

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :/2020



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : (Benalia Nadir)

Thème

*Modélisation et Simulation d'un Système de Récupération
d'Energie à partir d'un Effet Triboélectrique pour les
Implants Intelligents du Genou*

Soutenu publiquement, le 04/10/2020, devant le jury composé de :

M/ OULD-LAHOUCINE Cherif	Professeur	Univ.Guelma	Président/ Encadreur
M/ DJEBALA Abderrazak	Professeur	Univ.Guelma	Examinateur Principal
M/FRIHI Djamel	MCA	Univ.Guelma	Examinateur
Mme/FRIOUI Nadia	MCB	Univ.Guelma	Examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer votre profonde gratitude, avant tout à Dieu le tout puissant qui nous a aidé et nous a donné le courage pour mener à terme ce modeste travail.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. Ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire

*Je tiens à remercier tout d'abord **Monsieur Ould Lahoucine Cherif**, qui en tant que directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps, qu'il a bien voulu me consacrer et sans lequel ce mémoire n'aurait jamais vu le jour*

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif du département : Génies Electrotechnique et Automatique, pour la richesse et la qualité de leurs enseignements et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à **Monsieur Boutaous M'hamed** responsable de thèmes «Fluide, polymères et composites» au laboratoire CETHIL de L'INSA de Lyon pour son accueil chaleureux qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de mon projet de fin d'étude.*

Merci à tous et à toutes.

Dédicas

Merci à Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire, de réfléchir, d'avoir la force d'en croire en lui et surtout d'avoir la patience de persévérer jusqu'à la réalisation de mon rêve et de mon bonheur, tout en levant, mes mains vers le ciel et dire :

Ya Kayoum "

Je dédie humblement ce modeste travail :

A ma cher père Abed'El-Madjid

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Ce travail est fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

A ma chère mère Dalila

Honorable, Aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours.

A ma cher frère Nasreddine et ma chère sœur Hadjer

Pour leurs aides, leurs générosités, leurs gentillesse, et leurs soutiens.

A tous mes amis (es) avec lesquels (les) j'ai partagé des moments exceptionnels de joie et de bonheur.

Sans oublier d'adresser mes remerciements à toutes les personnes qui ont m'aidé de près ou de loin par le fruit de leurs connaissances, de leur savoir pendant toute la durée de mon parcours instructif.

NADIR

Introduction

Bien que le nombre de chirurgies d'arthroplastie totale du genou (RTG) augmente rapidement, la fonctionnalité et la réduction de la douleur restent insatisfaisantes pour de nombreux patients. La surveillance continue des charges du genou après la chirurgie offre le potentiel d'améliorer les procédures chirurgicales et la conception des implants. Le but de cette étude est de caractériser un récupérateur d'énergie triboélectrique sous charges corporelles afin qu'il soit incorporé par la suite avec une électronique à extrémité avant compatible pour numériser les données de charge. Le prototype de moissonneuse serait placé entre le composant tibial et le support en polyéthylène d'un implant RTG. La moissonneuse génère de l'énergie à partir de la charge compressive. Pour examiner le rendement de la moissonneuse et la faisabilité d'alimenter un circuit de numérisation, un prototype de récupérateur d'énergie triboélectrique est fabriqué et testé. Un profil de charge tibio--fémorale axiale de la marche normale (démarche) est approximé comme un signal sinusoïdal de 1 Hz et est appliqué à la moissonneuse. Étant donné que la racine carrée moyenne des tensions générées par ce phénomène est proportionnelle à la charge appliquée, le dispositif peut être utilisé simultanément pour la récupération d'énergie et la détection de charge. Avec une charge cyclique de genou approximative de 2,3 kN à 1 Hz, la moissonneuse a généré une tension de sortie de 18V rms, et une puissance moyenne de 6 μ W à la résistance optimale de 58M Ω . Le signal récolté est rectifié par un redresseur de convertisseur de tension négative et régulé par un régulateur à décrochage linéaire avec un rendement combiné de 71%. La sortie du régulateur sert à charger un supercondensateur. L'énergie stockée dans le supercondensateur est utilisée pour la détection à basse résolution de la charge via un détecteur de crête et un convertisseur analogique-numérique. Selon notre analyse, il est possible de détecter la charge plusieurs fois par jour en ne comptant que sur la puissance récoltée.

Les activités de la vie quotidienne (AVQ) telles que la marche, la course et le saut entraînent le transfert de charges importantes à travers l'articulation du genou humain [1]. Une épidémie d'arthrose et de dégénérescence du cartilage associée, même chez les patients jeunes et actifs, a augmenté les chirurgies d'arthroplastie totale du genou (RTG) qui utilisent des composants prothétiques. Bien que la plupart des patients soient satisfaits des résultats de ces chirurgies, environ 20% ne sont pas satisfaits des niveaux de fonctionnalité et de douleur qui en résultent après la chirurgie. L'équilibrage incorrect des ligaments, qui peut accélérer l'usure due aux déséquilibres de la force de réaction articulaire et favoriser le relâchement prothétique, est un facteur majeur du mauvais fonctionnement des RTG. Bien qu'il existe diverses techniques pour analyser la cinématique des RTG après la chirurgie, les charges

Introduction

subies par ces dispositifs sont difficiles à mesurer et les charges peuvent éventuellement conduire à une défaillance de l'implant.

Ces dernières années, le mécanisme de l'effet triboélectrique est considéré comme une nouvelle méthode pour la récupération d'énergie mécanique. Par rapport à d'autres types de collecteurs tels que piézoélectrique ou électromagnétique, une plus grande densité d'énergie est obtenue avec le transducteur triboélectrique. Le mécanisme de transduction triboélectrique présente les avantages d'une fabrication simple, d'une excellente fiabilité, d'un rendement élevé et d'un faible coût. Dans le mécanisme triboélectrique, l'électrification de contact se produit lorsque deux matériaux différents à des polarités différentes entrent en contact les uns avec les autres, puis se séparent par un petit espace. La petite séparation nécessaire entre les matériaux triboélectriques pour générer de l'énergie électrique signifie que le dispositif peut être utilisé pour alimenter des capteurs de pression intégré au niveau de la prothèse. L'écart, généralement compris entre 100 et 300 μm , peut être réglé pour maximiser la quantité d'énergie récoltée. Le processus cyclique conduit à l'écoulement des charges entre les deux couches triboélectriques. La tension de sortie efficace est proportionnelle à la charge, car des forces plus importantes amènent les deux couches du générateur à s'engager plus profondément, ainsi plus de charges sont générées, conduisant à une tension de sortie plus élevée. Cette proportionnalité et les fortes charges de compression disponibles au niveau du genou font des générateurs triboélectriques un mécanisme approprié pour récolter l'énergie.

Notre mémoire de master est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art de l'effet triboélectrique. Le deuxième chapitre est consacré à la théorie et l'analyse des nano-générateurs triboélectriques. Le troisième chapitre traite la modélisation sous Comsol Multiphysique, et le choix des modules, des conditions aux limites, et la sélection du maillage approprié. Enfin, dans le quatrième chapitre, la modélisation d'un système triboélectrique qui est l'objet de notre étude sera présentée. Il est important d'insister sur le fait qu'aucun module triboélectrique n'existe sous COMSOL actuellement. Ce travail a comme but justement de proposer une modélisation sous COMSOL en utilisant le module existant type 'électrostatique', et de comparer les résultats obtenus avec ceux publiés dans des revues internationales pour la validation. Deux types de nano-générateurs à effet triboélectrique seront modéliser et simuler; l'un utilisant le mode contact, par contre le second est de type glissant, respectivement.

Liste des figures

Numéro du figure	Titre du figure	Page
	Chapitre 01	
01	Les quatre modes fondamentaux des nano-générateurs triboélectriques : un mode de contact-séparation verticale ; b mode de glissement de contact dans le plan ; c mode mono-électrode ; et d mode triboélectrique autonome.	03
02	Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique à diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour Plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG.	04
03	Le mode coulissant dans le plan TENG	05
04	Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte. La constante diélectrique est de 2 dans ce calcul	05
05	Mode TENG à électrode unique	06
06	: Modèles et caractéristiques de sortie de base des TENG libres en mode coulissant (a) Modèle FEM d'un SFTENG diélectrique typique. (b) Modèle FEM d'un SFTENG métallique typique. (c – e) Influence du matériau de la couche autoportante sur le caractéristiques de base de la sortie (c) charges transférées en court-circuit sous MACRS, (d) capacité totale entre les deux électrodes, et (e) tension en circuit ouvert sous MACRS	07

07	Amplitude de la puissance et ses applications correspondantes . L'énergie à l'échelle macro est destinée à alimenter une ville et même un pays, l'énergie à l'échelle nanométrique est destinée à alimenter de minuscules petits appareils électroniques, ces deux applications sont mesurées par des caractéristiques différentes	09
08	Le générateur Van de Graaff et son mécanisme de fonctionnement.	14
09	Arthroplastie totale de genou (ATG)	15
10	Schéma d'une prothèse intelligente	16
Chapitre 02		
11	: Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique à diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour Plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG.	23
12	Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte.	29
13	. Caractéristiques de sortie intrinsèques des SETENG en mode contact conducteur-diélectrique. (a) Structure du modèle FEM. (b – d) Capacité calculée (b) entre les deux électrodes, (c) tension de circuit ouvert et (d) charges transférées en condition de court-circuit de SETENG à différents x, avec comparaison avec les résultats des TENG à électrode attachée. (e) Modèle de circuit équivalent contenant trois capacités pour les SETENG en condition de circuit ouvert (CO).	30
Chapitre 03		
14	Fenêtre principale de Comsol multiphysique	32
15	: Organigramme général pour la résolution d'un problème avec Comsol Multiphysique.	32
16	Définition des paramètres d'un matériau dans COMSOL	33
17	Représente les différentes dimensions d'espace dans COMSOL	37
18	Choix du type de la physique dans COMSOL	37
19	Espace d'étude dans COMSOL	38
20	Espace de travail dans COMSOL	38
21	La loi de Gauss indique que le flux électrique peut être trouvé en trouvant la charge totale enfermée (Q) et la permittivité relative du matériau (ϵ). Source	39

22	Équations interdépendantes utilisées pour résoudre des problèmes de limites basés sur la loi de Gauss. Source	40
23	Procédure d'analyse par éléments finis pour résoudre les problèmes multiphysiques dans COMSOL.	42
Chapitre 04		
24	Géométrie 2D du TEG en tant que condensateur (Non dessinée à l'échelle)	43
25	Géométrie 2D du TEG en tant que condensateur (Non dessinée à l'échelle)	44
26	Page menu pour crée un nouveau modèle dans COMSOL	45
27	: Fenêtre pour le choix du modèle (électrostatique)	46
28	Choix du domaine d'étude	46
29	Définition des paramètres Globaux du modèle	47
30	Image de la géométrie du modèle de simulation	48
31	Sélection des propriétés des matériaux.	49
32	(A, B, C, D) : Etablissement des conditions aux limite	52
33	Maillage de la géométrie	53
34	Définition des paramètres Globaux du modèle	57
35	Graphique linéaire Tracé du potentiel électrique en fonction de la hauteur de matériaux L'air.	60
36	Le mode traditionnel (a) et le mode de la méthode EDAEC (b) du mode LS TENG. La comparaison de la charge transférée par les méthodes traditionnelles et EDAEC (CE). La comparaison du courant de court-circuit par les méthodes traditionnelles et EDAEC	61
37	Graphique de l'intensité du courant électrique en fonction de la distance de séparation d (couche d'air).	62
38	Définition des paramètres Globaux du modèle	62
39	Graphique du potentiel électrique en fonction du déplacement latéral (mode glissant) suivant x .	66

Liste des figures

40	Graphique de l'intensité du courant électrique obtenu dans le cas du mode glissant pour différentes valeurs du déplacement x (cm).	67
41	Le mode traditionnel (a) et le mode de la méthode EDAEC (b) du mode LS TENG. La comparaison de la charge transférée par les méthodes traditionnelles et EDAEC (CE). La comparaison du courant de court-circuit par les méthodes traditionnelles et EDAEC.	68
42	Graphique de la charge du court-circuit (N_c) en fonction du déplacement latéral suivant x (cm) (mode glissant).	69

Liste des tableaux

Numéro du tableau	Titre du tableau	Page
	Chapitre 01	
01	Série triboélectrique pour certains matériaux courants suivant une tendance à perdre facilement des électrons (positifs) à gagner des électrons (négatifs)	11
01	Série triboélectrique pour certains matériaux courants suivant une tendance à perdre facilement des électrons (positifs) à gagner des électrons (négatifs).	12
	Chapitre 03	
02	Les lois de l'électrostatique Source : COMSOL Multiphysics Cyclopedia	40
	Chapitre 04	
03	Récapitulatif des valeurs moyennes des potentiels électriques pour différentes valeurs de la permittivité relative électrique k .	56
04	Récapitulatif des valeurs moyennes des potentiels électriques pour différentes valeurs de la séparation d	59
05	Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de l'intensité du courant pour différentes valeurs la distance de séparation d (cm)	61
06	. Récapitulatif des valeurs moyennes de potentiel électrique pour différentes valeurs de déplacement latéral suivant x (mode glissant)	66
07	Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de l'intensité du courant électrique pour différentes valeurs du déplacement latéral x	67
08	Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de la charge du court-circuit pour différentes valeurs du déplacement latéral x (cm) (mode glissant)	69

Nomenclature

Symbole	Description
$\rho : [\text{C}/\text{m}^3]$: la densité volumique de la charge électrique [C/m ³]
$\epsilon:$ Dans le vide $\epsilon=\epsilon_0= 8.8544*10^{-12}$;	La permittivité relative [F/m) ;
μ_r	Perméabilité relative
σ	Conductivité électrique [S/m)
μ_0	Perméabilité du vide $\frac{4\pi 10^{-7}}$
$\rho : [\text{C}/\text{m}^2]$	La densité surfacique de la charge électrique [C/m ²]

Nomenclature

Symbole	Description
(TENG)	Nano-générateur triboélectrique
CA	Courant alternatif
NTEU SFTENG	Nanogénérateur triboélectrique à électrode unique Single-electrode triboelectric nanogenerator
MFA AFM	Microscopie à force atomique Atomic force microscopy
ERCMR MACRS	État de référence de charge minimum réalisable Minimum achievable charge reference state
SCOM	semi-conducteur à oxyde métallique
TECOSC MOSFET	Transistor à effet de champ métal – oxyde – semi-conducteur Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor
CMOS	Transistor à effet de champ complémentaire métal-oxyde-semi-conducteur
CO	Circuit ouvert
CC	Court-circuit
MEF	Methode élément finis
AEF	L'analyse par éléments finis

Table des matières

INTRODUCTION.....	01
-------------------	----

Chapitre I : L'état de l'art du Triboélectrique

I.1.Introduction	03
I.1.1. Mode de séparation de contact verticale.....	04
I .1.2 Mode coulissant latéral	05
I.1.3 Mode à électrode unique.....	06
I.1.4 Mode triboélectrique autonome.....	06
I.2.Nano énergie et méga énergie.....	08
I.3. Effet Triboélectrique.....	09
I.4.Matériaux pour la triboélectrification	10
I.5.Générateur Van de Graff	13
I.6.Cas d'étude : Arthroplastie totale du genou.....	15
I.7. Conclusion du chapitre.....	17

Chapitre II : Théorie et analyse des nano-générateur triboélectrique

II.1. Introduction.....	18
II.2. Fondamentaux des nano-générateurs triboélectriques.....	19
II.2.1 Comportement capacitif inhérent et équations gouvernantes : relation $V - Q - x$	20
II.2.2 Méthode de simulation théorique.....	20
II.3. Caractéristiques de sortie intrinsèques TENG et modes fondamentaux.....	21
II.3.1. Générateurs triboélectriques à contact d'électrode attachée.....	21
II.3.2 Générateurs triboélectriques à mode glissant à électrode attachée.....	25
II.4. Conclusion du chapitre	30

Chapitre III : Modélisation avec Comsol Multiphysique

III.1. Introduction	31
III.2 : Code de calcul utilisé.....	31
III.2.1 : Présentation générale de Comsol Multiphysique.....	31
III.2.2 : Utilisation de comsol multiphysique.....	32
III.2.3 : Etapes du processus de modélisation.....	33
III.2.4 : Description des différents modules de Comsol	35
III.3 Utilisation du Comsol pour modéliser l'électrostatique.....	39
III.3.1. Principes électrostatiques.....	39
III.3.2 Analyse par éléments finis (AEF).....	41
III.3.3 COMSOL pour Analyse par éléments finis AEF.....	41

Chapitre IV Modélisation d'un système triboélectrique

IV.1.Introduction	43
IV.2. Étude paramétrique sur l'effet des inclusions de constante diélectrique.....	43
IV.2.1Création notre model dans COMSOL.....	44
IV.2.1.1 Résultats.....	53
IV.3 Mode de contact vertical.....	57
IV.3.1 Résultats.....	57
IV.4. Mode glissant.....	62
IV.4.1 Résultats.....	63
IV.5. Conclusion du chapitre.....	70
 CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	 71
Référence bibliographique.....	72



Chapitre I :

L'état de l'art de l'effet
triboélectrique

I.1. Introduction [1].

L'électronique d'aujourd'hui est principalement associée aux activités humaines à des fins de santé, de sécurité et de communication.

L'énergie la plus abondante associée à un humain est l'énergie mécanique résultant du mouvement du corps. Récemment, en utilisant les charges électrostatiques créées sur les surfaces de deux matériaux différents lorsqu'ils sont mis en contact physique, les charges triboélectriques induites par contact peuvent générer une chute de potentiel lorsque les deux surfaces sont séparées par une force mécanique, ce qui peut entraîner des électrons à circuler entre les deux électrodes construites sur les surfaces supérieure et inférieure des deux matériaux. Il s'agit du premier nano-générateur triboélectrique (TENG) inventé par le groupe Wang en 2012, visant à récolter de l'énergie mécanique à petite échelle. TENG a quatre modes de base élaborés en détail au-dessous de (Fig1).

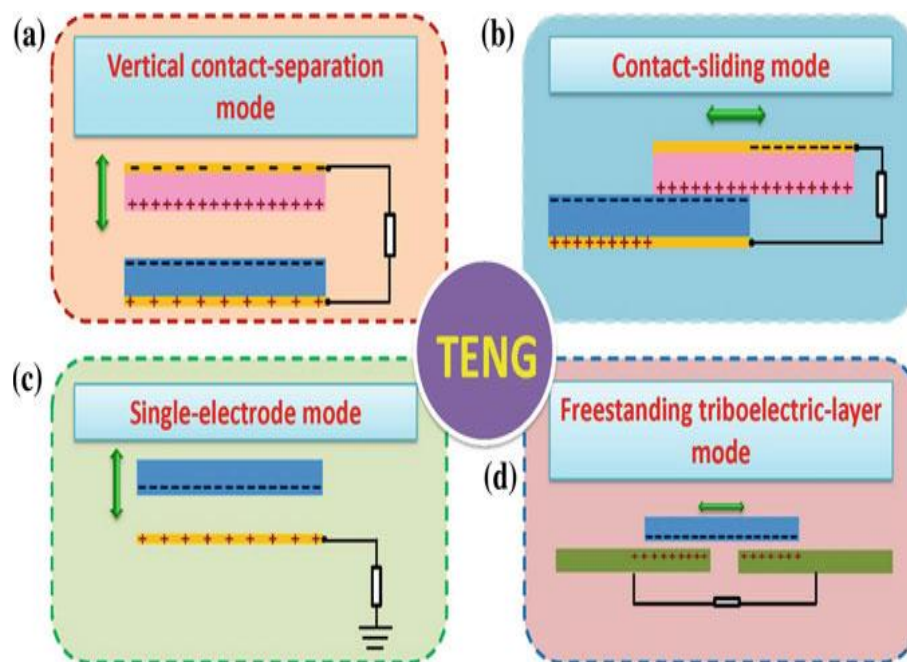


Figure 1 : Les quatre modes fondamentaux des nano-générateurs triboélectriques : (a) un mode de contact-séparation vertical; (b) mode de glissement dans le plan; (c) mode mono-électrode; et (d) mode triboélectrique autonome

I.1.1. Mode de séparation de contact verticale [1].

Nous utilisons la conception la plus simple de TENG comme exemple (Fig.1.a) (Fig.2) deux films diélectriques différents se font face et une électrode est déposée sur les surfaces supérieure et inférieure de la structure empilée. Un contact physique entre les deux films diélectriques crée des surfaces de charges opposées. Une fois que les deux surfaces sont

séparées par un petit espace sous la levée d'une force externe, une chute potentielle est créée. Si les deux électrodes sont connectées électriquement par une charge, les électrons libres dans une électrode s'écouleraient vers l'autre électrode pour construire un potentiel opposé afin d'équilibrer le champ électrostatique. Une fois l'espace fermé, le potentiel créé par la charge triboélectrique disparaît, les électrons refluent

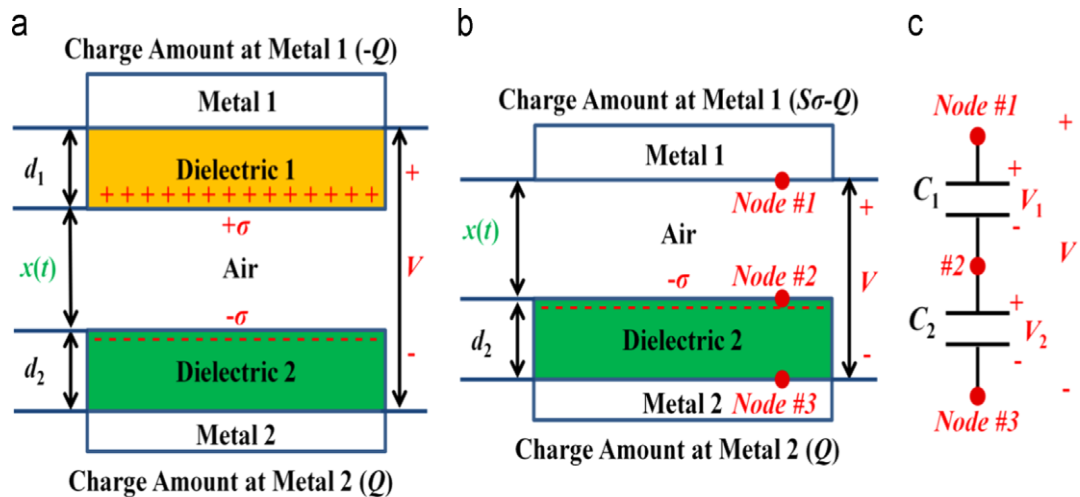


Figure 2 : Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique-diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (Société Royale de Chimie [2]).

I.1.2 Mode coulissant latéral [1]

La structure de départ est la même que celle du mode séparation-contact verticale. Lorsque deux films diélectriques sont en contact, un glissement relatif parallèle à la surface crée également des charges triboélectriques sur les deux surfaces (Fig.1.b) (Fig3) (Fig.4). Une polarisation latérale est ainsi introduite le long de la direction de glissement, ce qui pousse les électrons des électrodes supérieure et inférieure à s'écouler afin d'équilibrer pleinement le champ créé par les charges triboélectriques. Un glissement et une fermeture périodiques génèrent une sortie CA. Il s'agit du mode coulissant TENG. Le glissement peut être un mouvement plan, une rotation cylindrique ou une rotation de disque. Des études théoriques connexes ont été menées pour comprendre le mode de base et le réseau structuré TENG.

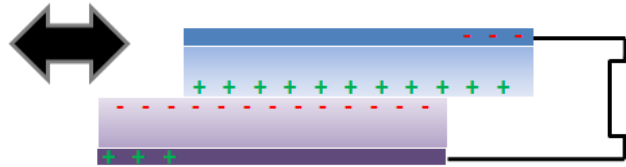


Figure 3 : Le mode coulissant dans le plan TENG. [3]

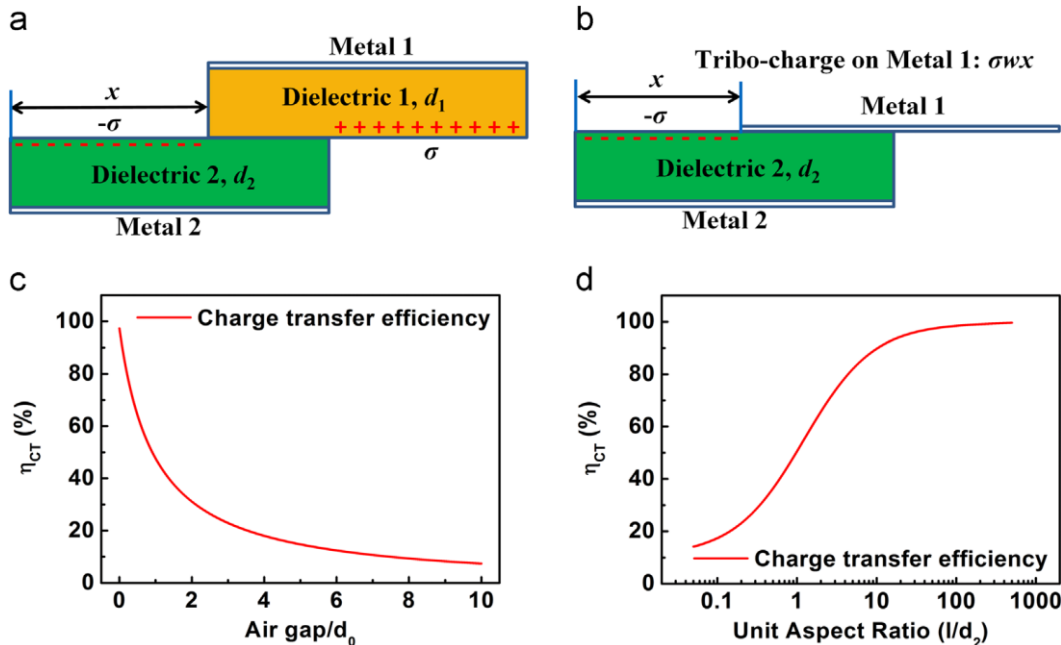


Figure 4 : Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte. La constante diélectrique est de 2 dans ce calcul. [2]

I.1.3 Mode à électrode unique [1]

Les deux modes introduits dans Sectes. 1.1 et 1.2 ont deux électrodes interconnectées par une charge. Ces TENG peuvent se déplacer librement afin de pouvoir fonctionner pour les étuis mobiles. Dans certains cas, l'objet qui fait partie du TENG ne peut pas être connecté électriquement à la charge car il s'agit d'un objet mobile, tel qu'un humain marchant sur un sol. Afin de récupérer l'énergie d'un tel cas, nous avons introduit une seule électrode TENG, dans lequel l'électrode sur la partie inférieure du TENG est mise à la terre (Fig. 1.c) (Fig.5). Si la taille du TENG est finie, une approche ou un départ de l'objet supérieur par le bas changerait la distribution locale du champ électrique, de sorte qu'il y a des échanges d'électrons entre l'électrode inférieure et le sol pour maintenir le changement potentiel de

l'électrode. Cette stratégie de récupération d'énergie peut être à la fois en mode de séparation de contact et en mode de glissement de contact.

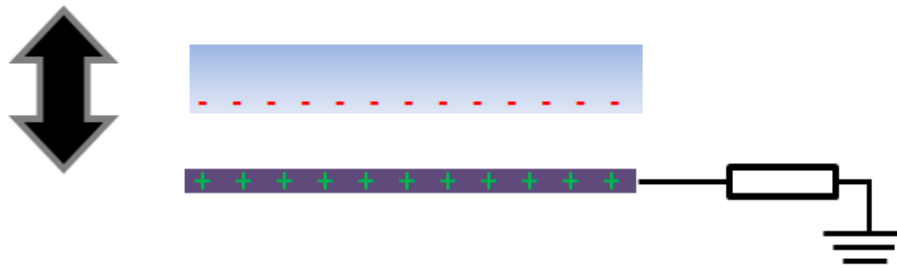


Figure 5 : Mode TENG à électrode unique [3]

I.1.4 Mode triboélectrique autonome [1]

Dans la nature, un objet en mouvement est naturellement chargé en raison de son contact avec l'air ou un autre objet, comme nos chaussures marchant sur des sols généralement chargés. Les charges restent en surface pendant des heures et le contact ou le frottement est inutile dans ce laps de temps car la densité de charge atteint un maximum. Si nous fabriquons une paire d'électrodes symétriques sous une couche diélectrique et que la taille des électrodes et la distance entre les deux sont du même ordre que la taille de l'objet en mouvement, l'objet s'approchant et / ou s'écartant des électrodes crée une distribution de charge asymétrique dans le milieu, qui fait circuler les électrons entre les deux électrodes pour équilibrer la distribution de potentiel locale (Fig. 1.d) (Fig.6). L'oscillation des électrons entre les paires d'électrodes produit de la puissance. Il n'est pas nécessaire que l'objet en mouvement touche directement la couche diélectrique supérieure des électrodes, de sorte qu'en mode rotation, une rotation libre est possible sans contact mécanique direct, de sorte que l'usure des surfaces peut être considérablement réduite. Il s'agit d'une bonne approche pour prolonger la durabilité des TENG.

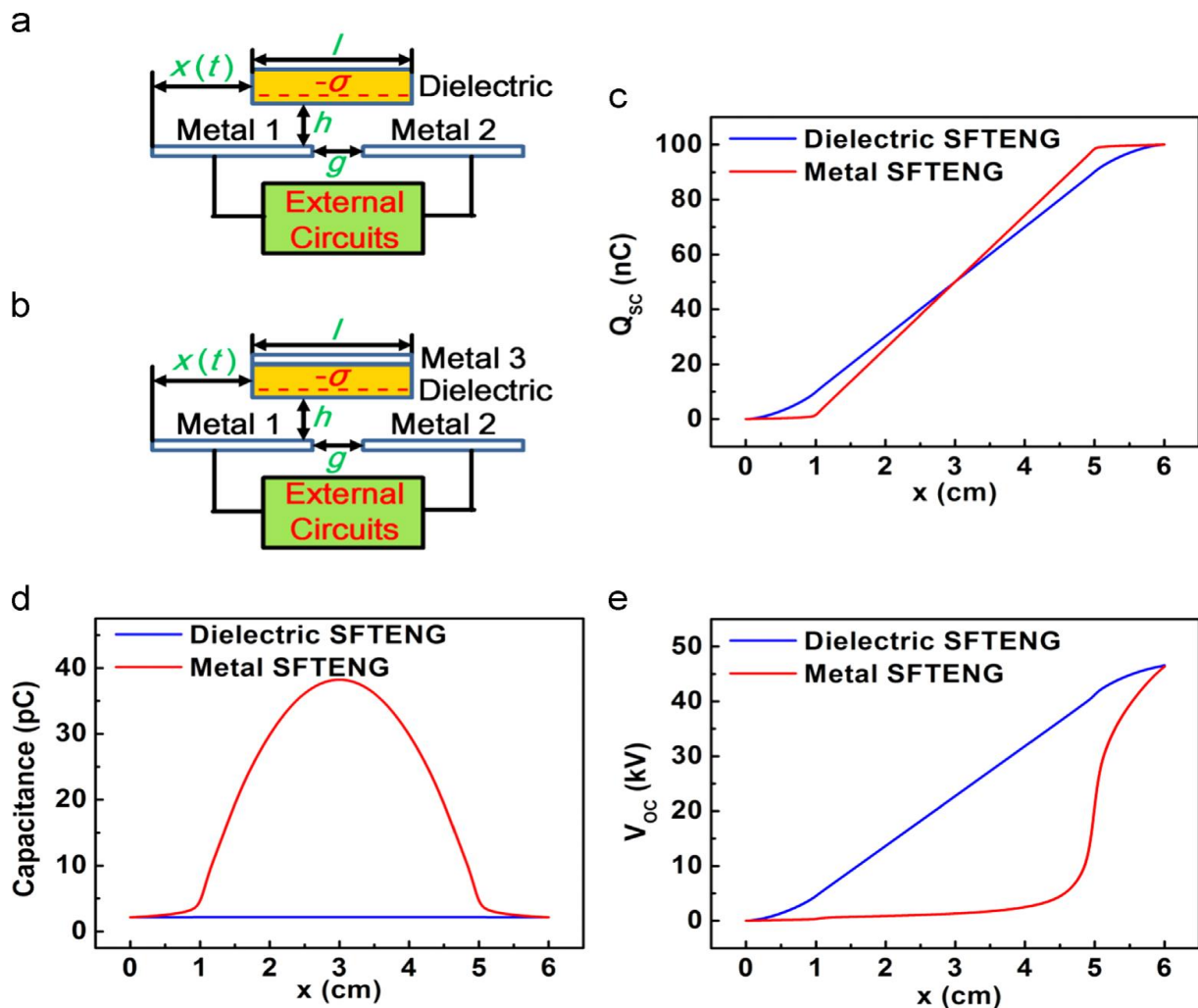


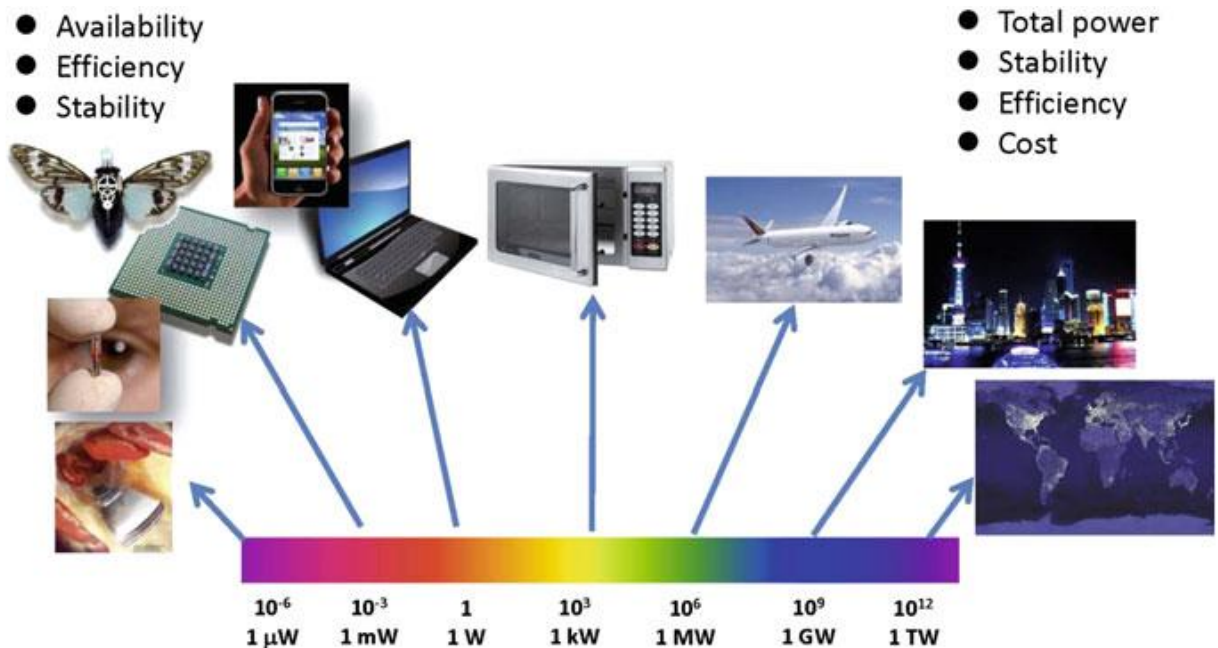
Figure 6 : Modèles et caractéristiques de sortie de base des TENG libres en mode coulissant (a) Modèle FEM d'un SFTENG diélectrique typique. (b) Modèle FEM d'un SFTENG métallique typique. (c – e) Influence du matériau de la couche autoportante sur le caractéristiques de base de la sortie (c) charges transférées en court-circuit sous MACRS, (d) capacité totale entre les deux électrodes, et (e) tension en circuit ouvert sous MACRS. [2]

I.2. Nano énergie et méga énergie [1]

En général, l'énergie signifie généralement l'énergie nécessaire au fonctionnement d'une usine, d'une ville ou d'un pays. Ceci est généralement appelé méga énergie, qui est mesurée à l'échelle de Giga Watt ou Mega Watt. Les caractéristiques générales d'une technologie à grande échelle sont la puissance de sortie totale, la stabilité, l'efficacité de conversion et le coût. Dans de nombreux cas, le coût est la mesure la plus importante, comme pour la cellule solaire (Fig.7).

D'un autre côté, avec l'énorme augmentation du nombre d'appareils électroniques portables, le développement de technologies liées au stockage d'énergie est d'une importance vitale car la plupart sont alimentées par des batteries. Bien que la consommation d'énergie de chacun soit plutôt faible, le nombre total d'appareils est extrêmement énorme. Plus de trois milliards de personnes dans le monde ont des téléphones portables. Avec la mise en place de réseaux de capteurs dans le monde, un nombre gigantesque de capteurs sera distribué dans le monde; il serait impossible d'alimenter un réseau aussi horrible composé de milliards de capteurs en utilisant des batteries, car il faut trouver l'emplacement, remplacer les batteries et inspecter le bon fonctionnement des batteries de temps en temps. La récupération d'énergie dans l'environnement dans lequel le sénateur est employé est une solution possible. C'est le domaine de la nano-énergie, qui est le pouvoir du développement durable, maintient le fonctionnement libre et autonome des micro / nano-systèmes. Les caractéristiques générales des sources d'énergie nano-énergétique sont la disponibilité, l'efficacité et la stabilité (Fig. 7).

Dans le cas où un appareil est utilisé sous la lumière, l'utilisation de l'énergie solaire serait un choix naturel. Dans le cas où un appareil est utilisé à proximité d'un moteur, éventuellement dans l'obscurité, la récupération de l'énergie de vibration mécanique serait le meilleur choix. En ce qui concerne l'application biologique, la récupération de l'énergie de déformation due à l'étirement musculaire serait une bonne approche. Bien que nous puissions avoir une cellule solaire à très haute efficacité, la condition dans laquelle l'appareil fonctionnera peut avoir peu de lumière, la cellule solaire à haute efficacité n'est pas le choix pour cet appareil. Par conséquent, le type d'énergie à récolter dépend de l'environnement de travail de l'appareil. C'est ce que nous entendons par la disponibilité de la source d'énergie pour une application particulière. La stabilité de la source d'énergie est également importante car elle garantit le fonctionnement à long terme de l'appareil. Prenons l'exemple de la cellule solaire, elle dépend fortement du jour ou de la nuit, du temps ou même de la saison. C'est la raison pour laquelle nous avons développé des technologies de conversion d'énergie mécanique en électricité pour des capteurs auto-alimentés.



Nanoenergy: energy required for the sustainable, maintains free and self-powered operation of micro/nano-systems

Figure 7 : Amplitude de la puissance et ses applications correspondantes.

L'énergie à l'échelle macro est destinée à alimenter une ville et même un pays, l'énergie à l'échelle nanométrique est destinée à alimenter de minuscules petits appareils électroniques, ces deux applications sont mesurées par des caractéristiques différentes.

(d'après Wiley [4]).

I.3. Effet Triboélectrique [1]

L'effet triboélectrique est une électrification induite par contact dans laquelle un matériau se charge électriquement après avoir été mis en contact avec un matériau différent par friction. L'effet triboélectrique est une cause générale de l'électrostatique quotidienne. La signature des charges à porter par un matériau dépend de sa polarité relative par rapport au matériau avec lequel il va entrer en contact.

Des milliers d'années. Bien qu'il s'agisse de l'un des effets les plus fréquents que chacun d'entre nous utilise inévitablement tous les jours, le mécanisme de la triboélectrification est toujours à l'étude, peut-être avec débat. Il est généralement admis qu'après l'entrée en contact de deux matériaux différents, une liaison chimique se forme entre certaines parties des deux surfaces, appelée adhérence, et les charges se déplacent d'un matériau à l'autre pour égaliser leur potentiel électrochimique. Les charges transférées peuvent être des électrons ou des ions / molécules. Lorsqu'ils sont séparés, certains des atomes liés ont tendance à garder des électrons supplémentaires, et certains à les donner, produisant éventuellement des charges triboélectriques sur les surfaces.

Les matériaux qui ont généralement un fort effet de triboélectrification sont probablement moins conducteurs ou isolants. Par conséquent, ils captent généralement les charges transférées et les conservent pendant une longue période, accumulant les charges électrostatiques, qui sont généralement attribuées à un effet négatif dans notre vie quotidienne. et les développements technologiques.



Nous pouvons utiliser les exemples suivants pour illustrer les dommages qui peuvent être causés par la triboélectrification. Les avions qui volent développent des charges statiques dues au frottement de l'air sur la cellule, ce qui gênera la communication par radiofréquence. Les charges électrostatiques sont une préoccupation importante pour la sécurité, car elles peuvent provoquer une explosion et enflammer des vapeurs inflammables. Les chariots / voitures pouvant transporter des liquides volatils, des gaz inflammables ou des produits chimiques explosifs doivent être déchargés correctement pour éviter tout incendie. Certains appareils électroniques, notamment les circuits intégrés complémentaires à semi-conducteur à oxyde métallique (SCOM) et les transistors MOSFET, peuvent être accidentellement détruits par une décharge statique à haute tension qui peut être portée par des gants. Par conséquent, la triboélectrification est principalement considérée comme un effet négatif dans notre vie quotidienne, notre fabrication industrielle et nos transports. Par conséquent, par surprise, bien que la triboélectrification soit connue depuis des milliers d'années, elle n'a pas été utilisée pour de nombreuses applications positives. C'est jusqu'à récemment que l'effet triboélectrique a été largement utilisé pour convertir l'énergie mécanique en électricité et comme capteurs mécaniques actifs auto-alimentés.

I.4. Matériaux pour la triboélectrification [1]

Presque tous les matériaux que nous connaissons ont un effet de triboélectrification, du métal au polymère, en passant par la soie et le bois, presque tout. Tous ces matériaux peuvent être candidats à la fabrication de TENG, de sorte que les choix de matériaux pour TENG sont énormes. Cependant, la capacité d'un matériau à gagner / perdre des électrons dépend de sa polarité. John Carl Wilcke a publié la première série triboélectrique dans un 1757 sur l'électricité statique accusations. Le tableau 1 donne une telle série pour certains matériaux conventionnels. Un matériau vers le bas de la série, lorsqu'il est touché à un matériau près du haut de la série, atteindra une charge plus négative. Plus deux matériaux sont éloignés l'un de l'autre sur la série, plus la charge transférée est importante. Récemment, en utilisant le contact entre un métal solide et liquide, tel que le Hg, une méthodologie a été



établie pour mesurer quantitativement la densité de charge de surface à la suite de la triboélectrification.

Tableau 1 Série triboélectrique pour certains matériaux courants suivant une tendance à perdre facilement des électrons (positifs) à gagner des électrons (négatifs) [1.4]

	Polyformaldéhyde 1,3-1,4 (suite)	(Suite)	
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 1	Polyisobutylène	
	Polyamide 6-6	Éponge flexible en polyuréthane	
	Mélanime formol	Polyéthylène téréphtalate	
	Laine, tricotée	Butyral polyvinylique	
	Soie, tissée	Polychlorobutadiène	
	Aluminium	Caoutchouc naturel	
	papier	Polyacrylonitrile	
	Coton, tissé	Acrylonitrile-chlorure de vinyle	
	Acier	Carbonate de polybisphénol	
	Bois	Polychloroéther	
	Caoutchouc dur	Chlorure de polyvinylidène (Saran)	
	Nickel, cuivre	Polystyrène	
	Soufre	Polyéthylène	
	Laiton, argent	Polypropylène	
	Acétate, rayonne	Polyimide (Kapton)	
	Méthacrylate de polyméthyle (Lucite)	Chlorure de polyvinyle (PVC)	
	Alcoho polyvinylique	Polydiméthylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

(a continué)

Table 1.1 (à continuer)

Positive 	Résine aniline-formol	Alcool polyvinylique	 Négatif
	Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyester (Dacron) (PET)	
	Etylcellulose	Polyisobutylène	
	Polyamide 11	Éponge flexible en polyuréthane	
	Polyamide 6-6	Polyéthylène téréphtalate	
	Mélanime formol	Butyral polyvinylique	
	Laine, tricotée	Formo-phénolique, durci	
	Soie, tissée	Polychlorobutadiène	
	Succinate de polyéthylène glycol	Copolymère butadiène-acrylonitrile	
	Cellulos	Caoutchouc nature	
	Acétate de cellulose	Polyacrilonitrile	
	Adipate de polyéthylène glycol	Acrylonitrile-chlorure de vinyle	
	Éponge cellulosique (régénérée)	Polychloroéther	
	Coton, tiss	Chlorure de polyvinylidene (Saran)	
	Élastomère polyuréthane	Poly(2,6-diméthyl polyphénylèneoxyde)	
	Copolymère styrène-acrylonitrile	Polystyrène	
	Copolymère styrène-butadiène	Polyéthylène	
	Bois	Polypropylène	
	Caoutchouc dur	Carbonate de polydiphénylpropane	
Méthacrylate de polyméthyle (Lucite)	Polyéthylène téréphtalate		
Alcool polyvinylique	Chlorure de polyvinyle (CPV)		
(a continué)	Polytrifluorochloroéthylène		
	Polytétrafluoroéthylène (téflon)		

I.5.Générateur Van de Graff [1]

Le générateur triboélectrique traditionnel est un appareil mécanique qui produit de l'électricité statique ou de l'électricité à haute tension par charge par contact. Les plus populaires sont la machine Wimshurst et le générateur Van de Graaff, inventés respectivement en 1880 et 1929. Les deux machines utilisent les charges statiques accumulées générées par la triboélectrification. Un simple générateur Van de Graaff est constitué d'une bande de caoutchouc (ou d'un matériau diélectrique flexible similaire) passant sur deux rouleaux de matériau différent, dont l'un est entouré d'une sphère métallique creuse, comme le montre la Fig.8. Deux électrodes, (2) et (7), sous la forme de rangées en forme de peigne de pointes métalliques pointues, sont positionnées près du bas du rouleau inférieur et à l'intérieur de la sphère, sur le rouleau supérieur. Le peigne (2) est connecté à la sphère et le peigne (7) à la terre. Le caoutchouc de la courroie se chargera négativement tandis que le verre acrylique du rouleau supérieur se chargera positivement. La courroie emporte une charge négative sur sa surface intérieure tandis que le rouleau supérieur accumule une charge positive. Ensuite, le champ électrique puissant entourant le rouleau supérieur positif (3) induit un champ électrique très élevé près des points du peigne voisin (2). Aux points, le champ devient suffisamment élevé pour ioniser les molécules d'air, et les électrons sont attirés vers l'extérieur de la ceinture tandis que les ions positifs vont au peigne. Au peigne (2), ils sont neutralisés par les électrons qui étaient sur le peigne, laissant ainsi le peigne et l'enveloppe externe attachée (1) avec moins d'électrons nets. La charge positive en excès s'accumule sur la surface externe de la coque externe (1), ne laissant aucun champ à l'intérieur de la coque. L'induction électrostatique par cette méthode se poursuit, accumulant de très grandes charges sur la coque.

Dans l'exemple, le rouleau inférieur (6) est en métal, qui prélève une charge négative sur la surface intérieure de la courroie. Le peigne inférieur (7) développe à ses points un champ électrique élevé qui devient également suffisamment grand pour ioniser les molécules d'air. Dans ce cas, les électrons sont attirés par le peigne et les ions d'air positifs neutralisent la charge négative sur la surface extérieure de la ceinture ou se fixent à la ceinture. À mesure que la courroie continue de se déplacer, un « courant de charge » constant passe par la courroie et la sphère continue d'accumuler une charge positive jusqu'à ce que le taux de perte de cette charge (par fuite et décharges corona) soit égal au courant de charge. La sphère métallique (8) est reliée à la terre, tout comme le peigne inférieur (7); les électrons sont tirés du sol du fait de l'attraction par la sphère positive et lorsque le champ électrique est suffisamment important (voir ci-dessous), l'air se décompose sous la forme d'une étincelle de

décharge électrique (9). Étant donné que le matériau de la bande et des rouleaux peut être sélectionné, la charge accumulée sur la sphère métallique creuse peut être rendue positive (déficiente en électrons) ou négative (excès d'électrons).

Le générateur Van de Graaff est une source haute tension, et il n'y a pas de courant sauf en cas de décharge. Pour une électrode sphérique polie de 30 cm de diamètre, on pourrait s'attendre à ce qu'elle développe une tension maximale d'environ 450 kV.

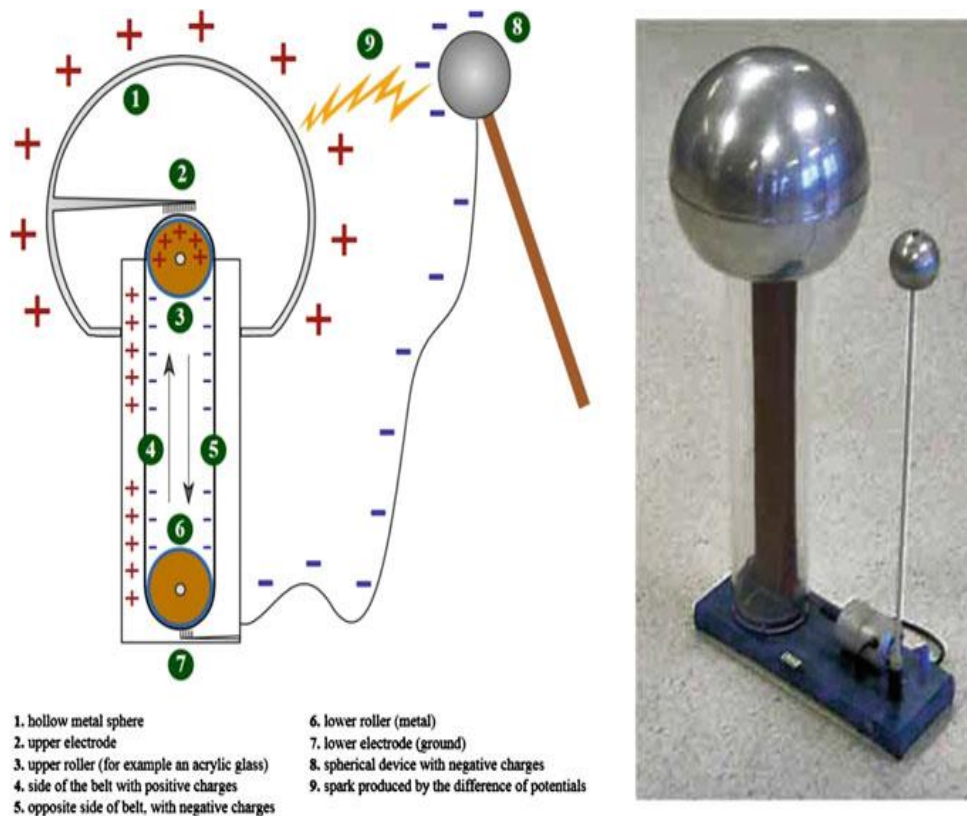


Figure 8 : Le générateur Van de Graaff et son mécanisme de fonctionnement.[1]

I.6.Cas d'étude : Arthroplastie totale du genou

L'arthroplastie totale de genou (ATG) est une opération chirurgicale qui consiste à remplacer entièrement l'articulation du genou par une prothèse suite à plusieurs maladies (arthrose, ostéoporose, usure et défauts des tissus mous de l'articulation, déchirures des ligaments et des cartilages). Pour éliminer la douleur et rétablir la mobilité du genou, la prothèse doit être positionnée de manière à garantir l'équilibre ligamentaire au niveau des deux ligaments collatéraux du genou(voir figure 10).

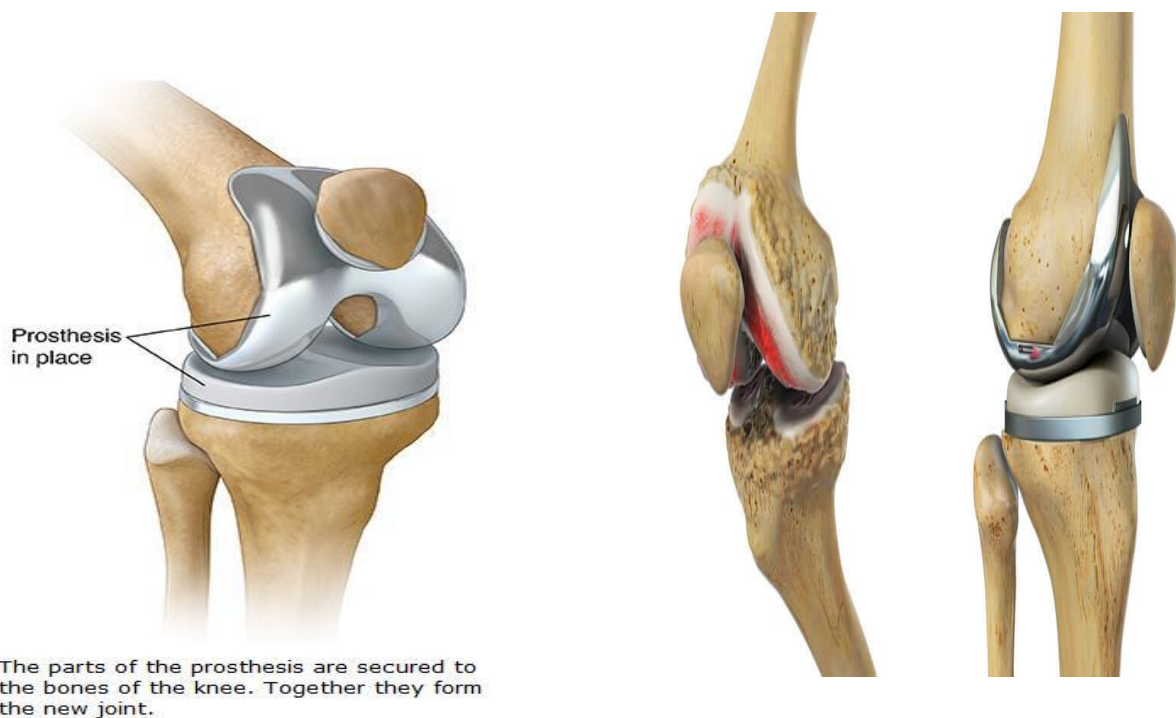


Fig.9 : Arthroplastie totale de genou (ATG)

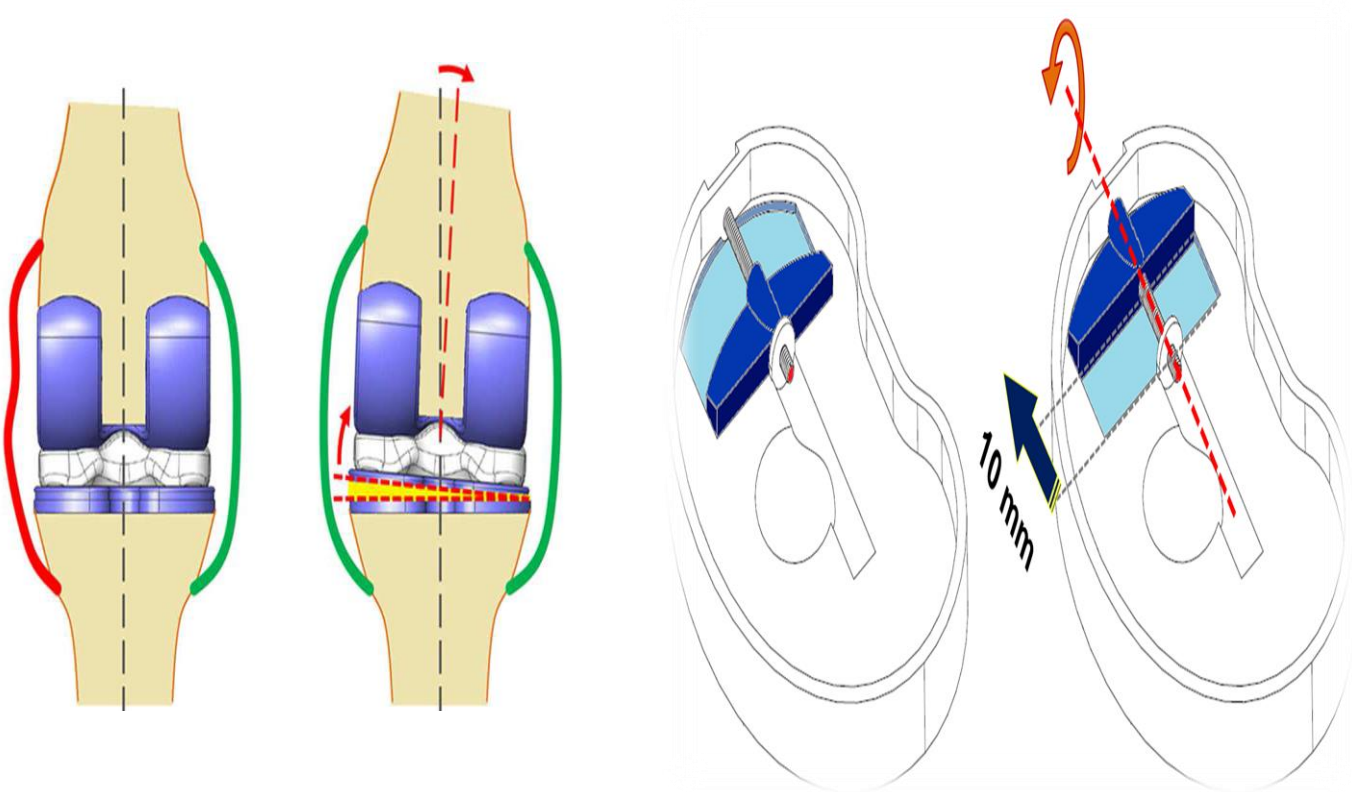


Fig.10 : Schéma d'une prothèse intelligente

Dans ce mémoire de master, une étude de modélisation d'un nano-générateur basé sur l'effet triboélectrique, et placé sur la prothèse dite 'intelligente'. Les frottements entre les deux couches du nano-générateur sous l'effet triboélectrique entraînent une génération d'un très faible courant électrique (quelques nano ampères). Ce courant électrique servira au fonctionnement d'un système embarqué contenant des capteurs de force piézoélectriques utilisés pour détecter le relâchement d'un ligament et de décalage de la prothèse par rapport à sa position initiale post-chirurgie, et d'envoyer ainsi les données récoltées au chirurgien par radiofréquence. Grâce à ces données, celui-ci peut estimer au millimètre près le nombre de tours de vis nécessaires pour retendre le ligament, et aussi corriger le positionnement encore une fois de la prothèse.

I.7. Conclusion du chapitre

La découverte du nanogénérateur triboélectrique (TENG) est une étape importante dans le domaine de la conversion de l'énergie mécanique en électricité pour la construction de systèmes autonomes. Il offre un tout nouveau paradigme pour la récupération efficace de l'énergie mécanique à l'aide de matériaux organiques et inorganiques

Le TENG peut être appliqué pour récolter toutes sortes d'énergies mécaniques qui sont disponibles mais gaspillées dans notre vie quotidienne, comme le mouvement humain, la marche, les vibrations, le déclenchement mécanique, la rotation des pneus, le vent, l'eau qui coule et plus Il s'agit du premier domaine d'application majeur de TENG en tant que source d'alimentation à micro / nano-échelle.

En outre, le TENG peut servir de capteur auto-alimenté pour détecter le déclenchement mécanique, la pression, l'étirement des muscles et autres, qui pourraient être commercialisés plus tôt que les moissonneuses d'énergie.

A decorative scroll graphic with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top edge slightly curved. The text is centered on the scroll.

Chapitre II :

Théorie et analyse des
nano-générateurs
triboélectriques

II.1. Introduction [2].

Les nano-générateurs triboélectriques (TENG) basés sur l'électrification par contact et l'induction électrostatique sont devenus une technologie prometteuse dans la récupération d'énergie mécanique, qui présente des mérites uniques, notamment une puissance de sortie élevée, une efficacité élevée, un poids réduit et des matériaux rentables et une fabrication simple.

Les nano-générateurs triboélectriques ont été utilisés comme source d'alimentation directe pour charger une batterie de téléphone portable et ont fonctionné comme des capteurs actifs auto-alimentés. Cependant, il existe encore des exigences pour continuer à améliorer leurs performances de sortie pour des applications de plus en plus pratiques, ce qui exige une conception rationnelle et une optimisation soignée des matériaux et des structures, en particulier lorsque les performances actuelles de TENG sont déjà très élevées. De plus, à l'instar du développement de circuits et de systèmes intégrés CMOS, les systèmes de récupération d'énergie entièrement intégrés qui contiennent des TENG, des circuits de gestion de l'alimentation, des circuits de traitement des signaux, des éléments de stockage d'énergie et / ou des circuits de charge sont essentiels pour les applications pratiques du TENGs. La simulation théorique joue un rôle clé dans la compréhension du mécanisme de travail et l'analyse des performances de sortie de l'ensemble du système. Enfin, du point de vue de la méthodologie, la simulation est toujours une étape nécessaire dans tout le processus de conception de l'appareil, car la réalisation d'expériences de contrôle est généralement longue et peu rentable. Par conséquent, une compréhension théorique approfondie des TENG est absolument urgente dans l'ensemble du domaine de la recherche. Ces connaissances peuvent aider à choisir la structure et les matériaux TENG appropriés, à éviter les conceptions qui nuiraient considérablement aux performances de sortie et à choisir des topologies de niveau système appropriées pour les systèmes intégrés de récupération d'énergie.

L'objectif de ce chapitre est de résumer la recherche en théorie fondamentale des nano-générateurs triboélectriques. Tout d'abord, nous discuterons de leur équation directrice, du modèle de circuit équivalent et de la méthode de simulation. Ensuite, les caractéristiques de sortie intrinsèques (tension en circuit ouvert, charges transférées par court-circuit et capacité inhérente) de deux modes TENG fondamentaux sont discutées en détail.

II.2. Fondamentaux des nano-générateurs triboélectriques : [2]

II.2.1 Comportement capacitif inhérent et équations gouvernantes : relation $V - Q - x$

Le principe de fonctionnement fondamental des TENG est une conjugaison de l'électrisation de contact et de l'induction électrostatique. L'électrisation par contact fournit des charges polarisées statiques et l'induction électrostatique est le principal mécanisme qui convertit l'énergie mécanique en électricité. Le dispositif le plus fondamental basé sur l'électrostatique étant un condensateur, le TENG aura fondamentalement un comportement capacitif inhérent.

Un TENG arbitraire est analysé pour dévoiler son comportement capacitif inhérent. Pour tous les générateurs triboélectriques, il existe des paires de matériaux qui se font face (appelés tribo-paires). La distance (x) entre ces deux couches tribo-électriques peut être modifiée sous l'agitation de la force mécanique. Après avoir été forcée d'entrer en contact l'une avec l'autre, la surface de contact des deux couches triboélectriques aura des charges statiques opposées (tribo-charges), du fait de l'électrification de contact. Outre les couches tribo-paires, il existe deux électrodes soigneusement isolées à l'intérieur du système TENG, ce qui garantit que les charges ne peuvent être transférées qu'entre les deux électrodes via des circuits externes. Si nous définissons les charges transférées d'une électrode à une autre est Q , une électrode aura la charge transférée Q et l'autre électrode aura la charge transférée $+ Q$.

La différence de potentiel électrique entre les deux électrodes de n'importe quel TENG contribue à deux parties. La première partie provient des charges triboélectriques polarisées et leur contribution à la tension est $V_{co}(x)$, qui est fonction de la distance de séparation x . Par ailleurs, les charges Q déjà transférées contribueront également à une partie de la différence de potentiel électrique. Si nous supposons qu'aucune charge triboélectrique n'existe dans cette structure, cette structure est complètement un condensateur typique, donc la contribution de ces charges déjà transférées entre les deux électrodes est $Q/C(x)$, où C est la capacité entre les deux électrodes. Par conséquent, en raison du principe de superposition de potentiel électrique, la différence de tension totale entre les deux électrodes peut être donnée par :

$$V = -\frac{1}{C(x)}Q + V_{oc}(x) \quad (1)$$

Eq. (1) (appelée relation $V-Q-x$) est l'équation qui régit tout TENG, expliquant clairement son comportement capacitif inhérent. La séparation des tribo-charges polarisées générera une différence de potentiel électrique entre les deux électrodes. Si le circuit externe existe entre les deux électrodes, ce potentiel électrique conduira les électrons à circuler d'une électrode à une autre. Ces électrons déjà transférés peuvent filtrer davantage le potentiel

électrique entre les deux électrodes. Dans des conditions de court-circuit (CC), ces charges transférées (Q_{cc}) filtrent complètement le potentiel électrique généré par les charges triboélectriques polarisées. Par conséquent, l'équation suivante peut être facilement dérivée pour les TENG dans des conditions de court-circuit.

$$0 = -\frac{1}{C(x)} Q_{sc}(x) + V_{oc}(x) \quad (2)$$

Ainsi, la relation fondamentale entre Q_{sc} , C et le V_{oc} peut être donné par

$$Q_{sc}(x) = C(x) \cdot V_{oc}(x) \quad (3)$$

II.2.2 Méthode de simulation théorique : [2]

La simulation des systèmes de récupération d'énergie basés sur TENG comprend principalement deux parties, dont la simulation électrostatique et la simulation du circuit de charge.

L'objectif principal de la simulation électrostatique est d'obtenir les fonctions $V_{oc}(x)$ et $C(x)$ dans la relation $V-Q-x$. Deux méthodes sont actuellement développées pour spécifier les relations $V_{oc}(x)$ et $C(x)$. La dérivation analytique est une méthode préférée, mais elle ne fonctionne que pour certaines caractéristiques géométriques telles que les TENG en mode de contact et en mode glissant à électrode à plaque parallèle avec des approximations appropriées. Une méthode plus générale qui fonctionne pour tous les TENG est le calcul numérique basé sur la méthode des éléments finis (MEF). Le calcul des éléments finis peut être facilement réalisé en utilisant un logiciel de simulation FEM commun tel que COMSOL et ANSYS. Dans cette méthode numérique, la valeur des V_{oc} et C est d'abord obtenue à certaines valeurs de x . Ensuite, à partir de l'interpolation de fraction continue, une relation numérique $V_{oc}(x)$ et $C(x)$ peut être générée dans toute la région x .

Une fois que la relation numérique $V_{oc}(x)$ et $C(x)$ est obtenue, les caractéristiques de sortie peuvent être calculées numériquement par simulation de circuit de charge. Lorsque la charge est très simple, l'équation différentielle régissant le système entier peut être facilement dérivée par la loi de Kirchhoff. Par exemple, lorsque la charge est purement résistive, l'équation différentielle gouvernante contenant le TENG et la résistance peut être donnée par :

$$R \frac{dQ}{dt} = V = -\frac{1}{C} Q + V_{oc} \quad (4)$$

II.3. Caractéristiques de sortie intrinsèques TENG et modes fondamentaux [2].

Ci-dessus, nous avons discuté des connaissances fondamentales et de la méthode de simulation des générateurs triboélectriques. Dans cette section, nous irons plus loin en abordant les modes de base et leurs processus d'induction électrostatiques fondamentaux. Ainsi, pour chaque mode TENG, nous discuterons en détail leurs caractéristiques de sortie intrinsèques (c'est-à-dire la tension en circuit ouvert V_{oc} , les charges transférées en court-circuit Q_{cc} , et leur capacité inhérente C).

II.3.1. Générateurs triboélectriques à contact d'électrode attachée.

Le premier mode de fonctionnement fondamental de TENG est appelé TENG en mode de contact d'électrode attachée, qui est basé sur un mécanisme de séparation de charge verticale. C'est également le premier mode TENG démontré expérimentalement. Sur la base des matériaux pour les paires triboélectriques, le TENG à mode de contact à électrode attachée est principalement divisé en deux catégories : les types diélectriques à diélectrique et conducteur à diélectrique. Le modèle construit pour un TENG en mode contact diélectrique-diélectrique est illustré sur la figure 11.a. Les deux plaques diélectriques, avec des épaisseurs de d_1 et d_2 et les constantes diélectriques relatives ϵ_{r1} et ϵ_{r2} , respectivement, sont empilées face à face en tant que deux couches triboélectriques.

A la surface externe de ces deux diélectriques, deux couches métalliques sont déposées sous forme de deux électrodes. La distance (x) entre les deux couches triboélectriques peut être modifiée sous l'agitation de la force mécanique. Après avoir été forcées d'entrer en contact l'une avec l'autre, les surfaces internes des deux couches triboélectriques auront des charges statiques opposées (tribo-charges) de densité égale de σ , du fait de l'électrisation de contact. Pour les isolants comme discuté, il est raisonnable de supposer que les tribo-charges sont uniformément réparties sur les deux surfaces avec une décroissance négligeable. Lorsque les deux couches triboélectriques commencent à se séparer l'une de l'autre, avec une augmentation de x , une différence de potentiel (V) entre les deux électrodes sera induite. La quantité de charges transférées entre les deux électrodes, telle que pilotée par le potentiel induit, est définie par Q . Nous choisissons l'état de référence de charge minimum réalisable (ERC MR), donc la quantité instantanée de charges sur l'électrode est Q_+ et Q_- , respectivement.

De même, le modèle de type conducteur à diélectrique est construit, comme le montre la figure 11-b. Dans cette structure, nous n'avons plus le diélectrique 1, dans le présent cas le métal 1 joue deux rôles à la fois comme couche triboélectrique supérieure et comme électrode

supérieure. Par conséquent, les charges totales dans le métal 1 ont maintenant deux parties : l'une est les charges triboélectriques ($S\sigma$), l'autre représente les charges transférées entre les deux électrodes (Q). Ainsi, les charges totales dans le métal 1 sont ($S\sigma - Q$).

Etant donné que la surface (S) des métaux est de plusieurs ordres de grandeur plus grande que leur distance de séparation ($d_1 + d_2 + x$) dans le cas expérimental, il est raisonnable de supposer que les deux électrodes peuvent être considérées comme infiniment grandes. Avec le modèle ci-dessus et l'hypothèse ci-dessus, la relation $V-Q-x$ et les caractéristiques de sortie intrinsèques (V_{oc} , Q_{sc} et C) d'un tel TENG en mode de contact à électrode attachée peuvent être dérivées sur la base de l'électrodynamique, comme indiqué ci-dessous :

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0}(d_0 + x(t)) + \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (5)$$

$$V_{oc} = \frac{\sigma x(t)}{\epsilon_0} \quad (6a)$$

$$Q_{sc} = \frac{S\sigma x(t)}{d_0 + x(t)} \quad (6b)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d_0 + x(t)} \quad (6c)$$

Dans les équations ci-dessus, l'épaisseur diélectrique effective d_0 est définie comme la somme de toutes les épaisseurs du diélectrique d_i entre les deux électrodes métalliques divisée par son épaisseur effective relative ϵ_{ri} , comme illustré par l'équation 7 ci-dessous :

$$d_0 = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\epsilon_{ri}} \quad (7)$$

En plus d'utiliser le théorème de Gauss, nous pouvons dériver sa relation $V-Q-x$ du mécanisme détaillé d'induction électrostatique, à travers lequel nous pouvons montrer le principe de fonctionnement fondamental de ces générateurs triboélectriques.

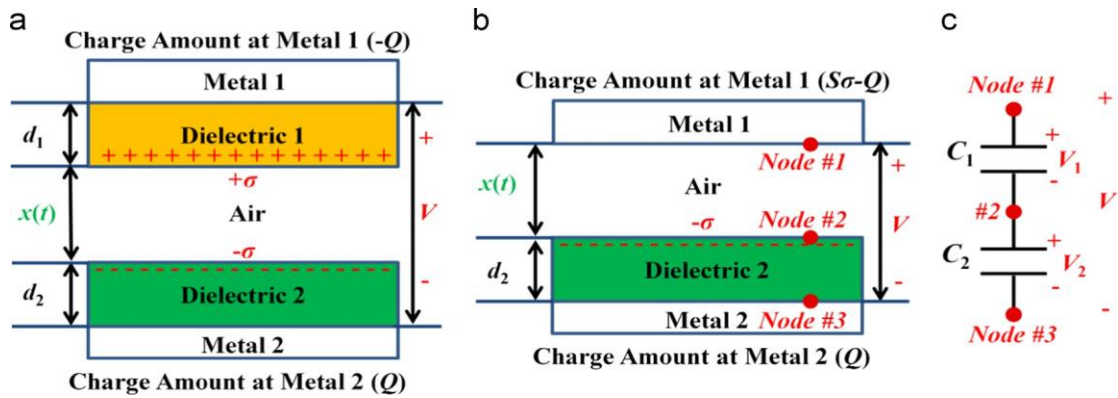


Figure 11. Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique à diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour Plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (Société royale de chimie, 2013 [2].)

Nous devons d'abord définir les nœuds de ce système électrostatique. Un nœud dans un système électrostatique correspond à une surface/volume avec le même potentiel électrique. Étant donné que la taille de la zone est supposée être infiniment grande et que toutes les couches diélectriques sont uniformes, toute la surface du diélectrique tribo-chargé 2 est avec le même potentiel électrique et peut être considérée comme un nœud (nœud 2). Puisque le potentiel électrique de l'électrode métallique entière est également le même, l'électrode 1 et l'électrode 2 sont deux autres nœuds dans ce système électrostatique (nœud 1 et nœud 3, respectivement), comme le montre la figure 11-b. Comme tous les deux nœuds sont connectés par des lignes de champ électrique, une capacité équivalente est formée entre chacun d'eux. Cependant, étant donné que la surface du diélectrique 2 est supposée être infiniment grande, la connexion de ligne électrique du nœud 1 et du nœud 3 est totalement bloquée par le nœud 2. Par conséquent, seules deux capacités existent dans ce système électrostatique, comme le montre la figure 11-c.

Nous considérons maintenant ce système dans des conditions de court-circuit, lorsque le nœud 1 et le nœud 3 ont le même potentiel électrique. Sous cette condition, le montant total des charges sur le nœud 1 et le nœud 3 est $+\sigma S$ tandis que celui sur le nœud 2 est $-\sigma S$.

À partir de la loi de conservation des charges et de la loi de Kirchhoff, le montant des charges sur le nœud 3 est facilement calculé par

$$Q_{node3} = \frac{\sigma S}{1 + C_1(x)/C_2(x)} \quad (8)$$

Ainsi, lorsque x est égal à 0, les charges de court-circuit transférés du nœud 3 au nœud 1 (Q_{cc}) peuvent être donnés par

$$Q_{sc} = \frac{\sigma S}{1 + C_1(x)/C_2(x)} - \frac{\sigma S}{1 + C_1(x=0)/C_2(x=0)} \quad (9)$$

En utilisant le mode capacitance à plaque parallèle, Eq. (9) peut être facilement déduite pour être équivalente à l'Eq. (6b). Grâce à la dérivation ci-dessus, le mécanisme de fonctionnement de base des TENG peut être clairement observé. Le changement de position de la surface tribo-chargée fera varier le rapport de capacité C_1/C_2 , ce qui induira un transfert d'électrons entre les électrodes en condition court-circuit.

Lorsque x est suffisamment grand, l'efficacité de transfert de charge η_{CT} (définie comme le rapport entre les charges transférées finales et les charges triboélectriques totales) peut être donnée par

$$\eta_{CT} = \frac{Q_{sc,final}}{\sigma S} + \frac{1}{1 + C_1(x = x_{max})/C_2(x = x_{max})} - \frac{1}{1 + C_1(x = 0)/C_2(x = 0)} \quad (10)$$

Pour les TENG en mode contact d'électrode attachée ci-dessus, lorsque $x = 0$, C_1 ($\epsilon_0 S/x$) est proche de l'infini tandis que C_2 est un nombre fini $\epsilon_0 S/d_0$, ce qui garantit que la quantité de charge sur le nœud 3 à ce moment est 0. Lorsque x est suffisamment grand (supérieur à $10d_0$), C_1 ($\epsilon_0 S/x$) est proche de 0 tandis que C_2 est toujours égale à $\epsilon_0 S/d_0$, ce qui garantit que la quantité de charge sur le nœud 3 à ce moment est σS . Par conséquent, l'efficacité du transfert de charge maximale pour un TENG en mode de contact à électrode attachée peut atteindre 100%.

À partir de la dérivation ci-dessus, les caractéristiques de sortie intrinsèques des TENG en mode contact à électrode attachée ont les propriétés suivantes. Leur tension en circuit ouvert est linéairement proportionnelle à la distance de séparation x tandis que leur capacité inhérente est inversement proportionnelle à la distance de séparation x . Pour les charges transférées par court-circuit, il a une tendance à la saturation. Q_{cc} atteint rapidement 90% de la valeur de saturation final σS lorsque x ne passe que de 0 à $10d_0$ (illustré sur la figure 12 avec une comparaison avec les TENG à électrode unique). Etant donné que l'épaisseur diélectrique est généralement très petite, la distance de séparation minimale doit être effectivement réduite à 0 pour atteindre une efficacité de transfert de charge élevée. Si la distance de séparation minimale est comparable à $10d_0$, $C_1(x)$ ($\epsilon_0 S/x$) sera toujours beaucoup plus petite que $C_2(x)$ ($\epsilon_0 S/d_0$). Sous cette condition, le rapport de capacité $C_1(x)/C_2(x)$ sera toujours proche de 0 et change peu lorsque x augmente encore, ce qui n'entraînera aucun transfert de charge entre les électrodes. Par ailleurs, lorsque x est déjà comparable à la taille

du dispositif, le dispositif ne peut plus être vu comme infiniment grand, et l'effet de bord dominera la performance. Dans cette condition, la tension en circuit ouvert s'écartera de la relation linéaire.

II.3.2 Générateurs triboélectriques à mode glissant à électrode attachée :

Le deuxième mode de fonctionnement fondamental est appelé générateurs triboélectriques à mode glissant à électrode attachée, basé sur un mécanisme de séparation de charge dans le plan. Plusieurs travaux expérimentaux antérieurs ont également été démontrés. Compte tenu des matériaux à utiliser comme couches triboélectriques, le TENG à mode de glissement à électrode attachée a également deux types : diélectrique à diélectrique et conducteur à diélectrique. Nous prenons tout d'abord la catégorie diélectrique à diélectrique comme exemple.

Le modèle de ce type de TENG a été construit avec des dimensions proches de celles de l'appareil réel, comme le montre la figure 12.a. Considérant que la largeur w de l'ensemble de la structure est beaucoup plus grande que l'épaisseur, un modèle 2D est utilisé pour simplifier le calcul. La taille géométrique des deux diélectriques est l dans le sens longitudinal et d_i ($i = 1, 2$) dans le sens de l'épaisseur. Deux électrodes métalliques sont liées aux deux couches diélectriques. La partie inférieure est fixe tandis que la partie supérieure peut coulisser dans le sens longitudinal. La distance de séparation latérale est définie par x . Lorsque les deux diélectriques sont séparés, la surface inférieure du diélectrique 1 et la surface supérieure du diélectrique 2 ont des charges avec des signes différents au niveau des régions non chevauchantes, qui sont dues à l'effet triboélectrique. Identique aux TENG à contact d'électrode attachée, il est raisonnable de supposer que ces charges triboélectriques sont uniformément réparties sur ces deux surfaces, ce qui est une excellente approximation pour les isolateurs. Aussi, la décroissance des tribo-charges avec le temps peut être négligée sur ces polymères isolants.

La densité de surface des tribo-charges est définie comme σ à la surface du diélectrique 1 et σ à la surface du diélectrique 2. La densité globale des tribo-charges sur la surface superposée peut être considérée comme 0 car la distance entre le centre du positif les charges et les charges négatives sont au niveau atomique. Dans les conditions ERCMR et CO, les charges totales à chaque électrode métallique sont affectées à 0. Si la quantité de charges transférées est définie par Q , la quantité de charge totale sur le métal 1 et le métal 2 est Q et $-Q$, respectivement. Pour les TENG en mode glissant à électrode fixée sur le conducteur diélectrique, la seule différence de structure géométrique est l'absence de diélectrique 1. Dans ce cas, le métal 1 n'est pas seulement la couche triboélectrique supérieure, mais également

l'électrode supérieure elle-même. Lorsque le métal 1 et le diélectrique 2 sont séparés, en raison de l'effet triboélectrique, la surface supérieure de la région séparée du diélectrique 2 a les tribo-charges uniformes (la densité de surface est σ) et la même quantité de tribo-charges de signe opposé existera sur la surface du métal 1. Par conséquent, à la condition CO (ERC MR), la quantité totale de charges sur l'électrode inférieure est de 0. Pour faciliter la compréhension physique, les tribo-charges sur la surface diélectrique dans la région de chevauchement ont été considérées comme annuler les parties de tribo-charge opposées sur la couche métallique supérieure, avec la densité de σ et la quantité de $\sigma w (lx)$. Ainsi, dans notre modèle, la quantité totale de charges sur l'électrode supérieure est σwx .

L'équation analytique pour le cas général des TENG en mode glissant à électrodes attachées ne peut être dérivée et une analyse théorique rigoureuse ne peut être basée que sur la méthode numérique. Mais dans les applications pratiques, puisque L est toujours beaucoup plus grand que d_1 et d_2 et que x est toujours plus petit que $0,9.l$ (en raison de la difficulté d'alignement parfait des deux surfaces diélectriques), une relation analytique approximative $V-Q-x$ peut être dérivée lorsque l'effet de bord peut être négligé dans les conditions ci-dessus.

Pour dériver la relation $V-Q-x$, l'estimation analytique de $C(x)$ et de $V_{oc}(x)$ doit d'abord être obtenue. Nous prenons l'exemple du cas diélectrique-diélectrique. La capacité C est d'abord déduite. Etant donné que l'épaisseur des diélectriques est beaucoup plus petite que leur longueur, le condensateur entre la région chevauchée est la partie dominante de la capacité totale tant que les deux diélectriques ne sont pas complètement séparés. Par conséquent, en utilisant le modèle de condensateur à plaques parallèles, la capacité totale C peut être estimée par l'équation suivante :

$$C = \frac{\varepsilon_0 w (l-x)}{d_0} \quad (11)$$

où d_0 est l'épaisseur diélectrique effective telle que définie dans Eq. (7). V_{oc} peut être estimé connaissant la distribution de charge. Comme la longueur des diélectriques est beaucoup plus grande que l'épaisseur, on peut supposer que dans chaque région, les électrodes métalliques fonctionnent comme des plaques infinies. Selon cette approximation, la distribution de charge est uniforme dans chaque région, et le champ électrique est uniforme le long de la direction y à l'intérieur des diélectriques. Par conséquent, dans un cas idéal, la valeur absolue de la densité de charge de surface est σ pour la région non chevauchée. Pour la région chevauchée, la densité de charge est toujours uniforme. Ainsi, la densité de charge au niveau de la région chevauchée peut être calculée à travers les 0 charges totales à chaque

électrode dans des conditions CO. La distribution de charge idéale en condition CO (en utilisant ERCMR) peut être approximée par les équations suivantes :

Pour la région non chevauchée de l'électrode supérieure :

$$\rho = \sigma \quad (12a)$$

Pour la région superposée de l'électrode inférieure :

$$\rho = \frac{\sigma x}{l-x} \quad (12b)$$

Pour la région non chevauchée de l'électrode supérieure :

$$\rho = -\sigma \quad (12c)$$

Pour la région superposée de l'électrode supérieure :

$$\rho = \frac{\sigma x}{l-x} \quad (12d)$$

En utilisant la distribution de charge indiquée ci-dessus et le théorème de Gauss, le V_{oc} peut être facilement estimé

$$V_{oc} = \frac{\sigma d_0}{\varepsilon_0(l-x)} \quad (13)$$

Ainsi, la relation $V-Q-x$ pour les TENG en mode glissement à électrode attachée lorsque l'effet de bord peut être négligé peut-être représentée comme

$$V = -\frac{1}{C}Q + V_{oc} = -\frac{d_0}{w\varepsilon_0(l-x)}Q + \frac{\sigma d_0 x}{\varepsilon_0(l-x)} \quad (14)$$

Pour les TENG conducteur-diélectrique lorsque l'effet de bord peut être négligé, une analyse similaire donne les mêmes résultats. Le processus d'induction électrostatique des TENG à électrode attachée en mode glissant peut également être parfaitement compris à travers la discussion des nœuds similaire aux TENG en mode de contact à électrode attachée. Par souci de simplicité, nous prenons les TENG en mode glissant à électrode attachée conducteur à diélectrique comme un exemple principalement parce qu'il n'a qu'une seule surface tribo-chargée et que nous analysons uniquement la distribution de la capacité aux deux extrémités ($x = 0$ et $x = x_{max}$). Lorsque $x = 0$, la capacité entre la surface diélectrique tribo-chargée et l'électrode supérieure est infinité tandis que la capacité entre la surface diélectrique tribo-chargée et l'électrode inférieure est un nombre fini grand, donc le rapport entre ces deux capacités est infinité. Lorsqu'une séparation complète a déjà été atteinte, la capacité entre la surface diélectrique tribo-chargée et l'électrode supérieure est proche de 0 tandis que la capacité entre la surface diélectrique tribo-chargée et l'électrode inférieure reste toujours la même, de sorte que le rapport entre ces deux capacitances est maintenant de 0. Ce

changement de rapport de capacité dû au changement de la position relative de la surface tribo-chargée induira un transfert d'électrons entre les électrodes en condition CC. D'après la discussion ci-dessus, le mécanisme de fonctionnement détaillé des TENG en mode glissant à électrode attachée est presque le même que celui des TENG en mode de contact à électrode attachée et l'efficacité de transfert de charge maximale pour ce type de TENG peut également atteindre 100%.

D'après la dérivation ci-dessus, les caractéristiques de sortie intrinsèques des TENG à mode glissant à électrode attachée ont les propriétés suivantes. Leur charge transférée par court-circuit est linéairement proportionnelle à la distance de séparation x tandis que leur capacité inhérente est linéairement proportionnelle à la longueur de la région superposée $(l - x)$. Pour la tension en circuit ouvert, elle augmente considérablement lorsque x est proche de l en raison de la diminution rapide de la capacité.

Une considération importante pour les TENG à mode de glissement à électrode fixée est que leur sortie est très sensible à l'espace entre les surfaces des deux couches triboélectriques. Par exemple, si l'épaisseur d'un tel espace est la même que d_0 , la capacité entre la surface diélectrique tribo-chargée et l'électrode supérieure lorsque $x = 0$ est la même que l'autre capacité. Et le rapport de capacité ne peut changer de 1 à 0 que lorsque x passe de 0 à x_{\max} . Par conséquent, l'efficacité de transfert de charge sera dégradée à seulement 50%, comme le montre la figure 13c. Etant donné que d_0 est toujours un petit nombre, la tolérance d'écart des TENG à mode glissant à électrode attachée est médiocre, ce qui peut être améliorée en utilisant des TENG autonomes à mode glissant décrits dans la section suivante.

En outre, une autre considération importante pour les TENG en mode glissant à électrodes attachées est l'effet de bord. Lorsque l'épaisseur des diélectriques est comparable à leur longueur, un effet de bord fort dominera la sortie et l'efficacité du transfert de charge sera fortement dégradée. La figure 13.d montre les résultats de la simulation MEF pour une électrode connectée conducteur à diélectrique TENG dont la constante diélectrique est de 2. Lorsque le rapport hauteur / largeur de la longueur et de l'épaisseur diélectrique diminue de 500 à 0,05, l'efficacité de transfert de charge diminue de près de 100% à environ 14%. Habituellement, l'effet de bord peut être ignoré dans les TENG pratiques à électrode fixe à mode coulissant avec une seule unité. Cependant, cet effet deviendra dominant dans les TENG structurés par réseau d'électrodes attachées lorsque le réseau sera suffisamment fin, ce que nous discuterons en détail dans la section suivante.

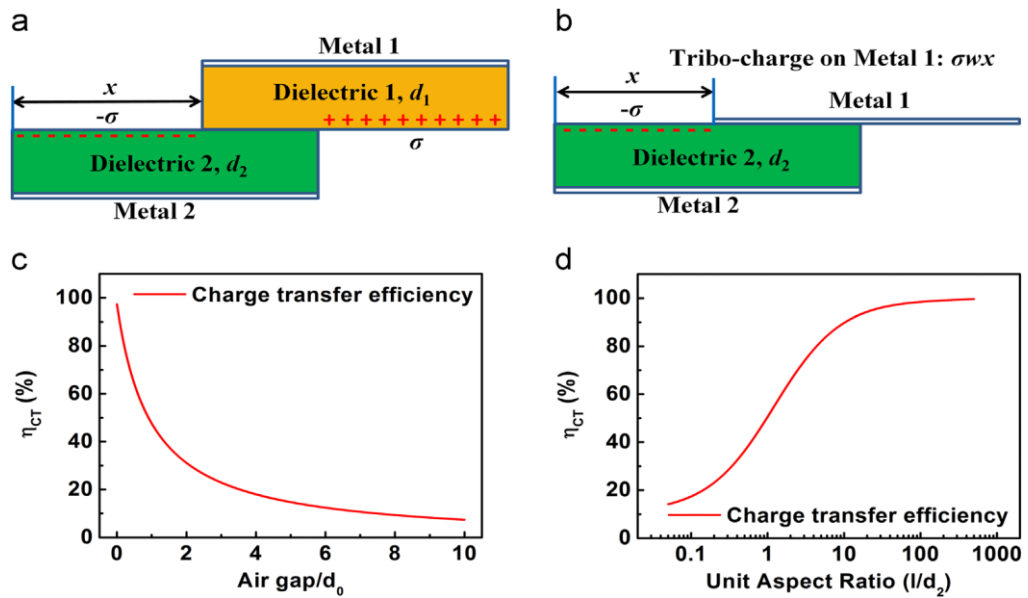


Figure 12. Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte. La constante diélectrique est de 2 dans ce calcul. [2]

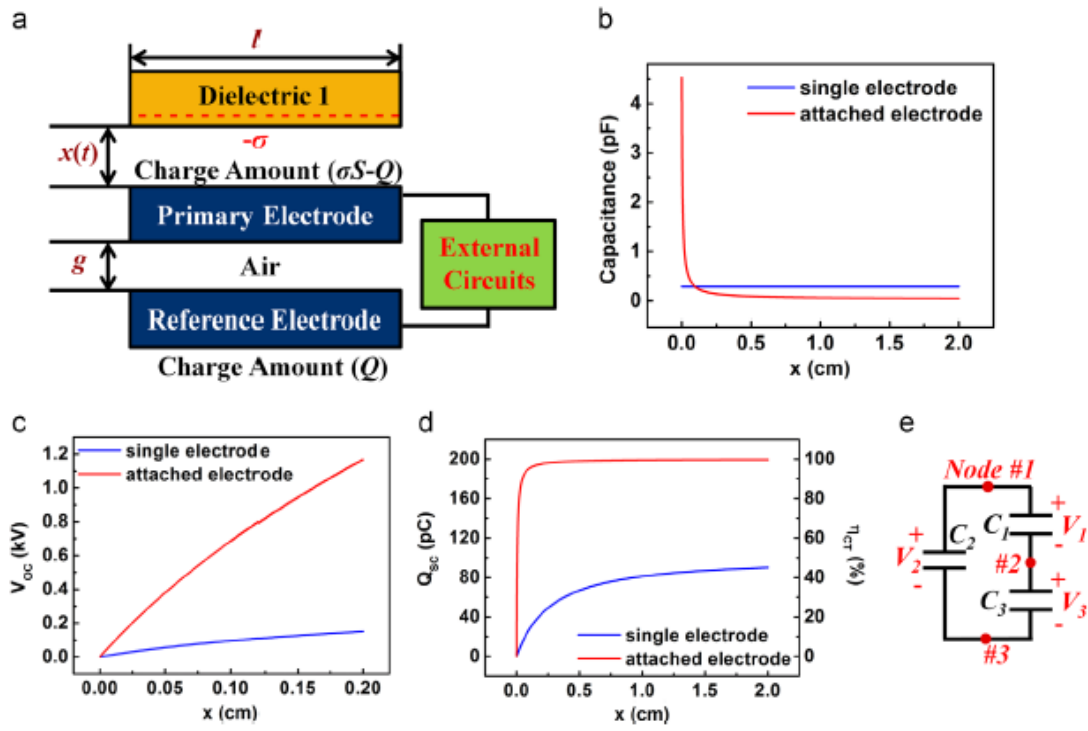
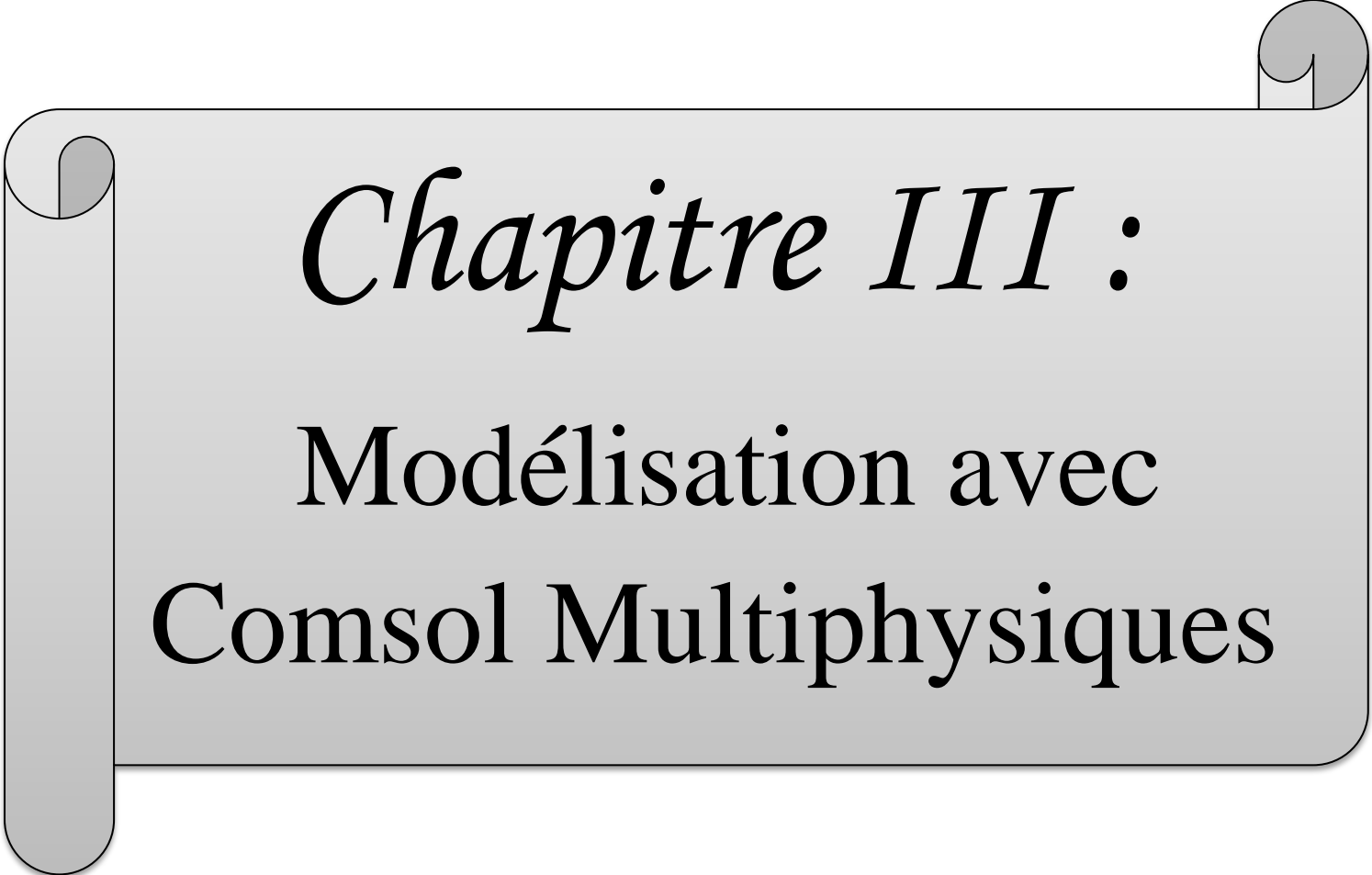


Figure 13. Caractéristiques de sortie intrinsèques des SETENG en mode contact conducteur-diélectrique. (a) Structure du modèle FEM. (b – d) Capacité calculée (b) entre les deux électrodes, (c) tension de circuit ouvert et (d) charges transférées en condition de court-circuit de SETENG à différents x , avec comparaison avec les résultats des TENG à électrode attachée. (e) Modèle de circuit équivalent contenant trois capacités pour les SETENG en condition de circuit ouvert (CO). (Reproduit de la réf.

Copyright de 2014 Wiley. [2]).

II.4. Conclusion du chapitre

Dans de ce chapitre, on a essayé de résumer les recherches concernant la théorie fondamentale des nano-générateurs à effet triboélectrique. On a commencé par discuter les équations fondamentales qui les régissent, ensuite le modèle du circuit équivalent et de la méthode de simulation. Finalement, les caractéristiques de sortie intrinsèques (tension en circuit ouvert, charges transférées par court-circuit et la capacité de charges inhérente) de deux modes TENG fondamentaux (contact et glissant, respectivement) ont été discutées en détails.

A decorative scroll graphic with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top edge slightly curved. The text is centered on the scroll.

Chapitre III :
Modélisation avec
Comsol Multiphysiques

III.1. Introduction [5]

Les systèmes deviennent complexes avec les développements technologiques, et les méthodes d'études basées sur les solutions analytiques simples ne suffisent plus pour les concevoir. Grâce à l'évolution de l'informatique et des méthodes numériques, on tend de plus en plus vers une meilleure solution proche des phénomènes réels.

Comsol Multiphysiques est un environnement de simulation et de modélisation de presque toutes les physiques. Son point fort : le couplage entre différents phénomènes. Des modules optionnels offrent des interfaces spécialisées en acoustique, génie chimique, géophysique, électromagnétique, transfert de chaleur et mécanique de structure, ainsi qu'avec les outils de CAO.

L'objectif principal de ce mémoire de master est la simulation numérique sous Comsol d'un système de récupération d'énergie à partir d'un effet triboélectrique d'une structure soumise à deux types de modes de triboélectriques.

III.2 : Code de calcul utilisé [6]

III.2.1 : Présentation générale de Comsol Multiphysiques

COMSOL a été créée en 1986 à Stockholm en Suède et n'a cessé de grandir pour compter aujourd'hui des bureaux au Danemark, en Finlande, Norvège, Allemagne, France, au Royaume-Uni et deux aux Etats-Unis. Il s'agit d'un programme informatique qui permet de modéliser et de simuler. Il est plus récent qu'Ansys, Nastron et Abaqus. S'intègre bien avec Matlab (utilise la même syntaxe que Matlab).

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab - qui signifie Finite Elements Modeling Laboratory- est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux. Développé initialement comme une tool-box de Matlab, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques, particuliers. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple, ou encore l'élévation de température dans un conducteur due au passage d'un courant électrique.

Des fonctions avancées permettent d'entrer manuellement des EDF spécifiques. De plus, les données du logiciel sont accessibles depuis Matlab, ce qui permet la réalisation de scripts.

III.2.2 : Utilisation de Comsol multiphysics [6]

Comsol utilise des techniques de résolution numérique très avancées pour la modélisation, la simulation et la visualisation des applications de tous les champs de la physique, de la technologie, et des mathématiques appliquées. Il est applicable dans tous les domaines de la science et de l'ingénierie, un pré-conditionneur multi-grille optimise les routines de calcul, entraînant une réduction du temps de calcul et de la mémoire nécessaire. Combiné avec la technologie 64-bit, Comsol traite des problèmes de plusieurs dizaines de millions de degrés de liberté. Par exemple, le calcul du champ électrique d'un réflecteur radar réclame 20 millions de degrés de liberté.

Dans le domaine de la mécanique, le code Comsol est un outil puissant devenu partie intégrant des méthodes de conception. Il permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire en statique et dynamique, des problèmes non linéaires (élasto-viscoplasticité, hyper élasticité) ... ; etc (voir Fig.14).

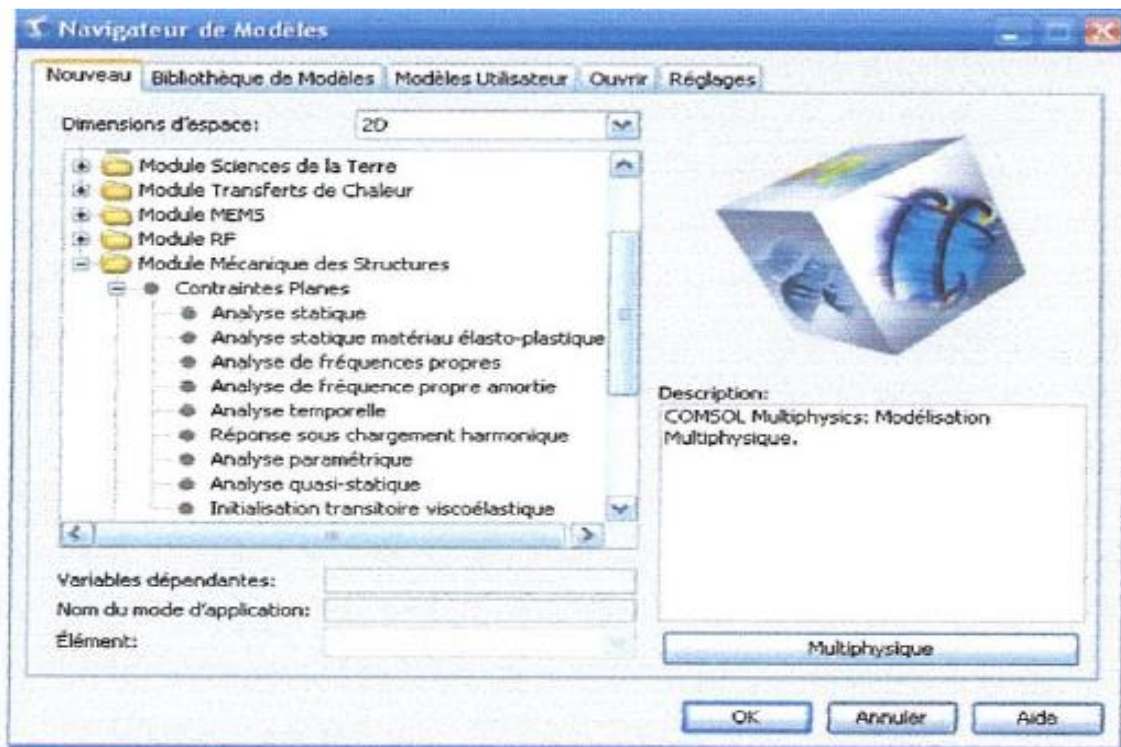


Figure 14 : Fenêtre principale de Comsol Multiphysics.

III.2.3 : Etapes du processus de modélisation [6]

Comsol multiphysics permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo fluide, ... etc.). Décrits par les équations aux dérivées partielles, cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels (voir Fig.15).

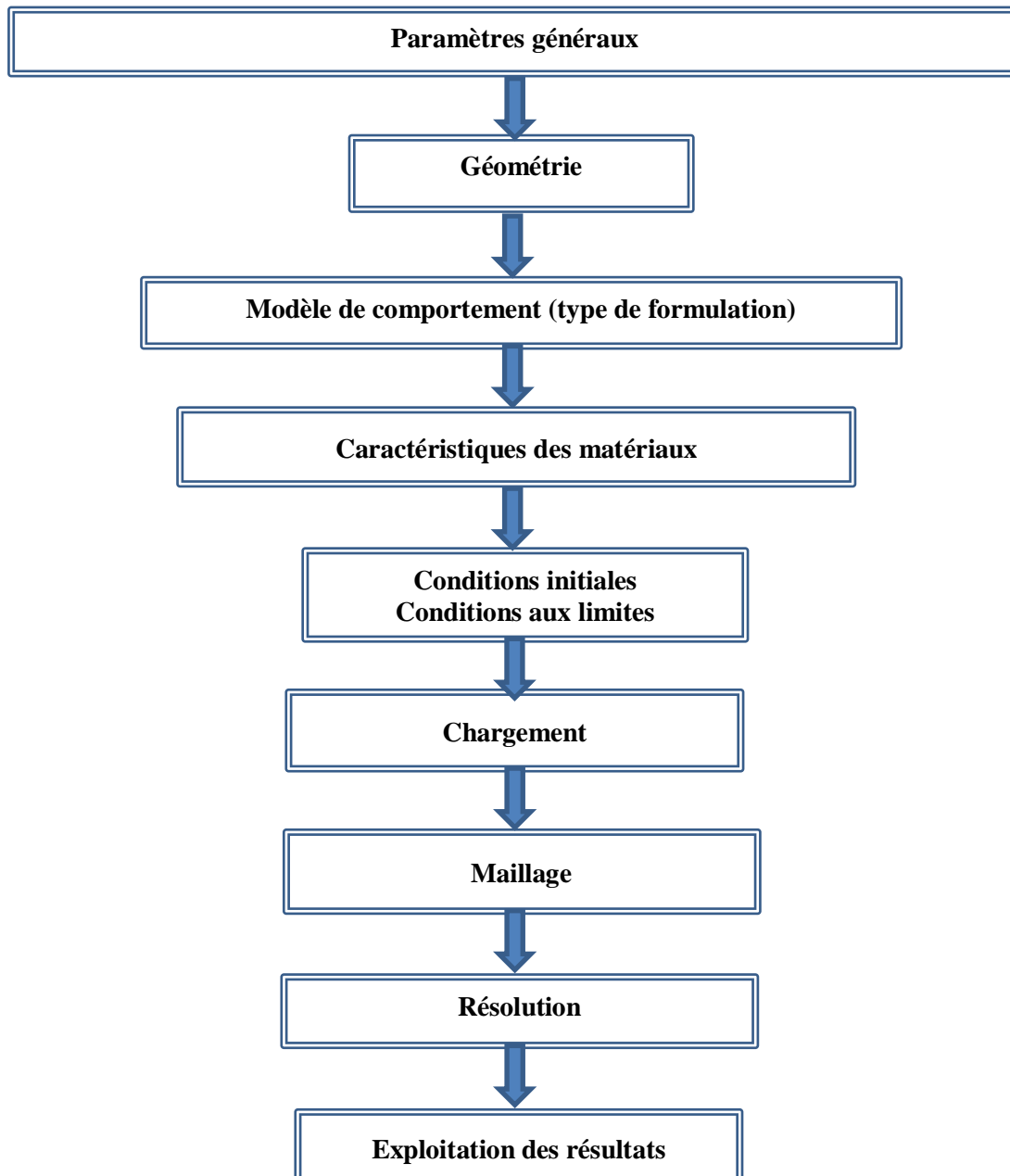


Figure 15. Organigramme général pour la résolution d'un problème avec Comsol Multiphysics

Le logiciel Comsol Multiphysics possède un environnement de programmation (Comsol Script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du Problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « solveurs », pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendants du temps. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

- 1- La Construction de la géométrie : la première étape est d'extruder une géométrie 2D vers une géométrie 3D
- 2- Le maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée.
- 3- Définition de la physique : définition des constantes et des expressions.
- 4- Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est disposition dans Comsol multiphysics (voir Fig.16).

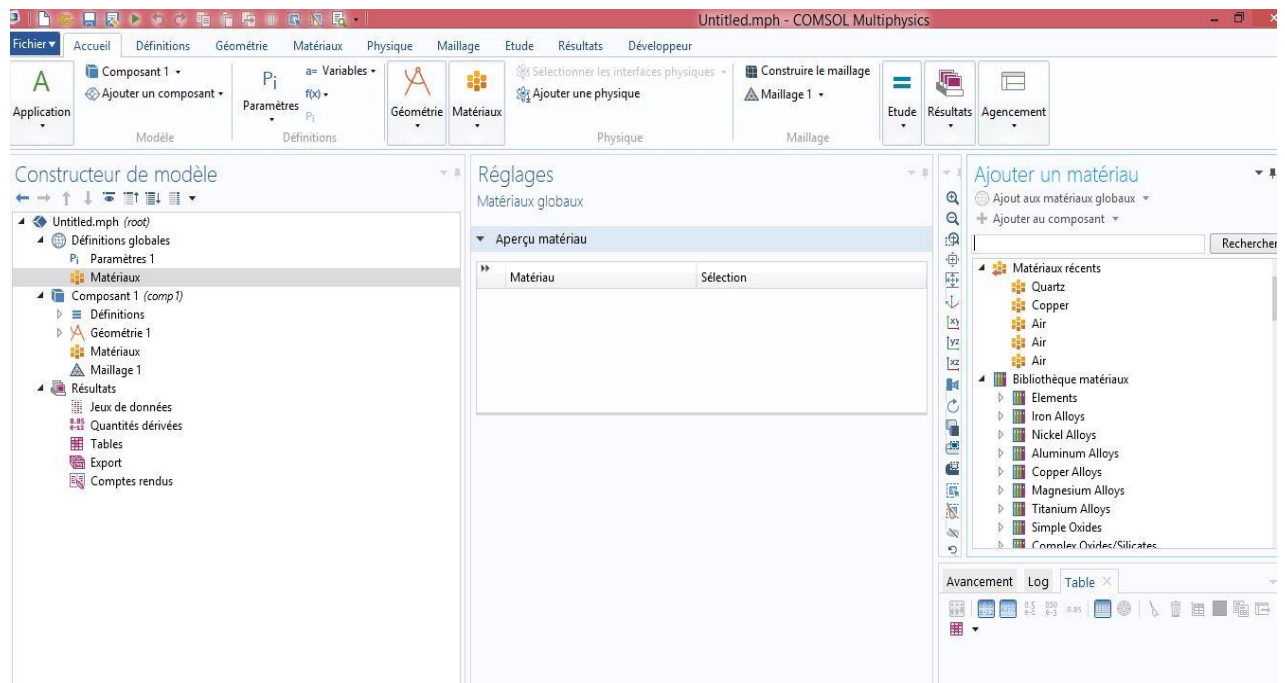


Figure 16. Définition des paramètres d'un matériau dans COMSOL

- 5- Les conditions aux limites : on impose des conditions sur certaines frontières,
- 6- Exploitation des résultats post-traitement : lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post-processing, qui permet d'analyser les résultats lors de la conception. Il permet d'asseoir le bien-fondé des concepts retenus pour s'assurer d'un dimensionnement correct, aussi bien dans les situations normales que perturbées; il aide à trouver les solutions en cas de défaillance.

Ainsi, avec les nouvelles techniques de maillage structuré, l'utilisateur choisit des éléments quadrilatère, hexaèdre ou prisme pour optimiser la discrétisation d'une géométrie donnée.

III.2.4 : Description des différents modules de Comsol [5]

➤ **Module AC/DC**

le module AC/DC prépare le terrain pour la modélisation de la performance des condensateurs, inductances, des moteurs et micro capteurs. Bien que ces dispositifs soient principalement caractérisés par l'électromagnétisme, ils sont également affectés par d'autres types de physique. Les effets thermiques par exemple, peuvent modifier les propriétés électriques des matériaux, tout comme en électromécanique les déformations et les vibrations dans les générateurs doivent être pleinement compris au cours d'une conception du processus.

➤ **Module de transfert de chaleur**

Les problèmes impliquant toute combinaison de conduction, convection et du rayonnement sont résolus facilement avec le module de transfert de chaleur. Il trouve une vaste utilisation dans des systèmes qui impliquent la production et la circulation de la chaleur dans n'importe quelle forme géométrique. Une variété de modélisations spécialisées interfaces sont disponibles pour différentes formulations et des applications telles que le rayonnement à partir d'une surface, flux non isotherme, le transfert de chaleur dans des structures en couches minces et les coquilles, et enfin le transfert de chaleur dans les tissus biologiques.

➤ **Module MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**

Le module MEMS aborde les questions de conception qui se posent dans le micro-monde, telle que la modélisation des phénomènes physiques dans les actionneurs et capteurs micros-fluidiques ou encore des dispositifs piézoélectriques. La plupart des applications MEMS sont multi-physiques par leur nature même, et comprennent généralement l'électromagnétique structurelle, thermique structurelle, fluide-structure (FSI), et les interactions électromagnétisme-fluide. A cette fin, le module MEMS fournit des équations et des paramètres optimisées pour la modélisation simple et couplée.

➤ **Module RF**

Modélisation en RF, micro-ondes et optique ingénierie nécessite la résolution de l'échelle du dispositif de transmission, tout en capturant les effets de plusieurs ordres de grandeur. Le module RF nous offre les outils nécessaires pour relever ce défi, y compris les couches parfaitement adaptées et les meilleurs solveurs disponibles.

➤ **Module mécanique des structures**

Ce module est spécialisé dans l'analyse des composants et sous-systèmes où il est nécessaire d'évaluer les déformations de la structure. Il contient également une application spéciale pour la modélisation des coquillages, des poutres et des plaques.

➤ **COMSOL Import Module CAD**

Le module d'importation CAO simplifie grandement le passage de dessins géométrique créés avec les outils de CAO spécialisés dans l'environnement de simulation COMSOL multiphysics et de ses modules. Justement, ce module est nécessaire pour importer un dessin type 3D d'un implant du genou afin de l'utiliser pour la modélisation de l'effet triboélectrique proposé dans ce mémoire de master.

➤ **Module CFD (Computational Fluid Dynamic) [7]**

Module Le CFD permet la simulation de composants et systèmes impliquant des écoulements de fluides complexes. Le module CFD fournit des interfaces physiques prêtes à l'emploi, configurées pour recevoir des données d'entrée du modèle via l'interface graphique et pour utiliser ces données en vue de formuler les équations du modèle. Les interfaces physiques propres au CFD Module permettent de modéliser la plupart des écoulements de fluides, notamment les écoulements compressibles, non isothermes, non newtoniens, diphasiques et en milieu poreux; le tout dans les régimes d'écoulement laminaire et turbulent, stationnaire ou non.

➤ **Module Chemical Réaction Engineering : [7]**

Le module Chemical Réaction Engineering, permet de simuler le transport de matière et de chaleur avec des cinétiques chimiques arbitraires dans tous les types d'environnements (gaz, écoulement de fluide, milieu poreux, sur les surfaces et dans les phases solides ou une combinaison de ces environnements). Il permet ainsi d'optimiser les réacteurs chimiques, les équipements de filtration, les mélangeurs et autres procédés.

L'assistant de modèle peut guider l'utilisateur à créer un nouveau modèle. Cet assistant guidera l'utilisateur dans la mise en place de la dimension de l'espace, la physique, et le type d'étude, en quelques étapes (voir Fig.17) :

1. Sélection de la dimension de l'espace pour votre composant de modèle : 3D, 2D...(Fig.17).

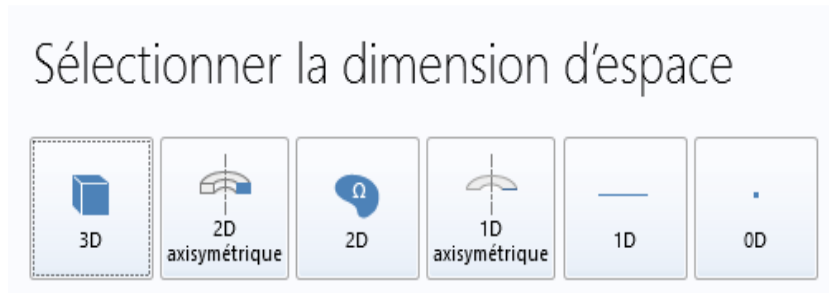


Figure 17: Représentation des différentes dimensions d'espace dans COMSOL

2. Il y a plusieurs physiques qu'on pourra sélectionner dans un menu déroulant (voir Fig.18).

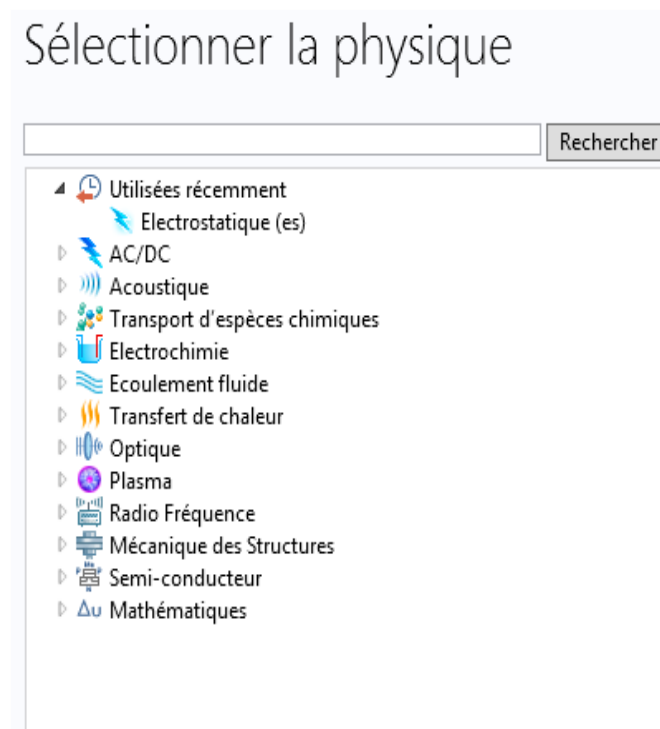


Figure 18. Choix du type de la physique dans COMSOL

3. La Sélection du type d'étude que représente le solveur ou un ensemble de solveurs qui sera utilisé pour le calcul (voir Fig.19 et Fig.20).

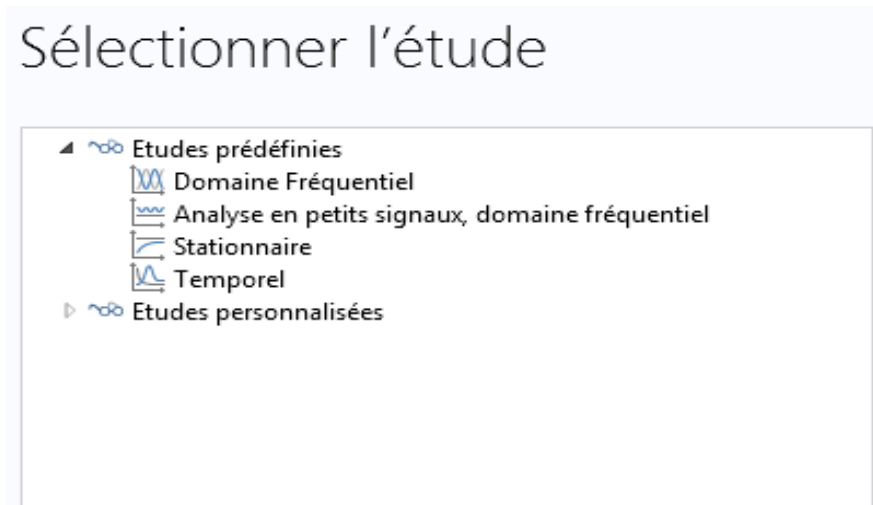


Figure 19. Espace d'étude dans COMSOL

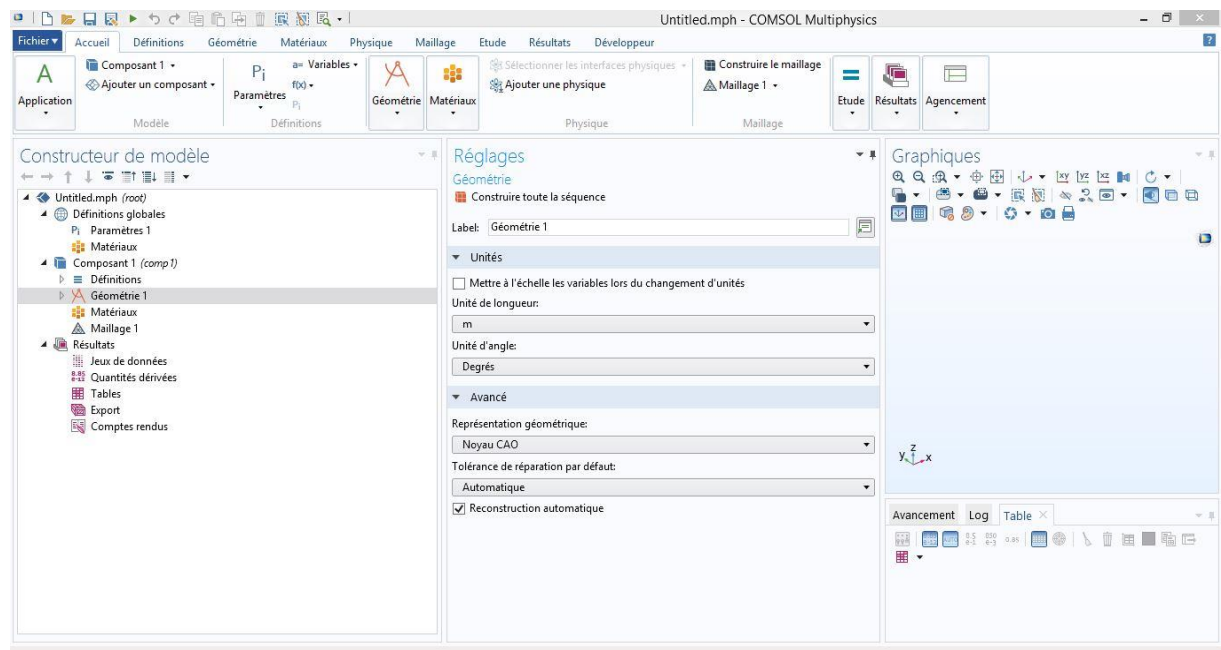


Figure 20. Espace de travail dans COMSOL

➤ COMSOL Script

Toutes les capacités de modélisations multi-physiques de Comsol sont disponibles via Script COMSOL. Il permet d'interagir avec des modèles à travers un utilisateur graphique d'interface interactif, pour à peu près n'importe quel objet de l'analyse que nous pouvons imaginer. Le COMSOL Script comprend plus de 600 commandes de haut niveau pour

l'analyse des données et la visualisation. Il suffit de sauvegarder un modèle multiphysique de COMSOL comme un M-file modèle, puis étendre notre simulation et l'analyse.

III.3 Utilisation du Comsol pour modéliser l'électrostatique [9]

III.3.1. Principes électrostatiques

L'électrostatique est le domaine qui étudie les charges électriques stationnaires. Un problème de valeur limite est une équation différentielle ou un système d'équations différentielles dans lequel une variable est résolue sur un domaine. Les principes pertinents pour notre étude incluent la loi de Gauss qui fait partie des équations de Maxwell. Les équations de Maxwell nous permettent de relier les champs électriques et magnétiques à la charge totale et au courant

La loi de Gauss stipule que le flux électrique (Φ) à l'extérieur de toute surface fermée est égal à la charge totale (Q) qui est enfermée, divisée par la permittivité relative (ϵ) (voir Fig. 19). Les charges sont la source et les puits du champ électrique, donc en connaissant le champ on connaît alors la force qu'une distribution de charge peut exercer sur une autre charge. En fait, si une distribution de charge a un degré élevé de symétrie, alors la loi de Gauss seule peut être utilisée pour déterminer l'amplitude du champ électrique et dériver l'expression de la force de Coulomb (Fig21).

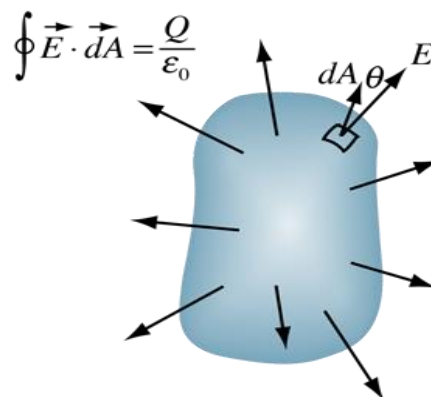


Figure 21. La loi de Gauss indique que le flux électrique peut être trouvé connaissant la charge totale enfermée (Q) et la permittivité relative du matériau (ϵ).

Les deux premières équations de Maxwell (loi de Gauss et loi de Faraday) permettront de calculer le champ électrique (magnitude et direction) dû à toute distribution de charge statique et vice versa. Le tableau 2 ci-dessous présente les conditions aux limites qui peuvent être appliquées dans un logiciel de calcul basé sur ces équations :

Nom de l'équation	Forme différentielle	Forme intégrale	Condition limite
Loi de Gauss	Toutes les lignes de champ commencent et se terminent sur les frais.	Le flux total à travers une surface fermée est égal à sa charge enfermée.	La charge de surface à une interface matérielle est égale au saut dans la composante normale du champ de déplacement.
Loi de Faraday (électrostatique)	Le champ électrique est irrotationnel.	Le champ électrique est conservateur.	À travers une interface matérielle, la composante tangentielle du champ électrique est continue.

Tableau 2. Les lois de l'électrostatique Source : COMSOL Multiphysique

En fin de compte, les trois grandeurs principales qui peuvent être calculées dans un problème électrostatique basé sur les lois mentionnées sont la distribution de charge de la source (ρ), le champ électrique (E) et le potentiel électrique (V). Les six équations de la figure 22 peuvent être utilisées pour trouver l'une des principales quantités connaissant les deux autres.

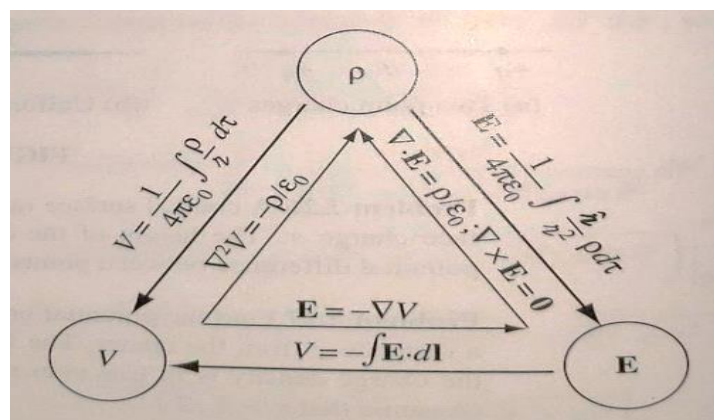


Figure 22. Équations interdépendantes utilisées pour résoudre des problèmes aux limites basés sur la loi de Gauss (d'après Introduction de l'Electrodynamiques», 4^{eme} édition, David J. Griffiths, 2017).

III.3.2 Analyse par éléments finis (AEF).

L'analyse par éléments finis (AEF) est une méthode d'approximation utilisée pour résoudre des équations différentielles sur une région spécifique de l'espace (domaine). Elle peut être utile dans un large éventail de domaines tels que la mécanique des structures, l'électrodynamique, le transfert de chaleur et plus encore. Les ingénieurs utilisent cette méthode afin de réduire le nombre de prototypes physiques et d'expériences, et d'optimiser les composants dans leur phase de conception pour développer plus rapidement de meilleurs produits. Un grand domaine est décomposé en éléments finis plus petits connectés via des nœuds par une procédure appelée maillage. Le comportement de chaque nœud est résolu à l'aide d'une équation matricielle, écrite selon des équations électrostatiques et des conditions aux limites. Une fois que les solutions sont connues pour tous les nœuds, le comportement entre les nœuds est approché par des polynômes. La combinaison des résultats individuels donne le résultat global de la structure.

III.3.3 COMSOL pour l'analyse par éléments finis (AEF).

COMSOL est un logiciel commercial utilisé pour effectuer des analyses par éléments finis (AFE). Le module d'étude électrostatique de COMSOL est utile pour le calcul des forces et des champs électrostatiques. La Figure 23 illustre les étapes procédurales impliquées dans le prétraitement, l'étude et le post-traitement dans COMSOL. Une géométrie appropriée est créée pour modéliser un système et les propriétés des matériaux sont attribuées à chaque domaine. Les conditions aux limites sont appliquées dans la simulation et COMSOL utilise AFE pour résoudre les équations. Après avoir calculé la solution, diverses options de tracé 2D et 3D peuvent être utilisées pour visualiser les résultats dans COMSOL.

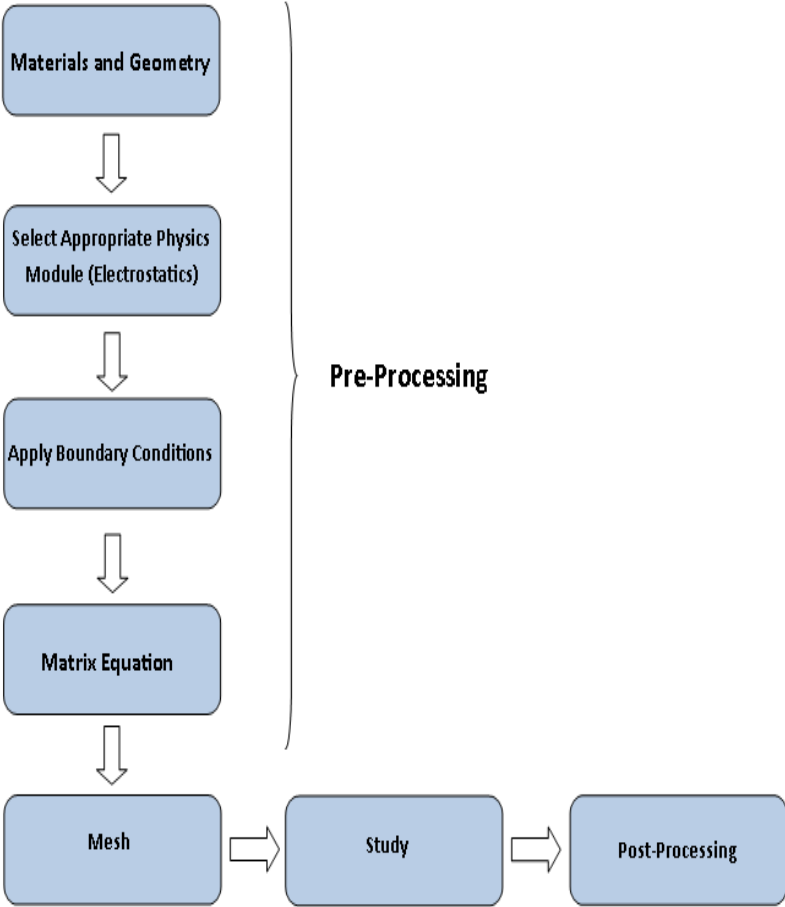
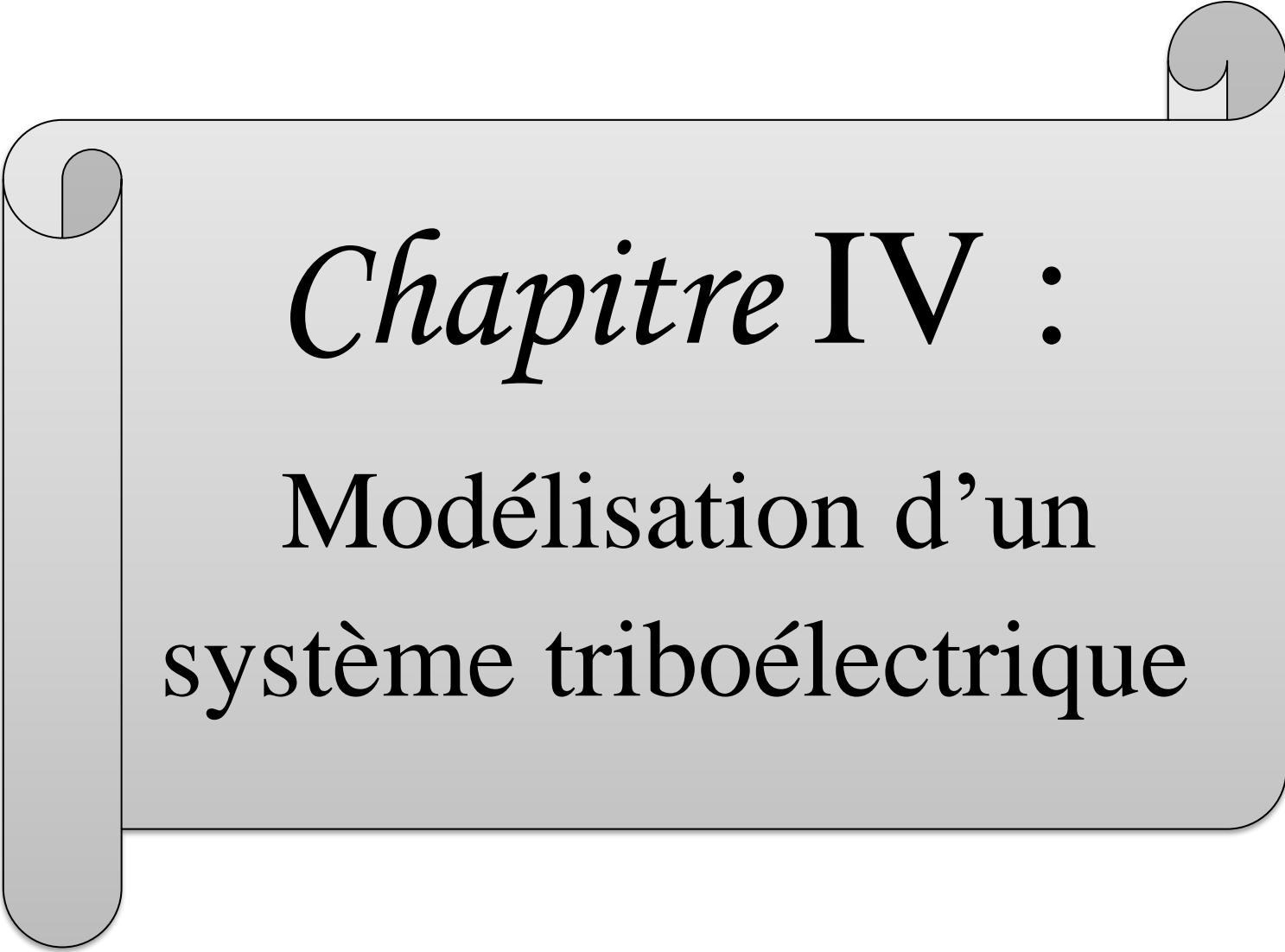


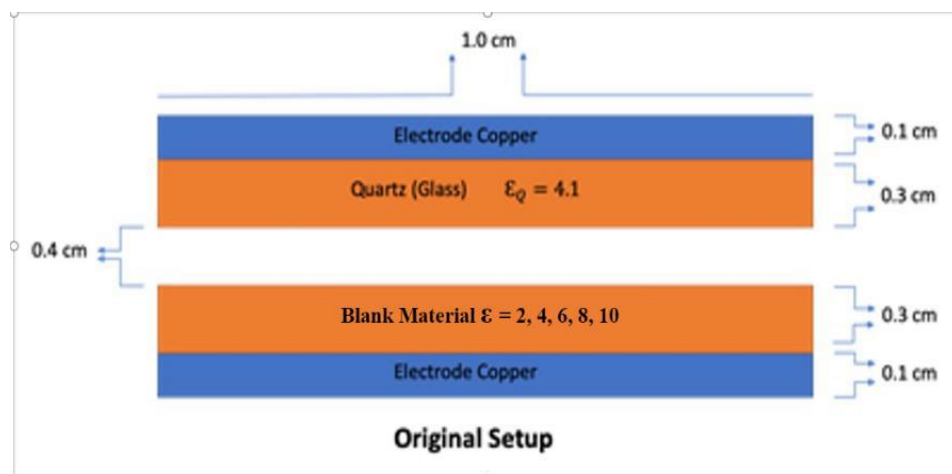
Figure 23. Procédure d'analyse par éléments finis pour résoudre les problèmes multiphysiques dans COMSOL

A decorative scroll graphic with a light gray background and a dark gray border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top edge curving upwards. The text is centered on the scroll.

Chapitre IV :
Modélisation d'un
système triboélectrique

IV.1. Introduction

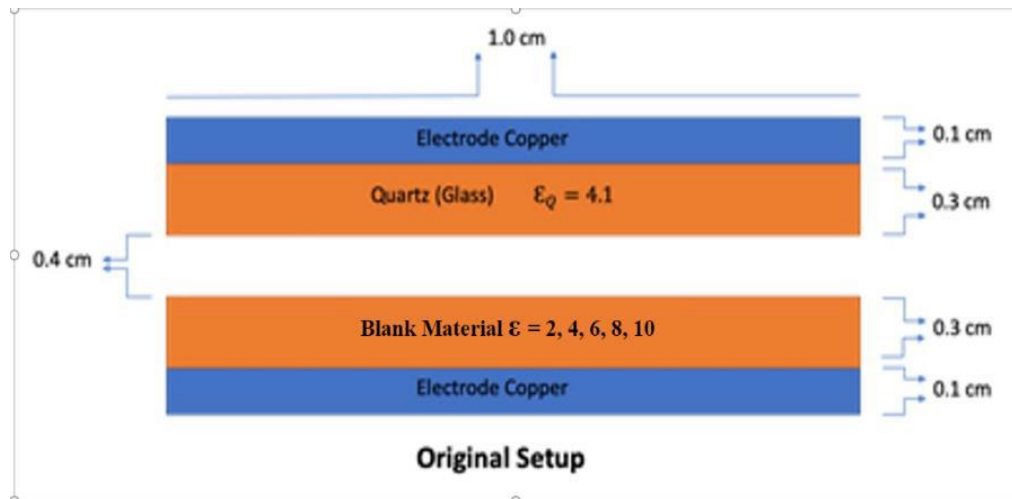
Dans ce chapitre, Afin d'acquérir une compréhension plus approfondie de COMSOL, nous avons commencé avec une conception simple illustrée par la **figure 24**. Notre objectif est de déterminer si les valeurs de la permittivité relative k des matériaux diélectriques avaient un effet sur la tension, la sortie de charge. Nous considérons deux types de modes de séparation ; le mode vertical et le mode glissant du TEG. A la fin de l'étude, nous allons identifier le mode le plus important.



**Figure 24. Géométrie 2D du TEG en tant que condensateur
(Non dessinée à l'échelle)[9]**

IV.2. Étude paramétrique sur l'effet des inclusions de constante diélectrique

Dans notre première configuration de calcul, le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé pour effectuer une analyse paramétrique. On commence par étudier l'influence de la variation du paramètre k sur une plage spécifiée. La conception du TEG a été simulée en considérant le quartz (verre) comme l'un des matériaux diélectriques, tandis qu'un matériau vierge qui est en fait le second diélectrique, a été choisi en variant sa valeur de k . La géométrie 2D a été créée en suivant les dimensions comme illustrées sur la Fig. 25 ci-dessous.



**Figure 25. Géométrie 2D du TEG en tant que condensateur
(Non dessinée à l'échelle)[9]**

Une densité de charge de surface de 0.001 et -0.001 C/m^2 a été appliquée au niveau des surfaces de chaque matériau. La région extérieure (air) a été définie comme un domaine infiniment grand. Après avoir défini la géométrie de tous les matériaux, la structure finale a été maillée. Un potentiel type flottant est appliqué autour du périmètre du matériau en cuivre de sorte qu'une valeur équipotentielle puisse être associée à ce conducteur électrique isolé.

IV.2.1Création du modèle sous COMSOL :

Pour créer un modèle multi-physique dans le logiciel COMSOL, on se doit de passer par plusieurs étapes :

Premièrement, il faut ouvrir un nouveau projet sur l'interface de l'application COMSOL. Sur la fenêtre d'ouverture de l'application, on fait le choix de la dimension d'espace (1, 2 ou 3D), et le type du module physico-chimique approprié. Dans notre cas c'est bien le module AC/DC (voir la figure.26)

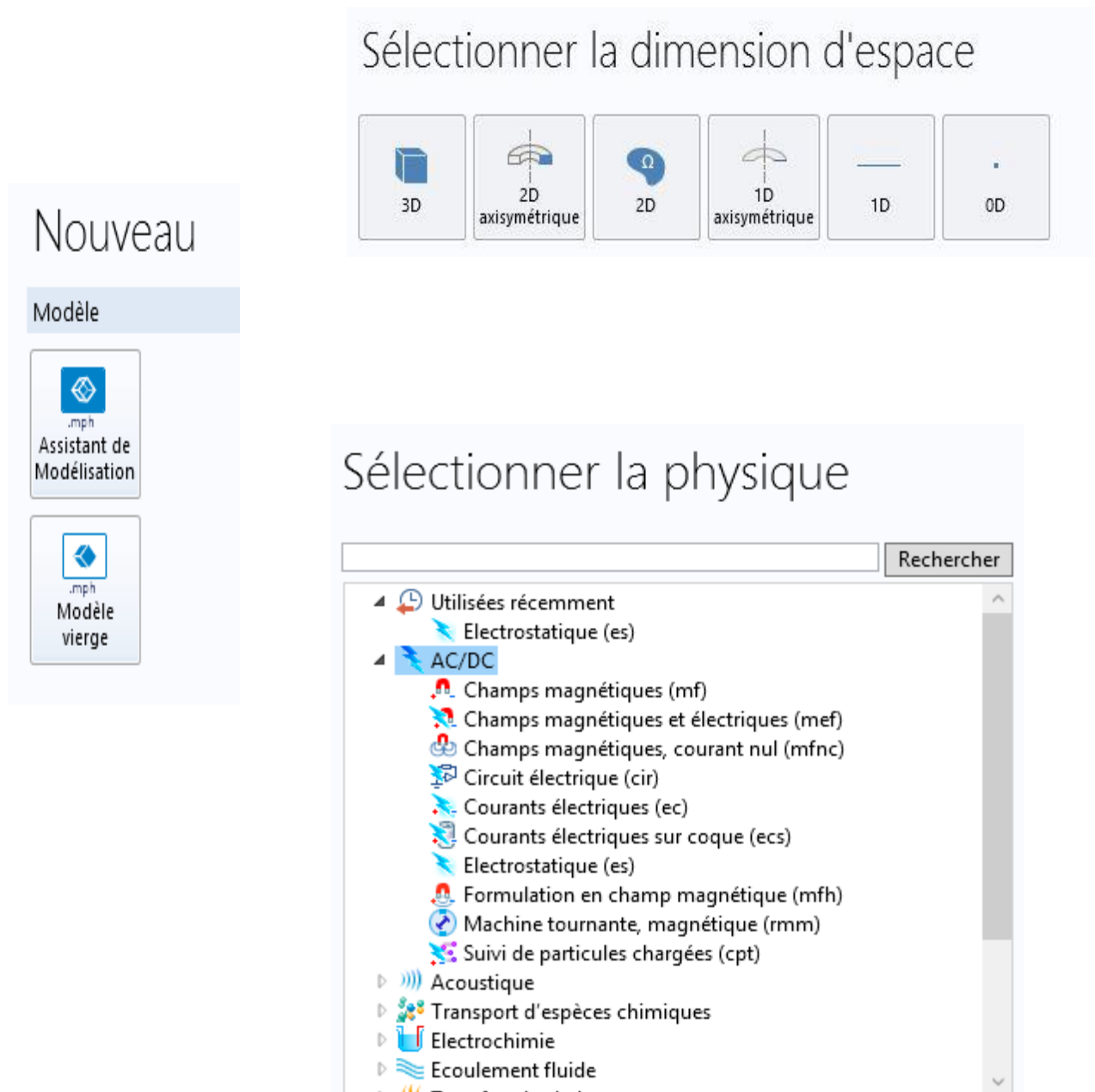


Figure 26. : Page menu pour créer un nouveau modèle dans COMSOL

L'étape suivante consiste à choisir le type du modèle de Maxwell approprié. Dans notre cas on choisit *le modèle électrostatique* sur le menu montré sur la figure 27.

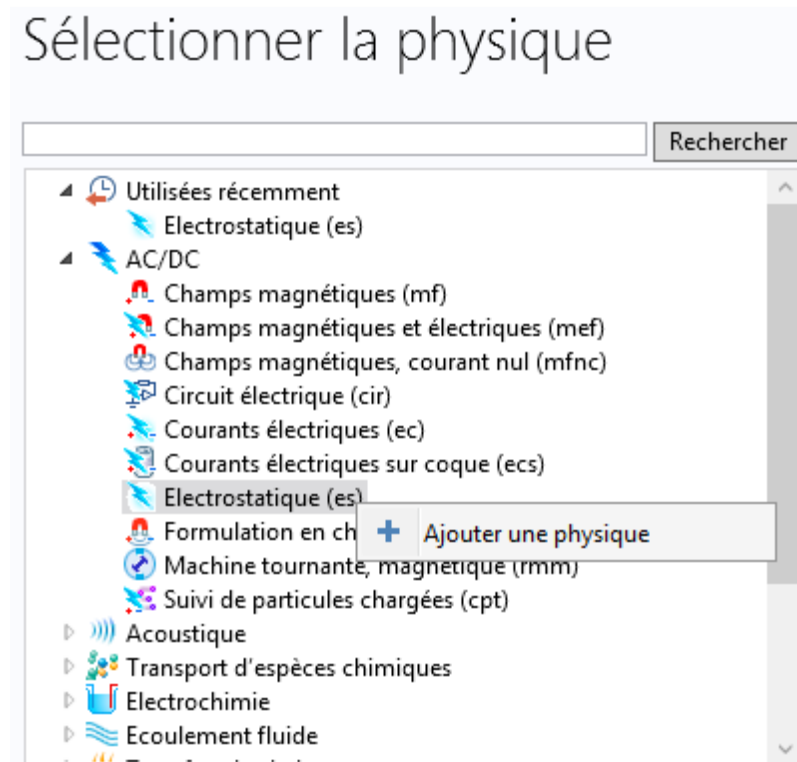


Figure 27 : Fenêtre pour le choix du modèle (électrostatique)

Ensuite, on sélectionne le domaine d'étude (figure.28). Notre choix est le domaine stationnaire.

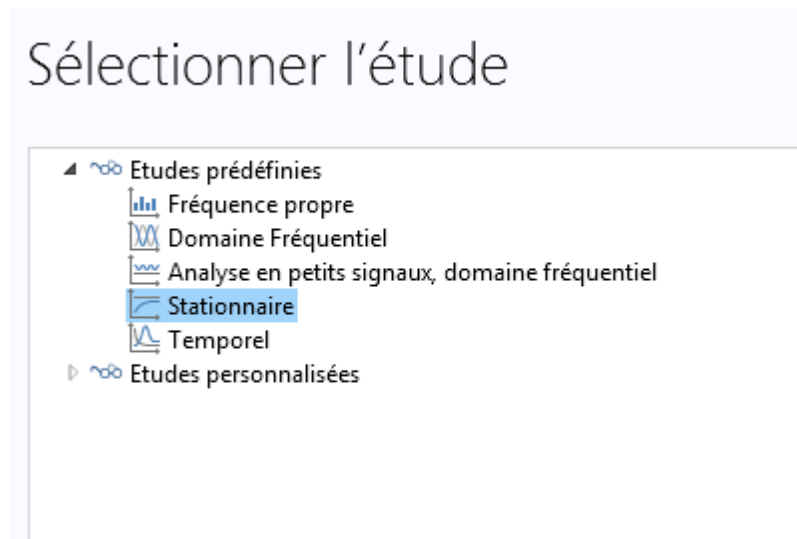


Figure 28. Choix du domaine d'étude

Sur le menu « Global Définitions », on introduit l'ensemble des paramètres de notre modèle comme indiqué sur la **figure 29**.

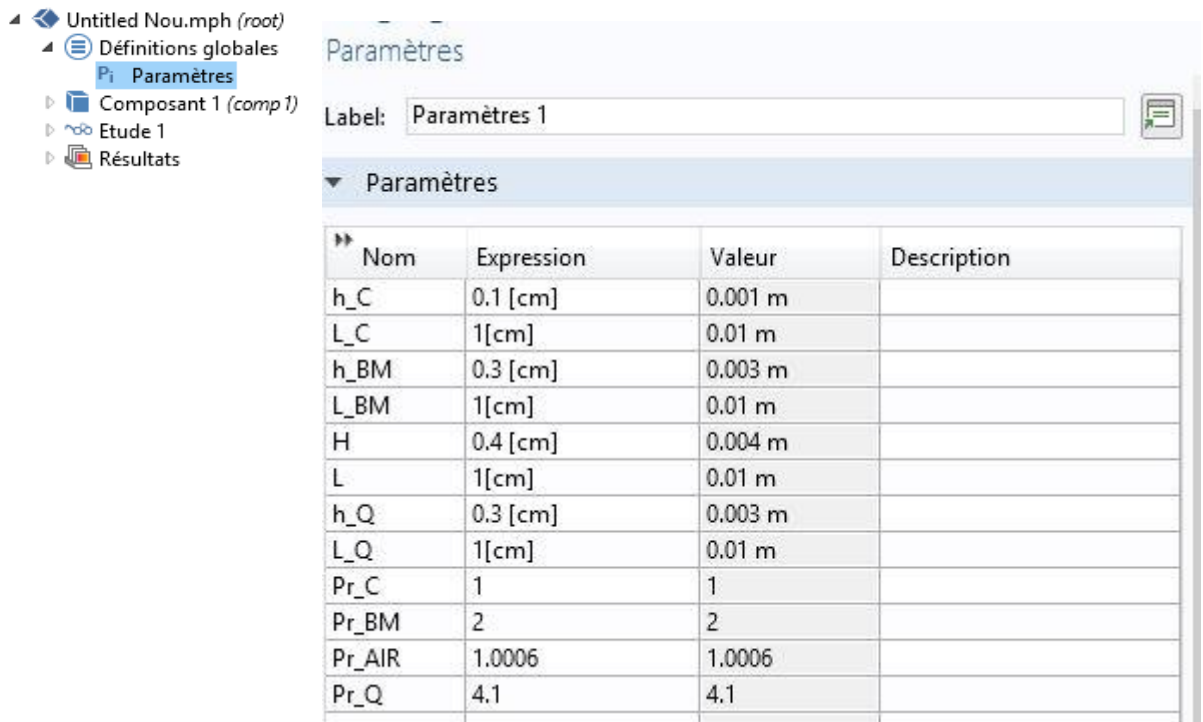


Figure 29 : Définition des paramètres Globaux du modèle

Liste des paramètres considérés :

- h_C : hauteur du cuivre
- L_C : Largeur du cuivre
- h_BM : hauteur du blank material(matériau vierge)
- L_BM : largeur du blank material (matériau vierge)
- h_Q : hauteur du quartz (verre)
- L_Q : largeur du quartz (verre)
- H : hauteur de l'air
- L : largeur de l'air
- Pr_C : permittivité du cuivre
- Pr_BM : permittivité du matériau vierge
- Pr_air: permittivité de l'air
- Pr_Q: permittivité du quart.

Après avoir fini de faire rentrer tous les paramètres du modèle, nous sélectionnons ensuite au modèle une géométrie adéquate. Comme exemple, dans notre cas on choisit une géométrie de type rectangulaire (voir Fig. 30).

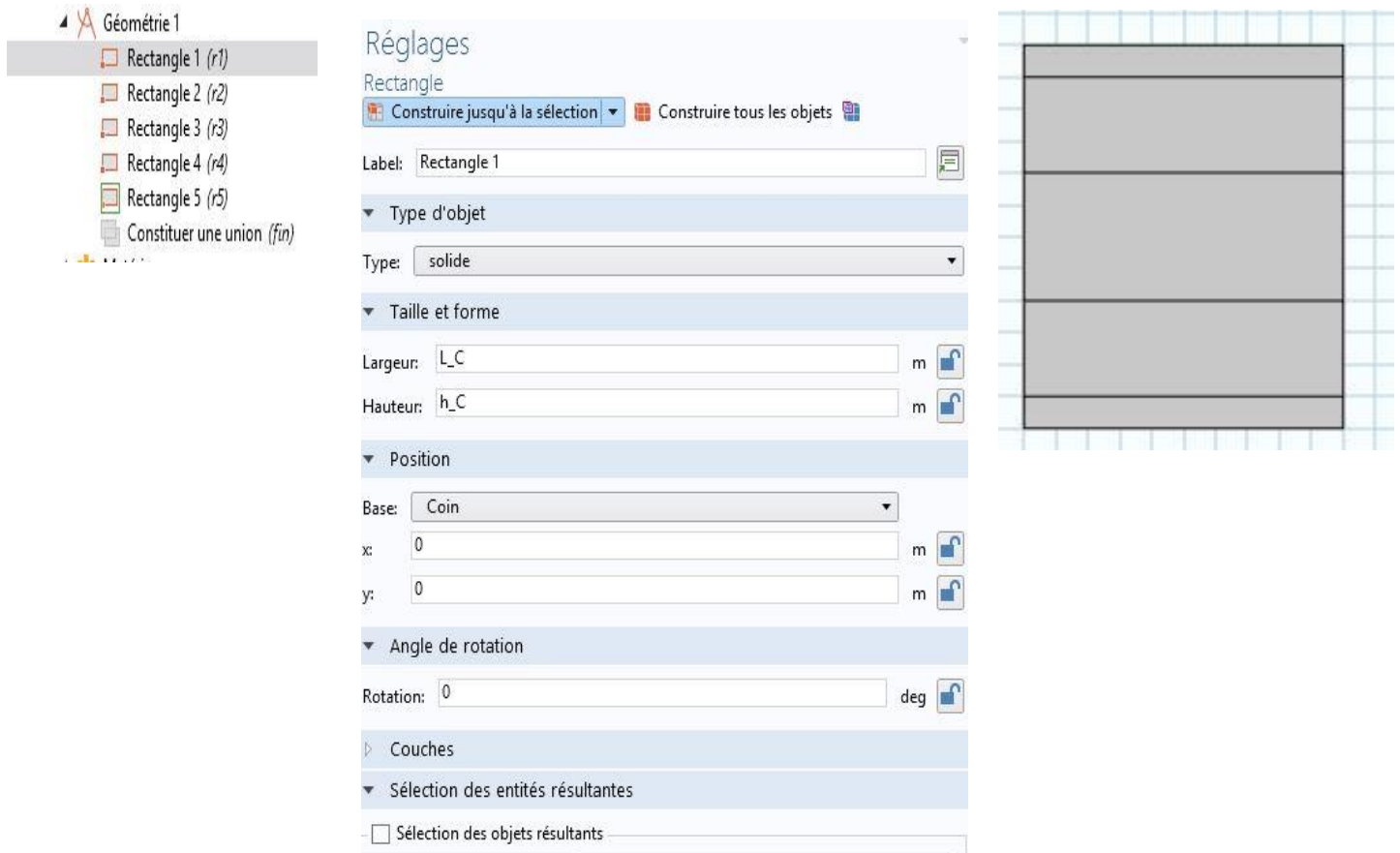


Figure 30 : Sélection de la géométrie du modèle à simuler.

Sur le menu « matériaux », on ajoute les propriétés des matériaux composant le modèle. Ceci est fait à travers le menu déroulant des matériaux dans le model AC/DC, puis on sélectionne les matériaux appropriés (voir la figure 31).

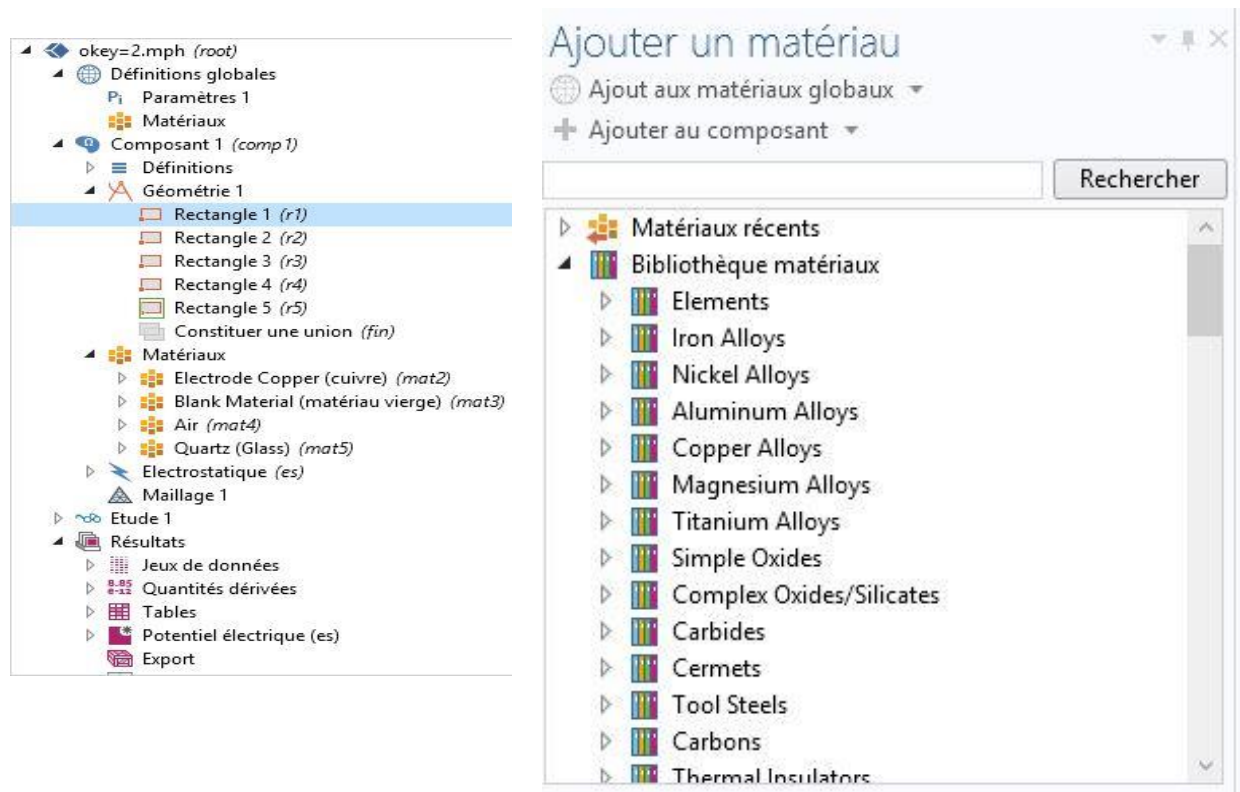
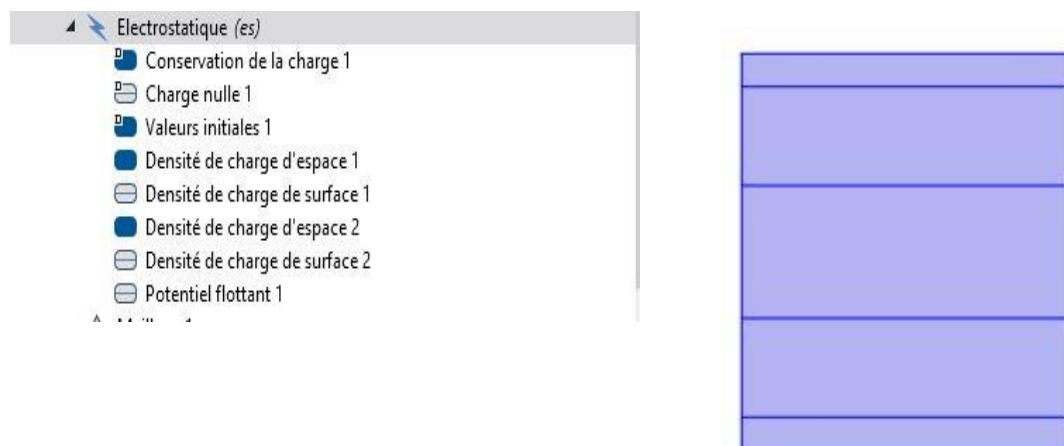


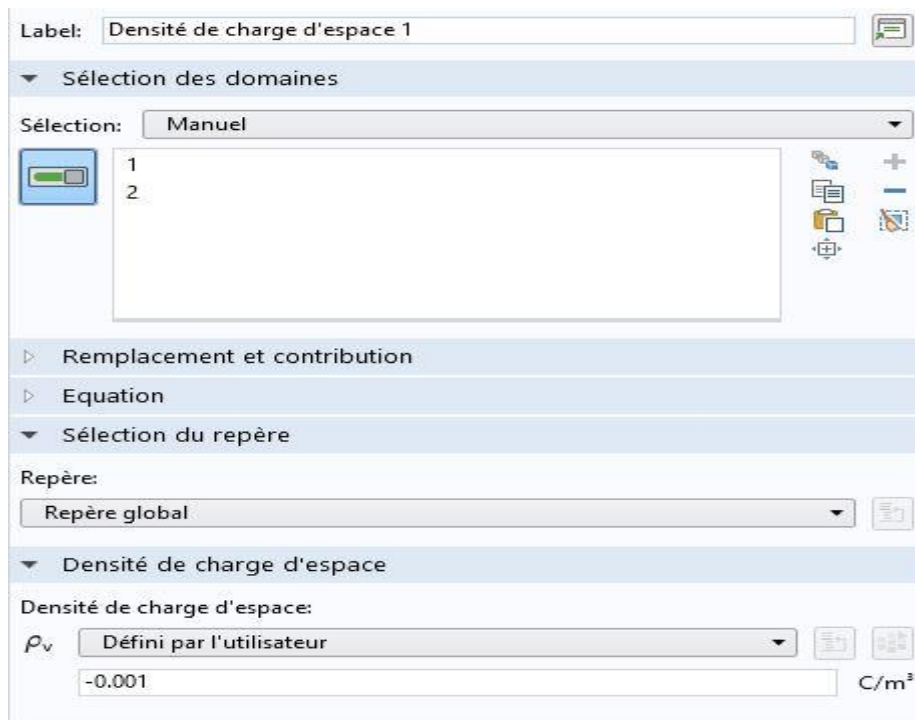
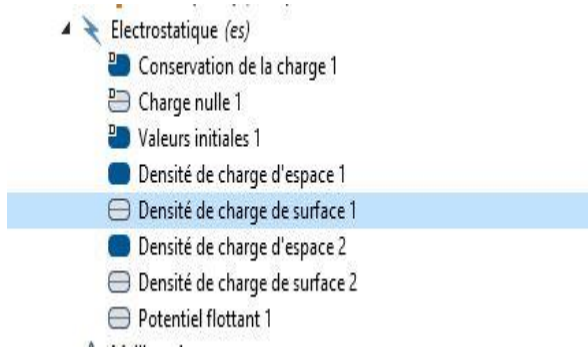
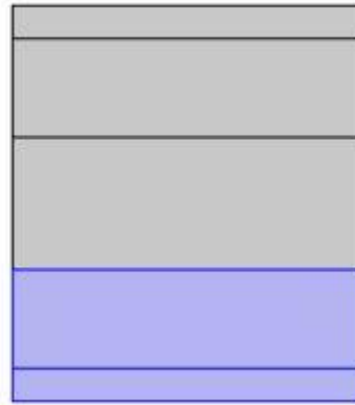
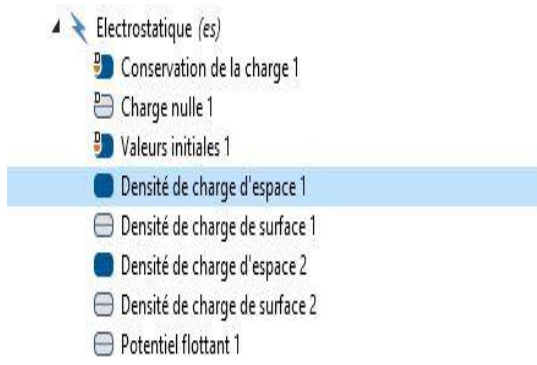
Figure 31: Sélection des propriétés des matériaux.

Ajout des conditions aux limites. (Voir la figure 32).

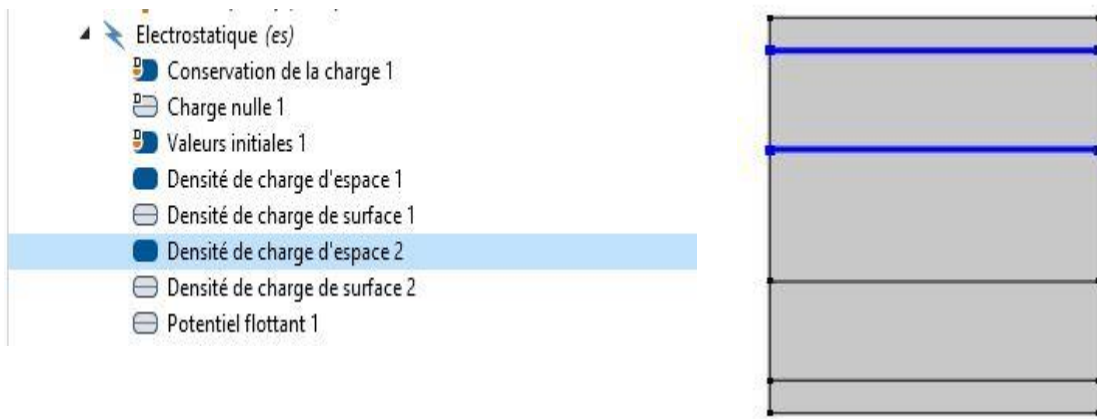
A)



B)



C)



Densité de charge de surface

Label:

▼ Sélection de frontières

Sélection:

	8
	10

► Remplacement et contribution

► Equation

▼ Sélection du repère

Repère:

▼ Densité de charge de surface

Densité de charge de surface:

ρ_s C/m²

D)

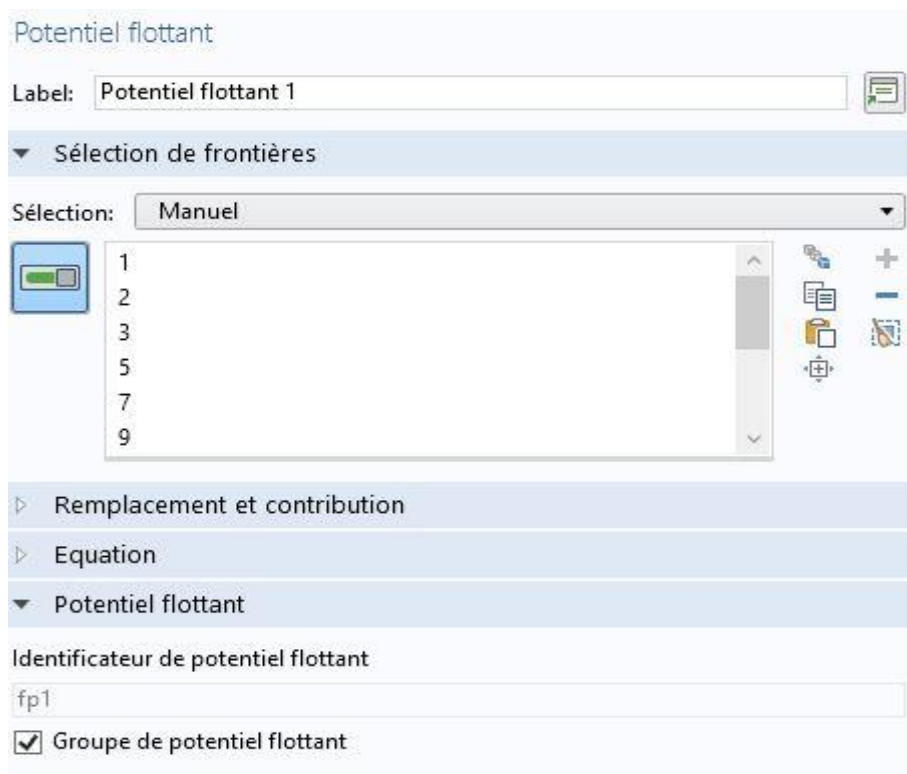
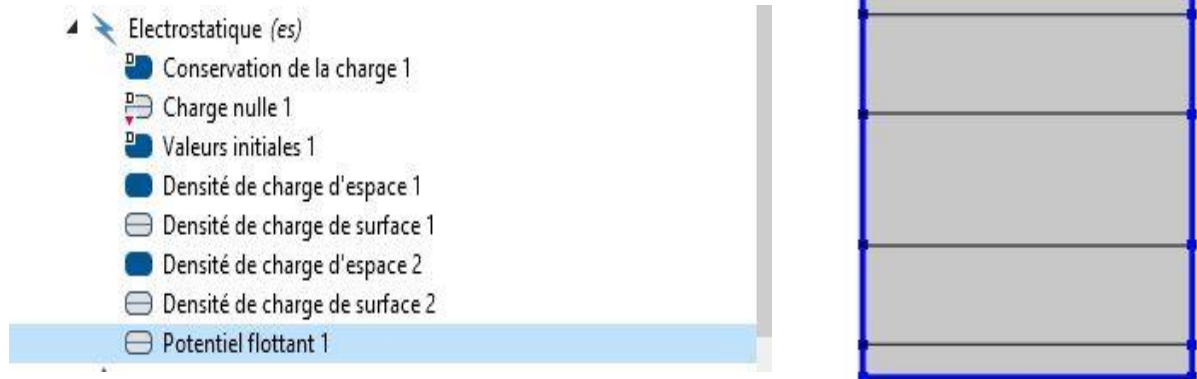


Figure 32. (A, B, C, D) : Etablissement des conditions aux limites.

L'étape suivante concerne le 'maillage' du modèle ; cette étape est nécessaire car COMSOL utilise la méthode numérique dite des éléments finis (voir la figure 33).

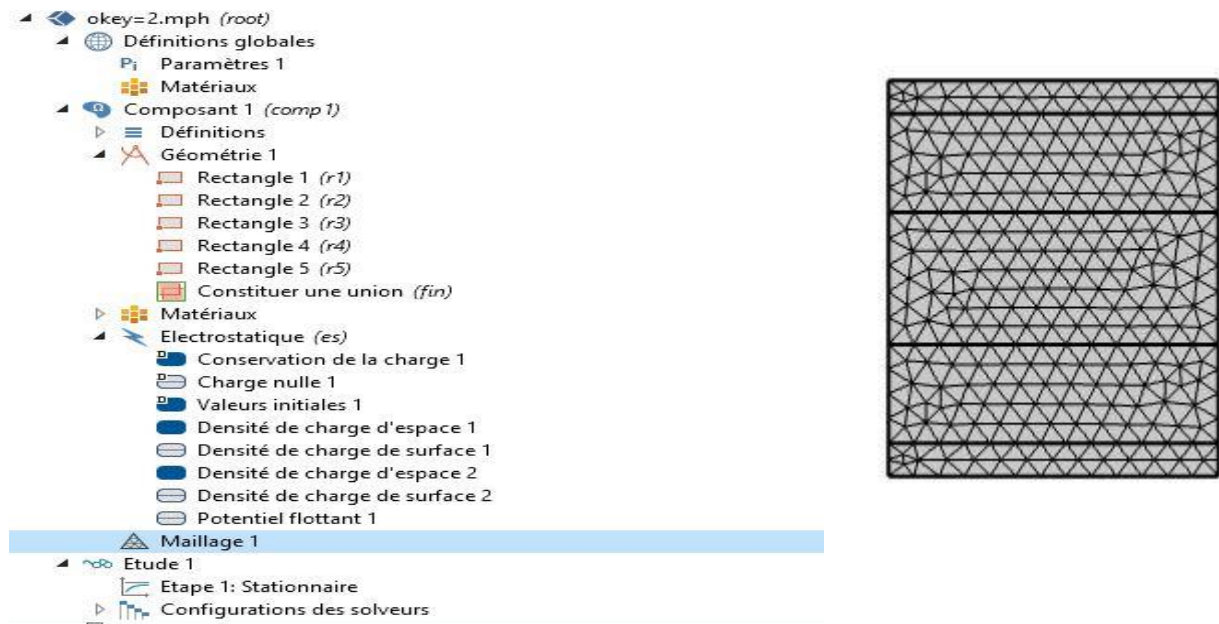
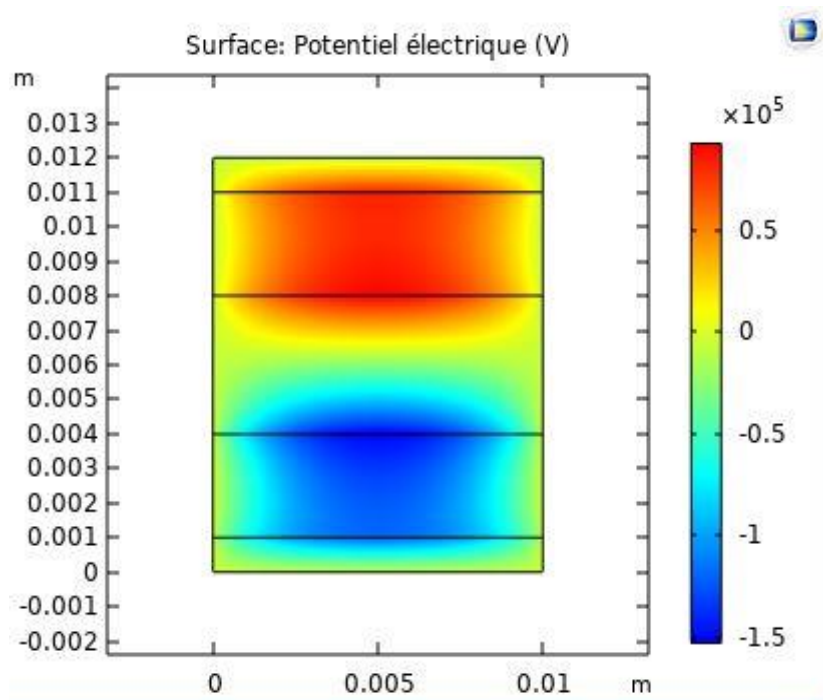


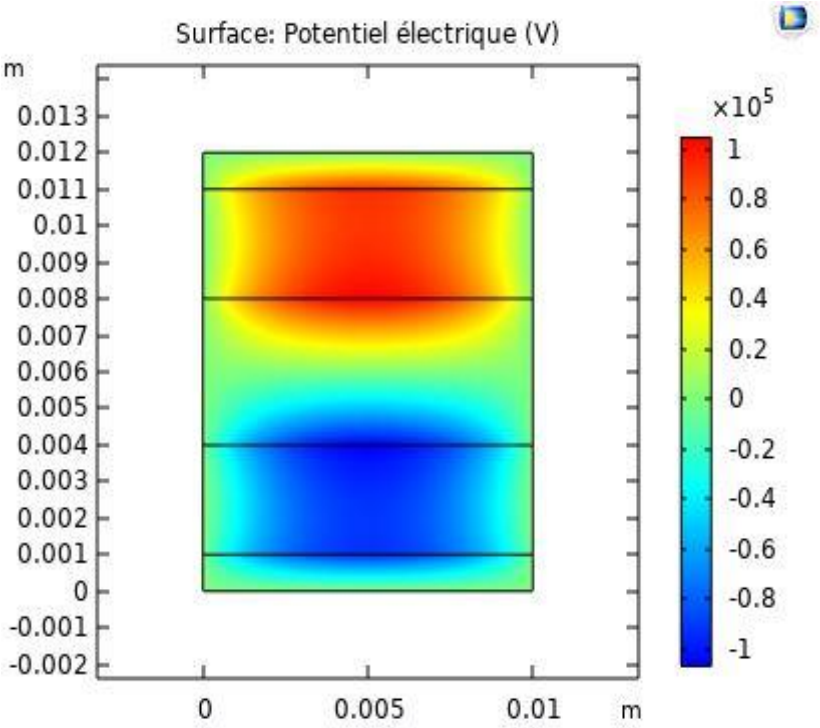
Figure 33 : Maillage de la géométrie

IV.2.1.1 Résultats

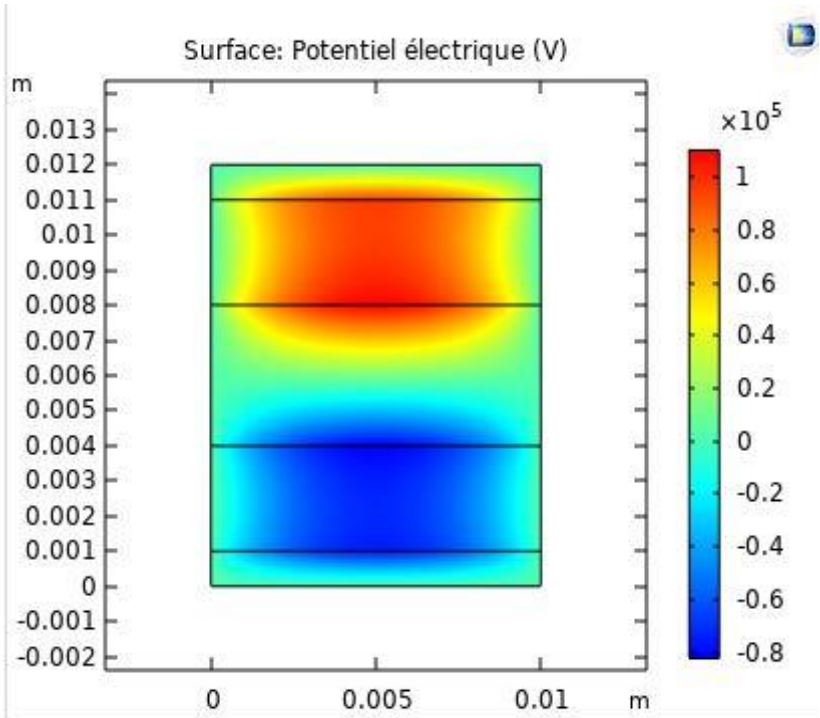
Les résultats obtenus à l'issu des simulations sont présentés sous les formes graphiques ainsi que dans des tableaux récapitulant les valeurs numériques.



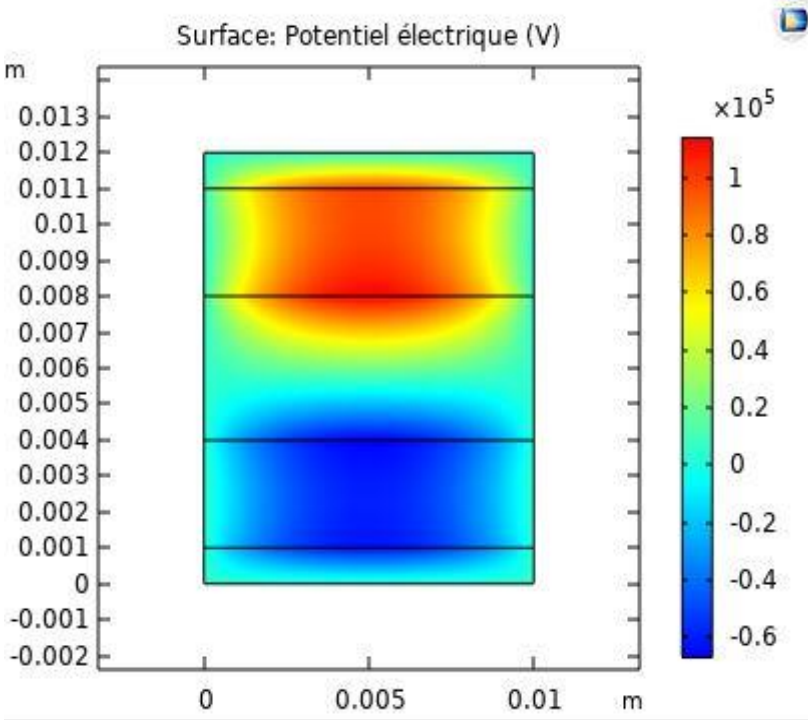
K=2



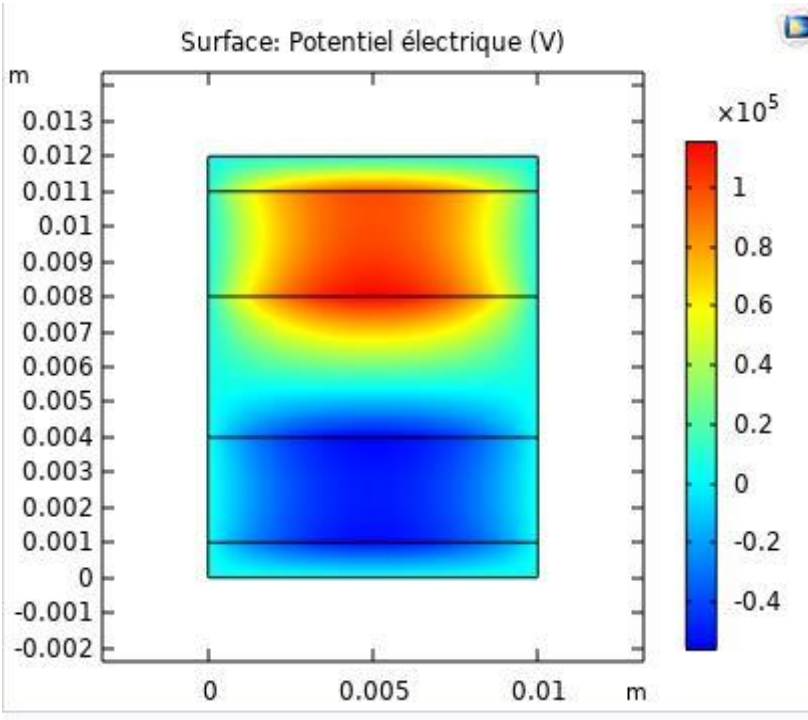
K=4



K=6



K=8



K=10

Tableau 3. Récapitulatif des valeurs moyennes des potentiels électriques pour différentes valeurs de la permittivité relative électrique k.

Permittivité relative K	Potentiel électrique V
K=2	$5.6389 \cdot 10^4$
K=4	$6.5002 \cdot 10^4$
K=6	$6.9159 \cdot 10^4$
K=8	$7.1512 \cdot 10^4$
K=10	$7.2743 \cdot 10^4$

IV.3 Mode de contact vertical

▲ **Untitled Nou.mph (root)**
 ▲ Définitions globales
 Pi Paramètres
 ▶ Composant 1 (comp 1)
 ▶ Etude 1
 ▶ Résultats

Réglages
Paramètres

Label: Paramètres 1

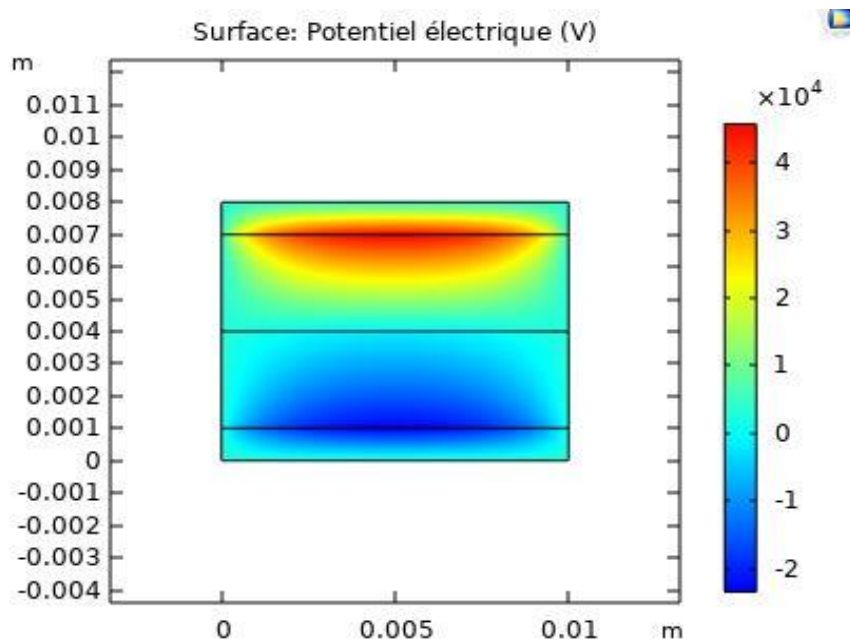
▼ Paramètres

Nom	Expression	Valeur	Description
h_C	0.1 [cm]	0.001 m	
L_C	1[cm]	0.01 m	
h_BM	0.3 [cm]	0.003 m	
L_BM	1[cm]	0.01 m	
H	0.3[cm]	0.003 m	
L	1[cm]	0.01 m	
h_Q	0.3 [cm]	0.003 m	
L_Q	1[cm]	0.01 m	
Pr_C	1	1	
Pr_BM	10	10	
Pr_AIR	1.0006	1.0006	
Pr_Q	4.1	4.1	

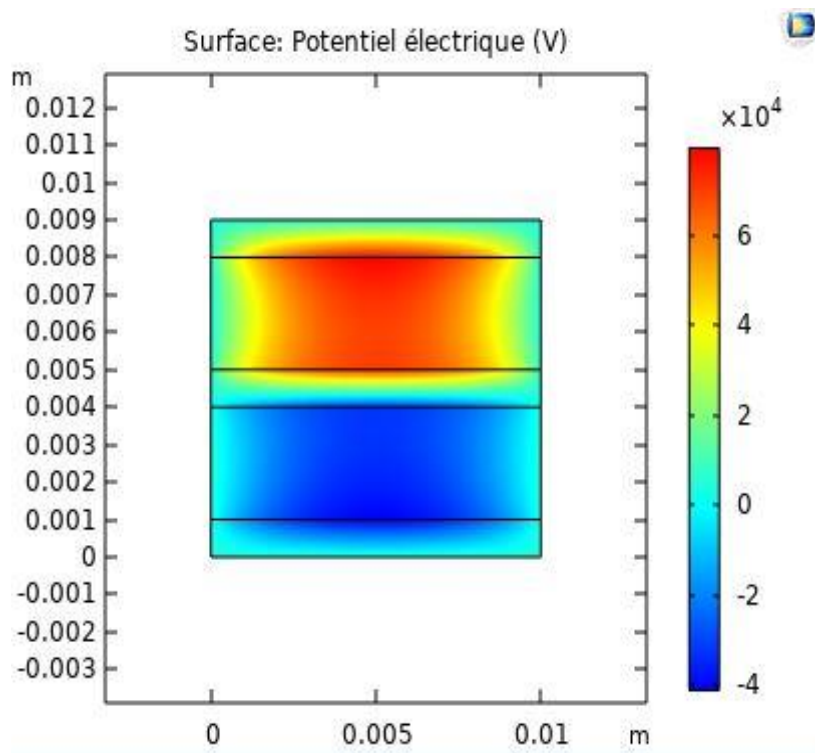
Figure .34 : Définition des paramètres globaux du modèle.

On change l'épaisseur de la séparation d entre la partie supérieure et inférieure du générateur tout en gardant les mêmes conditions aux limites.

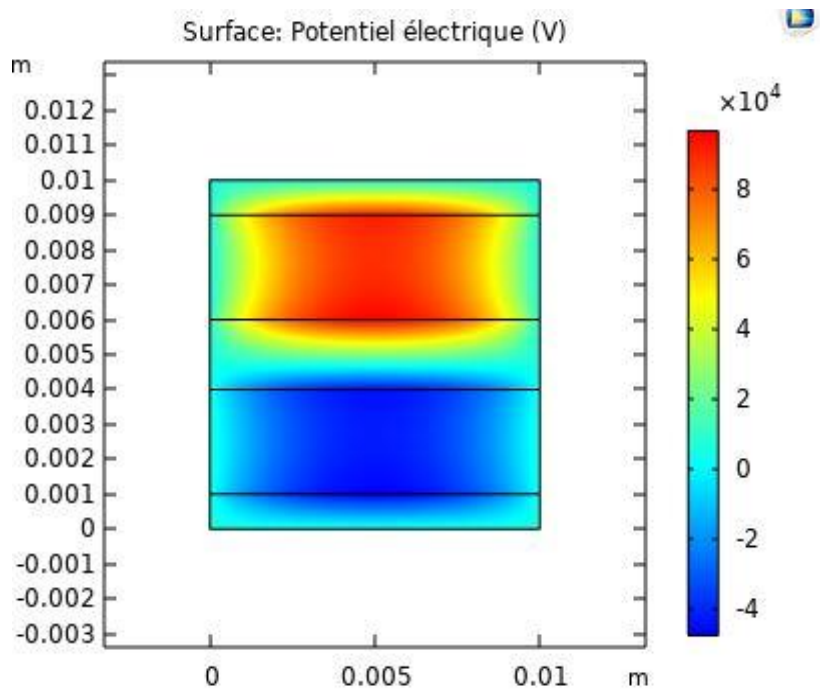
IV.3.1 Résultats



$d=0\text{cm}$



$d=0.1\text{cm}$



$d=0.2\text{cm}$

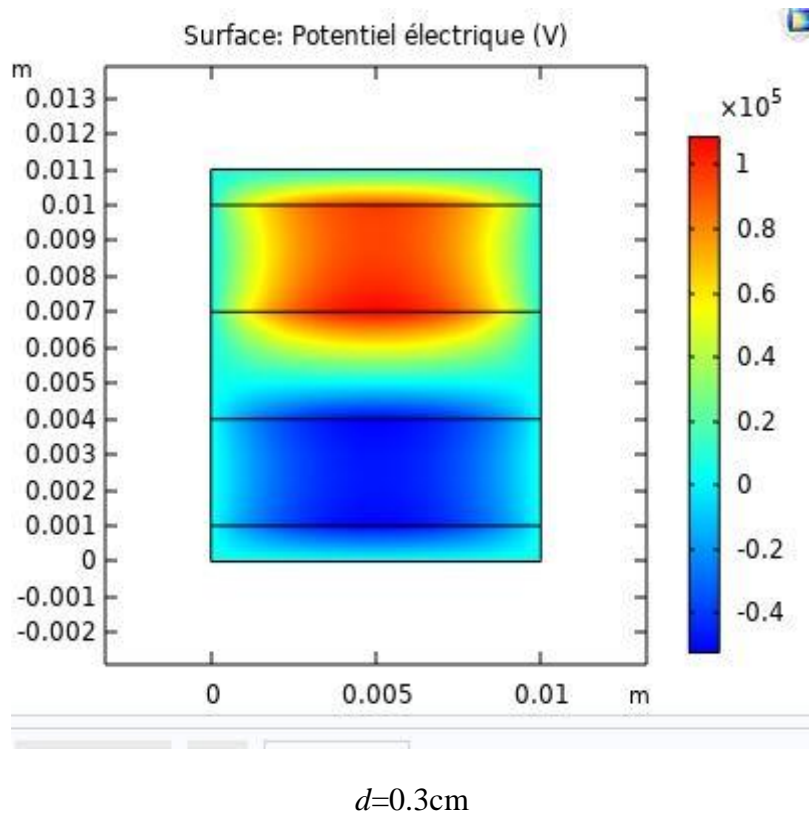
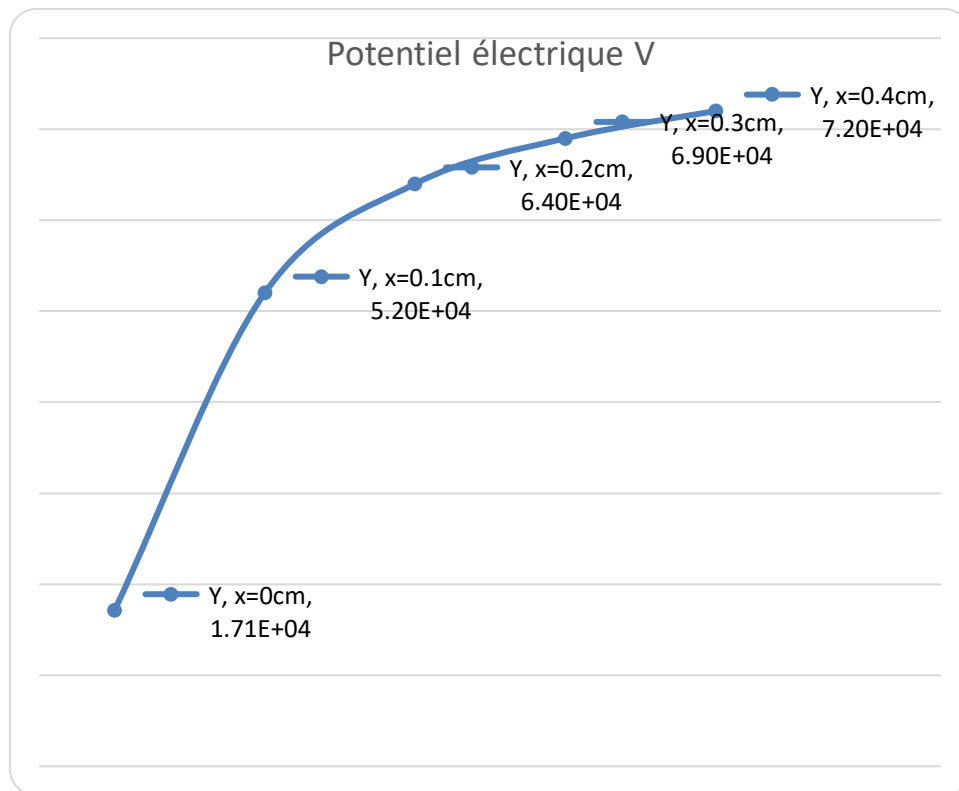


Tableau 4. Récapitulatif des valeurs moyennes des potentiels électriques pour différentes valeurs de la séparation d

Séparation d (cm)	Potentiel électrique
0-cm	$1.71 \cdot 10^4$
0.1-cm	$5.2373 \cdot 10^4$
0.2-cm	$6.4404 \cdot 10^4$
0.3-cm	$6.9713 \cdot 10^4$
0.4-cm	$7.2 \cdot 10^4$



Déplacement suivant x (séparation)

Figure 35. Graphique du potentiel électrique en fonction de l'épaisseur de la couche d'air

Pour le courant :

$$R = \rho * L / S = L / S * \gamma$$

ρ étant la résistivité en ohm-mètre ($\Omega \cdot m$) Quartz (Glass) = $10 * 10^{10} \Omega \cdot m$

l la longueur en mètres (m) ; (Rectangle de géométrie $L=1cm=0.01m$)

S la section en mètres carrés (m^2) ; Rectangle $S=L.H=0.01*0.003=3 * 10^{-5} m^2$

γ la conductivité en siemens par mètre (S/m)

R la résistance électrique en ohm Ω

$$R = 10 * 10^{10} * 0.01 / 3 * 10^{-5} = 3.33 * 10^{13} \Omega$$

$$U = R \cdot I$$

$$I = U / R$$

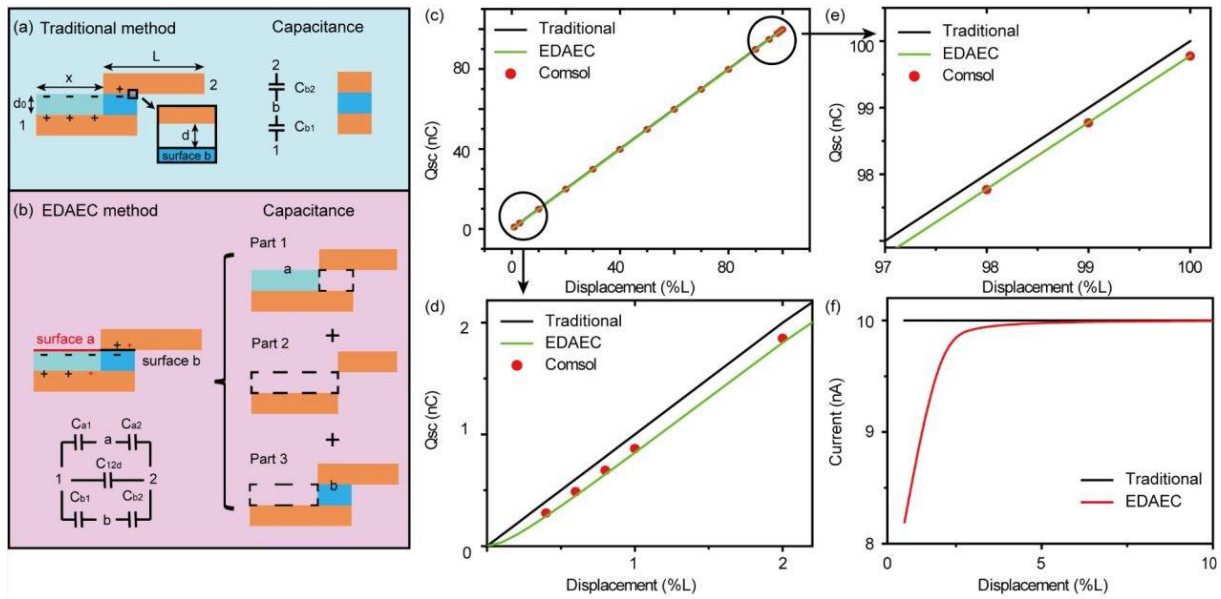


Fig. 36. Le mode traditionnel (a) et le mode de la méthode EDAEC (b) du mode LS TENG. La comparaison de la charge transférée par les méthodes traditionnelles et EDAEC (CE). La comparaison du courant de court-circuit par les méthodes traditionnelles et EDAEC.

Tableau 5. Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de l'intensité du courant pour différentes valeurs la distance de séparation d (cm)

Séparation d (cm)	Potentiel électrique (V)	Courant électrique (nA)
0-cm	$1.71 \cdot 10^4$	0.5
0.1-cm	$5.2373 \cdot 10^4$	1.57
0.2-cm	$6.4404 \cdot 10^4$	1.93
0.3-cm	$6.9713 \cdot 10^4$	2.09
0.4-cm	$7.2 \cdot 10^4$	2.16

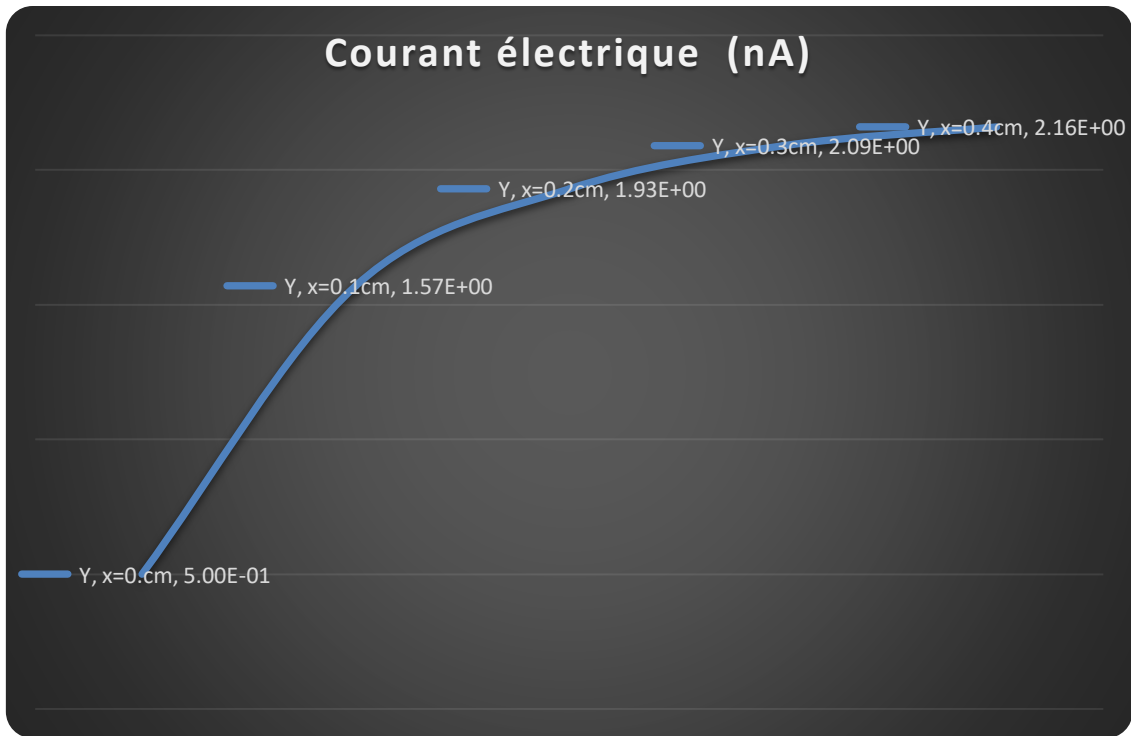


Figure .37. Graphique de l'intensité du courant électrique en fonction de la distance de séparation d (couche d'air).

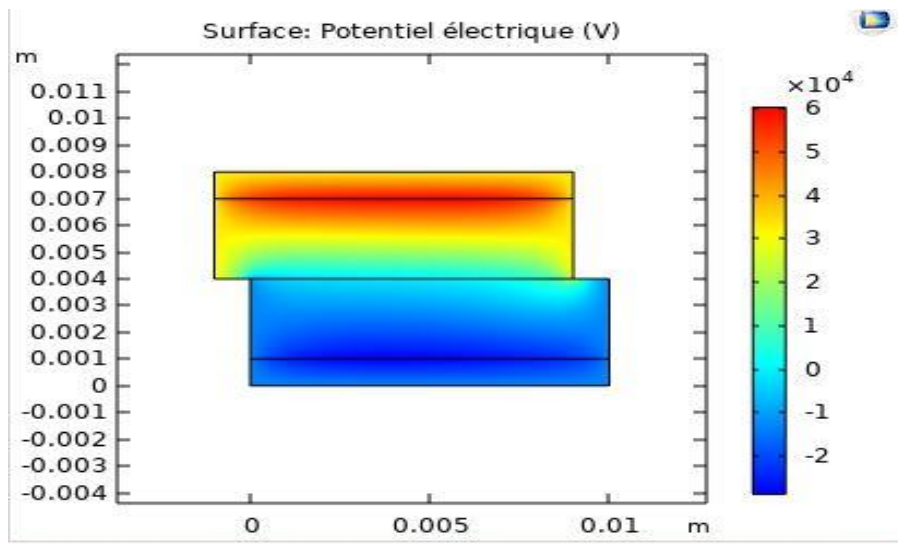
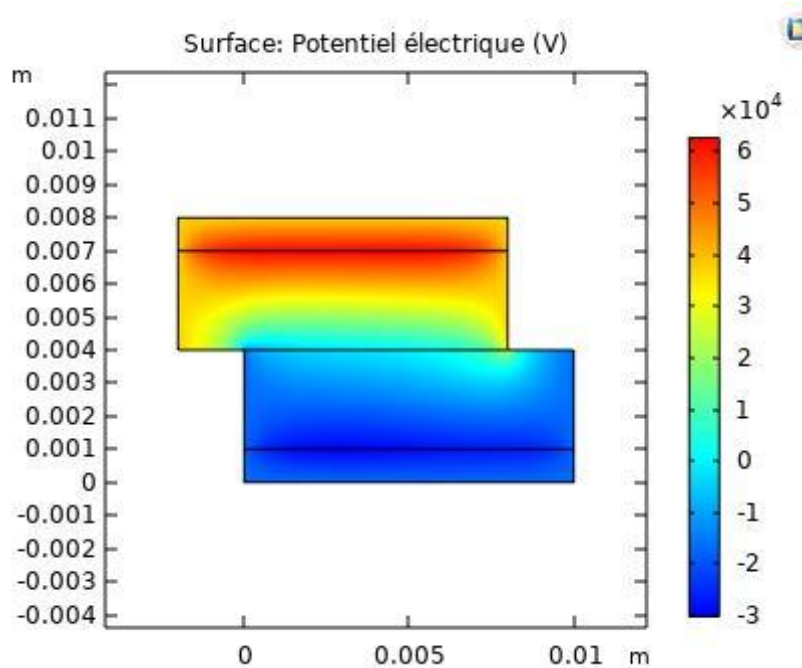
IV.4. Mode glissant :

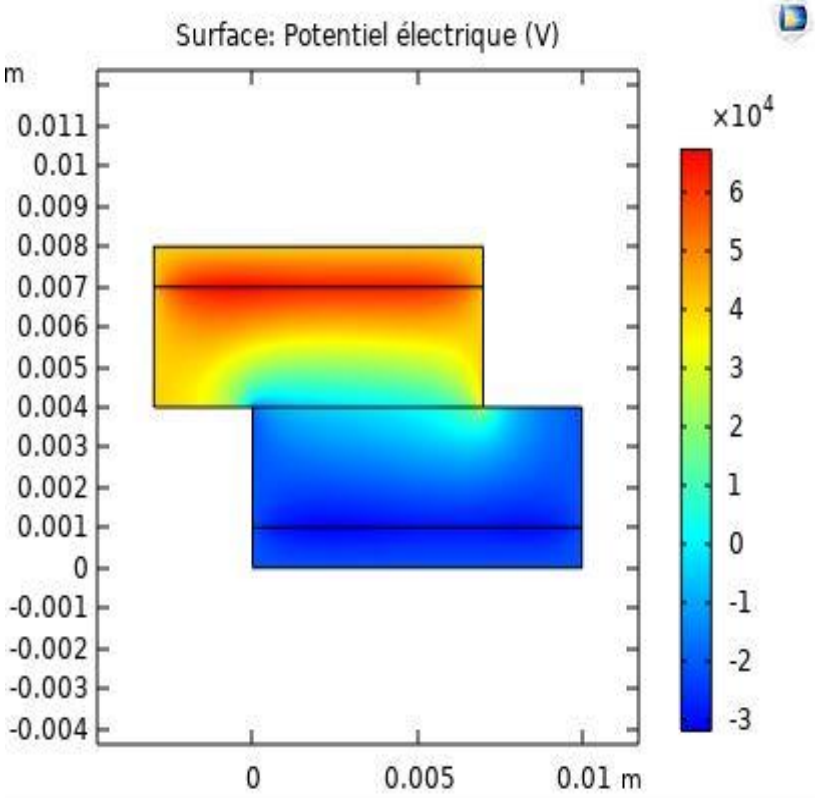
Sur le menu « Global Définitions », on introduit l'ensemble des paramètres de notre modèle comme indiqué la figure 35 ci-dessous :

Le screenshot montre l'interface de configuration des paramètres globaux du modèle. Le panneau de gauche affiche l'arborescence de projet avec "Paramètres" sélectionné. Le panneau principal, intitulé "Réglages Paramètres", contient un tableau de paramètres.

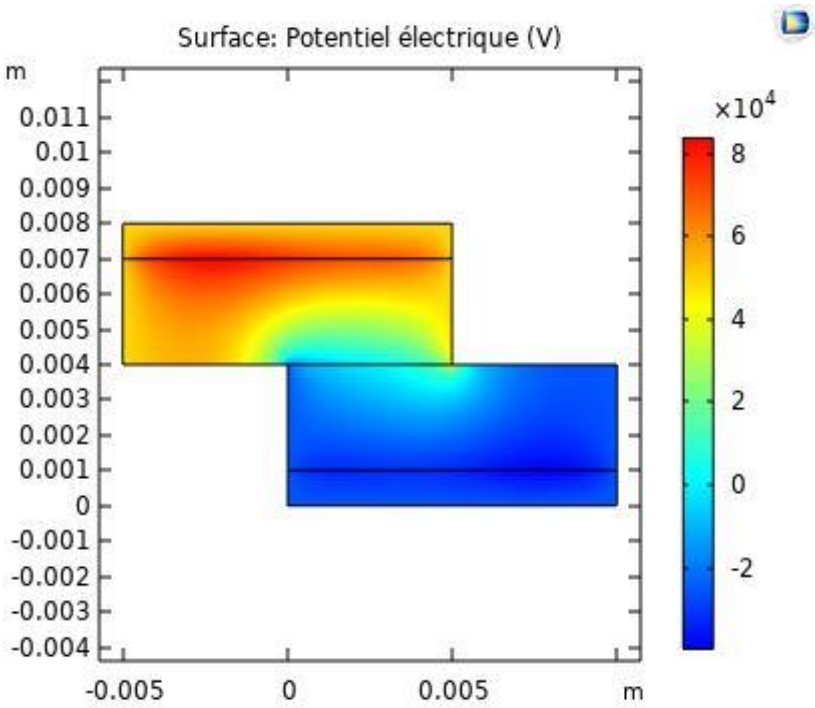
Nom	Expression	Valeur	Description
h_C	0.1 [cm]	0.001 m	
L_C	1[cm]	0.01 m	
h_BM	0.3 [cm]	0.003 m	
L_BM	1[cm]	0.01 m	
H	0[cm]	0 m	
L	1[cm]	0.01 m	
h_Q	0.3 [cm]	0.003 m	
L_Q	1[cm]	0.01 m	
Pr_C	1	1	
Pr_BM	10	10	
Pr_AIR	1.0006	1.0006	
Pr_Q	4.1	4.1	
G	-0.1[cm]	-0.001 m	

Figure 38. Définition des paramètres globaux du modèle.

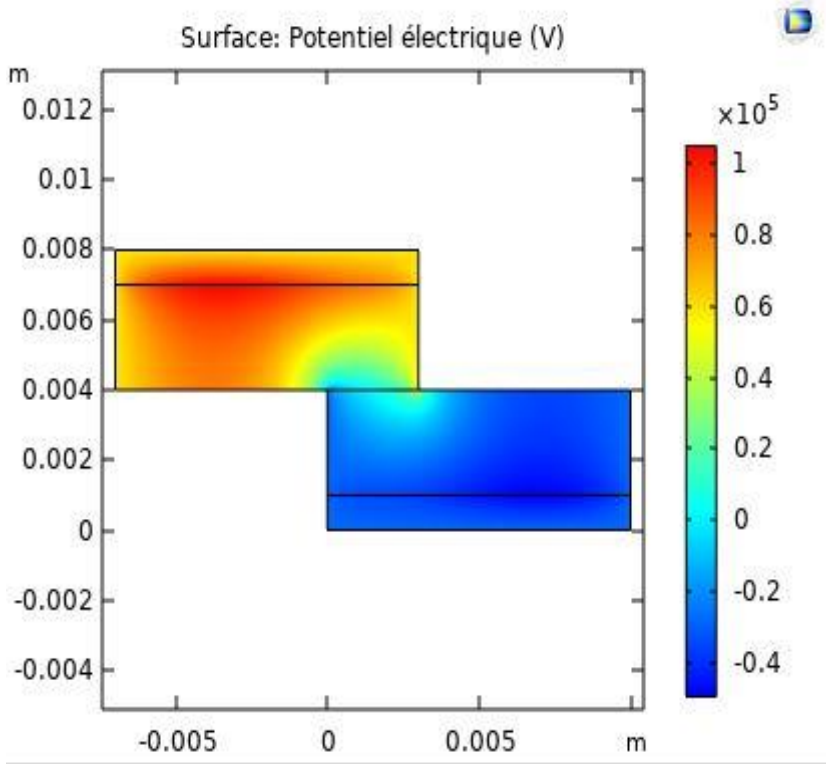
Liste des paramètres considérés :G : glissement suivant la direction x **IV.4.1 Résultats** $x=0.1\text{cm}$  $x=0.2\text{cm}$



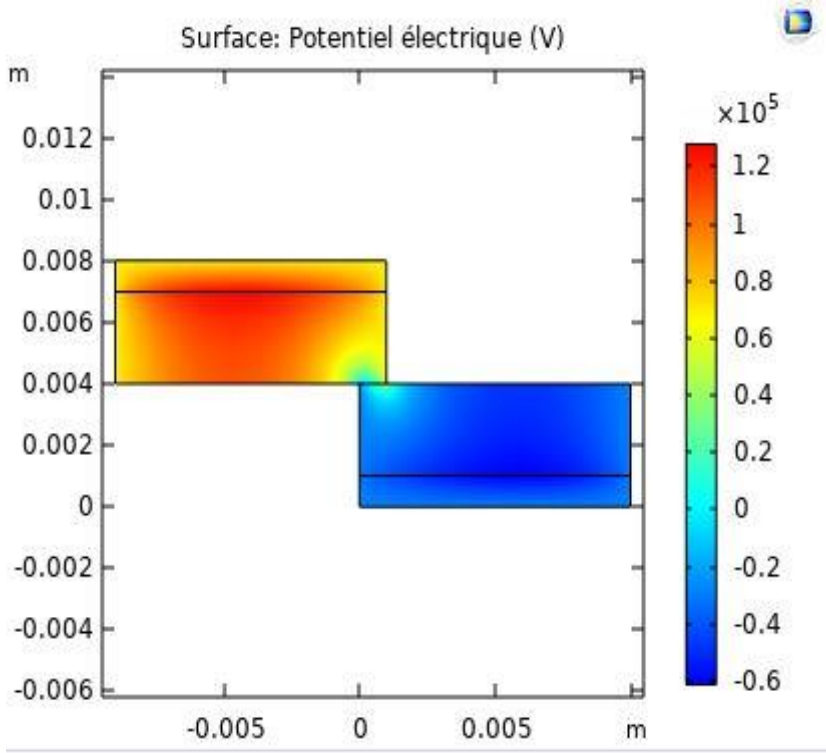
x=0.3cm



x=0.5cm



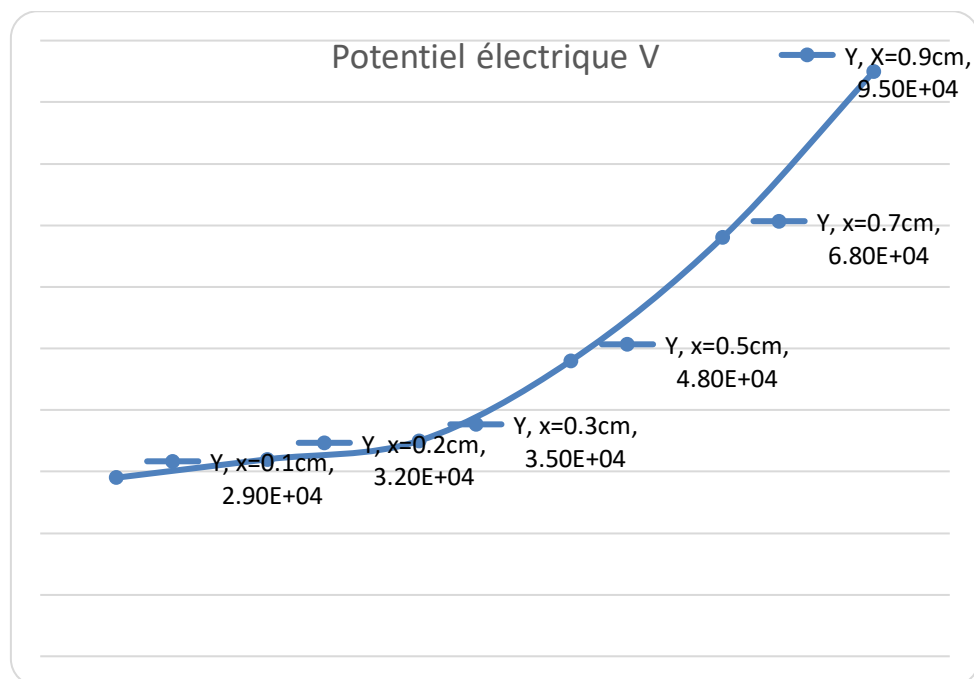
x=0.7cm



x=0.9cm

Tableau 6. Récapitulatif des valeurs moyennes de potentiel électrique pour différentes valeurs de déplacement latéral suivant x (mode glissant)

Distance de glissement x (cm)	Potentiel électrique (V)
0.1-cm	$2.9692 \cdot 10^4$
0.2-cm	$3.2580 \cdot 10^4$
0.3-cm	$3.5707 \cdot 10^4$
0.5-cm	$4.8453 \cdot 10^4$
0.7-cm	$6.8885 \cdot 10^4$
0.9-cm	$9.5910 \cdot 10^4$



Déplacement suivant x (mode glissement)

Figure 39. Graphique du potentiel électrique en fonction du déplacement latéral (mode glissant) suivant x .

Pour le Courant :

Tableau 07. Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de l'intensité du courant électrique pour différentes valeurs du déplacement latéral x

Déplacement latéral x (cm)	Potentiel électrique (V)	Courant électrique (Na)
0.1-cm	$2.9692 \cdot 10^4$	0.9
0.2-cm	$3.2580 \cdot 10^4$	0.97
0.3-cm	$3.5707 \cdot 10^4$	1.07
0.5-cm	$4.8453 \cdot 10^4$	1.45
0.7-cm	$6.8885 \cdot 10^4$	2.06
0.9-cm	$9.5910 \cdot 10^4$	2.88

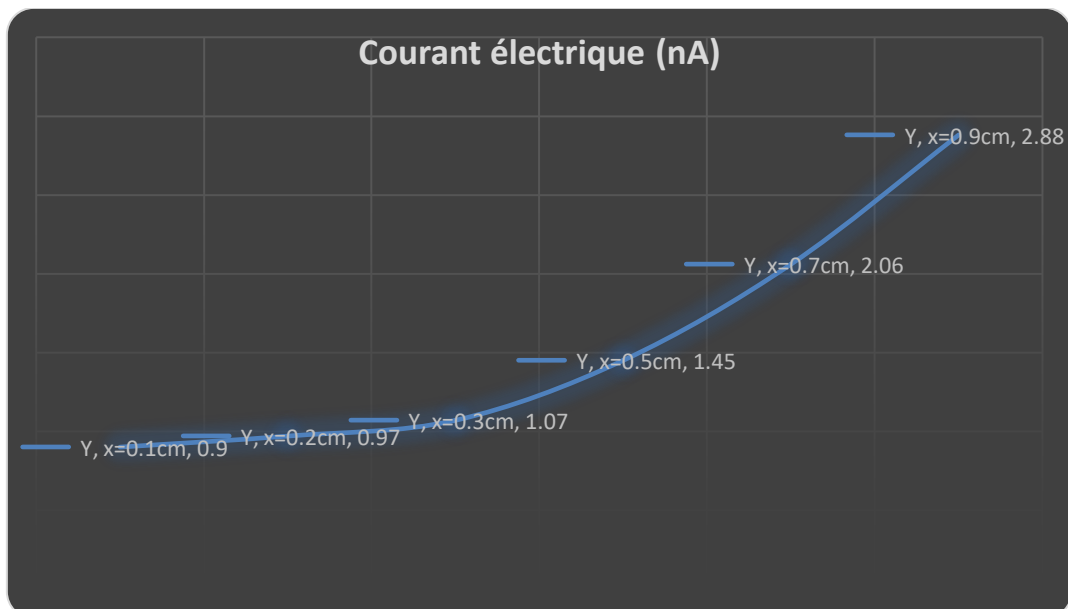


Figure .40. Graphique de l'intensité du courant électrique obtenu dans le cas du mode glissant pour différentes valeurs du déplacement x (cm).

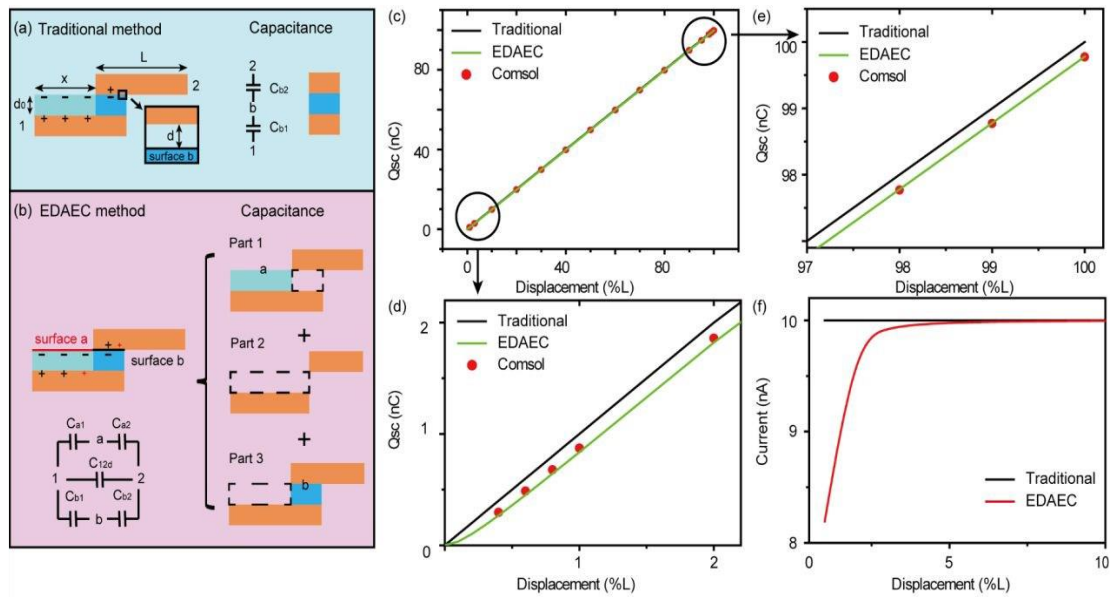


Fig. 41. Le mode traditionnel (a) et le mode de la méthode EDAEC (b) du mode LS TENG. La comparaison de la charge transférée par les méthodes traditionnelles et EDAEC (CE). La comparaison du courant de court-circuit par les méthodes traditionnelles et EDAEC.

Pour la charge du court-circuit Q_{cc} :

$$Q_{cc} = C * V$$

$$C = S / 4\pi * K * (L - x)$$

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^9 \text{ SI (N m}^2\text{C}^{-2}\text{)}.$$

S la section en mètres carrés (m^2) ; Rectangle $S = L \cdot H = 0.01 * 0.003 = 3 \cdot 10^{-5} m^2$

L = ℓ la longueur en mètres (m) ; (Rectangle de géométrie $L = 1 \text{ cm} = 0.01 \text{ m}$)

x (cm)=déplacement suivant x (glissant)

Pour $x = 0.1 \text{ cm} = 0.001 \text{ cm}$

$$Q_{cc} = 3 \cdot 10^{-5} / (4 * 3.14 * 9 * 10^9 * (0.01 - 0.001)) * 29692 = 0.8 * 10^{-9} = 0.8 \text{ Nc}$$

$$C = 3 \cdot 10^{-5} / (4 * 3.14 * 9 * 10^9 * (0.01 - 0.001)) = 2 * 10^{-14} \text{ F} = 0.002 \text{ Pf}$$

Tableau 8. Récapitulatif des valeurs moyennes du potentiel électrique et de la charge du court-circuit pour différentes valeurs du déplacement latéral x (cm) (mode glissant)

Déplacement latéral x (cm)	Potentiel électrique (V)	Charge Court-circuit Qcc (Nc)
0.1-cm	$2.9692 \cdot 10^4$	0.8
0.2-cm	$3.2580 \cdot 10^4$	1
0.3-cm	$3.5707 \cdot 10^4$	1.35
0.5-cm	$4.8453 \cdot 10^4$	2.5
0.7-cm	$6.8885 \cdot 10^4$	6.09
0.9-cm	$9.5910 \cdot 10^4$	25.4

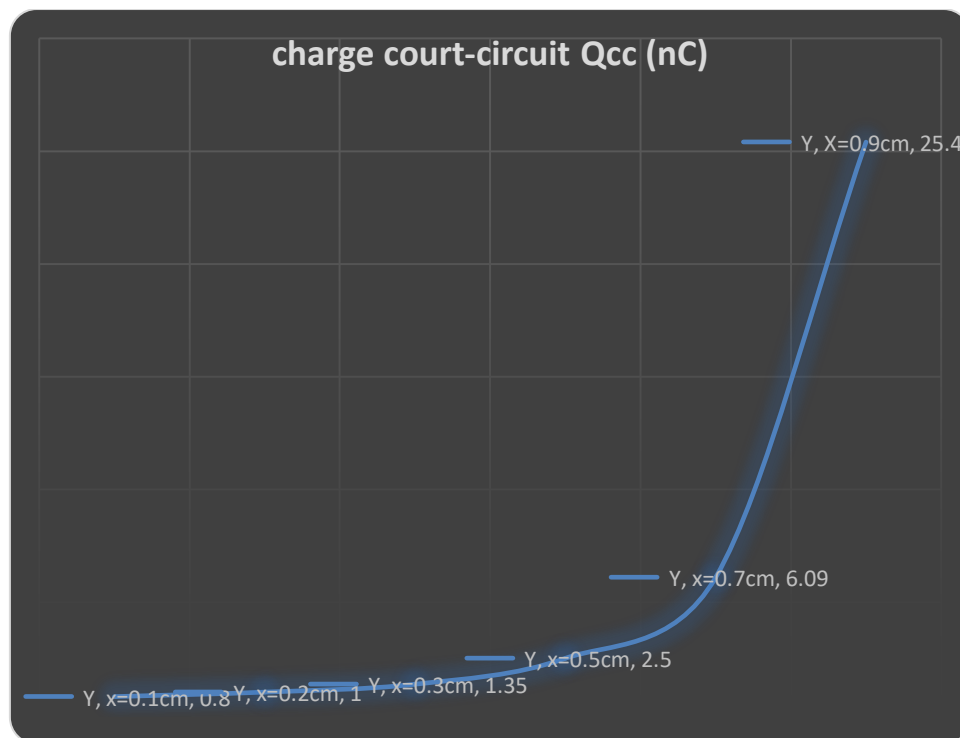


Fig. 42. Graphique de la charge du court-circuit (Nc) en fonction du déplacement latéral suivant x (cm) (mode glissant).

IV.5. Conclusion du chapitre :

D'après l'étude paramétrique effectuée pour les deux modes de contact et glissant, respectivement, on remarquera que le mode glissant générera plus de courant électrique que celui du mode contact. Ce résultat apparaît comme logique puisque l'effet triboélectrique est créé suite aux frottements des deux matériaux ; le mode glissant est de ce fait tout indiquée pour ce genre d'application. De plus, la modélisation sous COMSOL avec les différents résultats du chapitre IV confirment que l'approche et la méthode de résolution choisie pour modéliser ce phénomène peuvent être utilisées pour la simulation d'autres géométries plus complexes. En effet, comme prochaine étape de ce travail de simulation, on considérera le cas d'un système en 3D qui épousera la forme exacte de l'interface entre les deux blocs formant la prothèse du genou montrée sur la figure de l'arthroplastie totale du genou.

Ce travail de master a été défini avec comme objectif de modéliser des générateurs de dimensions nanométriques appelés à être utilisés comme générateurs de courant électrique sur des prothèses intelligentes dans le domaine de la chirurgie orthopédique.

Le défi majeur était de proposer une modélisation de l'effet triboélectrique sous Comsol, en tenant compte du fait qu'un tel module n'existe pas encore sous Comsol. L'étude des rares publications écrites sur ce nouveau domaine de recherche nous a permis de proposer une approche de modélisation basée sur le module électrostatique sous Comsol.

La partie validation étant incontournable pour vérifier si oui ou non l'approche proposée est adéquate. Aussi, grâce à une étude paramétrique effectuée pour les deux types de modes; contact et glissant, respectivement, on a remarqué que le mode glissant générera plus de courant électrique que le mode type contact. Ce résultat apparaît comme logique puisque l'effet triboélectrique est créé suite aux frottements des deux matériaux. Ainsi, le mode glissant est de ce fait tout indiqué pour ce genre d'applications. De plus, la modélisation sous COMSOL avec les différents résultats du chapitre IV confirment que l'approche et la méthode de résolution choisie pour modéliser ce phénomène peuvent être utilisées pour la simulation d'autres géométries plus complexes. La suite du présent travail consiste à modéliser des matériaux triboélectriques ayant la forme tridimensionnelle complexe des prothèses du genou.

Références bibliographiques

[1] Z.L. Wang et al., Triboelectric Nanogenerators, Green Energy and Technology, DOI 10.1007/978-3-319-40039-6_1(2016)

[2] S.M. Niu, Z.L. Wang, Theoretical systems of triboelectric nanogenerators. Nano Energy 14,161–192 (2015)

[3] Ayman Abdelwahed, Mayssa Amin, Mohamed Elosairy, Theoretical modeling for enhancing contact-separation triboelectric nanogenerator performance. 978-1-5090-0799-8. (2016).

[4] Z.L. Wang, Triboelectric nanogenerators as new energy technology for self-powered systems and as active mechanical and chemical sensors. ACS Nano 7(11), 9533–9557 (2013)

[5] Reggam Khaled, “Simulation numérique sous comsol multiphysics du comportement mécanique d'une structure soumise à plusieurs types de chargement”, Mémoire de master, Université du 8 Mai 1945 de Guelma, Juin 2013.

[6] Boumaiza Bachir, “Modélisation sous comsol multiphysics d'un système de séchage”, Mémoire de master, Université du 8 Mai 1945 de Guelma, Juin 2013.

[7] M. Mostefai Noureddine, M. Dine Khair-Eddine, “Etude du champ électrique d'une décharge couronne pointe plan positive”, Université de Tahar Moulay de Saïda, Août 2018.

[8] X. Li, T.H Lau, D. Guan and Y. ZiA universal method for quantitative analysis of triboelectric nanogenerator. , J. Mater.chem. DOI :10.1039/C9TA06525C. (2019).

[9] Giovanni Barbosa. Computational study of triboelectric generator design. Master thesis, Rhode Island College, New York, USA, August 2020.

Résumé

Résumé

La technologie des nano générateurs triboélectriques (TENG) basée sur l'électrification et l'électro-induction statique émerge comme une nouvelle technologie de collecte de l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique. L'effet triboélectrique est le processus dans lequel une charge électrique est générée après que différents matériaux se frottent et se séparent du contact. Les applications de l'effet triboélectrique restent néanmoins assez rares, puisque des études théoriques et de modélisations, surtout pour des systèmes ayant des géométries complexes se trouvent actuellement au stade préliminaire. Une des applications qui paraît très intéressante des TENG concerne leurs utilisations dans des implants ou prothèse orthopédiques. Dans ce mémoire de master, après une étude théorique des TENG, une approche de modélisation est proposée dans le cas de TENG ayant une géométrie de plaques accolées l'une à l'autre (électrode sur diélectrique). On utilise le logiciel Comsol Multiphysics pour la simulation de deux cas d'études qui sont : TENG avec mode de contact et TENG avec mode glissant, respectivement. Le module électrostatique est utilisé puisqu'aucun module triboélectrique n'existe sous Comsol actuellement. Une étude paramétrique est faite afin de comprendre quelles sont les pistes à explorer pour améliorer les performances de ces nano générateurs. Les résultats des simulations indiquent que le mode glissant générera plus d'électricité

Abstract

The technology of triboelectric nanogenerators (TENG) based on electrification and static electro-induction is emerging as a new technology for collecting electrical energy from mechanical energy. The triboelectric effect is the process in which an electric charge is generated after different materials rub together and separate from contact. Applications of the triboelectric effect, nevertheless, remain quite rare, since theoretical and modeling studies, especially for systems with complex geometries, are currently at the preliminary stage. One application that appears to be very interesting for TENG relates to their uses in orthopedic implants or prostheses. In this master's thesis, after a theoretical study of TENGs, a modeling approach is proposed in the case of TENG having geometry of plates stuck to each other (electrode on dielectric). We use the Comsol Multiphysics software for the simulation of two case studies which are: TENG with contact mode and TENG with sliding mode, respectively. The electrostatic module is used since no triboelectric module currently exists under Comsol. A parametric study is carried out in order to understand what avenues to explore to improve

Résumé

the performance of these nanogenerators. The simulation results indicate that the sliding mode will generate more electricity.