



HAL
open science

Modélisation d'un tribogénérateur portable autonome basé système intégré sur textiles

Gaëtan Vauche

► **To cite this version:**

Gaëtan Vauche. Modélisation d'un tribogénérateur portable autonome basé système intégré sur textiles. Autre [cond-mat.other]. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2023. Français. NNT : 2023STET0040 . tel-04556196

HAL Id: tel-04556196

<https://theses.hal.science/tel-04556196>

Submitted on 23 Apr 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2023STET040

**THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ JEAN MONNET SAINT-ÉTIENNE**

Membre de l'Université de LYON

École Doctorale N°488
(Sciences Ingénierie, Santé)

Spécialité / discipline de doctorat :
Micro-électronique

Soutenue publiquement le 24/11/2023, par :
Gaëtan VAUCHE

**Modélisation d'un tribogénérateur
portable autonome basé système
intégré sur textiles**

Devant un jury composé de :

SAULOT, Aurélien Professeur des Universités LaMCoS **Président**

BISTAC, Sophie Professeur des Universités LPIM - UHA **Rapporteuse**

CASTELLON, Jérôme Maître de Conférences (HDR) Institut d'Électronique et des Systèmes (IES) **Examineur**

DANTRAS, Eric Maître de Conférences (HDR) CIRIMAT **Examineur**

CORBIER, Christophe Maître de Conférences (HDR) LASPI Directeur de thèse

EL BADAoui, Mohamed Professeur des Universités LASPI **Invité**

*À ma compagne Roxane pour son soutien infaillible qui me permet d'avancer,
À mon père et à ma mère qui représentent mes plus grandes sources d'inspiration et
qui m'ont donné les outils sans lesquels rien n'aurait été possible,
À mes frères et sœurs pour la force qu'ils m'apportent au quotidien,
À Nathalie pour sa bienveillance et son aide inestimable,
À ma famille qui dans les moments difficiles a été ma source de réconfort.*

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette thèse, ce fut un voyage intellectuel fascinant et enrichissant. Leurs encouragements, conseils et soutiens m'ont été inestimables.

Mes goûts pour la recherche et l'enseignement se développèrent au gré des rencontres qui jalonnèrent mon parcours académique.

Pourtant, l'une d'entre elles constitue à mes yeux le point d'orgue de toutes ces années de travail. Ainsi, Monsieur le Professeur CORBIER fut pour moi un authentique mentor. Que ce soit à travers la richesse de son enseignement au sein de l'IUT de Roanne, son expertise quant aux différents contenus scientifiques, ses capacités de communicant et de pédagogue pendant les cours, il ne cessa de représenter pour moi la voix à suivre et une forme d'aboutissement personnel.

Après mon second cycle universitaire, il m'a proposé ce sujet de thèse original et je n'ai eu d'autres choix que d'accepter. Il m'a offert la formidable opportunité d'effectuer ce travail tout en étant le guide patient et indispensable à l'exploration de mes idées et des nouvelles pistes de réflexion. Ses conseils avisés, son expertise et la bienveillance qu'il m'a témoignés représentent les piliers de cette thèse. Je lui en suis extrêmement redevable.

Je souhaite manifester ma reconnaissance envers les acteurs du projet TIGER et particulièrement à Roger DELATTRE, Jennifer WEIMMERSKIRCH et Xavier BODDAERT. Les discussions stimulantes lors des points mensuels ont rendu chaque étape de cette thèse agréable. Nos séances de réflexions générèrent des idées novatrices qui éclairèrent de nombreuses facettes de ce travail. Leurs connaissances approfondies dans les divers domaines d'expertises rattachés au projet ont été une source d'inspiration constante.

Mes remerciements vont également à Reem ABOU MARAK DIT BROME, sa perspicacité et son sens de l'humour lors de nos longs débats, durant les trajets entre Lyon et Roanne, ont été une source d'énergie positive.

Je suis reconnaissant envers Lucien PERISSE, inventeur de génie, qui a toujours répondu présent pour m'épauler avec le banc, à Alexandre JOBERT-POLETTE pour son soutien technique tout au long du développement du projet et à Geraledine PICHARD pour son efficacité et sa disponibilité.

Cette thèse ne se serait bien évidemment pas déroulée ainsi sans la contribution du personnel du département RT et GIM de l'IUT de Roanne, qui m'accompagne depuis mes débuts dans l'enseignement supérieur.

Enfin, un remerciement tout particulier à ma compagne Roxane qui depuis le début de mon projet a su faire preuve de la sensibilité, de l'écoute et de l'intelligence nécessaire à l'accompagnement sans faille de mon travail. Elle a su rester compréhensive et patiente durant ces trois années, elle m'a aiguillé et aidé face aux nombreux problèmes rencontrés. Elle sut à maintes reprises dissiper mes inquiétudes et rendre encore plus merveilleux le chemin que j'emprunte.

Résumé

L'une des principales exigences des textiles intelligents consiste à parvenir à inclure une source d'énergie pour alimenter les systèmes électroniques intégrés. Dans ce contexte, les nanogénérateurs triboélectriques textiles (T-TENG) semblent particulièrement bien adaptés pour jouer ce rôle de manière imperceptible au cœur des textiles, ce qui les rend très intéressants pour le développement de futurs appareils autonomes. Cette thèse propose donc une étude théorique et empirique de ces dispositifs. Les différentes modélisations précédemment réalisées se sont d'abord basées sur une approche de Gauss pour tester l'efficacité théorique des TENG. Puis, les équations de Maxwell, combinées à une représentation « par couche » du TENG avec des charges surfaciques, permirent d'affiner les résultats des simulations. Le travail de modélisation soumis ici fait suite à cette représentation grâce à l'emploi des formules de Maxwell « par couche », mais en utilisant des charges volumiques. Cette modification apporte ainsi un niveau de précision supplémentaire et ouvre de nouvelles perspectives pour la compréhension des phénomènes électromagnétiques présents dans les TENG. En parallèle, une campagne de mesure permit d'analyser l'impact des principaux paramètres qui favorisent la production d'énergie comme la fréquence des mouvements imposés, la surface de contact et l'impédance de charge. De plus, de nouveaux effets furent mis en lumière et particulièrement l'importance d'une phase de préfrottements, essentielle à l'utilisation des TENG en tant que source d'énergie.

Abstract

One of the major requirements for smart textiles is to incorporate an energy source to power integrated electronic systems. In this context, textile triboelectric nanogenerators (T-TENGs) seem particularly well suited to play this role imperceptibly at the heart of textiles, making them very interesting for the development of future autonomous devices. This thesis proposes a theoretical and empirical study of these devices. The various models previously carried out were first based on a Gaussian approach to test the theoretical performance of TENGs. Then, Maxwell's equations, combined with a "per layer" representation of the TENG with surface loads, were used to refine the simulation results. The modeling work presented here follows on from this representation, using Maxwell's formulas "per layer", but with volume loads. This modification provides an additional level of precision and opens up new perspectives for understanding the electromagnetic phenomena present in TENGs. At the same time, a measurement program was carried out to analyze the impact of the main parameters involved in energy generation, such as the frequency of applied movements, contact area and load impedance. In addition, new effects were brought to light, in particular the importance of a pre-sliding phase, essential to the use of TENGs as an energy source.

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Projet TIGER	10
1.1.1	Description du projet	10
1.1.2	Présentation du porteur et des partenaires	11
1.1.3	Pertinence et qualité du partenariat	12
1.1.4	Caractère innovant du projet	12
1.1.5	Adéquation avec les orientations technologiques de la défense	15
1.1.6	Le projet dans la stratégie du porteur et des partenaires	15
1.1.7	Applications civiles et militaires - Marchés visés	16
1.2	Objets connectés	18
1.2.1	Connectivité	20
1.2.2	Les données collectées et traitées	20
1.2.3	Les objets eux-mêmes	21
1.3	Usages	22
1.3.1	La domotique	22
1.3.2	L'électroménager	22
1.3.3	La sécurité	23
1.3.4	La santé	24
1.4	Energie et impact écologique	24
1.4.1	La consommation d'énergie	25
1.4.2	Les énergies pour les dispositifs connectés	25
1.4.3	Les nanogénérateurs	26
2	État de l'art	31
2.1	Principaux phénomènes de récolte d'énergie	31
2.1.1	TENGs	32
2.2	Approche théorique des TENG	34
2.2.1	Modélisation	34

2.2.2	Impédance de charge optimale	38
2.3	Dispositif de transfert d'énergie	40
2.3.1	Adaptation d'impédance	40
2.3.2	Redressement et régulation de la tension	43
2.4	T-TENGs	44
2.4.1	Choix des matériaux : les diélectriques	45
2.4.2	Choix des matériaux : les conducteurs	45
2.4.3	Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures tissées	46
2.4.4	Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures tricotées	49
2.4.5	Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures multicouches	51
2.4.6	Analyse de différents types de structures T-TENG : autres structures d'intérêt pour la collecte d'énergie par mouvement de flexion	53
2.5	Intégration de systèmes électroniques dans les textiles	53
2.5.1	Pistes conductrices pour applications textiles	54
2.5.1.1	Pistes conductrices intégrées lors de la fabrication du textile	54
2.5.1.2	Traces conductrices sur le textile fini	55
2.5.1.2.1	Broderie	55
2.5.1.2.2	Sérigraphie	56
2.5.1.2.3	Impression à jet d'encre	56
2.5.1.2.4	Ablation au laser	57
2.5.2	Intégration hétérogène de l'électronique sur les textiles	58
2.5.2.1	Intégration de circuits flexibles	58
2.5.2.2	Intégration des composants	60
2.5.2.2.1	Collage de l'adhésif : l'adhésif conducteur	60
2.5.2.2.2	Collage de l'adhésif : l'adhésif non conducteur (NCA)	61
2.5.2.2.3	Soudure	61
2.5.2.2.4	Comparaison des méthodes	62
3	Modélisation du TENG par l'approche Maxwell	65
3.1	L'approche de Maxwell comme solution à la modélisation 3D du TENG	65
3.1.1	Champ électrique	65
3.1.2	Potentiel	69
3.2	Application des équations de champs et de potentiels	71
3.2.1	La problématique des simulations numériques	71

3.2.2	Choix du mouvement	73
3.2.3	Condensateur plan simple	74
3.2.4	Condensateur plan à couches	79
3.2.5	Application au TENG	81
4	Mesures	87
4.1	Présentation du banc de mesures	87
4.2	Mesures avec une charge résistive	90
4.2.1	Impact de la séquence de préfrotement	90
4.2.2	Impact de la résistance de charge R	95
4.2.3	Impact de la fréquence du mouvement F	98
4.2.4	Impact de la surface du TENG S	100
4.2.5	Chaussette-textile	102
4.3	Comparaison entre les mesures et la modélisation	105
5	Couplage TENG-Pont redresseur-Batterie souple	107
5.1	Condensateur simple	108
5.2	Circuit de charge : condensateur et batterie souple	109
6	Conclusion	112

Chapitre 1

Introduction

Le secteur des textiles intelligents (smart textiles en anglais) poursuit son essor depuis une vingtaine d'années. Ce type de technologie autorise l'intégration de fonctionnalités électroniques au cœur de vêtements.

Cet ajout apporte de nouvelles perspectives en ce qui concerne le suivi des données organiques notamment lors de situation d'intervention, en cas de convalescence médicalisée, ou durant une activité sportive. L'acquisition d'informations relatives à une surveillance thérapeutique des personnels de défense représente l'un des points prévus dans le projet ARTEMIS. La mesure des paramètres physiologiques joue un rôle important pendant les entraînements ou en opération, pour permettre une amélioration des performances [131]. La sécurité et la confidentialité de ces données apparaissent comme capitales et requièrent une solution 100% française.

Les éléments nécessaires à ce suivi doivent être intégrés dans le textile de la manière la plus fine possible. En effet, ce type de tenue implique une adaptation parfaite au physique de l'utilisateur malgré les différences de morphologie entre les hommes et les femmes. De plus, afin de conserver la liberté de mouvement du porteur, l'électronique embarquée suppose de demeurer imperceptible [98] dans n'importe quelle situation.

Les modules rigides tirent leurs alimentations, le plus souvent, de piles ou de batteries. Ces sources d'énergie doivent être changées ou chargées régulièrement, sous peine de rendre impossible l'emploi des fonctions implémentées dans le textile. Cela pose un problème majeur si l'accès à un point de recharge est limité (terrain d'intervention, athlète en séance d'exercice, etc.) et un souci écologique lors du recours à des accumulateurs non renouvelables. Il manque, par conséquent, une solution génératrice de courant pour alimenter des « smart-textiles » de manière autonome.

Le Projet TIGER vise donc à répondre à cette problématique. Ce dernier propose la réalisation d'un textile tribogénérateur qui intègre son électronique de récupération passive et de stockage énergétique, puis de vérifier son efficacité en l'implémentant dans un démonstrateur.

C'est dans ce contexte riche de perspectives que vient s'inscrire la thèse présentée ici.

1.1 Projet TIGER

La demande croissante de terminaux connectés oblige les acteurs du secteur à renouveler perpétuellement leurs technologies en innovant ou en améliorant celles déjà existantes. Les avancées relatives à l'alimentation et la consommation électrique de ces dispositifs font partie des domaines clefs pour faire face aux défis environnementaux majeurs à venir. C'est à cette nécessité que le Projet TIGER répond au travers de multiples progrès techniques. Les objectifs fixés sont détaillés ici afin d'apporter des précisions concernant les verrous scientifiques qui faisaient obstacle lors de la création du programme.

1.1.1 Description du projet

L'objectif de ce projet consiste à développer un système de génération d'énergie autonome souple intégré au tissu. Ce dernier doit alimenter des dispositifs communicants basse consommation (de l'ordre de quelques mW en instantané [147]), comme le monitoring physiologique longue durée. Ce système indépendant est composé d'une étoffe à base de fibres textiles tribogénératrices qui inclut sa propre électronique flexible de charge passive et de stockage. L'étude se décline selon quatre points majeurs.

La conception d'un chargeur de batteries qui utilise une électronique passive. Les énergies récupérées en instantané par la triboélectricité restent pour l'heure assez faibles [35]. Ceci permet d'assurer la transmission de puissance entre le générateur triboélectrique (TENG) et l'accumulateur à moindres pertes. L'exécution de multiples tests doit ainsi justifier un transfert d'énergie maximale entre les éléments du système (entre le TENG et le chargeur, ainsi qu'entre le chargeur et la microbatterie).

La réalisation d'un prototype du chargeur sur substrat souple. Cette étape s'intéresse au développement d'une électronique imperceptible et confortable, dont l'envergure n'impacte pas la rigidité du textile dans lequel elle s'intègre. Pour ce faire, des contraintes technologiques sur l'épaisseur totale, la surface et le grammage du circuit sont à lever. Dans le cadre de ce projet, ces avancées se basent sur de solides compétences déjà acquises au sein du département d'Electronique Flexible (FEL)[96], [95]. En parallèle, le dimensionnement d'une microbatterie étirable, basée sur une technologie brevetée à l'international du FEL [99], [25], permet de répondre aux caractéristiques du tribogénérateur électrique et de son circuit.

L'élaboration d'un prototype intégrable sur des vêtements. L'objectif de cette partie vise à coupler les trois briques technologiques développées dans ce projet : le textile triboélectrique, l'électronique de charge flexible, et la batterie étirable. Pour ce faire, une dernière étape consiste à réaliser les interconnexions souples entre les différents éléments. Enfin, des séries de tests effectués sur plusieurs zones du corps permettent de quantifier l'énergie récupérée par les frottements naturels locaux en fonction de la catégorie de l'effort exécuté (normal ou forcé).

La mise au point d'un démonstrateur afin de valider la viabilité du système d'alimentation autonome choisi durant ces travaux. Pour cela, différents cas d'usage à faible consommation d'énergie sont reconstitués dans les laboratoires. L'application proposée dans le cadre de ce projet concerne le suivi physiologique et la détection de chute d'une personne détentriche du produit. Dans le cas d'une perte d'équilibre associée à un malaise ou autre défaillance, l'outil déclenchera une balise qui alertera les secours. Un micro-

contrôleur sur base de silicium assurera la partie calculatoire et la partie connectivité du démonstrateur (grâce à des protocoles de communication comme le Bluetooth Low Energy (BLE)). Les individus qui pourraient bénéficier de ces dispositifs sont aussi bien le personnel militaire en opération que les sportifs de haut niveau ou encore des patients isolés.

1.1.2 Présentation du porteur et des partenaires

Le projet TIGER est un consortium qui regroupe trois entités distinctes, l'industriel [SOFILA](#) (porteur du programme), le laboratoire d'électronique flexible [FEL](#) et le laboratoire d'analyse des signaux et des processus industriels [LASPI](#).

SOFILA est un groupe textile rhônalpin, né du rapprochement de plusieurs entreprises centenaires : Billion et Mayor en 1995, ainsi que Moulinages Schwartzbach et Condamin et Prodon en 2012, suite au rachat du groupe SOFILA.

En tant que moulinier-texturateur, SOFILA est expert sur l'assemblage de fil de titres fins à moyens, à application dans des domaines variés (habillement, ameublement, technique, médical, etc.).

Lors de projets de recherche passés et actuels, le groupe a notamment participé à :

- la réalisation d'antennes RFID textile dans le cadre du projet FUI PACID
- l'intégration de puces RFID dans un fil (co-inventeur brevet FR2961947)

SOFILA a son siège social à Lyon, et 3 unités de production dans la Loire, la Haute-Loire et la Drôme, qui emploient approximativement 50 salariés répartis sur ces 3 sites. Le chiffre d'affaires annuel est de l'ordre de 10 millions d'euros par an. Les fonds propres de SOFILA représentent également environ 10 millions d'euros.

Le département d'électronique Flexible (FEL) fait partie du Centre de Microélectronique de Provence (CMP), un des cinq centres de recherche de l'école des Mines de Saint-étienne, elle-même une école de L'Institut Mine Telecom. Le CMP est composé de 105 individus : 22 enseignants-chercheurs, 5 CEA, 11 personnels administratifs et techniques et 57 doctorants et postdoctorants. Le département FEL est composé de 8 enseignants-chercheurs dont les compétences englobent notamment l'électronique souple et étirable, l'intégration hétérogène, la récupération d'énergie et les batteries flexibles [96] – [25]. Les recherches du département s'inscrivent dans une volonté de développement de systèmes électroniques autonomes et communicants pour la réalisation d'interfaces sensibles, de peau électronique, de dispositifs médicaux, etc.

Le Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels (LASPI – EA 3059) est un laboratoire de recherche de l'Université Jean Monnet de St-Etienne créé en 1995. Le LASPI composé de 11 enseignants-chercheurs et 12 doctorants est implanté à l'IUT de Roanne et a des compétences dans les domaines du traitement du signal et du génie industriel. Le LASPI est partenaire de SAFRAN et H-PUMP avec trois thèses CIFRE, avec le SNA-EPIS à St-Etienne, le LVA à Lyon, le LAMCOS à Lyon, le GIPSALAB à Grenoble, le laboratoire PRISME à Orléans, ainsi que de nombreux collaborateurs étrangers. Durant la période 2015-2018, le LASPI a publié une soixantaine d'articles dans des journaux de rang international.

1.1.3 Pertinence et qualité du partenariat

Le projet TIGER peut s'appuyer sur les connaissances propres de chacun des partenaires :

- SOFILA : Expertise des textiles et de la fabrication de fils
- LASPI : Expertise en modélisation électronique et prototypage
- FEL : Expertise en microélectronique souple et stockage de l'énergie

Les trois partenaires disposent de compétences complémentaires en textile, électronique, et microélectronique sur support souple. Les smart textiles se situent à la croisée de ces domaines qui habituellement ne s'associent pas ou peu. Cette collaboration autorise donc la réunion de savoir-faire dans ces divers secteurs. SOFILA assure donc la coordination des travaux.

Le projet repose sur deux brevets. Le premier, détenu par SOFILA, touche au domaine du fil tribogénérateur. Quant au second, possédé par l'école des Mines de Saint-étienne, concerne la microbatterie souple et étirable [25]. La stratégie de parutions scientifiques et de propriétés intellectuelles (en cas de découverte majeure) implique une étude rapide de la brevetabilité pour permettre dans la suite la rédaction de publications. De même les publications n'auront lieu qu'après l'analyse de brevetabilité faite.

1.1.4 Caractère innovant du projet

Le premier aspect innovant de ce projet consiste en la récupération d'énergie générée par conversion des frottements et battements en courant électrique par une étoffe textile respirante et confortable. Les premiers essais développés par SOFILA donnèrent une tension crête à crête de 10 V avec une intensité-pic de 1 μA et une énergie moyenne de 70 nWh. Le prototype possédait une surface de 210 cm^2 et durant les tests, le mouvement choisi fut une friction de type glissement d'une fréquence de 2 Hz appliquée avec une pression de 1000 N/m^2 (soit 10 g/cm^2). Ce système produisait ainsi 3,3 $\mu Wh/m^2$. En prenant l'hypothèse d'un tshirt équipé de 2 bandes de 10 $cm \times 40 cm$ de chaque côté afin de profiter des gestes des bras, une énergie de 0,266 μWh était envisageable.

L'objectif ici vise à maximiser la collecte d'énergie par ce type de dispositif, avec pour ambition 1,5 μWh sur un vêtement. Les pistes d'optimisation demeurent nombreuses et parmi la pluralité de ces dernières, trois d'entre elles semblent participer majoritairement à la production d'électricité.

L'étude du circuit de transfert apparaît comme une première voie de recherche intéressante. En effet, par un choix ingénieux de composants, qui dépendent de la fréquence du TENG [109], une grande partie de la puissance transformée peut transiter vers la batterie.

L'analyse des matériaux sélectionnés apporte une seconde perspective d'amélioration. Le fil conducteur désigné doit en effet minimiser les pertes résistives tout en restant fin et souple dans le but de conserver le confort textile de l'étoffe. Un fil de polymère plaqué métal remplit ces conditions, mais l'emploi de fils à plus faible impédance ne doit pas pour autant être négligé. De plus, la présence de structuration micronanoporeuse semble améliorer la génération de charges dans le diélectrique de surface [144]. Cela impose donc l'étude de plusieurs références commerciales disponibles afin de retenir la plus favorable.

L'optimisation de l'étoffe permet quant à elle de maximiser la superficie de contact.

En effet, plus l'étoffe tissée ou tricotée s'adapte à la zone d'application [80], moins la force d'appui nécessaire importe. D'autre part, l'architecture joue un rôle prépondérant dans la résistivité totale du TENG. Elle définit le parcours et la distance entre le site de génération de charges et celui de stockage. Il convient donc de choisir un chemin le plus court possible.

Le second aspect innovant comprend la mise au point d'un circuit électronique de gestion souple accompagné de sa batterie flexible et étirable. Le système s'encapsule directement dans le vêtement pour former une structure intégrée indétectable par le porteur et résistant aux contraintes.

Les accumulateurs produits au sein du département FEL présentent une capacité de 1200 mAh/cm^2 pour un taux de décharge de $C/10$. La réalisation d'une centaine de cycles de charge-décharge accomplis en laboratoire montre une grande stabilité de ces accumulateurs. L'imperceptibilité du dispositif demeure un point essentiel, afin de ne pas entraver la liberté de mouvement du détenteur. Le TENG respecte ce cahier des charges, mais l'électronique de récupération doit également se conformer à ces exigences.

La première technologie envisagée repose sur une intégration sous forme de point dur de petite taille, tel un bouton. C'est une encapsulation rigide, mais qui nécessite de miniaturiser tous les éléments, et donc, par exemple, de limiter la capacité de la batterie embarquée. De plus, la robustesse de raccordement entre un générateur flexible et une partie solide devient plus difficile à gérer, puisque ce genre d'interconnexion demeure souvent la zone faible d'un circuit.

Une intégration sous forme d'électronique souple encapsulée répond alors aux problèmes dus à la technique présente en amont. Dans ce cas, les composants sont incorporés sur le textile, en vue de pouvoir supporter des déformations, et encapsulés afin de résister à l'humidité (sueur, lavage). Cette catégorie d'intégration permet à l'utilisateur d'oublier complètement le dispositif. Cependant, elle demande à l'électronique une solidité extrême, puisque la réparation en cas de dysfonctionnement ou d'incident (type coupure) semble difficile.

Une autre solution proposée dans le cadre de ce projet consiste à employer une électronique souple repositionnable sous forme de patch. La fixation nécessite l'utilisation de scratch conducteur [51] et de bouton pression, pour assurer un détrompage et une robustesse de continuité électrique. Ce système permet le retrait de l'électronique pour le lavage, afin d'augmenter sa durée de vie, et également le remplacement aisé de ce module en cas de défaillance ou d'usure.

Le produit final vise à intégrer, dans un vêtement, une source d'énergie permanente nécessaire à la surveillance continue des constantes physiques des personnels civils ou militaires durant leurs missions. Ce dernier a pour but d'exploiter le suivi physiologique d'un individu pour identifier, entre autres, une perte d'équilibre liée à un malaise et de prévenir les secours appropriés.

En s'appuyant sur les marchandises disponibles, la combinaison d'un microcontrôleur basse consommation (STM32L431 par exemple) avec un accéléromètre sur base MEMS (MicroElectronic and Microelectromechanical Systems, LIS2DW12 par exemple) absorbent au repos une puissance moyenne de 104 nW . Cette valeur coïncide avec la production observée sur les premiers échantillons de textile tribogénérateur. Elle se détermine en fonction des données du fabricant. En inactivité, un LIS2DW12 nécessite environ $1,8 \text{ V} \times 8 \text{ nA} = 14,4 \text{ nW}$, où $1,8 \text{ V}$ représente la tension d'alimentation de

l'électronique. Un STM32L431 en veille requière quant à lui $1,8 V \times 50 nA = 90 nW$.

La phase de réveil de l'électronique est liée à une interruption en provenance du capteur (détection d'une chute). L'électronique surveille alors le comportement de la personne et émet un signal de détresse en cas d'immobilité consécutive à une chute.

Dans le cas d'une acquisition à $12,5 Hz$, le courant dépensé par le capteur représente $1\mu A$. Celui consommé par le microcontrôleur en mode « low power run » à une fréquence de $100 kHz$ est de $52,4 \mu A$ pour le traitement des données. Au total, la puissance considérée pour la mesure et la prise de décision correspond à $96 \mu W$. La durée totale de cette étape est estimée à une seconde.

Enfin, la transmission à une balise de détresse locale s'exécute à travers une liaison BLE (Bluetooth Low Energy). Cette liaison pourra également s'effectuer avec un smartphone par exemple pour une diffusion plus large de l'appel de détresse (numéros d'urgence avec géolocalisation, etc.). La puissance dépensée pour l'émission du signal, en se basant sur les données disponibles pour le composant BLE Blue-NRG annonce un courant de $8,2 mA$ durant un transfert. L'utilisation du microcontrôleur dans ce cas prévoit un usage de $2 mA$, soit une puissance totale d'environ $18 mW$ pour l'envoi. La période d'émission considérée persiste approximativement $20 ms$.

La supposition d'un scénario permet d'évaluer la consommation hypothétique d'un tel dispositif.

Sur une activité physique de $3 h$, les capteurs détectent une première chute au bout d'une heure et une seconde deux heures plus tard. Ici, seulement la seconde déclenche une alerte. La première étape nécessitera alors une énergie de $136 nWh$, sans diffusion. Quant à la seconde, elle utilisera $755 nWh$.

Ce scénario met donc en lumière les énergies consommées et produites et montre que ces dernières possèdent le même ordre de grandeur. Donc, en l'absence de chute, le textile tribogénérateur vient recharger la batterie qui va assurer le fonctionnement de l'électronique dans les phases de forte consommation. Ainsi, avec un accumulateur d'une capacité de $1 mAh$, une balise Bluetooth locale pourrait émettre durant $1 s$ toutes les minutes pendant environ $3 h$.

Dans le cadre de ce projet, une réévaluation de la fonction est prévue pour, notamment, prendre en compte les avancées technologiques réalisées dans le domaine des composants semi-conducteurs à ultrabasse consommation.

Les retombées scientifiques sont à la fois fondamentales et appliquées.

Pour les premières, elles permettent une meilleure compréhension des paramètres (diamètre du fil, techniques de tricotage/tissage, nombre de couches textiles, surfaces, etc.) qui influent sur la performance des tissus. Cette connaissance s'acquiert par l'analyse de la tension générée en fonction de leurs propriétés tribologiques et par la création d'un modèle mathématique.

La durabilité du TENG et de l'électronique associée font également l'objet d'une étude poussée, notamment leur résistance à l'abrasion, à l'humidité, et au lavage. Ces études autorisent une meilleure compréhension des effets de courbures par des contraintes textiles. Enfin, elles assurent une bonne assimilation de la résilience mécanique d'une électronique souple et de sa microbatterie étirable rattachée.

Les retombées scientifiques appliquées qui traitent du TENG fournissent un générateur électrique portable pour divers domaines comme le militaire, la sécurité civile, le médical,

la protection des travailleurs, le sport, etc.

Celles qui se rapportent aux modules relatifs aux circuits flexibles et la microbatterie, incluant le tribogénérateur et intégrable sur tout textile, apportent de nombreuses perspectives techniques. Elles ouvrent la voie au développement de circuits électroniques sur support souple ainsi que de batteries flexibles par des technologies industrialisables.

Néanmoins, la réalisation de ce projet nécessite la levée de plusieurs verrous scientifiques.

Premièrement, il convient de maximiser l'énergie récupérée par une étoffe tribogénératrice lors de frottements générés par son porteur grâce à des analyses sur les différents paramètres en vue d'une modélisation mathématique avancée.

Deuxièmement, le dimensionnement d'une microbatterie résiliente aux déformations mécaniques du corps humain demeure capital. Pour remédier à cette problématique, des électrodes étirables présentées sous forme de rangées de micropiliers supportés par des serpentins permettent dans un premier temps de répondre aux sollicitations mécaniques sans dégrader ses performances.

Le dernier verrou concerne la conception du produit final afin que la solution retenue coïncide avec l'utilisation pratique envisagée et offre une résistance optimale aux phénomènes tels que lavage, humidité, chaleur, altération, froissage, etc.

1.1.5 Adéquation avec les orientations technologiques de la défense

Ce projet est en adéquation avec les thématiques présentées dans le document de présentation de l'orientation de la S&T (POST) 2014-2019. Il concerne en premier lieu la thématique « Nanotechnologies », et en particulier la thématique technologique prioritaire :

- Nouvelles technologies pour l'équipement du combattant (plus particulièrement textile fonctionnalisé), par l'utilisation d'un fil textile générateur de courant.

Ce projet concerne également « Matériaux, Chimie, Energie », et plus particulièrement les thématiques technologiques prioritaires :

- Récupération d'énergie renouvelable en environnement non coopératif, grâce à la récupération de l'énergie triboélectrique générée par frottement du tissu actif.
- Stockage de l'énergie, grâce au système de charge de la batterie associée.

1.1.6 Le projet dans la stratégie du porteur et des partenaires

Le commerce textile classique de l'habillement progresse de 3 % par an au niveau mondial, mais en recul d'environ 10 % par an dans le chiffre d'affaires de SOFILA, notamment à cause de la concurrence asiatique. Cela nécessite donc de se placer sur d'audacieux marchés pour obtenir un relais de croissance. Ces dernières années, SOFILA pousse son implication dans la vente du fil technique (fil pour le marché des composites et EPI avec le projet NHYCCO, fil d'antenne pour puce RFID avec le programme PACID, etc.). Pouvoir proposer une solution novatrice qui répond aux besoins du domaine des smart textiles est un avantage qui permettra à l'entreprise de s'étendre dans de nouveaux marchés moins concurrentiels. De plus, l'intégration finale des éléments développés au cours de ce projet

se fera grâce à une start up dédiée.

En effet, une mise en production efficiente paraît possible en adossant la structure d'intégration et de commercialisation des outils « wearable » sous forme de start up, aux entités déjà existantes. Le business plan envisagé actuellement table sur la vente de 50000 *systemes/an*, par conséquent les hypothèses de travail pour le dimensionnement des lignes de confection se situent sur une cadence 50 *dispositifs/heures* de production.

Ainsi les sites de réalisation de SOFILA prendront en charge directement la fabrication des fils et des étoffes, avec un financement limité en terme industriel, ponctionné sur fonds propres de l'entreprise. Des lignes de production dans une structure de type SpinOff du FEL fourniront quant à elles des batteries et de l'électronique souples. L'investissement à anticiper pour ces lignes est estimé entre 1000 et 1500 *k€*. Pour cette organisation, la société SOFILA, prévoit de participer fortement dans cette technologie, pour partie sur fonds propres et pour partie en prêts bancaires. Enfin la startup en elle-même, qui prendrait en charge l'intégration (confection) et la commercialisation du dispositif, serait créée sur la base d'une première levée de fonds de 150 à 200 *k€*, les placements industriels restant limités pour cette structure.

La problématique de ce programme s'inscrit entièrement dans l'axe des recherches menées au sein du FEL et de leurs applications dans le domaine des techniques « wearable ». L'impact de ce projet permettra au département de lever de nouveaux verrous technologiques concernant la résilience mécanique de son électronique souple et l'augmentation des densités d'énergie et de puissances stockées dans ses microbatteries. La combinaison de ces travaux avec ceux portés par SOFILA et le LASPI offriront un aboutissement au développement d'un démonstrateur complet qui dépassera le cadre des solutions obtenues en laboratoire.

La stratégie du LASPI en science de l'ingénierie appliquée trouve pleinement sa position dans ce projet de recherche et d'innovation technologique. L'étude et la modélisation proposées pour les systèmes tribogénérateurs donnent une place de choix sur cette technologie modulaire originale et appliquée aux textiles dits intelligents.

1.1.7 Applications civiles et militaires - Marchés visés

Les principales applications du projet TIGER concernent l'alimentation de systèmes électroniques « low power ». Un second type de fonctions possibles envisage l'utilisation du tissu triboélectrique comme un capteur textile. Dans ce cas, il s'emploie tel un capteur de pression (analyse de respiration) ou interrupteur textile incorporé au vêtement.

Dans le domaine de la défense, le programme vise à créer une alimentation autonome pour les capteurs à faible consommation intégrés dans le textile. Cette intégration totale des fonctionnalités dans l'habit offre une acquisition d'informations sans gêner le personnel dans ses mouvements. Pour cela, le produit final pourra prendre la forme d'un vêtement tricoté par technologie « seamless » (sans couture), qui autorise un zonage de la pièce textile. Cette méthode de fabrication apporte un contrôle précis sur le design, ce qui favorise la récolte maximum d'énergie et facilite le positionnement des capteurs.

Le textile triboélectrique s'emploie aussi comme capteur tactile [114] et devient ainsi utilisable en tant que capteur de respiration [155]. Dans ces cas, le courant émis lors du contact ou de la déformation ne participe pas à l'alimentation du système, mais permet de déclencher une autre action ou la surveillance physiologique.

Ces deux utilisations ont pour but de venir en complément de matériel de supervision plus précis, mais également plus encombrant et lourd tel que le suivi d'ECG par un Holter. Dans le marché civil, les retombées directes du projet TIGER faciliteraient une vérification non invasive de données somatiques pour les individus âgées, afin de retarder le recours à un environnement de contrôle plus strict. Le taux d'adoption des nouvelles technologies augmente fortement parmi les seniors, et l'imperceptibilité du dispositif peut contribuer à sa bonne acceptation. L'intégration, par exemple, d'une détection de chute et d'un suivi de santé léger pour personnes encore indépendantes sécurise les intéressés et rassure leurs proches. Les chutes constituent en effet 90 % des accidents de la vie courante pour les personnes de 75 ans et plus. Cela correspond à un coût annuel estimé à 2 milliards d'euros [23], [120], et plus le temps passé à terre s'allonge, plus les séquelles physiques et psychologiques s'intensifient. Posséder un dispositif qui repère au plus vite une chute lorsqu'elle se produit, voire même de la prédire [4], représente donc un enjeu capital. Pour cela, la détection peut s'effectuer au niveau d'une chaussette ou d'un vêtement de corps, voire être incorporée au revêtement de sol.

Une application intéressante se dessine en outre chez les nouveau-nés. Une surveillance de la respiration des bébés inclus à leurs habits aiderait dans la lutte contre la mort subite du nourrisson, qui affecte 400 à 500 enfants par an en France, et 20000 à l'échelle mondiale.

Des exemples touchent aussi le domaine du sport amateur ou professionnel, pour un suivi d'activités, en intégrant et alimentant des capteurs d'examen physiologique et d'environnement (pouls, température, hygrométrie, etc.).

D'autres secteurs semblent en mesure de profiter de l'utilisation de la fonction « capteur » comme les domaines de la domotique (interrupteur textile, tapis qui allume la lumière lors d'un appui, etc.), de la mode (veste interactive, sur le modèle de la veste Jacquard par Google et Lévis) ainsi que divers usages du même type.

Le module tribogénérateur ainsi que l'unité de charge et de stockage d'énergie interviennent assez tôt dans la chaîne de valeur des textiles électroniques. Ils s'intègrent ainsi dans un grand nombre de produits différents de domaines variés.

Les collaborateurs de ce programme bénéficient de plusieurs forces afin d'adresser les besoins des divers marchés visés. SOFILA fournit déjà des tisseurs, tricoteurs et confectionneurs dans le secteur des EPI, du textile médical, sportif, et de la défense (Sasytex, Europrotect, Sofileta, Balsan, etc.). Elle dispose donc d'un lien avec la chaîne de valeur liée à plusieurs branches d'application.

La principale faiblesse des partenaires du consortium s'appuie sur l'absence d'entrepreneurs en électronique impliqués directement dans le projet. Une solution envisagée consiste en la création d'une « start-up » en cours de programme, qui se chargera de l'industrialisation des prototypes et de l'intégration des différentes compétences développées.

En ce qui concerne le business model associé à cette gamme de produits, ce dernier ne repose pas uniquement sur la vente du dispositif triboélectrique seul, mais bien d'un élément de génération d'énergie électrique entier. La valorisation de l'expérience acquise lors de la réalisation des démonstrateurs du projet TIGER s'effectue en proposant un accompagnement complet de l'acheteur dans la mise au point de sa marchandise textile électronique. En effet, une rapide enquête dans ce domaine établit que le client qui mettrait le produit sur le marché recherche avant tout une solution « clé en main ». Ce type de procédé implique la livraison d'un produit entièrement développé, de l'élaboration des textiles à l'implémentation sous forme d'applications web ou mobile.

Le commerce des e-textiles représentait 100 millions d'euros en 2018 et augmentera jusqu'à 2 milliards d'euros en 2029 d'après une étude récente menée par IDTechEx [33]. Réussir à atteindre 1 % de ce marché avec les déclinaisons de marchandises issues de ce programme de recherche constituera à court terme 10 % du CA de SOFILA, et à terme correspondra au double du chiffre d'affaires actuel.

Le danger majeur qui pèse sur l'aspect de la valorisation des résultats réside dans l'intense concurrence internationale, et notamment de la Chine et de la Corée du Sud. Ce dernier réduit fortement via l'approche originale de ce projet comme le montre l'état de l'art exposé ici. Une veille scientifique et technologique au niveau mondial reste toujours en place et des mesures de protection intellectuelle et industrielle préservent les innovations.

Enfin, le principal risque économique concerne le volume à commercialiser et son positionnement. Incarnant une innovation de rupture, veiller tout au long de l'industrialisation à fournir une solution à un prix compétitif, revêt une importance capitale. De plus, mettre en avant les avancées proposées par rapport aux produits existants dopera un marché en plein essor.

À ce titre, dans une première phase dite de présérie ou collection capsule pour le domaine du grand public, le coût du système triboélectrique est évalué. Il représente 2 € pour la partie textile, 7 € pour la partie batterie et électronique souple, et 5 € pour l'électronique dédiée à une application particulière, type détection de chute. De cette façon le dispositif de charge pourrait être commercialisé pour un prix cible de 20 à 30 € et le produit complet pour un tarif de 30 à 40 €. Ainsi pour atteindre l'objectif de 1 million € de CA, un plan prévisionnel de vente préconise la distribution de 40000 à 50000 appareils, ce qui correspond bien en termes de volume à des collections « présérie ou capsule ».

1.2 Objets connectés

Le type de produit proposé par le projet TIGER appartient au domaine des objets connectés. Il convient donc de déterminer précisément la signification de ce terme.

Depuis la première génération des objets connectés qui a vu le jour au début des années 2010, le nombre et les applications attribuées à ces derniers ne cessèrent de croître.

Les avancées techniques relatives à la fabrication de constituants électroniques permirent de rétrécir de manière significative les divers circuits intégrés nécessaires aux capteurs et antennes embarquées. De plus, afin d'abaisser la consommation des systèmes, de multiples études eurent pour objectifs de réduire drastiquement le besoin énergétique des composants pour répondre aux problématiques environnementales et financières.

La diminution de taille des microprocesseurs mena à une augmentation importante des compétences de calculs informatiques. Ces outils toujours plus rapides autorisèrent la création d'applications « intelligentes », capables notamment de traiter et de croiser au plus vite diverses informations en provenance de sources variées.

Parallèlement, les politiques publiques poussèrent les entreprises au développement massif des réseaux de communications sur l'ensemble du territoire. Ces investissements accélérèrent le déploiement des liaisons internet haut débit chez les particuliers et les industries et favorisèrent l'essor de nouvelles technologies mobiles.

Ainsi, aujourd'hui, grâce aux avancées dans ces différents domaines, les composants

électroniques sont devenus intégrables sur tous les dispositifs du quotidien. Ils se retrouvent sur les appareils ménagers, les lunettes, les accessoires médicaux et sportifs, les jouets ou les vêtements et transforment donc de simples objets en systèmes connectés.

L'année 2020 inédite à bien des égards, notamment à cause de la crise de la COVID-19, a bouleversé en profondeur les habitudes de la communauté française. Les diverses mesures prises pour endiguer la pandémie (confinement, distanciation sociale, arrêts de secteur entiers de l'économie, etc.) accélèrent le passage au tout numérique de nombreux pans de la société. Le télétravail, l'école à la maison, les consultations médicales en visio, les loisirs à domicile, etc., permirent aux équipements et usages digitaux de se démocratiser. En effet, l'enquête [70] indique que 37 % des Français disposaient en 2021 d'un objet connecté dans leur résidence.

Bien que l'année 2022 ait marqué la relance des pratiques nomades, les habitudes adoptées lors de l'épidémie semblent être restées ancrées dans de multiples foyers. Cela paraît découler de la flambée des prix de l'énergie qui pousse les ménages à limiter leurs déplacements. Ainsi, comme le montre l'étude [70] le pourcentage de Français qui profite d'au moins un élément communicant dans leur domicile a continué de progresser pour atteindre 40 % (ce qui constitue environ 244 millions de terminaux en France).

La difficulté à poser une définition claire de ce qu'est un objet connecté provient du fait que de nombreux concepts interfèrent et se contredisent. Les différentes revues (mais aussi la presse) utilisent, sans distinction précise, une multitude d'appellations telles qu'objets connectés, objets communicants, bâtiments intelligents, interconnexions d'objets, Internet des objets ou encore « smart city ».

Il est tout de même possible de proposer une explication de ce qu'est un objet connecté puisque généralement, il s'agit d'un produit ordinaire (montre, ampoule, balance, etc.) disposant d'un moyen de collecte et de partage d'information diverse à d'autres objets ou à Internet.

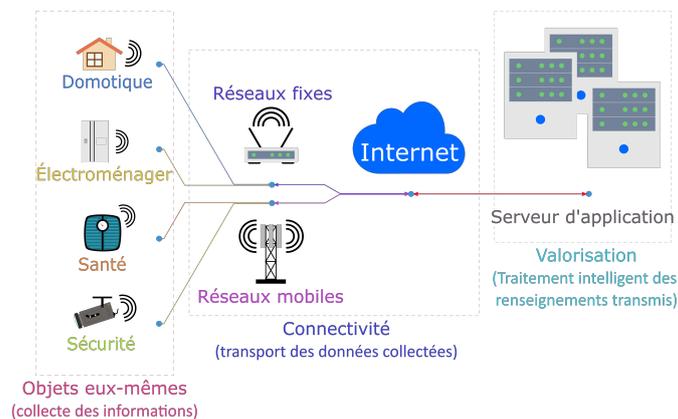


FIGURE 1.1 – Architecture des objets communicants

Néanmoins, une évolution s'est progressivement dessinée en faisant passer le terme d'objet connecté à celui d'objet communicant [50]. Si au départ les objets connectés symbolisaient, chez les utilisateurs, de simples capteurs de renseignement, il s'avère aujourd'hui que l'intelligence de ces dispositifs est de plus en plus présente et mise en avant. C'est cette caractéristique qui implique que les objets deviennent non seulement connec-

tés, mais aussi communicants. Car en plus de collecter des informations, les objets sont à présent en mesure de les analyser, de les valoriser et enfin de les transporter pour les partager comme le montre la figure 1.1.

L’objet connecté se retrouve alors à la croisée d’un ensemble d’actions s’articulant autour de trois grands points : les objets eux-mêmes, la connectivité et les données ainsi que leur traitement.

1.2.1 Connectivité

La couche avancée qu’est la connectivité repose sur les réseaux fixes ou mobiles et également sur les équipements qui les composent. Ces derniers permettent de couvrir le territoire au niveau local ou national en assurant le partage et le transport des informations collectées. L’émergence d’une grande diversité de dispositifs communicants (qui n’a cessé d’augmenter jusqu’à présent) rend le volet de la connectivité attractif et concurrentiel pour les entreprises et indispensable pour les utilisateurs comme le montre la figure 1.2. Bien que cette couche ne fasse pas partie intégrante de l’objet, il semble néanmoins que le chiffre croissant de terminaux connectés au sein des foyers soit conditionné par la diffusion de plus en plus large des liaisons Internet fixes à très haut débit.

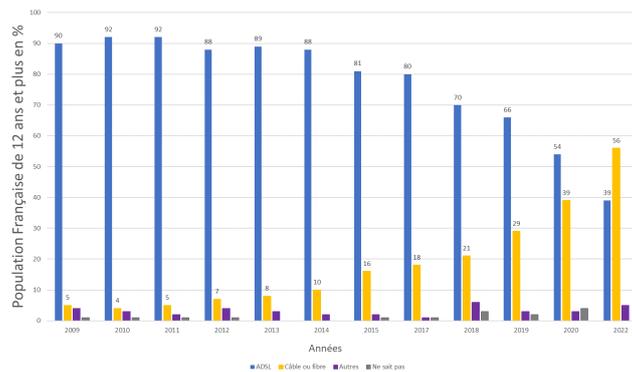


FIGURE 1.2 – Évolution du type de connexion à domicile

Cependant, ce bouleversement des habitudes des usagers n’aurait pas pu se faire sans la démocratisation des connexions fixes haut débit, mais aussi et surtout de l’apparition de nouvelles solutions mobiles grand public (4G, 5G, etc.). Car bien que de nombreuses technologies (LoRa, Sigfox 4G, etc.) aient déjà été déployées auparavant, c’est avec la 5G que le développement massif des objets connectés est attendu.

C’est donc grâce à cette couche en perpétuelle transformation que le domaine des objets connectés peut continuer son essor en séduisant un nombre toujours plus grand d’utilisateur.

1.2.2 Les données collectées et traitées

La couche de valorisation des données peut être décomposée en deux niveaux distincts. Le premier consiste à récupérer auprès de chaque utilisateur les informations transmises par les capteurs intégrés aux objets. En plus de la collecte, cette première étape aura également pour but de formaliser ces données pour qu’elles puissent par la suite être acheminées

et exploitées. Le deuxième échelon, quant à lui, permet en agrégeant les renseignements émanant de plusieurs individus de proposer des solutions intelligentes.

Cette couche sert donc à contextualiser et à mettre en relation des données au sein d'un environnement. Ce qui rend possible dans un premier temps la corrélation d'informations provenant d'autres objets d'un même utilisateur et dans un second temps de les faire communiquer avec des données similaires relatives à de divers usagers.

Cependant, les renseignements collectés ne sont pas tous de nature identique et ne peuvent donc pas être exploités de la même façon. C'est à cette couche qu'il incombe de les différencier et de proposer des applications adaptées.

Les informations seront catégorisées suivant trois grands types [132]. Les données personnelles sensibles qui regroupent principalement les origines raciales ou ethniques d'un utilisateur, les opinions politiques, philosophiques ou religieuses et les données relatives à la santé ou à la vie intime. Les données personnelles qui sont directement reliées à une personne, mais qui ne revêtissent pas le caractère sensible. Et enfin les données non personnelles qui ne permettent pas de rattacher un individu aux informations envoyées (ou qui ne proviennent pas d'un humain).

La couche de valorisation qui est souvent propre aux datacenters plutôt qu'aux objets, apporte un véritable intérêt aux dispositifs communicants puisque c'est par cette dernière que l'intelligence des appareils va pouvoir se manifester. Et c'est donc en partie, grâce à cette strate, que les objets connectés continuent leur séduction du grand public et du milieu industriel.

1.2.3 Les objets eux-mêmes

La couche physique représentée par les objets est quant à elle en constante mutation. De nombreuses solutions techniques voient le jour afin de répondre aux besoins de consommateurs et les industries qui souhaitent se positionner sur ce marché doivent trouver un équilibre parfait entre performance et contrôle des coûts.

Pour accroître les performances de leurs produits, les compagnies se doivent d'innover en permanence afin de proposer des capteurs plus perfectionnés et usent moins d'énergie. Cependant, la maîtrise des prix, primordial pour une entreprise, semble difficile à mettre en place à cause de la crise des semi-conducteurs qui dure depuis fin 2020. Or, ces puces électroniques qu'il est compliqué d'obtenir sont des constituants essentiels des marchandises numériques [137] (un smartphone se compose d'environ 160 et une voiture électrique hybride en contiendrait jusqu'à 3500).

Cette couche permet donc de faire le lien entre les données analogiques et numériques par les capteurs intégrés aux appareils. Mais bien que la transmission et le traitement intelligent des informations soient au cœur de ce type d'équipement, ces derniers doivent également remplir leurs fonctions initiales. Une grande attention doit alors être apportée à la conception et à l'ergonomie de ces dispositifs puisqu'ils constituent la partie visible de l'iceberg que sont les objets communicants.

1.3 Usages

Les éléments connectés tendent à se démocratiser dans les foyers à des allures variables en fonction de leurs usages. Il convient donc de distinguer leurs principaux champs d'applications ainsi que l'engouement des consommateurs pour les différents types d'objets (figure 1.1). L'étude [70] propose de catégoriser les dispositifs (détenus par la population française de plus de 12 ans) suivant quatre grandes familles : les composants communicants relatifs à la domotique, ceux relevant du domaine de l'électroménager, les outils de sécurité et enfin les appareils concernant la santé. Cette étude vise à justifier l'axe applicatif emprunté par le projet TIGER.

1.3.1 La domotique

La domotique est un terme générique qui désigne l'ensemble des techniques et systèmes régissant de manière automatique une habitation. Cette transformation du foyer permet principalement l'optimisation de la consommation d'énergie et le développement du bien-être dans la demeure. L'amélioration s'effectue par l'installation de capteurs connectés plus ou moins conséquents qui ont pour effet de rendre un bâtiment communicant, il s'agira alors d'une « smart home ».

Les solutions de gestions d'énergies dans les maisons sont nombreuses et de plus en plus intelligentes. Les différents capteurs de températures implantés en intérieur et en extérieur peuvent ainsi réguler le chauffage en fonction de la chaleur mesurée hors du lieu de vie. Les thermostats et radiateurs connectés autorisent la création de scénarios ou programmes liés aux habitudes de consommations, en aménageant la température suivant les heures d'absences du domicile, mais aussi en fonctions des heures de coucher ou des départs en vacances. Enfin, les nouvelles générations de chauffe-eau reliées à Internet simplifient le pilotage de la température et du débit d'eau afin d'ajuster l'utilisation et de prolonger la durée de vie des composants.

Les applications dans ce secteur sont nombreuses et bénéficient d'une popularité croissante. Ce domaine porté par de nouvelles mesures prises en matière de rénovation énergétique représente un marché en expansion rapide, dont le développement devrait se poursuivre au cours des années à venir.

1.3.2 L'électroménager

L'Internet des objets révolutionne le quotidien en permettant l'échange de données entre un nombre croissant de dispositifs présents dans les domiciles. Réfrigérateur, four, aspirateur, télévision, balance et bien d'autres éléments sont concernés. Il est par exemple possible de trouver des poêles connectées qui indiquent si la température est adaptée au mode de cuisson désiré ou à quel moment les aliments doivent être retournés. Ou encore des lave-linges qui, selon les renseignements fournis, analysent la dureté de l'eau et le poids des vêtements pour accommoder la chaleur de l'eau et la durée des cycles de lavage.

Malgré cette profusion de dispositifs, certains ont profité d'un engouement beaucoup plus fort que d'autres. Comme le montre l'étude [70] au travers de la figure 1.3, les enceintes connectées avec assistant vocal se sont beaucoup répandues puisqu'en 2022, 27 % des français procédaient un tel dispositif. Le nombre de personnes détentrices d'un tel bien a

été multiplié par trois en seulement trois ans, là où l'ordinateur en avait mis huit.

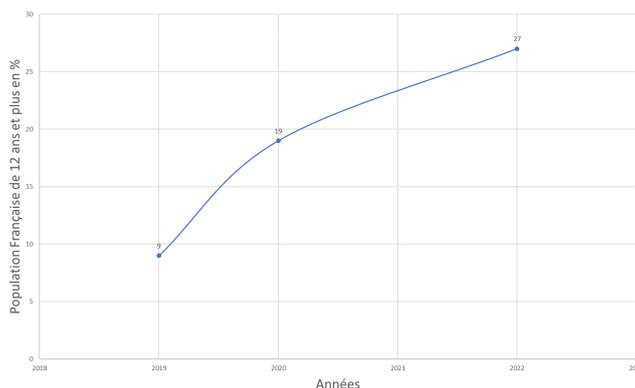


FIGURE 1.3 – Taux d'équipement en enceinte connectée à domicile

Les fabricants ont donc réussi à proposer des produits en adéquation avec les besoins des consommateurs en enrichissant l'offre sans cesse au cours des dernières années. Mais cette première percée des appareils électroménagers intelligents est majoritairement due à l'impulsion donnée par les assistants connectés à commande vocale qui joue un rôle toujours plus important dans les foyers français.

1.3.3 La sécurité

La possibilité d'interagir à distance avec des objets communicants et de les programmer suivant des schémas prédéfinis permet un fort gain de temps et d'ergonomie, mais autorise également l'optimisation de la sécurité des biens et des personnes.

Les dispositifs connectés rendent dès lors les entreprises plus sûres et plus productives en influant sur la prévention ou la détection d'accidents sur les employés. D'après [120], 43 % des accidents du travail graves non mortels arrivent lorsqu'un individu est seul et 80 % des accidents létaux surviennent sans témoin. Il convient donc de présenter des solutions d'alerte adaptées. Ainsi, quand un agent est isolé, il est aujourd'hui possible de lui fournir un système d'avertissement ayant pour objectif d'informer du danger ou d'aviser le personnel concerné en cas d'incident.

Le grand public dispose également de nouvelles applications, liées aux objets communicants, pour renforcer la sécurité des foyers et de leurs occupants. Car, à l'instar des enceintes, les alarmes et caméras connectées ont éveillé un intérêt particulier dans les ménages. Cependant, cet intérêt pour l'inspection de la maison n'est pas récent et de nombreux domiciles sont déjà équipés depuis longtemps de volets automatiques, d'interphone vidéo ou de lumières qui peuvent s'allumer et s'éteindre à distance. Le désir de multiples personnes âgées de vieillir chez elle, a aussi profité à l'essor de ces technologies connectées au travers de boîtiers de téléassistance qui permet une intervention rapide des secours en cas de blessure.

Les dispositifs intelligents autorisent alors une meilleure supervision des machines, l'anticipation des accidents humains ou la prévention des infractions. Les acteurs du secteur se doivent donc de proposer des objets irréprochables puisque de plus en plus de personnes choisissent de les utiliser pour assurer leur sécurité au quotidien.

1.3.4 La santé

Depuis plus d’une décennie, les médecins préconisent l’utilisation de divers objets connectés afin d’améliorer la prise en charge de leurs patients. De tels dispositifs permettent au praticien de suivre en direct l’efficacité d’un traitement ou d’observer l’évolution de certaines pathologies.

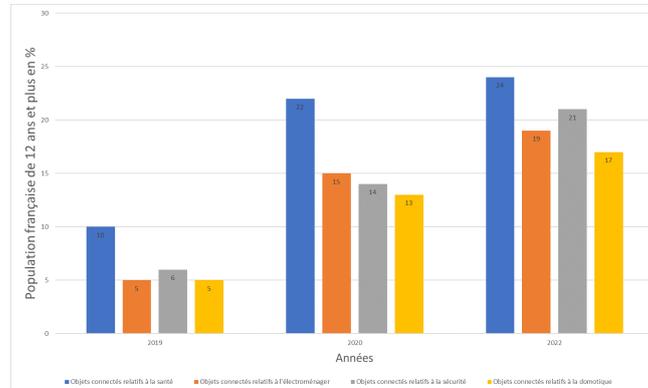


FIGURE 1.4 – Évolution du type d’équipement en objets connectés à domicile

Cette catégorie de système communicant semble être la plus répandue dans la société (avec les éléments relatifs à la sécurité) puisque comme le montre la figure 1.4, en 2022, 24 % des personnes interrogées dans l’étude [70] en possédaient au moins un.

Dans le cadre de la santé, deux familles d’objets sont à distinguer comme le montre [111]. La première concerne les appareils de bien-être et de loisir, la seconde, les outils reconnus comme étant des dispositifs médicaux.

Les composants communicants qui appartiennent au premier groupe permettent une supervision plus ou moins précise de paramètres comme l’activité physique, le sommeil, la fréquence cardiaque, le poids, etc. Un tel suivi encouragera donc les personnes les plus motivées et disciplinées à améliorer leur hygiène de vie pour prévenir certains problèmes de santé liés à la sédentarité (surpoids, obésité, diabète, etc.). Ces fonctions sont assurées par les bracelets ou montres connectées dont la popularité est croissante.

1.4 Energie et impact écologique

D’après [10], le terme « énergie » trouve son origine dans le Grec Ancien sous la forme de « énergeia », qui se traduit par « La force en action ». Ce concept scientifique a été introduit par Aristote et a connu une évolution significative au fil du temps. De nos jours, l’énergie est définie comme étant « la capacité à réaliser des transformations ». Par exemple, elle permet d’accomplir un travail, de générer un mouvement, de modifier la température ou de changer l’état de la matière. L’énergie est indispensable à toute activité humaine, que ce soit pour se déplacer, se chauffer, fabriquer des objets ou tout simplement se maintenir en vie.

L’énergie se présente sous différentes formes parmi lesquelles il est possible de retrouver l’énergie thermique qui produit de la chaleur, l’énergie électrique qui permet la circulation des particules (électrons), l’énergie mécanique qui facilite le déplacement des objets,

l'énergie chimique qui lie les atomes au sein des molécules, l'énergie de rayonnement ou lumineuse qui engendre de la lumière ou encore l'énergie musculaire qui met en mouvement les muscles.

L'énergie est conservée dans un système donné, ce qui signifie qu'elle ne peut ni être créée ni être détruite, mais seulement transférée d'une forme à une autre. La maîtrise de la chaîne de l'énergie, qui comprend la récupération, le stockage et l'utilisation de cette dernière, est capitale pour notre société. De nombreuses sources d'énergie permettent d'assurer la production nécessaire aux activités quotidiennes, que ce soit pour l'éclairage, le chauffage, les transports, ou encore pour l'industrie et les technologies.

1.4.1 La consommation d'énergie

En France, d'après [115] l'utilisation des énergies non renouvelables était en 2020 bien supérieur aux autres. La production d'énergie primaire (disponible dans la nature avant toute transformation), principalement nucléaire, a augmenté au fil des années, représentant 75 % de la production totale en 2020. En ce qui concerne la consommation, la part des énergies non renouvelables, notamment le nucléaire et le gaz naturel, a augmenté, tandis que les énergies fossiles ont décliné.

Cependant, il semble que l'utilisation intensive des énergies non renouvelables ait conduit à des problèmes environnementaux majeurs tels que le changement climatique, la pollution de l'air, l'épuisement des ressources naturelles, etc. Ces problèmes majeurs impliquent donc que la transition vers des sources d'énergie plus propres et durables, comme les énergies renouvelables, soit devenue un enjeu crucial. Cette entreprise nécessite des efforts dans la recherche et le développement de nouvelles technologies mais aussi des politiques publiques et des incitations financières favorables à ce changement.

D'après [19], l'utilisation de l'électricité dans les foyers français est répartie de manière diverse. Le chauffage représente la part la plus importante avec 27,6 %, suivi du froid et du lavage à 18,5 %. Les équipements multimédias et informatiques contribuent à hauteur de 13,5 %, tandis que l'eau chaude et sanitaire représentent 12,8 % de la consommation totale. La cuisson représente 7,8 % de l'utilisation électrique et l'éclairage compte pour 5,6 %. La ventilation a une part plus modeste de 1,7 %. Les autres appareils électroménagers tels que l'aspirateur, la cafetière, etc. (qui sont de plus en plus communicants), représentent 12,1 % de l'utilisation totale d'électricité dans les foyers français. Cette répartition met donc en évidence les différents besoins énergétiques des ménages et souligne l'importance de la diversification des sources d'énergie pour une consommation plus efficace et durable.

1.4.2 Les énergies pour les dispositifs connectés

Les objets connectés sont alimentés par diverses sources d'énergie en fonction de leurs besoins et contraintes spécifiques. Le choix de la source d'alimentation dépend des spécifications, des exigences de chaque objet connecté, ainsi que des contraintes environnementales et d'utilisation. Les dispositifs communicants qui sont situés à proximité d'une source d'alimentation électrique peuvent donc être directement branchés sur le réseau électrique qui assure une alimentation continue et constante. Les batteries sont également l'une des sources d'alimentation les plus courantes pour les objets connectés. Elles

offrent une alimentation portable et autonome, ce qui est idéal pour de nombreux dispositifs sans fil. Les batteries rechargeables, telles que les batteries au lithium-ion, sont souvent utilisées pour permettre une utilisation prolongée des objets connectés. Cependant, les dispositifs alimentés uniquement par ces technologies participent directement aux 12.1 % de la consommation d'électricité totale d'un foyer et ne permettent pas de se passer intégralement du réseau électrique. Cela peut donc être problématique pour certaines applications.

Pour remédier aux contraintes liées à l'emplacement des objets intelligents, l'utilisation de panneaux solaires présente des avantages. Ces derniers permettent l'exploitation d'une source d'énergie renouvelable et inépuisable, ce qui les rend respectueux de l'environnement et durables. De plus, ils offrent une autonomie énergétique, permettant aux objets connectés de fonctionner indépendamment du réseau électrique, ce qui les rend idéaux pour les zones éloignées. Les coûts d'exploitation sont réduits, car une fois installés, les panneaux solaires ne nécessitent généralement pas d'achat de carburant ou d'électricité supplémentaire. Enfin, leur installation est flexible et peut s'adapter à diverses surfaces et environnements. Néanmoins, la dépendance à la lumière solaire signifie que la production d'énergie subisse des limitations en cas de faible ensoleillement ou pendant la nuit. De plus, le coût initial de l'installation peut représenter un investissement important, et leur intégration physique peut poser des défis de conception.

Cependant, l'énergie solaire n'est pas la seule à pouvoir être utilisée. Le développement récent de nouveaux nanogénérateurs apporte également plusieurs avantages significatifs. Les nouvelles technologies de nanogénérateurs permettent de récupérer et de convertir des sources d'énergie ambiantes, telles que les mouvements, les vibrations, les ondes radio ou les champs magnétiques, en électricité utilisable. Cette diversité offre une opportunité d'alimentation autonome et durable pour des objets connectés, éliminant ainsi le besoin de sources d'énergie traditionnelles telles que les batteries ou les câbles d'alimentation. De plus, les nanogénérateurs sont souvent compacts et peuvent être intégrés de manière transparente dans les objets connectés, ce qui facilite leur utilisation dans des applications miniaturisées ou portables (à l'inverse des panneaux solaires).

Toutefois, la quantité d'énergie générée par les nanogénérateurs peut être relativement faible par rapport aux besoins énergétiques des objets connectés. Cela limite l'application des nanogénérateurs à des dispositifs à basse consommation énergétique ou nécessitant une énergie intermittente. De plus, l'efficacité de conversion des nanogénérateurs est généralement peu élevée, ce qui peut affecter la fiabilité de l'alimentation électrique.

Les nanogénérateurs offrent donc une alternative pour l'alimentation des objets connectés en exploitant les sources d'énergie ambiantes. Ils permettent une alimentation autonome, durable et compacte. Cependant, leur capacité à fournir une quantité suffisante d'énergie et leur efficacité de conversion nécessite encore des améliorations et ouvrent des pistes de recherches intéressantes.

1.4.3 Les nanogénérateurs

Les nanogénérateurs représentent des dispositifs révolutionnaires qui ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine de la production d'énergie. Grâce à leur taille extrêmement petite et à leur capacité à utiliser les sources d'énergie ambiantes, ces derniers fournissent une solution originale pour l'alimentation autonome des objets connectés et

autres applications électroniques à faible consommation énergétique.

Les nanogénérateurs piézoélectriques (PENGs) offrent d'exploiter l'effet piézoélectrique (figure 1.5). La propriété piézoélectrique relève de certains matériaux qui engendrent une polarisation lors d'une contrainte mécanique ou créer une déformation en réponse à un champ électrique. Ces deux caractéristiques, appelées effet piézoélectrique direct et effet piézoélectrique inverse, sont intimement liés. Cette propriété a de nombreuses visées dans l'industrie et la vie quotidienne. Par exemple, dans un allume-gaz, la pression exercée génère une tension électrique qui se décharge sous forme d'étincelles, exploitant ainsi l'effet direct. Plus généralement, il s'utilise dans la création de capteurs de pression, tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision. Ce dernier s'emploie dans les injecteurs à commande piézoélectrique des compagnies automobiles ou dans les nanomanipulateurs.

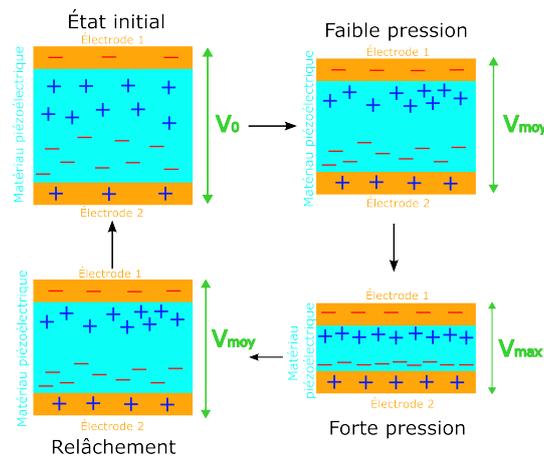


FIGURE 1.5 – Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur piézoélectrique

Les PENGs peuvent être classés en trois types en fonction de leur configuration : les nanogénérateurs intégrés à nanofils verticaux (VINGs), les nanogénérateurs intégrés à nanofils latéraux (LINGs) et les nanogénérateurs électriques à base de nanocomposites (NEGs). La fabrication des PENGs bénéficie d'avancées significatives, notamment par l'utilisation de nanorodures de ZnO, de nanocomposites et de nouvelles approches telles que la modification des électrodes et l'impression 3D. De plus, les structures hybrides, qui peuvent capter simultanément l'énergie mécanique et thermique, ont suscité un intérêt grandissant.

Les nanogénérateurs thermoélectriques et pyroélectriques représentent des technologies de collecte d'énergie qui peuvent convertir l'énergie thermique en électricité comme le détaille [116] (figure 1.6). Ces technologies font l'objet d'une attention particulière en raison de la demande croissante de sources d'énergie propres et durables.

Les nanogénérateurs thermoélectriques (TEG) utilisent l'effet thermoélectrique pour produire de l'électricité. Ils se constituent de matériaux thermoélectriques de type p et de type n disposés dans une architecture en π . Lorsqu'un gradient de température traverse le TEG, la migration des porteurs (électrons et trous) du côté chaud vers le côté froid génère un potentiel. De nombreuses recherches visent à améliorer les TEG grâce notamment à de nouveaux matériaux, des modifications de la structure, etc. Ils conviennent aux applications où la différence de température demeure importante entre le côté chaud et le côté froid.

Les nanogénérateurs pyroélectriques (PyENG) produisent quant à eux de l'électricité sur la base de l'effet pyroélectrique. Les matériaux pyroélectriques, présentent une polarisation spontanée qui évolue en fonction des fluctuations de température. Lorsque la température d'un matériau pyroélectrique varie, l'oscillation des dipôles électriques induite par le changement de température entraîne une modification de la polarisation. Cette modification conduit à un déplacement de charges électriques. Les pyroélectriques se composent généralement d'un film de polyfluorure de vinylidène (PVDF) avec des électrodes d'argent sur les deux surfaces. Les PyENG conviennent aux milieux où les température fluctuent en fonction du temps, mais où le gradient de température reste faible. Les mécanismes de fonctionnement des PyENGs et des TEGs se distinguent. Les PyENGs reposent sur les changements de polarisation spontanée induits par les variations de température, tandis que les TEGs dépendent de la migration des porteurs due aux différences de température. Les environnements de travail des PyENGs et des TEGs divergent donc.

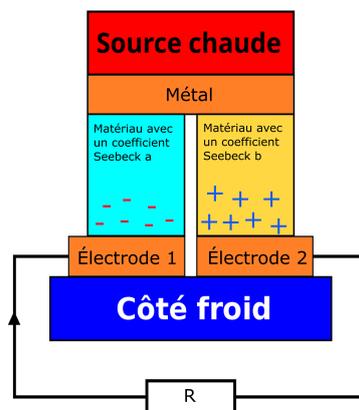


FIGURE 1.6 – Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur thermoélectrique

Les nanogénérateurs électrochimiques (ENG) correspondent à un type de nanogénérateur qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. Ils utilisent les réactions redox (réduction-oxydation) qui se produisent aux interfaces à l'échelle nanométrique entre différents matériaux ou à l'intérieur de matériaux nanostructurés pour engendrer un courant électrique. Les ENG comportent de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique. Les électrodes peuvent revêtir différents matériaux, l'une étant souvent un métal ou un alliage métallique et l'autre un polymère conducteur ou un matériau nanostructuré. Lorsqu'une réaction chimique a lieu à l'interface de ces électrodes, des électrons transitent entre elles, ce qui génère un potentiel électrique et un flux de courant.

La conception spécifique et les matériaux employés dans les ENG peuvent varier en fonction de l'application envisagée. Certains ENG utilisent des matériaux nanostructurés, comme des nanofils, des nanotubes ou des configurations nanoporeuses, afin de fournir une grande surface et de développer les réactions électrochimiques. Cette surface accrue facilite un transfert de charge plus efficace et améliore les performances globales du nanogénérateur.

Les ENG peuvent recueillir de l'énergie à partir de diverses sources chimiques, notamment des fluides biologiques (tels que le sang ou la sueur), des piles à combustible ou des solutions chimiques. Une application particulière des ENG concerne la récolte de bioénergie,

qui permet d'extraire l'énergie électrique des systèmes naturels. Par exemple, les ENG peuvent être intégrés dans des dispositifs implantables pour exploiter l'énergie des flux corporels ou des réactions métaboliques. Ils fournissent ainsi une source d'énergie durable pour les implants médicaux.

Les nanogénérateurs photovoltaïques (NGP) profitent de l'effet photovoltaïque pour convertir directement la lumière du soleil en énergie électrique (figure 1.7). Ils se constituent généralement de matériaux nanostructurés, tels que des nanofils ou des points quantiques, qui peuvent absorber l'éclairage et engendrer des paires électron-trou. Ces paires sont ensuite séparées, ce qui crée un flux de courant et génère de l'électricité. Les NGP s'utilisent dans des applications qui requièrent de la production d'énergie solaire à petite échelle. Les études actuelles portent sur trois technologies de cellules solaires différentes. La première comporte des cellules en silicium cristallin. La deuxième intègre des cellules à film mince comme le CdTe, le CIGS et l'AsGa. La troisième, quant à elle, embarque des cellules solaires émergentes telles que les cellules solaires sensibilisées par des colorants (DSSC), les cellules solaires à pérovskite (PSC) et les cellules solaires polymères ref.

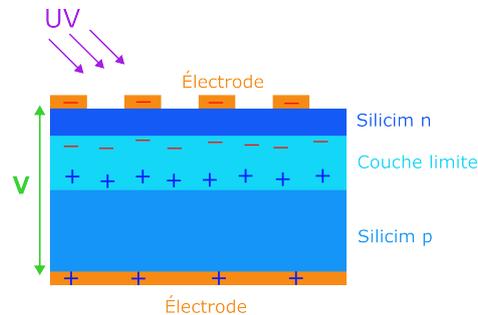


FIGURE 1.7 – Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur photovoltaïques

Les nanogénérateurs électromagnétiques (ENG) exploitent l'énergie électromagnétique ambiante pour produire de l'électricité. Ils utilisent souvent des matériaux aux propriétés magnétiques ou ferromagnétiques qui peuvent induire des courants électriques par le mouvement des champs magnétiques ou les fluctuations de l'environnement magnétique. Les ENG peuvent capter l'énergie de sources telles que le rayonnement électromagnétique, les ondes radio ou les champs magnétiques.

Les nanogénérateurs triboélectriques exploitent le phénomène de triboélectricité pour convertir l'énergie mécanique en électricité. Lorsque deux matériaux distincts entrent en contact et se frottent, des électrons migrent d'un matériau à l'autre. Cela crée ainsi une charge électrique positive sur la première et une négative sur la seconde. Puis, lorsque les matériaux sont séparés, ces charges électriques restent piégées à leur surface respective. L'emploi de la différence de potentiel électrique engendrée devient possible grâce à un circuit externe. Si les matériaux se mettent en mouvement, cela permet à un flux de courant électrique de traverser le circuit. Le maintien du fonctionnement continu dépend alors de la fréquence à laquelle le mouvement mécanique se répète. Les nanogénérateurs triboélectriques se conçoivent et s'utilisent selon différents modes d'usage. Chacun s'adapte à des processus spécifiques, mais tous exploitent le principe fondamental de la charge électrique générée par le frottement entre les matériaux pour fournir de l'énergie électrique. Ces dispositifs demeurent des candidats prometteurs pour de nombreuses applications grâce à leur grande efficacité, à des coûts réduits et à des techniques de production simples.

Il apparaît que de nombreux moyens sont employés pour faciliter l'adoption des objets connectés, tant chez les particuliers qu'en entreprise. Cet engouement introduit de nouvelles problématiques, notamment en ce qui concerne l'intégration et l'alimentation de ces dispositifs. De multiples technologies sont actuellement à l'étude pour répondre à ces besoins. Il convient donc de s'intéresser à ce qu'il est possible de réaliser aujourd'hui afin de mettre en lumière les verrous et proposer des solutions pour venir à bout de ces points bloquants.

Chapitre 2

État de l'art

Un projet de recherche dont l'objectif vise à produire un dispositif communicant autonome, alimenté par des nanogénérateurs, s'inscrit parfaitement dans le contexte actuel. Le développement d'un tel concept nécessite la mise en œuvre d'un large panel de compétences. Il convient d'approfondir de nombreux domaines qui vont de l'analyse des phénomènes physiques, à la réalisation de procédés de fabrication, en passant par la conception de circuit et de l'élaboration des outils logiciels. Le travail d'analyse et de synthèse, essentiel à la compréhension des verrous scientifiques et techniques, soumis dans cette section, constitue le fruit des recherches engendré par les trois entités rattachées au projet. Le chapitre présenté ici et tiré de [39] propose donc un état de l'art des différentes avancées relatives à la production d'un dispositif de mesures connecté, autoalimenté. L'entreprise SOFILA (porteuse du projet) par l'intermédiaire de Jennifer WEIMMERSKIRCH-AUBATIN s'est concentrée à la conception et à l'amélioration des fils pour tribogénérateurs textile. Valentin GAUBERT, Xavier BODDAERT, Roger DELATTRE et Thierry DJENIZIAN du FEL ont étudié les méthodes d'intégration des systèmes électroniques dans les textiles relatifs aux pistes électriques, aux composants, ainsi qu'aux batteries. Enfin, le LASPI a réalisé la modélisation mathématique, la conception du banc de test nécessaire à la validation des modèles par comparaison avec les mesures.

2.1 Principaux phénomènes de récolte d'énergie

Plusieurs technologies de nanogénérateurs proposent des méthodes innovantes de collectes d'énergie. Cependant, les dispositifs qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique suscitent un grand intérêt actuellement. Les applications couvrent un vaste éventail de domaines qui vont des vibrations à l'échelle du micromètre jusqu'aux mouvements humains. De nombreux événements permettent d'engendrer des charges électriques. La piézoélectricité, la triboélectricité et la ferroélectricité restent beaucoup utilisées dans les systèmes. L'effet piézoélectrique constitue la capacité de certains matériaux à générer des charges électriques à la surface sous pression/déformation. La triboélectricité incarne le phénomène d'électrification de contact entre deux matières qui se chargent électriquement lors d'une rencontre ou d'un frottement. La ferroélectricité décrit une caractéristique de certains matériaux qui présentent une polarisation électrique spontanée réversible par l'application d'un champ électrique externe [146]. Cependant, les signaux électriques générés par la piézoélectricité, la triboélectricité et la ferroélectricité demeurent difficiles à

discerner. En effet, dans les conditions pratiques d'essai, les processus piézoélectriques et triboélectriques se produisent presque en même temps et leurs participations deviennent impossibles à distinguer.

Comme expliqué dans [136], la différence se reflète uniquement par l'intensité globale des pics du signal électrique. Pour identifier les contributions piézoélectriques et triboélectriques dans une opération de conversion d'énergie mécanique, les auteurs ont conçu un résonateur de type « cantilever » grâce à l'utilisation d'un film composite en partie recouvert d'électrodes. Depuis peu, des travaux approfondis sur les polymères piézoélectriques sont apparus comme des matériaux très prometteurs pour la collecte d'énergie [138]. La différence de procédure de production/récolte d'énergie a des implications sur la manière dont les systèmes de générateur piézoélectrique (PEG) ou de générateur triboélectrique (TEG) sont déployés. Le dipôle de sortie de ces générateurs eux est évalué en tension, en courant, en puissance et en charges électriques. De nombreux chercheurs pensent qu'ils ne mesurent que l'influence piézoélectrique. Dans les faits, la tension triboélectrique reste souvent considérée à tort comme piézoélectrique, ce qui entraîne des coefficients piézoélectriques extrêmement élevés. Les auteurs concluent sur la nécessité de traiter le chevauchement des effets piézoélectriques et triboélectriques et de fournir un protocole d'acquisition et des conseils.

2.1.1 TENGs

Les TENG proposent un champ d'investigation pertinent de l'effet triboélectrique (figure 2.1). Dans [83], les auteurs développent une nouvelle méthode qui exploite l'oscillation de l'énergie entre le TENG et une charge inductive pour augmenter la production d'énergie d'un TENG avec le mode contact-séparation (CS). Une revue présentée dans [11] détaille la base des matériaux polymères (PM) pour les TENG à haute performance. Aujourd'hui, les efforts déployés visent à améliorer la fabrication d'énergie des TENG grâce à des techniques telles que l'ingénierie de la morphologie des tribosurfaces, la fonctionnalisation moléculaire des aires et la modification de la composition globale. En effet, les performances des TENG dépendent des charges triboélectriques de surface générées σ_T pendant le processus de friction et il convient donc de maximiser ces dernières.

Selon la conception des TENG, quatre fonctionnements différents se distinguent. Dans le cas du mode CS, un contact vertical intermittent entre deux surfaces isolantes se produit. Chacune d'entre elles correspond à une électrode du système. Le déplacement reste exclusivement horizontal pour le mode de glissement latéral, ce qui engendre un frottement entre les deux aires diélectriques. Les deux électrodes disposent du même diélectrique dans le mode couche libre et l'autre isolant passe entre les électrodes pour créer un courant alternatif (CA). Enfin, dans le mode à électrode unique, comme son nom l'indique, une seule électrode demeure connectée à l'un des diélectriques tandis que la seconde extrémité du circuit électrique incarne la masse[1].

L'origine physique du phénomène trouve sa source dans l'électrification de contact combinée à l'induction électrique. L'électrification de contact correspond au fait que lorsque deux couches diélectriques se rencontrent puis se séparent, elles présentent toutes deux une charge de surface non neutre. L'une se retrouve chargée positivement, tandis que l'autre devient chargée négativement. La théorie des bandes [142] fournit l'une des premières explications de l'électrification de contact métal-métal et métal-semiconducteur. Cet article montre que les états de surface jouent un rôle important dans l'apparition

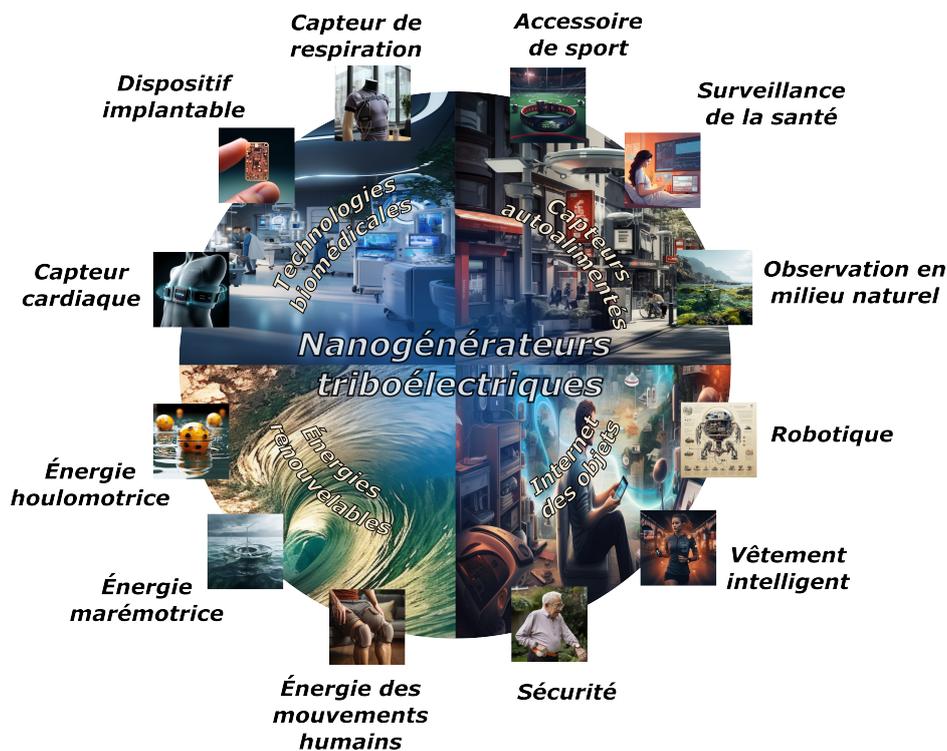


FIGURE 2.1 – Visualisation des applications potentielles des TENG

de l'électrification de surface et mentionne aussi que la transmission de charge peut se réaliser par transport ionique dans quelques cas.

Avec l'essor des TENG qui promettent la production d'électricité grâce à ces phénomènes, l'étude détaillée de ces événements à l'aide d'une approche quantique plus approfondie se développa ces dernières années. Un mécanisme de transfert de charge à l'échelle atomique se voit proposé par [145]. Les nuages électroniques peuvent se chevaucher pour former une liaison au moment d'un contact entre les deux matériaux comme le montre [158]. Dans ce cas, les deux puits de potentiel séparés résultent en un potentiel à double puits, avec une barrière énergétique plus faible entre les deux puits. Une transmission électronique peut alors se produire d'un puits à l'autre. Une fois les matériaux dissociés, les électrons transférés restent piégés sous forme de charges statiques sur la surface (chargée négativement), tandis que l'autre surface demeure dépourvue d'électrons (chargée positivement). Une autre compréhension du système peut s'obtenir en étudiant les électrons de surface comme une structure quantique ouverte liée aux dispositifs de masse [3].

Un regain d'intérêt pour les expériences dédiées à la connaissance des mécanismes fins qui se rapporte à l'électrisation de contact autorisa une meilleure vue d'ensemble sur la dynamique de l'électrisation de contact. Les mesures qui mettent en avant l'électrisation de contact de matériaux inorganiques non métalliques [160] confirment que l'origine de la triboélectricité provient d'un transfert électronique quantique. Les électrons passent à l'état électronique disponible le plus bas en énergie une fois que les deux nuages électroniques se chevauchent.

L'analyse de la dépendance en température de ce phénomène [143] vérifie également la provenance principalement électronique, au moins au cours du contact solide-solide. L'étude qui concerne la dynamique de l'électrification de contact dans le cas de deux sphères métalliques [55] révèle que la transmission d'électrons se réalise juste pendant le

contact dans un laps de temps de $6 - 8 \mu s$. Ces observations corroborent avec la nécessité d'un contact pour que l'électrification se produise. De plus en plus de preuves convergent vers le fait que le transfert électronique représente le principal moteur de la diffusion de charge de surface qui se déroule lors de l'électrification de contact.

L'autre phénomène qui joue un rôle dans le mécanisme du TENG correspond à l'induction électrique. Une charge neutre totale maintient le dispositif à l'équilibre, lorsque les deux diélectriques restent en contact. Une charge se manifeste à la surface du diélectrique, dès l'instant où les deux parties du système s'écartent. Cela provoque un flux de charge entre les électrodes du circuit extérieur afin de préserver la neutralité de la charge globale. Dès lors que les deux électrodes s'éloignent suffisamment, le courant dans le circuit s'amointrit jusqu'à disparaître, puisque la stabilité électrostatique se rétablit. Enfin, quand les deux électrodes se rapprochent, un courant de sens opposé au précédent apparaît, jusqu'à ce que les isolants rentrent à nouveau en contact, comme dans la situation initiale. Un mouvement continu génère alors un courant alternatif.

2.2 Approche théorique des TENG

Cette section développe deux approches de la modélisation du TENG à partir du théorème de Gauss et de la théorie électromagnétique de Maxwell. Ensuite, ces différents modèles permettront de trouver l'optimalité de l'impédance de charge du TENG. Enfin, l'analyse du dispositif en charge du transfert d'énergie et son adaptation d'impédance présenteront les avancées déjà étudiées dans ce domaine.

2.2.1 Modélisation

Les études triboélectriques nécessitent une connaissance pertinente des phénomènes physiques et des théories associées [83] [14]. Parmi ces analyses, la recherche sur l'induction électrostatique est présentée dans [14]. Les auteurs proposent une nouvelle approche numérique universelle capable de calculer le comportement dynamique des TENG avec des géométries $2D/3D$ complexes. De plus, la méthode des éléments finis (FEM) basée sur la technique du maillage mobile et des couches tampons d'air permet la modélisation de mouvements pratiques.

Les études et les applications résultent d'essais théoriques sur les TENG en mode contact en tant que source d'énergie efficace. Sur le fondement du mécanisme de séparation des charges, les TENG peuvent être divisés en deux catégories : le mode contact qui repose sur la polarisation verticale des charges et le mode latéral (ou mode de glissement) basé sur la polarisation des charges dans le plan [44] [68] [35] [130] [105] [16] [150] [69] [36] [160] [73] [66].

Une première approche découle du théorème de Gauss [102] afin d'obtenir le champ électrique E et les charges de surface transférées Q pour déduire le courant et la tension dans l'impédance de charge. Ce travail introduit des modèles théoriques tels que le TENG en mode contact diélectrique-à-diélectrique (figure 2.2) et le TENG en mode contact conducteur-à-diélectrique. Les auteurs ont montré que la tension entre deux électrodes est

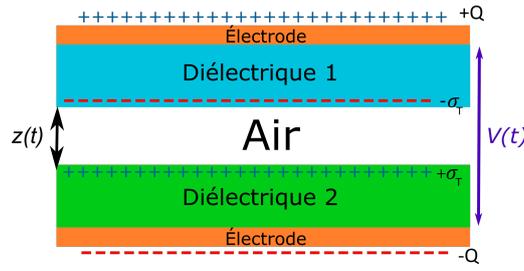


FIGURE 2.2 – Schéma simplifié du fonctionnement d'un TENG

$$V(t) = \frac{-Q}{S \cdot \varepsilon_0} (d_0 + z(t)) + \frac{\sigma_T \cdot z(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.1)$$

où $z(t)$ est le déplacement relatif entre deux diélectriques, σ_T la densité de charge de la surface triboélectrique, $d_0 = \frac{d_1}{\varepsilon_{r1}} + \frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}$ (avec d_1 et d_2 les épaisseurs des diélectriques 1 et 2 et ε_{r1} et ε_{r2} leurs permittivités électriques respectives) et S l'aire du diélectrique. La tension en circuit ouvert est proportionnelle à σ_T et $z(t)$ s'écrit

$$V_{oc}(t) = \frac{\sigma_T \cdot z(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

L'approche de Gauss semble donner une bonne estimation de la tension et de la charge, mais reste approximative.

Le développement d'une étude plus complexe doit se baser sur les équations du champ électromagnétique qui demeurent beaucoup plus précises pour décrire les effets engendrés par les charges électriques dans les milieux (apparition d'un champ électrique, apparition d'un champ magnétique, création d'une différence de potentiel, etc.). Le détail de ces calculs se trouve dans [128] [127] [126] [129] et s'effectue à partir des équations de Maxwell en utilisant le courant de déplacement comme force motrice pour convertir l'énergie mécanique des mouvements en électricité pour les modes de contact verticaux et latéraux. La modélisation de Maxwell améliore en profondeur l'approche de Gauss. Sur la base d'un ensemble de plans chargés de taille finie (FSCP), un modèle spatial tridimensionnel simple, qui dépend du temps pour le potentiel électrique et le champ électrique dans un milieu inhomogène composé de matériaux diélectriques et de contacts métalliques est proposé pour confirmer le bon fonctionnement du TENG. Cette approche se base sur le déplacement électrique \vec{D} donné par

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (2.3)$$

, où ε_0 représente la permittivité du vide et ε_r la permittivité relative du matériau diélectrique. La densité de courant de déplacement correspondante est $\vec{J}_D = \frac{d\vec{D}}{dt}$ et le courant de déplacement correspond à $i_D = \int \vec{J}_D \cdot d\vec{S}$ qui ne tient compte que de la polarisation dans le milieu à cause de l'existence d'un champ électrique. Cependant, compte tenu de la présence de charges électrostatiques sur les surfaces en raison de l'effet piézoélectrique ou triboélectrique, [128] a proposé d'ajouter un nouveau terme \vec{P} dans (2.3) lié à la polarisation induite par le champ non électrique due au déclenchement mécanique (électrification de contact). La solution intégrale de l'équation de Maxwell-Poisson en coordonnées car-

tésiennes $\vec{r} = (x, y, z)$ donnée par $\nabla \bullet \vec{D}(\vec{r}) = \rho(\vec{r})$ conduit au potentiel électrique $\phi(\vec{r})$ donné par

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int \frac{\rho(\vec{r}') dV}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (2.4)$$

, où $\varepsilon(\vec{r})$ est la permittivité du milieu et ρ la densité de charge. La technique des plans de taille finie conduit à un modèle 3D quasi-électrostatique [128] lorsqu'une partie des plans chargés se déplace à basse fréquence et qu'un changement du champ électrique total se produit. D'autre part, les mouvements linéaires et à faible périodicité simplifient les calculs, signifiant que les effets magnétiques restent nuls. Le champ électrique \vec{E} et le potentiel électrique ϕ dépendent des coordonnées cartésiennes $\vec{r} = (x, y, z)$ conduisant à

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial\phi(\vec{r}, t)}{\partial x}\vec{e}_x - \frac{\partial\phi(\vec{r}, t)}{\partial y}\vec{e}_y - \frac{\partial\phi(\vec{r}, t)}{\partial z}\vec{e}_z \quad (2.5)$$

, où \vec{e}_i sont des vecteurs unitaires dans la base orthonormée.

Dans la modélisation du mode verticale, certaines symétries de x et y conduit à l'expression ci-dessus du champ électrique sous la forme $\vec{E}^Z(\vec{r}, t) = -\frac{\partial\phi(\vec{r}, t)}{\partial z}\vec{e}_z = \sum_{i \in \mathcal{E}} \vec{E}_i^Z(\vec{r}, t)$ avec $\mathcal{E} = \{2, 3\}$ et

$$\vec{E}_i^Z(\vec{r}, t) = \frac{\sigma_i(t)}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \iint_S \frac{(z - z_i(t)) dx' dy'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z_i(t))^2]^{3/2}} \quad (2.6)$$

La densité de charge de la surface à la position verticale $z_i(t)$ (figure 2.3) est $\sigma_i(t)$ et $S = ab$ les aires des diélectriques.

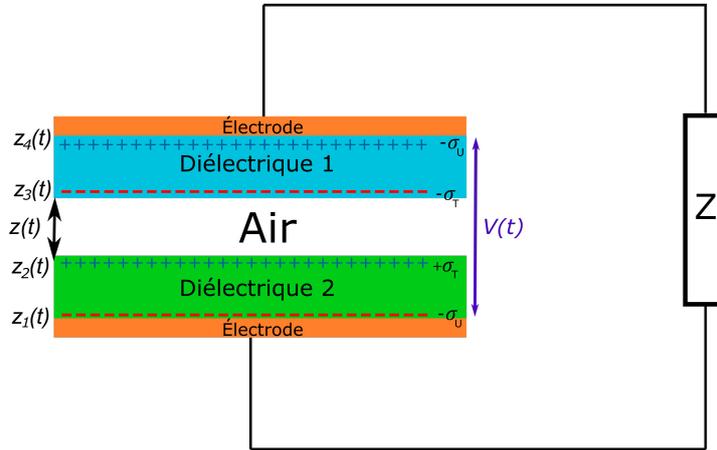


FIGURE 2.3 – Schéma du fonctionnement d'un TENG en mode verticale

Lorsque l'impédance de charge Z relie les électrodes, comme le montre la figure 2.3, une densité de charge de surface $\sigma_U(t)$ transite de l'anode à la cathode et l'équation différentielle en $\sigma_U(t)$ est

$$-ZS \frac{d\sigma_U(t)}{dt} = \phi(0, 0, z_4(t)) - \phi(0, 0, z_1(t)) \quad (2.7)$$

Dans le cas de surfaces homogènes, il devient possible de considérer σ_T comme une constante et la résolution de (2.7) permet d'exprimer $\sigma_U(t)$. Le courant dans l'impédance de charge Z est alors donné par $i(t) = i_D(t) = S \frac{d\sigma_U(t)}{dt}$ et la tension entre les électrodes par $v_Z(t) = -Zi(t) = -(\phi(0,0,z_4(t)) - \phi(0,0,z_1(t)))$ avec

$$\begin{aligned} \phi(0,0,z_4(t)) - \phi(0,0,z_1(t)) &= \frac{\sigma_U(t)}{\pi\varepsilon_2} \int_0^{z_4(t)-z_1} f(z') dz' + \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon_2} \int_{z_4(t)-z_2}^{z_4(t)-z_3} f(z') dz' + \\ &\quad \frac{\sigma_T}{\pi\varepsilon_1} \int_{z_1-z_3}^{z_1-z_2} f(z') dz' + \frac{\sigma_U(t)}{\pi\varepsilon_1} \int_0^{-z_4(t)+z_1} f(z') dz' \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$, \text{ où } f(z) = \tan^{-1} \left(\frac{xy}{4z\sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \left(\frac{y}{2}\right)^2 + z^2}} \right).$$

En ce qui concerne la modélisation du mode latérale (ou du mode glissement), le travail paru dans [127] a permis de montrer que les composantes du champ électrique s'expriment par

$$\begin{aligned} E^{(X,Y,Z)}(t) &= \frac{-\sigma_T}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_0^{a(t)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_0^-(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_0^-(t))^2\right]^{3/2}} + \\ &\quad \frac{\sigma_T}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_L^{L+a(t)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_0^+(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_0^+(t))^2\right]^{3/2}} + \\ &\quad \frac{\sigma_T}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_0^{a(t)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_1^-(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_1(t))^2\right]^{3/2}} - \\ &\quad \frac{\sigma_T}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_L^{L+a(t)} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_2^-(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_2(t))^2\right]^{3/2}} + \\ &\quad \frac{\sigma_E(t)}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_{a(t)}^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_1^+(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_1(t))^2\right]^{3/2}} - \\ &\quad \frac{\sigma_E(t)}{4\pi\varepsilon(\vec{r})} \int_{a(t)}^L \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{(x-x', y-y', z-z_2^+(t)) dx' dy'}{\left[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z_2(t))^2\right]^{3/2}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

, où L est la longueur des diélectriques et $a(t)$ la distance de mouvement relative entre les diélectriques (figure 2.4).

Pendant les frictions sur la surface de chevauchement $S_{ov}(t) = b(L - a(t))$ une densité de charge $\sigma_E(t)$ apparaît, égale en magnitude et de signe opposé aux charges σ_T du matériau en contact direct avec l'électrode. Sur $S_{ov}(t)$ considérons $-\sigma_E(t)$ à l'électrode supérieure et $+\sigma_E(t)$ à l'électrode inférieure. La densité de charge $\sigma_E(t)$ est déterminée en tenant compte du fait que la densité de charge sur les électrodes doit être nulle à tout moment t . Ainsi, sur l'électrode supérieure $-\sigma_T a(t) - \sigma_E(t)(L - a(t)) = 0$ est obtenue. Dans le cas où les électrodes sont connectées à l'impédance de charge Z , $\sigma_E(t)$ dans (2.9) est remplacée par $\sigma_E(t) + \sigma_U(t)$. Cependant, dans l'approche de Maxwell, aucune

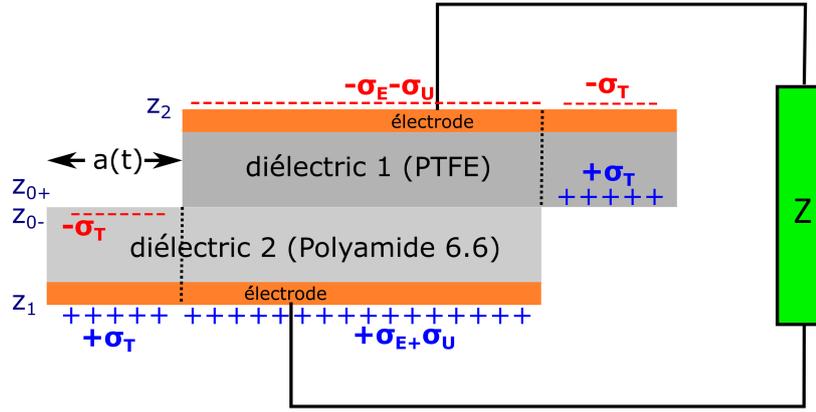


FIGURE 2.4 – Schéma du fonctionnement d'un TENG en mode latérale

expression analytique générale de $\sigma_U(t)$ n'est donnée et la solution exacte reste difficile à trouver.

2.2.2 Impédance de charge optimale

Comme montré précédemment, chaque expression de la tension dépend de l'impédance de charge Z entre les électrodes diélectriques. Le choix de Z demeure crucial pour un transfert de puissance optimum. L'impédance optimale pour une puissance instantanée maximale représente un paramètre clé pour tirer le meilleur parti de l'efficacité du TENG. Par conséquent, l'impédance doit être étudiée pour établir une relation avec les variables structurales du TENG et les conditions opérationnelles. Dans ce cas, le contrôle du TENG peut s'effectuer de manière rationnelle pour les applications.

Dans l'approche de Gauss [102], les auteurs analysent mathématiquement un mouvement arbitraire pour leur modèle TENG. Lorsque Z n'est ni trop grande ni trop petite, le comportement du TENG se situe entre le court-circuit et le circuit ouvert. C'est ici que la puissance atteint un niveau idéal. Par conséquent, un dispositif de transfert de puissance optimale doit disposer d'une impédance d'entrée assez importante. Le courant maximal de $i(t)$, I_{max} est ainsi donné par

$$I_{max} = \frac{\sigma_T d_0}{Z \varepsilon_0} G(F, y) \quad (2.10)$$

, avec $y = \frac{z_{max}}{d_0}$ le facteur d'épaisseur et (G, F) comme deux fonctions pour un mode de mouvement en cosinus $z(t) = z_{max} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi \langle V \rangle t}{z_{max}} \right) \right)$ où $\langle V \rangle$ est la vitesse moyenne sur une période de mouvement. Pour leur application, les auteurs utilisent les éléments suivants : distance de séparation maximale $z_{max} = 0,001 \text{ m}$, vitesse moyenne $\langle V \rangle \geq 0,1 \text{ m/s}$, densité de charge triboélectrique $\sigma_T = 10 \mu \text{ C/m}^2$, la taille de la surface des diélectriques $S = 58,0644 \text{ cm}^2$. La puissance instantanée maximale est alors obtenue comme suit

$$P_{max} = Z I_{max}^2 = \frac{\sigma_T^2 S \langle V \rangle}{\varepsilon_0} F^2 G^2 (F, y) \quad (2.11)$$

L'impédance de charge optimale Z_{opt} satisfait la condition $\frac{\partial P_{max}}{\partial Z} = 0$, ce qui conduit à

$$Z_{opt}^{gauss} \approx \frac{(d_0 + z_{max})^2}{S \langle V \rangle \varepsilon_0} \quad (2.12)$$

L'impédance optimale du TENG, Z , peut se déterminer par l'équation 2.12. Cependant, l'expression ci-dessus reste liée à un mouvement en cosinus spécifique. Les auteurs insistent sur le fait que Z_{opt}^{gauss} s'écartera quelque peu de cette valeur estimée et pourrait représenter comme une bonne référence pour maximiser la puissance transférée au dispositif idéal.

Dans l'approche de Maxwell, les auteurs représentent le modèle électrique du TENG par une source de tension en circuit ouvert en série avec un condensateur variable dans le temps. $V_{oc}(t)$ en circuit ouvert en série avec un condensateur à variation temporelle $c(t)$ comme le montre la figure 2.5 [129].

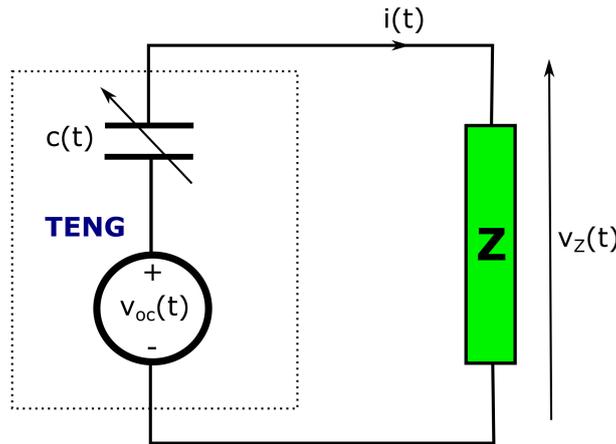


FIGURE 2.5 – Représentation du modèle électrique simplifié du TENG

En raison de $c(t)$, l'impédance interne du TENG est représenté par $z_T(t) = \frac{1}{c(t)\omega}$ où ω correspond à la vitesse angulaire de $c(t)$. Le changement de $c(t)$ entraîne un changement de $z_T(t)$ au cours du processus de conversion énergétique. Les auteurs montrent que $z_T(t+T) = z_T(t)$ peut être développés à partir d'une série de cosinus de Fourier par $z_T(t) = z_0 + \sum_{n=1}^{\infty} z_n \cos(n\omega t)$. L'impédance optimale est alors donnée par

$$Z_{opt}^{maxwell} = Z_{rms} \approx \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T z_T(t) dt} \quad (2.13)$$

L'impédance optimale dépend donc de la géométrie et des paramètres de mouvement tels que la fréquence et la distance de séparation maximale.

2.3 Dispositif de transfert d'énergie

Comme d'autres sources d'énergie en provenance de l'environnement, la triboélectricité dépend du temps. L'amplitude et la fréquence des pics de tension restent principalement soumises à la force mécanique appliquée au TENG, ce qui les rend difficiles à prévoir. Il convient donc de concevoir un dispositif de stockage de l'énergie pour pouvoir obtenir une puissance constante et contrôlable. Cependant, l'utilisation d'accumulateurs électriques ne peut s'envisager que si un circuit de transfert d'énergie est présent.

Cette partie du dispositif d'alimentation représente l'un des points clés pour le développement d'un outil auto-alimenté. En effet, c'est sur cette portion du système que la majeure partie de l'énergie produite sera dissipée.

De plus, l'intégration de composants sur des textiles apporte une exigence supplémentaire puisque les éléments peuvent être soumis à de multiples contraintes mécaniques. Il faudra donc veiller à ce que le fonctionnement de ces derniers ne soit pas trop perturbé par les différentes déformations appliquées par l'utilisateur.

Enfin, le dispositif final étant destiné à être autonome, il sera alors exclu de recourir à des constituants actifs fournis de l'extérieur.

2.3.1 Adaptation d'impédance

La résistance interne des TENG est très élevée et peut varier de 10 à 100 $M\Omega$, ce qui implique une tension de sortie importante, mais un courant très modeste. Les batteries, en revanche, disposent d'une impédance d'entrée beaucoup plus faible, généralement comprise entre 10^{-2} et $10^2 \Omega$.

Or, la puissance délivrée entre une source électrique et une charge dépend fortement de leur impédance respective. En effet, pour que la puissance transférée à la charge soit maximale, leurs impédances doivent être adaptées. La partie réactive de l'impédance du générateur nécessite donc une compensation et les parties résistives de la source et de la charge doivent demeurer égales.

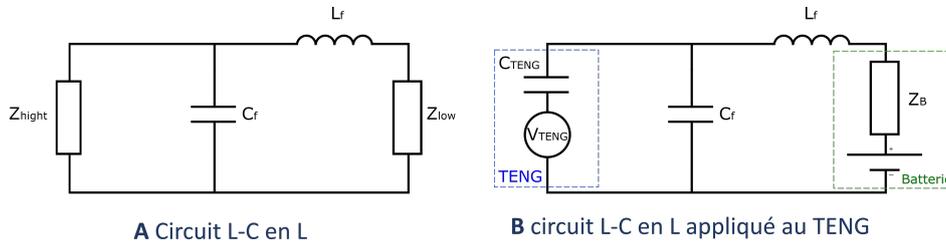
L'efficacité du système correspond au rapport entre la puissance fournie à la charge (donc dissipée par sa résistance interne R_L) et la puissance totale produite par la source (dissipée par la résistance propre de la source R_S ainsi que par R_L). Le rendement η s'exprime en fonction de R_S et R_L comme :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_S}{R_L}} \quad (2.14)$$

Le rendement sera meilleur si la résistance de la charge est très grande par rapport à celle de la source. Dans ce cas, le transfert d'énergie doit être optimal; cependant, il se fera en dépit de l'efficacité (puisque si $R_S = R_L \rightarrow \eta = 0.5$). Dans le cas présent, la résistance du TENG (la source) est beaucoup plus élevée que celle de la batterie (la charge), il faudra donc adapter le système afin de transmettre un maximum de puissance à notre accumulateur. Ceci peut être réalisé en créant un circuit $L - C$ ou en utilisant un transformateur.

Le circuit $L - C$ est en général employé comme filtre et sert également à adapter l'inductance de la charge à celle de la source. Il existe principalement trois réseaux distincts :

le circuit $L - C$ série / parallèle (circuit L), le circuit $L - C$ en π et le circuit $L - C$ en T . Le circuit $L - C$ en π est souvent utilisé lorsque l'inadéquation entre l'impédance d'entrée et celle de sortie est moyenne ou importante. Le circuit en T est dédié à l'adaptation d'une impédance faible ou moyenne. Enfin, le montage $L - C$ série/parallèle est plus adapté à l'adaptation d'une impédance élevée à une impédance faible. Dans notre cas, il faudra donc favoriser le circuit en L donné dans la figure 2.6A et la figure 2.6B.

FIGURE 2.6 – Utilisation des circuits $L - C$

Le dimensionnement des composants est alors

$$L_F = \frac{Z_{Low}}{2 \cdot \pi \cdot f} \sqrt{\frac{Z_{High} - Z_{Low}}{Z_{Low}}} \quad (2.15)$$

$$C_F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z_{High}} \sqrt{\frac{Z_{High} - Z_{Low}}{Z_{Low}}} \quad (2.16)$$

Les équations (2.15) et (2.16) indiquent que les composantes du circuit en L dépendent de l'impédance haute (Z_{High} qui correspond au TENG) et de la basse impédance (Z_{Low} qui représente la batterie), ainsi que de la fréquence de fonctionnement f du système.

Ce dernier point peut poser problème, car ce type d'adaptation reste très efficace pour une fréquence d'usage donnée. Or, la périodicité du signal émis par le TENG dépend du mouvement qui lui est appliqué. Il devient ainsi impossible de concevoir un circuit universel car la fréquence d'opération peut être très différente selon la source d'énergie mécanique (entre un sportif et une personne âgée). De plus, la perte due au filtre serait encore plus forte dans le cas d'une simple impulsion puisque la majorité des fréquences contenues dans le signal serait alors filtrée. Il faudra donc trouver un composant avec une largeur de bande plus importante pour assurer un transfert d'énergie optimal lors de l'adaptation.

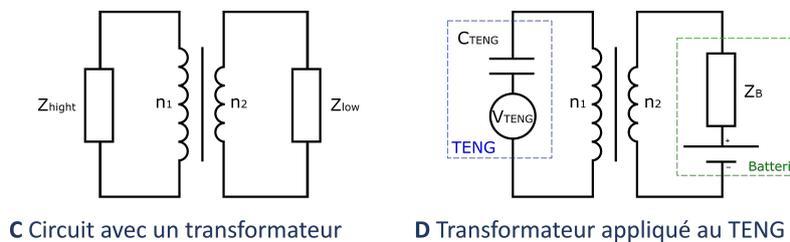


FIGURE 2.7 – Utilisation d'un transformateur

Afin de compenser le filtre (assez sélectif) généré par les circuits $L - C$, il est possible d'utiliser des transformateurs pour adapter le TENG à la charge d'un accumulateur

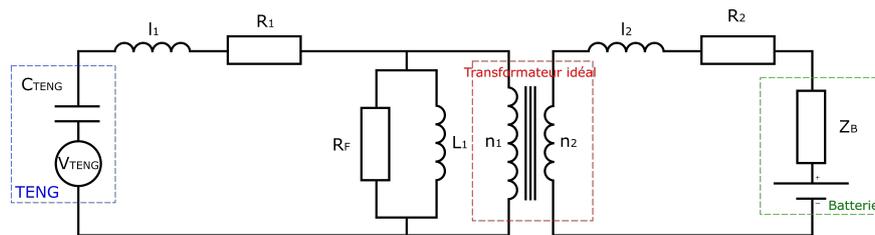
d'énergie (une batterie par exemple) (Figure 2.7C et Figure 2.7D). En effet, les transformateurs ont l'avantage de fonctionner en large bande et d'être toujours stables (même à des taux de transformations élevés).

Dans un transformateur, les rapports de tensions et de courants étant modifiés entre le primaire et le secondaire, une impédance placée au primaire ne sera pas perçue avec sa valeur initiale au secondaire. Ceci permet d'effectuer une adaptation en jouant sur le nombre de spires de part et d'autre de notre composant (n_1 au primaire et n_2 au secondaire) via l'équation (2.17).

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{Z_{High}}{Z_{Low}}} \quad (2.17)$$

Bien que cet élément ait une large bande passante, il est important de noter que la composante *DC* (courant continu) et les basses fréquences seront filtrées. Il est donc possible qu'une partie de la puissance potentiellement transmise à la batterie soit fortement dissipée.

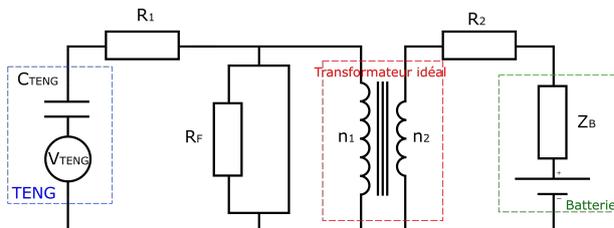
En effet, lors de l'utilisation d'un transformateur, il convient de prendre en compte les chutes de tension dans la résistance générée par les enroulements primaires et secondaires ainsi que leur inductance de fuite. Le transformateur peut dans ce cas être représenté à l'aide du schéma équivalent suivant.



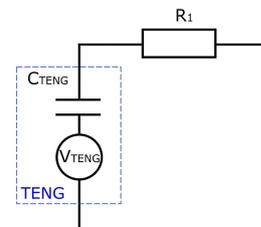
E Circuit employant un transformateur idéal

FIGURE 2.8 – Circuit complet avec un transformateur

La figure 2.8E montre clairement que l'utilisation d'un transformateur à basse fréquence peut entraîner une perte de puissance par l'intermédiaire de l'inductance L_1 . Dans le cas d'une basse fréquence opérationnelle du TENG, l'inductance peut être considérée comme un simple fil (en particulier L_1 qui sera très petit avant R_f). Par conséquent, le circuit présenté ci-dessus peut être simplifié comme le montrent les figures 2.9F et 2.9G.



F Circuit avec un transformateur idéal en basse fréquence



G Schéma simplifié d'un circuit employant un transformateur idéal avec un TENG en basse fréquence

FIGURE 2.9 – Application du transformateur au TENG

Dans cette configuration, l'énergie générée par le TENG ne serait pas transmise à un élément de stockage. Par conséquent, le système proposé dans [113] et décrit dans la figure 2.10H n'est pas approprié pour un système embarqué autonome.

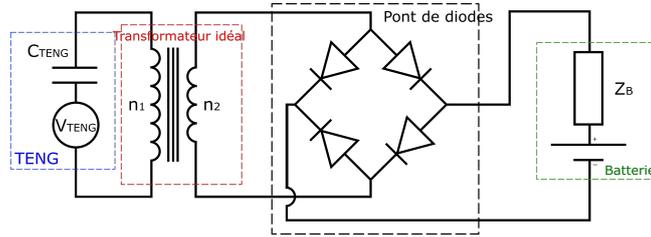


FIGURE 2.10 – Circuit avec un transformateur idéal et un pont de diodes

Comme cette solution ne semble pas adaptée aux basses fréquences, telle que la collecte d'énergie des mouvements humains pour les appareils portables, il est nécessaire de trouver une autre méthode pour assurer un transfert optimal de l'énergie.

2.3.2 Redressement et régulation de la tension

Les solutions conventionnelles ne permettent pas une adaptation optimale de l'impédance d'entrée du TENG à celle d'un dispositif de stockage (pour les signaux de basse fréquence), plusieurs groupes ont développé des circuits combinant l'adaptation et le lissage de la tension.

Pour le circuit proposé par [148] et présenté dans la figure 2.11, un rendement allant jusqu'à 80,4% a été atteint. Ici, la partie chargée de l'extraction de l'énergie est isolée du reste du système tant que U_T est inférieure à une valeur seuil U_{ref} appliquée à l'une des entrées du comparateur. Lorsque U_T est suffisamment grande, le MOSFET agissant comme un interrupteur est ouvert par l'intermédiaire du comparateur. Ceci a pour effet de charger le circuit $L - C$. Ensuite, lorsque U_T devient inférieure à U_{ref} , le MOSFET passe à l'état bloqué et le circuit $L - C$ libère l'énergie stockée dans la résistance R . Cependant, la tension de seuil U_{ref} et le comparateur doit être choisi avec soin, car ce dernier ne doit fonctionner qu'avec le courant et la tension produits par le TENG.

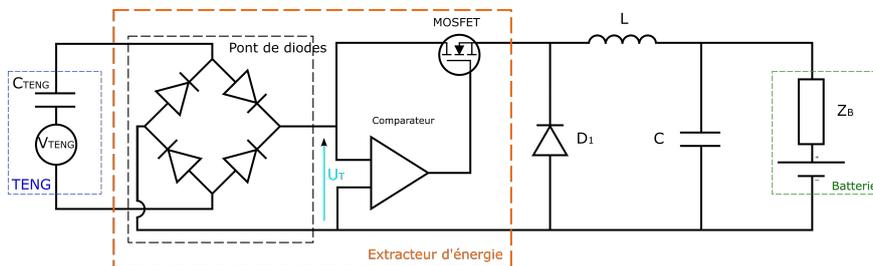


FIGURE 2.11 – Circuit de chargement universel

Le deuxième circuit étudié pour cette application est le doubleur de Bennet, exploré dans [40] et exposé dans la figure 2.12. La topologie proposée ci-dessus met en œuvre un schéma de conditionnement représenté par un cycle de charge rectangulaire de rapport d'aspect réglable. Ce circuit présente une augmentation exponentielle de l'énergie convertie au cours du temps de fonctionnement. Selon un aspect théorique, la croissance

de l'énergie commence à partir d'une énergie initiale supposée faible dans le système (ce qui est le cas du TENG).

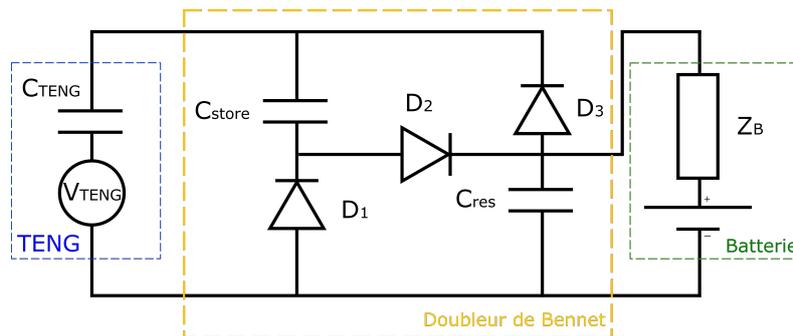


FIGURE 2.12 – Circuit de chargement avec un doubleur de Bennet

Néanmoins, aucun de ces deux circuits ne semble prometteur. Pour le premier, le comparateur employé comporte des éléments actifs. Afin de l'appliquer sur un TENG, le développement d'un comparateur passif efficace représente une étape indispensable et un nouveau verrou scientifique apparait. Le second n'apporte quant à lui aucun avantage par rapport à l'emploi d'un pont de diode classique comme le détaille [149]. C'est donc le pont redresseur à diode qui sera employé ici.

Cette sous-section a donné un aperçu général des origines physiques de la triboélectricité et des différents modèles électriques de TENG, ainsi que des exigences pour une collecte optimale de l'énergie générée. La section suivante se concentre sur la mise en œuvre du TENG dans les structures textiles.

2.4 T-TENGs

Le T-TENG est une source d'énergie prometteuse pour les systèmes portables et les textiles intelligents, car il peut directement s'intégrer dans l'architecture de l'appareil. Les structures textiles ont été étudiées dès le début du développement du TENG. La croissance spectaculaire des publications et des citations qui doublent chaque année démontre l'intérêt grandissant pour le sujet. Un nombre considérable de matières et de configurations globales de T-TENG furent explorées au cours de cette courte période, avec plusieurs nouveaux articles par semaine qui enrichissent ce corpus [29].

L'objectif de cette partie de l'étude consiste à fournir une vue d'ensemble des multiples stratégies déployées et développées pour concevoir des TENG. En vue de créer un TENG efficace, il demeure important de définir quels éléments utilisés et comment les organiser. Les différentes données relatives au choix des diélectriques et des matériaux conducteurs sont détaillées ici afin d'avoir un aperçu des divers paramètres qui jouent un rôle dans les performances du système. Dans le cas d'un dispositif à base de textile, une large variété de méthodes peuvent convenir pour gérer la configuration et l'empilement des matériaux. Les deux principales techniques reposent sur le tricot et le tissage. Elles offrent toutes deux un très grand nombre de motifs possibles, qui constituent de formidables outils de créativité. Un aperçu des différentes perspectives explorées par le tissage, le tricot et d'autres types de structures globales est donné dans la seconde moitié de cette partie de cette section.

2.4.1 Choix des matériaux : les diélectriques

Un index triboélectrique fut pendant longtemps établi de manière empirique en frottant les matériaux deux par deux et en les classant en fonction de leur polarisation relative. Dans le cas d'un contact solide-solide, l'aire de rencontre effective résulte de l'état de surface des matériaux frottés, et donc la densité de charge de surface mesurée dépendra de cette configuration. Une première réalisation d'une méthodologie pour élaborer une table « absolue » a été proposée en 2019 [161]. Dans cette expérience, les matériaux à évaluer se dressaient face à un bain de mercure liquide et les analyses furent effectuées dans une cage de Faraday, avec une atmosphère (azote), une pression, une température et une humidité contrôlées. Cela permis de définir les densités de charge triboélectrique de différents matériaux [161].

Idéalement, pour obtenir les meilleures performances, les matériaux doivent être mis en contact afin de générer autant de charges de surface triboélectriques que possible. Pour ce faire, le choix le plus avantageux consiste à utiliser des matériaux très éloignés dans la table triboélectrique. Dans le cas des textiles, le choix des matières disponibles est plus restreint : les thermoplastiques, les fibres naturelles et les fibres inorganiques représentent les principales catégories de fils accessibles ; des encres ou des revêtements peuvent autoriser le dépôt de divers matériaux spécifiques sur des substrats textiles. Comme expliqué précédemment, lors de l'électrification par contact, un matériau acquiert une charge négative (capture d'électrons) tandis que l'autre obtient une charge positive (perte d'électrons). Plusieurs paramètres chimiques et physiques influent sur la tendance d'une certaine superficie à gagner ou à abandonner des électrons [71] [11] [160].

L'existence de groupes électroattractifs tels que le fluor (-F), le cyano (-CN), l'ester (-COOR), l'acyle (-CON-), le carboxyle (-COOH) ou le nitro (-NO₂) favorise la rétention d'électrons. La présence de liaisons insaturées facilite également l'acceptation d'un électron supplémentaire. Pour ce faire, l'altération de l'aire par des méthodes de modification de la surface (comme que le traitement UV-ozone ou la gravure au plasma) peut encore accroître les performances des matériaux qui enlèvent les électrons.

En ce qui concerne les matériaux qui fournissent des électrons, ces derniers restent faiblement rattachés, ce qui correspond à une fonction de travail minimale. Parmi les groupes donneurs d'électrons typiques se trouvent les amidogènes (-NH₂), les amides (-CONH), les oxhydryles (-OH) et les alcoxy (-OR), ou des groupes d'oxygène chargés positivement (Chen, A. et al., 2020).

2.4.2 Choix des matériaux : les conducteurs

L'autre facteur essentiel d'un TENG équivaut à l'élément conducteur qui permet la circulation des électrons lors de la fabrication d'énergie. Dans les TENG non textiles, la grande majorité des dispositifs s'appuient sur des métaux en vrac, qui présentent l'atout d'une résistance mécanique, d'une excellente conductivité et d'un prix raisonnable. Dans le cas d'un T-TENG, la conductivité revêt toujours une importance capitale, mais la légèreté, la flexibilité et la respirabilité correspondent à d'autres points clés à améliorer dans la conception du produit afin d'obtenir un outil portable qui conserve les avantages d'un textile. La lavabilité et la résistance mécanique de l'appareil aux déformations sont également des facteurs essentiels à prendre en compte.

Les métaux sont les conducteurs les plus courants dans le cas des systèmes en vrac, puisqu'ils demeurent largement disponibles et disposent d'une excellente conductivité. Leurs inconvénients résident dans leur poids élevé et leur manque de souplesse, en particulier pour les textiles nomades. Pour y remédier, les fils ou les vêtements plaqués de métal constituent une bonne alternative, car ils restent plus légers et plus conciliables avec les textiles. La faible quantité de métal occasionne une plus grande résistance, et l'abrasion pendant le lavage peut éroder le placage, ce qui peut entraîner une perte de performance au fil du temps. Certains polymères intrinsèquement conducteurs tels que le PEDOT :PSS voient leur utilisation de plus en plus fréquente. Cependant ils se dégradent à haute température ou sous l'effet de l'humidité et des UV, et ne conviennent donc pas pour les textiles intelligents.

Les matériaux conducteurs à base de carbone sont disponibles dans une large gamme de techniques (remplissage de polymères ou différentes méthodes de trempage/enrobage) peu coûteuses et peuvent fournir de la conductivité dans ou sur des matériaux isolants. Une autre possibilité d'apport de conductivité aux diélectriques consiste à remplir les polymères avec des charges conductrices. Ces deux techniques ne demeurent pas encore exploitées à l'échelle industrielle pour obtenir des textiles hautement conducteurs, mais uniquement pour des applications antistatiques.

2.4.3 Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures tissées

Le premier T-TENG [157] se compose de coton recouvert d'un fil d'encre de nanotube de carbone (CCTY) et d'un CCTY enduit de PTFE. Les deux fils sont enchevêtrés pour constituer une double hélice, puis la hauteur de ces TENG à base de fils se retrouve tissée et cousue sur une blouse de laboratoire pour créer une « chemise électrique » de preuve de concept. Cette dernière emploie l'énergie qui provient des mouvements pour alimenter un système de capteur de température corporelle sans fil et pouvant charger un condensateur commercial de $2,2 \mu F$. La densité de puissance maximale obtenue avec ce système est de $0,1 \mu W/cm^2$ et dispose d'une résistance de $80 M\Omega$.

Plusieurs dispositifs explorent la conception de bandes de tissu tissées dans le T-TENG. Dans un premier exemple [159], des bandes de tissu polyester et nylon servent en temps que strates diélectriques ; une bande de tissu argenté vient se coller sur les bandes de la couche diélectrique pour produire une couche conductrice, puis le tout vient s'assembler afin de former une structure tissée. Intégrée dans un manteau, au niveau des articulations des jambes et des bras, elle peut générer de l'énergie à partir du frottement avec d'autres surfaces ou avec elle-même en mode déformation, ce qui permet d'exploiter les mouvements de pliage. Une composition similaire cousue sur un tissu de coton qui créer le substrat a également été développée [22]. Des bandes de cuivre servent d'électrodes et le tissu de nylon ainsi que le dacronles constituent les diélectriques actifs. Ce système, qui atteint une tension de V_{oc} de $2 kV$ propose une durabilité testée sur 5400 cycles et supporte un lavage.

Une structure tissée basée sur des bandes de tissu polyester comme substrat fut également réalisée [112]. Le PES se retrouve ici recouvert de nickel, puis de parylène, pour fabriquer le tissu Ni- et le tissu Parylène. Une fois tissé, le système atteint une densité de puissance de sortie maximale de $393,7 mW/m^2$ à $70 M\Omega$, et l'énergie recueillie en insérant

le dispositif sous un pied, sous un bras ou au niveau de l'articulation du coude. Associé à une batterie flexible à base de textile, un cardiofréquence-mètre avec communication à distance avec un smartphone a été alimenté.

La création d'un T-TENG se fit grâce à une machine à tissée traditionnelle dans [13] avec une technique largement disponible. Les parties de récolte et de stockage de l'énergie restèrent intégrées dans la même structure. Quant au T-TENG, il se composait d'une électrode tissée, avec du carbone pour trame et du coton comme chaîne, et d'un textile diélectrique tissé avec du carbone pour chaîne et du PTFE comme trame. Différents modèles de tissage lui permettent de fonctionner en mode CS ou en mode autonome. En guise de démonstration, ce dispositif a été cousu sous le bras d'un pull et a pu alimenter une montre électrique en continu.

Une fibre coaxiale fabriquée par double revêtement, contenant un fil de stockage d'énergie au centre de la fibre (H3 PO4 /PVA) et à l'extérieur du caoutchouc de silicone et fibre de carbone, a été rapportée. La puissance de sortie maximale d'une seule fibre correspondait à $1 \mu W$ pour une résistance de charge de $100 M\Omega$, en raison de la déformation de la section de la fibre. Un démonstrateur fut conçu en tissant plusieurs de ces fibres et en les introduisant dans une blouse de laboratoire, sous le bras. Seule une faible diminution du courant crête a été observée après trois lavages, et le système a pu alimenter une montre électronique. Des résultats prometteurs, même si le diamètre important de la fibre a réduit le nombre de dispositifs dans lesquels elle peut s'intégrer [152].

Un fil en acier inoxydable dans un tube en caoutchouc siliconé comme fil de chaîne tissé avec un fil torsadé en acier inoxydable et un fil en polyacrylonitrile modifié (pour fil de trame) [41] proposèrent une puissance maximale de $12,5 \mu W m^{-1}$ à $20 M\Omega$ avec une durabilité de 2000 cycles et une lavabilité de 10 cycles. Il alimenta une montre électronique en récoltant son énergie à partir des mouvements de traction et de compression du corps.

Liu et ses collaborateurs créèrent un système fondé sur un fil confectionné par un processus de fabrication conventionnel et capable de charger un condensateur de $0,47 \mu F$ ainsi qu'une diode électroluminescente (DEL) rouge [79]. Il se compose d'un fil tissé à-mé-gaine : fil de cuivre entouré de nylon et fil d'acier recouvert de polyester. La densité de puissance maximale atteinte était de $2,33 mW/m^2$ sous une résistance de $50 M\Omega$.

L'une des dernières structures tissées s'appuie sur un fil de TENG à électrode unique composé d'un fil de polyamide conducteur comme noyau tapissé d'un fil de PTFE (Ma et al., 2021). Les fils individuels étant extrêmement flexibles, l'ensemble du dispositif présente une excellente adaptabilité et portabilité. La puissance atteint un maximum de $25 \mu W/m$ à une résistance de $1 G\Omega$ et une fréquence de $1 Hz$. Cependant, cette structure ne représente pas un véritable générateur d'énergie, car elle fut conçue pour détecter les projections d'acides et d'alcalins sur les équipements de protection personnelle.

Les données des travaux cités sur le T-TENG tissé sont regroupées dans le tableau 2.1. Les meilleures prestations se réalisent pour des résistances de 50 à $100 M\Omega$. Les bandes enduites présentent les résultats les plus encourageants, mais leur fabrication artisanale ne semble pas compatible avec un développement à l'échelle industrielle. Dans le cadre de stratégies de conception comparables, les observations montrent que plus la conductivité du conducteur grandie, plus les performances augmentent, ce qui confirme l'importance capitale de cet élément, ainsi que la nature du diélectrique. Ces résultats demeurent prometteurs pour la résistance à l'abrasion lors du lavage, il reste cependant à tester la résistance à long terme à l'eau et aux détergents, et leur effet sur les performances.

Type d'appareil	Matériau triboélectrique	Électrode	Zone (cm^2)	V_{oc} (V)	Puissance maximale (résistance)	Durabilité	Lavabilité (fois)	Références
Double hélice	Coton / PTFE	CNT	9, 1	–	$1 \text{ mW}/m^2$ (80 Ω)	5 h (9000 cycles)	–	[157]
Bandes de tissu adhésives	Polyester / nylon	Argent	432	95	–	–	–	[159]
Bandes de tissu adhésives	Nylon / Dacron	Cuivre	588	2000	–	5400 cycles	1	[22]
Bandes de tissu enduit	Parylène	Nickel	50	–	$393,7 \text{ mW}/m^2$ (70 $M\Omega$)	–	–	[112]
Fils tissés	Coton / PTFE	Carbone	96	118	–	15000 cycles	–	[13]
Fibre coaxiale	Caoutchouc de silicone	Carbone	–	42,9	$11,2 \text{ }\mu\text{W}/m$ (100 $M\Omega$)	8000 cycles	3	[152]
Fil de gaine	Fil de polyacrylonitrile modifié par du caoutchouc de silicone	Acier inoxydable	–	–	$12,5 \text{ }\mu\text{W}/m$ (20 $M\Omega$)	2000 cycles	10	[41]
Fil de gaine	Nylon et polyester	Cuivre et acier	2, 25	–	$2,33 \text{ mW}/m^2$ (50 $M\Omega$)	12 h	–	[79]
Fibres tissées DC TENG	PTFE / PA	Argent	47, 6	4500	–	–	–	[12]
Fil de gaine	PTFE et coton	Fil polyamide conducteur	–	$180,06$ (moins de 15 N de force)	$605 \text{ }\mu\text{W}$ (moins de 15 N de force)	–	5	[84]

TABLE 2.1 – Propriétés des T-TENG tissés

2.4.4 Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures tricotées

L'un des premiers exemples dans la littérature comporte un générateur et un dispositif de stockage d'énergie textile portable fondé sur un TENG tricoté en trame et un supercondensateur [28]. Le T-TENG dispose d'une conception coaxiale composée d'une fibre mélangée acier inoxydable/polyester comme noyau conducteur, tapissée de caoutchouc de silicone, avec une densité de puissance maximale avoisinant 85 mW/m^2 . Dans une autre publication [27], le même fil triboélectrique de base est organisé en architectures tricotées 3D. Il permet ainsi d'alimenter des systèmes LED par frottement des mains ou une « smartwatch » par tapotement des mains ; et l'équipe a également imaginé un prototype de couverture dansante auto-alimentée. Pour une structure de 45 cm^2 , la tension d'alimentation $V_{oc} = 18 \text{ V}$ et la densité de puissance maximale atteinte est de $263,36 \text{ mW/m}^2$ à $132 \text{ M}\Omega$, ce qui prouve l'intérêt d'améliorer la configuration globale afin d'accéder à de meilleures performances.

Yu et ces collaborateurs proposèrent une composition plus fine avec une architecture cœur-coquille munie d'un cœur en acier inoxydable recouvert de polyuréthane [153]. Il s'agit de la première structure à base de fils rapportée dans la littérature qui peut se tisser ou se tricoter et obtenue à partir de techniques largement disponibles dans l'industrie textile. L'inconvénient réside dans le fait que l'acier inoxydable reste lourd et assez rigide, de sorte qu'il ne soit pas confortable pour le porteur s'il demeure inclus dans un vêtement. La densité puissance maximale atteint 60 mW/m^2 à $200 \text{ M}\Omega$, et le dispositif fut intégré sous le bras et dans une chaussette pour charger une « smartwatch ». La résistance au lavage et les propriétés d'adaptation ont été testées, car le système peut être coupé et cousu sans perte de performance.

Une autre structure cœur-coquille fut étudiée par Dong et ces collaborateurs sur la base d'un nylon 6 revêtu d'argent et recouvert de PTFE et de PA66 tressés, transformés par tricotage plat [26]. Le dispositif fonctionne en mode de déformation par étirement ou par compression et peut s'intégrer de manière transparente dans une articulation à usure traditionnelle. En termes de performances, la tension d'alimentation V_{oc} a pu atteindre 25 V et la densité de puissance maximale grimpa jusqu'à 1484 W/m^2 à $90 \text{ M}\Omega$ sans perte de performance après 6000 cycles et 10 lavages.

Un dernier exemple traite d'un tricot à double face par la technique du point de placage, avec un fil diélectrique d'un côté et du nylon 6 revêtu d'argent comme conducteur de l'autre côté [151]. Le système fonctionne en mode CS ou en mode coulissant coplanaire avec une tension $V_{oc} = 120 \text{ V}$ et une densité de puissance maximale de $5,58 \text{ mW/m}^2$ à $70 \text{ M}\Omega$.

Ces différents résultats sont regroupés dans le tableau 2.2. Il apparaît clairement que la plupart des structures tricotées reposent sur le fil à âme comme composant élémentaire. Pour l'instant, seul le tricotage de base a été pleinement exploité. Étant donné que des tricots de plus en plus complexes apparaissent, en particulier pour la fabrication de composites, une grande variété de T-TENG tricotés reste à développer.

Type d'appareil	Matériau triboélectrique	Électrode	Zone (cm^2)	V_{oc} (V)	Puissance maximale (résistance)	Durabilité	Lavabilité (fois)	Références
Fil conducteur enduit	PDMS	Acier inoxydable / fibre de polyester	45	18	263,36 mW/m^2 (132 $M\Omega$)	–	10	[28]
Fil conducteur enduit	Gaoutchouc de silicone	Acier inoxydable / fibre de polyester	–	150	85 mW/m^2 (100 $M\Omega$)	50000	15	[27]
Fil à âme	Spandex	Acier inoxydable	306	75	60 mW/m^2 (200 $M\Omega$)	5 h	120	[153]
Fil recouvert de tricot tubulaire	PA66 et PTFE	Fil de nylon 6 revêtu d'Ag	–	25	1484 $\mu W/m^2$ (90 $M\Omega$)	6000 cycles	10	[31]
Tricot double face par la technique du point de placage	PA66 et PE	Fil de nylon 6 revêtu d'Ag	–	120	5,58 mW/m^2 (70 $M\Omega$)	6000 cycles	10	[151]

TABLE 2.2 – Propriétés des T-TENG tricotés

2.4.5 Analyse de différents types de structures T-TENG : les structures multicouches

Une autre catégorie de T-TENG se compose de structures multicouches. Seung et ces collaborateurs conçurent un dispositif basé sur un tissu d'Ag recouvert de polydiméthylsiloxane (PDMS) [124]. La croissance hydrothermale de nanorods de ZnO avant le revêtement PDMS a augmenté les performances du mécanisme qui a ensuite été intégré dans une preuve de concept pour un accès à distance à un système d'entrée de véhicule sans clé. Les propriétés de l'outil furent testées en fonction du nombre de strates (de 1 à 4) et de la force appliquée (de 0,1 à 15 *kgf*).

Kwak et ces collaborateurs développèrent un tricot à trois couches composé d'une strate centrale en argent [67] entourée de deux couches constituées d'argent et de PTFE. Différentes structures de tricot ont été explorées ; le double tricot et le tricot côtelé révélèrent une meilleure extensibilité lors de l'exploitation de la compression ou l'étirement. Ils délivrent une tension de $V_{oc} = 23,5 V$ et une puissance maximale de 60 μW à 70 $M\Omega$.

Le multicouche, conçu par Huang et ces collaborateurs, est composé d'un textile classique laminé avec une membrane de PTFE par rapport à un tricot de coton et de fibres de nylon argentées conductrices [49]. Comme la strate de PTFE peut s'appliquer sur n'importe quel textile conventionnel, elle permet une intégration facile de ce T-TENG. Il atteint 203 mW/m^2 à 80 $M\Omega$, fonctionne en mode autoportant à glissement latéral, et fut introduit dans un indicateur d'alerte à processus automatique et dans l'alimentation d'une « smartwatch » par balancement du bras. Ces systèmes demeurent particulièrement attrayants, car ils restent très polyvalents : il est possible de régler le nombre de strates, le modèle de tricotage/tissage par couche et les connexions entre les strates. Ils constituent une voie prometteuse en ce qui concerne la réalisation de nouveaux générateurs d'énergie. En effet, ces derniers répondent à la fois à des spécifications d'intégration et de performance.

Une autre technique de superposition intéressante consiste à recouvrir le fil ou le tissu d'un polymère qui sert de conducteur ou de surface triboélectrique. Mule et ces collaborateurs ont conçu un T-TENG fondé sur des revêtements multiples [97]. La strate conductrice comprend un tissu de coton enduit de polypyrrole (PPy). La couche PDMS est ensuite employée comme surface triboélectrique. Le papier de verre s'utilise en temps que moule pour le PDMS afin d'obtenir une structuration de la surface dans l'intention d'augmenter les performances. Ce système atteint une tension de courant ouvert de 200 V, et une densité de puissance maximale de 82 $\mu W/m^2$ à 70 $M\Omega$. Un autre exemple de T-TENG basé sur un textile nappé structuré fut donné par Zhang et ces collaborateurs. Dans ce travail, un textile argenté commercial a été recouvert d'un mélange de PDMS et de nanotubes de carbone par trempage ou à l'aide d'une brosse. L'échantillon oint au pinceau proposait un façonnement de surface qui augmentait la tension générée de 80 % par rapport à l'induction par immersion traditionnelle [156].

Une analogie plus aisée de ces résultats est envisageable avec le tableau 2.3. Les diverses architectures présentent d'importantes disparités de performances, et comme ces dernières ne dépendent pas toujours de la surface, la comparaison demeure difficile. Il reste néanmoins possible de noter la grande durabilité des différents échantillons. Malheureusement, la résistance au lavage n'a pas été systématiquement testée, car une délamination peut se produire et annihiler l'adhérence du revêtement, ou l'intégrité de la structure multicouche peut se retrouver détruite par des contraintes mécaniques.

Type d'appareil	Matériau tribolélectrique	Électrode	Structure	Zone (cm^2)	V_{oc} (V)	Puissance maximale (résistance)	Durabilité	Lavabilité (fois)	Références
Croissance hydrothermale + revêtement	PDMS	Ag	Multicouche	–	120	1,1 mW (1 $M\Omega$)	12000 cycles	–	[124]
Tissus à mailles	PTFE	Ag	Multicouche	100	23,5	60 μW (5 $M\Omega$)	–	–	[67]
Fil à âme	Caoutchouc de silicone	Fil de nylon conducteur	Fil	–	20	11 W/m^3 (compression)	50000 cycles	10	[30]
Conv textile PTFE laminé vs. coton + conducteur	PTFE / coton	Fibres conductrice en nylon argenté	Multicouche	–	400	203 mW/m^2 (80 $M\Omega$)	500 cycles	1	[49]
Textile conventionnel enduit	PDMS	Coton enduit de polypyrrole	Textile enduit	–	200	82 $\mu W/m^2$ (70 $M\Omega$)	5000 cycles	–	[97]
DC TENG à base de fibres tissées	PTFE PA	Argent	Tissé	47,6	4500	–	–	–	[12]
Fil hybride TENG-supercondensateur	PTFE	Fil de tissu de carbone conducteur	Réseau textile	–	400	–	1000 cycles	1	[85]
Fil enduit	PEDOT / feuille d'aluminium vs. nylon	Revêtement Ni	–	–	0,45	1,1 mW (30 $k\Omega$)	6000 courbures 3350 glissements	–	[89]
Textile enduit	PDMS + CNT vs. nylon	Textile argenté	–	9	51,2	99,8 mW/m^2 (200 $M\Omega$)	10000 cycles	–	[156]
Structure tubulaire en matériaux à coefficient de Poisson opposé	PVC/PDMS	Acier inoxydable	Fil intégré au textile	–	46	52,36 mW/m^2 (10 $M\Omega$)	10000 cycles	–	[43]

TABLE 2.3 – Propriétés des T-TENG multicouches, revêtus et non conventionnels dans la littérature

2.4.6 Analyse de différents types de structures T-TENG : autres structures d'intérêt pour la collecte d'énergie par mouvement de flexion

Une âme en caoutchouc de silicone dans une application de fibre creuse [30] a été développée pour l'intégration dans « smartglove ». De façon plus générale, la création de cette structure visait une application destinée à la reconnaissance gestuelle et son adaptation comme chaîne pour le tissage de grande taille a été validée.

Mao et ses collaborateurs proposèrent une architecture noyau-coquille novatrice [85] dont le noyau se constitue d'un fil de tissu de carbone conducteur nappé de PDMS/MnO₂, et dont la coquille se compose d'un fil de PTFE gauchi autour de ce fil. Ce système exploite l'énergie de la compression tout en étant incorporé dans un réseau textile.

Une structure tubulaire originale basée sur des matériaux à rapport de Poisson opposé [43] pourrait récolter l'énergie des mouvements d'étirement. Lorsqu'il s'étire, le manchon tressé extérieur, en acier inoxydable, se rétracte et le tube intérieur en fil d'acier inoxydable enduit de PDMS se dilate, ce qui permet l'intégration au niveau des articulations, comme l'a prouvé la démonstration d'un gant de reconnaissance gestuelle dans la publication.

Bien que les systèmes décrits dans cette section demeurent plus volumineux que les configurations tissées ou tricotées, ils offrent la possibilité de profiter des zones de compression et de pliage en tant que ressources génératrices d'énergie.

Depuis le premier T-TENG présenté en 2014, une grande diversité de matériaux textiles, de structures et de design fut explorée afin d'adapter le TENG à la plupart des mouvements qui peuvent être exploités pour fournir de l'énergie. L'évolution des designs employés montre également que les démonstrateurs sont de plus en plus effectués grâce des techniques compatibles avec les technologies textiles utilisées à l'échelle industrielle, ce qui inaugure la voie à la réalisation de T-TENG largement disponibles. Une nouvelle génération de T-TENG émerge [12] [89] produisant un courant positif oscillant. Cela peut conduire à une conception plus légère et à un circuit de gestion de l'énergie plus efficace. Par conséquent, moins de composants sont requis, ce qui ouvre le chemin à l'intégration du circuit électronique dans les textiles. Néanmoins, la fusion transparente du système complet sur les textiles, incluant le circuit de transfert d'énergie, demeure difficile et n'a pas encore été réalisée. Cette intégration nécessite une bonne compréhension et un contrôle des différents processus et technologies disponibles pour interconnecter les éléments électroniques sur les textiles, y compris les T-TENG.

2.5 Intégration de systèmes électroniques dans les textiles

Cette section présente un aperçu de la conception d'un système tribogénérateur complet et de l'intégration du circuit de transfert d'énergie sur les textiles. À notre connaissance, la littérature actuelle couvre peu ce domaine. Un exemple récent [20] montre l'intégration sur textile d'un pont de diodes agissant comme circuit de transfert. D'après la littérature vue dans la section précédente 2.3.2, des circuits plus complexes peuvent être nécessaires pour la conversion d'énergie d'un générateur triboélectrique et il devient alors nécessaire d'identifier quelles techniques d'intégration hétérogène sont actuellement

disponibles pour leur incorporation sur des textiles. Bien que des méthodes d'intégration de circuits électroniques rigides à base de PCB sur des textiles aient été proposées dans la littérature, telles que la broderie [21] ou la connexion par force vissée [75], les prototypes résultants semblent encombrants et inconfortables. Par conséquent, seule l'intégration directe de composants ou au moins de circuits imprimés flexibles sera examinée.

La partie qui suit détaille les deux éléments différents essentiels à la réalisation de l'électronique textile :

1. Réalisation de pistes conductrices sur textile : elles doivent avoir une faible résistance électrique ainsi que des dimensions compatibles avec les composants montés sur la surface de l'électronique (*pas minimum* = *largeur de ligne* + *espacement* = 400 μm).
2. Intégration de l'électronique sur le textile : le circuit peut être réalisé à l'extérieur du textile sur un substrat souple, mais de préférence directement sur le substrat textile à l'aide de pistes conductrices et de l'intégration discrète des composants sur les pistes textiles.

2.5.1 Pistes conductrices pour applications textiles

Les pistes conductrices sur les textiles représentent un élément fondamental pour la réalisation de circuits électroniques sur les tissus textiles. Elles doivent avoir une conductivité électrique appropriée, une résolution latérale et résister aux contraintes mécaniques et aux contraintes de lavage. En outre, elles doivent permettre l'interconnexion de divers composants électroniques tels que des composants passifs, des capteurs, des microprocesseurs, des batteries, etc.

Les pistes conductrices peuvent être intégrées lors de la fabrication du textile ou réalisées sur les tissus finaux à l'aide de différentes techniques. Cette section donne un aperçu des différents procédés disponibles pour réaliser des circuits flexibles fiables sur les textiles.

2.5.1.1 Pistes conductrices intégrées lors de la fabrication du textile

Les fils conducteurs peuvent être tricotés ou tissés au cours du processus de fabrication du textile. Ils doivent disposer des propriétés mécaniques appropriées pour être compatibles avec la fabrication du textile, c'est-à-dire une faible rigidité, un faible frottement et une résistance mécanique acceptable. Par conséquent, les fils métalliques conventionnels employés dans les câbles électriques ne peuvent pas être utilisés seuls, car ils ne peuvent pas être traités correctement pendant la fabrication du textile. En outre, l'insertion de ces fils conducteurs doit aussi préserver les propriétés inhérentes du textile, à savoir la respirabilité, la flexibilité et éventuellement l'extensibilité, tout en présentant la résistivité électrique la plus faible possible pour être compatible avec les exigences des circuits électroniques en matière de courant continu et alternatif.

Pour répondre à toutes ces exigences, différentes stratégies peuvent s'envisager pour incorporer intimement du métal dans un fil textile. Ces principales structures textiles conductrices sont détaillées dans [110]. D'une part, le filament polymère revêtu de métal demeure l'un des fils conducteurs les plus disponibles dans le commerce ; d'autre part, un filament métallique peut être utilisé. Il peut également être torsadé autour d'un fil

polymère [135] [103]. Une couche de polyuréthane (PU) peut éventuellement être enroulée à des fins d'isolation ou de protection.

L'argent et le cuivre restent principalement utilisés en raison de leurs excellentes propriétés électriques. L'argent souffre d'une faible résistance aux contraintes et d'une mauvaise lavabilité [106]. Les alliages de cuivre permettent de souder/interconnecter facilement les composants [110]. Une grille métallique fut reproduite sur un tissu incorporant des fils de cuivre. Le fil de cuivre de $40 \mu m$ de diamètre était recouvert de PU et séparé de $0,57 mm$. La résistance linéaire en courant continu était d'environ $15 \Omega/m$ et les lignes de transmission fonctionnaient jusqu'à $2 GHz$ [82]. Des circuits imprimés en tissu extensible ont été testés sur divers textiles tissés à l'aide de fils de polyamide enduits de nanoparticules d'argent. Ces fils conducteurs sont flexibles et robustes. La résistance au courant continu était d'environ $200 \Omega/m$. Le « 1/3 twill weave design » garantit la plus faible variation électrique (5 %) sous une contrainte mécanique de 30 % [72].

Dans le cadre du projet Jacquard [52], un nouveau fil conducteur a été développé avec des propriétés mécaniques comparables à celles des fibres textiles. Il se compose de brins torsadés de fils de cuivre tressés avec des fibres de soie. Là encore, une couche de PU est tressée pour la protection contre les contraintes externes [110].

Gaubert et ces collaborateurs testèrent des fils conducteurs (argent et acier inoxydable) tricotés sans couture sur du tissu de coton afin de développer des capteurs pour prévenir l'énurésie. La résistance linéaire en courant continu était $< 600 \Omega/m$ pour l'argent et entre $2500 - 4000 \Omega/m$ pour l'acier inoxydable [38]. Pour suivre la locomotion humaine, deux types de fils conducteurs ont été essayés : un mélange de fils filés en polyester et en acier inoxydable ($350 \Omega/m$) et des fils composés de filaments torsadés recouverts d'argent [9]. Paiva et ces collaborateurs utilisèrent des fibres polyamides recouvertes d'argent tricotées sur un t-shirt à des fins d'EMG et d'ECG [104].

En complément de l'insertion de fibres conductrices au cours du processus de fabrication du tissu, des traces conductrices peuvent être réalisées sur le textile fini à l'aide de différentes techniques telles que la broderie, l'impression, le dépôt d'une couche conductrice et la stratification d'un motif conducteur sur le textile.

2.5.1.2 Traces conductrices sur le textile fini

2.5.1.2.1 Broderie

La broderie utilise le même type de fils conducteurs que précédemment. Là encore, le cuivre, l'argent ou une combinaison des deux demeurent le plus souvent employés. Rotzler et ces collaborateurs réalisèrent une étude comparative de l'effet des cycles de lavage sur différents types de pistes conductrices. Les pistes de broderie étaient des multifilaments d'aramide enveloppés de fils de Cu/Ag. Ils conclurent que les performances de lavabilité ne dépendent pas seulement du type de pistes conductrices, mais aussi de la structure du tissu utilisé [118]. Un circuit NFC a été développé en exploitant des fils conducteurs composés de fibres de cuivre torsadées sur un fil PET brodé sur un tissu en coton [37]. [60] présente une antenne $2,4 GHz$ fabriquée en brodant des fibres revêtues de Cu (intérieur) et d'Ag (extérieur) sur un textile. En utilisant des fibres plus fines et en augmentant la densité de broderie, la conductivité de surface mesurée était proche de celle du cuivre avec une résolution géométrique améliorée d'environ $0,3 mm$. Ce type de fil est flexible

et présente d'excellentes propriétés mécaniques [60].

La broderie permet de fabriquer des pistes conductrices présentant une bonne conductivité et une bonne robustesse mécanique, mais elle souffre d'une mauvaise résolution latérale, d'un faible débit et d'un coût de fabrication élevé. Par conséquent, les techniques d'impression additive telles que la sérigraphie et l'impression à jet d'encre restent très attrayantes, car la sérigraphie permet un débit élevé, tandis que l'impression à jet d'encre est une technique polyvalente. Des encres organiques et inorganiques peuvent être utilisées, mais pour obtenir une conductivité élevée, il est préférable d'utiliser des encres métalliques.

2.5.1.2.2 Sérigraphie

La sérigraphie est une technique bien établie qui permet de déposer une couche conductrice épaisse de quelques microns à travers un masque de pochoir. Les encres d'argent et les encres composites d'argent sont principalement utilisées en raison de leur excellente conductivité et de leur résistance à l'oxydation. Des encres composites composées d'argent et de polymères (fluoroelastomère ou PU) ont été développées pour améliorer l'étirabilité de la couche imprimée [53] [48]. Les performances électriques et mécaniques dépendent fortement de la structure du textile. Une meilleure résolution latérale et une meilleure résistivité ont été observées sur les textiles dont les pores de surface sont plus faibles [48] ; tandis que l'influence de la pénétration de l'encre sur la robustesse mécanique [61] et la facilité d'interconnexion des composants [53] ont été démontrées. Il est intéressant de noter que Koshi et ces collaborateurs ont sérigraphié une couche d'argent sur un serpent de cuivre prépatiné afin d'améliorer la solidité mécanique [63].

En utilisant la sérigraphie, une résolution latérale jusqu'à $200 \mu m$ [58] et une résistance de la feuille jusqu'à $0,06 \Omega/\square$ (ohm par carré) ont été obtenues [53]. Pour améliorer la robustesse mécanique et la résistance au lavage, une couche de passivation en PU peut être laminée sur le dessus [56].

2.5.1.2.3 Impression à jet d'encre

L'impression à jet d'encre est une technique sans contact et sans masque qui peut s'utiliser pour déposer les motifs conducteurs souhaités au bon endroit. Par conséquent, cette technique permet de tester rapidement différentes conceptions sans avoir à fabriquer des masques coûteux et nécessite très peu de matériaux [57] [133]. Cependant, les encres ont une faible viscosité qui induit un étalement indésirable de l'encre à la fois dans le plan et à travers le tissu [125].

En outre, de nombreux passages demeurent nécessaires pour obtenir une couche d'épaisseur et une conductivité acceptables [59]. Les effets d'étalement peuvent être minimisés en modifiant la surface du textile (traitement de surface chimique ou couche d'interface) [65] [100] [57] et en sélectionnant la structure textile appropriée [59]. Une structure dense avec de petits pores réduira l'étalement de l'encre [56] [154].

Une résolution latérale jusqu'à $50 \mu m$ peut être obtenue avec d'excellentes propriétés électriques, mais l'interconnexion des composants reste un problème en raison de la faible épaisseur de la couche imprimée (environ un micron). Un exemple d'e-textile imprimé au

Processus	Performance électrique	Résolution latérale (μm)	Épaisseur (μm)	Comportement mécanique	Matériau	Réf
Fibres tissées ou tricotées	15,7 Ω/m (chaîne) 17,2 Ω/m (trame)	300	Fil de diamètre $40 \pm 8 \mu\text{m}$	–	Fil de cuivre	[82]
Broderie	0,8 – 6,7 Ω/m	300	–	–	Fil recouvert de cuivre et d'argent	[60]
Sérigraphie	0,06 Ω/\square	200	1-10	Allongement à la rupture 215 – 450 %	Fluoro-élastomère argenté	[53]
Impression à jet d'encre	0,03 – 4,7 Ω/\square	50-100	0,3-1	Plus de 1000 cycles de flexion	Composite graphène-argent	[57]

TABLE 2.4 – Procédés utilisés pour obtenir des pistes conductrices sur les textiles

jet d'encre est présenté par [59].

2.5.1.2.4 Ablation au laser

L'ablation au laser d'une couche conductrice déposée par dépôt en phase vapeur par plasma (PVD) a également été testée par plusieurs groupes. Pawlak et ces collaborateurs ont testé l'ablation laser d'une couche d'or PVD (300 nm) déposée sur quatre textiles composites, ainsi que le modelage d'une couche Ag/Au déposée sur un textile Cordura prétraité au plasma. Les textiles composites présentent une membrane supérieure en polymère (PU, PTFE, etc.) qui réduit la rugosité de la surface du tissu [107] [108]. Stempien et ces collaborateurs testèrent l'ablation laser de couches d'Ag et de Cu [134]. Plus rarement, le modelage d'une couche PVD peut également être réalisé à l'aide d'un masque d'ombre [58].

Enfin, les feuilles ou les textiles conducteurs peuvent être modelés par ablation laser, puis transférés ou laminés sur le textile. Les tissus conducteurs peuvent être constitués de fibres conductrices ou d'une fine couche métallique déposée sur la surface du textile. Des textiles Ni/Cu et Sn/Cu structurés par laser furent repassés sur le tissu sans affecter de manière significative les propriétés du textile [88] [7]. Rotzler et ces collaborateurs analysèrent à la fois la stratification d'une feuille de méandre en cuivre intégrée dans du TPU et un textile en nylon argenté structuré au laser (Shieldex) [118]. Les textiles conducteurs en argent structurés par ablation laser ont été largement étudiés [24] [34]. La combinaison d'une feuille de cuivre découpée au laser et de la sérigraphie d'une pâte d'argent a aussi été évaluée [62]. La résolution latérale de ces pistes conductrices est liée aux caractéristiques du laser utilisé et peut s'amincir jusqu'à 100 μm . La résistivité reste assez bonne et dépend surtout du choix du métal et de l'épaisseur de la couche. L'interconnexion des composants électroniques, soit par soudure, soit à l'aide de pâte conductrice, est relativement facile et robuste.

Les pistes conductrices textiles peuvent s'obtenir par différents procédés. Les principaux sont synthétisés et comparés dans le tableau 2.4. En fonction de l'application finale, un procédé peut être préféré aux autres. Par exemple, si une résolution élevée est nécessaire pour intégrer de petits composants, l'impression à jet d'encre doit être privilégiée, car sa résolution la plus fine est inférieure d'un ordre de grandeur à celle des autres procédés. De même, si les pistes conductrices nécessitent une bonne résistance mécanique, les composites conducteurs obtenus par impression à jet d'encre ou par sérigraphie sont à envisager. Ils présentent également une faible résistance électrique qui convient aux applications à faible impédance.

2.5.2 Intégration hétérogène de l'électronique sur les textiles

L'utilisation de composants à base de silicium garantit une fonctionnalité équivalente à celle des applications visées. De nombreuses recherches ont été menées sur l'intégration de circuits imprimés et de composants sur des textiles. D'une part, les circuits imprimés comportent l'avantage d'employer des processus d'emballage bien développés qui assurent des connexions électriques fiables des composants électroniques et un support mécanique aux circuits. D'autre part, cette fiabilité s'obtient avec des cartes rigides (substrat époxy FR4) au détriment des propriétés textiles telles que l'extensibilité et la conformabilité. Par conséquent, dans cette étude, seuls les substrats flexibles (substrat plastique, textile tissé, etc.) seront présentés puisque le système TENG est censé être porté et doit rester confortable.

Dans la littérature, plusieurs procédés compatibles avec cet objectif furent identifiés. Parmi eux, le collage et le brasage seront davantage abordés. Le principal défi consiste à créer une interconnexion entre les fils métalliques ou autres connecteurs des circuits intégrés et les matériaux textiles conducteurs. Ces interconnexions doivent présenter de bonnes propriétés mécaniques et électriques afin de fixer le composant sur le textile et d'alimenter les composants ou de transmettre le signal.

2.5.2.1 Intégration de circuits flexibles

D'ordinaire, le substrat textile et les composants électroniques s'obtiennent par des opérations distinctes. D'où la nécessité de trouver des méthodes de fixation pour l'élément électronique par la suite. Cet arrimage peut être permanente, mais dans certains cas, une implantation détachable pourrait être plus appropriée. En effet, le processus de lavage d'un vêtement implique des contraintes mécaniques et chimiques qui peuvent endommager le module électronique s'il n'est pas bien protégé. Les boutons-pression constituent un moyen d'obtenir une telle interconnexion amovible, car ils sont fabriqués en métal et déjà massivement employés par l'industrie textile. L'usage de boutons-pression a été rapporté pour relier un élément de traitement ECG basé sur un circuit imprimé flexible (FPCB) à une « smartwatch » [8]. En suivant la même logique de raccordements modulaires, il est possible de recourir à une fermeture auto-agrippante conductrice en temps que branchement pour les textiles intelligents. Les fermetures auto-agrippantes sont couramment utilisées dans les vêtements, et des fermetures auto-agrippantes conductrices sont disponibles dans le commerce (« Electromagnetic Field Shielding Fabrics », 2021). Elles ont été étudiées pour des applications RF [122]. Ce type d'interconnexion fournit une résistance de feuille de $1,8 \Omega/\square$ pour le crochet et de $1,4 \Omega/\square$ pour la boucle, ce qui aboutit à une résistance de contact attendue de $0,8 \Omega$ pour une connexion de 1 pouce de large. Les connecteurs souples pour les usages RF ont été exploités à des fréquences micro-ondes basses. Afin d'étendre la gamme de fréquences de ces connecteurs, une conductivité plus élevée est nécessaire, ce qui peut être envisagé grâce à la galvanoplastie du connecteur à boucle et crochet. Toutefois, ce procédé rigidifie le connecteur, qui peut ne plus convenir aux applications flexibles.

Une autre interconnexion modulaire disponible dans la littérature concerne l'emploi d'aimants au néodyme comme liaison mécanique et électrique [117]. Les aimants peuvent

Processus	Résistance de contact (Ω)	Largeur du contact (mm)	Références
Mousqueton	0,05	5-8	[8]
Crochet et boucle	0,8	3,5	[122]
Aimants	0,3-0,8	5	[117]
Broderie	,395	2	[75]; [76]

TABLE 2.5 – Procédés utilisés pour obtenir des pistes conductrices sur les textiles

être intégrés à la fois sur les circuits souples et sur les tenues pour assurer le lien mécanique entre eux. Les matériaux magnétiques présentant une conductivité élevée, ils peuvent également être utilisés en temps que contacts électriques [121]. Des aimants peuvent être connectés à l'aide d'une pâte conductrice sur un textile conducteur. Les résultats obtenus pour une aire de contact de 8 mm^2 pointent une basse résistance de contact (de 1,9 à 3,7 Ω) avec un aimant revêtu de nickel. Les aimants recouverts d'or comportent des résistances plus faibles (de 0,3 à 0,8 Ω) dans les mêmes conditions. Des tests mécaniques ont été effectués sur les joints adhésifs, montrant une force maximale supportable entre 24 et 35 N pour une surface de contact de 8 mm^2 . Un autre point souligné par les auteurs traite de la capacité d'auto-alignement des aimants. Ainsi, l'utilisation d'aimants comme interconnexions autoriserait cet autoalignement des circuits.

De même, à l'image des circuits imprimés rigides portables (PCB), tels que le LilyPad Arduino, qui ont été conçus pour être brodés sur du textile, la broderie peut également constituer une intégration (FPCB), comme le montre [74] et [78].

Différents procédés permettent l'ajout d'un FPCB sur un textile. Les principaux sont synthétisés et comparés dans le tableau 2.5. Bien que les boutons-pression soient deux fois plus étendus que les autres interconnexions, leur résistance de contact demeure inférieure d'un ordre de grandeur. Il est possible de s'attendre à une grande robustesse mécanique en raison de l'utilisation courante des boutons-pression dans les vêtements, bien que la fiabilité mécanique de ces derniers n'ait pas été étudiée en corrélation avec leur comportement électrique. Pour une intégration plus petite, il faut envisager de coudre/broder la carte à circuit imprimé sur le substrat textile, qui présente la plus faible largeur de contact. La résistance de contact obtenue avec la broderie devient supérieure à celle du bouton-pression, mais reste dans le même ordre de grandeur que les autres techniques.

Linz et ces collaborateurs étudièrent en détail le processus de broderie et caractérisèrent la connexion électrique [74] [78]. Ils proposèrent même un modèle théorique du contact brodé qui en résulte [75] [76]. Le fil conducteur, un polyamide recouvert d'argent - à savoir la ficelle Statex 117/17 produite par Shieldex, fut brodé avec des machines à broder semi-professionnelles (Bernina artista 200) et professionnelles (ZSK JCZ 01). La carte de circuit imprimé flexible se composait d'une feuille de polyamide de $50 \mu\text{m}$ structurée sur les deux faces avec $17 \mu\text{m}$ de cuivre, $5 \mu\text{m}$ de nickel, de l'or flash et $15 \mu\text{m}$ de réserve de soudure.

Dans cette section préliminaire, des méthodes qui autorisent l'intégration des circuits électroniques complets directement sur le textile de manière permanente ou temporaire ont été abordées. Cela permet de préserver la puissance de calcul élevée offerte par l'électronique et de conserver les procédés de fabrication conventionnels, qui sont fiables et efficaces à l'échelle industrielle.

Néanmoins, le substrat électronique, qu'il s'agisse d'un circuit imprimé rigide ou

souple, nuit à la portabilité du vêtement en réduisant sa respirabilité, sa drapabilité et même son esthétique. Il est donc nécessaire d'aller plus loin en intégrant directement les composants sur le substrat textile.

2.5.2.2 Intégration des composants

Briedis et ces collaborateurs tentèrent de broder les éléments malgré la précision limitée de ce procédé (pas le plus fin rapporté de $0,75\text{ mm}$ de diamètre d'aiguille à broder et 1 mm de décalage minimum de l'appareil à broder) [5]. Néanmoins, il faut noter que pour réaliser le circuit électronique complet qui inclut des constituants électroniques, leurs fils ont été passés manuellement dans le tissu puis pliés avant que le cycle de la machine ne reprenne.

Bien que l'intégration de composants montés en surface ne puisse pas être envisagée avec la broderie, une méthode d'insertion de dispositifs montés en surface (SMD) sur un substrat textile conducteur, basée sur l'impression 3D, a été proposée [42]. Un support de LED a été imprimé en 3D sur un substrat textile incorporant des fils conducteurs avec du PLA conducteur et non-conducteur pour assurer les raccordements mécaniques et électriques, respectivement. Une LED montée en surface a en second lieu été placée à l'intérieur du support.

Si un branchement amovible est nécessaire, une solution peut consister à utiliser un insert-connecteur tel que présenté dans [72]. Le trou circulaire du connecteur se réalise avec un fil conducteur formant un tube qui vient ensuite s'incorporer dans le PDMS.

Le collage s'envisage pour introduire directement l'ensemble du circuit sur le textile. En 2012, Vervust et ces collaborateurs inclurent un module électronique étirable encapsulé de bout en bout dans une fine couche de PDMS sérigraphiée sur du textile [141]. Cela peut aboutir à une rigidité locale, qui peut entraîner une gêne pour le porteur, mais une forte robustesse mécanique peut en découler. En outre, une bonne connexion électrique peut aussi être obtenue par collage conducteur, ce qui en fait une technique largement utilisée pour l'intégration de l'électronique dans le textile.

2.5.2.2.1 Collage de l'adhésif : l'adhésif conducteur

Les adhésifs conducteurs d'électricité (ECA) se composent de particules métalliques et d'un adhésif polymère (époxy), le métal étant généralement de l'argent [94]. La résistivité électrique de ces adhésifs est inférieure à $1\ \Omega\text{cm}$ [87]. Les propriétés physiques et mécaniques se définissent par la matrice polymère et les caractéristiques électriques sont fournies par les charges conductrices. En fonction de leur niveau de charge conductrice, les adhésifs se divisent en adhésifs conducteurs anisotropes (ACA, avec des charges conductrices d'un gabarit typique de $3\text{ à }5\text{ mm}$) et adhésifs conducteurs isotropes (ICA, avec des charges d'une taille de $1\text{ à }10\text{ mm}$). L'ACA a révélé des attributs électriques intéressants, différents dans chaque direction, dépendants de la pression et de la température appliquées pendant l'opération de liaison. Ainsi, les chemins conducteurs peuvent être spécifiquement conçus sans connecter électriquement d'autres composants. Un tel adhésif a été exploité dans un processus de flip-chip pour monter une puce sur un cadre de plomb

en Cu sur un tissu [17].

À l'échelle du circuit, l'ICA a été employé pour interconnecter une puce RFID sur une antenne brodée [15]. Aux dimensions des composants, l'ICA fut manipulé pour coller une résistance à puce SMD à des pistes sérigraphiées [63] ou une LED à un fil de cuivre nickelé [139]. Il convient également de signaler que des adhésifs conducteurs ont été utilisés pour relier mécaniquement et électriquement un FCB à deux couches textiles afin d'obtenir un FCB multicouche [123].

2.5.2.2.2 Collage de l'adhésif : l'adhésif non conducteur (NCA)

Alors que l'ACA et l'ICA demeurent des adhésifs chargés de particules conductrices pour réaliser le contact électrique, le NCA assure le contact de deux matériaux conducteurs en appliquant une force mécanique pour maintenir leur connexion. Un adhésif thermoplastique non conducteur à base de polyuréthane a été utilisé pour coller un module d'essai électronique à base de FR4 à un circuit en tissu structuré au laser et à un circuit brodé. Il a rapporté des résistances de contact moyennes de $16,5\text{ m}\Omega$ et $28,3\text{ m}\Omega$, respectivement [77]. Il convient de noter que cette méthode permet de mettre en contact des conducteurs isolés sans avoir à supprimer l'isolation dans une étape distincte.

Comme décrit par [47], la résistance de contact R_c diminue avec l'augmentation de la force de contact F_N et dépend du coefficient de dureté n :

$$R_c \sim \left(\frac{1}{F_N}\right)^n \quad (2.18)$$

La sélection de l'adhésif fit l'objet de discussions approfondies sur des considérations théoriques relatives à la dilatation thermique, au comportement de relaxation et à l'adhérence du matériau. Des tests de fiabilité détaillés, tel que des essais de cycles de température (JEDEC JESD22-A104-C), des analyses de cycles de lavage (ISO 6330) et des expérimentations d'humidité (JEDEC JESD22-A101-B) ont été réalisés [77] [76] [64]. Les conclusions montrèrent que le collage NCA reste une technologie sûre, sous les contraintes typiques des textiles, pour intégrer l'électronique dans les textiles. Choi et ces collaborateurs comparèrent les résistances de contact moyennes des joints flip-chip traités avec ACA et NCA sur un tissu textile robuste à la chaleur et récoltèrent des résultats similaires : $5,3 - 10,2\text{ m}\Omega$ et $5,5 - 10,1\text{ m}\Omega$, respectivement [17]. Ils étudièrent en particulier la durabilité du flip-chip NCA et déduisirent qu'une assez bonne fiabilité dans le test de haute température/humidité à $85^\circ\text{C}/85\%$ RH (Relative Humidity) peut être obtenue avec la liaison Cu/Sn [18]. Hirman et ces collaborateurs éprouvèrent également la fiabilité des joints entre des résistances CMS collées avec du NCA durcissable aux UV sur des fils de cuivre conducteurs recouverts d'argent. Ces joints furent jugés fiables après 30 cycles de lavage et de séchage [46].

2.5.2.2.3 Soudure

La soudure, qui consiste à faire fondre un métal d'apport entre deux fils métalliques, reste une méthode standard pour obtenir une connexion physique et électrique fiable dans l'électronique conventionnelle. Pour les textiles électroniques (e-textiles), les fils mé-

talliques du circuit intégré doivent être connectés directement aux pistes conductrices du textile. Buechley a été l'un des premiers à soumettre des joints de soudure sur un FCB [6] [7]. Néanmoins, le brasage sur tissu demeure plus délicat, car les textiles peuvent être abîmés par la chaleur nécessaire pour réaliser la fusion du métal. Hirman et ces collaborateurs rapportèrent de mauvais résultats avec le brasage manuel à l'aide d'une panne [46] et ont donc recouru à une pâte à braser étain-bismuth qui fond à 155°C . Des pâtes à braser à faible fusion (à 143°C [93] ou à 138°C [54]) ont été principalement utilisées pour éviter d'endommager le substrat textile. Pour améliorer la durabilité de l'interconnexion soudée, Koshi et ces collaborateurs proposèrent la perméation en profondeur d'une encre d'argent étirable à motifs [63]. La résistance mécanique de l'interconnexion fut soigneusement évaluée au cours d'essais de traction et de cisaillement. D'autres composants tels que des condensateurs, des inducteurs, des commutateurs à contact et un microprocesseur, avec un pas de broche de 1 mm , ont été soudés sur un tissu textile afin d'illustrer l'adéquation de cette méthode pour la fabrication de circuits complets.

De même, une nouvelle étude conclut que le brasage assure une connexion bonne et durable des éléments sur des fils de cuivre plaqués argent [45]. En effet, la résistance électrique était encore acceptable ($< 100\text{ m}\Omega$) après un vieillissement accéléré de 1000 h à 85°C et 85% d'humidité, ce qui reste beaucoup plus intense que les conditions réelles. À la suite d'un test de culbutage sévère, des dysfonctionnements des interconnexions soudées furent signalées pour 215 joints sur 800 [93]. La plupart d'entre elles se situaient entre le joint de soudure et la pastille LED ou la trace de fil. Seulement 5 sur 215 correspondaient à des anomalies à l'intérieur des joints de soudure.

Afin d'éviter la rupture des joints de soudure et de préserver la conductivité des pistes électriques textiles, des matériaux de protection furent envisagés [92]. Certains d'entre eux se révélèrent vraiment efficaces puisqu'un taux de défaillance de 0% dans le meilleur des cas et une augmentation maximale de $0,38\ \Omega/m$ de la résistance des traces ont été signalés pour les joints de soudure des composants après 1000 min de lavage.

Pour diminuer la fragilité des interconnexions, le brasage ultrasonique, qui nécessite une soudure sans flux, fut étudié [90]. En effet, l'absence de flux limite l'absorption de la soudure. Par conséquent, la pénétration de la brasure dans le substrat textile reste réduite, ce qui permet d'obtenir des joints plus souples. Les paramètres de brasage tels que la nature et la quantité de l'alliage de brasage, la température, la durée et la puissance du brasage sont discutés.

Pour les zones difficiles à atteindre, le soudage au laser à fibre dopée à l'ytterbium (1064 nm) a été suggéré [91]. Cette méthode sans contact évite d'endommager le substrat textile environnant en raison d'un temps de traitement court et d'une faible contrainte mécanique. En outre, elle permet d'utiliser des fils conducteurs isolés pour le circuit puisque la bande protectrice des fils peut être dénudée avec le laser.

Il convient de noter que le collage de fils a également été proposé lorsque le décalage de pas entre les pastilles du circuit intégré et les fils nécessite un interposeur entre la puce et le tissu [86]. Le processus fut documenté par Seulki Lee et ces collaborateurs [123].

2.5.2.2.4 Comparaison des méthodes

Des aperçus des technologies d'assemblage existantes dans les domaines de l'électronique et du textile peuvent être consultés dans d'autres articles [81] et [87]. En termes de

résistance électrique, des études relatent que la résistance électrique demeure plus faible pour les résistances à puce soudées [91] [46] que pour les résistances collées. La comparaison des valeurs rapportées pour la colle (tableau 2.6) et la brasure (tableau 2.7) permet de souligner que les deux résistances de contact restent du même ordre de grandeur. En termes de propriétés électriques, la soudure et la colle représentent des candidats prometteurs dont l'application peut dépendre de la tolérance à la température du substrat.

Les colles correspondent plus au travail sur substrat sensible à la chaleur, comme le textile, car certaines d'entre elles peuvent être employées et durcies à température ambiante, ce qui évite d'endommager le textile. D'une manière plus globale, les colles peuvent se traiter à une température $\leq 200^{\circ}\text{C}$, tandis que les soudures requièrent généralement une température supérieure à 200°C . Les alliages SnBi, qui présentent une température de soudure de 138°C , constituent une exception. Il convient également de garder à l'esprit que les alliages d'étain ne permettent pas de souder tous les métaux, alors que les colles restent efficaces sur la plupart des surfaces solides.

La résistance mécanique des joints réalisés avec des adhésifs conducteurs demeure relativement faible en raison de la fraction massique élevée des particules conductrices dans le système adhésif. Ces particules affaiblissent généralement l'adhésif [119]. Des essais de traction par cyclage sur des composants collés ou soudés sur du textile montrent que les changements de résistance sont de 3,0 à 4,2 fois plus faibles pour les échantillons soudés [63]. Dans cette expérience particulière, les composants furent reliés à des lignes d'argent sérigraphiées sur le textile. Il convient de noter que la pénétration profonde de l'encre dans le textile garantit une plus grande durabilité du contact électrique [63]. Seuls Tao et ces collaborateurs firent état d'une meilleure lavabilité pour les composants collés que pour les composants soudés [139]. Des LED SMD ont été interconnectées à un fil de cuivre nickelé. Dans ce cas particulier, le joint de soudure est fragile pour le nickel, ce qui se traduit par une interconnexion par soudure moins fiable que l'interconnexion par collage.

Les différentes avancées présentées dans ce chapitre apportent des éléments de réponses aux verrous technologiques. De multiples pistes sont fournies concernant le choix des matières à employer pour la conception des T-TENG. La meilleure combinaison entre les matériaux « donneurs » et les matériaux « arracheurs » d'électrons semble être le couple PTFE Polyamide 6.6. Il incombe cependant à SOFILA de continuer les investigations qui rendront possible la réalisation d'un tribogénérateur efficace et industrialisable à grande échelle. Un nombre conséquent de technologies qui se rapporte à la création de circuits sur substrat souple existe. La plus adaptée d'entre elles reste la sérigraphie qui permet une très bonne résolution des pistes avec la résistance électrique la plus faible et une robustesse satisfaisante. De plus, des études sur des batteries flexibles sont actuellement effectuées au sein du FEL, dans le but de fournir une méthode de stockage d'énergie imperceptible par l'utilisateur. Plusieurs types de circuits de transferts de puissance ont été exposés et il convient de vérifier par la mesure quelle architecture proposerait une transmission optimale lorsqu'un T-TENG convertit des mouvements humains en énergie électrique. Les différents procédés de modélisations autorisent une visualisation pertinente du comportement des TENG. Cependant, ces dernières utilisent une représentation par couche avec des charges surfaciques. Le chapitre qui suit soumet donc une amélioration de cette modélisation avec notamment, une approche qui se base sur une résolution complète des équations de Maxwell et l'emploi de charges volumiques.

Type d'adhésif	Pistes conductrices	Composants	Processus de durcissement	Résistance de contact ($m\Omega$)	Références
ICA	Encre argentée extensible sérigraphiée	Résistances à puce (0 Ω)	Température ambiante pendant 1 h	610-1140	[62]
Argent conducteur ICA	Fil de cuivre nickelé	LED	—	—	[139]
ACA	Cu Plomb	Puce Si	Collage d'une puce par maintien à 160°C et 100 MPa pendant 1 min	5, 3-10, 2	[17]
ANC	Cu Plomb	Puce Si	Collage d'une puce par maintien à 160°C et 100 MPa pendant 1 min	5, 5-10, 1	[17]
ANC	Cu Plomb	Puce Si	Collage d'une puce par maintien à 160°C et 100 MPa pendant 1 min	5, 4-10, 8	[18]
Film TPU NCA	Tissu conducteur et fil conducteur brodé (fibres métallisées avec du nano-argent)	Module de test	195°C pendant 30 s Pression : 0, 7 N/mm ²	Résistance pour le cheminet les joints : 23 Ω pour les circuits en tissu 9 Ω pour les circuits brodés	[77]
ANC	Fil à coudre en cuivre argenté	Résistances à puce (0 Ω)	Lumière UV + pression mécanique 200°C	30	[46]
ANC	Fils de Litz avec âme en aramide (LWAC) avec revêtement argenté	Micro PCB avec 4 LED et IC driving	Pression : 1, 9-3, 1 N/mm ² selon la structure du tissu	< 2 pour les LWAC isolés et non isolés et 1-25 pour le fil d'argent	[64]

TABLE 2.6 – Synthèse des méthodes utilisées pour coller des composants électroniques sur des pistes conductrices en textile

Pâte à braser	Piste conductrice	Composants	Procédé de soudure	Résistance de contact ($m\Omega$)	Références
Sn Pb _{0.630.37} (1 mg)	Encre argentée extensible sérigraphiée	Résistances à puce (0 Ω)	Fer à 250-300°C	490-1050	[62]
ChipQuick	Fil conducteur argenté brodé	LED	Air chaud à 143°C	—	[93]
S _{70.63} P _{30.37} S _{70.42} B _{10.58}	Fil à coudre en cuivre argenté	Résistances à puce (0 Ω)	Air chaud à 155°C	20	[45]
Loctite GC10	Fil de cuivre nickelé	LED	Air chaud à 230°C	—	[139]
S _{70.965} A _{90.03} C _{40.005}	Polyamide argenté	Interposeur	Air chaud à 138°C	—	[54]
S _{70.965} A _{90.03} C _{40.005} S _{70.955} A _{90.038} C _{40.007}	Brins de cuivre isolés par laquage	Petit PCB	Laser	10	[91]
S _{70.42} B _{10.576} A _{90.004} S _{70.4347} B _{10.5585} A _{90.0068}	(Pâtes à souder sans flux)	Petit PCB	Ultrasons à 350-390°C	6-8	[90]
S _{70.955} A _{90.038} C _{40.007} S _{70.997} C _{40.003} S _{70.97} A _{90.03}	Brin de cuivre argenté	Petit PCB			

TABLE 2.7 – Méthodes utilisées pour souder des composants électroniques sur des pistes conductrices en textile

Chapitre 3

Modélisation du TENG par l'approche Maxwell

L'étude réalisée ici vise à comprendre, de façon théorique, le fonctionnement des TENG en mode vertical avec un traitement mathématique différent de celui déjà proposé dans [127]. Afin de simplifier les équations, les auteurs firent de nombreuses suppositions et se placèrent dans des conditions assez particulières. En effet, la plupart des formules avancées montrent une approche en 2D via l'emploi de charges surfaciques et permettent de visualiser les variables uniquement en une position bien précise (à la localisation $P(0, 0, 0)$).

La nouvelle modélisation suggérée conserve la représentation de couches de charges introduite dans les études antérieures, mais considère des charges volumiques et autorise le calcul des paramètres du composant en tout point de l'espace. L'objectif consiste donc à vérifier si les formules proposées dans les publications, plus anciennes, dépeignent fidèlement le comportement des TENG et si la complexité d'une approche 3D apporte plus de précision. Il convient alors pour cela de s'intéresser aux équations de Maxwell qui décrivent de manière rigoureuse l'évolution du champ électromagnétique généré par des charges électriques.

3.1 L'approche de Maxwell comme solution à la modélisation 3D du TENG

Les équations de Maxwell correspondent à un ensemble de formules aux dérivées partielles couplées qui, avec la loi de la force de Lorentz, constituent le fondement de l'électromagnétisme classique, de l'optique standard et des circuits électriques. Ces équations composent un modèle mathématique pour les technologies électriques, optiques et radio, telles que la production d'énergie, les moteurs électriques, la communication sans fil, les lentilles, les radars, etc. Elles décrivent comment les charges génèrent les champs électriques et magnétiques, les courants, mais aussi, comment ces derniers varient.

3.1.1 Champ électrique

Lorsqu'une charge q_2 se déplace en empruntant une direction arbitraire, dans un milieu de permittivité relative ε_r , le champ électrique $\vec{E}_{(x,y,z)}$ diffusé par celle-ci en un point p_1

se traduit par :

$$\vec{E}_{(x_1, y_1, z_1)} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{\vec{e}_r'}{r'^2} + \frac{r'}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{e}_r'}{r'^2} \right) + \frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} (\vec{e}_r') \right) \quad (3.1)$$

Avec \vec{e}_r' le vecteur unité retardé et r' la distance retardée entre la charge q_2 et le point (1) :

$$r' = \sqrt{(x_1 - x_2')^2 + (y_1 - y_2')^2 + (z_1 - z_2')^2} \quad (3.2)$$

et

$$\vec{e}_r' = \frac{(x_1 - x_2') + (y_1 - y_2') + (z_1 - z_2')}{\sqrt{(x_1 - x_2')^2 + (y_1 - y_2')^2 + (z_1 - z_2')^2}} \quad (3.3)$$

Cela signifie que le champ électrique au point p_1 généré par une charge mobile se trouvant en position p_2 à un temps t doit être calculé via la position de la charge au point p_2' à un temps $t - \frac{r'}{c}$.

Dans le cas étudié ici, la distance entre les charges p_1 et p_2 est considérée très faible. La vitesse de propagation d'une onde électromagnétique se définit par $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}}$. Cette dernière est très rapide (équivalente à la celle de la lumière). Donc si la vitesse de déplacement des charges dans le milieu est très inférieure à c alors il est possible d'estimer que, $\frac{r'}{c} \approx 0$ et que $\frac{1}{c^2} \frac{d^2}{dt^2} (\vec{e}_r') \approx 0$. Par conséquent, dans ces conditions, le champ $\vec{E}_{(x_1, y_1, z_1)}$ devient :

$$\vec{E}_{(x_1, y_1, z_1)} = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \left(\frac{\vec{e}_r}{r^2} \right) \quad (3.4)$$

Avec \vec{e}_r le vecteur unité instantané et r la distance instantanée entre la charge q_2 et le point p_1 ,

$$\vec{e}_r = \frac{(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) + (z_1 - z_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \quad (3.5)$$

et

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (3.6)$$

L'équation ainsi obtenue, renvoie au cas de l'électrostatique qui correspond à l'étude de phénomènes engendrés par des charges électriques statiques pour l'observateur (par rapport à p_1). Ici l'étude porte sur des charges volumiques $\rho(t)$ et non pas sur une charge ponctuelle q . Ce qui donne finalement,

$$\begin{aligned} \vec{E}_{(x_1, y_1, z_1)} &= \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{\vec{e}_r}{r^2} dV_2 \\ &= \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{(x_1 - x_2) + (y_1 - y_2) + (z_1 - z_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ces dernières seront considérées continues suivant les axes x , y et z . Il convient alors de chercher la primitive de l'équation ci-dessus pour formuler les composantes du champ électrique et créer au point p_1 . Puis, une fois la primitive résolue, la modélisation du champ, s'exprimera à travers l'intégrale qui en découle.

Pour déterminer la valeur du champ selon x ,

$$E_{x(x_1, y_1, z_1, t)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{(x_1 - x_2)}{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.8)$$

il importe de trouver tout d'abord la primitive volumique de l'équation suivante en fonction de x_2 , y_2 et z_2

$$Px_{(x_2, y_2, z_2)} = \iiint \frac{(x_1 - x_2)}{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.9)$$

ce qui donne :

$$\begin{aligned} Px_{(x_2, y_2, z_2)} &= \iiint \frac{(x_1 - x_2)}{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \\ &= (y_1 - y_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + (z_1 - z_2) \right) - \\ &\quad (x_1 - x_2) \tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_2)(z_1 - z_2)}{(x_1 - x_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) + \\ &\quad (z_1 - z_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) - \\ &\quad (y_1 - y_2) \log \left(\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + (z_1 - z_2) \right) - \\ &\quad (z_1 - z_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_2)}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Puis il convient à présent d'effectuer un calcul d'intégrale. En supposant que les dimensions se rapportant à l'axe x du composant étudié sont comprises entre $a_m(t)$ et $a_p(t)$. Que celles suivant l'orientation y s'étendent de $b_m(t)$ et $b_p(t)$. Et enfin, que sur z elles correspondent à la différence entre les points $z_m(t)$ et $z_p(t)$, cela implique que :

$$Ix_{1(y_2, z_2)} = Px_{(a_p(t), y_2, z_2)} - Px_{(a_m(t), y_2, z_2)} \quad (3.11)$$

$$Ix_{2(z_2)} = Ix_{1(b_p(t), z_2)} - Ix_{1(b_m(t), z_2)} \quad (3.12)$$

$$Ix_{(x_1, y_1, z_1)} = Ix_{2(z_p(t),)} - Ix_{2(z_m(t))} \quad (3.13)$$

Donc la composante du champ électrique suivant x s'exprime en intégrant (3.13) dans (3.8) :

$$E_{x(x_1, y_1, z_1, t)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} Ix_{(x_1, y_1, z_1)} \quad (3.14)$$

Pour la valeur du champ suivant y ,

$$E_{y(x_1, y_1, z_1)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{(y_1 - y_2)}{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.15)$$

avec

$$Py_{(x_1, y_1, z_1)} = \iiint \frac{(y_1 - y_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.16)$$

Ce qui implique de résoudre :

$$\begin{aligned} Py_{(x_1, y_1, z_1)} &= \iiint \frac{(y_1 - y_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \\ &= (x_1 - x_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + (z_1 - z_2) \right) - \\ &\quad (y_1 - y_2) \tan^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) + \\ &\quad (z_1 - z_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) - \\ &\quad (x_1 - x_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + (z_1 - z_2) \right) - \\ &\quad (z_1 - z_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Via le calcul d'intégrale :

$$Iy_{1(y_2, z_2)} = Py_{(a_p(t), y_2, z_2)} - Py_{(a_m(t), y_2, z_2)} \quad (3.18)$$

$$Iy_{2(z_2)} = Iy_{1(b_p(t), z_2)} - Iy_{1(b_m(t), z_2)} \quad (3.19)$$

$$Iy_{(x_1, y_1, z_1)} = Iy_{2(z_p(t),)} - Iy_{2(z_m(t))} \quad (3.20)$$

En remplaçant (3.20) dans (3.15) :

$$Ey_{(x_1, y_1, z_1, t)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} Iy_{(x_1, y_1, z_1)} \quad (3.21)$$

Et enfin, pour déterminer la valeur du champ suivant z :

$$Ez_{(x_1, y_1, z_1)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{(z_1 - z_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.22)$$

Il faut poser

$$Pz_{(x_1, y_1, z_1)} = \iiint \frac{(z_1 - z_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \quad (3.23)$$

Puis trouver sa primitive :

$$\begin{aligned}
 Pz_{(x_1, y_1, z_1)} &= \iiint \frac{(z_1 - z_2)}{\left((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right)^{\frac{3}{2}}} dV_2 \\
 &= (x_1 - x_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + (y_1 - y_2) \right) - \\
 &\quad (z_1 - z_2) \tan^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{(z_1 - z_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) + \\
 &\quad (y_1 - y_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) - \\
 &\quad (x_1 - x_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} + (y_1 - y_2) \right) - \\
 &\quad (y_1 - y_2) \tanh^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} \right) \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

La valeur de l'intégrale se trouve en effectuant les équations ci-dessous :

$$Iz_{1(y_2, z_2)} = Pz_{(a_p(t), y_2, z_2)} - Pz_{(a_m(t), y_2, z_2)} \quad (3.25)$$

$$Iz_{2(z_2)} = Iz_{1(b_p(t), z_2)} - Iz_{1(b_m(t), z_2)} \quad (3.26)$$

$$Iz_{(x_1, y_1, z_1)} = Iz_{2(z_p(t),)} - Iz_{2(z_m(t))} \quad (3.27)$$

Finalement, en imbriquant (3.27) dans (3.22) :

$$Ez_{(x_1, y_1, z_1, t)} = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} Iz_{(x_1, y_1, z_1)} \quad (3.28)$$

Il est maintenant possible de déterminer la valeur de chaque composante du champ électrique en n'importe quel point de l'espace, et cela, pour n'importe quelle répartition des charges $\rho(t)$ (tant que ces dernières sont continues suivant les axes x , y et z).

3.1.2 Potentiel

Deux volumes chargés de « signes opposés » engendrent une différence de potentiel qui peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\phi(x_1, y_1, z_1, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{\rho\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r} dV_2 \quad (3.29)$$

Cependant, ici aussi, si la vitesse de déplacement des charges est supposée très inférieure à la vitesse de la lumière, il est possible de poser $\frac{r}{c} \approx 0$ et donc

$$\phi(x_1, y_1, z_1, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{\rho(t)}{r} dV_2 \quad (3.30)$$

Ce qui donne :

$$\phi(x_1, y_1, z_1, t) = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \iiint \frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} dV_2 \quad (3.31)$$

Comme précédemment, il convient de trouver tout d'abord la primitive :

$$\begin{aligned} P(x_1, y_1, z_1) &= \iiint \frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} dV_2 \\ &= (y_1 - y_2)^2 \tan^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) - \\ &\quad (y_1 - y_2)(z_1 - z_2) \tanh^{-1} \left(\frac{x_1 - x_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) - \\ &\quad (x_1 - x_2) \left(2(y_1 - y_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + z_1 - z_2 \right) + \right. \\ &\quad \left. (z_1 - z_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + y_1 - y_2 \right) + \right. \\ &\quad \left. (x_1 - x_2) \left(-\tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_2)(z_1 - z_2)}{(x_1 - x_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \right) + \right. \\ &\quad \left. (x_1 - x_2) \tan^{-1} \left(\frac{z_1 - z_2}{x_1 - x_2} \right) \right) + \\ &\quad \frac{1}{2} \left(2(x_1 - x_2)(y_1 - y_2) \log \left(\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} + z_1 - z_2 \right) + \right. \\ &\quad \left. (x_1 - x_2)^2 \left(-\tan^{-1} \left(\frac{(y_1 - y_2)(z_1 - z_2)}{(x_1 - x_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \right) - \right. \\ &\quad \left. (y_1 - y_2)^2 \tan^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) + \right. \\ &\quad \left. (z_1 - z_2)^2 \tan^{-1} \left(\frac{(x_1 - x_2)(y_1 - y_2)}{(z_1 - z_2) \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} \right) \right) + \\ &\quad (x_1 - x_2)(z_1 - z_2) \quad (3.32) \end{aligned}$$

Avec les mêmes conditions géométriques que pour le calcul du champ, il devient possible d'écrire :

$$Ip_{1(y_2, z_2)} = P_{(a_p(t), y_2, z_2)} - P_{(a_m(t), y_2, z_2)} \quad (3.33)$$

$$Ip_{2(z_2)} = Ip_{1(b_p(t), z_2)} - Ip_{1(b_m(t), z_2)} \quad (3.34)$$

$$Ip_{(x_1, y_1, z_1)} = Ip_{2(z_p(t),)} - Ip_{2(z_m(t))} \quad (3.35)$$

Ce qui implique, lors du remplacement de (3.35) dans (3.31) que :

$$\phi(x_1, y_1, z_1, t) = \frac{\rho(t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} Ip_{(x_1, y_1, z_1)} \quad (3.36)$$

Il est alors possible, en utilisant l'équation ci-dessus, de déterminer le potentiel électrique en tout point.

3.2 Application des équations de champs et de potentiels

L'emploi des formules présentées dans le paragraphe précédent impose la manipulation de grands nombres. En effet, quand le composant vient prendre place dans un circuit (ici, il s'agira d'une simple résistance), la résolution de l'équation différentielle qui en découle implique l'apparition de termes exponentiels. Or ces derniers augmentent très rapidement et nécessitent donc l'usage d'un logiciel approprié afin de mener à bien les simulations.

3.2.1 La problématique des simulations numériques

Lors de cette étude, l'application MATLAB demeure le principal outil de modélisation du TENG. Bien qu'il s'agisse d'un « software » propriétaire, ce dernier propose de multiples avantages comme une configuration rapide pour le calcul et l'affichage, un code facile à comprendre et lisible, la possibilité d'inclure un programme en $C++$ et une librairie très riche. Cependant, les simulations réalisées durant ce projet conduisirent souvent aux seuils de l'informatique « grand public », tant au niveau logiciel que matériel. En effet, la première limitation est survenue lors de la détermination de résultats analytiques d'équations différentielles. La forme des solutions de ce type de formule comporte généralement un terme exponentiel. En effet, le composant étudié ici agit comme un condensateur variable $C_v(t)$ en série avec une source de tension $U_s(t)$. Ainsi, un circuit RC apparaît si une résistance relie l'anode à la cathode. Cela implique de résoudre analytiquement l'équation suivante :

$$U_s(t) = \frac{1}{C_v(t)}Q(t) + R\frac{dQ(t)}{dt} \quad (3.37)$$

Si à $t = 0$, $Q(0) = 0$ alors :

$$Q(t) = e^{\int_0^t -\frac{1}{R.C_v(x)}dx} \int_0^t \frac{e^{\int_0^x -\frac{1}{R.C_v(y)}dy} U_s(x)}{R} dx \quad (3.38)$$

Or si $\int_0^t -\frac{1}{R.C_v(x)}dx$ reste important, le nombre généré va augmenter très rapidement.

Les chiffres à virgule fixe demeurent bornés en informatique, car ils ne sont pas en mesure de représenter à la fois des valeurs très importantes ou très petites avec une taille mémoire raisonnable. Cette problématique peut se contourner grâce à la notation scientifique. Avec cette dernière, « le point binaire » se place de manière dynamique. Ainsi la conception d'une plage numérique très grande ou infime devient possible avec un espace de stockage moindre.

N'importe quel nombre binaire à virgule flottante s'écrit donc sous forme de notation scientifique de la forme $f.2^e$, où f est la fraction (ou mantisse), 2 est la base (binaire dans ce cas) et e est l'exposant de la base (figure 3.1). La base symbolise toujours un nombre positif, tandis que f et e peuvent être positifs ou négatifs.

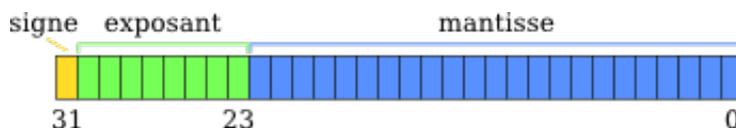


FIGURE 3.1 – Format de représentation des nombres flottants en simple précision

Presque tous les processeurs à virgule flottante et coprocesseur arithmétiques emploient la norme IEEE 754. Cette dernière spécifie plusieurs types de nombres à virgule flottante, parmi lesquels les « singles » et les « doubles » demeurent les plus largement utilisés. Chaque format contient les trois composants détaillés ci-dessus, un bit de signe, un champ de fraction et un exposant.

Cela permet d'écrire les nombres compris entre les limites exposées dans le tableau 3.1 ci-dessous :

Type de donnée	Limite basse	Limite haute	Précision
Single	$2^{-126} \approx 10^{-38}$	$2^{128} \approx 3.10^{38}$	$2^{-23} \approx 10^{-7}$
Double	$2^{-1022} \approx 2.10^{-308}$	$2^{1024} \approx 2.10^{308}$	$2^{-52} \approx 10^{-16}$

TABLE 3.1 – Limite haute, limite basse et précision pour la norme IEEE 754

De plus, la compression d'un nombre composé d'une infinité de chiffres réels dans une quantité finie de bits nécessite une représentation approximative. Bien qu'une myriade de nombres entiers existe, dans la plupart des programmes, le résultat des calculs ne peut se stocker que sur 32 bits. En revanche, compte tenu d'un nombre fixe de bits, la plupart des opérations effectuées avec des nombres réels produiront des quantités qui ne peuvent pas être incarnées exactement en utilisant ce nombre de bits. C'est pourquoi la réponse d'un calcul en virgule flottante doit souvent être arrondie afin de rentrer dans sa représentation finie.

Une méthode de calcul entre deux nombres à virgule flottante consiste à calculer, puis à arrondir au nombre à virgule flottante le plus proche. Cette méthode reste très coûteuse en termes de ressources si la taille des opérandes diffère grandement. La norme IEEE 745 comprend donc un protocole pour venir à bout de ce problème. Elle donne un algorithme pour l'addition, la soustraction, la multiplication, la division et la racine carrée, et exige que les implémentations produisent le même résultat que cet algorithme. Ainsi, lorsqu'un programme transite d'une machine à une autre, les résultats des opérations de base coïncideront si les deux appareils supportent la norme IEEE. Cela simplifie grandement le portage des applications. Cependant, des erreurs persistent, notamment lorsque les nombres sont très différents. Par exemple si :

$$x = 2.15 \times 10^{12} ; y_1 = 2.15 \times 10^{-6} ; y_2 = 2.14 \times 10^{-6}$$

$$z_1 = x + y_1 ; z_2 = x + y_2$$

Les résultats retournés dans ce cas correspondent à :

$$z_1 = 2.15 \times 10^{12} ; z_2 = 2.15 \times 10^{12}$$

$$z_1 - z_2 = 0$$

L'arrondi a complètement fait disparaître « les petites parties ». Il conviendra alors de faire attention lors de telles opérations.

3.2.2 Choix du mouvement

Dans les diverses études menées précédemment, la fluctuation de l'écart entre les couches d'isolants représente un paramètre important de la simulation comme le montre la figure 3.2. C'est grâce à celui-ci, qu'un champ électrique, et qu'une différence de potentiel variable, apparaissent aux bornes du TENG. Sans ce dernier, les charges statiques accumulées par le frottement sur l'anode et sur la cathode ne migreraient pas, sous l'effet du champ électromagnétique produit, à travers le circuit pour que le système retrouve son équilibre.

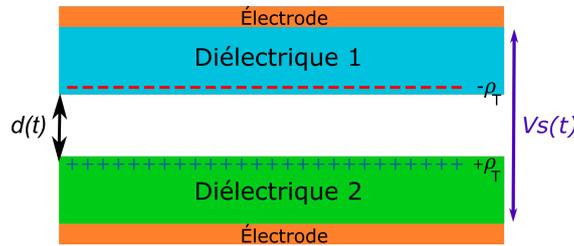


FIGURE 3.2 – Schéma simplifié du fonctionnement d'un TENG

Le choix d'une équation qui représentera au mieux le mouvement $d(t)$ susceptible d'y être appliqué plus tard revêt donc un aspect primordial. Or, le projet TIGER ambitionne de développer un textile triboélectrique pour la récupération d'énergie sur des gestes humains (pendant d'une activité physique). L'allure de la formule utilisée nécessite alors de concorder avec les déplacements effectués par les membres du corps sur lesquels se trouveront les TENG. Trois grands types de fonction semblent se rapprocher des mouvements humains :

— Fonction triangle,

$$\left\{ \begin{array}{l} d(t) = v \cdot t \text{ si } x \leq x_{max} \\ d(t) = 2 \cdot x_{max} - t \frac{x_{max}}{t_{cycles}} \text{ si } x_{max} < x \leq t_{cycles} \\ d(t) = 0 \text{ si } x > t_{cycles} \end{array} \right\} \quad (3.39)$$

— Fonction cosinus,

$$d(t) = x_{max} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi \cdot v \cdot t}{x_{max}} \right) \right) \quad (3.40)$$

— Fonction « impulsion »,

$$d(t) = \frac{1}{\sigma_{LN} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \frac{x_{max}}{v}}{x_{max}} \right)^2} \cdot \frac{x_{max}}{8,06} \quad (3.41)$$

Avec x_{max} la distance maximale entre les diélectriques (en m), v la vitesse du mouvement (en m/s) et $t_{cycles} = \frac{x_{max}}{v}$. Durant une course, l'éloignement entre les bras et le buste, où celui qui opère entre les jambes semble minime. Ainsi, si une petite séparation

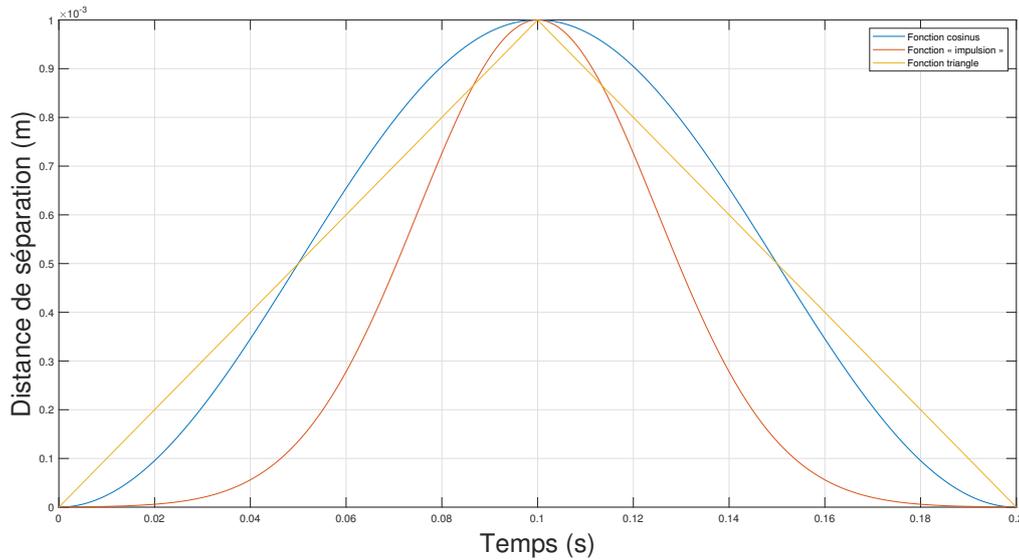


FIGURE 3.3 – Courbes des différentes fonctions de représentation du mouvement humain

intervient, de l'ordre de $x_{max} = 0,001\text{ m}$ et que la vitesse du mouvement reste assez faible $v = 0,1\text{ m/s}$, les formules (3.39), (3.40) et (3.41) donnent le résultat présenté en figure 3.3.

Comme le montre la figure 3.3, les fonctions triangle et cosinus produisent une pente « assez lente » comparativement à la l'équation impulsion qui fluctue de manière plus rapide. Pour une démarche plus pertinente, il conviendra probablement de privilégier les formules triangle et cosinus. Cependant, la fonction cosinus semble plus appropriée puisque la pente ne varie pas de façon brutale. Elle se rapproche plus d'un mouvement cyclique humain (espace entre les jambes lors de la course) et apparaît donc comme une solution appropriée (choisi également dans [101]).

3.2.3 Condensateur plan simple

Afin de valider les équations de champs et de potentiels, une simulation d'un condensateur plan semble appropriée. Cette première étape vise à déterminer si les formules adaptées aux charges volumiques, proposées plus haut, peuvent s'appliquer à une conception par couche et enrichir le modèle déjà exposé dans [101].

L'élément étudié, présenté en figure 3.4 comporte deux électrodes métalliques, d'épaisseur $d_m = z_{p0}$, de longueur b , de largeur a et de surface $S = a.b$, considérées comme des conducteurs parfaits. Entre ces extrémités se trouve un diélectrique de profondeur D_a et de permittivité $\varepsilon_2 = \varepsilon_0\varepsilon_{r2}$. Ici, le matériau isolant choisi remplit entièrement l'espace entre les bornes du composant et donc l'intervalle entre l'anode et la cathode $d = D_a$.

Une tension variable $U_c(t) = A \cos(2\pi ft)$ (avec $A = 10\text{ V}$ et $f = 5\text{ Hz}$) est appliquée à ces bornes et occasionne donc un champ électrique dont les composantes suivant x , y et z peuvent respectivement se définir par les équations (3.8), (3.15) et (3.22). Le cas d'étude présenté ici inclut dès lors quatre zones de charges considérées homogènes sur toute la surface et sur toute la profondeur. La première comporte des charges libres $\rho_V(t)$ supposées positives. Elle se trouve à une altitude comprise entre $-d_m$ et 0, et est créée par

la différence de potentiel imposée par le générateur externe. La seconde se rencontre entre 0 et z_{p0} et contient des charges de polarisation $\rho_T(t)$ négatives. Ces dernières apparaissent lorsqu'un champ électrique traverse un matériau isolant. Le volume qui va de $D_a - z_{p0}$ à D_a réunit également des charges de polarisation, mais positives. Enfin, les charges situées sur la cathode de D_a à $D_a + d_m$ correspondent aux charges libres, mais demeurent négatives.

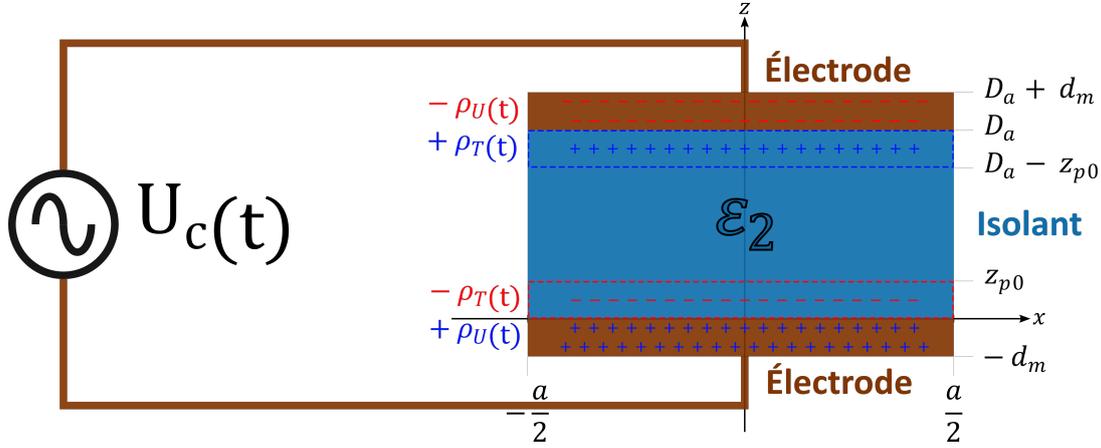


FIGURE 3.4 – Schéma d'un condensateur plan simple

Il convient à présent de quantifier l'évolution de $\rho_U(t)$ et $\rho_T(t)$ en fonction des variations de la tension imposée au composant. Les équations des Maxwell stipulent que :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_U(t) + \rho_T(t)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (3.42)$$

Avec $\vec{\nabla}$ qui représente l'opérateur divergence du champ électrique. Il reste maintenant à exprimer le champ $\vec{E}(t)$ grâce aux équations (3.14), (3.21) et (3.28). L'existence de quatre zones de charges implique l'apparition de quatre champs électriques distincts. Il faudra alors sommer ces derniers pour trouver le champ électrique total présent dans le composant. De plus, la comparaison entre les résultats obtenus ici avec ceux des autres équipes se fera en se plaçant aux points $P1_{(0,0,0)}$ et $P2_{(0,0,z1)}$. Donc si :

$$\vec{e}(\epsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) = \left(\begin{array}{c} E_x(0, 0, z_0) \\ E_y(0, 0, z_0) \\ E_z(0, 0, z_0) \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \epsilon_r = \epsilon_2 \\ \rho(t) = \rho_U(t) \\ z_m(t) = -z_{p0} \\ z_p(t) = z_0 \end{array} \right) \quad (3.43)$$

et

$$\vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_1, z_1 + z_{p0}, z_0) = \left(\begin{array}{c} E_x(0, 0, z_0) \\ E_y(0, 0, z_0) \\ E_z(0, 0, z_0) \end{array} \middle| \begin{array}{c} \varepsilon_r = \varepsilon_2 \\ \rho(t) = -\rho_U(t) \\ z_m(t) = z_1 \\ z_p(t) = z_1 + z_{p0} \end{array} \right) \quad (3.44)$$

alors

$$\vec{E}_0(t) = \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_1, z_1 + z_{p0}, z_0) \quad (3.45)$$

En appliquant la même procédure pour les équations du champ électrique aux autres zones qui contiennent des charges :

$$\vec{E}_1(t) = \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1 - z_{p0}, z_1, z_0) \quad (3.46)$$

$$\vec{E}_2(t) = \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_1) + \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_1, z_1 + z_{p0}, z_1) \quad (3.47)$$

$$\vec{E}_3(t) = \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_1) + \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1 - z_{p0}, z_1, z_1) \quad (3.48)$$

Ainsi, le champ total présent dans le composant correspond à :

$$\vec{E} = \vec{E}_0(t) + \vec{E}_1(t) + \vec{E}_2(t) + \vec{E}_3(t) \quad (3.49)$$

Cependant, la formule (3.42) comporte deux inconnues ($\rho_U(t)$ et $\rho_T(t)$) et sa résolution nécessite l'utilisation d'un système avec au moins une deuxième équation. Ce second terme correspond ici à la formule qui permet le calcul de la différence de potentiel :

$$U_c(t) = \phi_0(t) - \phi_1(t) \quad (3.50)$$

Les quatre zones où les charges demeurent localisées doivent également être prises en compte pour le calcul du potentiel $U_c(t)$. $P1_{(0,0,0)}$ et $P2_{(0,0,z_1)}$ représentent les deux points pour lesquels la différence de potentiel est évaluée. Donc l'emploi de l'équation (3.36) donne :

$$\vartheta(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) = \phi(0, 0, z_0, t) \middle| \begin{array}{c} \varepsilon_r = \varepsilon_2 \\ \rho(t) = \rho_U(t) \\ z_m(t) = -z_{p0} \\ z_p(t) = z_0 \end{array} \quad (3.51)$$

Puis en appliquant la même procédure pour les autres zones, il devient possible de poser $\phi_0(t)$ et $\phi_1(t)$:

$$\begin{aligned} \phi_0(t) = & \vartheta(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_0) + \\ & \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1 - z_{p0}, z_1, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_1, z_1 + z_{p0}, z_0) \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \phi_1(t) = & \vartheta(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_1) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_1) + \\ & \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1 - z_{p0}, z_1, z_1) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_1, z_1 + z_{p0}, z_1) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Ainsi, la résolution de l'équation (3.50) apporte une solution qui permet d'exprimer $\rho_U(t)$ et $\rho_T(t)$ ce qui autorise la visualisation des paramètres électriques du dispositif. Pour s'assurer de la validité du modèle, une comparaison entre les résultats obtenus et les données produites par les formules « classiques » s'impose. Le procédé de confrontation consiste à déterminer la valeur de la capacité retournée via l'utilisation de l'approche par couche en posant :

$$\frac{\rho_U(t)}{\phi_1 - \phi_2} S \cdot z_{p0} = C \quad (3.54)$$

Avec celle indiquée par la méthode traditionnelle :

$$\frac{S}{D_a} \varepsilon_0 \varepsilon_r = C \quad (3.55)$$

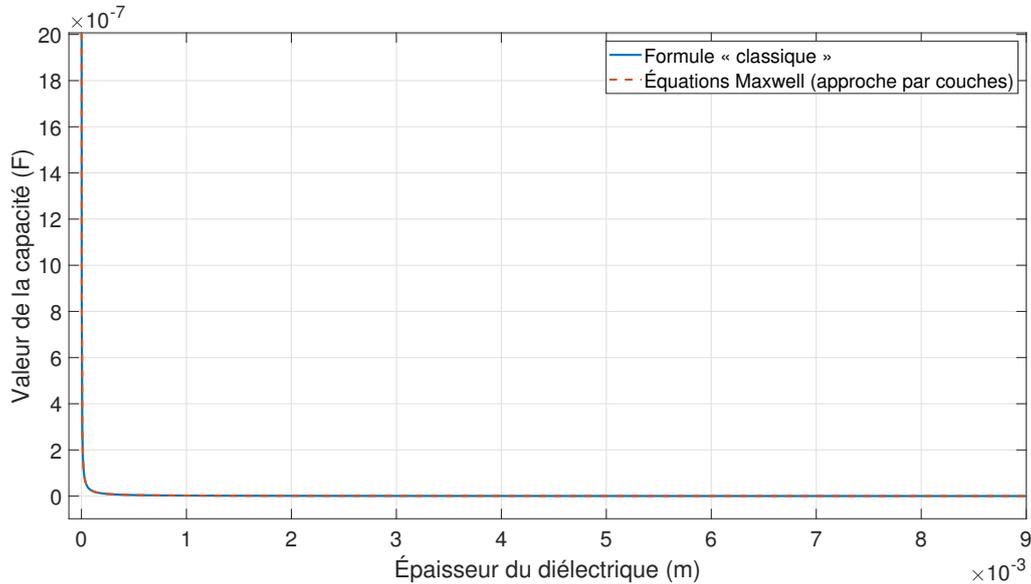


FIGURE 3.5 – Comparaison des valeurs de capacité d'un condensateur plan pour différentes épaisseurs d'isolant

Cette courbe représente donc l'évolution des valeurs de capacité pour différentes hauteurs de diélectrique (choisies arbitrairement) D_a allant de 1.25×10^{-6} à $7.70 \times 10^{-3} m$, une surface fixe $S = 7.70 \times 10^{-2} m^2$, un matériau isolant d'une permittivité relative $\varepsilon_{r2} = 3.4$

(PTFE), une épaisseur de couche de charge $z_{p0} = 2 \times 10^{-9} \text{ m}$ et en se plaçant au point $P1_{(0,0,0)}$ et $P2_{(0,0,z1)}$

La figure 3.5 montre que les valeurs retournées par les deux formules coïncident parfaitement avec le coefficient de détermination $R^2 = 1$ (représentant le fit du modèle). Par conséquent, l'usage de l'approche par couche, conjugué aux équations de Maxwell 3D, semble approuvé. La validation du modèle autorise à présent l'affichage des caractéristiques du composant.

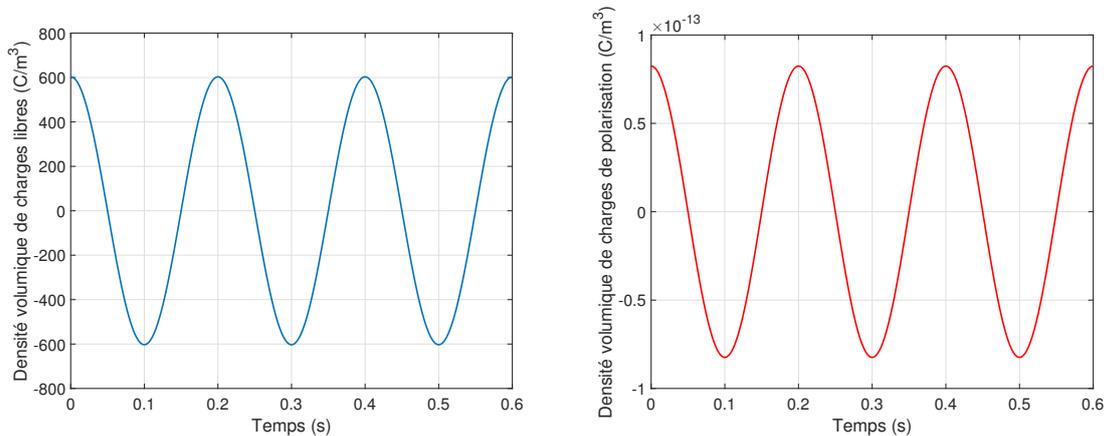


FIGURE 3.6 – a. Variation des charges $\rho_U(t)$ (gauche); b. Variation des charges $\rho_T(t)$ (droite)

Si $D_a = 2,50 \times 10^{-4} \text{ m}$ alors les charges libres évoluent de la même manière que la tension (figure 3.6a) et sont beaucoup plus nombreuses que celles engendrées par la polarisation du diélectrique comme en témoigne la figure 3.6b.

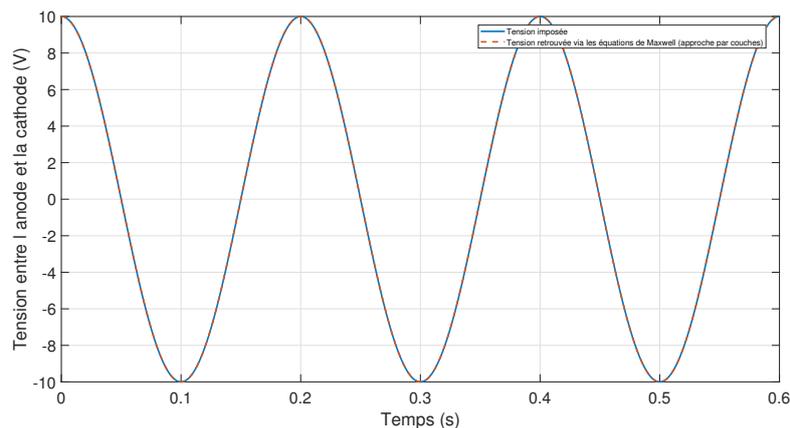


FIGURE 3.7 – Comparaison entre la tension appliquée au composant et celle retrouvée avec les équations de Maxwell

De plus, la valeur de la tension retrouvée grâce à l'emploi de $\phi_1 - \phi_1$ colle parfaitement à la tension $U_c(t)$ présentée en figure 3.7. Les équations concordent donc et leur application dans des architectures plus complexes s'avère possible.

3.2.4 Condensateur plan à couches

Avant de chercher à déterminer les formules qui permettent une caractérisation théorique des TENG, l'approche 3D par couche doit encore démontrer son efficacité sur un élément plus complexe. Cette partie se consacre donc à l'étude d'un condensateur plan composé de plusieurs strates.

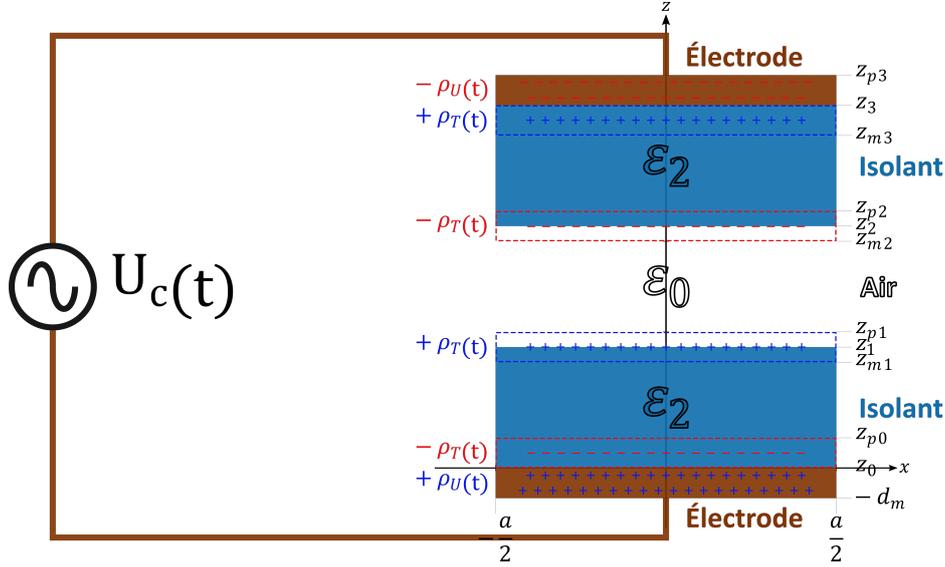


FIGURE 3.8 – Schéma d'un condensateur plan double

Ce dernier, représenté en figure 3.8, comporte une anode et une cathode, d'épaisseur d_m , de longueur b , de largeur a et de superficie $S = a.b$, considérées ici aussi comme des conducteurs parfaits. Les bornes du dispositif sont séparées par deux couches d'isolants distincts de surface identique, de profondeur D_a et D_b et de permittivité $\epsilon_0 \epsilon_{r2} = \epsilon_2$. Une faible strate d'air (ou de vide) réside entre les isolants E_{sp} . Le volume occupé par les charges ne change pas de celui résumé plus haut (supposé constant sur toute l'étendue des matériaux et d'une épaisseur $d_m = z_{p0}$).

Comme pour la simulation précédente, un générateur externe impose une tension U_c au dispositif et engendre des charges libres $\rho_U(t)$ et $-\rho_U(t)$ aux altitudes comprises entre $-z_{p0}$ et z_0 ainsi qu'entre z_3 et $z_{p3} = z_3 + z_{p0}$. Les différences apparaissent ici au niveau des charges de polarisation. L'arrivée d'un espace entre les diélectriques implique une nouvelle répartition de ces dernières. Donc, de z_0 à z_{p0} et de $z_{m3} = z_3 - z_{p0}$ à z_3 se trouvent les charges de polarisation $\rho_T(t)$ et $-\rho_T(t)$ qui surgissent dans les isolants. À l'interstice qui intervient au niveau des diélectriques, les charges vont se répartir autour de la limite entre le matériau et le vide de manière à se situer entre $z_{m1} = z_1 - \frac{z_{p0}}{2}$ et $z_{p1} = z_1 + \frac{z_{p0}}{2}$ ainsi que entre $z_{m2} = z_2 - \frac{z_{p0}}{2}$ et $z_{p2} = z_2 + \frac{z_{p0}}{2}$.

Une fois la position des charges identifiée, il convient de déterminer le comportement de $\rho_U(t)$ et $\rho_T(t)$ en fonction des variations de la tension imposée au composant. Les équations des Maxwell stipulent que :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} (\epsilon_0 - \epsilon_2) = -\rho_T(t) \quad (3.56)$$

, avec \vec{E} qui représente la somme des champs électrique engendré sur chaque couche et par toutes les charges présentes sur le composant et $\vec{\nabla}$ la divergence du champ. Le com-

posant étudié dispose de six zones contenant des charges, donc en appliquant la méthode utilisée pour le condensateur classique, il est possible de poser :

$$\vec{E}_a(z_0, \varepsilon_2, t) = \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_3, z_{p3}, z_0) \quad (3.57)$$

$$\vec{E}_b(z_0, \varepsilon_2, t) = \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_{m1}, z_1, z_0) \quad (3.58)$$

$$\vec{E}_c(z_0, \varepsilon_2, t) = \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1, z_{p1}, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_{m2}, z_2, z_0) \quad (3.59)$$

$$\vec{E}_d(z_0, \varepsilon_2, t) = \vec{e}(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_2, z_{p2}, z_0) + \vec{e}(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_{m3}, z_3, z_0) \quad (3.60)$$

Ce qui permet alors d'exprimer le champ au point z_0 .

$$\vec{E}_0(t) = \vec{E}_a(z_0, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_b(z_0, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_c(z_0, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_d(z_0, \varepsilon_2, t) \quad (3.61)$$

Il convient ensuite de répéter la même procédure pour toutes les autres zones de charges :

$$\vec{E}_1(t) = \vec{E}_a(z_1, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_b(z_1, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_c(z_1, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_d(z_1, \varepsilon_2, t) \quad (3.62)$$

$$\vec{E}_2(t) = \vec{E}_a(z_1, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_b(z_1, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_c(z_1, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_d(z_1, \varepsilon_0, t) \quad (3.63)$$

$$\vec{E}_3(t) = \vec{E}_a(z_2, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_b(z_2, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_c(z_2, \varepsilon_0, t) + \vec{E}_d(z_2, \varepsilon_0, t) \quad (3.64)$$

$$\vec{E}_4(t) = \vec{E}_a(z_2, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_b(z_2, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_c(z_2, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_d(z_2, \varepsilon_2, t) \quad (3.65)$$

$$\vec{E}_5(t) = \vec{E}_a(z_3, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_b(z_3, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_c(z_3, \varepsilon_2, t) + \vec{E}_d(z_3, \varepsilon_2, t) \quad (3.66)$$

Maintenant que tous les champs sont connus, il ne reste plus qu'à les additionner pour obtenir l'équation du champ global :

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0(t) + \vec{E}_1(t) + \vec{E}_2(t) + \vec{E}_3(t) + \vec{E}_4(t) + \vec{E}_5(t) \quad (3.67)$$

La formule (3.56) comporte toujours deux inconnues ($\rho_U(t)$ et $\rho_T(t)$) et sa résolution nécessite à nouveau l'utilisation d'un système avec au moins une deuxième équation. Ce second terme correspond à la formule qui permet le calcul de la différence de potentiel :

$$U_c(t) = \phi_0(t) - \phi_5(t) + \phi_1(t) - \phi_4(t) + \phi_2(t) - \phi_3(t) \quad (3.68)$$

Les zones où les charges demeurent localisées doivent également être prises en compte pour le calcul du potentiel $U_c(t)$. $P1_{(0,0,0)}$ et $P2_{(0,0,z_1)}$ représentent les deux points pour lesquels la différence de potentiel est évaluée donc au niveau de z_0 :

$$\phi_a(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_3, z_{p3}, z_0) \quad (3.69)$$

$$\phi_b(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_0, z_{p0}, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_{m1}, z_1, z_0) \quad (3.70)$$

$$\phi_c(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_1, z_{p1}, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_{m2}, z_2, z_0) \quad (3.71)$$

$$\phi_d(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T(t), z_2, z_{p2}, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T(t), z_{m3}, z_3, z_0) \quad (3.72)$$

Ce qui implique que le potentiel, à cette altitude, soit donné par :

$$\phi_0(t) = \phi_a(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_0, \varepsilon_2, t) \quad (3.73)$$

Cependant, dans cette configuration, toutes les charges présentes comptent dans le calcul de la tension. Il devient donc nécessaire de déterminer le potentiel à chaque niveau :

$$\phi_1(t) = \phi_a(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_1, \varepsilon_2, t) \quad (3.74)$$

$$\phi_2(t) = \phi_a(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_b(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_c(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_d(z_1, \varepsilon_0, t) \quad (3.75)$$

$$\phi_3(t) = \phi_a(z_2, \varepsilon_0, t) + \phi_b(z_2, \varepsilon_0, t) + \phi_c(z_2, \varepsilon_0, t) + \phi_d(z_2, \varepsilon_0, t) \quad (3.76)$$

$$\phi_4(t) = \phi_a(z_2, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_2, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_2, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_2, \varepsilon_2, t) \quad (3.77)$$

$$\phi_5(t) = \phi_a(z_3, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_3, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_3, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_3, \varepsilon_2, t) \quad (3.78)$$

Si $D_a = D_b = 1.25 \times 10^{-4} \text{ m}$, $E_{sp} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $z_{p0} = 2 \times 10^{-9} \text{ m}$, $z_0 = 0 \text{ m}$, $z_1 = D_a$, $z_2 = z_1 + E_{sp}$, $z_3 = z_2 + D_b$ et avec $\varepsilon_2 = 3,4 \text{ F/m}$ alors la courbe des charges $\rho_U(t)$ présentée en figure 3.9a et celle des charges $\rho_T(t)$ montrée sur la figure 3.9b peuvent être tracées.

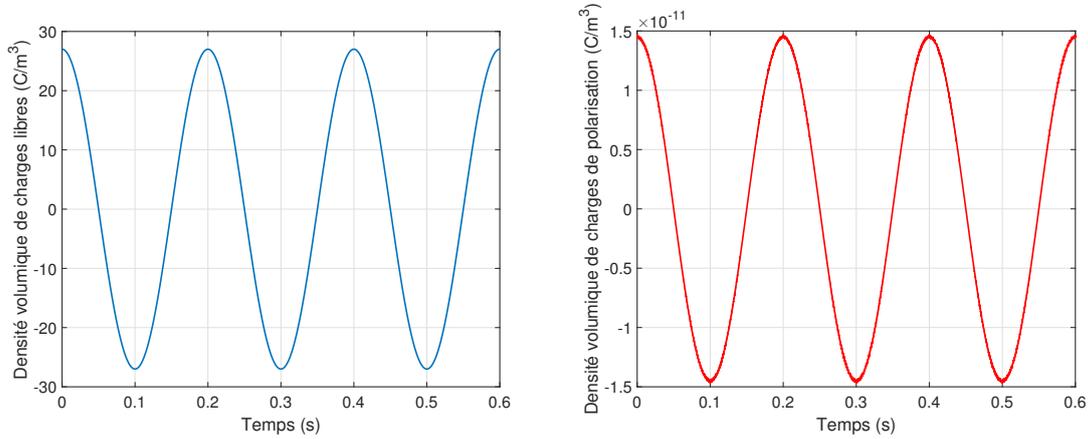


FIGURE 3.9 – a. Variation des charges $\rho_U(t)$ (gauche); b. Variation des charges $\rho_T(t)$ (droite)

Les charges libres évoluent ici aussi de la même manière que la tension (figure 2a) et sont beaucoup plus nombreuses que celles engendrées par la polarisation du diélectrique comme en témoigne la figure 2b. Le comportement du composant reste semblable à celui qui ne comporte qu'une couche de diélectrique. De plus, la valeur de la tension retrouvée grâce à l'emploi de (3.68) représente toujours parfaitement à la tension $U_c(t) = A \cos(2\pi ft)$ (avec $A = 10 \text{ V}$ et $f = 5 \text{ Hz}$) présentée en figure 3.10.

Les équations concordent donc et leur application à des systèmes légèrement différents s'avère possible. Ces dernières permettront alors de déterminer avec précision les différents paramètres du TENG.

3.2.5 Application au TENG

L'emploi des formules du champ électrique et du potentiel avec les charges volumiques a montré son efficacité avec des composants simples. Il convient maintenant d'appliquer ces

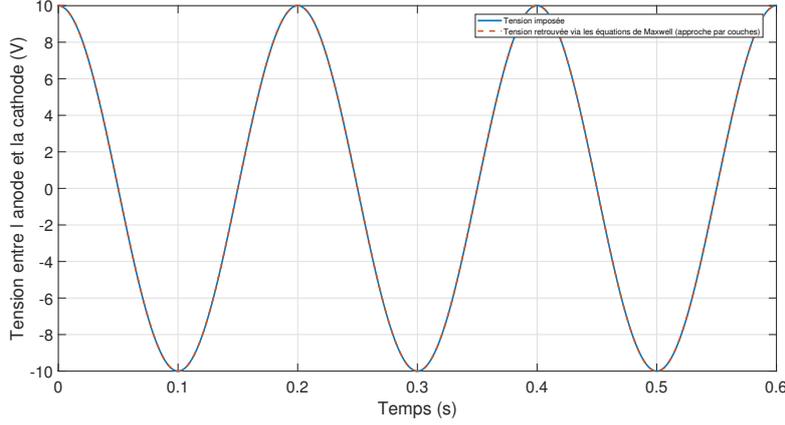


FIGURE 3.10 – Comparaison entre la tension appliquée au composant et celle retrouvée avec les équations de Maxwell

équations aux TENG et d'effectuer une comparaison entre les résultats obtenus dans [127] et ceux retournés lors de cette étude. L'architecture des TENG à films homogènes correspond à celle présentée plus haut (dans le condensateur double) et la figure 3.11 en détaille les éléments. L'anode et la cathode comportent une surface identique $S = a.b$ (avec la longueur $a = 11,30 \text{ cm}$ et la largeur $b = 7,05 \text{ cm}$) et sont composées d'un conducteur supposé parfait de profondeur $d_m = 0,2 \text{ }\mu\text{m}$. Du Polyamide 6.6 de permittivité relative $E_{r1} = 3,4$ recouvre une électrode tandis que du PTFE de permittivité relative $E_{r2} = 2,2$ enveloppe la seconde. L'épaisseur des isolants demeure égale donc $D_a = D_b = 1,25 \times 10^{-4} \text{ m}$. Dans cette modélisation, aucune couche d'air ou de vide n'intervient entre les diélectriques et les conducteurs. Ici, la fonction $d(t) = x_{max} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi.v.t}{x_{max}} \right) \right)$ représente l'espace-ment entre les plaques. x_{max} indique la distance maximale d'éloignement et correspond à $x_{max} = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$, tandis que v traduit la vitesse de mouvement appliqué au TENG. Comme l'objectif de cette étude consiste à l'analyser les paramètres des TENG lorsqu'une basse fréquence de « contacte-séparation » les anime, v doit rester faible. Ainsi, une fréquence de mouvement $F = 4,2 \text{ Hz}$ conduit à une vitesse $v = 8,40 \times 10^{-2} \text{ m/s}$.

De plus, la figure 3.11 montre les différentes zones qui contiennent les charges engendrées par l'utilisation d'un TENG en mode verticale. Les charges $\rho_U(t)$ restent toujours dans les conducteurs aux niveaux compris entre $-z_{p0} = -d_m$ et z_0 (pour les charges positives) ainsi qu'entre z_3 et $z_{p3}(t) = z_3(t) + z_{p0}$ (pour les charges négatives). Cependant, à l'inverse des simulations précédentes, aucune tension, occasionnée par un générateur externe, ne fournit de charges libres $\rho_U(t)$ aux bornes du composant. Ces dernières se retrouvent créées grâce au champ électrique produit par le mouvement imposé aux charges statiques ρ_T supposées constantes. D'après [127], les charges ρ_T apparaissent au niveau de la zone de contact entre le PTFE et le Polyamide 6.6. Elles se trouvent donc réparties de manière égale entre l'aire et le diélectrique ce qui implique l'émergence de charges de polarisation à l'interface entre isolants et conducteurs. Des charges $-\rho_T$ résident donc aux niveaux compris entre z_0 et z_{p0} , entre $z_{m2}(t) = z_2(t) - \frac{z_{p0}}{2}$ et $z_2(t)$ et entre $z_2(t)$ et $z_{p2}(t) = z_2(t) + \frac{z_{p0}}{2}$. Les charges ρ_T se retrouvent quant à elles aux altitudes allant de $z_{m1} = z_1 + \frac{z_{p0}}{2}$ à z_1 , de z_1 à $z_{p1} = z_1 + \frac{z_{p0}}{2}$ et de $z_{m3}(t) = z_3(t) - z_{p0}$ à $z_3(t)$.

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus durant cette étude avec ceux affichés dans [127], les conditions de simulation doivent demeurer identiques. Dans cette confi-

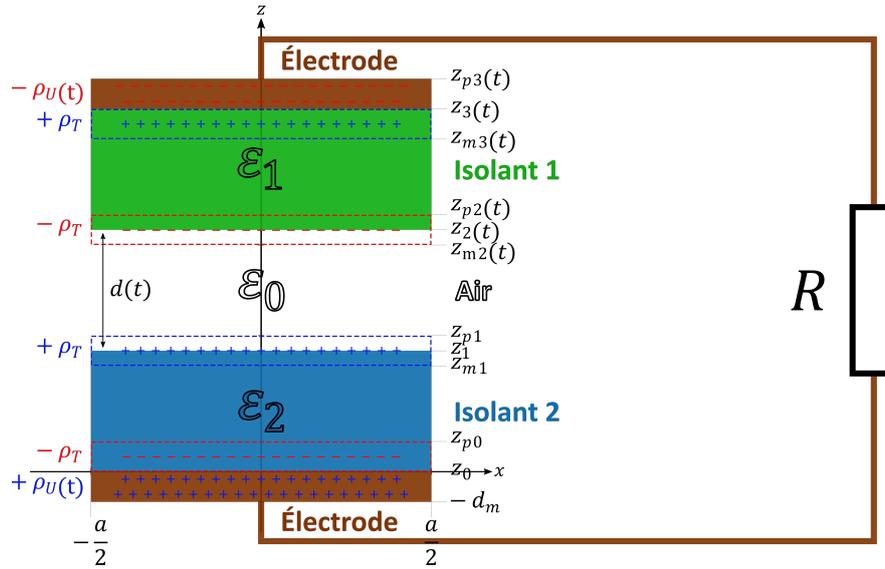


FIGURE 3.11 – Schéma qui représente la localisation des charges présentes dans un TENG

guration, le TENG constitue le générateur de tension. Une charge résistive $R = 50 \text{ M}\Omega$ vient donc faire le lien entre l'anode et la cathode. De plus, $P_1(0, 0, z_0)$ et $P_2(0, 0, z_3(t))$ représentent les points suivant lesquels la différence de potentiel est calculée.

Ici, seules les charges libres $\rho_U(t)$ restent inconnues, ce qui signifie qu'une seule équation suffit :

$$U_c(t) = -R S \frac{d \rho_u(t)}{dt} \quad (3.79)$$

La différence de potentiel $U_c(t)$ dépend alors des huit zones qui comportent des charges et doit être déterminée pour chacun des quatre niveaux. Ainsi, en se plaçant à z_0 :

$$\phi_a(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, \rho_U(t), -z_{p0}, z_0, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_U(t), z_3(t), z_{p3}(t), z_0) \quad (3.80)$$

$$\phi_b(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T, z_0, z_{p0}, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T, z_{m1}, z_1, z_0) \quad (3.81)$$

$$\phi_c(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T, z_1, z_{p1}, z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T, z_{m2}(t), z_2(t), z_0) \quad (3.82)$$

$$\phi_d(z_0, \varepsilon_2, t) = \vartheta(\varepsilon_2, -\rho_T, z_2(t), z_{p2}(t), z_0) + \vartheta(\varepsilon_2, \rho_T, z_{m3}(t), z_3(t), z_0) \quad (3.83)$$

D'où :

$$\phi_0(t) = \phi_a(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_0, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_0, \varepsilon_2, t) \quad (3.84)$$

Puis, en effectuant la même procédure à tous les autres niveaux :

$$\phi_1(t) = \phi_a(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_b(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_c(z_1, \varepsilon_2, t) + \phi_d(z_1, \varepsilon_2, t) \quad (3.85)$$

$$\phi_2(t) = \phi_a(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_b(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_c(z_1, \varepsilon_0, t) + \phi_d(z_1, \varepsilon_0, t) \quad (3.86)$$

$$\phi_3(t) = \phi_a(z_2(t), \varepsilon_0, t) + \phi_b(z_2(t), \varepsilon_0, t) + \phi_c(z_2(t), \varepsilon_0, t) + \phi_d(z_2(t), \varepsilon_0, t) \quad (3.87)$$

$$\phi_4(t) = \phi_a(z_2(t), \varepsilon_1, t) + \phi_b(z_2(t), \varepsilon_1, t) + \phi_c(z_2(t), \varepsilon_1, t) + \phi_d(z_2(t), \varepsilon_1, t) \quad (3.88)$$

$$\phi_5(t) = \phi_a(z_3(t), \varepsilon_1, t) + \phi_b(z_3(t), \varepsilon_1, t) + \phi_c(z_3(t), \varepsilon_1, t) + \phi_d(z_3(t), \varepsilon_1, t) \quad (3.89)$$

Ce qui signifie que :

$$U_c(t) = \phi_0(t) - \phi_5(t) + \phi_1(t) - \phi_4(t) + \phi_2(t) - \phi_3(t) \quad (3.90)$$

Enfin, en résolvant numériquement l'équation différentielle et en traçant le résultat, il est possible de définir l'évolution des charges volumique au cours du mouvement. La figure 3.12 présente donc $\rho_U(t)$ avec les charges triboélectriques $\rho_T = 3,94 \times 10^9 \text{ C/m}^3$.

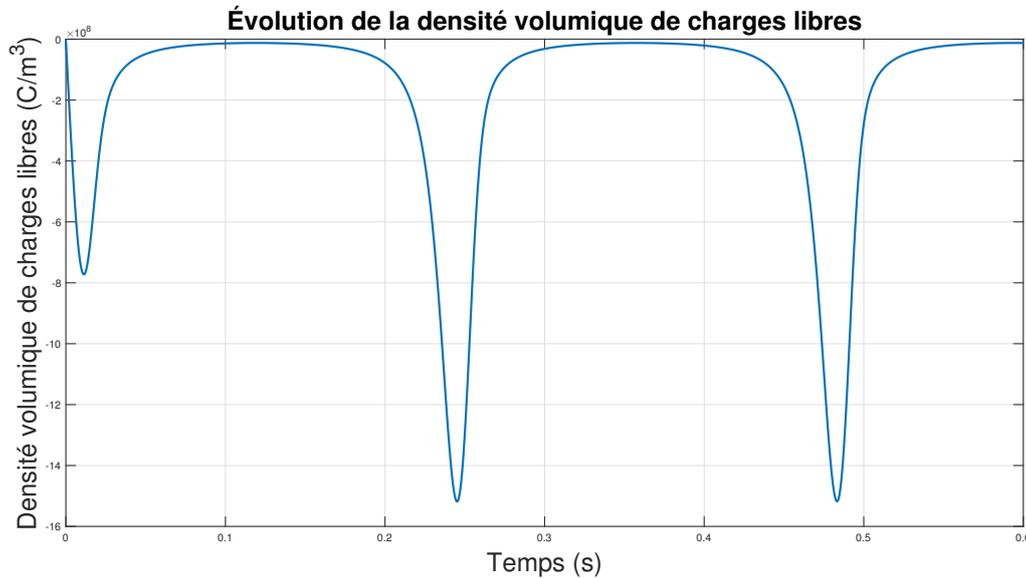


FIGURE 3.12 – Évolution de $\rho_U(t)$ lors de mouvements

Lors de la première séparation, quand les panneaux demeurent très proches, un déclin des charges libre présente sur l'anode, se manifeste. La proximité entre les charges ρ_T au début du mouvement engendre un important champ électrique. Ce champ implique une forte réduction des charges libres $\rho_U(t)$. Ensuite, plus les plaques s'éloignent l'une de l'autre, plus $\vec{E}(t)$ diminue, permettant ainsi aux charges libres, contraintes de se déplacer au travers de R , de rejoindre leur position initiale. Durant cette phase, le composant vise à retrouver son équilibre électrique puisque les charges tendent vers 0. Une fois que les diélectriques se rapprochent, le champ $\vec{E}(t)$ va à nouveau croître et entraîner une nouvelle migration des charges libres (et par conséquent une chute de ces dernières). La répétition du mouvement occasionne donc un transfert de charge périodique.

La circulation des charges dans un conducteur engendre un courant. Afin de déterminer le courant, il convient de dériver $\frac{\rho_U(t)}{S \cdot z_{p0}}$ par rapport au temps. Le résultat de cette opération est présenté en figure 3.13.

Au début de la séparation, la circulation des charges reste importante. Le courant va donc brusquement diminuer. Puis comme détaillé plus haut, une fois que les plaques sont assez éloignées, le champ n'influence presque plus les charges libres. Ces dernières retrouvent d'abord rapidement (ce qui suppose un pic de courant positif) puis petit à petit leur position d'équilibre. C'est durant cette phase que le courant retombe au fur et à mesure à 0. Enfin, quand les isolants se rapprochent, le champ grandit derechef et les charges se déplacent à nouveau, ce qui génère le pic négatif. L'application d'un mouvement répété produit alors un courant périodique. Les charges mettront plus de temps à traverser

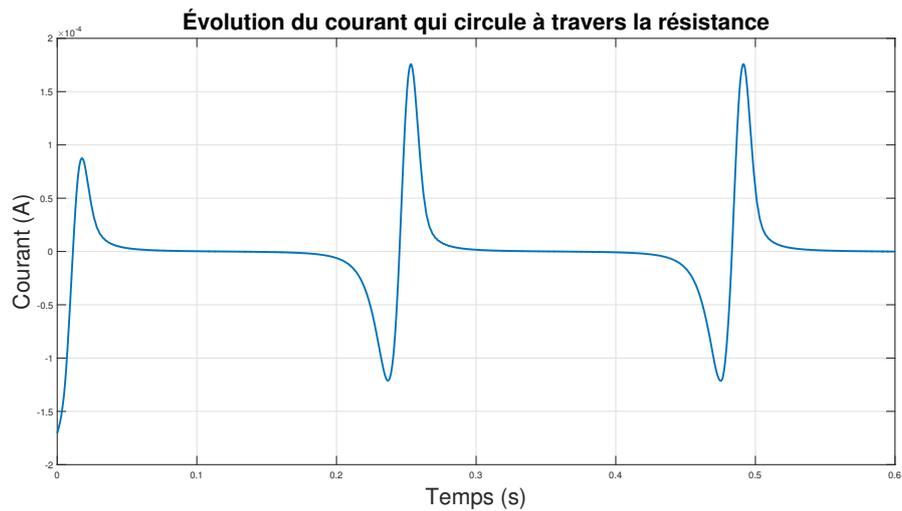


FIGURE 3.13 – Évolution du courant produit lors de mouvements

une forte résistance, ce qui impliquera un courant plus faible, donc des pics moins hauts et plus étalés dans le temps.

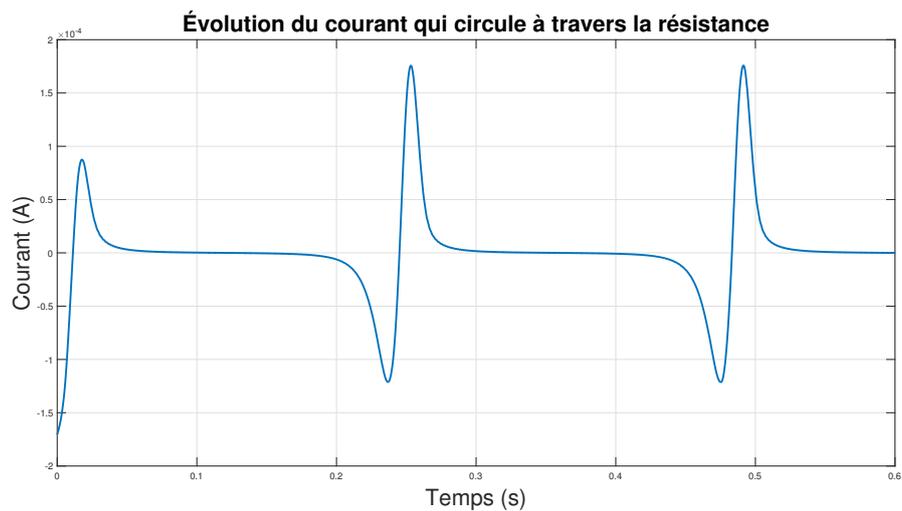


FIGURE 3.14 – Évolution de la tension produite lors de mouvements

La tension représentée en figure 3.14 reste semblable au courant. En effet, la charge résistive n'apporte pas de déphasage entre tension et courant.

La comparaison des résultats, pour le calcul des charges libres, proposée dans [127], par rapport à ceux obtenus plus haut, est présentée en figure 3.15.

Il semble que l'allure des tracés soit identique. Une première disparité réside dans l'amplitude des variations. Cet écart est probablement dû aux approximations effectuées dans les méthodes de calcul utilisées.

Une seconde divergence concerne la valeur moyenne des courbes. L'emploi des équations proposées dans [127] fait apparaître une valeur « d'offset » sur la courbe de charge. Il convient donc à présent de s'intéresser aux différences sur le courant présenté en figure 3.16.

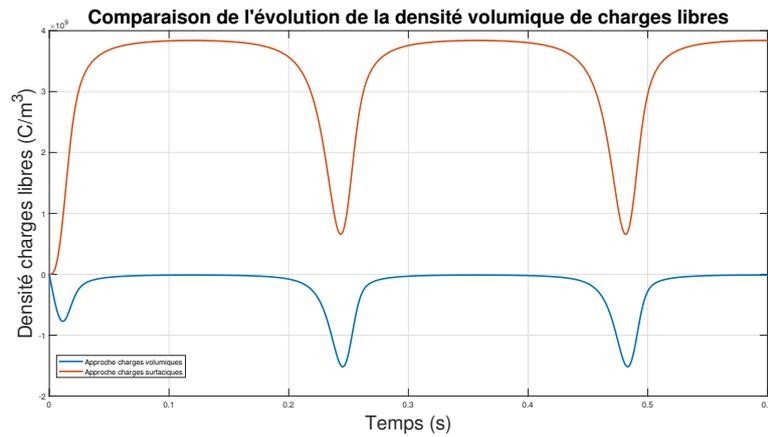


FIGURE 3.15 – Comparaison des évolutions de $\rho_U(t)$ lors de mouvements entre deux approches différentes

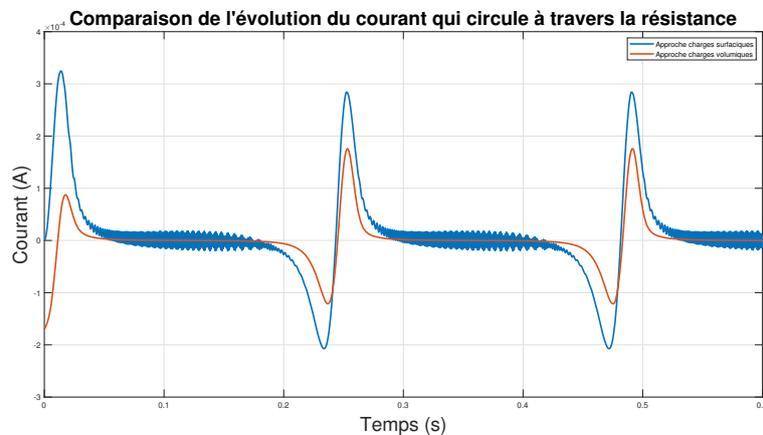


FIGURE 3.16 – Comparaison des évolutions des courants produits lors de mouvements entre deux approches différentes

Les différences existantes ici restent moins importantes que celles présentes entre les courbes de charges et ne concernent que l'amplitude des pics. Les oscillations sur la courbe qui résulte de l'utilisation des équations de [127] semblent due aux techniques de calcul (propre aux fonctions « ode45 » et « diff » de Matlab).

Les deux méthodes de simulations proposent des conclusions assez voisines. Cependant, les équations effectuées durant cette thèse produisent des résultats plus adaptés aux logiciels de modélisation. Une comparaison avec des mesures paraît indispensable pour distinguer les approches. Une vaste campagne de collecte de données a donc été mise en place afin d'approfondir les connaissances sur les TENG et est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Mesures

La mesure de la tension entre les électrodes, la caractérisation du courant, la quantification des densités de charges transférées et les relevés des puissances produites représentent les points d'observation clef qui autorisent une véritable compréhension des TENG. Afin de proposer un schéma d'usage approprié et pour concevoir un circuit électronique adapté au composant, il convient de visualiser les paramètres énumérés précédemment en fonction des multiples variables propre à son utilisation.

De plus, les expérimentations effectuées durant la campagne de mesures permirent de mettre au point une nouvelle méthode simple qui autorise une amélioration importante de l'énergie fournie par le TENG. Lors des premières manipulations du TENG, de grands écarts de tensions entre deux acquisitions se manifestèrent. Or, d'après les analyses des mouvements exécutés avant et pendant les tests, il apparut qu'une séquence de préfrottement produisait une forte augmentation dans le nombre de charges de surfaces responsables du phénomène.

La fluctuation des facteurs « environnementaux » contribue à l'efficacité énergétique des TENG. Donc, l'impacte des leviers tels que la fréquence de mouvement, les aires de contacts effectives, l'impédance de charge où encore le nombre de préfrottements fait l'objet de l'étude réalisée dans cette partie. Les premières mesures exposent les résultats obtenus lorsque le TENG se constitue de films homogènes plaqués sur des panneaux de cuivre. Une deuxième partie montre les améliorations apportées par les T-TENG via une analyse sur des TENG tricotés. Enfin, la troisième partie propose une comparaison entre le modèle mathématique et les acquisitions.

4.1 Présentation du banc de mesures

Un dispositif expérimental a permis d'effectuer les acquisitions tout en autorisant la modification des facteurs dont l'incidence semblait majeure telle que la fréquence de mouvement, la surface de contact ou l'impédance de charges. La figure 4.1 illustre ce système. Il bénéficie de deux plaques en bois (un matériau électriquement neutre). L'information de la pression appliquée s'obtient grâce à des résistances sensibles à la contrainte CP 149 (de chez IEE) fixées directement sur les panneaux. Ces capteurs renvoient une valeur pour une force située dans l'intervalle de $0,5\text{ N}$ à 100 N . Deux moteurs pas à pas RS PRO 1805279 (qui profitent d'un pas angulaire de $1,8^\circ \pm 5\%$ et donc qui proposent une

translation de $0,185 \text{ mm} \pm 0,0013 \text{ mm}$ par pas) maîtrisent les positions des plaques. Ces derniers créent les mouvements nécessaires à l'étude et cela sur les axes x et z . Ils permettent ainsi la production d'un frottement ou d'un contact suivi d'une séparation. Une carte Arduino Dué couplée à deux SBC-MotoDriver2 et à des capteurs de fin de course vérifie précisément les déplacements imposés par l'utilisateur (via une connexion, série avec le microcontrôleur).

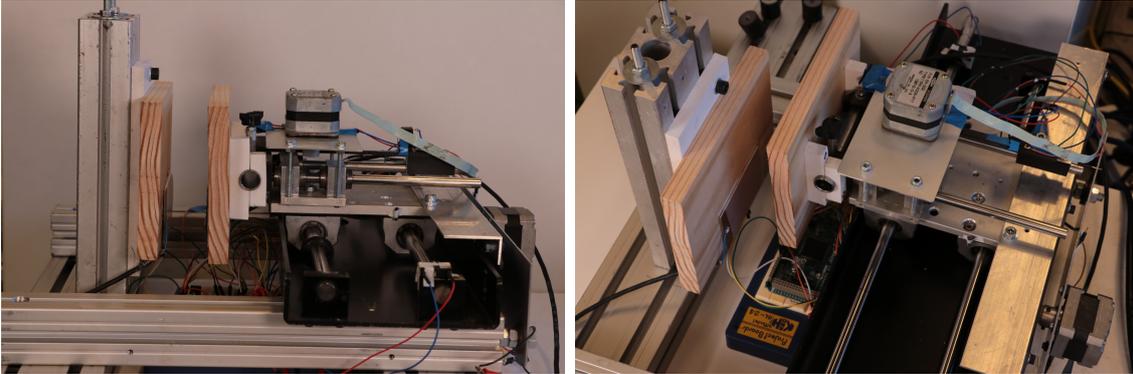


FIGURE 4.1 – a. Banc de mesure, vue latérale (gauche) ; b. Banc de mesure, vue du dessus (droite)

La mesure de tension s'effectue par deux méthodes distinctes. La première, « single-ended », compare la tension présente sur une voie à la masse (qui peut se définir comme le potentiel 0 V). La plupart des oscilloscopes emploient ce mode d'acquisition. La seconde consiste à se mettre dans une configuration différentielle, en soustrayant les valeurs de tension en deux points séparés. Afin de ne pas ajouter de composants qui altéreraient le signal généré par un TENG en mouvement, il convient de choisir un protocole de visualisation de la tension qui n'apporte pas ou peu de modifications (ces dernières doivent pouvoir être traitées par un programme informatique).

Le dispositif transfère une certaine quantité de charges (de l'anode à la cathode) lors du déplacement d'une des plaques. Or, le mode « single-ended » effectue une comparaison entre un signal et la masse de l'outil d'échantillonnage. Dans cette configuration, la masse serait reliée à la cathode. Une partie du signal produit est donc envoyée à la masse. Une sonde différentielle parviendrait à remédier à ce problème. Cependant un tel appareil fait intervenir un nombre conséquent de composants intermédiaires (pour certains actifs) ce qui rend impossible la visualisation de la tension « brute ».

L'option la plus avantageuse réside alors dans l'emploi de la mesure différentielle. L'oscilloscope utilisé doit disposer de deux entrées, ce qui permet de relier les masses entre elles et d'observer ce qui sort de l'anode et qui rentre dans la cathode, sans fuites vers la masse. Une fois les signaux enregistrés il ne reste plus qu'à faire une simple soustraction de ces derniers pour obtenir la tension vue par l'oscilloscope (ce qui a aussi pour effet d'atténuer le bruit).

Cependant, un autre problème intervient également. Durant la mesure, l'oscilloscope affiche la tension qui se trouve aux bornes des résistances R_{o1} et R_{o2} comme cela est présenté en figure 4.2. Par conséquent si cette dernière demeure trop faible (par rapport à R , l'impédance du circuit disposée entre les électrodes du TENG) la plupart du courant produit se dirigera vers la masse de l'appareil au lieu de circuler dans le circuit. Il convient alors de placer une autre résistance en série avec l'entrée de l'oscilloscope (R_{L1} et R_{L2})

pour qu'une majorité des charges reste dans le système.

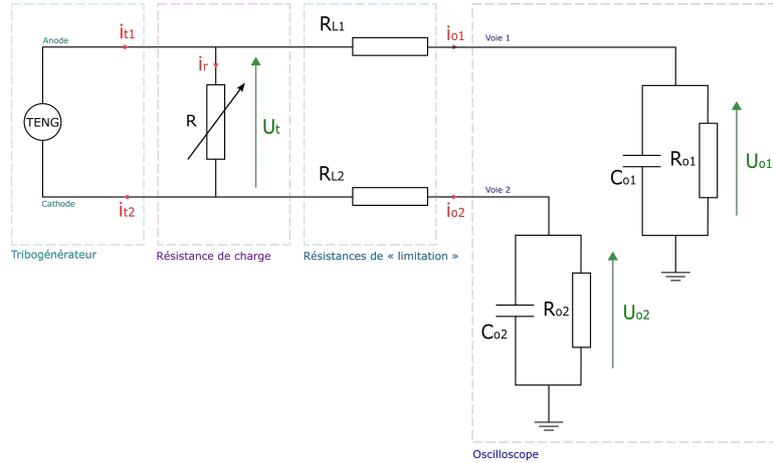


FIGURE 4.2 – Schéma du montage d'acquisition de la tension produite par un TENG

Néanmoins, cet ajout nécessite un traitement informatique pour obtenir une image de la tension réellement produite par le TENG. L'oscilloscope permet de mesurer les tensions $U_{o1}(t)$ et $U_{o2}(t)$ comme cela est montré en figure 4.2.

D'après la loi des nœuds et la loi de mailles,

$$U_{o2}(t) + i_{o2}(t) R_{L2} + U_t(t) - i_{o1}(t) R_{L1} - U_{o1}(t) = 0 \quad (4.1)$$

avec

$$i_{o1}(t) = \frac{U_{o1}(t)}{R_{o1}} + C_{o1} \frac{d U_{o1}(t)}{dt} \quad (4.2)$$

et

$$i_{o2}(t) = \frac{U_{o2}(t)}{R_{o2}} + C_{o2} \frac{d U_{o2}(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Dans le cas où $R_{L1} = R_{L2}$, $C_{o1} = C_{o2}$ et $R_{o1} = R_{o2}$ alors $i_{t1}(t) = i_{t2}(t)$ et $i_{o1}(t) = i_{o2}(t)$

$$U_t(t) = 2 R_{L1} i_{o1}(t) + 2 U_{o1}(t) \quad (4.4)$$

Donc avec les équations (4.2) et (4.4) la tension réelle produit par le TENG peut être calculée :

$$U_t(t) = 2 R_{L1} \left(\frac{U_{o1}(t)}{R_{o1}} + C_{o1} \frac{d U_{o1}(t)}{dt} \right) + 2 U_{o1}(t) \quad (4.5)$$

Cette méthode permet ainsi la quantification de la tension fournie par le composant tout en assurant une fuite minimum de charge. Cependant, il convient de choisir judicieusement les impédances R_{L1} et R_{L2} , car si ces dernières sont trop importantes, les courants $i_{o1}(t)$ et $i_{o2}(t)$ ne généreront pas une différence de potentiel $U_{o1}(t)$ et $U_{o2}(t)$ assez grande pour que l'oscilloscope les détecte et puisse les afficher. À l'inverse, si les résistances demeurent trop petites, la fuite des charges produites par le TENG sera trop forte et la mesure ne représentera pas ce qui se passe dans le circuit alimenté par le dispositif triboélectrique.

4.2 Mesures avec une charge résistive

Cette partie présente les mesures de tension produit par le TENG en fonction de divers paramètres d'usage tels que la fréquence de mouvement, la surface de contact ou la résistance de charges. Les données recueillies ici permettent de comprendre expérimentalement quels facteurs impactent le plus la puissance du signal fourni. Elles autorisent l'analogie avec les simulations pour vérifier si les équations détaillées plus haut décrivent bien le comportement du composant étudié. Enfin, les informations collectées offrent également la possibilité de déterminer la combinaison de variables optimales pour une exploitation maximale de l'énergie dans les conditions d'utilisation finales. Par conséquent, afin de proposer une comparaison, sans pour l'instant complexifier les formules, une simple résistance constituera la charge placée aux bornes du TENG.

Les tests croisés de multiples valeurs d'impédance, de fréquences de mouvements ainsi que de surfaces effectives de contact, présentées sur le Tableau 4.1 permettent d'évaluer l'effet de l'augmentation de ces dernières sur la quantité de puissance transmise.

Résistance R	$10\text{ k}\Omega \pm 5\%$	$10\text{ M}\Omega \pm 5\%$	$20\text{ M}\Omega \pm 5\%$
	$30\text{ M}\Omega \pm 5\%$	$40\text{ M}\Omega \pm 5\%$	$50\text{ M}\Omega \pm 5\%$
Fréquence F	$1,8\text{ Hz} \pm 12\%$	$2,3\text{ Hz} \pm 12\%$	$3,0\text{ Hz} \pm 12\%$
	$4,2\text{ Hz} \pm 12\%$		
Surface S	$28,88\text{ cm}^2 \pm 7\%$	$48,81\text{ cm}^2 \pm 7\%$	$79,59\text{ cm}^2 \pm 7\%$
	$128,5\text{ cm}^2 \pm 7\%$		

TABLE 4.1 – Paramètres variables lors des campagnes de mesures

4.2.1 Impact de la séquence de pré-frottement

Bien que l'étude ne porte que sur le mouvement vertical, la campagne de mesures a mis en lumière l'effet d'un pré-frottement sur la puissance développée pendant la phase de « contact-séparation ». Une première étape de friction produira une augmentation de charges sur les surfaces des diélectriques, comme le montre la figure 4.3.

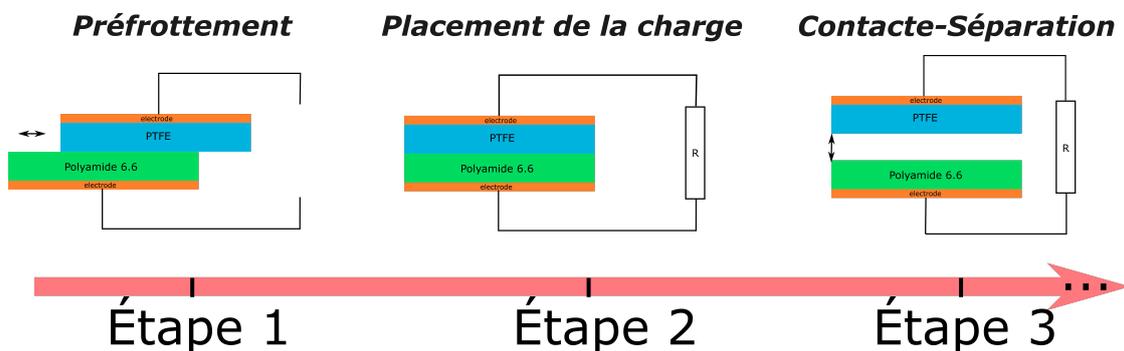


FIGURE 4.3 – Schéma des étapes d'excitation du TENG

Le TENG se trouve en circuit ouvert, durant la première étape de frottement, pour qu'aucune des charges générées par cette action ne transite de l'anode à la cathode. Une fois la période de frottements terminée, la charge viendra relier les électrodes du TENG.

Enfin, le déplacement vertical sera imposé et engendrera la création d'un signal au travers du dispositif de test.

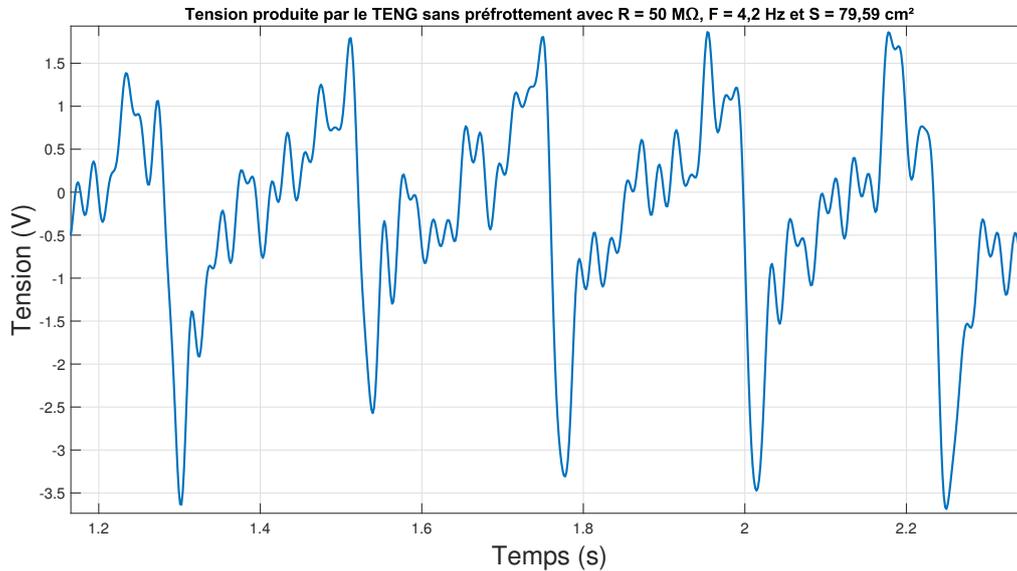


FIGURE 4.4 – Tension aux bornes de $R = 50 \text{ M}\Omega$ sans phase de préfrotement

Si la phase de préfrotement n'a pas lieu avant celle de « contact-séparation » les charges statiques qui participent à la tension $U_t(t)$ restent faibles et la différence de potentiel enregistrée demeure minimale comme le montre la figure 4.4. Cette dernière présente $U_t(t)$ mesurée aux bornes de $R = 50 \text{ M}\Omega$ pour un TENG d'une surface effective $S = 79,59 \text{ cm}^2$ et dont la fréquence du mouvement $F = 4,2 \text{ Hz}$ sur cinq périodes (sans préfrotement). Dans le cas présent, un cycle correspond à un « contact-séparation-contact ».

Le début d'un cycle correspond au premier contact entre les plaques, là où $U_t(t) = 0$. Une séparation subite des plaques induit dès lors une augmentation soudaine de $U_t(t)$ avec un pic positif maximal équivalent à $1,863 \text{ V}$ et devient 0 V au terme du demi-cycle. Lorsque la distance entre les diélectriques tend vers zéro (avant le contact), un pic négatif égal à $-3,474 \text{ V}$ apparaît. Enfin, la différence de potentiel $U_t(t)$ repasse à zéro dès la deuxième rencontre des panneaux, à la fin d'une période. Un schéma identique se reproduit durant les cycles suivants, ce qui implique que le composant dispose d'un « comportement » stable au cours des mouvements (la forme et l'intensité des amplitudes restent identiques d'un cycle à l'autre). Cependant, la figure 4.4 témoigne que le TENG reste très sensible aux bruits puisque l'anode et la cathode contiennent des plaques de cuivre qui se conduisent comme une antenne.

Le courant ainsi produit ($i_r(t) = \frac{U_t(t)}{R}$), montré en figure 4.5, évolue de la même manière que la tension et demeure également extrêmement faible (les pics négatifs descendent en moyenne à -60 nA tandis que ceux positifs montent environ à 40 nA).

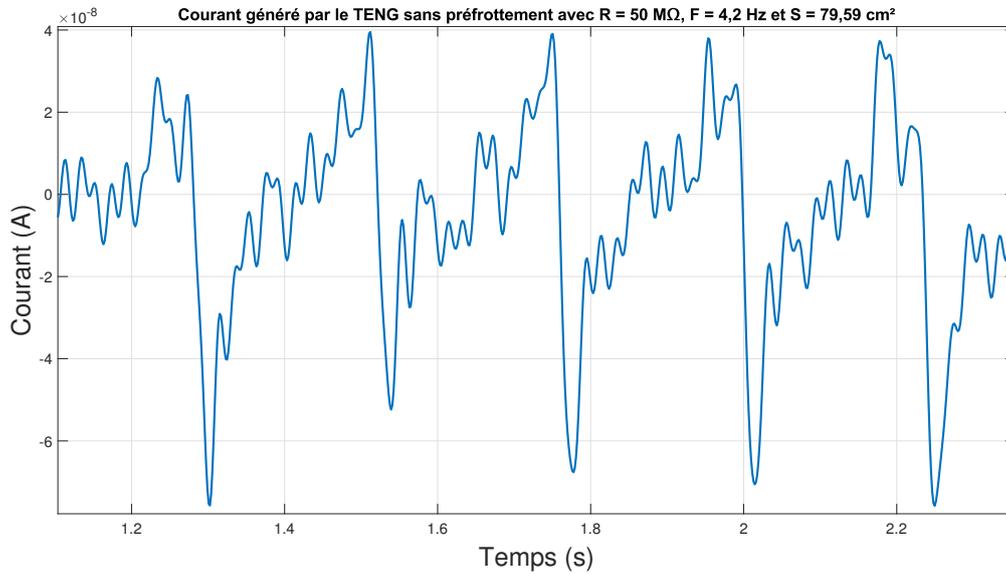


FIGURE 4.5 – Courant traversant $R = 50 M\Omega$ sans phase de préfrotement

Quant à la puissance affichée sur la figure 4.6 (calculée via $P(t) = U_t(t) i_r(t)$), elle devient maximale lorsque le courant et la tension atteignent leurs valeurs de pic.

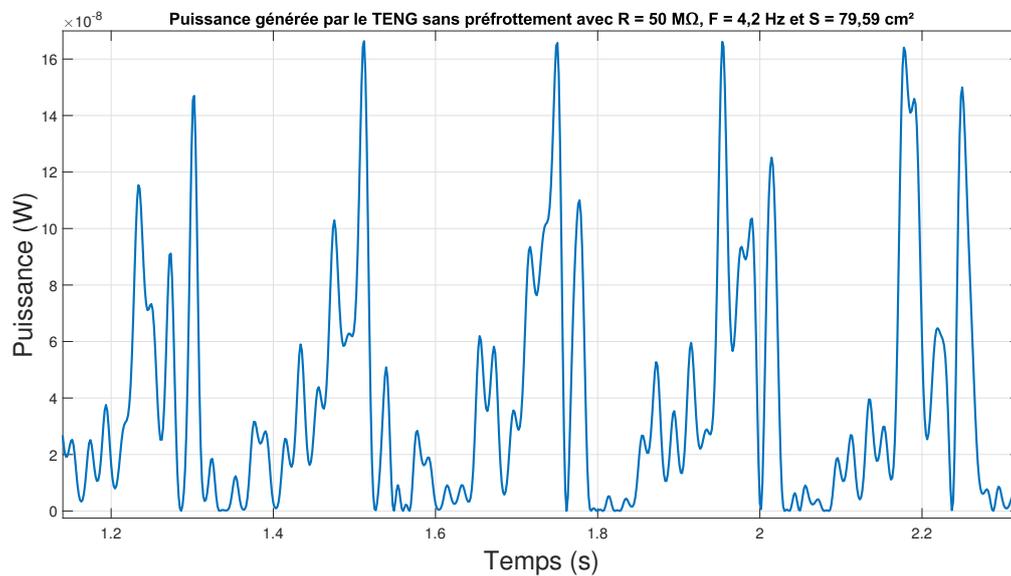
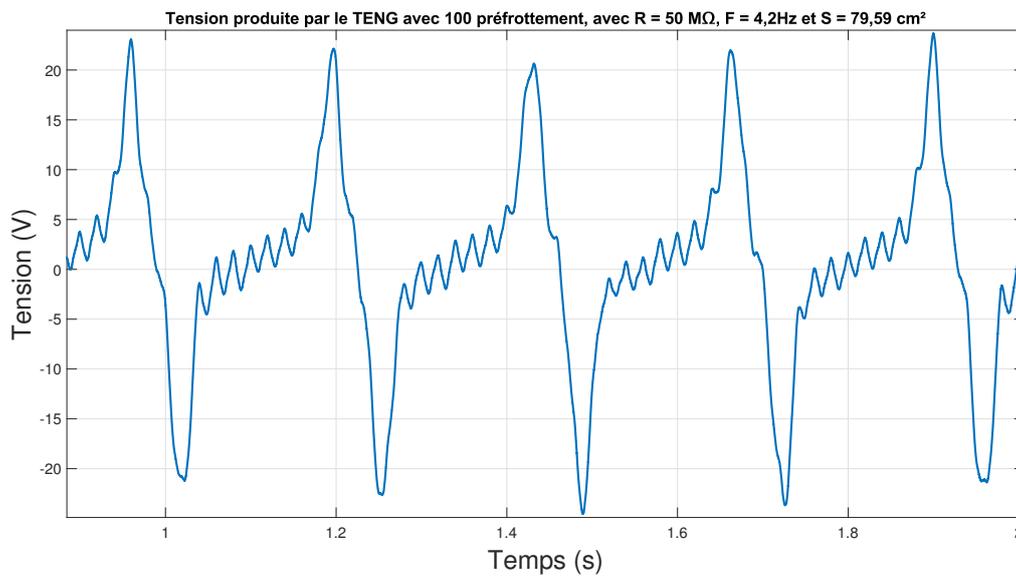
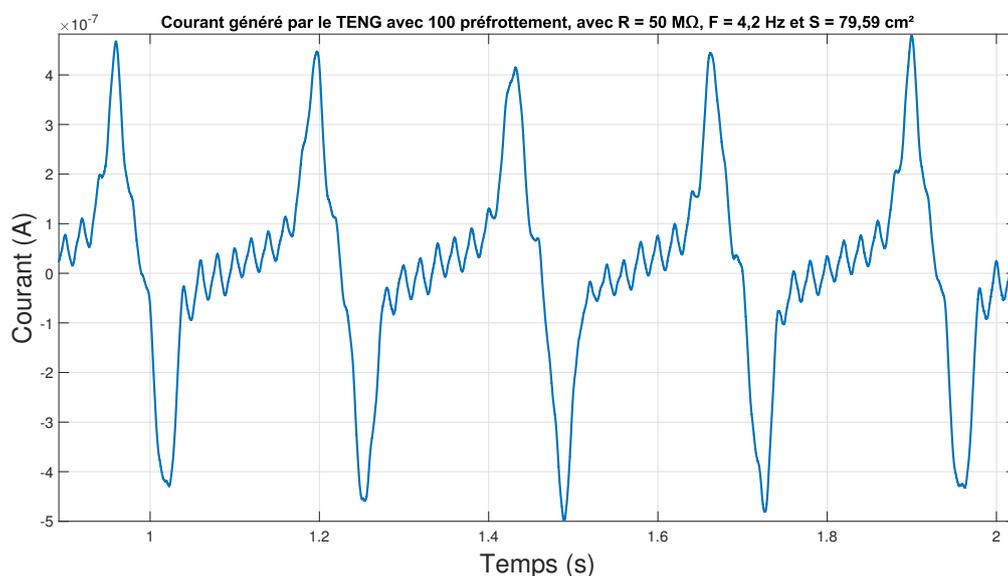


FIGURE 4.6 – Puissance dissipée par effet Joule par $R = 50 M\Omega$ sans phase de préfrotement

Si les paramètres de test utilisés précédemment demeurent identiques ($R = 50 M\Omega$; $S = 79,59 cm^2$; $F = 4,2 Hz$) alors l'application du protocole détaillé en figure 4.3, comportant une phase de 100 préfrotements consécutifs, « boostera » la tension produite, comme le montre la figure 4.7.

FIGURE 4.7 – Tension aux bornes de $R = 50 \text{ M}\Omega$ avec une phase de 100 prérottements

L'allure de la tension évolue ici toujours de la même manière, mais se retrouve multipliée par 9. Le courant bénéficie également de cette augmentation, puisque la figure 4.8 indique un courant crête à crête de $9,26 \times 10^{-7} \text{ A}$ (contre $1,09 \times 10^{-7} \text{ A}$ sur la figure 4.5).

FIGURE 4.8 – Courant qui traverse $R = 50 \text{ M}\Omega$ avec une phase de 100 prérottements

Enfin, la puissance subie elle aussi l'effet du « boost » puisque les pics de tension se situent aux alentours de $1,04 \times 10^{-5} \text{ W}$ sur la figure 4.9 alors qu'ils atteignent seulement $1,64 \times 10^{-7} \text{ W}$ sur la figure 4.6.

Cette augmentation de la puissance produite dépend donc de l'étape d'excitation effectuée avant tout mouvement vertical. Il existe cependant des limites à ce phénomène.

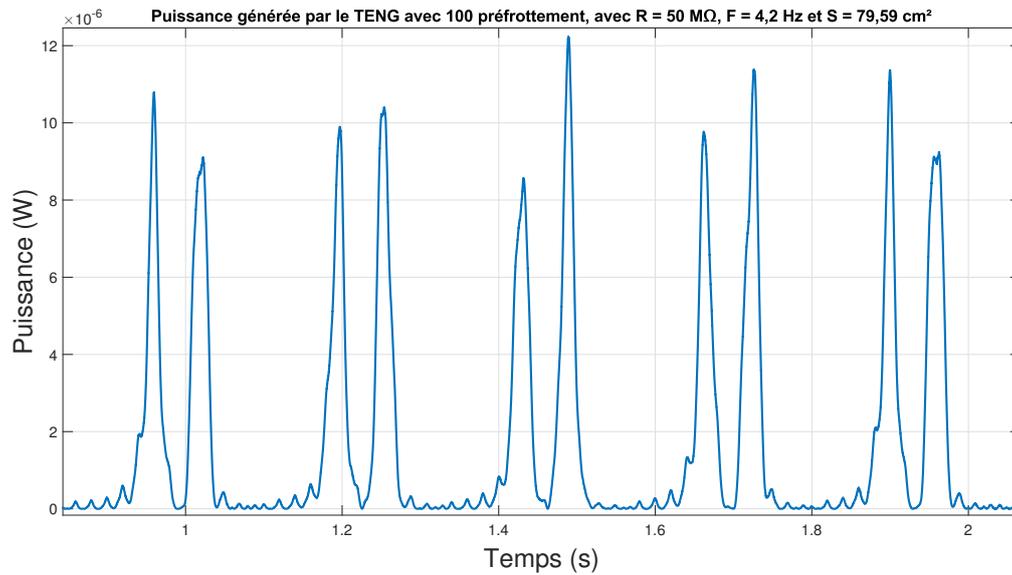


FIGURE 4.9 – Puissance dissipée par $R = 50 M\Omega$ avec une phase de 100 préfrottements

Dans ce cas, la figure 4.10 illustre ces limites pour un composant avec $R = 50 M\Omega$, $S = 79,59 cm^2$ et $F = 4,2 Hz$.

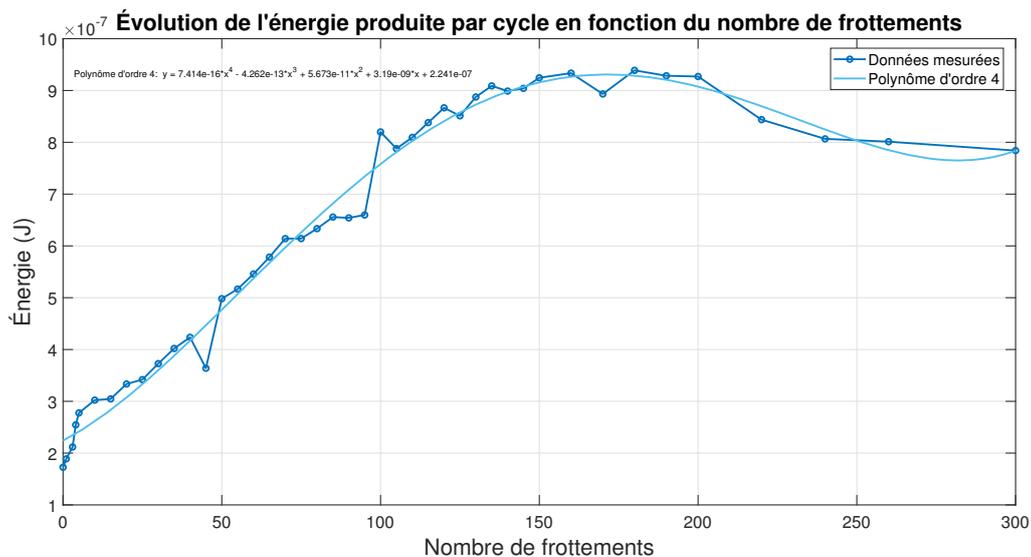


FIGURE 4.10 – Évolution de l'énergie moyenne dissipée par $R = 50 M\Omega$ en fonction du nombre de frottements

L'évolution de l'énergie produite lors d'un cycle en fonction du nombre de frictions présente trois zones différentes comme le montre la figure 4.10. La première, entre 0 et 140 frottements, montre une augmentation linéaire. Le déséquilibre électrique entre l'anode et la cathode devient de plus en plus important. C'est durant cette phase que l'isolant qui « arrache les charges » va en récolter le plus. Dans la région intermédiaire entre 150 et 200 frictions, l'accroissement tend à disparaître pour se stabiliser autour de $924,33 nJ$. La plupart des charges disposées à sauter d'un diélectrique à l'autre ont déjà migré sous l'action du frottement et l'énergie engendrée ne croît plus. Dans la dernière zone, de 200

à 300 frottements, une légère diminution de l'énergie produite peut s'observer. Durant la phase précédente, le composant a atteint son niveau de déséquilibre électrique maximum. Cela signifie que l'énergie apportée par des frictions « humain » ne permet pas d'engendrer le déplacement de charges statiques supplémentaires (de l'anode à la cathode). L'énergie occasionnée par le TENG va par conséquent osciller autour de la valeur maximale relevée. Ainsi, la chute d'énergie produite constatée pendant de cette dernière phase ne va pas se poursuivre avec l'augmentation du nombre de frottements. La décroissance présentée reste donc temporaire, due aux aléas des mesures. Ce tracé peut alors être approximé par une courbe de tendance grâce à un polynôme de degré 4 comme le montre la figure 4.10 et ainsi mettre en évidence les trois zones distinctes.

La phase de préexcitation demeure donc essentielle pour l'optimisation de la puissance produite par le TENG. Cette étape octroie une augmentation considérable des charges ρ_T et permet de multiplier l'énergie générée par le TENG d'un facteur 5,4 en passant de $172,64nW$ par cycle à $938,86nW$. La procédure présentée restera alors employée durant toutes les mesures qui suivront.

4.2.2 Impact de la résistance de charge R

Afin de transmettre un maximum de puissance, la résistivité du générateur doit correspondre à celle du circuit sur lequel il délivre une alimentation. Dans [101], l'impédance du TENG semblait assez importante. L'objectif des mesures présentées dans cette partie vise à confirmer la théorie et à déterminer l'ordre de grandeur idéal que la charge devrait avoir pour assurer un transfert d'énergie optimale. Les limitations imposées par l'oscilloscope n'autorisent pas la visualisation de la tension produite si $R > 50 M\Omega$ (comme le montre la figure 4.2). En effet, une telle grandeur impose que $R_{L1} = R_{L2} = 2 G\Omega$ or, au-dessus de cette limite les courants $i_{o1}(t)$ et $i_{o2}(t)$ ne permettent plus de générer des voltages (aux bornes de R_{o1} et R_{o2}) suffisamment importants pour que le dispositif d'acquisitions les détecte.

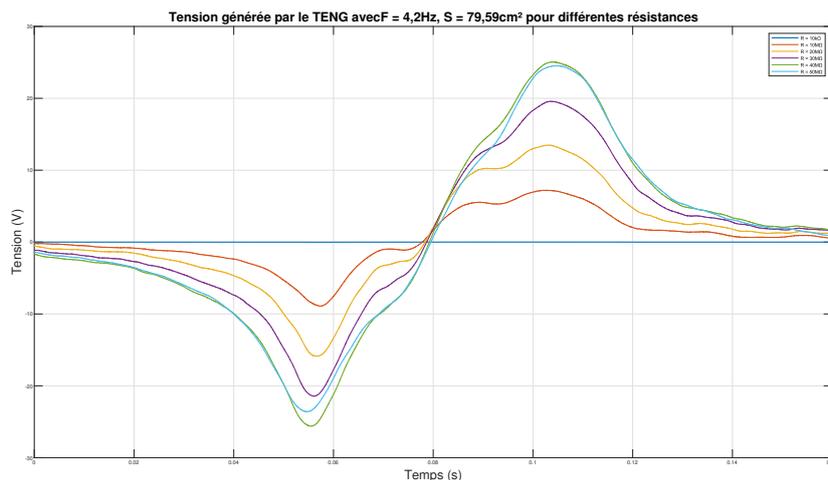


FIGURE 4.11 – Comparaison de la tension aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R

Six valeurs de résistance (tableau 4.1) tolèrent la quantification de la transformation

du signal afin de rendre compte de l'impact de cette dernière sur la puissance transmise par le composant testé. Le TENG utilisé dispose d'une surface fixe $S = 79,59 \text{ cm}^2$ et d'une fréquence de « contact-séparation » constante $F = 4,2 \text{ Hz}$. La figure 4.11 montre ainsi la moyenne de l'évolution de la tension sur 5 cycles. Cela permet de constater que plus l'impédance grandie, plus la différence de potentiel mesurée à ses bornes augmente.

Il convient de remarquer que l'amplitude des pics croît rapidement avec les premières valeurs de la résistance. Quand $R = 50 \text{ k}\Omega$, la tension crête à crête maximale atteint $U_{tc} = 15,25 \text{ mV}$ et progresse jusqu'à un plafond de $U_{tc} = 50,66 \text{ V}$ lorsque $R = 40 \text{ M}\Omega$.

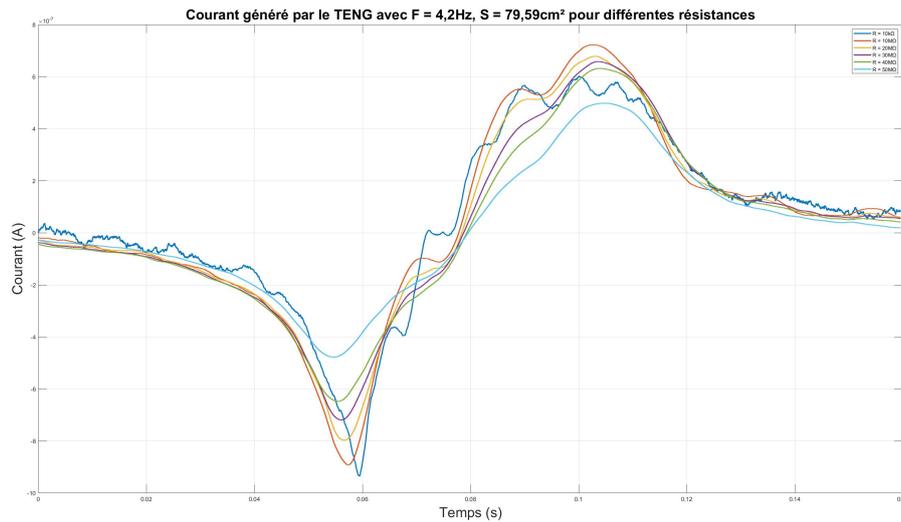


FIGURE 4.12 – Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R

Il semble ainsi que les hypothèses soumises dans [101] coïncident avec les données exposées en figure 4.11.

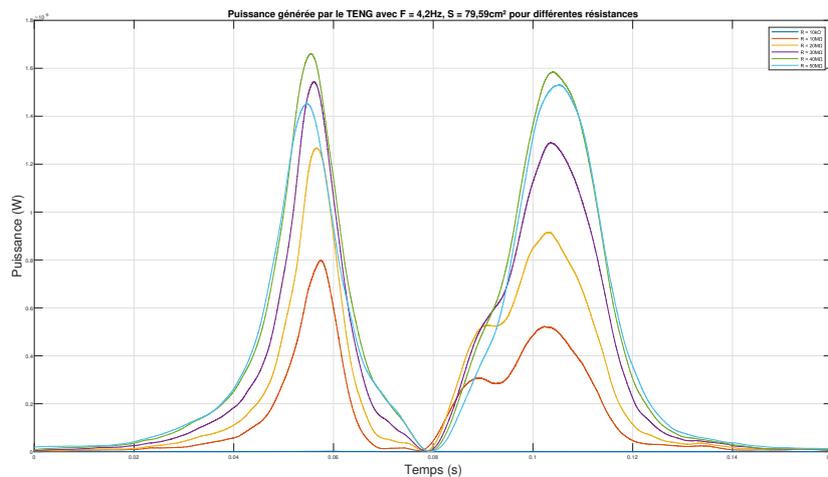


FIGURE 4.13 – Comparaison de la puissance fournie par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R

En effet, si le composant constitue un condensateur variable, alors son impédance (surtout en basse fréquence) reste très élevée.

La transmission optimale de puissance s'effectuera donc si le circuit connecté au TENG dispose lui aussi d'une grande résistance. Cependant, afin de valider complètement cette analyse, il convient de s'intéresser à l'évolution du courant fourni par le TENG comme cela peut être visualisé en figure 4.12. Ce courant se détermine par la loi d'ohm $i_r(t) = \frac{U_t(t)}{R}$.

Le courant engendré s'affaiblit bel et bien au fur et à mesure que la résistance croît, mais ce dernier varie beaucoup moins que la tension. Voilà pourquoi la puissance instantanée approche d'un pic quand $R = 40 M\Omega$ ainsi que l'expose la figure 4.12.

La puissance fournie par le TENG est donnée par la relation de la puissance instantanée $P(t) = U_t(t) \times i_r(t)$. Étant donné que le courant ne diminue que très peu et que le voltage s'élève fortement avec l'augmentation de R , $P(t)$ s'accroît linéairement pour atteindre son plafond au moment où $i_r(t)$ et $U_t(t)$ deviennent le plus importants.

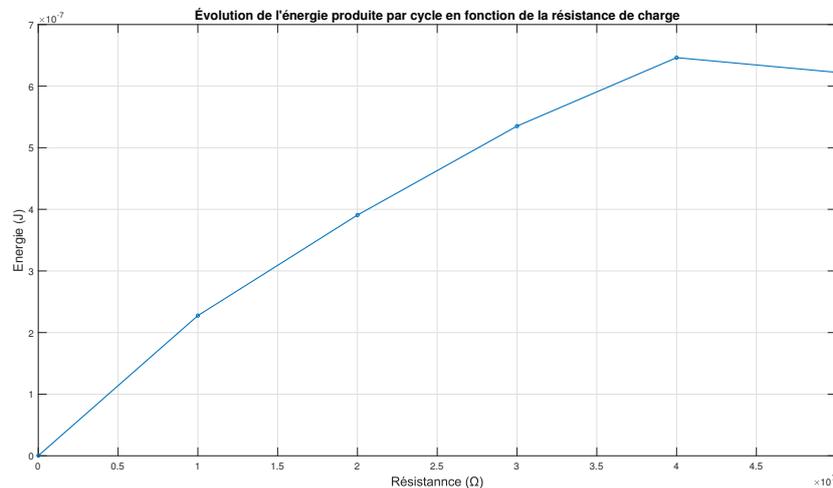


FIGURE 4.14 – Évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R

L'énergie moyenne produite pendant un cycle se détermine en intégrant la puissance $P(t)$, c'est-à-dire par la relation $\int P(t) dt$. Elle suit la même évolution que celle de la puissance et tend vers un maximum lorsque $R = 40 M\Omega$ comme le montre la figure 4.14.

Ces mesures relatives à la puissance générée par le TENG, au cours de l'accroissement de la résistance placée à ces bornes, confirment que ce type de composants dispose d'une résistance interne conséquente. L'adaptation d'impédance tient ainsi un rôle clef dans l'extraction de l'énergie engendrée par un tel dispositif. Comme en témoigne la figure 4.14, une bonne adaptation permettrait de passer de $0,34 nJ$ pour l'énergie moyenne par cycle lorsque $R = 10 k\Omega$ à $0,65 \mu J$ pour $R = 40 M\Omega$. Un des enjeux pour la suite du projet consistera donc à adapter correctement le TENG à une batterie pour en retirer le maximum d'énergie.

4.2.3 Impact de la fréquence du mouvement F

L'application envisagée pour les TENG dans ce projet vise à utiliser ces derniers comme récupérateur d'énergie fournie par les gestes naturels lors de mouvements humains. Il convient donc de s'intéresser à l'effet de la périodicité du mouvement « contact-séparation » sur la production de puissance. La visualisation des modifications apportées par différentes vitesses de « contact-séparation » s'effectue ici avec quatre valeurs de la fréquences, comme cela est précisé dans le tableau 4.1. Les faibles valeurs choisies correspondent à celles données, en moyenne, lors d'une activité physique humaine.

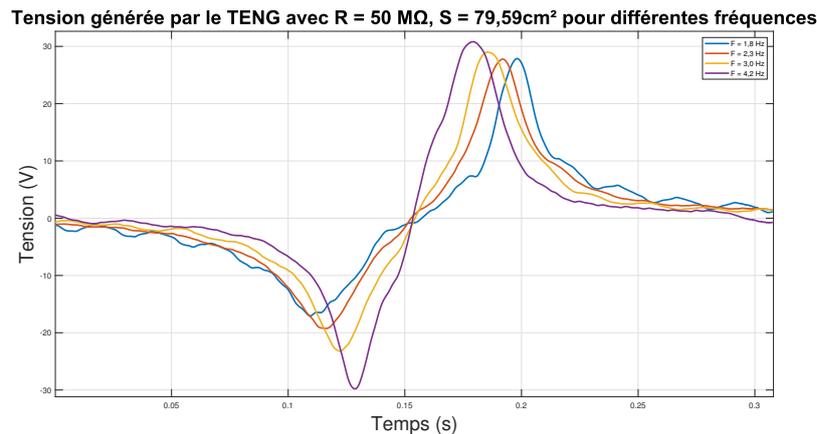


FIGURE 4.15 – Comparaison de la tension aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F

Les nombreuses études théoriques semblent montrer un lien étroit entre la vitesse d'éloignement des plaques triboélectrique et la puissance fournie par le TENG. La figure 4.15 permet d'observer que la tension fournie augmente bien avec la fréquence du mouvement. L'allure de la courbe de tension reste la même, cependant son amplitude crête à crête passe de $44,95 \text{ V}$ à $60,60 \text{ V}$.

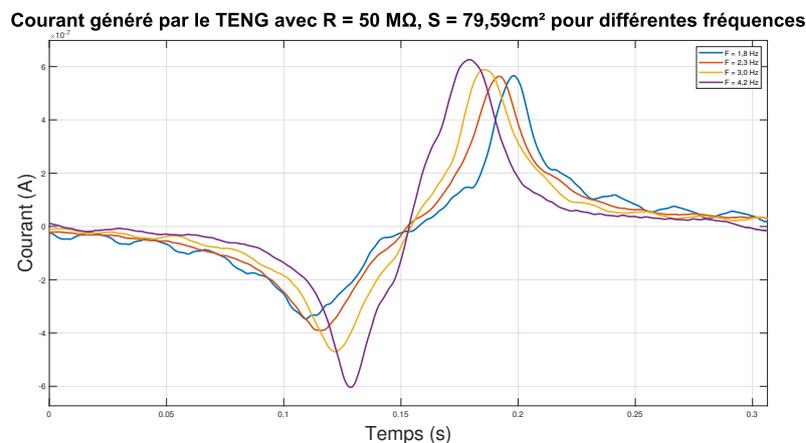


FIGURE 4.16 – Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F

De cette manière, un mouvement plus rapide autorise la création d'une différence de potentiel plus importante. Néanmoins, la quantification de puissance engendrée nécessite l'analyse du courant émis par le dispositif. Le courant exposé en figure 4.16 progresse de manière similaire et dans des proportions identiques à la tension.

La puissance instantanée augmente donc également avec la fréquence comme le montre la figure 4.17.

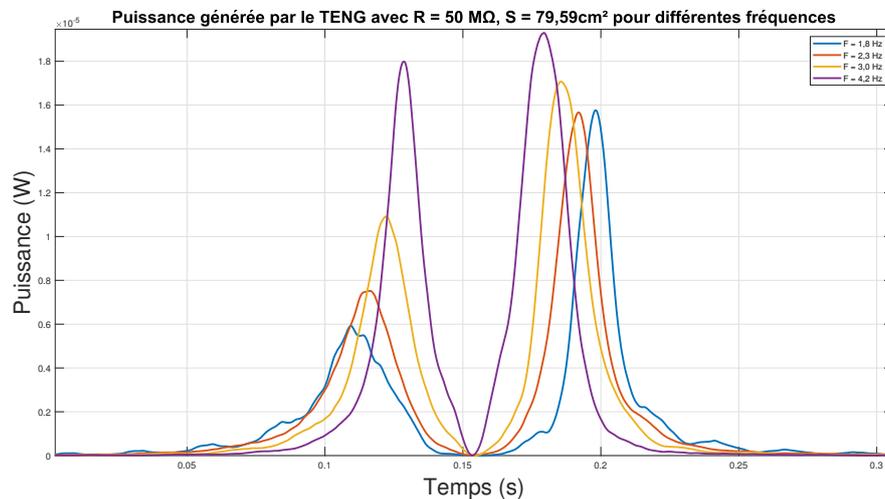


FIGURE 4.17 – Comparaison de la puissance produite par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F

L'énergie moyenne produite par cycle semble évoluer linéairement sur la plage de fréquence choisie ainsi que le présente la figure 4.18.

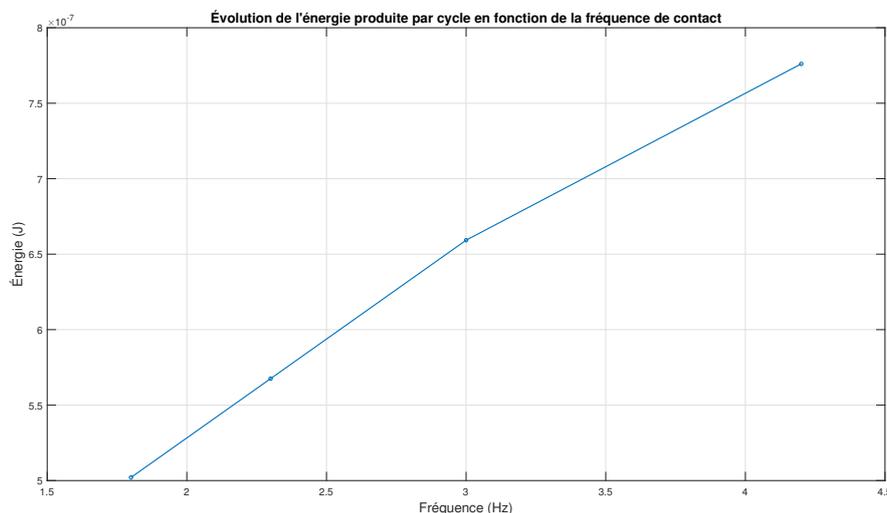


FIGURE 4.18 – évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F

Il conviendra par conséquent de maximiser la vitesse du mouvement pour augmenter la puissance développée par le TENG. Ces générateurs seront particulièrement adaptés

aux activités physiques intenses, dans lesquelles les gestes doivent être rapides (course, natation, vélo, etc.)[158].

4.2.4 Impact de la surface du TENG S

La surface effective de connexion entre l'anode et la cathode recouvertes de charges (d'électron ou de « trous ») [3] représente également un des paramètres importants à examiner. La surface étudiée doit correspondre à l'application finale envisagée. Les régions de « contact-séparation » présentes sur le corps humain demeurent peu étendues (entre les bras et le torse ou entre les jambes). Peu de recherches traitent de l'aire des secteurs de frottement/séparation sur l'anatomie humaine. Les envergures choisies dans le tableau 4.1 visent à correspondre au mieux avec l'utilisation future du TENG. Les mesures présentées en figure 4.19 montrent l'importance de la superficie des zones tribogénératrices dans la génération de voltage.

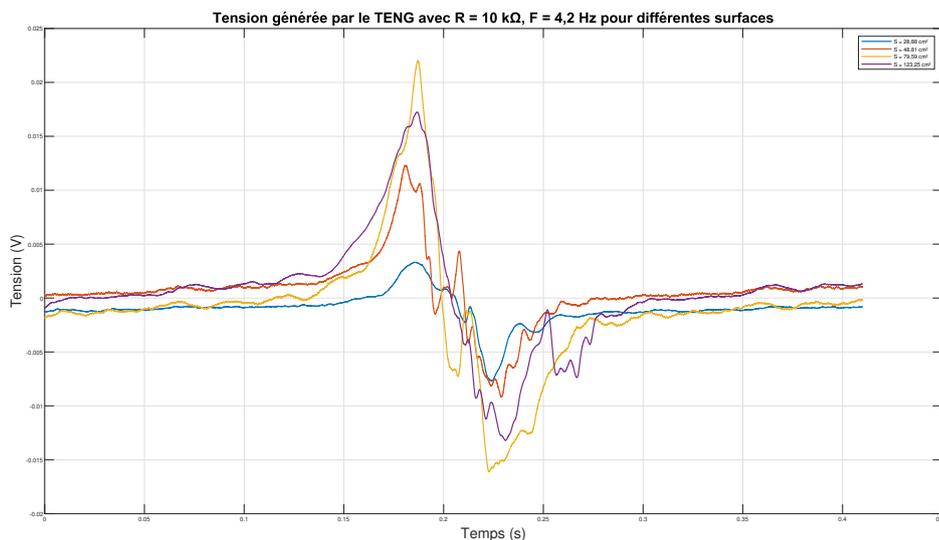


FIGURE 4.19 – Comparaison de la tension produite aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de surface S

La tension semble conserver la même forme tout au long du mouvement et bien que celle-ci s'élève avec la surface (jusqu'à $S = 79,59 \text{ cm}^2$), une fois passée cette limite, la différence de potentiel chute à nouveau. Les observations réalisées sur les analyses du voltage peuvent se transposer aux comparaisons de courant sur la figure 4.20.

Une augmentation presque linéaire du courant généré se remarque pour les premières valeurs de S . Cependant, la dernière mesure pour la plus grande des aires indique une diminution de l'amplitude. Un comportement semblable apparaît sur les courbes de puissance du TENG comme cela est présenté dans la figure 4.21.

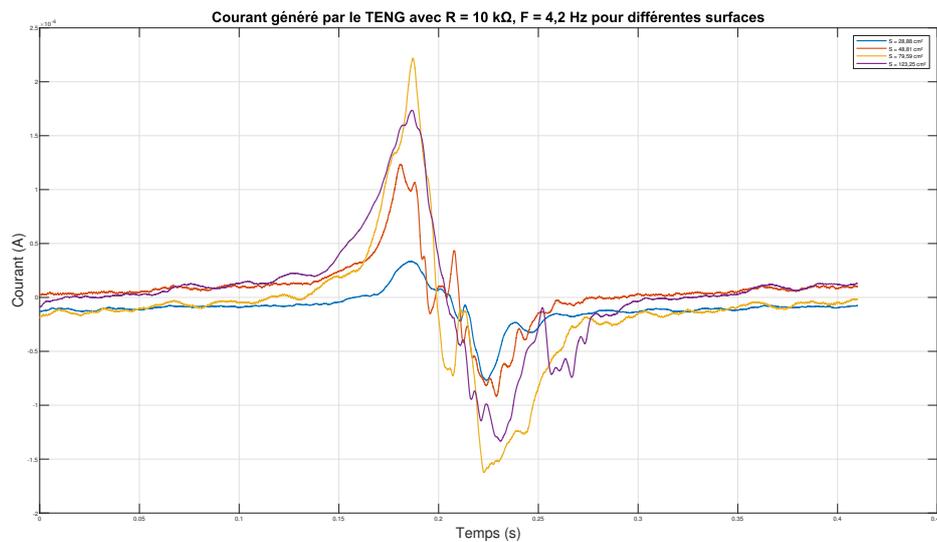


FIGURE 4.20 – Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S

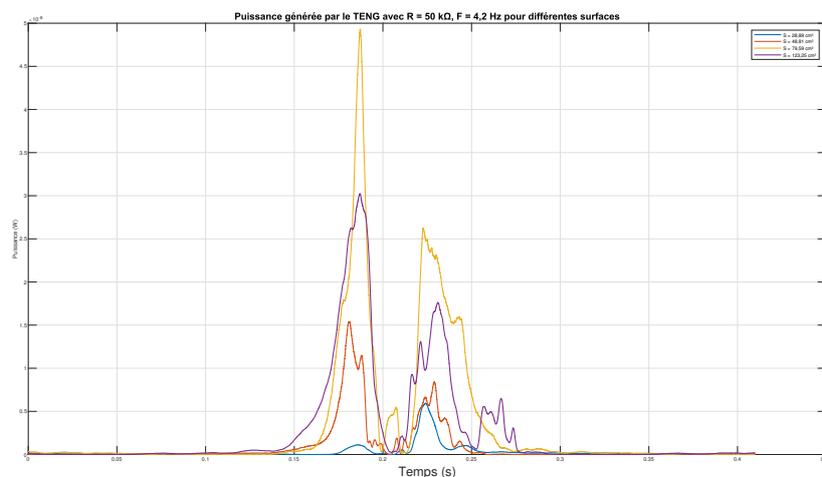


FIGURE 4.21 – Comparaison de la puissance produite par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S

La puissance instantanée se détermine par la relation $P(t) = U_t(t) \times i_r(t)$. Ainsi la même augmentation subsiste ici également. Pour terminer, le tracé de la variation de l'énergie moyenne fournie lors d'un mouvement complet, affiché en figure 4.22, confirme l'importance de la surface de contact.

L'évolution de la production d'énergie reste bien linéaire pour les trois premières valeurs de la surfaces S , mais décroît fortement à la dernière valeur. Ce phénomène peut trouver son explication dans le fait que les isolants (PTFE et Polyamide 6.6) demeurent plaqués sur les panneaux de cuivre. Aucune colle ou autre ingrédient ne fait le lien entre

les différentes parties du TENG. Or sur la plus grande des surfaces, le maintien parfait du contact entre le diélectrique et le métal constitue un problème.

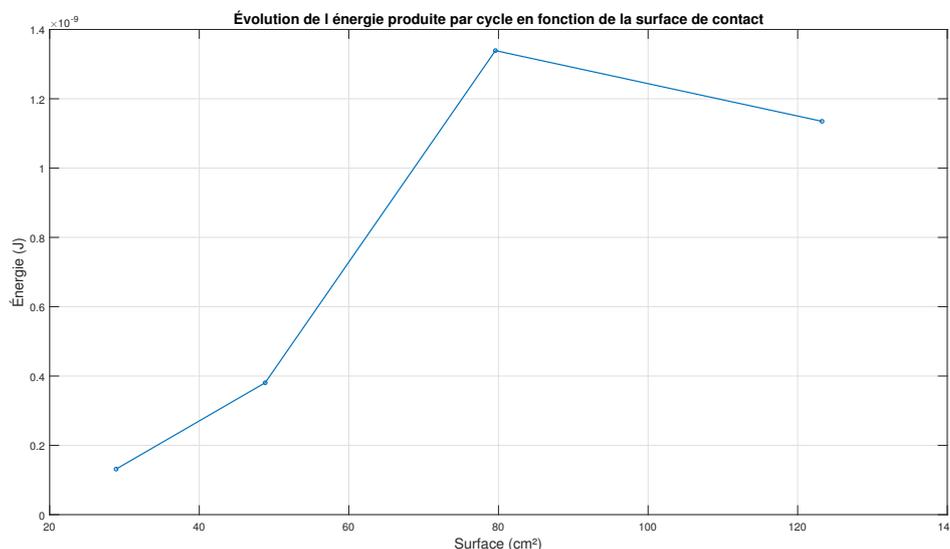


FIGURE 4.22 – évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S

Ainsi quelques espaces apparaissent à la jonction entre conducteur et isolant ce qui engendra des acquisitions de moins bonne qualité. L'adjonction d'une glu conductrice permettrait de répondre à ce problème. Cependant cela entraînerait une nouvelle strate d'un composant distinct et complexifierait l'analyse des résultats. De plus, la technologie envisagée pour la conception des TENG consiste à guiper des fils conducteurs avec du PTFE et du Polymamide 6.6, sans aucun intermédiaire entre les matériaux. Par conséquent l'ajout d'une colle aurait altéré les mesures relatives aux plaques par rapport à celles effectuées grâce aux fils.

4.2.5 Chaussette-textile

Dans l'objectif de procéder à des essais sur la technologie choisie pour l'élaboration du TENG, l'entreprise SOFILA a réalisé un démonstrateur d'un T-TENG. Ces échantillons se composent de fils conducteurs guipés, puis tricotés afin d'obtenir deux « chaussettes », une en PTFE et une autre en polyamide 6.6. De plus, chaque partie dispose d'une surface $S = 156 \text{ cm}^2 \pm 7 \%$, reliée l'une à l'autre par une résistance de charge $R = 50 \text{ M}\Omega$ et mise en mouvement à une fréquence $F = 4,2 \text{ Hz}$. Comme le montre la figure 4.23, l'interstice entre les fils au niveau des mailles reste assez important. Il convient donc de déterminer l'aire de contact véritable avant toute mesure.

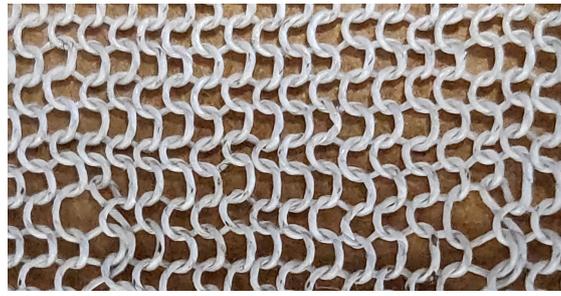


FIGURE 4.23 – Photo des mailles du démonstrateur

La conception du filament repose sur du double guipage, ce qui exige une épaisseur de $345,2 \text{ nm} \pm 7 \%$. La technique de création des étoffes impose quant à elle un espace entre les fibres supposées rectangulaires et d'étendue moyenne de $1,31 \text{ mm}^2$. Cela implique que la superficie effective de contact devienne $S = 28,36 \text{ cm}^2 \pm 7 \%$. Cette dernière reste proche de la surface employée avec les panneaux à films homogènes et une comparaison semble importante afin de déterminer si les tests réalisés auparavant peuvent s'appliquer au T-TENG. L'allure générale des « signaux-chaussette » présente une forme similaire, car composée d'un pic positif suivi d'un pic négatif. Cette forme coïncide avec celle du signal-plaque homogène. La figure 4.24 permet de bien visualiser les mesures effectuées.

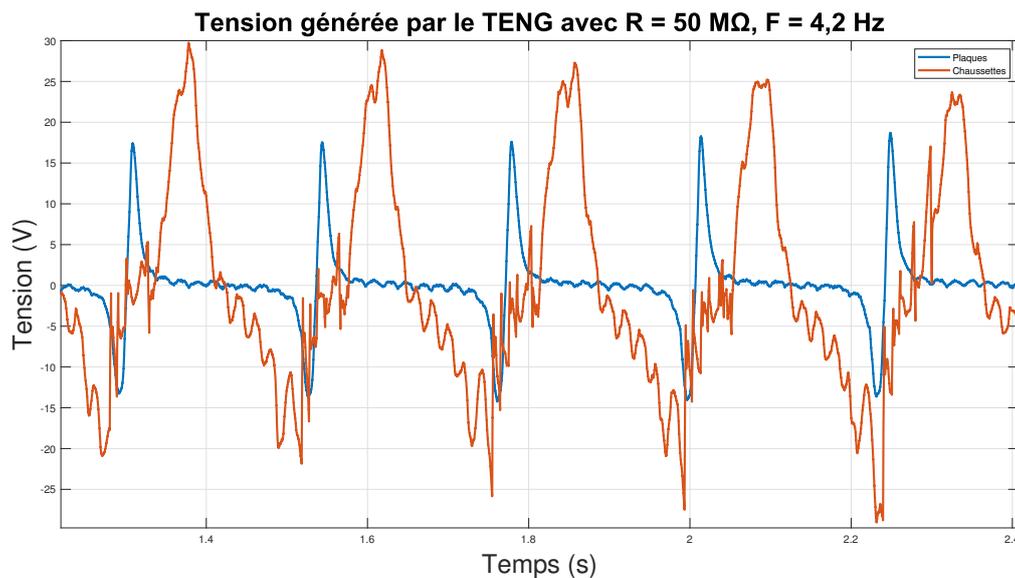


FIGURE 4.24 – Comparaison de la tension produite entre le TENG à plaques et le TENG textile

Cependant, la tension crête à crête demeure bien meilleure via la « chaussette » avec $50,63 \text{ V}$ contre $30,65 \text{ V}$ pour le TENG à film homogène. Conformément à la loi d'ohm, le courant généré par le TENG et traversant la résistance de charge R , présente la même forme que la tension avec un pic positif à $0,59 \mu\text{A}$ et un pic négatif à $0,41 \mu\text{A}$. La figure 4.25 montre ceci avec précision.

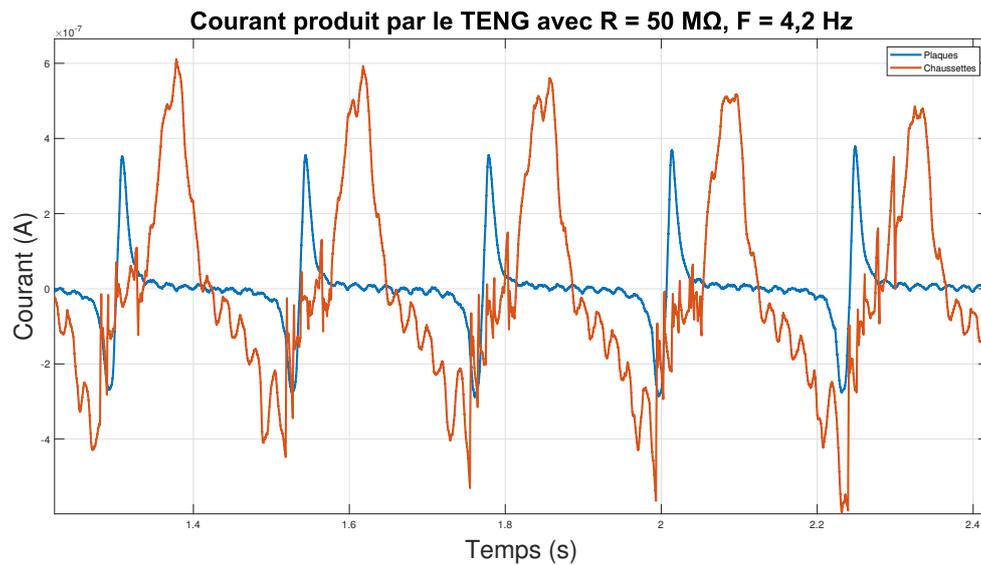


FIGURE 4.25 – Comparaison du courant produit entre le TENG à plaques et le TENG textile

Ces deux derniers résultats permettent de déterminer la puissance instantanée en effectuant le produit entre la tension et le courant. Comme le montre la figure 4.26., cette puissance est supérieure à celle fournie par le TENG à film homogène.

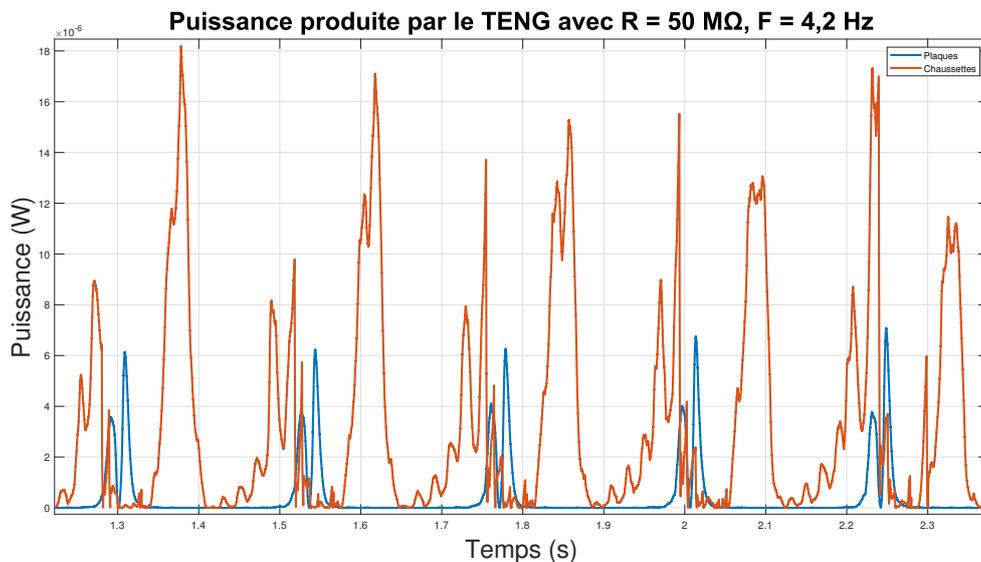


FIGURE 4.26 – Comparaison de la puissance produite entre le TENG à plaques et le TENG textile

A partir de la puissance, le calcul de l'énergie moyenne fournie par le T-TENG durant un cycle est de $6,67 \times 10^{-7} J$, alors qu'elle n'est que de $1,34 \times 10^{-7} J$ pour le film homogène. L'augmentation de la puissance produite par le T-TENG pourrait s'expliquer quant à de multiples facteurs, dont les principaux résident dans l'épaisseur du diélectrique ainsi que dans la qualité de recouvrement du conducteur par l'isolant. L'objectif des TENG à films homogènes consiste à reproduire le plus fidèlement possible les spécifications du T-TENG. Il convient par conséquent de plaquer le plus possible les diélectriques en film

homogène sur une surface métallique. Cependant, pendant les campagnes de mesures, de nombreuses zones d'air apparaissent, produisant ainsi des résultats inférieurs à ceux fournis par le T-TENG.

4.3 Comparaison entre les mesures et la modélisation

Il convient à présent de confronter les données acquises au cours des expérimentations avec celles retournées par les simulations afin de justifier des équations soumises.

La campagne de mesure opérée offre une meilleure compréhension du fonctionnement des tribogénérateurs. Les analyses effectuées avec différentes surfaces, diverses fréquences de mouvement et différentes résistances de charge permettent une utilisation optimale des TENG. Cependant, cette étude autorise aussi la vérification du modèle suggéré précédemment. En effet, quelques différences persistent entre les formules proposées ici et celles développées dans [127]. Bien que les résultats demeurent semblables, un « offset » conséquent apparaît sur la courbe des charges lors de l'emploi des équations de [127]. La figure 4.27 présente donc les courbes de charge qui circulent au travers de la résistance entre les bornes du TENG lorsque $R = 40 \text{ M}\Omega$, $F = 4,2 \text{ Hz}$, $S = 79,59 \text{ cm}^2$ et que les charges statique $\rho_T = 8,35 \times 10^8 \text{ C/m}^3$ (ce qui signifie que $\sigma_T = 1,67 \text{ C/m}^2$).

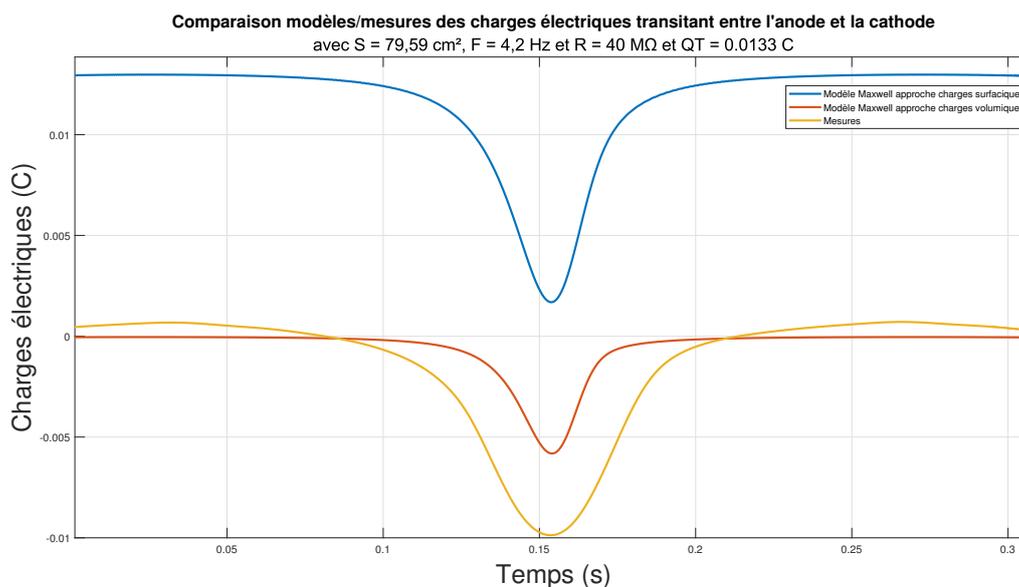


FIGURE 4.27 – Comparaison entre les modèles et la mesure des charges électriques $Q_u(t)$ transitant entre l'anode et la cathode

Pour définir la variation des charges à partir du courant, il convient de déterminer l'intégrale du courant mesuré. Cette opération s'effectue grâce à une fonction directement intégrée dans Matlab « cumtrapz » (qui utilise la méthode des trapèzes). En comparant les tracés, il semble que l'offset qui intervient dans la modélisation de [127] ne soit pas conforme aux analyses. Les équations développées durant cette thèse apparaissent donc comme plus précises pour le calcul des charges. Cependant, l'allure de la courbe du courant mesuré coïncide avec les deux approches ainsi que le montre la figure 4.28.

Le courant correspond à la dérivée des charges par rapport au temps. Or la dérivée d'une constante est égale à zéro. C'est pour cette raison que la forme des courbes de

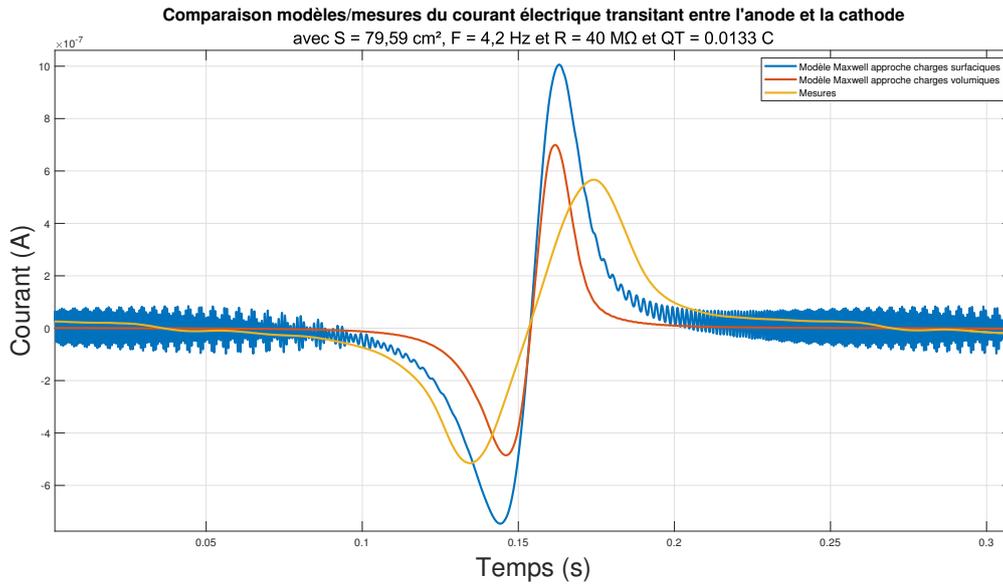


FIGURE 4.28 – Comparaison entre les modèles et la mesure du courant généré par le TENG

courant reste identique. Il est néanmoins possible de constater un écart d'amplitude (avec la même quantité de charges σ_T). En ce qui concerne cette deuxième variation, les formules développées ici concordent davantage. De plus, des oscillations dues majoritairement au calcul numérique de l'équation différentielle apparaissent sur la courbe produite par les équations de [127]. Les divergences qui existent entre la courbe mesurée et celle définie par le modèle présenté plus haut s'expliquent en partie par les composants parasites propres au circuit d'acquisition. Il faudrait alors les prendre en compte dans la simulation pour que les courbes tendent à devenir identiques. Ces comparaisons permettent donc de valider les équations développées durant cette thèse et ouvrent la voie à une nouvelle approche théorique pour les TENG.

Bien que plus complexe, l'emploi des équations complètes de Maxwell se révéla bénéfique pour la modélisation du TENG. Les résultats retournés semblent plus robustes et plus précis que ceux obtenus avec les approches par couches et les charges surfaciques. Les mesures effectuées grâce au banc permirent également de mettre en lumière l'impact d'une phase de préfrottement sur la puissance délivrée par le TENG. Cette dernière peut facilement être appliquée et apparaît essentielle pour que la conversion de l'énergie en énergie électrique soit optimale. Les analyses ont aussi confirmé l'importance d'une grande surface de contact et d'une fréquence de mouvements élevée. De plus, les résultats des études sur la variation de l'impédance de charge démontrèrent que l'impédance interne des TENG est très forte. Il convient donc à présent d'observer si le TENG, via les conditions idéales identifiées dans ce chapitre, est capable d'alimenter une batterie.

Chapitre 5

Couplage TENG-Pont redresseur-Batterie souple

Ce dernier chapitre présente la première campagne d'acquisition de données relatives au couplage du TENG avec le circuit responsable de la gestion de l'énergie. L'analyse expose deux étapes de mesure distinctes.

La première étude vise à observer la quantité d'énergie stockée dans un condensateur placé en sortie d'un pont de diode sans batterie comme le montre la figure 5.1. L'objectif recherché ici tend dans un premier temps à s'assurer que le condensateur reçoit bien l'énergie produite par le TENG et dans un deuxième temps à visualiser la durée de chargement de la capacité.

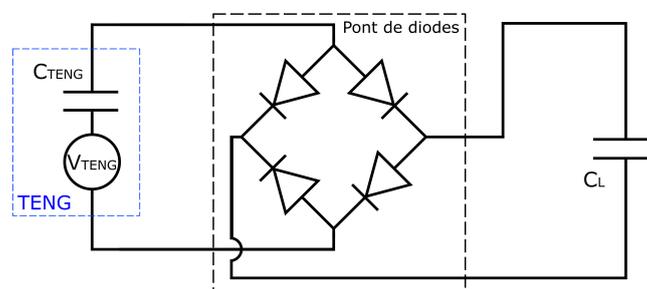


FIGURE 5.1 – Schéma représentant le câblage du TENG avec le circuit de gestion d'énergie, chargé par un condensateur de lissage C_L

La seconde étude consiste à examiner le chargement de la batterie souple lorsque cette dernière se trouve disposée aux bornes de la capacité de lissage comme le montre la figure 5.2. Ces mesures doivent rendre compte de la quantité d'énergie transmise à la batterie et doivent mettre en évidence le temps nécessaire pour atteindre une charge complète.

Les études réalisées et présentées dans la chapitre 4 montrent que le signal produit par le TENG dépend du mouvement appliqué au dispositif qui impose donc une différence de potentiel variable. Or l'alimentation d'un circuit électronique ou d'une batterie se réalise grâce à une tension continue. De plus, au regard des puissances fournies par les TENG, le système de redressement du voltage doit comporter uniquement des éléments passifs. De cette manière, toute l'énergie disponible se stocke dans la batterie ou alimente les composants utiles aux mesures, aux analyses ou à la communication de données. Très peu

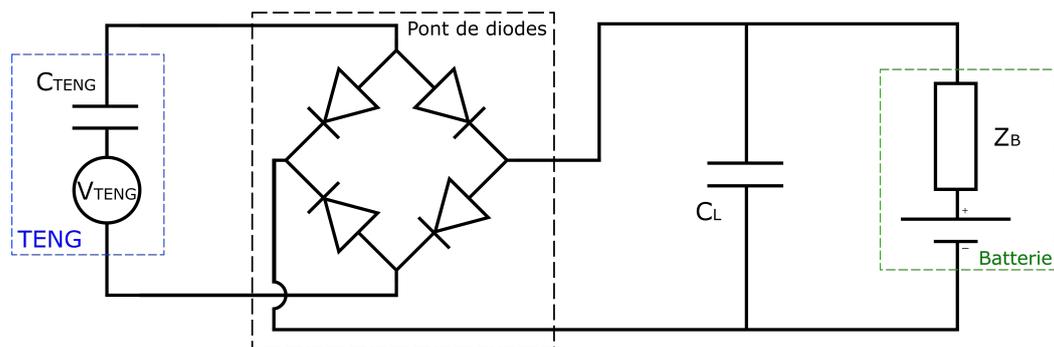
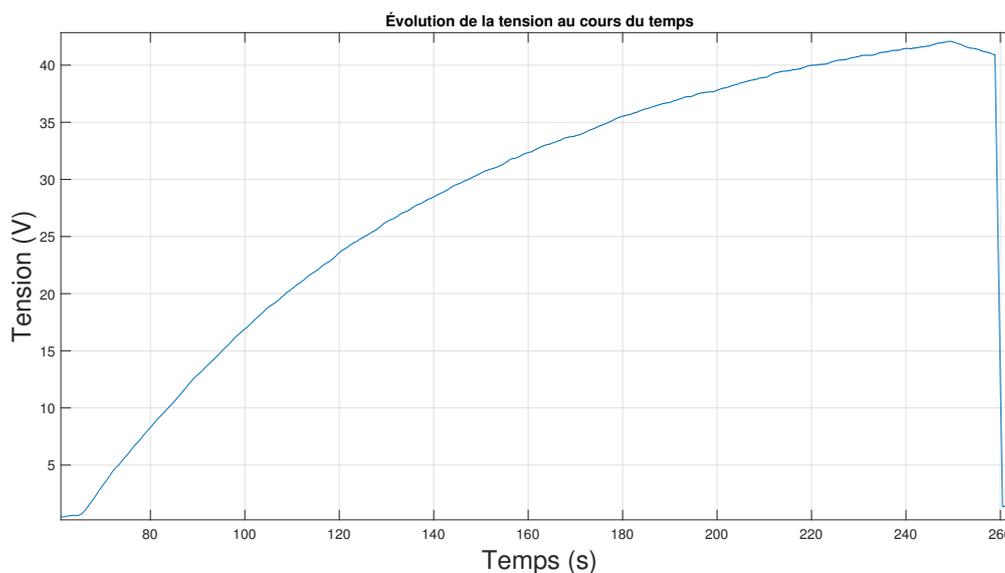


FIGURE 5.2 – Schéma du pont redresseur couplé à une batterie souple

d'études traitent pour l'instant de circuit de redressement passif pour tribogénérateur et dans [149] un pont redresseur à diode semble offrir un lissage suffisant, sans pour autant engendrer beaucoup de pertes. La réalisation d'un test qui implique un système de lissage couplé à un TENG et à une batterie doit donc justifier de l'architecture proposée par le circuit en figure 5.2.

5.1 Condensateur simple

Le TENG à plaque métallique dispose d'une surface $S = 79,59 \text{ cm}^2$ et effectue ici des mouvements « contact-séparation » successifs à une fréquence $F = 4,2 \text{ Hz}$. Une étape de prérottement de 120 allers-retours à $4,2 \text{ Hz}$ permet une collecte maximale de charge statique. Dans les conditions spécifiées sur la figure 5.1, la capacité $C_L = 94 \text{ nF}$ emmagasine l'énergie en provenance du pont de diode et se charge. Cela implique que la tension à ces électrodes croît jusqu'à une limite qui équivaut à la valeur crête du voltage produit par le TENG (si le condensateur le tolère).

FIGURE 5.3 – Évolution de la tension emmagasinée par C_L

Le tracé de la tension mesurée aux bornes de la capacité C_L exposé en figure 5.3 montre ainsi le bon fonctionnement du redresseur. La courbe de charge du condensateur augmente progressivement et atteint $42,10\text{ V}$ au bout de $187,38\text{ s}$ (800 mouvements). La brutale chute de tension à la fin de l'acquisition correspond à la mise en court-circuit du condensateur. Cependant, à l'image des analyses soumises dans les parties précédentes, la tension seule ne permet pas de rendre compte de l'efficacité du circuit de redressement. Il convient de s'intéresser à l'évolution de l'énergie stockée par le condensateur au cours du temps. Ceci est présenté dans la figure 5.4.

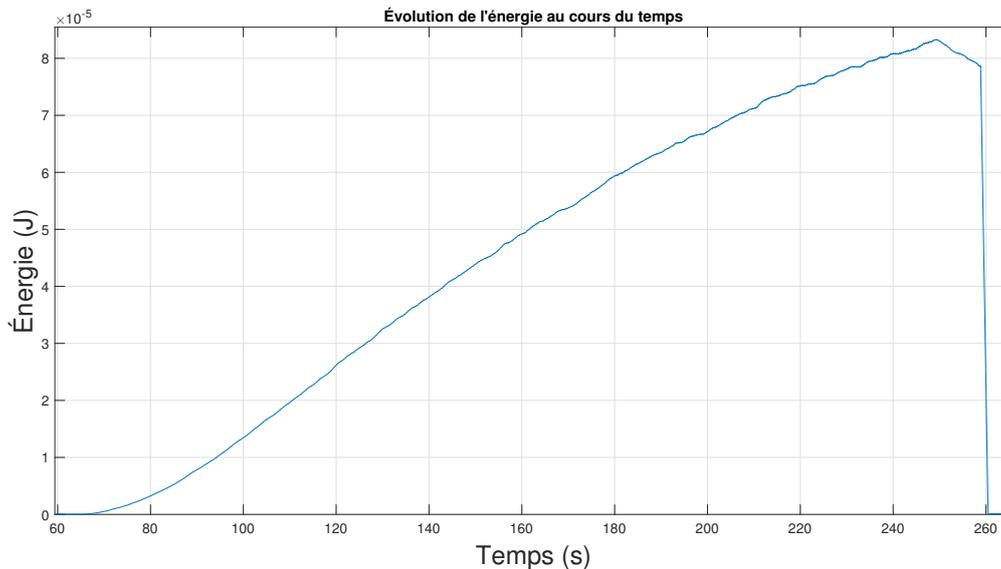


FIGURE 5.4 – Évolution de l'énergie emmagasinée par C_L

Cette dernière augmente de la même manière que la courbe de la tension jusqu'à atteindre $8,33 \times 10^{-5}\text{ J}$ à l'issue de 800 battements ($190,47\text{ s}$). L'énergie moyenne par mouvement croît à $6,46 \times 10^{-7}\text{ J}$ lorsque la résistance de charge semble assez bien adaptée au TENG comme le montre la figure 4.14. Dans ces conditions, au bout de 800 « contacts-séparations » l'énergie produite correspondrait à $800 \times 6,46 \times 10^{-7} = 5,17 \times 10^{-4}\text{ J}$. Cela signifie que seulement $16,11\%$ de l'énergie générée par le TENG se retrouve dans le condensateur. Cette valeur découle du mauvais ajustement entre la capacité et le TENG. Il conviendra donc de résoudre ce problème afin d'assurer un transfert optimal de la puissance.

5.2 Circuit de charge : condensateur et batterie souple

Les batteries lithium-ion (Li-ion) permettent d'assurer un stockage sûr de l'énergie disponible en sortie du circuit de redressement. En effet, ces dernières offrent une densité énergétique élevée. Elles se composent de deux électrodes, séparées par un électrolyte. Cependant, les déformations mécaniques très limitées, tolérées par ces éléments rigides les rendent inadaptées pour une application sur textile. Le FEL a donc développé une nouvelle technologie de batterie souple apte à supporter des distorsions importantes tout en conservant leur efficacité [2] [140]. Afin de vérifier les conditions d'utilisations finales,

une batterie similaire à celle présentée en figure 5.5 a été connectée aux bornes de la capacité C_L .



FIGURE 5.5 – Batterie souple développée au FEL

La tension emmagasinée par le condensateur augmente au fur et à mesure des mouvements bien que peu d'énergie transite jusqu'à ce dernier. Il convient donc de vérifier si le circuit présenté en figure 5.2 permet le chargement d'une batterie. Ici, le TENG bénéficie des mêmes caractéristiques que celui employé précédemment. Il dispose d'une surface $S = 79,59 \text{ cm}^2$, le mouvement conserve sa fréquence $F = 4,2 \text{ Hz}$, l'étape de pré-frottement est également maintenue (avec 120 allers-retours) et la capacité de filtrage demeure inchangée $C_L = 94 \text{ nF}$. De plus, la batterie souple est chargée avant utilisation à $2,4 \text{ V}$ afin que son comportement se trouve sur le plateau de délimitation [32] (zone dans laquelle la batterie fonctionne sans risquer de s'endommager). La figure 5.6 présente l'évolution de la tension aux bornes de la batterie quand un mouvement « contact-séparation » est appliqué au TENG et lorsqu'aucun mouvement n'est produit.

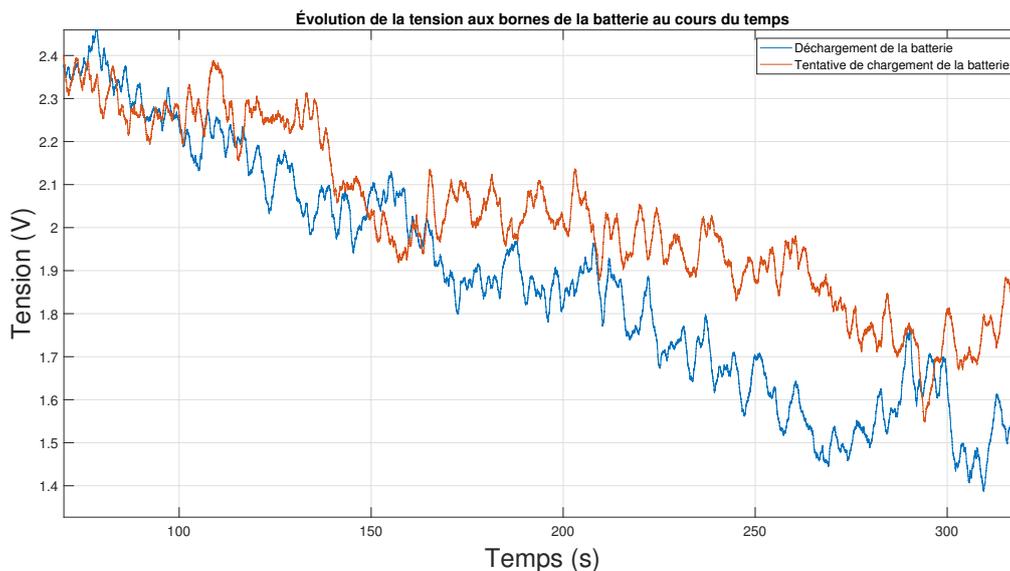


FIGURE 5.6 – Évolution de l'énergie emmagasinée par C_L

La figure 5.6 montre une chute de tension continue de la batterie (au cours des mouvements) qui correspond à la chute de tension observée pendant que la batterie se décharge de manière naturelle. Cela signifie que le circuit présenté en figure 5.2 ne permet pas un transfert convenable de puissance. Ce résultat découle principalement de la mauvaise adaptation d'impédance entre la batterie et le TENG. En effet, la batterie souple dispose d'une impédance interne faible Z_B comprise entre 50 et 200Ω alors que le TENG bénéficie d'une résistance interne de $40 \text{ M}\Omega$. Une telle différence implique que seule une infime partie de l'énergie produite soit transmise à la batterie et que cela ne suffise pas pour contrer sa décharge.

Ce chapitre a présenté une étude qui regroupe à la fois le TENG, le circuit de gestion de l'énergie et une batterie souple. L'intégration de ces trois éléments a été un premier essai, qui n'a pas permis de valider la structure du TENG, couplée à ses paramètres externes tels que F , S et la séquence de préfrottements. Les résultats sont certes, décevants, mais les raisons de ce mauvais couplage sont maintenant ciblées. Le choix du circuit de gestion est pour le moment incontournable, car constitué de composants passifs. Les variables d'ajustement ne pourront venir que des deux autres éléments : le TENG et la batterie. Dans l'avenir, le TENG devra fournir un courant beaucoup plus important. Cela signifie que des recherches devront être menées sur la constitution du fil, avec certainement des topologies de tricotage et/ou tissage différentes, afin de disposer d'une densité de charges plus conséquente.

Par ailleurs, la batterie souple devra être scrupuleusement adaptée au TENG sur l'aspect impédance interne, qui, comme nous l'avons vu, n'est pas encore le cas. Cette étude contient un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques. Les futurs travaux pourront s'appuyer sur les résultats présentés, à la fois, dans les chapitres précédents et dans celui-ci.

Chapitre 6

Conclusion

L'une des principales exigences des textiles intelligents consiste à parvenir à inclure une source d'énergie pour alimenter les dispositifs électroniques intégrés. Dans ce contexte, les nanogénérateurs triboélectriques textiles (T-TENG) sont particulièrement bien adaptés pour jouer ce rôle de manière imperceptible au cœur des textiles, ce qui les rend très intéressants pour le développement de futurs systèmes autonomes. Le projet réalisé vise à apporter une compréhension globale des TENG textiles portables (T-TENG) aux spécialistes de trois domaines différents : une modélisation plus profonde du phénomène de triboélectricité, l'intégration textile des matériaux nécessaires, et l'intégration électronique sur les textiles des circuits de transfert d'énergie pour les applications embarquées.

Le sujet de recherche développé ici s'intéresse principalement à la théorie et à la modélisation de l'effet triboélectrique ainsi qu'à l'incidence des circuits de transmissions d'énergie sur les puissances délivrées par les tribogénérateurs électriques. La connaissance du phénomène a permis la mise en place d'une méthode qui améliore l'énergie produite par un TENG à partir d'une séquence de frottement latérale qui présente un effet de réservoir avant les mouvements verticaux à fréquence humaine. Les résultats expérimentaux ont témoigné de l'utilité d'une pareille approche et de l'impact de paramètres tels que la fréquence du mouvement humain, la surface du diélectrique et l'impédance de la charge.

Les analyses montrent que la puissance générée par un TENG s'accroît sensiblement grâce à la séquence de pré-frottement et cette dernière semble essentielle à l'emploi des TENG comme source d'énergie. Plus la phase d'excitation comportera un nombre conséquent de frictions, plus le TENG convertira efficacement l'énergie mécanique en énergie électrique. Une limitation est cependant apparue puisqu'au-delà d'un certain nombre de frottements la puissance engendrée s'est stabilisée.

Les observations relatives aux surfaces des TENG mettent en évidence la nécessité d'une aire de contact maximal entre l'anode et la cathode. Une superficie importante permettra de collecter beaucoup plus de charges comparativement à une plus petite. Néanmoins, une grande surface apporte de nouvelles exigences inhérentes à la réalisation technique, mais aussi, potentiellement, à la circulation et à la répartition des charges statiques.

La fréquence du mouvement imposée aux électrodes joue un rôle majeur dans ce type de générateur. Ici encore, une haute fréquence reste préférable pour une meilleure efficacité.

Quant à l'impédance de charge, celle-ci doit demeurer assez forte pour assurer un

transfert de puissance optimal. Malheureusement, les contraintes liées au matériel de mesures ne permirent pas d'effectuer des relevés précis pour de très faibles résistances ou pour des résistances supérieures à $50 M\Omega$.

Bien qu'elle ne fut pas étudiée directement, la qualité de couverture du conducteur par l'isolant s'avéra importante. En effet, les TENG à films homogènes ne disposaient pas d'un recouvrement aussi bien exécuté que les fils guipés. Plusieurs « bulles d'airs » apparurent durant les manipulations et conduisirent à de moins bons résultats. Il semble donc que l'emploi de T-TENG soit bénéfique.

Ainsi la réalisation d'un tribogénérateur textile optimal, adapté aux mouvements humains, doit prendre en compte la physiologie du porteur afin de positionner les électrodes entre deux zones de contact suffisamment grandes, pour lesquelles des gestes rapides de friction et de « contacts-séparation » interviennent. De plus, le circuit de gestion de puissance devra être ajusté pour de hautes impédances et de basses fréquences.

L'approche de Maxwell semble efficace pour la modélisation des TENG. Elle permet de visualiser les effets du changement de la fréquence, des variations de surfaces ainsi que de la modification de la résistance de charge. Cependant, certains problèmes numériques apparaissent notamment à cause de l'utilisation d'équation différentielle (et du « solveur » de Matlab). Une expression complète des équations via l'usage de charges volumiques apporte une première solution en affinant les résultats renvoyés par les outils de calculs numériques. Les courbes ainsi retournées sont plus lisibles et plus précises. De plus, avec les modélisations auparavant effectuées (en recourant aux charges surfaciques), une valeur « d'offset » se manifeste qui n'est pas présente sur les mesures. L'emploi des nouvelles formules permet donc de résoudre ce problème et de « fiter » au mieux avec les observations.

Une grande variété de T-TENG a été explorée dans les études précédentes, mais plusieurs points clés doivent être réunis dans la conception d'un seul dispositif afin de maximiser les chances d'être largement adopté dans un court laps de temps. Le T-TENG doit être fabriqué à l'aide de procédés compatibles avec la chaîne de valeur textile ou déjà intégrés dans celle-ci, et être composé de matériaux déjà disponibles ou facilement intégrables. La résistance aux déformations mécaniques à long terme et au lavage domestique est cruciale, en particulier si le T-TENG est intégré à des vêtements qui sont proches du corps et doivent être lavés fréquemment. La perte drastique de performance de la plupart des TENG dans un environnement humide peut être problématique dans le cas d'une intégration pour des applications de vêtements de sport, comme le risque de pluie dans le cas de vêtements extérieurs et l'influence de la sueur s'ils sont intégrés près du corps (la plupart des zones de frottement du corps sont également des zones où la sueur apparaît facilement). Ce paramètre doit être pris en compte dès le début des essais de caractérisation afin de prévenir les dysfonctionnements du T-TENG à des niveaux de maturité technologique plus élevés lors du passage des essais en laboratoire aux essais en conditions réelles. La taille et l'imperceptibilité du T-TENG sont essentielles, l'optimisation de la structure et la conception globale de l'intégration dans le vêtement seront de la plus haute importance une fois qu'il sera prêt à être sur le marché. Enfin, un standard de mesure des performances est nécessaire afin de pouvoir comparer l'efficacité de différents systèmes T-TENG (même intensité de déclenchement par exemple). Les améliorations de l'énergie produite devraient quant à elles se concentrer sur la qualité et le changement des diélectriques afin d'augmenter l'effet de réservoir, la qualité du fil afin d'obtenir une meilleure couverture des diélectriques et la topologie du tricot.

Lors de l'analyse des répercussions du pré-frottement, une limitation est apparue et il conviendra d'étudier plus finement le plafond et les conséquences d'une phase bien plus longue ou bien plus rapide. De plus, il faudra, pour finir de bien caractériser cette phase, mesurer la persistance précise du « boost » et déterminer quels paramètres seraient susceptibles de l'influencer. Enfin, des observations de la dégradation des diélectriques au fur et à mesure des frottements ainsi que sur les performances données pourraient autoriser une estimation de la durée de vie des TENG.

L'intégration imperceptible sur les textiles du circuit de transfert d'énergie pour la conversion et le stockage des charges générées par le T-TENG nécessite l'interconnexion fiable de divers composants électroniques (composants passifs, microcontrôleur, batterie, etc.) sur des pistes conductrices. Des pistes conductrices à faible résistivité et à résolution latérale compatible avec le pas fin d'un microcontrôleur peuvent être obtenues par des techniques d'impression et d'ablation laser. Aujourd'hui, la sérigraphie est probablement la technique la plus aboutie et la plus mature. Le collage et le brasage sont les deux principaux procédés utilisés pour atteindre un niveau élevé de fiabilité des interconnexions. La robustesse aux contraintes mécaniques et la lavabilité restent des défis et nécessitent l'utilisation d'encres extensibles et d'une couche protectrice encapsulante.

L'étude préliminaire des circuits de transfert d'énergie a mis en lumière les verrous à lever pour l'usage des TENG comme source d'énergie. En effet, la forte impédance du TENG, la basse fréquence des mouvements humains et les faibles niveaux d'énergie fournie imposent de sérieuses exigences au système de gestion de puissance passif. Les premières tentatives n'ont malheureusement pas permis le chargement de la batterie, ni même la prolongation de sa durée d'utilisation. Néanmoins de nombreuses pistes restent exploitables avec notamment le développement d'un transformateur d'isolement souple adapté aux TENG.

Enfin, en ce qui concerne la modélisation, seule une charge résistive a été étudiée. Cependant, le TENG doit être relié à un circuit complexe pour que l'énergie produite soit stockée. À l'avenir, il conviendra donc de résoudre ce problème à l'aide d'une nouvelle approche en intégrant à la modélisation des composants inductifs et capacitifs. Un autre verrou concerne également la répartition des charges statique et leur apparition. En effet, les modèles proposés pour l'instant considèrent que $\rho_T(t)$ demeurent constantes. Or, ces charges augmentent significativement lors de la phase de frottement et diminuent peu à peu (à un rythme non étudié pour l'instant). Il conviendra donc de quantifier ces effets, de soumettre des modèles adéquats et de modifier les simulations en conséquence.

Table des figures

1.1	Architecture des objets communicants	19
1.2	Évolution du type de connexion à domicile	20
1.3	Taux d'équipement en enceinte connectée à domicile	23
1.4	Évolution du type d'équipement en objets connectés à domicile	24
1.5	Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur piézoélectrique	27
1.6	Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur thermoélec- trique	28
1.7	Schéma représentatif du fonctionnement d'un nanogénérateur photovol- taïques	29
2.1	Visualisation des applications potentielles des TENG	33
2.2	Schéma simplifié du fonctionnement d'un TEN	35
2.3	Schéma du fonctionnement d'un TENG en mode verticale	36
2.4	Schéma du fonctionnement d'un TENG en mode latérale	38
2.5	Représentation du modèle électrique simplifié du TENG	39
2.6	Utilisation des circuits $L - C$	41
2.7	Utilisation d'un transformateur	41
2.8	Circuit complet avec un transformateur	42
2.9	Application du transformateur au TENG	42
2.10	Circuit avec un transformateur idéal et un pont de diodes	43
2.11	Circuit de chargement universel	43
2.12	Circuit de chargement avec un doubleur de Bennet	44
3.1	Format de représentation des nombres flottants en simple précision	72
3.2	Schéma simplifier du fonctionnement d'un TENG	73
3.3	Courbes des différentes fonctions de représentation du mouvement humain	74
3.4	Schéma d'un condensateur plan simple	75
3.5	Comparaison des valeurs de capacité d'un condensateur plan pour diffé- rentes épaisseurs d'isolant	77

3.6	a. Variation des charges $\rho_U(t)$ (gauche); b. Variation des charges $\rho_T(t)$ (droite)	78
3.7	Comparaison entre la tension appliquée au composant et celle retrouvée avec les équations de Maxwell	78
3.8	Schéma d'un condensateur plan double	79
3.9	a. Variation des charges $\rho_U(t)$ (gauche); b. Variation des charges $\rho_T(t)$ (droite)	81
3.10	Comparaison entre la tension appliquée au composant et celle retrouver avec les équations de Maxwell	82
3.11	Schéma qui représente la localisation des charges présentes dans un TENG	83
3.12	Évolution de $\rho_U(t)$ lors de mouvements	84
3.13	Évolution du courant produit lors de mouvements	85
3.14	Évolution de la tension produite lors de mouvements	85
3.15	Comparaison des évolutions de $\rho_U(t)$ lors de mouvements entre deux approches différentes	86
3.16	Comparaison des évolution des courants produits lors de mouvements entre deux approches différentes	86
4.1	a. Banc de mesure, vue latérale (gauche); b. Banc de mesure, vue du dessus (droite)	88
4.2	Schéma du montage d'acquisition de la tension produite par un TENG	89
4.3	Schéma des étapes d'excitation du TENG	90
4.4	Tension aux bornes de $R = 50 M\Omega$ sans phase de préfrottement	91
4.5	Courant traversant $R = 50 M\Omega$ sans phase de préfrottement	92
4.6	Puissance dissipée par effet Joule par $R = 50 M\Omega$ sans phase de préfrottement	92
4.7	Tension aux bornes de $R = 50 M\Omega$ avec une phase de 100 préfrottements	93
4.8	Courant qui traverse $R = 50 M\Omega$ avec une phase de 100 préfrottements	93
4.9	Puissance dissipée par $R = 50 M\Omega$ avec une phase de 100 préfrottements	94
4.10	Évolution de l'énergie moyenne dissipée par $R = 50 M\Omega$ en fonction du nombre de frottements	94
4.11	Comparaison de la tension aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R	95
4.12	Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R	96
4.13	Comparaison de la puissance fournie par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R	96
4.14	Évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de la résistance de charge R	97
4.15	Comparaison de la tension aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F	98

4.16	Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F	98
4.17	Comparaison de la puissance produite par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F	99
4.18	évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de fréquence de mouvement F	99
4.19	Comparaison de la tension produite aux bornes du TENG pour plusieurs valeurs de surface S	100
4.20	Comparaison du courant généré par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S	101
4.21	Comparaison de la puissance produite par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S	101
4.22	évolution de l'énergie produite par le TENG pour plusieurs valeurs de surface S	102
4.23	Photo des mailles du démonstrateur	103
4.24	Comparaison de la tension produite entre le TENG à plaques et le TENG textile	103
4.25	Comparaison du courant produit entre le TENG à plaques et le TENG textile	104
4.26	Comparaison de la puissance produite entre le TENG à plaques et le TENG textile	104
4.27	Comparaison ente les modèles et la mesure des charges électriques $Q_u(t)$ transitant entre l'anode et la cathode	105
4.28	Comparaison ente les modèles et la mesure du courant généré par le TENG	106
5.1	Schéma représentant le câblage du TENG avec le circuit de gestion d'énergie, chargé par un condensateur de lissage C_L	107
5.2	Schéma du pont redresseur couplé à une batterie souple	108
5.3	Évolution de la tension emmagasinée par C_L	108
5.4	Évolution de l'énergie emmagasinée par C_L	109
5.5	Batterie souple développée au FEL	110
5.6	Évolution de l'énergie emmagasinée par C_L	110

Liste des tableaux

2.1	Propriétés des T-TENG tissés	48
2.2	Propriétés des T-TENG tricotés	50
2.3	Propriétés des T-TENG multicouches, revêtus et non conventionnels dans la littérature	52
2.4	Procédés utilisés pour obtenir des pistes conductrices sur les textiles	57
2.5	Procédés utilisés pour obtenir des pistes conductrices sur les textiles	59
2.6	Synthèse des méthodes utilisées pour coller des composants électroniques sur des pistes conductrices en textile	64
2.7	Méthodes utilisées pour souder des composants électroniques sur des pistes conductrices en textile	64
3.1	Limite haute, limite basse et précision pour la norme IEEE 754	72
4.1	Paramètres variables lors des campagnes de mesures	90

Bibliographie

- [1] Abdelsalam AHMED et al. « Integrated Triboelectric Nanogenerators in the Era of the Internet of Things ». In : *Advanced Science* 6.24 (déc. 2019), p. 1802230. ISSN : 2198-3844, 2198-3844. DOI : [10.1002/advs.201802230](https://doi.org/10.1002/advs.201802230). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.201802230> (visité le 08/08/2023).
- [2] Alban ALBERTENGO et al. « Enhancing Electrochemical Performance of Stretchable/Flexible Li-Ion Microbatteries by Tuning Microstructured Electrode Dimensions ». In : *Advanced Materials Interfaces* 9.13 (2022). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/admi.202102541>, p. 2102541. ISSN : 2196-7350. DOI : [10.1002/admi.202102541](https://doi.org/10.1002/admi.202102541). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admi.202102541> (visité le 23/08/2023).
- [3] Robert ALICKI et Alejandro JENKINS. « Quantum Theory of Triboelectricity ». In : *Physical Review Letters* 125.18 (30 oct. 2020), p. 186101. ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : [10.1103/PhysRevLett.125.186101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.186101). URL : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.186101> (visité le 08/08/2023).
- [4] Rami ALKHATIB et al. « Task-Specific Gait Analysis : Faller versus Non-Faller Comparative Study ». In : *Journal of Computer and Communications* 6.1 (29 déc. 2017). Number : 1 Publisher : Scientific Research Publishing, p. 81-91. DOI : [10.4236/jcc.2018.61009](https://doi.org/10.4236/jcc.2018.61009). URL : <http://www.scirp.org/Journal/Paperabs.aspx?paperid=81427> (visité le 23/06/2023).
- [5] Ugis BRIEDIS, Aleksandrs VALISEVSKIS et Marianna GRECKA. « Development of a Smart Garment Prototype with Enuresis Alarm Using an Embroidery-machine-based Technique for the Integration of Electronic Components ». In : *Procedia Computer Science* 104 (2017), p. 369-374. ISSN : 18770509. DOI : [10.1016/j.procs.2017.01.147](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.147). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050917301485> (visité le 08/08/2023).
- [6] Leah BUECHLEY. « A Construction Kit for Electronic Textiles ». In : *2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*. 2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers. ISSN : 1550-4816. Montreux, Switzerland : IEEE, oct. 2006, p. 83-90. ISBN : 978-1-4244-0597-8. DOI : [10.1109/ISWC.2006.286348](https://doi.org/10.1109/ISWC.2006.286348). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4067731/> (visité le 08/08/2023).
- [7] Leah BUECHLEY et Michael EISENBERG. « Fabric PCBs, electronic sequins, and socket buttons : techniques for e-textile craft ». In : *Personal and Ubiquitous Computing* 13.2 (fév. 2009), p. 133-150. ISSN : 1617-4909, 1617-4917. DOI : [10.1007/s00779-007-0181-0](https://doi.org/10.1007/s00779-007-0181-0). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00779-007-0181-0> (visité le 08/08/2023).

- [8] Zhipeng CAI et al. « Design of a smart ECG garment based on conductive textile electrode and flexible printed circuit board ». In : *Technology and Health Care* 25.4 (9 août 2017), p. 815-821. ISSN : 09287329, 18787401. DOI : [10.3233/THC-170828](https://doi.org/10.3233/THC-170828). URL : <https://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/THC-170828> (visité le 08/08/2023).
- [9] Andr e CATARINO et al. « E-Legging for Monitoring the Human Locomotion Patterns ». In : *Journal of Textile Engineering* 59.6 (2013), p. 153-158. ISSN : 1346-8235, 1880-1986. DOI : [10.4188/jte.59.153](https://doi.org/10.4188/jte.59.153). URL : https://www.jstage.jst.go.jp/article/jte/59/6/59_153/_article (visité le 08/08/2023).
- [10] CEA. *L' nergie*. 20 d c. 2017. URL : <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/essentiel-sur-energies.aspx> (visité le 23/06/2023).
- [11] Aihua CHEN et al. « Polymer Materials for High-Performance Triboelectric Nanogenerators ». In : *Advanced Science* 7.14 (2020). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.202000186>, p. 2000186. ISSN : 2198-3844. DOI : [10.1002/advs.202000186](https://doi.org/10.1002/advs.202000186). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/advs.202000186> (visité le 08/12/2021).
- [12] Chaoyu CHEN et al. « Direct Current Fabric Triboelectric Nanogenerator for Biomotion Energy Harvesting ». In : *ACS Nano* 14.4 (28 avr. 2020), p. 4585-4594. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/acsnano.0c00138](https://doi.org/10.1021/acsnano.0c00138). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.0c00138> (visité le 08/08/2023).
- [13] Jie CHEN et al. « Traditional weaving craft for one-piece self-charging power textile for wearable electronics ». In : *Nano Energy* 50 (août 2018), p. 536-543. ISSN : 22112855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2018.06.009](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.009). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285518304038> (visité le 08/08/2023).
- [14] Jinkai CHEN et al. « Universal Triboelectric Nanogenerator Simulation Based on Dynamic Finite Element Method Model ». In : *Sensors* 20.17 (jan. 2020). Number : 17 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 4838. DOI : [10.3390/s20174838](https://doi.org/10.3390/s20174838). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4838> (visité le 08/12/2021).
- [15] Xiaochen CHEN, Leena UKKONEN et Johanna VIRKKI. « Reliability evaluation of wearable radio frequency identification tags : Design and fabrication of a two-part textile antenna ». In : *Textile Research Journal* 89.4 (f v. 2019), p. 560-571. ISSN : 0040-5175, 1746-7748. DOI : [10.1177/0040517517750651](https://doi.org/10.1177/0040517517750651). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0040517517750651> (visité le 08/08/2023).
- [16] Dongwhi CHOI et al. « Spontaneous occurrence of liquid-solid contact electrification in nature : Toward a robust triboelectric nanogenerator inspired by the natural lotus leaf ». In : *Nano Energy* 36 (1^{er} juin 2017), p. 250-259. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2017.04.026](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.026). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285517302306> (visité le 08/12/2021).
- [17] Jung-Yeol CHOI et Tae Sung OH. « Contact Resistance Comparison of Flip-Chip Joints Produced with Anisotropic Conductive Adhesive and Nonconductive Adhesive for Smart Textile Applications ». In : *MATERIALS TRANSACTIONS* 56.10 (2015), p. 1711-1718. ISSN : 1345-9678, 1347-5320. DOI : [10.2320/matertrans.M2015106](https://doi.org/10.2320/matertrans.M2015106). URL : https://www.jstage.jst.go.jp/article/matertrans/56/10/56_M2015106/_article (visité le 08/08/2023).

- [18] Jung-Yeol CHOI et Tae Sung OH. « Contact Resistance of Flip-Chip Joints in Wearable Electronic Textiles ». In : *Journal of Electronic Materials* 43.12 (déc. 2014), p. 4464-4471. ISSN : 0361-5235, 1543-186X. DOI : [10.1007/s11664-014-3431-8](https://doi.org/10.1007/s11664-014-3431-8). URL : <http://link.springer.com/10.1007/s11664-014-3431-8> (visité le 08/08/2023).
- [19] *Comment se répartit ma consommation électrique? – EDF*. URL : <https://particulier.edf.fr/fr/accueil/aide-contact/faq/suivi-conso/consommation-electrique.html> (visité le 23/06/2023).
- [20] Zifeng CONG et al. « Stretchable Coplanar Self-Charging Power Textile with Resist-Dyeing Triboelectric Nanogenerators and Microsupercapacitors ». In : *ACS Nano* 14.5 (26 mai 2020), p. 5590-5599. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/acsnano.9b09994](https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09994). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.9b09994> (visité le 08/08/2023).
- [21] Shirley COYLE et al. « Textile-Based Wearable Sensors for Assisting Sports Performance ». In : *2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*. Implantable Body Sensor Networks Conference (BSN). Berkeley, CA : IEEE, juin 2009, p. 307-311. ISBN : 978-0-7695-3644-6. DOI : [10.1109/BSN.2009.57](https://doi.org/10.1109/BSN.2009.57). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5226873/> (visité le 08/08/2023).
- [22] Nuanyang CUI et al. « Wearable Triboelectric Generator for Powering the Portable Electronic Devices ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 7.33 (26 août 2015), p. 18225-18230. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/am5071688](https://doi.org/10.1021/am5071688). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/am5071688> (visité le 08/08/2023).
- [23] Thierry DANTOINE et al. *Études médico-économiques et chutes graves du sujet âgé : quelle évaluation pour les nouvelles technologies appliquées à la prévention? Réflexions à partir de l'exemple des systèmes de Détection Systématique par Caméra Vidéo*. URL : <https://www.silvereco.fr/wp-content/uploads/2016/04/EtudePrDantoine.pdf> (visité le 19/04/2023).
- [24] DILS et al. « Investigation of the Mechanical and Electrical Properties of Elastic Textile/Polymer Composites for Stretchable Electronics at Quasi-Static or Cyclic Mechanical Loads ». In : *Materials* 12.21 (1^{er} nov. 2019), p. 3599. ISSN : 1996-1944. DOI : [10.3390/ma12213599](https://doi.org/10.3390/ma12213599). URL : <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/21/3599> (visité le 08/08/2023).
- [25] Thierry DJENIZIAN et Roger DELATTRE. « Accumulateur Déformable ». Brev. INSTITUT MINES TELECOM. 20 sept. 2018. URL : <https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=W02018167393> (visité le 23/06/2023).
- [26] Kai DONG, Xiao PENG et Zhong Lin WANG. « Fiber/Fabric-Based Piezoelectric and Triboelectric Nanogenerators for Flexible/Stretchable and Wearable Electronics and Artificial Intelligence ». In : *Advanced Materials* 32.5 (2020). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201902549>, p. 1902549. ISSN : 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.201902549](https://doi.org/10.1002/adma.201902549). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201902549> (visité le 23/06/2023).

- [27] Kai DONG et al. « 3D Orthogonal Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Biomechanical Energy Harvesting and as Self-Powered Active Motion Sensors ». In : *Advanced Materials* 29.38 (oct. 2017), p. 1702648. ISSN : 09359648. DOI : [10.1002/adma.201702648](https://doi.org/10.1002/adma.201702648). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201702648> (visité le 08/08/2023).
- [28] Kai DONG et al. « A Highly Stretchable and Washable All-Yarn-Based Self-Charging Knitting Power Textile Composed of Fiber Triboelectric Nanogenerators and Supercapacitors ». In : *ACS Nano* 11.9 (26 sept. 2017). Publisher : American Chemical Society, p. 9490-9499. ISSN : 1936-0851. DOI : [10.1021/acsnano.7b05317](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05317). URL : <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05317> (visité le 23/06/2023).
- [29] Kai DONG et al. « Smart textile triboelectric nanogenerators : Current status and perspectives ». In : *MRS Bulletin* 46.6 (juin 2021), p. 512-521. ISSN : 0883-7694, 1938-1425. DOI : [10.1557/s43577-021-00123-2](https://doi.org/10.1557/s43577-021-00123-2). URL : <https://link.springer.com/10.1557/s43577-021-00123-2> (visité le 08/08/2023).
- [30] Kai DONG et al. « Versatile Core-Sheath Yarn for Sustainable Biomechanical Energy Harvesting and Real-Time Human-Interactive Sensing ». In : *Advanced Energy Materials* 8.23 (août 2018), p. 1801114. ISSN : 16146832. DOI : [10.1002/aenm.201801114](https://doi.org/10.1002/aenm.201801114). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.201801114> (visité le 08/08/2023).
- [31] Shanshan DONG et al. « Seamlessly knitted stretchable comfortable textile triboelectric nanogenerators for E-textile power sources ». In : *Nano Energy* 78 (1^{er} déc. 2020), p. 105327. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2020.105327](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105327). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520309046> (visité le 28/10/2021).
- [32] *Dossier Le stockage de l'énergie électrochimique en technologie lithium-ion*. URL : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/sites/default/files/2021-04/Dossier%20Li-ion%20complet.pdf> (visité le 19/08/2023).
- [33] *E-Textiles 2019-2029 : Technologies, Markets and Players*. 21 mai 2019. URL : <https://www.idtechex.com/en/research-report/e-textiles-2019-2029-technologies-markets-and-players/671> (visité le 23/06/2023).
- [34] Pablo ESCOBEDO et al. « The effect of bending on laser-cut electro-textile inductors and capacitors attached on denim as wearable structures ». In : *Textile Research Journal* 90.21 (nov. 2020), p. 2355-2366. ISSN : 0040-5175, 1746-7748. DOI : [10.1177/0040517520920570](https://doi.org/10.1177/0040517520920570). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0040517520920570> (visité le 08/08/2023).
- [35] Feng-Ru FAN, Zhong-Qun TIAN et Zhong LIN WANG. « Flexible triboelectric generator ». In : *Nano Energy* 1.2 (1^{er} mars 2012), p. 328-334. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285512000481> (visité le 08/12/2021).
- [36] M. FESHANJERDI et A. MALEKAN. « Contact electrification between randomly rough surfaces with identical materials ». In : *Journal of Applied Physics* 125.16 (28 avr. 2019). Publisher : American Institute of Physics, p. 165302. ISSN : 0021-8979. DOI : [10.1063/1.5089769](https://doi.org/10.1063/1.5089769). URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5089769> (visité le 08/12/2021).

- [37] Baptiste GARNIER et al. « Electronic-components less fully textile multiple resonant combiners for body-centric near field communication ». In : *Scientific Reports* 11.1 (25 jan. 2021), p. 2159. ISSN : 2045-2322. DOI : [10.1038/s41598-021-81246-z](https://doi.org/10.1038/s41598-021-81246-z). URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-021-81246-z> (visité le 08/08/2023).
- [38] Valentin GAUBERT, Hayriye GIDIK et Vladan KONCAR. « Boxer Underwear Incorporating Textile Moisture Sensor to Prevent Nocturnal Enuresis ». In : *Sensors* 20.12 (23 juin 2020), p. 3546. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s20123546](https://doi.org/10.3390/s20123546). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3546> (visité le 08/08/2023).
- [39] Valentin GAUBERT et al. « Toward autonomous wearable triboelectric systems integrated on textiles ». In : *iScience* 25.11 (nov. 2022), p. 105264. ISSN : 25890042. DOI : [10.1016/j.isci.2022.105264](https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105264). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S258900422201536X> (visité le 17/08/2023).
- [40] Ali GHAFFARINEJAD et al. « A conditioning circuit with exponential enhancement of output energy for triboelectric nanogenerator ». In : *Nano Energy* 51 (1^{er} sept. 2018), p. 173-184. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2018.06.034](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.06.034). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285518304294> (visité le 28/10/2021).
- [41] Wei GONG et al. « Continuous and scalable manufacture of amphibious energy yarns and textiles ». In : *Nature Communications* 10.1 (20 fév. 2019), p. 868. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-019-08846-2](https://doi.org/10.1038/s41467-019-08846-2). URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08846-2> (visité le 08/08/2023).
- [42] Nils GRIMMELSMANN et al. « Mechanical and Electrical Contacting of Electronic Components on Textiles by 3D Printing ». In : *Procedia Technology* 26 (2016), p. 66-71. ISSN : 22120173. DOI : [10.1016/j.protcy.2016.08.010](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.010). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017316303577> (visité le 08/08/2023).
- [43] Xiaoyang GUAN et al. « Fiber-shaped stretchable triboelectric nanogenerator with a novel synergistic structure of opposite Poisson's ratios ». In : *Chemical Engineering Journal* 427 (jan. 2022), p. 131698. ISSN : 13858947. DOI : [10.1016/j.cej.2021.131698](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131698). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894721032794> (visité le 08/08/2023).
- [44] J. HENNIKER. « Triboelectricity in Polymers ». In : *Nature* 196.4853 (nov. 1962). Bandiera_abtest : a Cg_type : Nature Research Journals Number : 4853 Primary_atype : Research Publisher : Nature Publishing Group, p. 474-474. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/196474a0](https://doi.org/10.1038/196474a0). URL : <https://www.nature.com/articles/196474a0> (visité le 08/12/2021).
- [45] Martin HIRMAN et al. « Effect of Washing Cycles on Glued Conductive Joints Used on Stretchable Smart Textile Ribbons ». In : *2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*. 2020 IEEE 8th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). Tønsberg, Vestfold, Norway : IEEE, 15 sept. 2020, p. 1-4. ISBN : 978-1-72816-293-5. DOI : [10.1109/ESTC48849.2020.9229797](https://doi.org/10.1109/ESTC48849.2020.9229797). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9229797/> (visité le 08/08/2023).

- [46] Martin HIRMAN et al. « Electrical Resistance of Solder Joints on Conductive Ribbons ». In : *2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). Demanovska Valley, Slovakia : IEEE, mai 2020, p. 1-5. ISBN : 978-1-72816-773-2. DOI : [10.1109/ISSE49702.2020.9120981](https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120981). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9120981/> (visité le 08/08/2023).
- [47] Ragnar HOLM. *Electric Contacts*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1967. ISBN : 978-3-642-05708-3 978-3-662-06688-1. DOI : [10.1007/978-3-662-06688-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-06688-1). URL : <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-06688-1> (visité le 08/08/2023).
- [48] Hong HONG, Jiyong HU et Xiong YAN. « UV Curable Conductive Ink for the Fabrication of Textile-Based Conductive Circuits and Wearable UHF RFID Tags ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 11.30 (31 juill. 2019), p. 27318-27326. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/acsami.9b06432](https://doi.org/10.1021/acsami.9b06432). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.9b06432> (visité le 08/08/2023).
- [49] Tao HUANG et al. « Fabric texture design for boosting the performance of a knitted washable textile triboelectric nanogenerator as wearable power ». In : *Nano Energy* 58 (avr. 2019), p. 375-383. ISSN : 22112855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2019.01.038](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.038). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285519300473> (visité le 08/08/2023).
- [50] I'MTECH. *Des objets connectés aux objets communicants*. 9 déc. 2021. URL : <https://imtech.imt.fr/2021/12/09/des-objets-connectes-aux-objets-communicants/> (visité le 23/06/2023).
- [51] Adafruit INDUSTRIES. *Conductive Hook & Loop Tape - 3" long*. URL : <https://www.adafruit.com/product/1324> (visité le 23/06/2023).
- [52] *Jacquard by Google - Home*. Jacquard by Google. URL : https://atap.google.com/intl/fr_fr/jacquard/ (visité le 22/08/2023).
- [53] Hanbit JIN et al. « Enhancing the Performance of Stretchable Conductors for E-Textiles by Controlled Ink Permeation ». In : *Advanced Materials* 29.21 (juin 2017), p. 1605848. ISSN : 0935-9648, 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.201605848](https://doi.org/10.1002/adma.201605848). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201605848> (visité le 08/08/2023).
- [54] Christine KALLMAYER et Erik SIMON. « Large area sensor integration in textiles ». In : *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*. 2012 IEEE 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices (SSD). Chemnitz, Germany : IEEE, mars 2012, p. 1-5. ISBN : 978-1-4673-1590-6 978-1-4673-1591-3. DOI : [10.1109/SSD.2012.6198112](https://doi.org/10.1109/SSD.2012.6198112). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6198112/> (visité le 08/08/2023).
- [55] Mirco KAPONIG et al. « Dynamics of contact electrification ». In : *Science Advances* 7.22 (28 mai 2021), eabg7595. ISSN : 2375-2548. DOI : [10.1126/sciadv.abg7595](https://doi.org/10.1126/sciadv.abg7595). URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abg7595> (visité le 08/08/2023).

- [56] B. KARAGUZEL et al. « Flexible, durable printed electrical circuits ». In : *Journal of the Textile Institute* 100.1 (9 mars 2009), p. 1-9. ISSN : 0040-5000, 1754-2340. DOI : [10.1080/00405000802390147](https://doi.org/10.1080/00405000802390147). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000802390147> (visité le 08/08/2023).
- [57] Nazmul KARIM et al. « All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications ». In : *Scientific Reports* 9.1 (29 mai 2019), p. 8035. ISSN : 2045-2322. DOI : [10.1038/s41598-019-44420-y](https://doi.org/10.1038/s41598-019-44420-y). URL : <https://www.nature.com/articles/s41598-019-44420-y> (visité le 08/08/2023).
- [58] Hyejung KIM et al. « A Wearable Fabric Computer by Planar-Fashionable Circuit Board Technique ». In : *2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*. Implantable Body Sensor Networks Conference (BSN). Berkeley, CA : IEEE, juin 2009, p. 282-285. ISBN : 978-0-7695-3644-6. DOI : [10.1109/BSN.2009.51](https://doi.org/10.1109/BSN.2009.51). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5226876/> (visité le 08/08/2023).
- [59] Inhwon KIM et al. « Inkjet Process for Conductive Patterning on Textiles : Maintaining Inherent Stretchability and Breathability in Knit Structures ». In : *Advanced Functional Materials* 29.7 (fév. 2019), p. 1807573. ISSN : 1616-301X, 1616-3028. DOI : [10.1002/adfm.201807573](https://doi.org/10.1002/adfm.201807573). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201807573> (visité le 08/08/2023).
- [60] Asimina KIOURTI et John L. VOLAKIS. « High-Geometrical-Accuracy Embroidery Process for Textile Antennas With Fine Details ». In : *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14 (2015), p. 1474-1477. ISSN : 1536-1225, 1548-5757. DOI : [10.1109/LAWP.2014.2363556](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2363556). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/6924730/> (visité le 08/08/2023).
- [61] KOSHI, NOMURA et YOSHIDA. « Requirements for Durability Improvement of Conductive Patterns Permeated in Textiles under Cyclic Tensile Deformation ». In : *Micromachines* 10.11 (25 oct. 2019), p. 721. ISSN : 2072-666X. DOI : [10.3390/mi10110721](https://doi.org/10.3390/mi10110721). URL : <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/11/721> (visité le 08/08/2023).
- [62] Tomoya KOSHI, Ken-ichi NOMURA et Manabu YOSHIDA. « Electrical Characterization of a Double-Layered Conductive Pattern with Different Crack Configurations for Durable E-Textiles ». In : *Micromachines* 11.11 (30 oct. 2020), p. 977. ISSN : 2072-666X. DOI : [10.3390/mi11110977](https://doi.org/10.3390/mi11110977). URL : <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/11/977> (visité le 08/08/2023).
- [63] Tomoya KOSHI, Ken-ichi NOMURA et Manabu YOSHIDA. « Electronic Component Mounting for Durable E-Textiles : Direct Soldering of Components onto Textile-Based Deeply Permeated Conductive Patterns ». In : *Micromachines* 11.2 (18 fév. 2020), p. 209. ISSN : 2072-666X. DOI : [10.3390/mi11020209](https://doi.org/10.3390/mi11020209). URL : <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/2/209> (visité le 08/08/2023).
- [64] Malte von KRSHIWOBLIZKI et al. « Electronics in Textiles – Adhesive Bonding Technology for Reliably Embedding Electronic Modules into Textile Circuits ». In : *4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems Symposium I*. 11 sept. 2012, p. 1-10. DOI : [10.4028/www.scientific.net/AST.85.1](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.85.1). URL : <https://www.scientific.net/AST.85.1> (visité le 08/08/2023).

- [65] Bauyrzhan KRYKPAYEV et al. « A wearable tracking device inkjet-printed on textile ». In : *Microelectronics Journal* 65 (juill. 2017), p. 40-48. ISSN : 00262692. DOI : [10.1016/j.mejo.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.mejo.2017.05.010). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026269217300265> (visité le 08/08/2023).
- [66] Benjamin J. KULBAGO et James CHEN. « Nonlinear potential field in contact electrification ». In : *Journal of Electrostatics* 108 (1^{er} nov. 2020), p. 103511. ISSN : 0304-3886. DOI : [10.1016/j.elstat.2020.103511](https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103511). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388620300954> (visité le 08/12/2021).
- [67] Sung Soo KWAK et al. « Fully Stretchable Textile Triboelectric Nanogenerator with Knitted Fabric Structures ». In : *ACS Nano* 11.11 (28 nov. 2017), p. 10733-10741. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/acsnano.7b05203](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b05203). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.7b05203> (visité le 08/08/2023).
- [68] Daniel J. LACKS. « The Unpredictability of Electrostatic Charging ». In : *Angewandte Chemie International Edition* 51.28 (2012). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/anie.201202896>, p. 6822-6823. ISSN : 1521-3773. DOI : [10.1002/anie.201202896](https://doi.org/10.1002/anie.201202896). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201202896> (visité le 08/12/2021).
- [69] Daniel J. LACKS et Troy SHINBROT. « Long-standing and unresolved issues in triboelectric charging ». In : *Nature Reviews Chemistry* 3.8 (août 2019). Bandiera_abtest : a Cg_type : Nature Research Journals Number : 8 Primary_atype : Reviews Publisher : Nature Publishing Group Subject_term : Chemical physics ;Materials chemistry Subject_term_id : chemical-physics ;materials-chemistry, p. 465-476. ISSN : 2397-3358. DOI : [10.1038/s41570-019-0115-1](https://doi.org/10.1038/s41570-019-0115-1). URL : <https://www.nature.com/articles/s41570-019-0115-1> (visité le 28/10/2021).
- [70] *Les Français.es face aux objets connectés : quels équipements et perceptions des impacts ? - Labo*. URL : <https://labo.societenumerique.gouv.fr/fr/articles/dossier-les-fran%C3%A7aises-face-aux-objets-connect%C3%A9s-quels-%C3%A9quipements-et-perceptions-des-impacts/> (visité le 19/04/2023).
- [71] Shuyao LI et al. « Contributions of Different Functional Groups to Contact Electrification of Polymers ». In : *Advanced Materials* 32.25 (juin 2020), p. 2001307. ISSN : 0935-9648, 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.202001307](https://doi.org/10.1002/adma.202001307). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202001307> (visité le 08/08/2023).
- [72] LI et al. « Fabric Circuit Board Connecting to Flexible Sensors or Rigid Components for Wearable Applications ». In : *Sensors* 19.17 (29 août 2019), p. 3745. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s19173745](https://doi.org/10.3390/s19173745). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/17/3745> (visité le 08/08/2023).
- [73] Shiquan LIN et al. « Electron Transfer in Nanoscale Contact Electrification : Effect of Temperature in the Metal–Dielectric Case ». In : *Advanced Materials* 31.17 (2019). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201808197>, p. 1808197. ISSN : 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.201808197](https://doi.org/10.1002/adma.201808197). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201808197> (visité le 08/12/2021).

- [74] T. LINZ et al. « Embroidering electrical interconnects with conductive yarn for the integration of flexible electronic modules into fabric ». In : *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*. Proceedings. Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers. Osaka, Japan : IEEE, 2005, p. 86-89. ISBN : 978-0-7695-2419-1. DOI : [10.1109/ISWC.2005.19](https://doi.org/10.1109/ISWC.2005.19). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1550791/> (visité le 08/08/2023).
- [75] Torsten LINZ, Erik SIMON et Hans WALTER. « Fundamental analysis of embroidered contacts for electronics in textiles ». In : *3rd Electronics System Integration Technology Conference ESTC*. 2010 3rd Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC). Berlin, Germany : IEEE, sept. 2010, p. 1-5. ISBN : 978-1-4244-8553-6 978-1-4244-8555-0. DOI : [10.1109/ESTC.2010.5642823](https://doi.org/10.1109/ESTC.2010.5642823). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5642823/> (visité le 08/08/2023).
- [76] Torsten LINZ, Erik P. SIMON et Hans WALTER. « Modeling embroidered contacts for electronics in textiles ». In : *Journal of the Textile Institute* 103.6 (juin 2012), p. 644-653. ISSN : 0040-5000, 1754-2340. DOI : [10.1080/00405000.2011.597568](https://doi.org/10.1080/00405000.2011.597568). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2011.597568> (visité le 08/08/2023).
- [77] Torsten LINZ et al. « Contacting electronics to fabric circuits with nonconductive adhesive bonding ». In : *Journal of the Textile Institute* 103.10 (oct. 2012), p. 1139-1150. ISSN : 0040-5000, 1754-2340. DOI : [10.1080/00405000.2012.664867](https://doi.org/10.1080/00405000.2012.664867). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2012.664867> (visité le 08/08/2023).
- [78] Torsten LINZ et al. « Embroidered Interconnections and Encapsulation for Electronics in Textiles for Wearable Electronics Applications ». In : CIMTEC 2008. 2 sept. 2008, p. 85-94. DOI : [10.4028/www.scientific.net/AST.60.85](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.60.85). URL : <https://www.scientific.net/AST.60.85> (visité le 08/08/2023).
- [79] Jinmei LIU et al. « Core-Shell Fiber-Based 2D Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Motion Energy Harvesting ». In : *Nanoscale Research Letters* 14.1 (déc. 2019), p. 311. ISSN : 1931-7573, 1556-276X. DOI : [10.1186/s11671-019-3144-2](https://doi.org/10.1186/s11671-019-3144-2). URL : <https://link.springer.com/10.1186/s11671-019-3144-2> (visité le 08/08/2023).
- [80] Shirui LIU et al. « Triboelectric charge density of porous and deformable fabrics made from polymer fibers ». In : *Nano Energy* 53 (1^{er} nov. 2018), p. 383-390. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2018.08.071](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.08.071). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285518306335> (visité le 23/06/2023).
- [81] I. LOCHER et A.G. SEFAR. « Joining technologies for smart textiles ». In : *Multi-disciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers*. Elsevier, 2013, p. 285-305. ISBN : 978-0-85709-342-4. DOI : [10.1533/9780857093530.2.285](https://doi.org/10.1533/9780857093530.2.285). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857093424500109> (visité le 08/08/2023).
- [82] I. LOCHER et G. TROSTER. « Fundamental Building Blocks for Circuits on Textiles ». In : *IEEE Transactions on Advanced Packaging* 30.3 (août 2007), p. 541-550. ISSN : 1521-3323, 1557-9980. DOI : [10.1109/TADVP.2007.898636](https://doi.org/10.1109/TADVP.2007.898636). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/4285941/> (visité le 08/08/2023).

- [83] Mingyang LU et al. « A model for the triboelectric nanogenerator with inductive load and its energy boost potential ». In : *Nano Energy* 63 (1^{er} sept. 2019), p. 103883. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2019.103883](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.103883). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519305890> (visité le 28/10/2021).
- [84] Liyun MA et al. « Acid and Alkali-Resistant Textile Triboelectric Nanogenerator as a Smart Protective Suit for Liquid Energy Harvesting and Self-Powered Monitoring in High-Risk Environments ». In : *Advanced Functional Materials* 31.35 (août 2021), p. 2102963. ISSN : 1616-301X, 1616-3028. DOI : [10.1002/adfm.202102963](https://doi.org/10.1002/adfm.202102963). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.202102963> (visité le 08/08/2023).
- [85] Yongyun MAO et al. « Triboelectric nanogenerator/supercapacitor in-one self-powered textile based on PTFE yarn wrapped PDMS/MnO₂NW hybrid elastomer ». In : *Nano Energy* 84 (juin 2021), p. 105918. ISSN : 22112855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2021.105918](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105918). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285521001762> (visité le 08/08/2023).
- [86] D. MARCULESCU et al. « Electronic textiles : a platform for pervasive computing ». In : *Proceedings of the IEEE* 91.12 (déc. 2003), p. 1995-2018. ISSN : 0018-9219. DOI : [10.1109/JPROC.2003.819612](https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.819612). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1246382/> (visité le 08/08/2023).
- [87] V. MECNIKA et al. « Joining technologies for electronic textiles ». In : *Electronic Textiles*. Elsevier, 2015, p. 133-153. ISBN : 978-0-08-100201-8. DOI : [10.1016/B978-0-08-100201-8.00008-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100201-8.00008-4). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081002018000084> (visité le 08/08/2023).
- [88] Adnan MEHMOOD et al. « Clothing-integrated RFID-based Interface for Human-Technology Interaction ». In : *2019 IEEE 7th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*. 2019 IEEE 7th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH). Kyoto, Japan : IEEE, août 2019, p. 1-5. ISBN : 978-1-72810-300-6. DOI : [10.1109/SeGAH.2019.8882467](https://doi.org/10.1109/SeGAH.2019.8882467). URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8882467/> (visité le 08/08/2023).
- [89] Jia MENG et al. « Flexible Textile Direct-Current Generator Based on the Tribovoltaic Effect at Dynamic Metal-Semiconducting Polymer Interfaces ». In : *ACS Energy Letters* 6.7 (9 juill. 2021), p. 2442-2450. ISSN : 2380-8195, 2380-8195. DOI : [10.1021/acsenerylett.1c00288](https://doi.org/10.1021/acsenerylett.1c00288). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenerylett.1c00288> (visité le 08/08/2023).
- [90] Sebastian MICUS, Michael HAUPT et Götz T. GRESSER. « Automatic Joining of Electrical Components to Smart Textiles by Ultrasonic Soldering ». In : *Sensors* 21.2 (14 jan. 2021), p. 545. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s21020545](https://doi.org/10.3390/s21020545). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/2/545> (visité le 08/08/2023).
- [91] Sebastian MICUS, Michael HAUPT et Götz T. GRESSER. « Soldering Electronics to Smart Textiles by Pulsed Nd :YAG Laser ». In : *Materials* 13.11 (26 mai 2020), p. 2429. ISSN : 1996-1944. DOI : [10.3390/ma13112429](https://doi.org/10.3390/ma13112429). URL : <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2429> (visité le 08/08/2023).

- [92] Md. Tahmidul Islam MOLLA, Crystal COMPTON et Lucy E. DUNNE. « Launderability of surface-insulated cut and sew E-textiles ». In : *Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers*. UbiComp '18 : The 2018 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. Singapore Singapore : ACM, 8 oct. 2018, p. 104-111. ISBN : 978-1-4503-5967-2. DOI : [10.1145/3267242.3267255](https://doi.org/10.1145/3267242.3267255). URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3267242.3267255> (visité le 08/08/2023).
- [93] Md. Tahmidul Islam MOLLA et al. « Surface-mount manufacturing for e-textile circuits ». In : *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*. UbiComp '17 : The 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. Maui Hawaii : ACM, 11 sept. 2017, p. 18-25. ISBN : 978-1-4503-5188-1. DOI : [10.1145/3123021.3123058](https://doi.org/10.1145/3123021.3123058). URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3123021.3123058> (visité le 08/08/2023).
- [94] J.E. MORRIS, JEAHUCK LEE et J. LIU. « Isotropic Conductive Adhesive Interconnect Technology in Electronics Packaging Applications ». In : *Polytronic 2005 - 5th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*. Polytronic 2005 - 5th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics. Warsaw, Poland : IEEE, 2005, p. 45-52. ISBN : 978-0-7803-9553-4. DOI : [10.1109/POLYTR.2005.1596485](https://doi.org/10.1109/POLYTR.2005.1596485). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1596485/> (visité le 08/08/2023).
- [95] S. de MULATIER et al. « Mechanical characterization of soft substrates for wearable and washable electronic systems ». In : *APL Materials* 7.3 (11 fév. 2019), p. 031505. ISSN : 2166-532X. DOI : [10.1063/1.5063671](https://doi.org/10.1063/1.5063671). URL : <https://doi.org/10.1063/1.5063671> (visité le 23/06/2023).
- [96] Séverine de MULATIER et al. « Electronic Circuits Integration in Textiles for Data Processing in Wearable Technologies ». In : *Advanced Materials Technologies* 3.10 (2018). eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/admt.201700320>, p. 1700320. ISSN : 2365-709X. DOI : [10.1002/admt.201700320](https://doi.org/10.1002/admt.201700320). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admt.201700320> (visité le 23/06/2023).
- [97] Anki Reddy MULE et al. « Wearable Single-Electrode-Mode Triboelectric Nanogenerator via Conductive Polymer-Coated Textiles for Self-Power Electronics ». In : *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 7.19 (7 oct. 2019), p. 16450-16458. ISSN : 2168-0485, 2168-0485. DOI : [10.1021/acssuschemeng.9b03629](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03629). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.9b03629> (visité le 08/08/2023).
- [98] Meghann MYERS. *The Army is looking to make a sports bra that also measures soldier performance*. Army Times. Section : Your Army. 6 nov. 2018. URL : <https://www.armytimes.com/news/your-army/2018/11/06/the-army-is-looking-to-make-a-sports-bra-that-also-measures-soldier-performance/> (visité le 23/06/2023).
- [99] M. NASRELDIN et al. « Microstructured electrodes supported on serpentine interconnects for stretchable electronics ». In : *APL Materials* 7.3 (22 fév. 2019), p. 031507. ISSN : 2166-532X. DOI : [10.1063/1.5085160](https://doi.org/10.1063/1.5085160). URL : <https://doi.org/10.1063/1.5085160> (visité le 23/06/2023).

- [100] Oleksandr NECHYPORCHUK et al. « Cellulose Nanofibril-Based Coatings of Woven Cotton Fabrics for Improved Inkjet Printing with a Potential in E-Textile Manufacturing ». In : *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 5.6 (5 juin 2017), p. 4793-4801. ISSN : 2168-0485, 2168-0485. DOI : [10.1021/acssuschemeng.7b00200](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00200). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.7b00200> (visité le 08/08/2023).
- [101] Simiao NIU et Zhong Lin WANG. « Theoretical systems of triboelectric nanogenerators ». In : *Nano Energy*. Special issue on the 2nd International Conference on Nanogenerators and Piezotronics (NGPT 2014) 14 (1^{er} mai 2015), p. 161-192. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2014.11.034](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.034). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285514002353> (visité le 28/10/2021).
- [102] Simiao NIU et al. « Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source ». In : *Energy & Environmental Science* 6.12 (14 nov. 2013). Publisher : The Royal Society of Chemistry, p. 3576-3583. ISSN : 1754-5706. DOI : [10.1039/C3EE42571A](https://doi.org/10.1039/C3EE42571A). URL : <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ee/c3ee42571a> (visité le 28/10/2021).
- [103] Alenka OJSTRŠEK et al. « Metallisation of Textiles and Protection of Conductive Layers : An Overview of Application Techniques ». In : *Sensors* 21.10 (18 mai 2021), p. 3508. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s21103508](https://doi.org/10.3390/s21103508). URL : <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/10/3508> (visité le 08/08/2023).
- [104] André PAIVA et al. « Design of a Long Sleeve T-Shirt with ECG and EMG for Athletes and Rehabilitation Patients ». In : *Innovation, Engineering and Entrepreneurship*. Sous la dir. de José MACHADO, Filomena SOARES et Germano VEIGA. T. 505. Series Title : Lecture Notes in Electrical Engineering. Cham : Springer International Publishing, 2019, p. 244-250. ISBN : 978-3-319-91333-9 978-3-319-91334-6. DOI : [10.1007/978-3-319-91334-6_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_34). URL : http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-91334-6_34 (visité le 08/08/2023).
- [105] Shuaihang PAN et Zhinan ZHANG. « Triboelectric effect : A new perspective on electron transfer process ». In : *Journal of Applied Physics* 122.14 (14 oct. 2017). Publisher : American Institute of Physics, p. 144302. ISSN : 0021-8979. DOI : [10.1063/1.5006634](https://doi.org/10.1063/1.5006634). URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5006634> (visité le 08/12/2021).
- [106] Rita PARADISO, Laura CALDANI et Maria PACELLI. « Knitted Electronic Textiles ». In : *Wearable Sensors*. Elsevier, 2014, p. 153-174. ISBN : 978-0-12-418662-0. DOI : [10.1016/B978-0-12-418662-0.00003-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418662-0.00003-9). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124186620000039> (visité le 08/08/2023).
- [107] R. PAWLAK et al. « Properties Of Thin Metal Layers Deposited On Textile Composites By Using The Pvd Method For Textronic Applications ». In : *Autex Research Journal* 17.3 (26 sept. 2017), p. 229-237. ISSN : 2300-0929. DOI : [10.1515/aut-2017-0015](https://doi.org/10.1515/aut-2017-0015). URL : <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/aut-2017-0015/html> (visité le 08/08/2023).

- [108] Ryszard PAWLAK et al. « Modelling and applications of conductive elements on textile materials ». In : *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering* 37.5 (30 oct. 2018), p. 1645-1656. ISSN : 0332-1649. DOI : [10.1108/COMPEL-01-2018-0023](https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2018-0023). URL : <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/COMPEL-01-2018-0023/full/html> (visité le 08/08/2023).
- [109] Jun PENG, Stephen Dongmin KANG et G. Jeffrey SNYDER. « Optimization principles and the figure of merit for triboelectric generators ». In : *Science Advances* 3.12 (15 déc. 2017). Publisher : American Association for the Advancement of Science, eaap8576. DOI : [10.1126/sciadv.aap8576](https://doi.org/10.1126/sciadv.aap8576). URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aap8576> (visité le 23/06/2023).
- [110] Ivan POUPYREV et al. « Project Jacquard : Interactive Digital Textiles at Scale ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI'16 : CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. San Jose California USA : ACM, 7 mai 2016, p. 4216-4227. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858176](https://doi.org/10.1145/2858036.2858176). URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2858036.2858176> (visité le 08/08/2023).
- [111] Assurance PRÉVENTION. *Santé et objets connectés - Cité des Sciences*. 1^{er} déc. 2019. URL : https://www.cite-sciences.fr/fileadmin/fileadmin_CSI/fichiers/au-programme/lieux-ressources/cite-de-la-sante/_documents/Ressources/Brochures/Sante_objets_connectes.pdf (visité le 19/04/2023).
- [112] Xiong PU et al. « A Self-Charging Power Unit by Integration of a Textile Triboelectric Nanogenerator and a Flexible Lithium-Ion Battery for Wearable Electronics ». In : *Advanced Materials* 27.15 (avr. 2015), p. 2472-2478. ISSN : 09359648. DOI : [10.1002/adma.201500311](https://doi.org/10.1002/adma.201500311). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201500311> (visité le 08/08/2023).
- [113] Xiong PU et al. « Efficient Charging of Li-Ion Batteries with Pulsed Output Current of Triboelectric Nanogenerators ». In : *Advanced Science* 3.1 (2016). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/advs.201500255>, p. 1500255. ISSN : 2198-3844. DOI : [10.1002/advs.201500255](https://doi.org/10.1002/advs.201500255). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/advs.201500255> (visité le 28/10/2021).
- [114] Xiong PU et al. « Ultrastretchable, transparent triboelectric nanogenerator as electronic skin for biomechanical energy harvesting and tactile sensing ». In : *Science Advances* 3.5 (31 mai 2017). Publisher : American Association for the Advancement of Science, e1700015. DOI : [10.1126/sciadv.1700015](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700015). URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700015> (visité le 23/06/2023).
- [115] Statistiques PUBLIQUES. *Chiffres clés de l'énergie - Édition 2021*. 1^{er} sept. 2021. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/pdf/chiffres-cles-de-l-energie-edition-2021.pdf> (visité le 19/04/2023).
- [116] « Pyroelectric and Thermoelectric Nanogenerators ». In : *Hybridized and Coupled Nanogenerators*. Section : 7 _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9783527346332.ch7>. John Wiley & Sons, Ltd, 2020, p. 219-257. ISBN : 978-3-527-34633-2. DOI : [10.1002/9783527346332.ch7](https://doi.org/10.1002/9783527346332.ch7). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527346332.ch7> (visité le 23/06/2023).

- [117] Xavier RIGHETTI et Daniel THALMANN. « Proposition of a modular I2C-based wearable architecture ». In : *Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta, Malta : IEEE, 2010, p. 802-805. ISBN : 978-1-4244-5793-9. DOI : [10.1109/MELCON.2010.5475965](https://doi.org/10.1109/MELCON.2010.5475965). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5475965/> (visité le 08/08/2023).
- [118] Sigrid ROTZLER et al. « Improving the washability of smart textiles : influence of different washing conditions on textile integrated conductor tracks ». In : *The Journal of The Textile Institute* 111.12 (1^{er} déc. 2020), p. 1766-1777. ISSN : 0040-5000, 1754-2340. DOI : [10.1080/00405000.2020.1729056](https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1729056). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00405000.2020.1729056> (visité le 08/08/2023).
- [119] Erol SANCAKTAR et Lan BAI. « Electrically Conductive Epoxy Adhesives ». In : *Polymers* 3.1 (10 fév. 2011), p. 427-466. ISSN : 2073-4360. DOI : [10.3390/polym3010427](https://doi.org/10.3390/polym3010427). URL : <http://www.mdpi.com/2073-4360/3/1/427> (visité le 08/08/2023).
- [120] Institut de veille SANITAIRE. *Enquête Permanente sur les accidents de la vie courante*. URL : <https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/145303/2130645?version=1> (visité le 19/04/2023).
- [121] Klaus SCHEULEN, Anne SCHWARZ et Stefan JOCKENHOEVEL. « Reversible contacting of smart textiles with adhesive bonded magnets ». In : *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*. UbiComp '13 : The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. Zurich Switzerland : ACM, 8 sept. 2013, p. 131-132. ISBN : 978-1-4503-2127-3. DOI : [10.1145/2493988.2494338](https://doi.org/10.1145/2493988.2494338). URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2493988.2494338> (visité le 08/08/2023).
- [122] R.D. SEAGER et al. « Flexible radio frequency connectors for textile electronics ». In : *Electronics Letters* 49.22 (oct. 2013), p. 1371-1373. ISSN : 0013-5194, 1350-911X. DOI : [10.1049/el.2013.2105](https://doi.org/10.1049/el.2013.2105). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/el.2013.2105> (visité le 08/08/2023).
- [123] SEULKI LEE et al. « Arm-band type textile-MP3 player with multi-layer Planar Fashionable Circuit Board (P-FCB) techniques ». In : *International Symposium on Wearable Computers (ISWC) 2010*. 2010 International Symposium on Wearable Computers (ISWC). Seoul, Korea (South) : IEEE, oct. 2010, p. 1-7. ISBN : 978-1-4244-9046-2. DOI : [10.1109/ISWC.2010.5665879](https://doi.org/10.1109/ISWC.2010.5665879). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/5665879/> (visité le 08/08/2023).
- [124] Wanchul SEUNG et al. « Nanopatterned Textile-Based Wearable Triboelectric Nanogenerator ». In : *ACS Nano* 9.4 (28 avr. 2015), p. 3501-3509. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/nn507221f](https://doi.org/10.1021/nn507221f). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn507221f> (visité le 08/08/2023).
- [125] Hasan SHAHARIAR et al. « Inkjet Printing of Reactive Silver Ink on Textiles ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 11.6 (13 fév. 2019), p. 6208-6216. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/acsami.8b18231](https://doi.org/10.1021/acsami.8b18231). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.8b18231> (visité le 08/08/2023).

- [126] JiaJia SHAO, Tao JIANG et ZhongLin WANG. « Theoretical foundations of triboelectric nanogenerators (TENGs) ». In : *Science China Technological Sciences* 63.7 (1^{er} juill. 2020), p. 1087-1109. ISSN : 1869-1900. DOI : [10.1007/s11431-020-1604-9](https://doi.org/10.1007/s11431-020-1604-9). URL : <https://doi.org/10.1007/s11431-020-1604-9> (visité le 08/12/2021).
- [127] Jiajia SHAO, Morten WILLATZEN et Zhong Lin WANG. « Theoretical modeling of triboelectric nanogenerators (TENGs) ». In : *Journal of Applied Physics* 128.11 (21 sept. 2020). Publisher : American Institute of Physics, p. 111101. ISSN : 0021-8979. DOI : [10.1063/5.0020961](https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0020961). URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0020961> (visité le 28/10/2021).
- [128] Jiajia SHAO et al. « 3D mathematical model of contact-separation and single-electrode mode triboelectric nanogenerators ». In : *Nano Energy* 60 (1^{er} juin 2019), p. 630-640. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2019.03.072](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519302678). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519302678> (visité le 28/10/2021).
- [129] Jiajia SHAO et al. « Three-dimensional modeling of alternating current triboelectric nanogenerator in the linear sliding mode ». In : *Applied Physics Reviews* 7.1 (1^{er} mars 2020). Publisher : American Institute of Physics, p. 011405. DOI : [10.1063/1.5133023](https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5133023). URL : <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5133023> (visité le 08/12/2021).
- [130] Xiaozhou SHEN et al. « First-principles calculation of contact electrification and validation by experiment ». In : *Journal of Electrostatics* 82 (1^{er} août 2016), p. 11-16. ISSN : 0304-3886. DOI : [10.1016/j.elstat.2016.04.006](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388616300353). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388616300353> (visité le 08/12/2021).
- [131] Todd SOUTH. *These paratroopers strap on sensors during field ops to help scientists measure performance*. Army Times. Section : Your Army. 26 juin 2018. URL : <https://www.armytimes.com/news/your-army/2018/06/14/these-paratroopers-strap-on-sensors-during-field-ops-to-help-scientists-measure-performance/> (visité le 23/06/2023).
- [132] SPARKK. *LES OBJETS CONNECTÉS ET LA COLLECTE DE DONNÉES* | *text-bar Veille*. URL : <http://blogs.lecolededesign.com/veille/2020/05/06/les-objets-connectes-et-la-collecte-de-donnees/> (visité le 23/06/2023).
- [133] Z STEMPIEN et al. « Shape-programmed inkjet-printed silver electro-conductive layers on textile surfaces ». In : *Journal of Industrial Textiles* 47.6 (fév. 2018), p. 1321-1341. ISSN : 1528-0837, 1530-8057. DOI : [10.1177/1528083717690610](http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1528083717690610). URL : <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1528083717690610> (visité le 08/08/2023).
- [134] Zbigniew STEMPIEN, Ryszard PAWLAK et Ewa KORZENIEWSKA. « Thin conductive structures on coated textiles ». In : *2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*. 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE). Rzeszow, Poland : IEEE, mai 2016, p. 1-6. ISBN : 978-1-5090-1015-8. DOI : [10.1109/WZEE.2016.7800248](http://ieeexplore.ieee.org/document/7800248/). URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7800248/> (visité le 08/08/2023).

- [135] Matteo STOPPA et Alessandro CHIOLERIO. « Wearable Electronics and Smart Textiles : A Critical Review ». In : *Sensors* 14.7 (7 juill. 2014), p. 11957-11992. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s140711957](https://doi.org/10.3390/s140711957). URL : <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/11957> (visité le 08/08/2023).
- [136] Guoquan SUO et al. « Piezoelectric and Triboelectric Dual Effects in Mechanical-Energy Harvesting Using BaTiO₃/Polydimethylsiloxane Composite Film ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 8.50 (21 déc. 2016), p. 34335-34341. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/acsami.6b11108](https://doi.org/10.1021/acsami.6b11108). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.6b11108> (visité le 08/08/2023).
- [137] *Supply of computer chips and semiconductors*. Epthinktank. 29 mars 2022. URL : <https://epthinktank.eu/2022/03/29/supply-of-computer-chips-and-semiconductors/> (visité le 11/05/2023).
- [138] Andris ŠUTKA et al. « Measuring Piezoelectric Output—Fact or Friction? » In : *Advanced Materials* 32.32 (août 2020), p. 2002979. ISSN : 0935-9648, 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.202002979](https://doi.org/10.1002/adma.202002979). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.202002979> (visité le 08/08/2023).
- [139] Xuyuan TAO et al. « How to Make Reliable, Washable, and Wearable Textronic Devices ». In : *Sensors* 17.4 (24 mars 2017), p. 673. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s17040673](https://doi.org/10.3390/s17040673). URL : <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/4/673> (visité le 08/08/2023).
- [140] *US20200052340 Deformable accumulator*. URL : https://patentscope.wipo.int/search/fr/detail.jsf?docId=US283327933&_cid=P12-LLNH0Z-50697-1 (visité le 23/08/2023).
- [141] Thomas VERVUST et al. « Integration of stretchable and washable electronic modules for smart textile applications ». In : *Journal of the Textile Institute* 103.10 (oct. 2012), p. 1127-1138. ISSN : 0040-5000, 1754-2340. DOI : [10.1080/00405000.2012.664866](https://doi.org/10.1080/00405000.2012.664866). URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000.2012.664866> (visité le 08/08/2023).
- [142] F A VICK. « Theory of contact electrification ». In : *British Journal of Applied Physics* 4 (S2 1^{er} jan. 1953), S1-S5. ISSN : 0508-3443. DOI : [10.1088/0508-3443/4/S2/301](https://doi.org/10.1088/0508-3443/4/S2/301). URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/4/S2/301> (visité le 08/08/2023).
- [143] Aurelia C. WANG et al. « Unraveling Temperature-Dependent Contact Electrification between Sliding-Mode Triboelectric Pairs ». In : *Advanced Functional Materials* 30.12 (mars 2020), p. 1909384. ISSN : 1616-301X, 1616-3028. DOI : [10.1002/adfm.201909384](https://doi.org/10.1002/adfm.201909384). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adfm.201909384> (visité le 08/08/2023).
- [144] Xiaofeng WANG et al. « Triboelectric Nanogenerator Based on Fully Enclosed Rolling Spherical Structure for Harvesting Low-Frequency Water Wave Energy ». In : *Advanced Energy Materials* 5.24 (2015). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aenm.201501467>. p. 1501467. ISSN : 1614-6840. DOI : [10.1002/aenm.201501467](https://doi.org/10.1002/aenm.201501467). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201501467> (visité le 23/06/2023).

- [145] Zhong Lin WANG et Aurelia Chi WANG. « On the origin of contact-electrification ». In : *Materials Today* 30 (1^{er} nov. 2019), p. 34-51. ISSN : 1369-7021. DOI : [10.1016/j.mattod.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.05.016). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702119303700> (visité le 08/12/2021).
- [146] Menghao WU et Ju LI. « Sliding ferroelectricity in 2D van der Waals materials : Related physics and future opportunities ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.50 (14 déc. 2021), e2115703118. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : [10.1073/pnas.2115703118](https://doi.org/10.1073/pnas.2115703118). URL : <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2115703118> (visité le 08/08/2023).
- [147] Taiyang WU, Jean-Michel REDOUTÉ et Mehmet YUCE. « A Wearable, Low-Power, Real-Time ECG Monitor for Smart T-shirt and IoT Healthcare Applications ». In : *Advances in Body Area Networks I*. Sous la dir. de Giancarlo FORTINO et Zhelong WANG. Internet of Things. Cham : Springer International Publishing, 2019, p. 165-173. ISBN : 978-3-030-02819-0. DOI : [10.1007/978-3-030-02819-0_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02819-0_13).
- [148] Fengben XI et al. « Universal power management strategy for triboelectric nanogenerator ». In : *Nano Energy* 37 (1^{er} juill. 2017), p. 168-176. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2017.05.027](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.05.027). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285517302999> (visité le 28/10/2021).
- [149] Jiaqing XIONG et al. « Wearable All-Fabric-Based Triboelectric Generator for Water Energy Harvesting ». In : *Advanced Energy Materials* 7.21 (2017). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/aenm.201701243>, p. 1701243. ISSN : 1614-6840. DOI : [10.1002/aenm.201701243](https://doi.org/10.1002/aenm.201701243). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aenm.201701243> (visité le 23/06/2023).
- [150] Cheng XU et al. « On the Electron-Transfer Mechanism in the Contact-Electrification Effect ». In : *Advanced Materials* 30.15 (2018). _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201706790>, p. 1706790. ISSN : 1521-4095. DOI : [10.1002/adma.201706790](https://doi.org/10.1002/adma.201706790). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201706790> (visité le 08/12/2021).
- [151] Fan XU et al. « Scalable fabrication of stretchable and washable textile triboelectric nanogenerators as constant power sources for wearable electronics ». In : *Nano Energy* 88 (oct. 2021), p. 106247. ISSN : 22112855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2021.106247](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106247). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285521005024> (visité le 08/08/2023).
- [152] Yanqin YANG et al. « Coaxial Triboelectric Nanogenerator and Supercapacitor Fiber-Based Self-Charging Power Fabric ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 10.49 (12 déc. 2018), p. 42356-42362. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/acsami.8b15104](https://doi.org/10.1021/acsami.8b15104). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.8b15104> (visité le 08/08/2023).
- [153] Aifang YU et al. « Core-Shell-Yarn-Based Triboelectric Nanogenerator Textiles as Power Cloths ». In : *ACS Nano* 11.12 (26 déc. 2017), p. 12764-12771. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/acsnano.7b07534](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b07534). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.7b07534> (visité le 08/08/2023).
- [154] Gannian ZHANG et al. « Droplet impact dynamics on textiles ». In : *Soft Matter* 14.40 (2018), p. 8182-8190. ISSN : 1744-683X, 1744-6848. DOI : [10.1039/C8SM01082J](https://doi.org/10.1039/C8SM01082J). URL : <http://xlink.rsc.org/?DOI=C8SM01082J> (visité le 08/08/2023).

- [155] He ZHANG et al. « Waist-wearable wireless respiration sensor based on triboelectric effect ». In : *Nano Energy* 59 (1^{er} mai 2019), p. 75-83. ISSN : 2211-2855. DOI : [10.1016/j.nanoen.2019.01.063](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.063). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285519300837> (visité le 23/06/2023).
- [156] Ping ZHANG, Weikang ZHANG et Honghao ZHANG. « A high-performance textile-based triboelectric nanogenerator manufactured by a novel brush method for self-powered human motion pattern detector ». In : *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 46 (août 2021), p. 101290. ISSN : 22131388. DOI : [10.1016/j.seta.2021.101290](https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101290). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213138821003003> (visité le 08/08/2023).
- [157] Junwen ZHONG et al. « Fiber-Based Generator for Wearable Electronics and Mobile Medication ». In : *ACS Nano* 8.6 (24 juin 2014), p. 6273-6280. ISSN : 1936-0851, 1936-086X. DOI : [10.1021/nn501732z](https://doi.org/10.1021/nn501732z). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn501732z> (visité le 08/08/2023).
- [158] Linglin ZHOU et al. « Triboelectric nanogenerators : Fundamental physics and potential applications ». In : *Friction* 8.3 (1^{er} juin 2020), p. 481-506. ISSN : 2223-7704. DOI : [10.1007/s40544-020-0390-3](https://doi.org/10.1007/s40544-020-0390-3). URL : <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0390-3> (visité le 28/10/2021).
- [159] Tao ZHOU et al. « Woven Structured Triboelectric Nanogenerator for Wearable Devices ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* 6.16 (27 août 2014), p. 14695-14701. ISSN : 1944-8244, 1944-8252. DOI : [10.1021/am504110u](https://doi.org/10.1021/am504110u). URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/am504110u> (visité le 08/08/2023).
- [160] Haiyang ZOU et al. « Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials ». In : *Nature Communications* 11.1 (29 avr. 2020), p. 2093. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-020-15926-1](https://doi.org/10.1038/s41467-020-15926-1). URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-020-15926-1> (visité le 08/08/2023).
- [161] Haiyang ZOU et al. « Quantifying the triboelectric series ». In : *Nature Communications* 10.1 (29 mars 2019). Bandiera_abtest : a Cc_license_type : cc_by Cg_type : Nature Research Journals Number : 1 Primary_atype : Research Publisher : Nature Publishing Group Subject_term : Devices for energy harvesting ;Electronic devices Subject_term_id : devices-for-energy-harvesting ;electronic-devices, p. 1427. ISSN : 2041-1723. DOI : [10.1038/s41467-019-09461-x](https://doi.org/10.1038/s41467-019-09461-x). URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-019-09461-x> (visité le 08/12/2021).