionnement à charge constante, ce qui veut dire que la charge  $Q$  suivra la relation suivante :

$$Q = C_{\min} * V_{\max} = C_{\max} * V_{\min} \quad (3) [11]$$

Nous obtenons alors la formule suivante pour calculer l'énergie récupérée :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{\min}^2 * C_{\max} * \left( \frac{C_{\max}}{C_{\min}} - 1 \right) \quad (4) [11]$$

## 8.2.1 Modélisation théorique

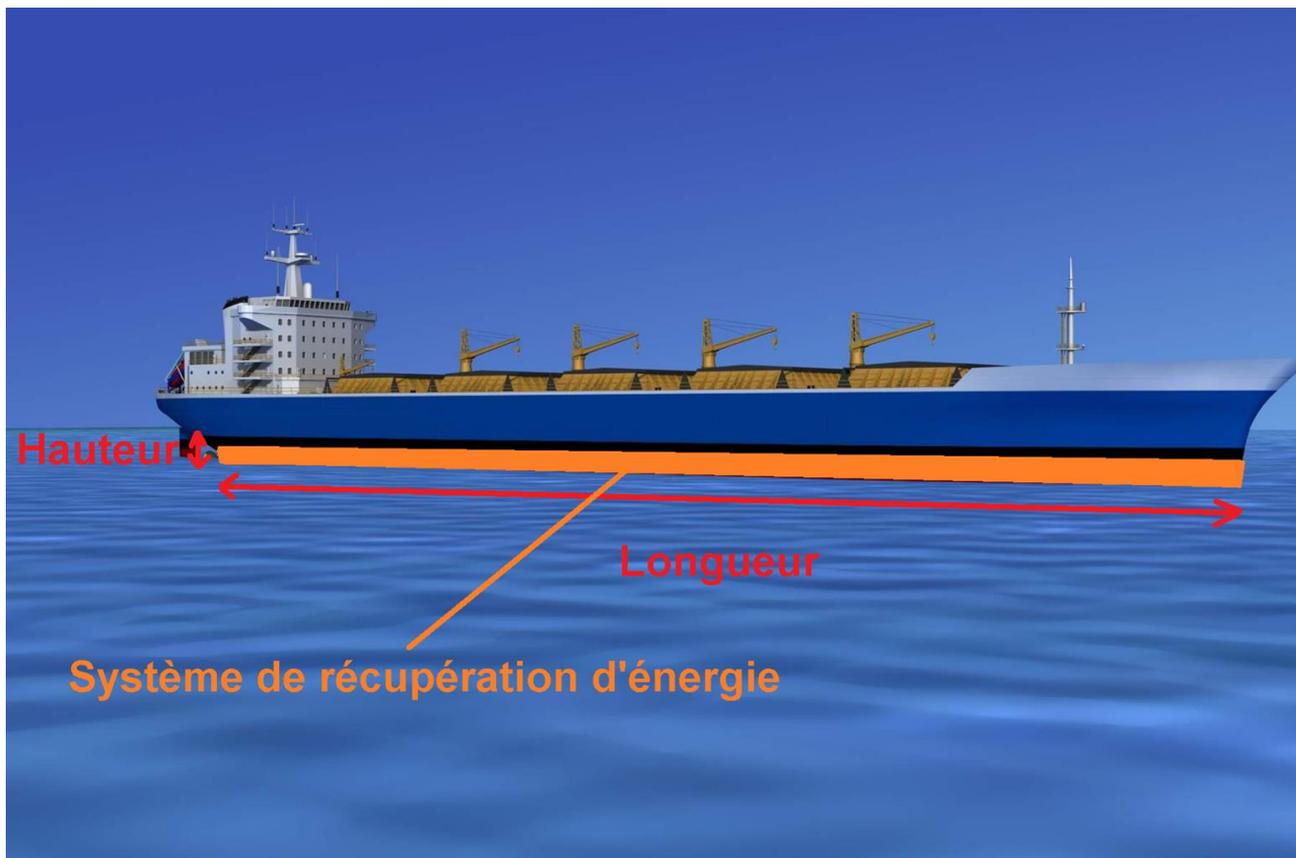
Nous connaissons désormais la formule théorique de l'énergie récupérable par notre système. Nous allons donc maintenant estimer la quantité d'énergie qu'un tel système récupérerait sur un navire de la marine marchande.

Imaginons notre sandwich électrode - élastomère diélectrique - électrode à l'intérieur d'un boudin gonflable similaire à ceux présents sur les hors-bords semi-rigides (Zodiac, etc.).



**Figure 17 : Photo d'un Zodiac (Hors-bord semi-rigide) [12]**

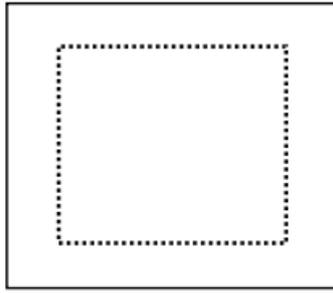
Et maintenant nous allons imaginer notre système de boudin collecteur d'énergie tout autour d'un navire marchant :



**Figure 18 : Image 3D d'un navire marchand équipé d'un boudin en DEG (Source : travail personnel)**

Nous travaillerons sur trois navires de longueurs différentes (100 m, 200 m et 300 m). Ce qui veut dire que nous travaillerons avec trois  $C_{\min}$  et  $C_{\max}$  différents. La hauteur et l'épaisseur du système ne varieront pas, seule la longueur du navire changera. Pour ce qui est de la fréquence des vagues qui agissent sur le système, elle se rapprochera d'une vibration et nous considérerons un cycle de production par seconde. Dans la réalité, les cycles de production seront peut-être différents, mais cet aspect sera discuté dans le chapitre 10.

En ce qui concerne la force des vagues, nous l'exprimerons en fonction du coefficient de déformation ( $\lambda$ ) et nous travaillerons avec des déformations de type biaxiales symétriques. C'est-à-dire que nous ferons varier les coefficients sur deux axes ( $\lambda_1, \lambda_2$ ). Ce type de déformation est le plus couramment utilisé dans la littérature car il facilite l'étude des résultats.



Déformations biaxiales

**Figure 19 : Schéma Déformations biaxiales [5]**

Les traits en pointillés représentent l'état initial du matériau et les traits pleins représentent l'état final de celui-ci.

On retiendra que la déformation maximale du Sylgard 184 à une température de 25 °C est de 166 %. [3]

Ce qui se traduira donc par un coefficient de déformation maximal de  $\lambda_{\max} = 1,66$ .

Au-delà, nous arriverons dans la zone de rupture mécanique de notre DEG, mais pour notre étude nous calculerons quand même jusqu'à une déformation de  $\lambda = 2$ . Cela nous permettra d'observer les quantités d'énergie récupérable avec le Sylgard 184 dont les performances de déformation mécanique auraient été améliorées grâce à un mixe de polymères.

Nous allons maintenant pouvoir calculer l'énergie récupérable entre chaque cycle de déformation en fonction de la taille du navire avec les formules suivantes :

$$C_{\min} = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_r * x_1 * x_2}{x_3} \quad (2.1) [11]$$

$$C_{\max} = \frac{\varepsilon_0 * \varepsilon_r * \lambda_1 * x_1 * \lambda_2 * x_2}{\lambda_3 * x_3} \quad (2.2) [11]$$

$$E_S = \frac{1}{2} * V_{\min}^2 * C_{\max} * \left( \frac{C_{\max}}{C_{\min}} - 1 \right) \quad (4) [11]$$

Et nous garderons les valeurs suivantes constantes dans différents calculs :

$$V_{\min} = 3000V \text{ (DC) puis } V_{\min} = 6000V \text{ (DC)}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

$$\epsilon_R = 2,39 \text{ (sans unité)}$$

$$x_2 \text{ (largeur)} = 2 \text{ m}$$

$$x_3 \text{ (épaisseur)} = 0,000052 \text{ m}$$

$\lambda_1, \lambda_2$  = variable en fonction du degré de déformation imposée par les vagues

## 8.2.2 Calculs théoriques avec notre DEG

### Analyse Dimensionnelle :

On commence par une brève analyse dimensionnelle pour vérifier les unités de nos résultats.

$$C = \frac{[F.m^{-1}] * S.U.*m*m}{m} = \text{Farad} \quad (5) \text{ (Source : propre calcul)}$$

$$E = \frac{1}{2} * \text{Volt} * \text{Farad} * \left( \frac{\text{Farad}}{\text{Farad}} - 1 \right) = \text{Joule} \quad (6) \text{ (Source : propre calcul)}$$

### Pour un navire de 100 mètres et $V_{min} = 3000V$ :

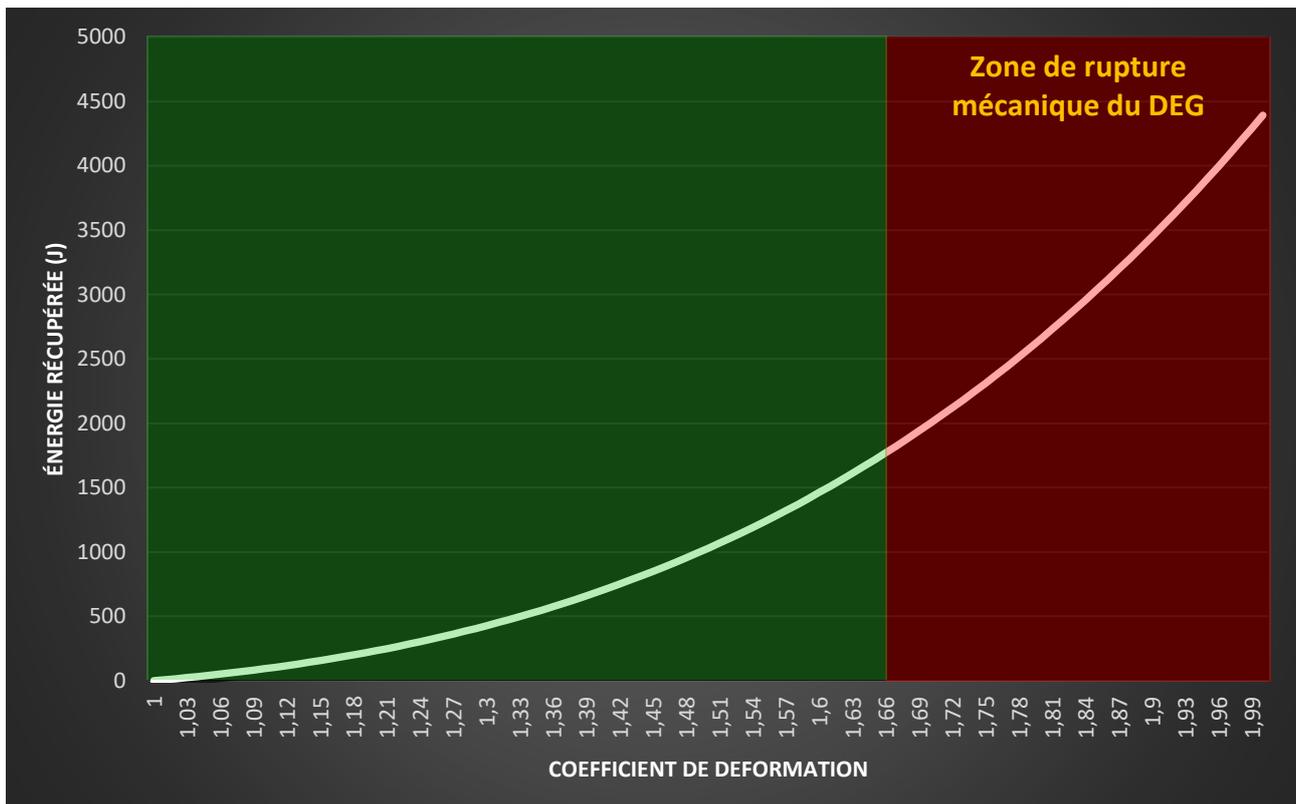
Tableau des résultats : Annexe 1.

Pour  $\lambda = 1.33$  :

$$E_S = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 497,913 \text{ J} \quad (4.1) \text{ (Source : propre calcul)}$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

$$E_S = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 1771,014 \text{ J} \quad (4.2) \text{ (Source : propre calcul)}$$



**Figure 20 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 100m / 3000V**  
 (Source : Propre travail)

**Pour un navire de 100 mètres et  $V_{min} = 6000V$  :**

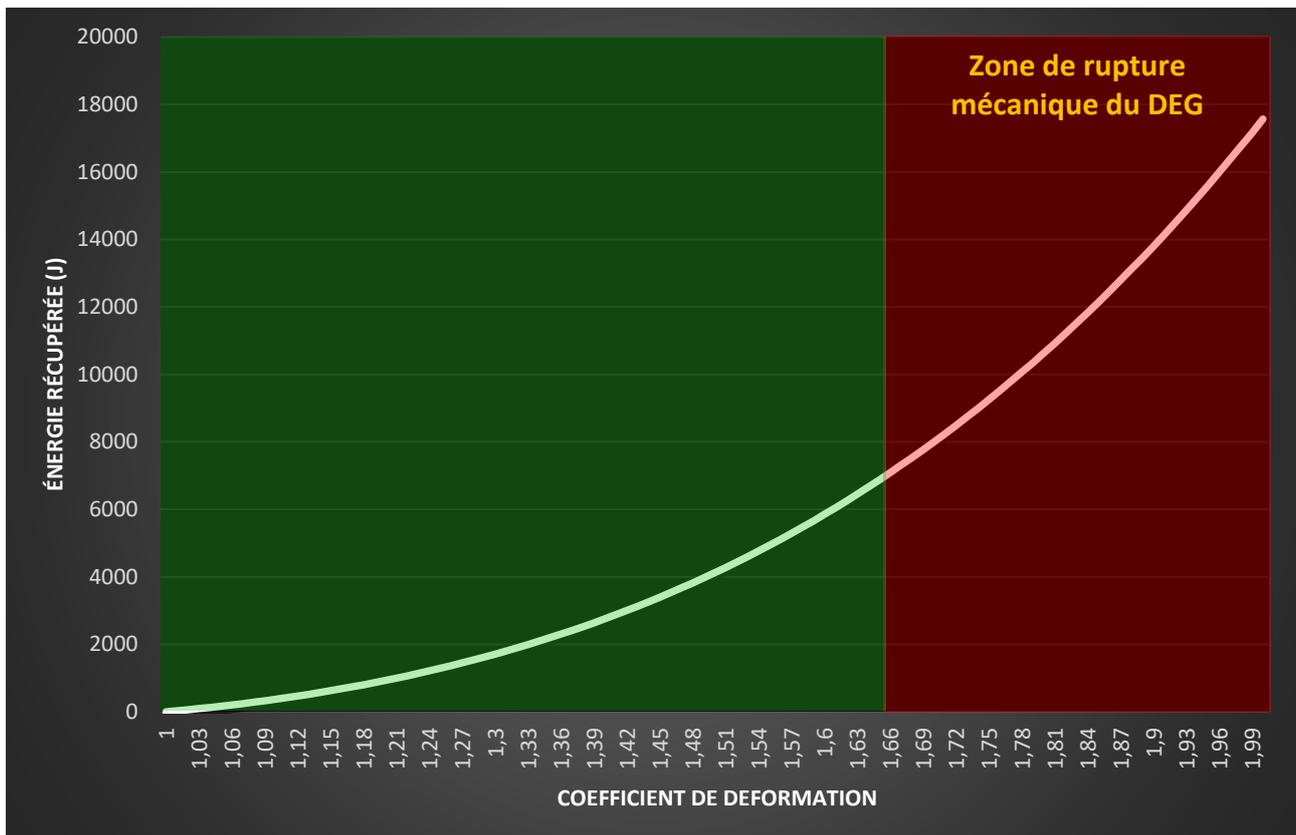
Tableau des résultats : Annexe 2.

Pour  $\lambda = 1.3$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 1991,652 \text{ J} \quad (4.3) \quad (\text{Source : propre calcul})$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 7084,057 \text{ J} \quad (4.4) \quad (\text{Source : propre calcul})$$



**Figure 21 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 100m / 6000V**  
 (Source : Propre travail)

**Pour un navire de 200 mètres et  $V_{min} = 3000V$  :**

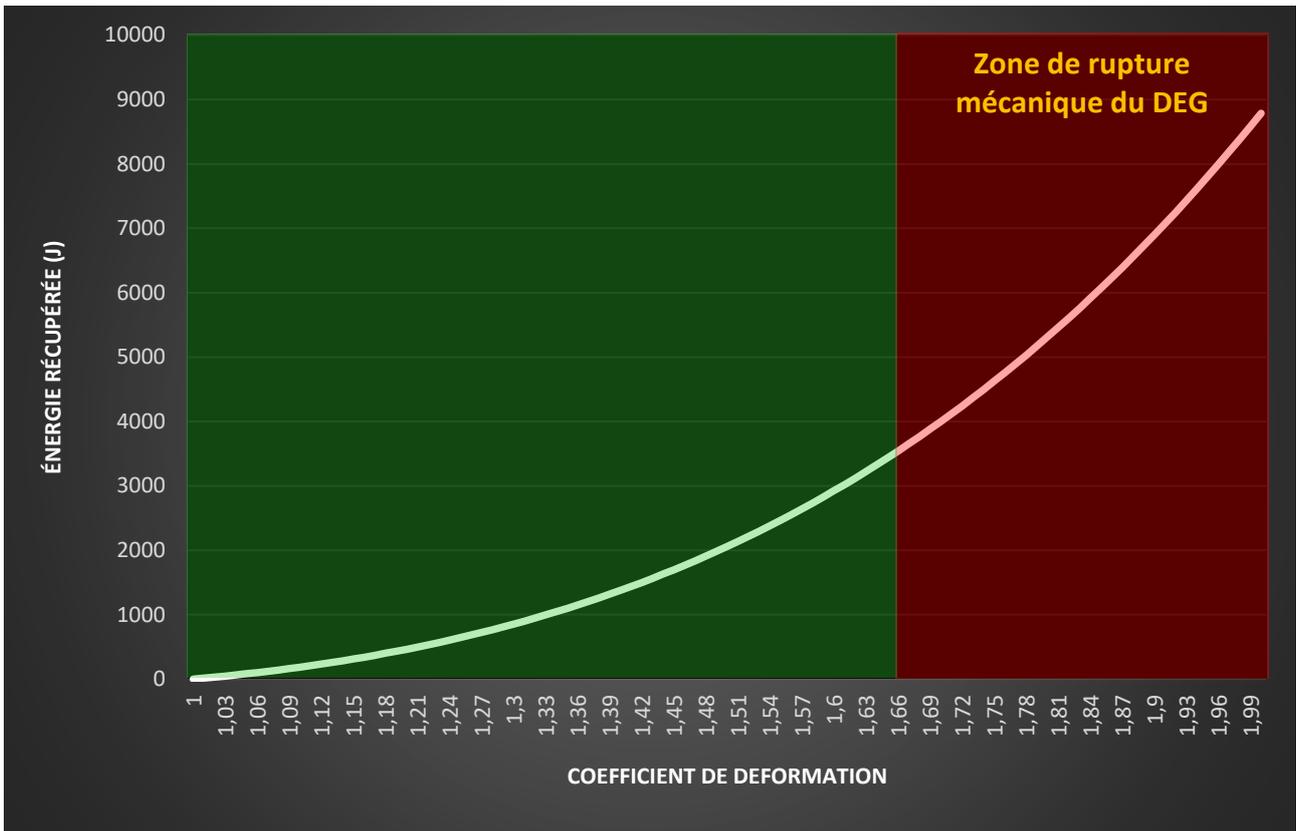
Tableau des résultats : Annexe 3.

Pour  $\lambda = 1.3$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 995,826 \text{ J} \quad (4.5) \quad (\text{Source : propre calcul})$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 3542,02875 \text{ J} \quad (4.6) \quad (\text{Source : propre calcul})$$



**Figure 22 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 200m / 3000V**  
 (Source : Propre travail)

**Pour un navire de 200 mètres et  $V_{min} = 6000V$  :**

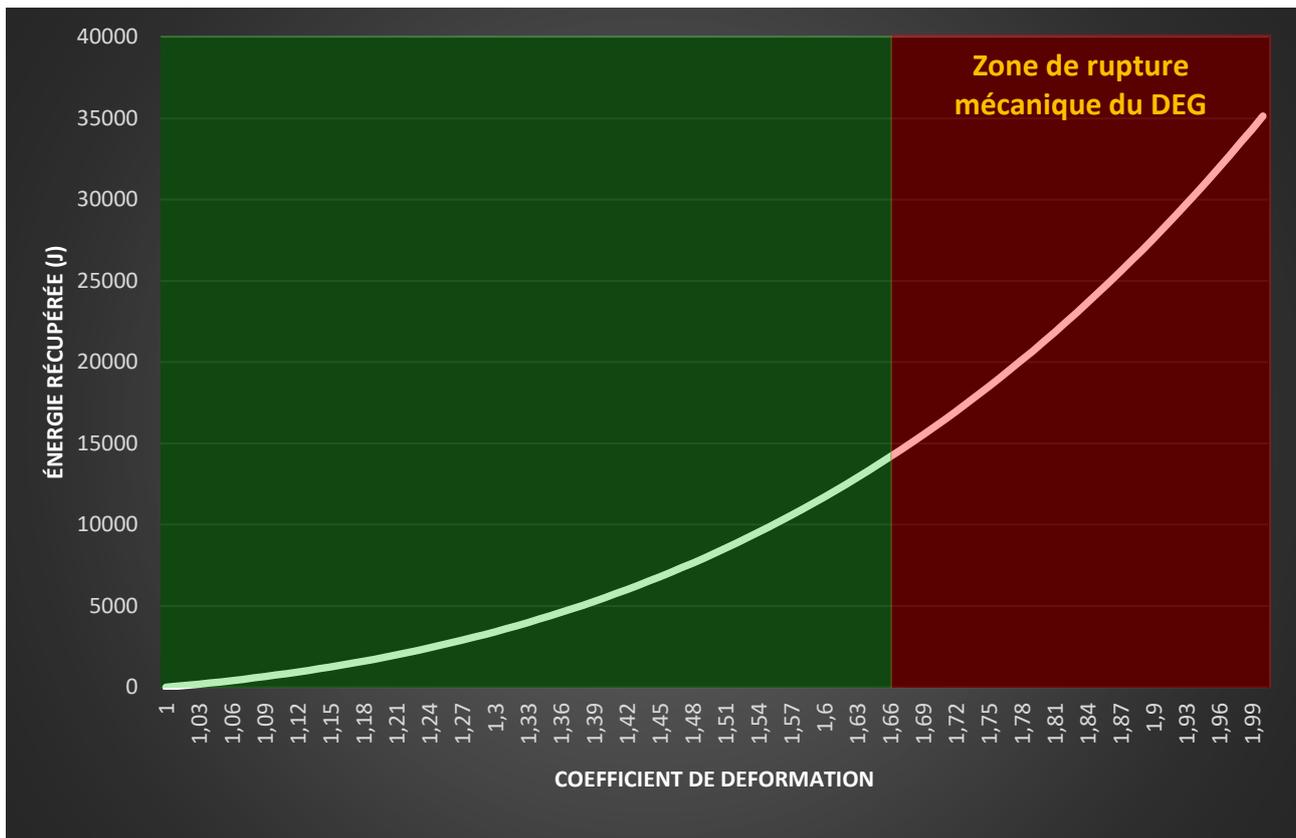
Tableau des résultats : Annexe 4.

Pour  $\lambda = 1.3$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 3983,304 \text{ J} \quad (4.7) \quad (\text{Source : propre calcul})$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 14168,115 \text{ J} \quad (4.8) \quad (\text{Source : propre calcul})$$



**Figure 23 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 200m / 6000V**  
 (Source : Propre travail)

**Pour un navire de 300 mètres et  $V_{min} = 3000V$  :**

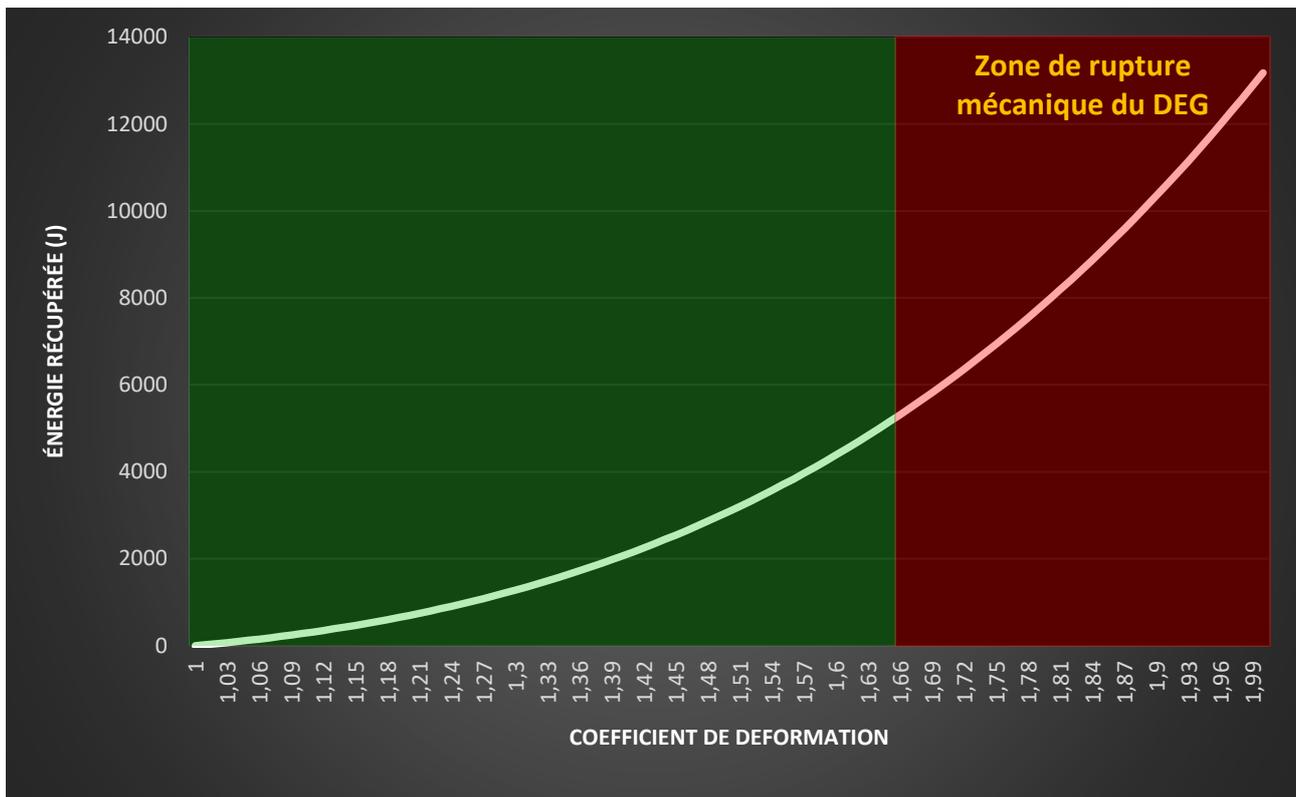
Tableau des résultats : Annexe 5.

Pour  $\lambda = 1.3$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 1493,739 \text{ J} \quad (4.9) \quad (\text{Source : propre calcul})$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 5313,043 \text{ J} \quad (4.10) \quad (\text{Source : propre calcul})$$



**Figure 24 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 300m / 3000V**  
 (Source : Propre travail)

**Pour un navire de 300 mètres et  $V_{min} = 6000V$  :**

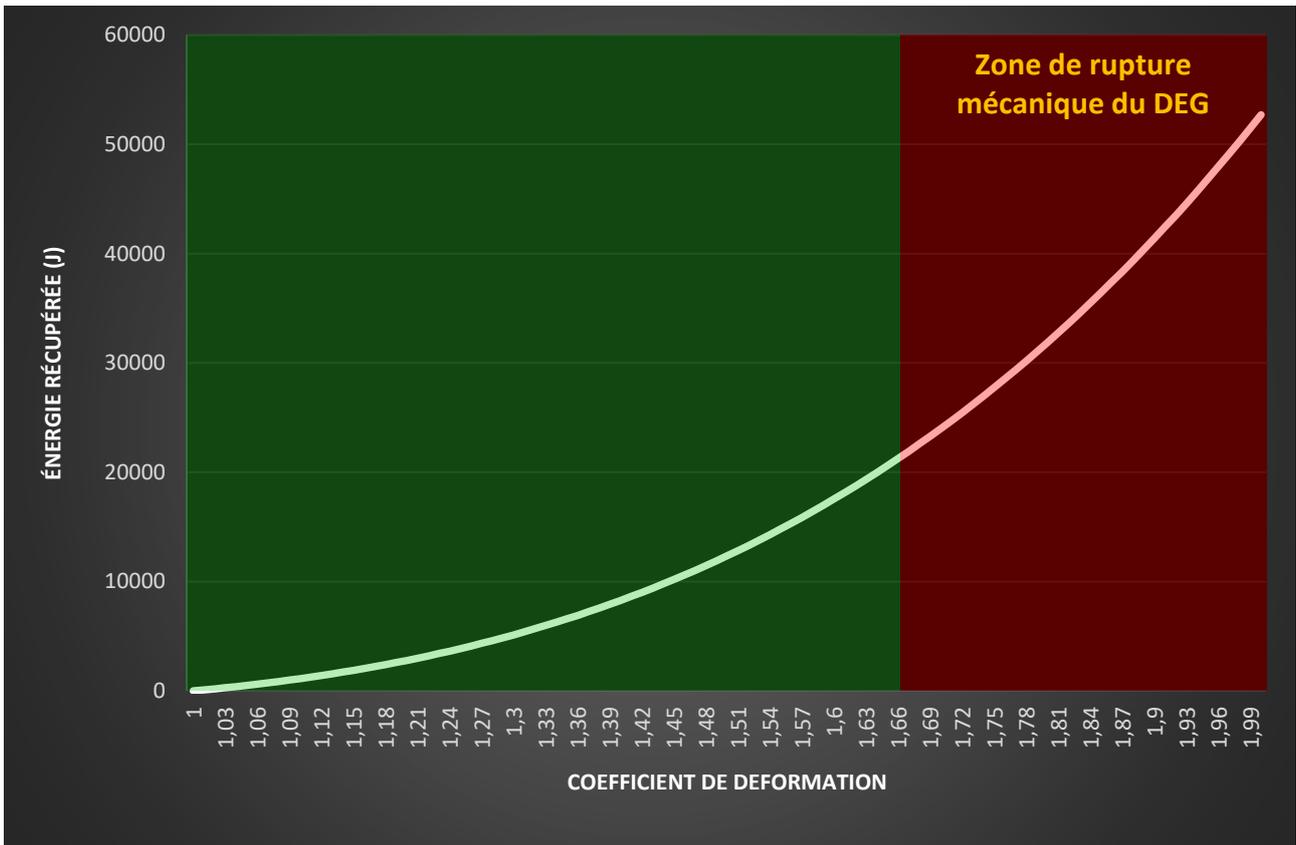
Tableau des résultats : Annexe 6.

Pour  $\lambda = 1.3$  :

$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 5974,956 \text{ J} \quad (4.11) \text{ (Source : propre calcul)}$$

Pour  $\lambda = 1.66$  :

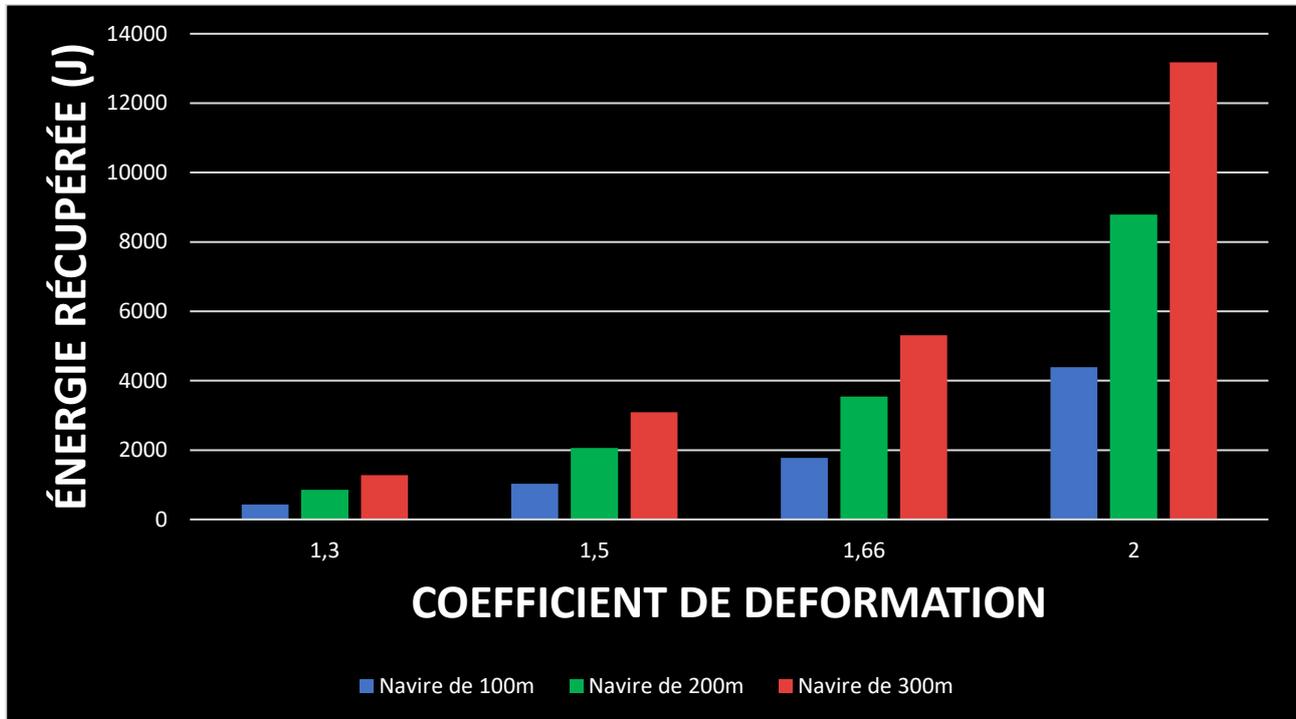
$$E_s = \frac{1}{2} * V_{min}^2 * C_{max} * \left( \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1 \right) = 21252,172 \text{ J} \quad (4.12) \text{ (Source : propre calcul)}$$



**Figure 25 : Énergie récupérée en fonction de la déformation du DEG - Navire de 300m / 6000V**  
 (Source : Propre travail)

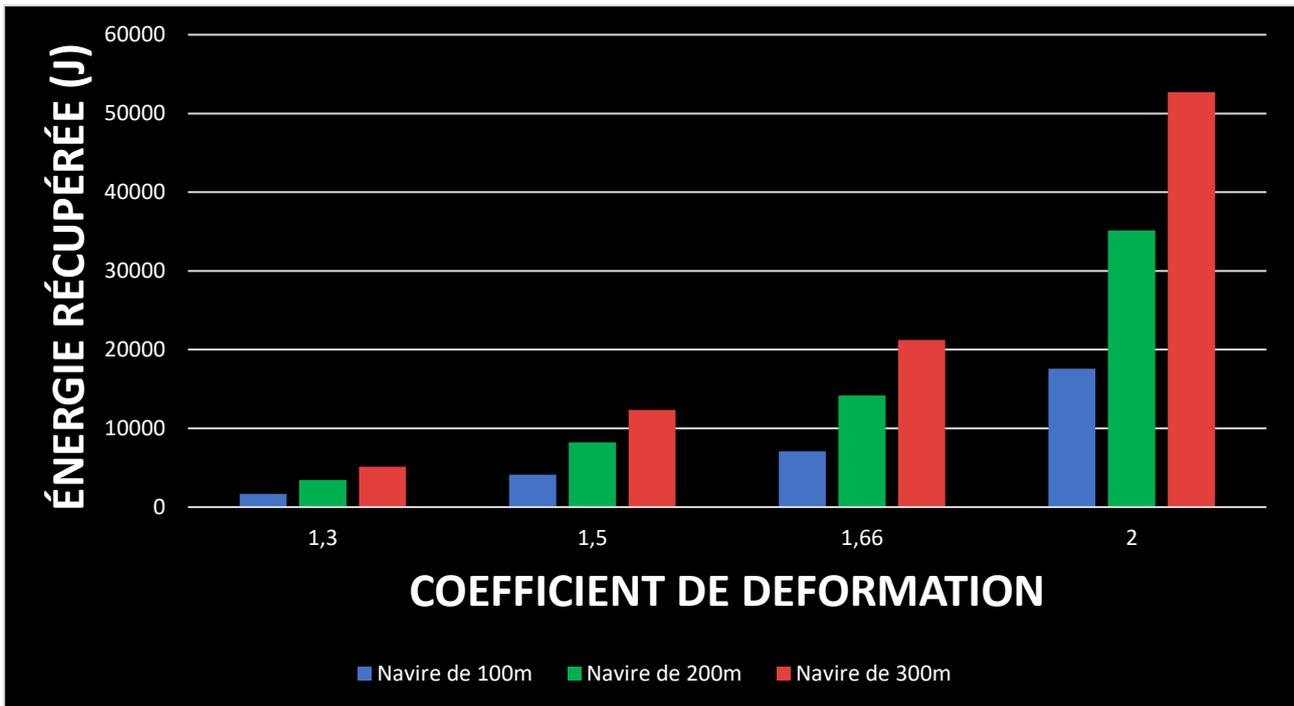
## Comparaison des résultats :

Avec  $V_{\min} = 3000 \text{ V}$  :



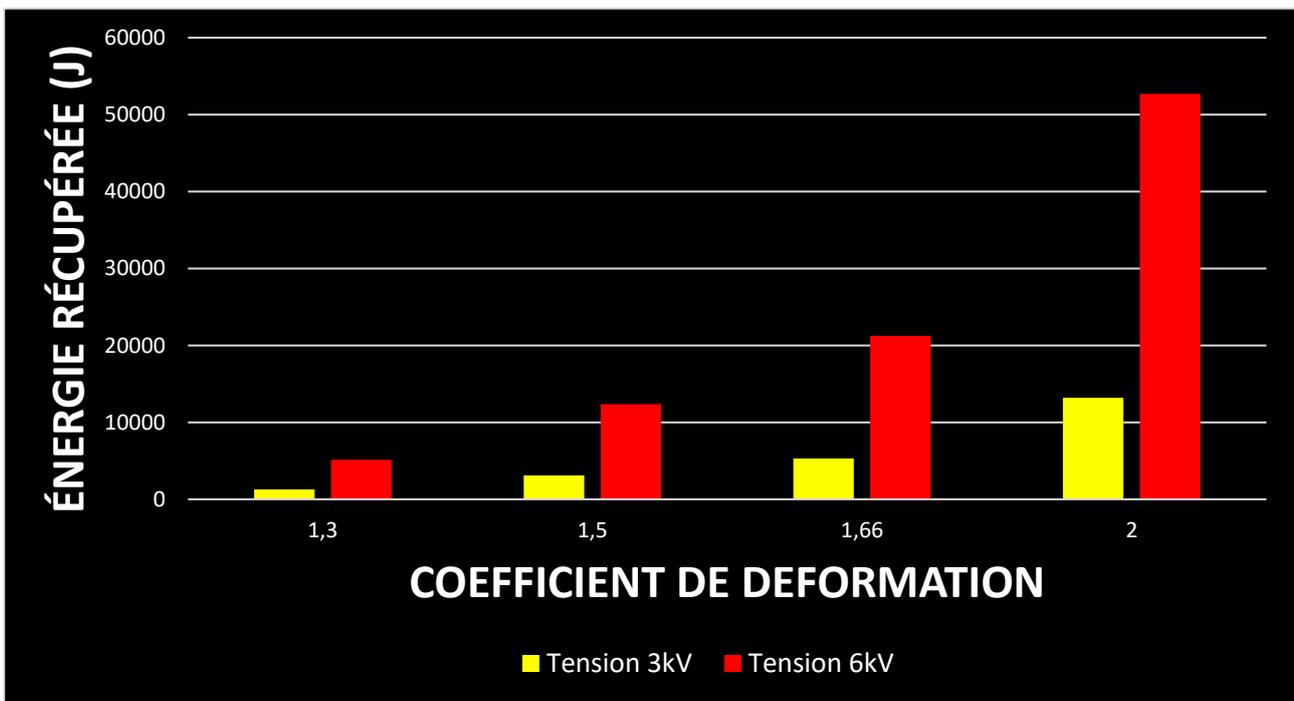
**Figure 26 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et de la taille du navire  
- Tension 3000V (Source : Propre travail)**

Avec  $V_{\min} = 6000 \text{ V}$  :



**Figure 27 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et de la taille du navire - Tension 6000V (Source : Propre travail)**

Comparaison entre tension de 3kV et 6kV :



**Figure 28 : Comparaison de l'énergie récupérée en fonction de la déformation et  $V_{\min}$  – Navire de 300m (Source : Propre travail)**

### 8.2.3 Discussion des résultats

Lorsque l'on observe les résultats de l'énergie récupérée en fonction du coefficient de déformation de notre DEG on remarque que les courbes obtenues ne sont pas linéaires. L'énergie théorique récupérée par le système est donc bien plus importante sur des déformations élevées que sur de faibles déformations. Par exemple, avec un  $\lambda$  de 1.3 et pour un navire de 300 m avec un  $V_{\min}$  de 3 kV, nous obtenons une récupération d'énergie de 1 493 Joules par cycle. Alors que pour un  $\lambda$  de 1.66, nous obtenons une récupération de 5 313 Joules par cycle.

On retiendra donc que le comportement de l'énergie récupérée en fonction du coefficient de déformation se rapproche d'un comportement exponentiel. Par conséquent, la capacité de déformation du système est une caractéristique très importante afin d'augmenter la quantité d'énergie récupérable. Si notre projet est un jour étudié, il faudra alors modifier notre polymère à l'aide de mixe ou d'additif pour augmenter sa capacité à se déformer.

Un autre résultat intéressant est l'impact de la taille du navire sur la quantité d'énergie récupérée. Comme nous avons pu l'observer sur les figures 26 et 27, la taille du navire va grandement influencer sur la quantité d'énergie récupérée. Par exemple, pour un coefficient  $\lambda$  de 2 et une tension  $V_{\min}$  de 6 kV, la différence d'énergie récupérée par cycle entre un navire de 300 m et un navire de 200 m est de 17 572 Joules. Pour ces mêmes conditions, la différence est d'autant plus impressionnante entre un navire de 300 m et navire de 100 m, celle-ci sera alors de 35 144 Joules par cycle.

En pratique ces résultats sont logiques car nous utilisons une plus grande surface de couche active. On retiendra alors que même si le coût d'installation du système sur de grands navires est plus important que sur de petits navires, la quantité d'énergie récupérée n'en sera que plus rentable.

Finalement, le point le plus important à retenir sera exposé sur la figure 28. On y observe la différence d'énergie récupérée entre deux systèmes aux caractéristiques identiques, mais dont la tension fournie est différente.

Rappelons-le encore, notre système n'est pas un générateur pur, l'énergie qu'il crée ne provient pas uniquement de la déformation mécanique qui lui est imposée. Il fonctionne comme un multiplicateur, l'énergie mécanique qu'il reçoit va permettre d'amplifier l'énergie qui lui est fournie. Cet effet de multiplication est très largement observable sur la figure 28, pour un navire de 300 m, avec un même coefficient de déformation ( $\lambda = 1.66$ ), la différence d'énergie récupérée entre une source de 3 kV et une source de 6 kV est de 15 939 Joules par cycle. Et les résultats sont exponentiels, pour une plus grande déformation ( $\lambda = 2$ ), la différence sera alors de 39 537 Joules.

Ces résultats théoriques sont très encourageants, cependant, il nous reste deux points importants à traiter dans les chapitres suivants. Tout d'abord dans les études de récupération d'énergie, il est courant d'exprimer les résultats en Joules, Watt-seconde (Ws) ou Watt-heure (Wh). Ces unités expriment toutes les trois l'énergie mais le Watt heure est très utilisé dans la littérature car il permet de mieux visualiser la quantité d'énergie récupérée dans le temps. C'est également l'unité la plus appropriée pour comparer les récupérations et les consommations d'énergie entre différents systèmes. C'est pourquoi nous allons convertir nos résultats en kilo Watt-heure (kWh) dans le prochain chapitre. Ensuite ces résultats théoriques sont très utiles afin de visualiser la quantité d'énergie récupérable d'un système tel que le nôtre. En revanche, il est nécessaire d'étudier des résultats issus d'expériences pratiques afin de soulever des aspects que l'on ne peut pas visualiser en théorie. C'est pourquoi nous allons maintenant observer des expériences qui ont été menées à très petites échelles.

### 8.3 Études Expérimentales réalisées

Le travail effectué précédemment représente des recherches purement théoriques établies avec les données qui étaient à notre disposition. Cependant, des études expérimentales à petite échelle ont été menées sur des récupérations d'énergie à l'aide de polymères électroactifs. Ces études vont donc nous aider à améliorer notre compréhension du fonctionnement de ces systèmes. Nous pourrons alors par la suite observer des phénomènes dont nous n'avons pas connaissance, en plus d'améliorer certains aspects de notre projet. Ces études vont également nous aider à améliorer la rentabilité économique de notre système car nous serons en mesure de comprendre les aspects qui influent sur le rendement. Même si les polymères étudiés sont différents du nôtre, les facteurs qui entrent en jeu resteront les mêmes.

Lorsque nous aurons bien compris tous les aspects qui influencent les résultats, nous serons alors en mesure de savoir quelles propriétés de notre polymère il faudra modifier pour en optimiser le rendement à l'avenir.

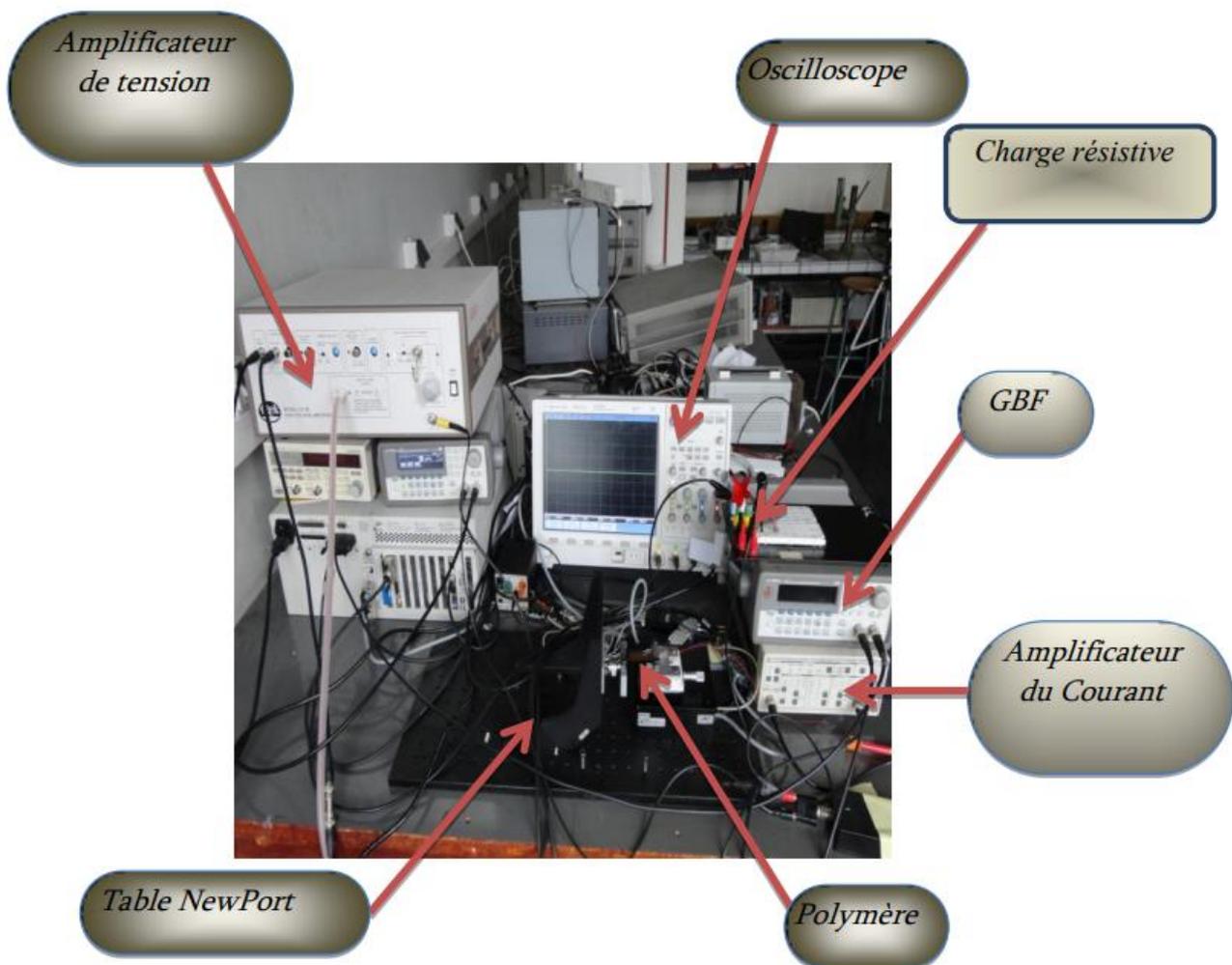
Pour mieux saisir les résultats de ces études il est important de comprendre les trois facteurs qui reviendront souvent : la rigidité électrique, la permittivité et la conductivité. La rigidité diélectrique représente notre champ de claquage. Comme nous l'avons déjà mentionné plus tôt, ce facteur représente le champ électrique maximal que peut supporter le polymère avant un court-circuit. La permittivité électrique quant à elle représente la capacité du polymère à accumuler des charges électriques. Et enfin la conductivité est la capacité du matériau à transférer ces charges qu'il a accumulé. Maintenant que nous avons rappelé la définition de ces facteurs nous allons à présent observer différentes études menées.

### 8.3.1 Composé de Polyuréthane

Pour cette étude un échantillon de polymère commercialisé par Estane est utilisé. Il est composé de l'élastomère 58887 TPU de la famille des polyuréthanes.

Similairement à notre projet, l'échantillon utilisé est d'une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$ , et la rigidité diélectrique est quasiment identique. La grande différence avec notre DEG est sa capacité à déformer mécaniquement (allongement de rupture de 640 %).

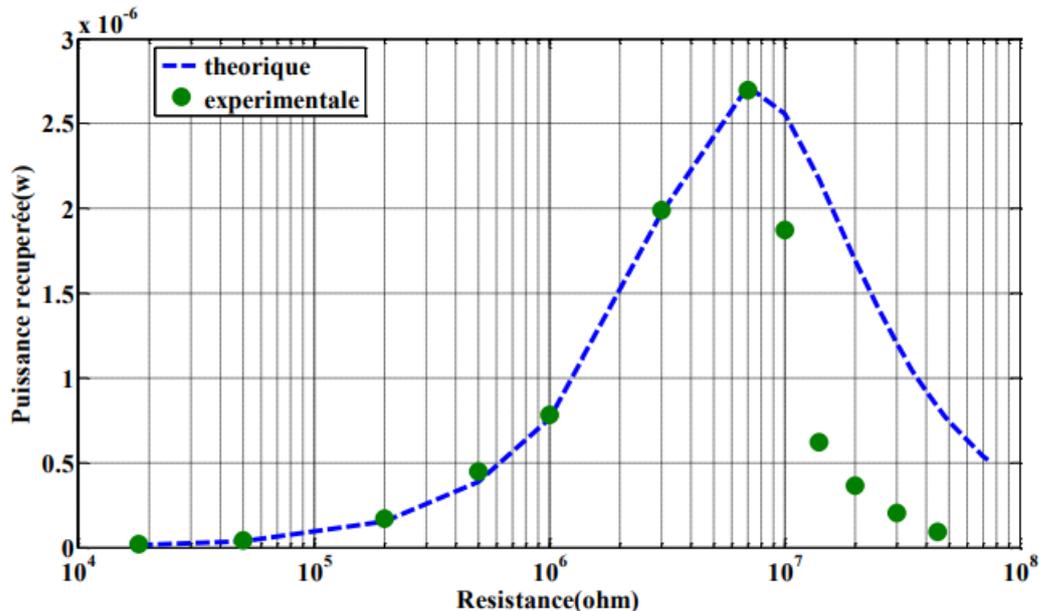
Voici à quoi ressemble le banc d'essai de cette étude :



**Figure 29 : Installation expérimentale de l'étude [13]**

Le polymère étudié est monté sur un support avec une partie fixe et une partie mobile. La déformation ne se fait qu'horizontalement et ce à l'aide d'un moteur linéaire. L'amplitude de déformation est de 0.5 % à 15 Hz. La mesure du courant généré se fait à l'aide d'un amplificateur de courant et la puissance récupérée est calculée par la formule  $P=RI^2$ . [4]

Voici les résultats obtenus :

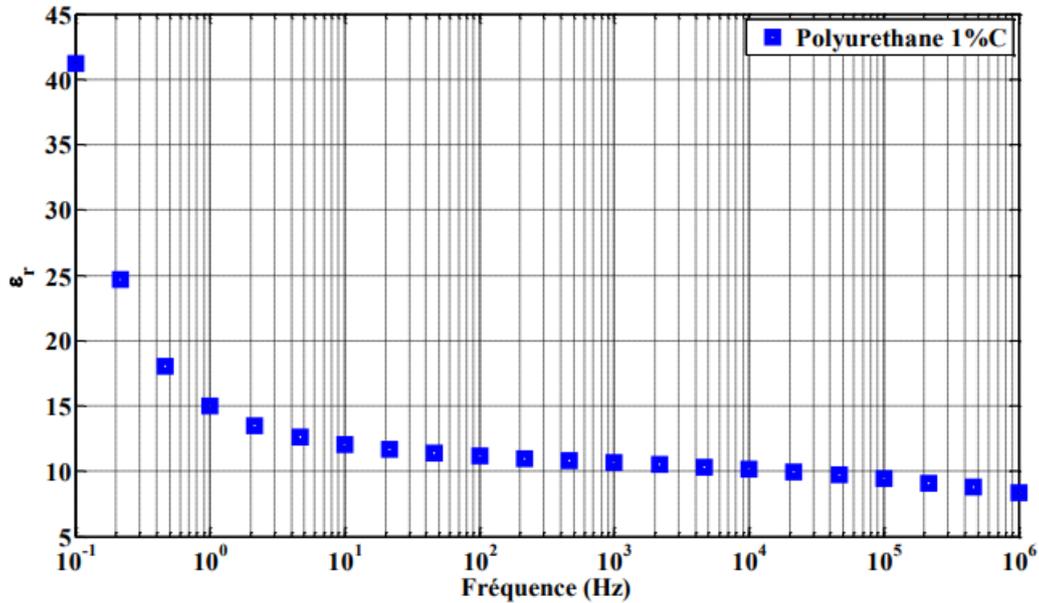


**Figure 30 : Puissance récupérée théorique & expérimentale en fonction de la résistance [13]**

On note sur cette première figure une différence entre la puissance récupérée espérée théoriquement et la puissance réelle récupérée. Nous avons déjà parlé de ce phénomène plus tôt dans ce mémoire et il s'agit des pertes électriques dues au polymère lui-même.

On retiendra pour notre projet qu'à partir d'une certaine résistance la puissance récupérée sera perdue en chaleur et en pertes diélectriques. Il sera donc important de tester notre système sur ces aspects.

De plus, il faut noter que la résistance est une composante importante dans la récupération de puissance. En effet, l'augmentation de celle-ci est liée à la quantité d'énergie récupérée. Il sera alors important d'effectuer une étude sur la résistance optimale de notre matériau afin d'optimiser la puissance récupérée du système.



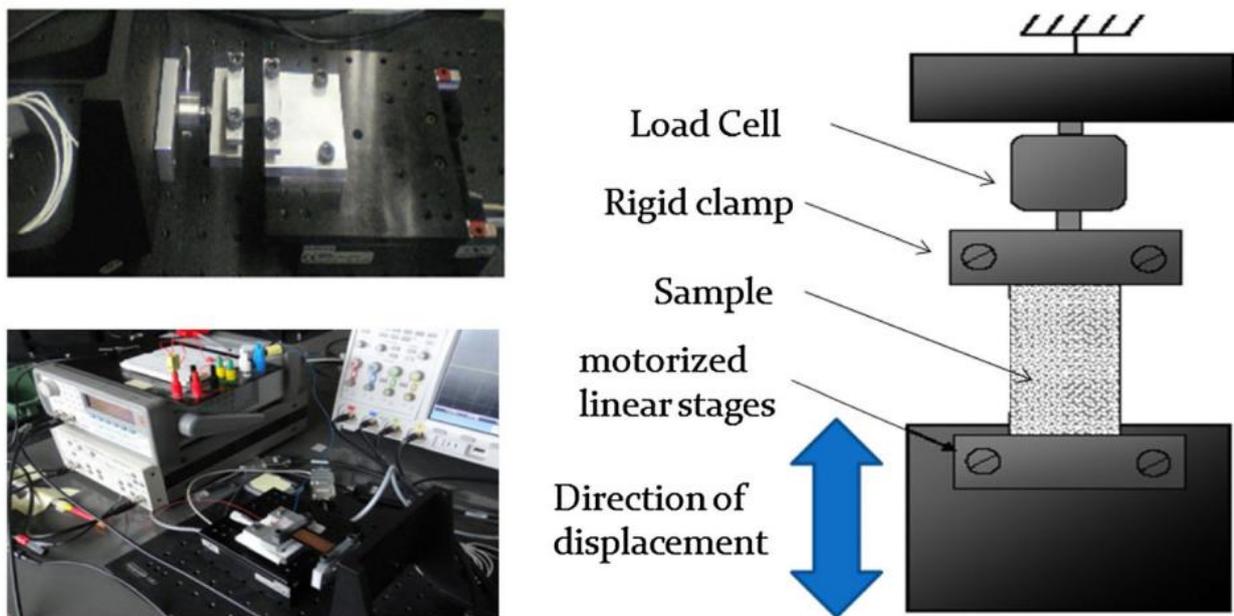
**Figure 31 : Influence de la fréquence sur la permittivité diélectrique [13]**

On observe sur cette figure que la fréquence a un impact sur la permittivité diélectrique du polymère. Entre 0.1 et 1 Hz on peut lire une très grande réduction de la permittivité diélectrique, puis, qu'elle se stabilise sur une très grande bande de fréquence.

Cette donnée est alors très importante et à prendre en compte pour notre projet. Elle signifie deux choses. Tout d'abord il sera important d'étudier la fréquence créée par les vagues sur notre système. Puis il faudra étudier le comportement de notre polymère face à la fréquence. Si le comportement est similaire et si la fréquence créée par les vagues est trop élevée, alors nous aurons une diminution de la capacité de notre matériau à accumuler les charges électriques.

### 8.3.2 Polymère P(VDF-TrFE-CFE)

Dans cette étude, l'échantillon étudié est le P(VDF-TrFE-CFE), pour cette expérience il sera maintenu entre deux mords mécaniques dont l'un est statique et l'autre mobile. Pour le mouvement, un moteur linéaire est une fois de plus utilisé. Il faut noter que les électrodes utilisées sont en or, ce type d'électrode possède une conductivité optimale, mais n'est pas utilisable dans le cadre du projet de notre mémoire à cause de sa faible capacité de déformation. En revanche, ces électrodes sont très utiles pour mener ce genre d'expérience en laboratoire. On notera également que l'épaisseur des matériaux testés est encore de 50  $\mu\text{m}$ . Voici une illustration de l'expérimentation :



**Figure 32 : Illustration de l'expérience [14]**

L'objectif de l'étude était ici de démontrer que les matériaux les plus prometteurs en termes de récupération d'énergie mécanique sont les polymères électroactifs.

L'expérience menée dans cet article étudie un composite de polymère électrostrictif nommé P(VDF-TrFE-CFE). Ils espèrent également réussir à optimiser la puissance récoltée par celui-ci.

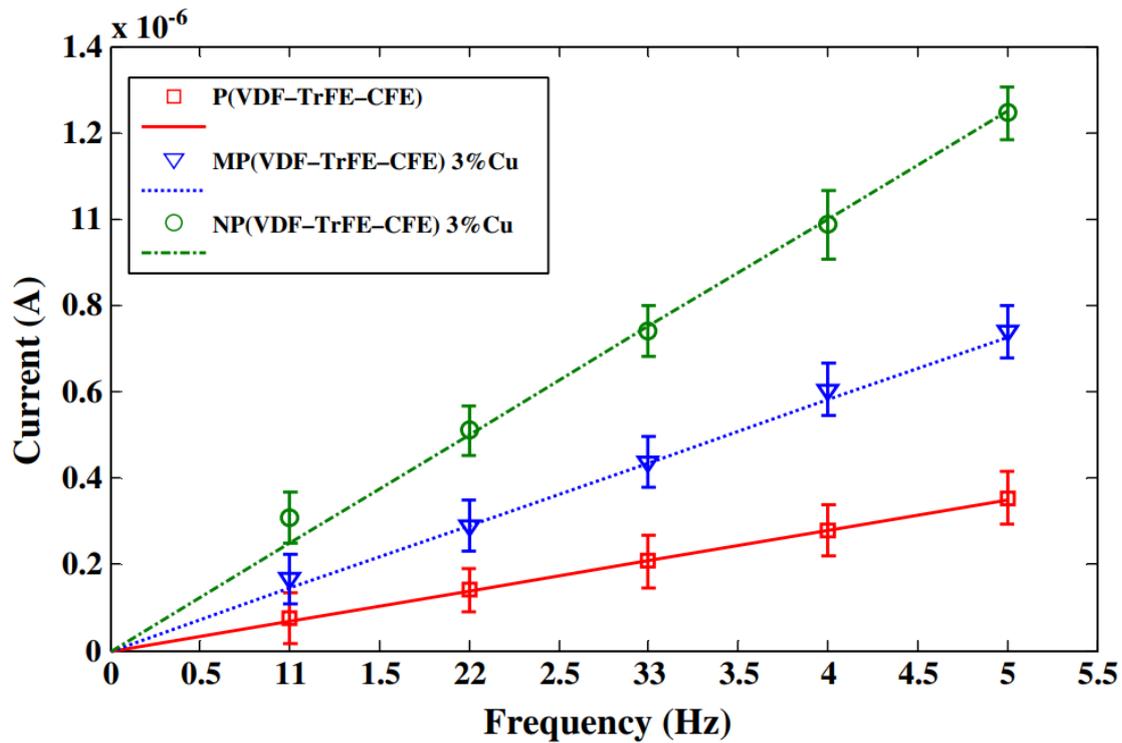
Pour ce faire, l'étude rappelle que la permittivité diélectrique est primordiale pour la capacité de transduction mécanique d'un polymère. Et donc que si l'on cherche à augmenter la quantité d'énergie récupérée il est important d'augmenter la permittivité diélectrique du matériau utilisé.

Cette information est très utile si l'on veut augmenter le rendement de notre projet, mais on y apprend surtout une information primordiale : il est possible d'augmenter la permittivité d'un polymère en y ajoutant un additif. « Gallone et al. have demonstrated that it was possible to obtain a fourfold increase in permittivity of a silicone elastomer at 10 Hz by charging the material with 30 vol.% lead magnesium niobate–diacrylate » [5].

Si on se réfère au chapitre précédent (chapitre 7), on sait que le matériau que nous avons sélectionné est très intéressant pour l'utilisation que nous voulons en faire. Cependant, son défaut était une permittivité trop faible. Nous avons alors trouvé une façon de palier à ce problème. De plus, les recherches sur les mixes de polymères semblent être une innovation de grand intérêt pour les systèmes tels que le nôtre.

Nous allons maintenant étudier les résultats de l'expérience menée avec le P(VDF-TrFE-CFE), dont les caractéristiques ont été comparées aux MP(VDF-TrFE-CFE) et NP(VDF-TrFE-CFE). Le MP(VDF-TrFE-CFE) correspond au composite P(VDF-TrFE-CFE) auquel on a rajouté un additif de micropoudre de cuivre et le NP(VDF-TrFE-CFE) correspond à l'ajout d'un additif de nanopoudre de cuivre.

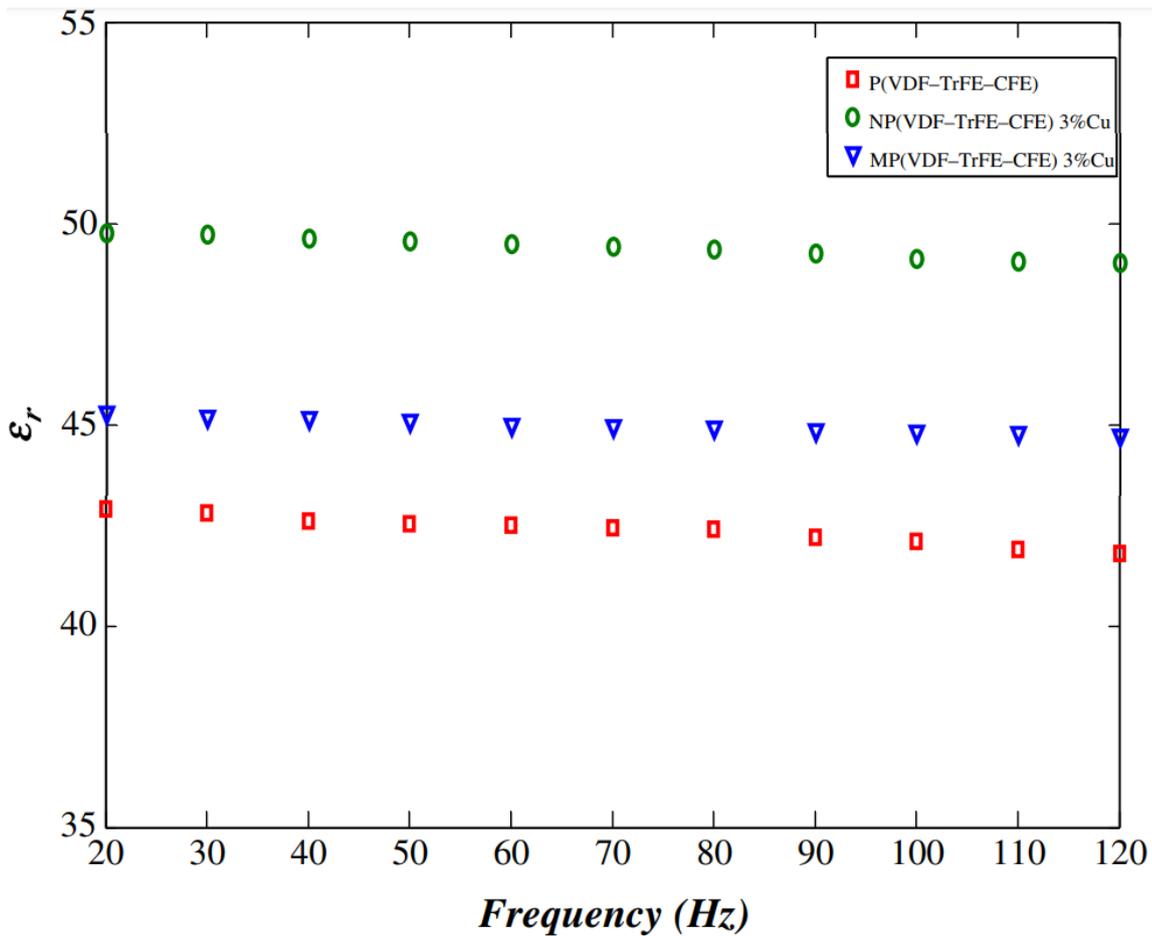
Voici les résultats observés :



**Figure 33 : Comparaison du courant récupéré en fonction de la fréquence et des matériaux utilisés**

[14]

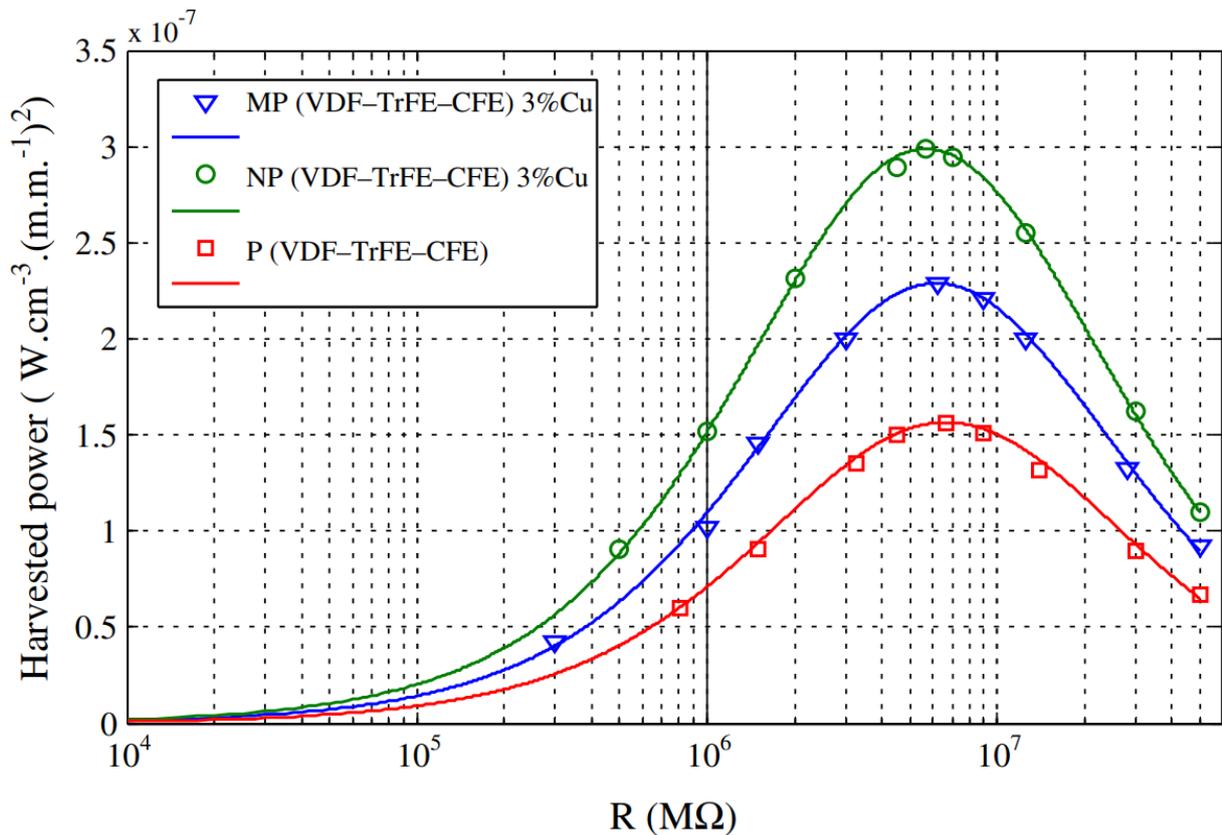
Sur cette première figure on peut observer la différence de courant récupéré entre le polymère de base et ses versions améliorées. Il apparaît de façon évidente que la quantité de courant récupéré est significativement plus élevée chez les versions qui contiennent l'additif de cuivre. De plus, le composite contenant de la nanopoudre de cuivre offre de loin les meilleurs résultats.



**Figure 34 : Comparaison de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence et des matériaux utilisés [14]**

Cette seconde figure compare la permittivité diélectrique des trois matériaux en fonction de la fréquence. Tout comme la figure précédente, on peut facilement lire que le matériau composé de nanopoudre de cuivre offre une permittivité supérieure aux autres composites.

Les figures 33 et 34 montrent un courant récupéré plus élevé ainsi qu'une meilleure permittivité, ce qui va donc se traduire par une puissance récupérée plus élevée, comme le montre ce graphique :



**Figure 35 : Comparaison de la puissance récupérée en fonction de la résistance et des matériaux utilisés [14]**

On peut alors confirmer plusieurs points qui vont nous être utiles pour notre projet. L'ajout d'additif à notre polymère est un facteur essentiel pour augmenter la quantité d'énergie récupérée. On peut lire sur la figure précédente que l'ajout de nanopoudre de cuivre offre des résultats supérieurs au composite de base ainsi qu'à l'additif en micropoudre de cuivre. De plus, on observe à nouveau le phénomène exposé dans l'expérience précédente (chapitre 8.3.1), avec la résistance optimale qui offre la plus grande puissance récupérée.

Cette étude nous aura donc montré que l'on peut améliorer le courant récupéré et la permittivité de notre matériau en y ajoutant un additif adéquat. On aura également appris que l'additif en nanopoudre de cuivre offre de meilleurs résultats que l'additif en micropoudre. Ces résultats se sont traduits par une augmentation de la puissance récupérée, ce qui prouve que cette solution est très prometteuse dans le cadre de notre projet. Il sera alors essentiel d'étudier à l'avenir l'ajout d'additifs à notre matériau afin d'augmenter le rendement de notre système.

# Chapitre 9

## Étude économique

### 9.1 Calcul des coûts

Le système de récupération d'énergie que nous imaginons dans ce mémoire ne sera intéressant pour les compagnies maritimes seulement si sa rentabilité économique est prouvée. Il va donc falloir prendre en compte deux facteurs, le coût total du système et la rentabilité qu'il va offrir. Pour cette étude, nous nous baserons sur un prototype à installer sur un navire de 300 mètres de long et 50 mètres de large. Les dimensions du système seront donc de 300 m de long sur 2 m de large et 52  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

On va alors commencer par calculer le coût total du système, pour cela, nous allons additionner le coût des différents matériaux nécessaires à sa réalisation. Puis, il nous faudra rajouter les coûts supplémentaires tels que la manufacture, l'installation du système sur le navire et la maintenance de celui-ci.

Résumons les matériaux dont nous allons avoir besoin pour réaliser notre système :

**Le polymère électroactif :** Notre choix initial est porté sur le Sylgard 184 produit par la compagnie DOW Corning. Pour faciliter le calcul des coûts nous établirons une utilisation pure de ce DEG. C'est-à-dire composé à 100 % du Sylgard 184.

Dans la pratique, il devra en être autrement, si nous voulons atteindre un rendement optimal il faudra utiliser un mixe entre plusieurs polymères avec l'ajout d'additifs. Cependant, il n'existe pas de tel mélange à ce jour car aucune étude n'a été réalisée pour répondre précisément à nos attentes. Il faudra alors prendre en compte un coût supplémentaire de recherche pour réaliser le DEG optimal qui répondra aux attentes précises de notre système.

L'utilisation pure du Sylgard 184 reste la meilleure option pour un premier prototype et pour en calculer le coût de production. On gardera en tête que les rendements obtenus pourront être grandement améliorés.

En ce qui concerne la quantité à utiliser de Sylgard 184, il va falloir faire quelques calculs. On considère quatre rectangles, deux pour les longueurs (bâbord et tribord) et deux pour les largeurs (avant et arrière).

Ce qui nous donne un volume correspondant de :

	Formule	Un côté	Deux côtés
Volume longueur	300m * 2m * 52 µm	0.0312 m3	0,0624 m3
Volume largeur	50m * 2m * 52 µm	0.0052 m3	0,0104 m3

**Tableau 3 : Calcul volume Sylgard 184 (Source : Propre travail)**

En additionnant les volumes des deux côtés pour la longueur et la largeur, on obtient un volume total de 0.0728 m<sup>3</sup>.

La densité du Sylgard 184 a été calculée de 0.982 g / ml. **[18]**

Pour déterminer la masse volumique il va falloir convertir notre volume total en millilitres. On sait qu'un mètre cube est égal à 1000 Litres.

Donc 0.0728 m<sup>3</sup> = 72,8 L = 72 800 ml.

Ensuite il faut calculer la quantité de Sylgard 184 à utiliser. N'ayant pas la même densité que l'eau il va falloir faire un autre calcul :

$$Masse\ Volumique = \frac{Masse}{Volume} \quad (7)$$

Donc :

$$Masse_{Syl184} = Masse\ Volumique_{Syl184} * Volume \quad (7.1)$$

$$Masse_{Syl184} = 0.982 \frac{g}{mL} * 72\,800\, mL \quad (7.2)$$

$$Masse_{Syl184} = 71\,489,6\, g \quad (\text{Source : Propre travail})$$

Pour notre projet nous aurons alors besoin d'une quantité de Sylgard 184 de 71 489,6 grammes.

Le prix de cet élastomère diélectrique, commandé à petite échelle, sans remise professionnelle, est de 0.20 € le gramme. (Source : Annexe 7)

Le prix total est donc de 14 297,92 €.

**Electrodes :** Comme nous en avons déjà discuté lors du chapitre dédié aux électrodes, ces éléments sont primordiaux. Sans elles, le système ne peut pas fonctionner et leurs qualités vont directement influencer sur le rendement énergétique. Tout comme le Sylgard 184, il va falloir ici aussi calculer la quantité nécessaire au système. On rappellera que les électrodes doivent prendre en sandwich la couche active, c'est-à-dire que le CW7100 doit couvrir au-dessus et en dessous toute la surface du DEG. Donc pour calculer le volume on prendra les mêmes longueurs et largeurs. En revanche pour l'épaisseur, la plupart des études prennent moins de la moitié de l'épaisseur de la couche active.

Le volume sera alors calculé pour les mesures suivantes : 300 m de long, 2 m de large et 20 µm d'épaisseur.

	Formule	Un côté	Pour une électrode : Deux côtés	Pour deux électrodes : Deux côtés
Volume longueur	300m * 2m * 20 µm	0,012 m3	0,024 m3	0,048 m3
Volume largeur	50m * 2m * 20 µm	0,002 m3	0,004 m3	0,008 m3

**Tableau 4 : Calcul volume électrodes (Source : Propre travail)**

En additionnant les volumes des deux côtés pour la longueur et la largeur pour deux couches d'électrodes, on obtient un volume total de 0.056 m<sup>3</sup>. Volume qui correspond à 56 000 ml.

En ce qui concerne sa densité, la datasheet du CW7100 précise qu'elle est égale à 2.5 fois la densité de l'eau [19].

La densité de l'eau étant de 1 g / ml, le CW7100 aura donc une densité de 2.5 g / ml.

On va alors pouvoir déduire la quantité de CW7100 nécessaire pour le volume total que l'on vient de calculer :

$$Masse_{CW7100} = Masse\ Volumique_{CW7100} * Volume \quad (7.3)$$

$$Masse_{CW7100} = 2.5 \frac{g}{mL} * 56000 mL \quad (7.4)$$

$$Masse_{CW7100} = 140\ 000\ g \quad (Source : Propre travail)$$

Pour notre projet, nous aurons donc besoin d'une quantité de CW7100 de 140 000 grammes.

Le prix de cette graisse carbonée, sans remise, est de 0.66 € le gramme.

(Source : Annexe 7)

Le prix total est donc de 92 400 €.

Ce prix est beaucoup trop élevé car nous utilisons le prix vendu aux particuliers en lots de très petites quantités (seringue à l'unité de 6,5 g). Cette valeur n'est pas du tout représentative de la réalité. Pour une commande aussi importante que la nôtre, nous bénéficierions d'un prix beaucoup plus bas.

Comme il est impossible de trouver le prix de vente pour de grosses quantités, nous allons alors utiliser une graisse concurrente. La graisse conductive carbonée

premium 8481 de MG Chemical est une électrode similaire au CW7100 et est largement utilisée dans la littérature concernant l'utilisation des élastomères diélectriques. Nous allons l'utiliser pour calculer le coût de notre système car nous avons accès à son prix industriel, qui est de 756,768 € par pot de 4,125 kg. Cette étude économique ayant pour but de se rapprocher d'une estimation réelle, l'utilisation de cette électrode semble plus pertinente.

La densité du 8481 est bien plus faible que celle du CW100 (1.1 g/ml contre 2.5 g/ml).

$$Masse_{8481} = Masse\ Volumique_{8481} * Volume \quad (7.5)$$

$$Masse_{8481} = 1.1 \frac{g}{mL} * 56000 mL \quad (7.6)$$

$$Masse_{8481} = 61\ 600g \quad (\text{Source : Propre travail})$$

Il nous faudra alors 15 pots de 4.125 kg. (Source : Annexe 7)

Le prix total pour cette graisse carbonée vendue à un particulier ne serait donc que de 11 351,52 €.

**Boudin Pneumatique :** Le choix du boudin pneumatique qui enveloppera notre système est très important, il faudra sélectionner une matière qui résistera aux chocs du quai ou d'autres navires, il lui faudra résister aux attaques de la vie marine (algues) ainsi qu'aux UV. Il ne faudra donc pas essayer d'économiser sur ce matériau car il va grandement aider à améliorer la durée de vie de notre système. Le polyéthylène chlorosulfoné répond parfaitement à nos attentes, initialement commercialisé par l'entreprise américaine Dupont, il a été baptisé Hypalon. Nécessitant une main d'œuvre qualifiée car ses collages à froid sont réalisés à la main ce matériau sera plus coûteux qu'un simple PVC. En revanche il peut tenir en mer jusqu'à 25 ans, il est très résistant aux UV, aux hydrocarbures et aux températures extrêmes. Il résiste aux pliages, aux chocs, aux frottements et à l'abrasion. De plus, en cas de dégâts, il peut se réparer simplement avec une colle à froid.

Le prix est de 18.15 € au mètre carré, sachant que nous aurons besoin d'une longueur de 700 m sur deux mètres de large, nous obtenons donc 1400 m<sup>2</sup> de matériau nécessaire. (Source : Annexe 7)

Sur les conditions de vente à un particulier, et donc avec des prix supérieurs à la réalité, nous estimons alors un coût total de 25 410 €.

### **Coûts supplémentaires incalculables actuellement :**

**Câbles de connexion :** Dans le cours d'électrotechnique nous avons vu que le câblage en haute tension est très important à bord. On a appris que certains câbles sont liés à des fonctions de sécurité du navire (détection du feu, communications, pompes d'incendie, etc.). Ils doivent alors répondre à des exigences précises.

Dans notre cas, ces câbles vont assurer une fonction auxiliaire, leurs propriétés seront alors moins rigoureuses, mais il faudra quand même respecter certaines règles de haute tension. Pour ce faire, ils doivent être installés avec une longueur continue et une section suffisante. Nos câbles vont raccorder le système extérieur à l'intérieur du navire, il faudra donc prendre en compte quelques aspects. Par exemple, une faible émission de fumée, une faible toxicité, une résistance aux UV et une résistance à la vie marine. De plus, dans le cas idéal où le système fonctionne en 6 000 Volts, l'utilisation d'un câble de raccordement entraînera un risque inévitable d'échauffement dû à la résistance. Le choix de la section de celui-ci sera alors très important. Mais nous ne pouvons pas encore calculer précisément ce paramètre, car il nous manque des données que nous n'avons pas encore. Tels que l'angle de déphasage entre le courant absorbé et la tension, la chute de tension et le courant de court-circuit.

En ce qui concerne les longueurs des câbles, on prendra une moyenne de 30 m de hauteur entre le système et le pont. Et 50 m de longueur entre le pont et la salle des machines.

**Manufacture :** Nous avons calculé théoriquement l'énergie récupérée pour le Sylgard 184 pur, mais si un jour un tel système est développé, un mix d'élastomère diélectrique sera nécessaire. De plus, il faudra également étudier les bons additifs à rajouter (comme la nanopoudre de cuivre). L'étude d'un tel DEG ainsi que sa réalisation auront donc un coût de recherche et développement supplémentaire à prendre en compte. De plus, il faudra embaucher un personnel spécialisé et qualifié pour ce type de recherche, ce qui amènera de nouveau à un coût additionnel.

En addition à un tel système, il faudra compter l'ajout d'un circuit de commande et un circuit de puissance, incluant des disjoncteurs et protections adaptés. De l'électronique de puissance sera également nécessaire pour améliorer les rendements. Mais il est encore trop tôt pour déterminer quels seront nos besoins.

**Installation :** Une fois construit l'installation se doit d'être simple et réalisable sur tout type de navire. Pour ce faire il faudra donc payer une main d'œuvre qualifiée qui a connaissance de notre système. De plus, un ou plusieurs navires de support seront nécessaires pour cette installation. Ce qui représente un autre coût supplémentaire.

**Maintenance :** L'avantage de ce système est qu'il ne nécessite théoriquement aucune maintenance. Cependant, en cas de collision avec un quai ou un autre navire, notre système pourrait être sévèrement endommagé. Il faudra alors prévoir un potentiel coût de maintenance.

En additionnant toutes les valeurs que nous aurons pu calculer, nous arrivons à une estimation moyenne du coût total du système de 51 059,44 €.

Bien évidemment le coût réel du système sera plus élevé car il manque certains coûts supplémentaires. Ce chiffre n'est qu'une moyenne pour nous aider à estimer la rentabilité d'un tel projet.

## 9.2 Calcul de rentabilité

Pour calculer si notre système est rentable, il va falloir comparer les coûts et les bénéfices qu'il offre. Nous venons de faire une estimation à la hausse des coûts de notre système. C'est-à-dire que nous avons tout calculé comme si nous étions un particulier, sans aucunes remises et en commandant par petites quantités.

On va donc maintenant calculer les bénéfices possibles de notre système. Pour ce faire, on va commencer par convertir la puissance récupérée en kilo Watt-heure (kWh). Cette unité est la plus répandue dans les recherches scientifiques quand il s'agit de comparer ou d'observer des consommations. La conversion est simple, un Watt-heure (Wh) correspond à 3 600 Joules. Et un kilo Watt-heure est égal à 1 000 Watt-heure.

Ensuite il va falloir calculer le nombre de cycles effectué par notre DEG au cours d'une année de fonctionnement. Les vagues opèrent sur des fréquences relativement variables, nous en reparlerons au chapitre 10.4. Pour ce calcul, nous allons prendre comme référence un cycle par seconde. C'est une fréquence de fonctionnement largement observée dans la littérature concernant la récupération d'énergie houlomotrice. Ce n'est pas la fréquence optimale et le rendement final pourra toujours être supérieur. Mais ici :

Un cycle par seconde = 60 cycles par minute = 3 600 cycles par heure.

Ce qui correspond à 86 400 cycles par jour et donc 31 536 000 cycles par an.

Pour connaître la capacité de récupération du système pendant un an de fonctionnement, on va faire une moyenne de l'énergie récupérée à chaque cycle. Pour ce chapitre nous avons fait l'hypothèse de travailler avec un navire de 300 m et une alimentation de 6 kV. On prendra alors l'énergie récupérée pour ces conditions et nous calculerons deux moyennes, l'une pour un  $\lambda_{\max} = 1.66$  et l'autre pour un  $\lambda_{\max} = 2$ . On pourra alors également observer l'influence d'un DEG légèrement amélioré sur la rentabilité.

**Moyenne d'énergie récupérée par cycle pour  $\lambda_{\max} = 1.66$  :**

$$E_{moy} = \frac{\text{Somme des énergies récupérée pour } \lambda \text{ entre 1 et 1.66}}{\text{Somme des cas possibles } (\lambda \text{ entre 1 et 1.66)}} \quad (8) \text{ (Source : Propre travail)}$$

$$E_{moy} = \frac{506887,105 \text{ Joules}}{66} = 7\,680,107 \text{ Joules} \quad (8.1) \text{ (Source : Propre travail)}$$

$$E_{moy} = 0.00213336 \text{ kWh} \quad \text{(Source : Propre travail)}$$

**Moyenne d'énergie récupérée par cycle pour  $\lambda_{\max} = 2$  :**

$$E_{moy} = \frac{\text{Somme des énergies récupérée pour } \lambda \text{ entre 1 et 2}}{\text{Somme des cas possibles } (\lambda \text{ entre 1 et 2)}} \quad (9) \text{ (Source : Propre travail)}$$

$$E_{moy} = \frac{1725081,358 \text{ Joules}}{100} = 17\,250,813 \text{ Joules} \quad (9.1) \text{ (Source : Propre travail)}$$

$$E_{moy} = 0.00479189 \text{ kWh} \quad \text{(Source : Propre travail)}$$

Calculons maintenant l'énergie récupérée sur un an dans ces deux cas.

$$E_{Total \text{ par an}} = E_{moy} * n_{\text{cycle par an}} \quad (10)$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 1.66$  :**

$$E_{Total \text{ par an}} = 0.00213336 * 31\,536\,000 = 67\,277,640 \text{ kWh} \quad (10.1) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 2$  :**

$$E_{Total \text{ par an}} = 0.00479189 * 31\,536\,000 = 151\,117,043 \text{ kWh} \quad (10.2) \text{ (Source : Propre travail)}$$

On observe une très grande différence d'énergie récupérée pour un matériau dont la déformation maximale est plus élevée. C'est donc une caractéristique importante à retenir pour l'élaboration d'un DEG optimisé qui apporterait un rendement économique supérieur.

Continuons cette étude en calculant la rentabilité du système en fonction du prix du kWh. Pour ce faire, nous allons comparer un navire à quai et un navire en mer. Ce calcul pourrait devenir plus compliqué car il y a de nombreux facteurs à prendre en compte. Par exemple, le type de moteur, le type de fioul, les régulations MARPOL, le secteur géographique, le type de navire, etc.

Pour simplifier un peu ce calcul, nous allons ignorer les facteurs géopolitiques actuels qui ont mené à une hausse significative des prix de l'énergie. Ensuite nous allons prendre des moyennes du coût du kWh fournies par la Commission européenne à Bruxelles en 2020 [20].

$$\text{Somme économisée} = \text{Prix du kWh} * \text{kWh produit} \quad (11)$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 1.66$ , à quai :**

$$Economie_{par\ an} = 0.2 * 67\ 277,640 = 13\ 455,528\ \text{€} \quad (11.1) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 1.66$ , en mer, pour le diesel :**

$$Economie_{par\ an} = 0,2192 * 67\ 277,640 = 14\ 747,258\ \text{€} \quad (11.2) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 1.66$ , en mer, pour le HFO :**

$$Economie_{par\ an} = 0,0953 * 67\ 277,640 = 6\ 411,559\ \text{€} \quad (11.3) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 2$ , à quai :**

$$Economie_{par\ an} = 0.2 * 151\ 117,043 = 30\ 223,408\ \text{€} \quad (11.4) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 2$ , en mer, pour le diesel :**

$$Economie_{par\ an} = 0,2192 * 151\ 117,043 = 33\ 124,855\ \text{€} \quad (11.5) \text{ (Source : Propre travail)}$$

**Pour  $\lambda_{\max} = 2$ , en mer, pour le HFO :**

$$Economie_{par\ an} = 0,0953 * 151\ 117,043 = 14\ 401,454\ \text{€} \quad (11.6) \text{ (Source : Propre travail)}$$

Ces calculs montrent que la rentabilité du système n'est pas facile à estimer exactement car beaucoup de facteurs rentrent en jeu. Cependant, avec un coût du système estimé à 51 059,44 €, une rentabilité est perceptible après quelques années d'utilisation. Même si l'économie estimée va toujours dépendre du type de moteur et du type de carburant utilisé, il faut noter que le gain est calculé ici pour un système non optimisé.

Dans le cadre d'un élastomère diélectrique spécialement étudié pour notre utilisation, avec une capacité de déformation améliorée, nous pourrions approcher une économie de 33 124,855 € par an.

Sur une durée de vie estimée à 10 ans, ce système serait capable de produire de manière écologiquement viable une grande quantité d'énergie et serait probablement une solution économiquement viable à la demande d'énergie en mer. Mais ces résultats sont purement théoriques et ne prennent pas en compte certains facteurs présents dans des conditions réelles d'utilisation.

# Chapitre 10

## Limites du système

### 10.1 Forme du système

Si en théorie le système paraît idéal, il comporte en pratique quelques défauts. Nous allons en discuter dans ce chapitre afin de réfléchir aux solutions que nous pourrions apporter.

Les premières idées étaient d'utiliser un boudin pneumatique gonflé pour envelopper le système. Cette méthode apporte beaucoup d'avantages : pas d'impact sur la stabilité (aucun poids ajouté au navire), protection des électrodes, faible impact sur l'hydrodynamisme, etc. Cependant, après l'étude théorique de l'énergie récupérée, nous avons appris que le coefficient de déformation joue un rôle primordial dans la production énergétique. Il apparaît alors comme une évidence qu'un boudin trop gonflé réduira la capacité à se déformer du système et donc réduira drastiquement l'énergie récupérable.

Il nous faut alors réfléchir à forme plus adaptée pour notre système. Si l'on se concentre sur la capacité à se déformer, dans le but de maximiser l'énergie récupérable, le mieux serait alors d'utiliser un boudin partiellement dégonflé. Voir mieux, un boudin entièrement dégonflé et partiellement rempli d'eau. Situé légèrement en dessous de la ligne de flottaison et complètement collé à la coque, ce système aurait alors tendance à imiter au mieux le comportement des vagues. Les mouvements, même moins importants, seraient alors mieux captés et absorbés par le système. On augmenterait ainsi la capacité à se déformer, et donc l'énergie produite.

Cependant, nous savons qu'un navire marchand aura une ligne de flottaison variable tout au long de son voyage. Navire lège ou chargé, densité de l'eau (douce, salée, température), assiette, gîte, ballast, etc. Autant de facteurs à prendre en compte si l'on souhaite installer un système plaqué contre la coque, au niveau de cette ligne de flottaison. Il va alors falloir réfléchir à un système mobile. L'avantage, quand on a un boudin partiellement rempli d'eau, c'est qu'il possède un poids. Et donc, si nous utilisons un système de poulies situées entre la coque et le boudin, nous serions alors en mesure de garder notre boudin au niveau de la ligne de flottaison. Et ce, même si celui-ci bouge tout au long du voyage de notre navire.

Ce nouveau type de système apporterait un très grand avantage sur la production d'énergie. Mais inclurait également deux défauts majeurs à étudier sur la stabilité et l'hydrodynamisme du navire.

## 10.2 Stabilité du navire

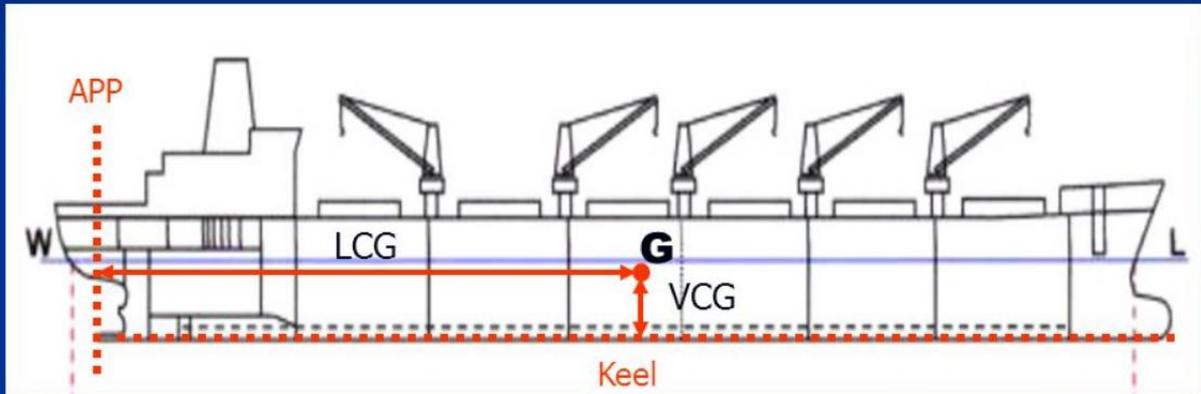
Dans les cours qui nous ont été dispensés, on apprend la définition suivante : « La stabilité est la capacité du navire à revenir à sa position d'origine après avoir été déséquilibré par une force externe ». Cette caractéristique est essentielle pour la sécurité du navire et ne peut pas être mise de côté. C'est pourquoi l'idée initiale pour notre système était de gonfler suffisamment le boudin pneumatique qui lui servait d'enveloppe. De ce fait, la stabilité du navire n'aurait pas été impactée car nous ne rajoutons pas de poids à celui-ci. Cependant, nous réfléchissons à présent à une nouvelle forme pour notre système afin d'augmenter l'énergie récupérable.

Celle-ci comporte un boudin partiellement rempli d'eau et ajoute donc un poids à notre navire. Nous avons alors un problème à résoudre si nous souhaitons avoir un système entièrement déformable qui n'influence pas la stabilité et donc la sécurité du navire.

Il est maintenant essentiel de rappeler quelques notions que nous avons apprises en cours de stabilité. Premièrement, l'assiette (trim) et la gîte (list). L'assiette correspond à la différence entre le tirant d'eau avant et le tirant d'eau arrière. La gîte, quant à elle, définit la différence entre le tirant d'eau bâbord et tribord. Cependant, si notre système possède le même volume et un poids équitablement réparti tout autour du navire, alors il n'y aura pas d'influence sur ces deux facteurs.

En revanche, le fait de rajouter un poids va influencer sur le second point important : le centre de gravité. Dans le cours de stabilité, nous avons appris que le centre de gravité du navire est le point d'application de toutes les forces d'attraction qui s'exercent sur le navire. Il correspond donc au point d'application de tous les poids du navire : poids navire lège, chargement, ballast, fuel, et dans notre cas, le système qui lui est rattaché.

A bord, la position de G est déterminée par rapport à 3 plans de référence :



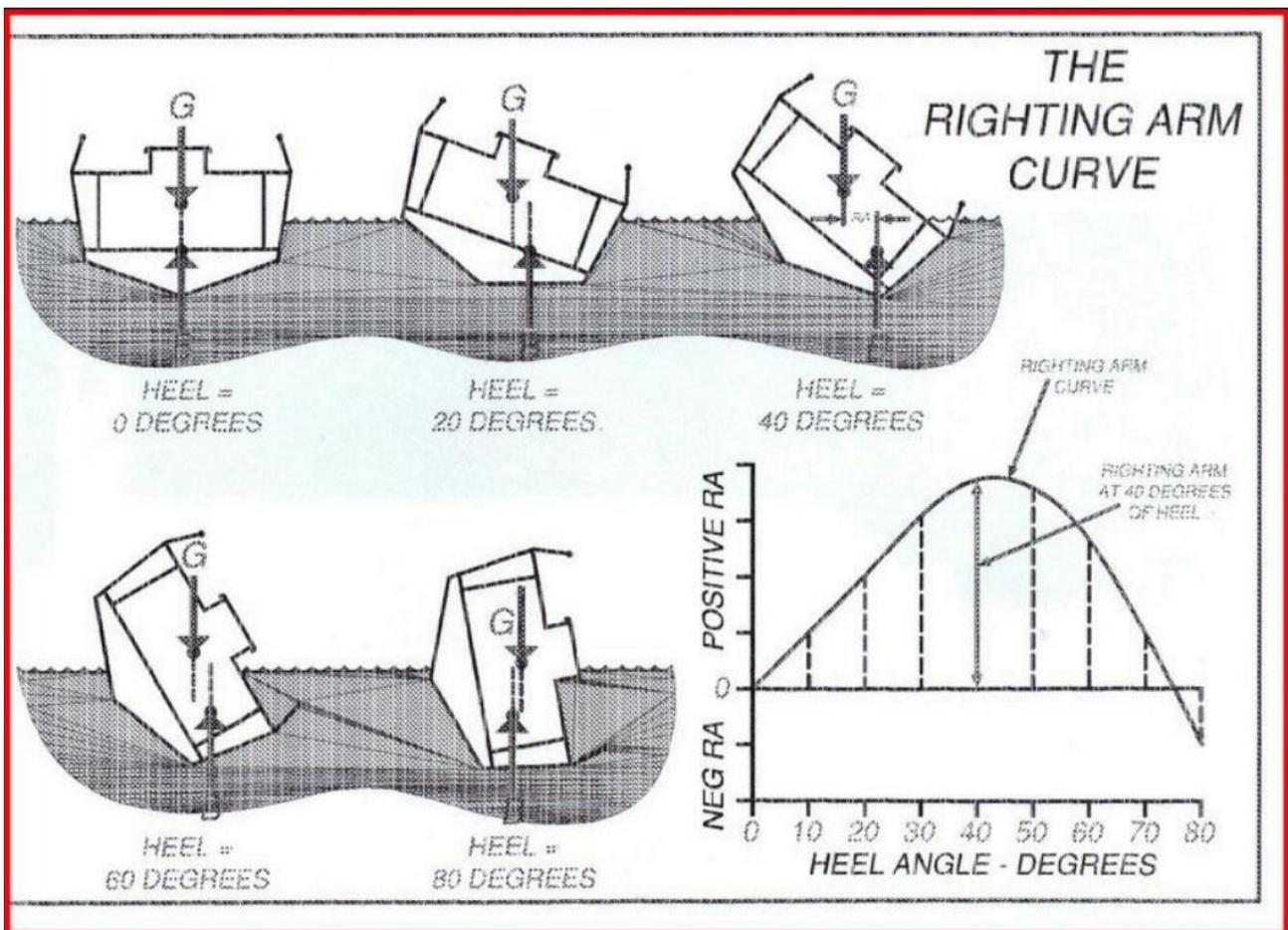
Abréviation G	Plan de Référence	Expression
VCG, KG	Plan de la quille	Vertical Center of Gravity
LCG	Plan passant par APP	Longitudinal Center of Gravity
TCG	Plan longitudinal	Transverse Center of Gravity

**Figure 36 : Schéma stabilité du navire [15]**

On observe alors sur la figure ci-dessus les trois plans qui déterminent la position du centre de gravité. Si on considère que notre système possède un poids parfaitement réparti tout autour du navire, il n'y aura alors qu'une influence sur le plan KG. C'est-à-dire sur la distance verticale entre la quille et le centre de gravité.

Dans ce cas, il n'y aura pas d'influence sur la gîte et l'assiette, mais uniquement sur le plan KG. On va donc influencer ce qu'on appelle le couple de stabilité.

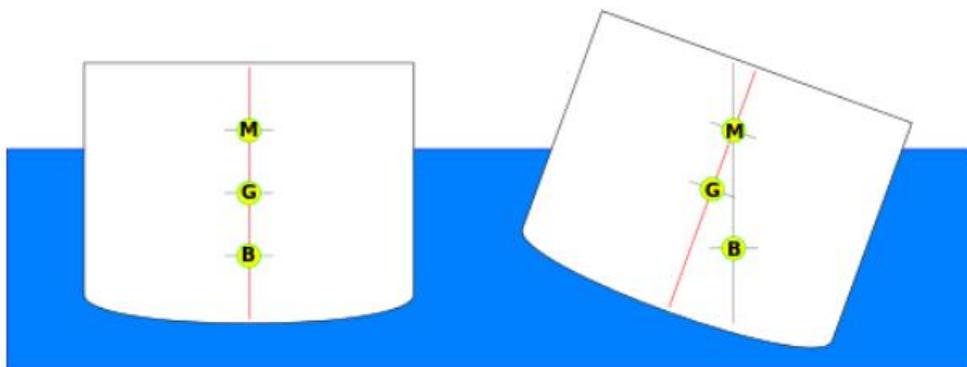
Le couple de stabilité d'un navire est lié au centre de gravité G et au centre de poussée B. Si le centre de poussée n'est pas aligné au plan vertical du centre de gravité, on va alors créer un bras de levier (noté GZ), qui influera sur la stabilité.



**Figure 37 : Influence des forces G et B [15]**

Avec notre système nous resterions donc dans le cas d'une inclinaison de 0°.

Finalement, le dernier point à observer est le métacentre noté M. Le métacentre est le point d'intersection de la ligne verticale passant par le centre de poussée et le plan de symétrie longitudinal. Considéré comme fixe sur le plan longitudinal, il va varier en fonction de la position de B.



**Figure 38 : Schéma de représentation du métacentre [16]**

Dans le cours de stabilité, nous avons appris que la relation  $GM$  permet de déterminer la stabilité de notre navire dans le cas d'un angle d'inclinaison inférieur à plus ou moins  $7^\circ$ . Ce qui est le cas que nous observons ici avec notre système.  $GM$  est alors défini comme la distance entre le centre de gravité et le métacentre.

Nous pouvons donc définir la stabilité de notre navire équipé de notre système à l'aide de toutes ces données et de la formule suivante :

$$KM - KG = GM \quad (12) \quad [15]$$

Si  $GM$  est égal à 0, la stabilité transversale est nulle et le navire n'a pas de couple de stabilité. Dans ce cas, on dit que la stabilité est indifférente et le navire reste en position.

Si  $GM$  est inférieur à 0, alors il existe un couple inclinant et on se trouvera dans une situation dangereuse.

Pour notre système, nous voulons nous trouver dans le cas où  $GM$  est supérieur à 0. C'est-à-dire que la stabilité statique est positive, le navire aura donc un couple de stabilité positif (appelé couple redressant). Il sera alors capable de revenir à sa position d'équilibre initiale après avoir été désaxé.

Si nous sommes dans le cas d'un couple redressant, le système avec un boudin partiellement rempli d'eau ne devrait pas être un problème pour la stabilité. Il permettrait également d'obtenir un coefficient de déformation maximal. Nous serions alors en mesure de récupérer un maximum d'énergie tout en conservant une bonne stabilité.

Cependant, nous manquons de valeurs expérimentales pour confirmer ces hypothèses. Il faudra alors réaliser par la suite une étude pratique pour répondre à ces questions.

## 10.3 Hydrodynamisme

Un système partiellement immergé offrirait certes une plus grande capacité à se déformer ainsi qu'une plus grande quantité d'énergie récupérée, mais il en découlerait aussi des problèmes d'hydrodynamisme.

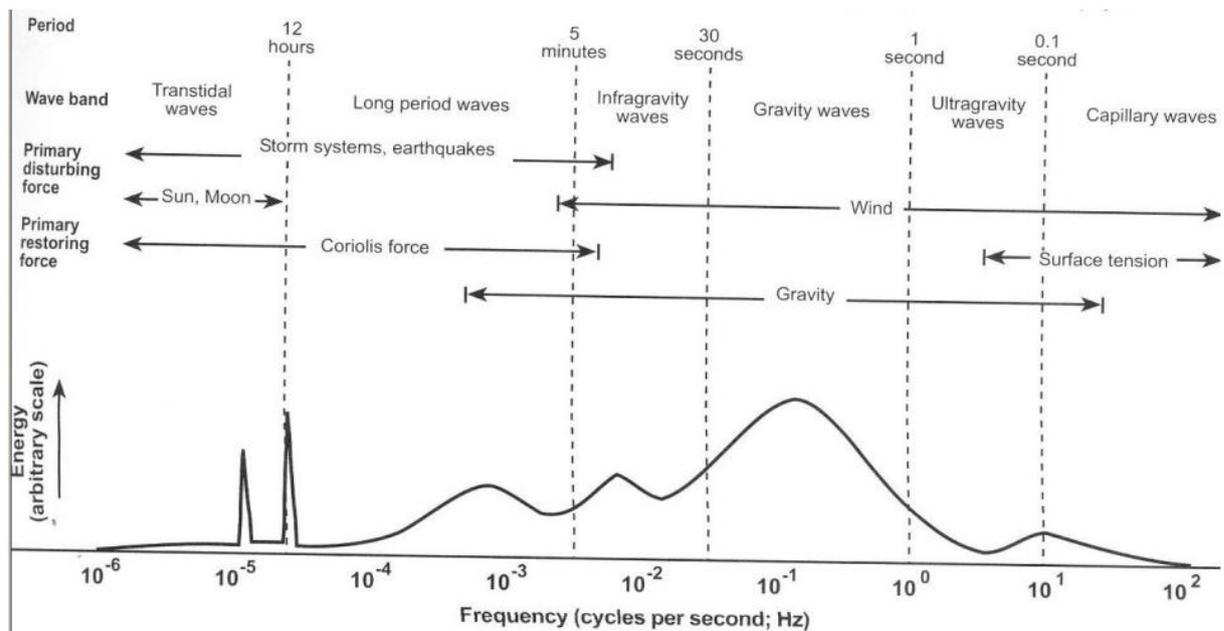
Le plus évident est l'augmentation des forces de frottement. Si le système est immergé, nous induirons forcément une résistance au déplacement du navire. Il serait alors intéressant à l'avenir de mener une étude approfondie sur l'hydrodynamisme afin de répondre à quelques questions. Quelle forme donner au système pour améliorer au mieux cette hydrodynamisme ? Et est-ce que l'impact sur l'augmentation de la consommation est plus important que l'énergie récupérée ? Aurait-on un meilleur rendement final en utilisant un système au-dessus de la ligne de flottaison (comme pensé initialement) ?

Les chiffres concernant la quantité théorique d'énergie récupérée sont suffisamment prometteurs pour envisager une légère augmentation de la consommation du navire. D'autant plus qu'avec une forme bien étudiée, on pourrait alors réduire au mieux la résistance à l'avancement créé par notre système. Mais en se concentrant uniquement sur la théorie il est impossible pour nous d'apporter des réponses précises. Il faudrait alors mener ultérieurement une étude expérimentale qui comparerait les consommations avec et sans notre système, pour observer si celui-ci reste rentable ou non.

## 10.4 Problèmes pratiques

Avec l'installation d'un boudin tout autour de la coque du navire, il faut également penser aux problématiques pratiques que cela engendrerait. Certains problèmes sont mineurs et seront facilement contournables. Par exemple, les marques de Plimsoll et autres marques utiles pour les inspections qui seront cachées par notre système. On pourra alors peindre le système pour reproduire ces marques, mais il faudra étudier une échelle équivalente pour ne pas les fausser.

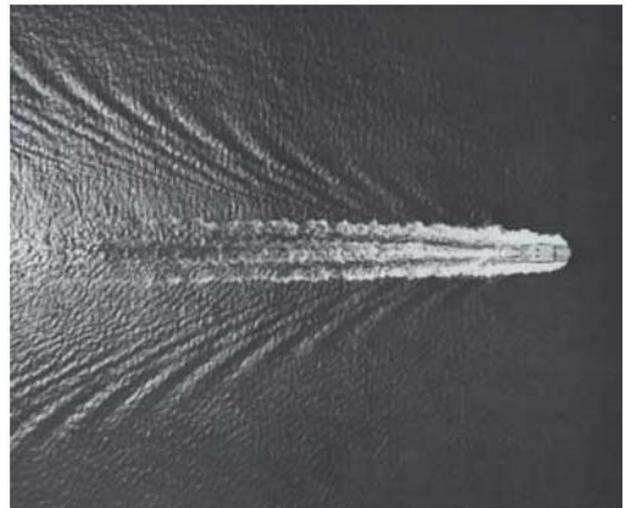
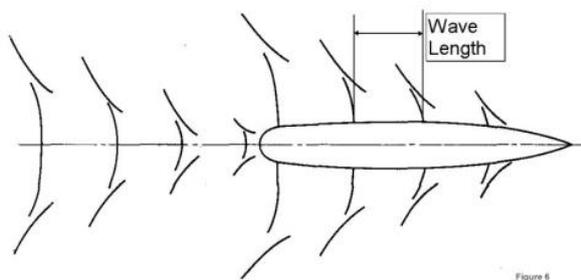
Il y a également la question de la fréquence des vagues créées par l'océan. Elles ne seront jamais fixes et vont dépendre de la lune, la marée, la distance avec la côte, la distance avec le fond de la mer, et même dépendre de la zone géographique. Entre le clapot, les vagues et la houle, nombreuses sont les ondes mécaniques à se déplacer dans nos océans. Mais il est compliqué d'estimer la moyenne des fréquences qui composent ces vagues. Voici tout de même une estimation de leurs fréquences en fonction de l'énergie qu'elles peuvent contenir :



**Figure 39 : Estimation de l'énergie contenue en fonction du type de vague et de sa fréquence [21]**

On observe que l'énergie contenue par les vagues est variable. Le rendement de notre système dépendra alors des vagues qu'il rencontre. Il faut donc garder à l'esprit que certaines vagues apporteront beaucoup plus d'énergie que d'autres, même si leur fréquence d'apparition est moins élevée. En ayant estimé le cycle moyen à une seconde, nous avons alors également estimé une énergie moindre contenue par les vagues.

Mais d'autres problèmes pratiques mèneront à de sérieux questionnements. C'est le cas des vagues créées par le navire lui-même. En 1887 le physicien anglais lord Kelvin avait déjà étudié les ondes créées à la surface de l'eau par les navires. Il avait alors observé un sillage en V à l'arrière des navires, avec un angle constant d'environ  $39^\circ$ .



**Figure 40 : Sillage de Kelvin [17]**

Aujourd'hui, avec les navires moderne et l'augmentation de leur vitesse, le sillage créé est plus étroit. Les vagues créées dans le sillage vont alors être proportionnelles la vitesse de celui-ci. À cela il faut rajouter les vagues d'étrave et de poupe du navire. Notre système a été réfléchi pour récupérer l'énergie des vagues externes au navire.

Cependant celles produites par le navire lui-même contiennent elles aussi de l'énergie. Ces vagues seraient-elles alors un problème ? Leurs fréquences seraient-elles trop élevées pour que notre système en récupère intégralement l'énergie ? Ou seraient-elles une bénédiction en assurant une déformation constante et donc une production constante d'énergie ? Ensuite, quel sera l'effet du mélange entre les vagues produites par le navire en plus des vagues externes ? Quel sera l'impact sur la fréquence de fonctionnement du système ?

Ce facteur devra donc être le sujet d'études ultérieures afin de répondre correctement à ces questions d'ordre pratique. Mais si l'on suit la logique de la théorie, les vagues créées par le navire lui-même devraient alimenter notre système et donc assurer une production d'énergie permanente. Et ce, même lors de conditions de mer très calme.

## 10.5 Durée de vie

Toujours dans ces problématiques liées aux conditions réelles, nous devons aborder le sujet de la durée de vie. En théorie, la durée de vie de notre DEG est d'environ 25 ans. Ce ne sera donc pas le facteur limitant de notre système. En revanche, l'électrode en graisse carbonée CW7100 possède une durée de vie estimée à 10 ans. Cette durée peut être augmentée en la remplaçant par une graisse carbonée type VHB9473, qui est une électrode utilisée dans la littérature sur les polymères électroactifs. Cette électrode possède une capacité d'auto-cicatrisation comme notre élastomère diélectrique, ce qui a pour effet de rallonger sa durée de vie.

Cependant, dans la pratique, ce ne sont pas ces éléments qui vont réellement impacter sur la durée de vie, mais plutôt des facteurs externes tels que la corrosion, les UV ou encore des conditions météorologiques extrêmes.

La corrosion est alors le premier facteur auquel on pense lorsque l'on installe un système en mer. Défini comme étant l'altération d'un matériau par une réaction chimique avec un oxydant, ce phénomène est bien plus complexe qu'une simple oxydation. Il peut se combiner avec des effets mécaniques (corrosion sous contrainte) et ne touche pas seulement les métaux (par exemple les polymères). Cavitation, érosion, abrasion, galvanique ou due à des micro-organismes, la corrosion apparaît sous de multiples formes et peut sévèrement réduire la durée de vie de notre système. De plus, dans notre cas, notre système va travailler sous une tension élevée, l'électrolyse (corrosion galvanique) sera alors un risque non-négligeable.

À la corrosion il va falloir rajouter l'exposition aux rayons ultraviolets du soleil, qui sont connus pour détériorer les polymères. En effet, lorsque ces UV entrent en contact avec un polymère, celui-ci aura alors tendance à les absorber. Cela aura pour effet de démarrer un cycle de dégradation qui va rompre les liaisons chimiques du polymère.

Heureusement nous avons préalablement réfléchi à une enveloppe pour protéger notre système : le boudin hypalon. Ce polyéthylène est connu pour garantir une fiabilité maximum face aux problèmes de corrosion et d'oxydation. De plus, il est réputé pour pouvoir accueillir un traitement anti-UV qui lui permet de résister à de longues expositions au soleil. Nous misons alors sur cette enveloppe pour protéger le système à l'intérieur de ces agressions externes.

Le seul facteur sur lequel nous ne pouvons influencer sont les conditions météorologiques extrêmes. Dans une tempête de force 12, les matériaux seront alors mis à rude épreuve. Notre élastomère et nos électrodes peuvent subir de très grandes déformations, mais ils ne sont pas à l'abri d'une rupture mécanique en cas de chocs violents et répétés. Le boudin qui sert d'enveloppe n'est lui non plus pas indestructible. Une rupture de celui-ci entraînerait des conséquences désastreuses pour le système.

La solution à ce facteur météorologique serait alors de remonter le système à l'aide des poulies discutées plus tôt, et de le mettre en sécurité à bord. Mais un système si volumineux entraînerait des problèmes logistiques évidents. Cependant, ces problèmes ne sont pas insurmontables. Avec un peu d'ingénierie, nous serions capables de vider l'eau de nos boudins et les enrouler. Mais là encore, il faudrait mener une étude supplémentaire dédiée.

# Conclusion

Ce mémoire portait sur l'étude de la récupération d'énergie mécanique fournie par les vagues au moyen d'un système basé sur les polymères électroactifs. Nous avons pour but de montrer qu'une telle récupération d'énergie était possible, et nous avons découvert que c'est en effet une solution viable. De plus, nous avons montré qu'elle est théoriquement économiquement rentable.

Cette nouvelle technologie est très prometteuse, mais son installation sur les navires marchands est encore un défi scientifique. En effet, l'utilisation d'un tel système engendre la prise en compte de nombreux facteurs. Qu'ils soient liés à la stabilité, à l'hydrodynamisme ou au fonctionnement en conditions réelles, ces paramètres devront être des sujets d'études expérimentales afin de convaincre l'industrie maritime d'investir dans ce système. De plus, il va falloir étudier un polymère électroactif dédié à notre système. Avec une composition qui offrira toutes les propriétés dont nous avons besoin, et avec les additifs nécessaires pour améliorer au maximum son rendement final.

Alors, si notre projet se révèle être viable dans la pratique, il pourrait ainsi devenir une norme et aider à diminuer nos émissions de CO<sub>2</sub>. En diminuant l'énergie nécessaire pour alimenter les systèmes auxiliaires de nos navires, nous pourrions à l'avenir diminuer l'impact écologique de l'industrie maritime.

# Bibliographie

- [10] Babarit, A., Gendron, B., Jitendra, S., Mélis, C., & Jean, P. (2013). Hydro-elastic modelling of an electro-active wave energy converter. *Hydro-elastic modelling of an electro-active wave energy converter*. Nantes, France: s.n. doi:10.1115/OMAE2013-10848
- [14] Belharaa, F., Hajjajib, A., Mazroui, M., Guyomar, D., Boughaleb, Y., Touhtouh, S., & Lebrun, L. (2014). Combination of electrostrictive polymers composites and electrets for energy harvesting capability: ELECTROSTRICTIVE POLYMERS AND ELECTRETS. *Polymers for Advanced Technologies*, 25(9). France & Maroc: John Wiley & Sons. doi:10.1002/pat.3336
- [15] Capt. Stokart, J. (2007). Cours de Stabilité - HZS - Chapitre 4 : La Courbe de Stabilité Statique. Anvers.
- [19] CHEMWATCH. (2019). CW7100 CircuitWorks Conductive Grease #298-7943. *Safety Data Sheet according to WHS Regulations (Hazardous Chemicals) Amendment 2020 and ADG requirements*. (CHEMWATCH, Éd.) Récupéré sur <https://docs.rs-online.com/f227/0900766b81166345.pdf>
- [4] Collins, L., Mokarram, H., Dettmer, W., & Masters, I. (2021). Flexible membrane structures for wave energy harvesting: A review of the developments, materials and computational modelling approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151. s.l.: s.n. doi:10.1016/j.rser.2021.111478
- [20] Commission Européenne. (14/09/2020). DÉCISION D'EXÉCUTION DU CONSEIL. *DÉCISION D'EXÉCUTION DU CONSEIL autorisant la France à appliquer un taux réduit de taxation à l'électricité directement fournie aux navires se trouvant à quai dans un port conformément à l'article 19 de la directive 2003/96/CE*. Bruxelles. Récupéré sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0498&from=EN>

- [17] Delacroix, S. (2015). Caractérisation de la génération et de la propagation de bulles autour de la carène des navires scientifiques. Boulogne-sur-mer: École Doctorale des Sciences de la mer. Récupéré sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02180918v1>
- [8] Elbarmaki, J., Jouad, M., Belhora, F., & Hajjaji, A. (2022). Wave energy harvesting using Silicone as Electro-active Polymers. s.l.: Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2022.03.105
- [3] Gendron, B. (2017). Modélisation et optimisation d'un système de récupération de l'énergie des vagues électro-actif déformable. Nantes: École centrale de Nantes. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02981611>
- [12] Group VirtualExpo. (s.d.). *Bateau pneumatique hors-bord NAV 19 HD*. (Nautic&Art) Récupéré sur <https://www.nauticexpo.fr/prod/nautic-art/product-27194-192593.html>
- [1] Iglesias, S. (2019). *Composites conducteurs polymères hautement déformables pour la récupération d'énergie houlomotrice*. Ecole Doctorale Matériaux de Lyon (Villeurbanne). Lyon: Université de Lyon. doi:tel-02063312
- [5] Jean-Mistral, C. (2008). Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystemes autonomes communicants. Grenoble: Université Joseph-Fourier - Grenoble I. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00356265>
- [11] Lagomarsini, C., Jean-Mistral, C., Lom, G., & Sylvestre, A. (2019). Hybrid piezoelectric–electrostatic generators for wearable energy harvesting applications. *Smart Materials and Structures*, 28(3), 13. doi:10.1088/1361-665X/aaf34e
- [13] MEDDAD, M. (2012). Etude de l'énergie renouvelable dans l'environnement

humain pour alimenter les systèmes électroniques portables. 232. Setif, Algérie. Récupéré sur <http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/handle/123456789/2040>

[9] Moonzur, R. (2013). *L'auto-cicatrisation, avenir du polymère*. (La rédaction) Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lauto-cicatrisation-avenir-du-polymere-25346/>

[21] Péloquin-Guay, M. (2013, Septembre). Évaluation de l'effet des vagues de bateau sur les conditions hydrauliques. Montréal: Département de géographie Faculté des arts et des sciences. Récupéré sur [https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/10680/Peloquin\\_Guay\\_Mathilde\\_2013\\_memoire.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/10680/Peloquin_Guay_Mathilde_2013_memoire.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

[18] Santiago-Alvarado, A., Cruz-Felix, A. S., Iturbide, F., & Licona-Morán, B. (2014). Physical-chemical properties of PDMS samples used in tunable lenses. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 3(2). Récupéré sur [https://www.researchgate.net/publication/261861311\\_Physical-chemical\\_properties\\_of\\_PDMS\\_samples\\_used\\_in\\_tunable\\_lenses](https://www.researchgate.net/publication/261861311_Physical-chemical_properties_of_PDMS_samples_used_in_tunable_lenses)

[2] SBM Offshore; Wattez, Ambroise; Van Kessel, Rick; . (2016). Novel Wave Energy Converter: Promising Future. 41. Récupéré sur [https://www.kivi.nl/uploads/media/56cc5ff4bd33b/2016-02-18\\_KIVI-SBM-Novel-Wave-Energy-Converter.pdf](https://www.kivi.nl/uploads/media/56cc5ff4bd33b/2016-02-18_KIVI-SBM-Novel-Wave-Energy-Converter.pdf)

[6] Singh Anjani, K. (2004). *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges* (Vol. PM136). s.l.: Yoseph Bar-Cohen. Récupéré sur <https://spie.org/Publications/Book/547465>

[16] Stringfixer .(s.d.). Récupéré sur [https://stringfixer.com/fr/Metacentric\\_height](https://stringfixer.com/fr/Metacentric_height)

[7] Xiaoshi , Q., Wu, S., Furman, E., Zhang, Q., & Su, J. (2015). Ferroelectric polymers as multifunctional electroactive materials: recent advances, potential, and challenges. 5(2), 129. s.l.: MRS Communications. Récupéré sur <https://doi.org/10.1557/mrc.2015.20>

# Liste des annexes

<b>Annexe 1</b> : Tableau des résultats pour un navire de 100 mètres et $V_{min} = 3000$ V.....	<b>84</b>
<b>Annexe 2</b> : Tableau des résultats pour un navire de 100 mètres et $V_{min} = 6000$ V.....	<b>85</b>
<b>Annexe 3</b> : Tableau des résultats pour un navire de 200 mètres et $V_{min} = 3000$ V.....	<b>86</b>
<b>Annexe 4</b> : Tableau des résultats pour un navire de 200 mètres et $V_{min} = 6000$ V.....	<b>87</b>
<b>Annexe 5</b> : Tableau des résultats pour un navire de 300 mètres et $V_{min} = 3000$ V.....	<b>88</b>
<b>Annexe 6</b> : Tableau des résultats pour un navire de 300 mètres et $V_{min} = 6000$ V.....	<b>89</b>
<b>Annexe 7</b> : Tableau récapitulatif du prix des matériaux.....	<b>90</b>

# Annexe 1 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>r</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1	1	1	0,00008135	0,00008135	0
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,00008135	0,00008299	7,5061829
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,00008135	0,00008464	15,3872867
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,00008135	0,00008631	23,6522292
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,00008135	0,00008799	32,3100161
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,00008135	0,00008969	41,3697409
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,00008135	0,00009141	50,840585
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,00008135	0,00009314	60,7318175
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,00008135	0,00009489	71,0527956
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,00008135	0,00009665	81,8129644
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,00008135	0,00009844	93,0218564
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,00008135	0,00010023	104,689093
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,00008135	0,00010205	116,824381
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,00008135	0,00010388	129,437519
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,00008135	0,00010572	142,53839
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,00008135	0,00010759	156,136966
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,00008135	0,00010947	170,243308
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,00008135	0,00011136	184,867563
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,00008135	0,00011327	200,019967
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,00008135	0,00011520	215,710843
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,00008135	0,00011715	231,950603
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,00008135	0,00011911	248,749746
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,00008135	0,00012108	266,11886
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,00008135	0,00012308	284,068619
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,00008135	0,00012509	302,609786
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,00008135	0,00012711	321,753211
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,00008135	0,00012915	341,509335
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,00008135	0,00013121	361,890682
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,00008135	0,00013329	382,906867
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,00008135	0,00013538	404,569593
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,00008135	0,00013748	426,890149
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,00008135	0,00013961	449,879913
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,00008135	0,00014175	473,550351
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,00008135	0,00014390	497,913017
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,00008135	0,00014608	522,979552
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,00008135	0,00014826	548,761685
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,00008135	0,00015047	575,271234
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,00008135	0,00015269	602,520103
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,00008135	0,00015493	630,520286
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,00008135	0,00015718	659,283863
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,00008135	0,00015945	688,823003
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,00008135	0,00016174	719,149962
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,00008135	0,00016404	750,277085
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,00008135	0,00016636	782,216804
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,00008135	0,00016869	814,981639
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,00008135	0,00017104	848,584198
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,00008135	0,00017341	883,037176
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,00008135	0,00017579	918,353358
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,00008135	0,00017819	954,545614
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,00008135	0,00018061	991,626905
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,00008135	0,00018304	1029,61028
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,00008135	0,00018549	1068,50886
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,00008135	0,00018796	1108,33589
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,00008135	0,00019044	1149,10467
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,00008135	0,00019293	1190,8286
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,00008135	0,00019545	1233,52116
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,00008135	0,00019798	1277,19593
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,00008135	0,00020052	1321,86658
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,00008135	0,00020309	1367,54684
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,00008135	0,00020567	1414,25057
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,00008135	0,00020826	1461,99168
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,00008135	0,00021087	1510,78419
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,00008135	0,00021350	1560,6422
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,00008135	0,00021614	1611,57991
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,00008135	0,00021880	1663,61158
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,00008135	0,00022148	1716,75158
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,00008135	0,00022417	1771,01437
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,00008135	0,00022688	1826,41449
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,00008135	0,00022961	1882,96656
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,00008135	0,00023235	1940,68531
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,00008135	0,00023511	1999,58553
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,00008135	0,00023788	2059,68211
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,00008135	0,00024067	2120,99005
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,00008135	0,00024348	2183,52441
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,00008135	0,00024630	2247,30034
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,00008135	0,00024914	2312,33308
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,00008135	0,00025200	2378,63797
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,00008135	0,00025487	2446,23043
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,00008135	0,00025776	2515,12596
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,00008135	0,00026066	2585,34017
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,00008135	0,00026358	2656,88873
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,00008135	0,00026652	2729,78741
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,00008135	0,00026947	2804,05207
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,00008135	0,00027244	2879,69866
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,00008135	0,00027543	2956,74322
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,00008135	0,00027843	3035,20186
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,00008135	0,00028145	3115,0908
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,00008135	0,00028448	3196,42633
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,00008135	0,00028753	3279,22485
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,00008135	0,00029060	3363,50281
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,00008135	0,00029368	3449,27679
3000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,00008135	0,00029678	3536,56344
3000											

## Annexe 2 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>R</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1	1	1	0,00008135	0,00008135	0
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,00008135	0,00008299	30,0247316
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,00008135	0,00008464	61,5491468
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,00008135	0,00008631	94,6089169
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,00008135	0,00008799	129,240065
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,00008135	0,00008969	165,478964
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,00008135	0,00009141	203,36234
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,00008135	0,00009314	242,92727
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,00008135	0,00009489	284,211183
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,00008135	0,00009665	327,251857
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,00008135	0,00009844	372,087426
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,00008135	0,00010023	418,75637
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,00008135	0,00010205	467,297525
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,00008135	0,00010388	517,750076
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,00008135	0,00010572	570,15356
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,00008135	0,00010759	624,547866
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,00008135	0,00010947	680,973232
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,00008135	0,00011136	739,470252
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,00008135	0,00011327	800,079867
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,00008135	0,00011520	862,843372
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,00008135	0,00011715	927,802412
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,00008135	0,00011911	994,998985
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,00008135	0,00012108	1064,47544
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,00008135	0,00012308	1136,27447
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,00008135	0,00012509	1210,43914
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,00008135	0,00012711	1287,01285
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,00008135	0,00012915	1366,03934
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,00008135	0,00013121	1447,56273
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,00008135	0,00013329	1531,62747
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,00008135	0,00013538	1618,27837
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,00008135	0,00013748	1707,5606
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,00008135	0,00013961	1799,51965
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,00008135	0,00014175	1894,2014
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,00008135	0,00014390	1991,65207
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,00008135	0,00014608	2091,91821
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,00008135	0,00014826	2195,04674
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,00008135	0,00015047	2301,08494
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,00008135	0,00015269	2410,08041
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,00008135	0,00015493	2522,08114
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,00008135	0,00015718	2637,13545
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,00008135	0,00015945	2755,29201
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,00008135	0,00016174	2876,59985
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,00008135	0,00016404	3001,10834
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,00008135	0,00016636	3128,86722
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,00008135	0,00016869	3259,92656
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,00008135	0,00017104	3394,33679
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,00008135	0,00017341	3532,1487
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,00008135	0,00017579	3673,41343
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,00008135	0,00017819	3818,18246
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,00008135	0,00018061	3966,50762
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,00008135	0,00018304	4118,44111
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,00008135	0,00018549	4274,03546
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,00008135	0,00018796	4433,34357
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,00008135	0,00019044	4596,41868
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,00008135	0,00019293	4763,31439
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,00008135	0,00019545	4934,08464
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,00008135	0,00019798	5108,78373
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,00008135	0,00020052	5287,4663
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,00008135	0,00020309	5470,18737
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,00008135	0,00020567	5657,00227
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,00008135	0,00020826	5847,96672
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,00008135	0,00021087	6043,13677
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,00008135	0,00021350	6242,56882
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,00008135	0,00021614	6446,31963
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,00008135	0,00021880	6654,44632
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,00008135	0,00022148	6867,00633
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,00008135	0,00022417	7084,05749
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,00008135	0,00022688	7305,65796
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,00008135	0,00022961	7531,86624
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,00008135	0,00023235	7762,74122
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,00008135	0,00023511	7998,3421
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,00008135	0,00023788	8238,72846
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,00008135	0,00024067	8483,96021
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,00008135	0,00024348	8734,09763
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,00008135	0,00024630	8989,20134
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,00008135	0,00024914	9249,33232
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,00008135	0,00025200	9514,55188
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,00008135	0,00025487	9784,92172
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,00008135	0,00025776	10060,5039
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,00008135	0,00026066	10341,3607
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,00008135	0,00026358	10627,5549
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,00008135	0,00026652	10919,1496
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,00008135	0,00026947	11216,2083
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,00008135	0,00027244	11518,7947
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,00008135	0,00027543	11826,9729
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,00008135	0,00027843	12140,8074
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,00008135	0,00028145	12460,3632
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,00008135	0,00028448	12785,7053
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,00008135	0,00028753	13116,8994
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,00008135	0,00029060	13454,0113
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,00008135	0,00029368	13797,1072
6000	8,85E-12	2,39	100	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,00008135	0,00029678	14146,2538
6000	8,8										

# Annexe 3 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>R</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1	1	1	0,0001627	0,0001627	0
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,0001627	0,00016597	15,0123658
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,0001627	0,00016928	30,7745734
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,0001627	0,00017261	47,3044585
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,0001627	0,00017598	64,6200323
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,0001627	0,00017938	82,7394818
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,0001627	0,00018281	101,68117
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,0001627	0,00018628	121,463635
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,0001627	0,00018978	142,105591
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,0001627	0,00019331	163,625929
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,0001627	0,00019687	186,043713
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,0001627	0,00020047	209,378185
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,0001627	0,0002041	233,648763
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,0001627	0,00020776	258,875038
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,0001627	0,00021145	285,07678
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,0001627	0,00021518	312,273933
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,0001627	0,00021893	340,486616
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,0001627	0,00022273	369,735126
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,0001627	0,00022655	400,039934
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,0001627	0,0002304	431,421686
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,0001627	0,00023429	463,901206
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,0001627	0,00023821	497,499493
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,0001627	0,00024217	532,23772
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,0001627	0,00024615	568,137237
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,0001627	0,00025017	605,219571
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,0001627	0,00025422	643,506423
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,0001627	0,00025831	683,019669
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,0001627	0,00026243	723,781364
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,0001627	0,00026657	765,813734
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,0001627	0,00027076	809,139185
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,0001627	0,00027497	853,780298
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,0001627	0,00027922	899,759826
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,0001627	0,0002835	947,100702
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,0001627	0,00028781	995,826034
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,0001627	0,00029215	1045,9591
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,0001627	0,00029653	1097,52337
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,0001627	0,00030094	1150,54247
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,0001627	0,00030538	1205,04021
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,0001627	0,00030985	1261,04057
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,0001627	0,00031436	1318,56773
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,0001627	0,0003189	1377,64601
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,0001627	0,00032347	1438,29992
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,0001627	0,00032808	1500,55417
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,0001627	0,00033271	1564,43361
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,0001627	0,00033738	1629,96328
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,0001627	0,00034208	1697,1684
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,0001627	0,00034682	1766,07435
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,0001627	0,00035159	1836,70672
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,0001627	0,00035639	1909,09123
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,0001627	0,00036122	1983,25381
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,0001627	0,00036608	2059,22055
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,0001627	0,00037098	2137,01773
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,0001627	0,00037591	2216,67179
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,0001627	0,00038087	2298,20934
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,0001627	0,00038587	2381,65719
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,0001627	0,0003909	2467,04232
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,0001627	0,00039596	2554,39186
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,0001627	0,00040105	2643,73315
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,0001627	0,00040617	2735,09368
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,0001627	0,00041133	2828,50114
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,0001627	0,00041652	2923,98336
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,0001627	0,00042174	3021,56838
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,0001627	0,000427	3121,28441
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,0001627	0,00043229	3223,15982
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,0001627	0,00043761	3327,22316
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,0001627	0,00044296	3433,50317
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,0001627	0,00044835	3542,02875
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,0001627	0,00045376	3652,82898
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,0001627	0,00045922	3765,93312
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,0001627	0,0004647	3881,37061
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,0001627	0,00047021	3999,17105
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,0001627	0,00047576	4119,36423
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,0001627	0,00048134	4241,98011
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,0001627	0,00048696	4367,04882
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,0001627	0,0004926	4494,60067
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,0001627	0,00049828	4624,66616
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,0001627	0,00050399	4757,27594
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,0001627	0,00050973	4892,46086
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,0001627	0,00051551	5030,25193
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,0001627	0,00052132	5170,68034
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,0001627	0,00052716	5313,77745
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,0001627	0,00053303	5459,57481
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,0001627	0,00053894	5608,10414
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,0001627	0,00054488	5759,39733
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,0001627	0,00055085	5913,48644
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,0001627	0,00055685	6070,40372
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,0001627	0,00056289	6230,1816
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,0001627	0,00056896	6392,85267
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,0001627	0,00057506	6558,44969
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,0001627	0,00058119	6727,00563
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,0001627	0,00058736	6898,55359
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,0001627	0,00059356	7073,12688
3000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,92	1,92	1	0,0001627	0,00059979	

# Annexe 4 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>R</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1	1	1	0,0001627	0,0001627	0
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,0001627	0,00016597	60,0494632
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,0001627	0,00016928	123,098294
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,0001627	0,00017261	189,217834
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,0001627	0,00017598	258,480129
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,0001627	0,00017938	330,957927
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,0001627	0,00018281	406,72468
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,0001627	0,00018628	485,85454
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,0001627	0,00018978	568,422365
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,0001627	0,00019331	654,503715
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,0001627	0,00019687	744,174852
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,0001627	0,00020047	837,512741
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,0001627	0,0002041	934,595051
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,0001627	0,00020776	1035,50015
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,0001627	0,00021145	1140,30712
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,0001627	0,00021518	1249,09573
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,0001627	0,00021893	1361,94646
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,0001627	0,00022273	1478,9405
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,0001627	0,00022655	1600,15973
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,0001627	0,0002304	1725,68674
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,0001627	0,00023429	1855,60482
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,0001627	0,00023821	1989,99797
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,0001627	0,00024217	2128,95088
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,0001627	0,00024615	2272,54895
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,0001627	0,00025017	2420,87828
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,0001627	0,00025422	2574,02569
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,0001627	0,00025831	2732,07868
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,0001627	0,00026243	2895,12545
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,0001627	0,00026657	3063,25494
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,0001627	0,00027076	3236,55674
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,0001627	0,00027497	3415,12119
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,0001627	0,00027922	3599,0393
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,0001627	0,0002835	3788,40281
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,0001627	0,00028781	3983,30414
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,0001627	0,00029215	4183,83642
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,0001627	0,00029653	4390,09348
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,0001627	0,00030094	4602,16987
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,0001627	0,00030538	4820,16083
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,0001627	0,00030985	5044,16229
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,0001627	0,00031436	5274,27091
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,0001627	0,0003189	5510,58402
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,0001627	0,00032347	5753,1997
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,0001627	0,00032808	6002,21668
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,0001627	0,00033271	6257,73443
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,0001627	0,00033738	6519,85311
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,0001627	0,00034208	6788,67358
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,0001627	0,00034682	7064,29741
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,0001627	0,00035159	7346,82686
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,0001627	0,00035639	7636,36491
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,0001627	0,00036122	7933,01524
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,0001627	0,00036608	8236,88221
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,0001627	0,00037098	8548,07092
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,0001627	0,00037591	8866,68714
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,0001627	0,00038087	9192,83736
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,0001627	0,00038587	9526,62878
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,0001627	0,0003909	9868,16928
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,0001627	0,00039596	10217,5675
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,0001627	0,00040105	10574,9326
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,0001627	0,00040617	10940,3747
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,0001627	0,00041133	11314,0045
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,0001627	0,00041652	11695,9334
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,0001627	0,00042174	12086,2735
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,0001627	0,000427	12485,1376
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,0001627	0,00043229	12892,6393
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,0001627	0,00043761	13308,8926
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,0001627	0,00044296	13734,0127
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,0001627	0,00044835	14168,115
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,0001627	0,00045376	14611,3159
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,0001627	0,00045922	15063,7325
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,0001627	0,0004647	15525,4824
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,0001627	0,00047021	15996,6842
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,0001627	0,00047576	16477,4569
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,0001627	0,00048134	16967,9204
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,0001627	0,00048696	17468,1953
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,0001627	0,0004926	17978,4027
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,0001627	0,00049828	18498,6646
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,0001627	0,00050399	19029,1038
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,0001627	0,00050973	19569,8434
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,0001627	0,00051551	20121,0077
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,0001627	0,00052132	20682,7214
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,0001627	0,00052716	21255,1098
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,0001627	0,00053303	21838,2993
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,0001627	0,00053894	22432,4166
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,0001627	0,00054488	23037,5893
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,0001627	0,00055085	23653,9458
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,0001627	0,00055685	24281,6149
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,0001627	0,00056289	24920,7264
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,0001627	0,00056896	25571,4107
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,0001627	0,00057506	26233,7988
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,0001627	0,00058119	26908,0225
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,0001627	0,00058736	27594,2144
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,0001627	0,00059356	28292,5075
6000	8,85E-12	2,39	200	2	0,000052	1,92	1,92	1	0,0001627	0,00059979	

# Annexe 5 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>R</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1	1	1	0,00024406	0,00024406	0
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,00024406	0,00024896	22,5185487
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,00024406	0,00025392	46,1618601
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,00024406	0,00025892	70,9566877
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,00024406	0,00026397	96,9300484
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,00024406	0,00026907	124,109223
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,00024406	0,00027422	152,521755
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,00024406	0,00027942	182,195452
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,00024406	0,00028467	213,158387
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,00024406	0,00028996	245,438893
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,00024406	0,00029531	279,065569
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,00024406	0,0003007	314,067278
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,00024406	0,00030614	350,473144
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,00024406	0,00031163	388,312557
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,00024406	0,00031717	427,61517
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,00024406	0,00032276	468,410899
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,00024406	0,0003284	510,729924
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,00024406	0,00033409	554,602689
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,00024406	0,00033982	600,0599
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,00024406	0,00034561	647,132529
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,00024406	0,00035144	695,851809
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,00024406	0,00035732	746,249239
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,00024406	0,00036325	798,356579
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,00024406	0,00036923	852,205856
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,00024406	0,00037526	907,829357
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,00024406	0,00038134	965,259634
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,00024406	0,00038746	1024,5295
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,00024406	0,00039364	1085,67205
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,00024406	0,00039986	1148,7206
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,00024406	0,00040613	1213,70878
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,00024406	0,00041245	1280,67045
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,00024406	0,00041882	1349,63974
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,00024406	0,00042524	1420,65105
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,00024406	0,00043171	1493,73905
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,00024406	0,00043823	1568,93866
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,00024406	0,00044479	1646,28506
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,00024406	0,00045141	1725,8137
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,00024406	0,00045807	1807,56031
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,00024406	0,00046478	1891,56086
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,00024406	0,00047154	1977,85159
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,00024406	0,00047835	2066,46901
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,00024406	0,00048521	2157,44989
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,00024406	0,00049211	2250,83126
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,00024406	0,00049907	2346,65041
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,00024406	0,00050607	2444,94492
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,00024406	0,00051313	2545,75259
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,00024406	0,00052023	2649,11153
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,00024406	0,00052738	2755,06007
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,00024406	0,00053458	2863,63684
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,00024406	0,00054183	2974,88071
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,00024406	0,00054913	3088,83083
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,00024406	0,00055647	3205,52659
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,00024406	0,00056387	3325,00768
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,00024406	0,00057131	3447,31401
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,00024406	0,0005788	3572,48579
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,00024406	0,00058634	3700,56348
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,00024406	0,00059393	3831,58779
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,00024406	0,00060157	3965,59973
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,00024406	0,00060926	4102,64053
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,00024406	0,000617	4242,7517
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,00024406	0,00062478	4385,97504
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,00024406	0,00063262	4532,35257
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,00024406	0,0006405	4681,92661
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,00024406	0,00064843	4834,73972
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,00024406	0,00065641	4990,83474
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,00024406	0,00066444	5150,25475
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,00024406	0,00067252	5313,04312
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,00024406	0,00068065	5479,24347
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,00024406	0,00068882	5648,89968
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,00024406	0,00069705	5822,05592
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,00024406	0,00070532	5998,75658
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,00024406	0,00071364	6179,04634
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,00024406	0,00072201	6362,97016
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,00024406	0,00073043	6550,57322
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,00024406	0,0007389	6741,90101
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,00024406	0,00074742	6936,99924
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,00024406	0,00075599	7135,91391
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,00024406	0,0007646	7338,69129
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,00024406	0,00077327	7545,37789
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,00024406	0,00078198	7756,02051
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,00024406	0,00079074	7970,66618
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,00024406	0,00079955	8189,36222
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,00024406	0,00080841	8412,15621
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,00024406	0,00081732	8639,09599
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,00024406	0,00082628	8870,22966
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,00024406	0,00083528	9105,60559
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,00024406	0,00084434	9345,2724
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,00024406	0,00085344	9589,279
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,00024406	0,00086259	9837,67454
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,00024406	0,00087179	10090,5084
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,00024406	0,00088104	10347,8304
3000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,00024406	0,00089034	10609,6903
3000	8,85E-12										

# Annexe 6 : (Source : Propre travail)

Vmin (V)	E <sub>0</sub> (F.m <sup>-1</sup> )	ε <sub>R</sub> (sans unité)	x <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	λ <sub>1</sub> (coef)	λ <sub>2</sub> (coef)	λ <sub>3</sub> (coef)	Cmin (F)	Cmax (F)	Es (J)
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1	1	1	0,00024406	0,00024406	0
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,01	1,01	1	0,00024406	0,00024896	90,0741948
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,02	1,02	1	0,00024406	0,00025392	184,647441
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,03	1,03	1	0,00024406	0,00025892	283,826751
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,04	1,04	1	0,00024406	0,00026397	387,720194
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,05	1,05	1	0,00024406	0,00026907	496,436891
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,06	1,06	1	0,00024406	0,00027422	610,087019
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,07	1,07	1	0,00024406	0,00027942	728,78181
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,08	1,08	1	0,00024406	0,00028467	852,633548
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,09	1,09	1	0,00024406	0,00028996	981,755572
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,1	1,1	1	0,00024406	0,00029531	1116,26228
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,11	1,11	1	0,00024406	0,0003007	1256,26911
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,12	1,12	1	0,00024406	0,00030614	1401,89258
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,13	1,13	1	0,00024406	0,00031163	1553,25023
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,14	1,14	1	0,00024406	0,00031717	1710,46068
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,15	1,15	1	0,00024406	0,00032276	1873,6436
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,16	1,16	1	0,00024406	0,0003284	2042,9197
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,17	1,17	1	0,00024406	0,00033409	2218,41076
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,18	1,18	1	0,00024406	0,00033982	2400,2396
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,19	1,19	1	0,00024406	0,00034561	2588,53012
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,2	1,2	1	0,00024406	0,00035144	2783,40724
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,21	1,21	1	0,00024406	0,00035732	2984,99696
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,22	1,22	1	0,00024406	0,00036325	3193,42632
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,23	1,23	1	0,00024406	0,00036923	3408,82342
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,24	1,24	1	0,00024406	0,00037526	3631,31743
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,25	1,25	1	0,00024406	0,00038134	3861,03854
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,26	1,26	1	0,00024406	0,00038746	4098,11802
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,27	1,27	1	0,00024406	0,00039364	4342,68818
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,28	1,28	1	0,00024406	0,00039986	4594,8824
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,29	1,29	1	0,00024406	0,00040613	4854,83511
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,3	1,3	1	0,00024406	0,00041245	5122,68179
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,31	1,31	1	0,00024406	0,00041882	5398,55896
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,32	1,32	1	0,00024406	0,00042524	5682,60421
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,33	1,33	1	0,00024406	0,00043171	5974,9562
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,34	1,34	1	0,00024406	0,00043823	6275,75462
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,35	1,35	1	0,00024406	0,00044479	6585,14022
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,36	1,36	1	0,00024406	0,00045141	6903,25481
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,37	1,37	1	0,00024406	0,00045807	7230,24124
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,38	1,38	1	0,00024406	0,00046478	7566,24343
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,39	1,39	1	0,00024406	0,00047154	7911,40636
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,4	1,4	1	0,00024406	0,00047835	8265,87604
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,41	1,41	1	0,00024406	0,00048521	8629,79955
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,42	1,42	1	0,00024406	0,00049211	9003,32502
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,43	1,43	1	0,00024406	0,00049907	9386,60165
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,44	1,44	1	0,00024406	0,00050607	9779,77967
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,45	1,45	1	0,00024406	0,00051313	10183,0104
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,46	1,46	1	0,00024406	0,00052023	10596,4461
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,47	1,47	1	0,00024406	0,00052738	11020,2403
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,48	1,48	1	0,00024406	0,00053458	11454,5474
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,49	1,49	1	0,00024406	0,00054183	11899,5229
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,5	1,5	1	0,00024406	0,00054913	12355,3233
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,51	1,51	1	0,00024406	0,00055647	12822,1064
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,52	1,52	1	0,00024406	0,00056387	13300,0307
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,53	1,53	1	0,00024406	0,00057131	13789,256
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,54	1,54	1	0,00024406	0,0005788	14289,9432
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,55	1,55	1	0,00024406	0,00058634	14802,2539
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,56	1,56	1	0,00024406	0,00059393	15326,3512
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,57	1,57	1	0,00024406	0,00060157	15862,3989
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,58	1,58	1	0,00024406	0,00060926	16410,5621
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,59	1,59	1	0,00024406	0,000617	16971,0068
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,6	1,6	1	0,00024406	0,00062478	17543,9002
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,61	1,61	1	0,00024406	0,00063262	18129,4103
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,62	1,62	1	0,00024406	0,0006405	18727,7065
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,63	1,63	1	0,00024406	0,00064843	19338,9589
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,64	1,64	1	0,00024406	0,00065641	19963,3389
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,65	1,65	1	0,00024406	0,00066444	20601,019
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,66	1,66	1	0,00024406	0,00067252	21252,1725
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,67	1,67	1	0,00024406	0,00068065	21916,9739
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,68	1,68	1	0,00024406	0,00068882	22595,5987
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,69	1,69	1	0,00024406	0,00069705	23288,2237
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,7	1,7	1	0,00024406	0,00070532	23995,0263
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,71	1,71	1	0,00024406	0,00071364	24716,1854
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,72	1,72	1	0,00024406	0,00072201	25451,8806
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,73	1,73	1	0,00024406	0,00073043	26202,2929
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,74	1,74	1	0,00024406	0,0007389	26967,604
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,75	1,75	1	0,00024406	0,00074742	27747,997
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,76	1,76	1	0,00024406	0,00075599	28543,6557
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,77	1,77	1	0,00024406	0,0007646	29354,7652
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,78	1,78	1	0,00024406	0,00077327	30181,5116
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,79	1,79	1	0,00024406	0,00078198	31024,082
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,8	1,8	1	0,00024406	0,00079074	31882,6647
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,81	1,81	1	0,00024406	0,00079955	32757,4489
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,82	1,82	1	0,00024406	0,00080841	33648,6248
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,83	1,83	1	0,00024406	0,00081732	34556,384
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,84	1,84	1	0,00024406	0,00082628	35480,9186
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,85	1,85	1	0,00024406	0,00083528	36422,4223
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,86	1,86	1	0,00024406	0,00084434	37381,0896
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,87	1,87	1	0,00024406	0,00085344	38357,116
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,88	1,88	1	0,00024406	0,00086259	39350,6982
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,89	1,89	1	0,00024406	0,00087179	40362,0338
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,9	1,9	1	0,00024406	0,00088104	41391,3215
6000	8,85E-12	2,39	300	2	0,000052	1,91	1,91	1	0,00024406	0,00089034	42438,7613
6000	8,85E-12										

## Annexe 7 : (Source : Propre travail)

Descriptif Produit	N° du fabricant	Quantité	Unités nécessaires	Prix TTC au 15/05/2022 (par unité) (pour le nbr d'unité commandé)
DOWSIL Sylgard 184	1272/2008	1,1 kg	65	223,230 €
Chemtronics CircuitWorks CW7100	CW7100-ND	6,5 g * 12	21 539	51,553 €
MG Chemicals Premium Carbon Conductive Grease 8481	8481-3-ND	3,75 L = 4,125 kg	15	756,768 €
Tissu Néoprène Hypalon	3A5009	vente au m²	1400 m²	18,15€ /m²

Descriptif Produit	Lien internet du Site d'achat
DOWSIL Sylgard 184	<a href="https://be.farnell.com/fr-BE/dowsil-formerly-dow-corning/sylgard-184-1-1kg/elastomer-clear-184-1-1kg/dp/101697?ost=sylgard+184">https://be.farnell.com/fr-BE/dowsil-formerly-dow-corning/sylgard-184-1-1kg/elastomer-clear-184-1-1kg/dp/101697?ost=sylgard+184</a>
Chemtronics CircuitWorks CW7100	<a href="https://www.digikey.be/en/products/detail/chemtronics/CW7100/307001?utm_source=findchips&amp;utm_medium=aggregator&amp;WT.z_cid=ref_findchips_standard&amp;utm_campaign=buynow">https://www.digikey.be/en/products/detail/chemtronics/CW7100/307001?utm_source=findchips&amp;utm_medium=aggregator&amp;WT.z_cid=ref_findchips_standard&amp;utm_campaign=buynow</a>
MG Chemicals Premium Carbon Conductive Grease 8481	<a href="https://www.digikey.fr/fr/products/detail/mg-chemicals/8481-3/6199276">https://www.digikey.fr/fr/products/detail/mg-chemicals/8481-3/6199276</a>
Tissu Néoprène Hypalon	<a href="http://french.industrialrubbersheets.com/sale-6143425-hypalon-fabric-sheet-industrial-neoprene-rubber-sheet-yellow-grey-red-blue.html">http://french.industrialrubbersheets.com/sale-6143425-hypalon-fabric-sheet-industrial-neoprene-rubber-sheet-yellow-grey-red-blue.html</a>