



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Mathématiques et Physiques Appliquées

THÈSE

Présentée par

TOUAI RI SOUAD

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Discipline : Physique

Spécialité : Génie Electrique - Mécatronique.

**Modélisation mécatronique, simulation et commande d'un système
de récupération d'énergie vibratoire ambiante à large bande.**

Soutenu le Samedi 10 Décembre 2022 à 10h devant la commission d'examen :

Pr. Mohammed SAJIEDDINE	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni- Mellal, Maroc	Président
Pr. Ahmed CHEBAK	Professeur, Université Mohammed VI Polytechnique- Benguerir, Maroc	Rapporteur
Pr. Kebir CHAJI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni- Mellal, Maroc.	Rapporteur
Pr. Jamaa BENGOURRAM	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni- Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr. Abdelaziz EL BOUJLAIDI	Professeur, Université Cadi Ayyad-Faculté des Sciences Semplalia - Marrakech, Maroc.	Examineur
Pr. Mustapha MABROUKI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T. Béni- Mellal, Maroc	Directeur de Thèse

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Mes chères sœurs

Mon frère

Mes professeurs

Toute ma famille

Tous mes amis...

Souad Touairi

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a été effectué au Laboratoire génie industriel et ingénieries des surfaces (LGIIS) à la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Béni Mellal, Université Sultan Moulay Slimane, sous la direction du Professeur **MABROUKI Mustapha**.

Je n'aurais jamais pu réaliser ce travail de doctorat sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de mes recherches.

Je commence par remercier mon directeur de thèse Monsieur **MABROUKI Mustapha**, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal. Je lui adresse toute ma reconnaissance pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et pour m'avoir aidé tout au long de ma thèse. Il a éclairé ce travail de ses conseils judicieux, il m'a prodigué ses encouragements tout au long de la thèse et il a su partager avec moi ses nombreuses compétences, sa vision toujours claire et synthétique. Sa direction a été une expérience extraordinaire qui m'a permis de rentrer dans la recherche, qui m'a fait comprendre l'importance des relations humaines, qui m'a mis en contact avec des nombreux personnages experts dans les sciences et l'ingénierie

Je souhaite exprimer ma plus sincère reconnaissance à madame **BOUCHAKOUR Habiba** qui a pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi et a été là pour me soutenir et me conseiller. A vous ma profonde gratitude pour la confiance que vous m'avez accordée.

Je tiens également à remercier Monsieur **SAJIEDDINE Mohammed**, Professeur à l'école nationale des sciences appliquées de Khouribga, Université Sultan Moulay Slimane, qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Mes remerciements, vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail, en acceptant de l'examiner en l'occurrence, Monsieur **CHEBAK Ahmed**, Professeur à Green Tech Institute, Université Mohammed VI Polytechnique, Benguéir, Monsieur **HAJI Kebir**, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal, Monsieur **BENGOURRAM Jamaa**, Professeur à la Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal et Monsieur **EL BOUJLAIDI Abdelaziz**, Professeur à la Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad de Marrakech. Leurs interventions vont sans aucun doute enrichir le débat et ouvrir de nouvelles perspectives à mon travail.

Je termine ces remerciements par une reconnaissance grandiose envers toute ma famille. Il m'est impossible d'exprimer en quelques mots tout ce que je dois à ma mère, mon père, mon frère et mes sœurs que DIEU les protège. Je leur adresse ma profonde gratitude pour leur confiance, leur aide et leur amour qui m'ont permis d'aller au bout de mes projets. J'espère que ce modeste travail témoignera de mon immense remerciement.

Liste des publications internationales

Les travaux de recherche consignés par la présente thèse ont été concrétisés par plusieurs publications et communications internationales :

1. Articles publiés dans des revues internationales :

1. **Souad Touairi** & Mustapha Mabrouki, *CONTROL AND MODELLING EVALUATION OF A PIEZOELECTRIC HARVESTER SYSTEM*, International Journal of Dynamics and Control, 7 February 2021.
<https://doi.org/10.1007/s40435-021-00764-w>.
2. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha, *POWER CONSUMPTION OPTIMIZATION USING PIEZOELECTRIC HARVESTER IN THE CAR SUSPENSION*, International Journal of Control and Automation (2019).
<https://doi.org/10.33832/ijca.2019.12.10.03>.
3. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha, *VIBRATION HARVESTING INTEGRATED INTO VEHICLE SUSPENSION AND BODYWORK*, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (2021).
<https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJEECS/article/view/25483>.
4. **Touairi Souad** & Mustapha Mabrouki, *CHAOTIC DYNAMICS APPLIED TO HARVESTED ENERGY PREDICTION WITH TIME DELAY*, International Journal of Dynamics and Control, 14 July 2021.
<https://doi.org/10.1007/s40435-021-00837-w>.
5. **Touairi Souad**, Ahmed Bouzid & Mabrouki Mustapha, *ROAD HANDLING OF REGENERATIVE MOTORCYCLE SUSPENSIONS AND ENERGY HARVESTING*, AIP Conference Proceedings (2021) (CiteScore : 0.7).
<https://doi.org/10.1063/5.0049387>.

2. Chapitres de Livres

1. **Touairi Souad**, Aboulouard Abdelkhalk & Mabrouki Mustapha, *MPPT Algorithm of Piezoelectric Power Generation System Based on Nonlinear Extrapolation*, Digital Technologies and Applications, edited by Saad Mottahir & Badre Bossoufi, Springer, Cham, 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-02447-4-53>.
2. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha, *IMPROVE THE ENERGY HARVESTING ALTERNATIVES USING THE BOND GRAPH APPROACH FOR POWERING CRITICAL AUTONOMOUS DEVICES*, Digital Technologies and Applications, edited by Saad Mottahir & Badre Bossoufi, Springer, Cham, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2>

Liste des publications internationales

3. Communications internationales publiées

1. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha, *IMPROVE THE ENERGY HARVESTING ALTERNATIVES USING THE BOND GRAPH APPROACH FOR POWERING CRITICAL AUTONOMOUS DEVICES*, 2021 International Conference on Digital Technologies and Applications (ICDTA'21) **Springer**. Fes, Morocco
2. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha, *OPTIMIZATION OF ENERGY HARVESTING SYSTEM DESIGN BY FUNCTIONAL ANALYSIS*, 2020 **IEEE** 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET), Meknes, Morocco.
3. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha , *OPTIMIZATION OF HARVESTER SYSTEM IN EMBEDDED VEHICLE SYSTEMS VIA BOND GRAPH MODELING ALGORITHM*, 2020 **IEEE** 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), Beni Mellal, Morocco.
4. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha , *MECHATRONIC MODELING AND CONTROL OF ENERGY RECOVERY IN MOTORCYCLE TIRES*, 2020 **IEEE** 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA), Beni Mellal, Morocco.
5. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha , *VIBRATION HARVESTING INTEGRATION INTO THE VEHICLE SUSPENSION AND BODYWORK*, 2020 Advances in physics international online conference (Apioc2020).
6. **Touairi Souad** & Mabrouki Mustapha , *POWER CONSUMPTION OPTIMIZATION USING PIEZOELECTRIC HARVESTER IN THE CAR SUSPENSION*, 2020 The first international conference on smart information communication technologies (SmartICT-2019) **Springer**. Saidia, MOROCCO.
7. **Touairi Souad**, Youssef Khouya, Caouthar Bahanni, Zakaria Khaouch & Mabrouki Mustapha , *MECHATRONIC CONTROL AND MODELING OF A PIEZOELECTRIC ACTUATOR*, 2019 **IEEE**, International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), Fez, Morocco.

Résumé

La technologie de récupération d'énergie décrit le processus de conversion de l'énergie ambiante entourant un système en énergie électrique utile grâce à l'utilisation d'un matériau ou d'un transducteur spécifique. Il a la capacité d'offrir la perspective d'alimenter des appareils électroniques autonomes tels que des nœuds de capteurs sans fil dans les véhicules sans l'utilisation de batteries conventionnelles. Cette thèse porte sur la récupération d'énergie vibratoire ambiante à l'aide de matériaux piézoélectriques, vise à relever le défi des hautes performances des dispositifs de récupération d'énergie vibratoire (VEHD) dans le cas de vibrations à large bande. Un VEHD à base piézoélectrique typique comprend principalement un générateur piézoélectrique (PEG) qui transforme l'énergie de vibration mécanique en énergie électrique et un circuit d'extraction d'énergie (EEC) qui extrait et stocke l'énergie générée dans un élément de stockage. Les deux doivent être étudiés et spécialement conçus pour améliorer la densité de puissance dans les vibrations à large bande. Par conséquent, la thèse commence par l'étude et la modélisation d'un PEG linéaire classique, puis un PEG non linéaire utilisant le langage bond graph (BGL). Plusieurs paramètres clés du PEG proposé sont discutés sous l'excitation mécanique du véhicule. Les différentes performances entre les deux PEG sont également présentées sous trois types de signaux d'excitation.

Cette thèse propose l'étude théorique et la modélisation mécatronique d'un récupérateur d'énergie vibratoire à transduction piézoélectrique, afin d'extraire l'énergie électrique en temps réel. Après avoir expliqué le contexte dans lequel s'inscrit cette thèse, nous avons développé un modèle électromécanique du récupérateur d'énergie couplé à l'interface électrique. L'analyse de ce modèle nous a permis de rassembler l'ensemble des influences de l'interface électrique sur la dynamique du système sous la forme de deux paramètres : l'amortissement électrique et la raideur électrique. La modélisation par le langage bond graph (BG) de ces deux paramètres a été réalisée grâce à des combinaisons de charges linéaires résistives, capacitatives et inductives. La modélisation mécatronique utilisée non seulement simplifiée les circuits électroniques et la stratégie de commande de commutateur, mais améliore également l'efficacité de la conversion d'énergie. Les expressions analytiques des puissances récoltées à l'aide des trois CEE ci-dessus sont dérivées et confirmées par les résultats des simulations. Certaines pertes d'énergie supplémentaires dans les CEE non linéaires sont également répertoriées et analysées à l'aide d'un logiciel de simulation.

Dans ce but, le langage Bond Graph est utilisé et appliqué avec succès sur l'ensemble du système de suspension ainsi que sur les récupérateurs d'énergie en raison de sa capacité à traduire les effets physiques et les échanges énergétiques au sein de systèmes multiphysiques.

En conséquence, la deuxième approche introduit un VEHD avancé qui se compose du PEG linéaire par morceaux dû aux bouchons mécaniques et de la CEE OSECE non linéaire.

Enfin, un modèle global de suspension automobile intégrant les sous-systèmes de récupération d'énergie est étudié. Afin de compléter cette analyse, une modélisation du circuit de restitution et du stockage d'énergie est également proposée.

Les résultats issus des simulations numériques basées sur les normes standards d'une route avec le récupérateur d'énergie piézoélectrique démontrent la validité de l'analyse théorique et la faisabilité des techniques développées.

Mots clés : Electrets, Piégeage de charges, Convertisseur électrostatique, Récupération d'énergie piézoélectrique, Transducteurs, Algorithme de maximisation de la puissance, Contrôle par logique floue (FLC), contrôle par mode glissant (SMC).

Abstract

Energy harvesting technology describes the process of converting the ambient energy surrounding a system into useful electrical energy through the use of a specific material or transducer. It offers the possibility of powering autonomous electronic devices such as wireless sensor nodes in vehicles without using conventional batteries. This thesis focuses on ambient vibration energy harvesting using piezoelectric materials, and aims to address the challenge of high-performance vibration energy harvesting devices (VEHDs) for broadband vibrations.

A typical VEHD based on piezoelectric materials mainly consists of a piezoelectric generator (PEG) that converts mechanical vibration energy into electrical energy and an energy extraction circuit (EEC) that extracts and stores the generated energy in a storage element. Both of these elements need to be researched and specifically designed to improve the power density in broadband vibration. Therefore, the thesis begins with the study and modeling of a classical linear PEG, followed by a nonlinear PEG using the binding graph language (BGL). Several key parameters of the proposed PEG are discussed under the mechanical excitation of the vehicle. The different performances between the two PEGs are also presented under three types of excitation signals.

This thesis proposes the theoretical study and mechatronic modeling of a piezoelectric transduction vibration energy sensor to extract electrical energy in real time. After explaining the context of this thesis, we developed an electromechanical model of the energy sensor coupled to the electrical interface. The analysis of this model allowed us to gather all the influences of the electrical interface on the dynamics of the system in the form of two parameters: electrical damping and electrical stiffness. The modeling of these two parameters by the language of bond graphs (BG) was carried out thanks to combinations of resistive, capacitive and inductive linear loads. The mechatronic modeling used not only simplifies the electronic circuits and the switch control strategy, but also improves the efficiency of the energy conversion. The analytical expressions of the powers gathered using the above three EWCs are derived and confirmed by the simulation results. Some additional power losses in nonlinear PECs are also listed and analyzed using simulation software.

For this purpose, the Bond Graph language is successfully used and applied to the entire suspension system as well as energy harvesters due to its ability to translate physical effects and energy exchanges within multiphysics systems. Accordingly, the second approach introduces an advanced VEHD that consists of the piecewise linear PEG due to mechanical plugs and the nonlinear OSECE.

Finally, a global automotive suspension model incorporating energy recovery subsystems is studied. In order to complete this analysis, a modeling of the energy restitution and storage circuit is also proposed. The results of the numerical simulations based on the standard norms of a road with the piezoelectric energy recuperator demonstrate the validity of the theoretical analysis and the feasibility of the developed techniques.

Keywords : Electrets, Charge trapping, Electrostatic converter, Piezoelectric energy recovery, Transducers, Power maximization algorithm, Nonlinear Control, Fuzzy Logic Control (FLC), Sliding Mode Control (SMC).

Liste des matières

Remerciements.....	II
Liste des publications internationales	III
Résumé.....	VI
Abstract	VII
Glossaire.....	XVI
Nomenclature.....	XVII

Chapitre 1 Contexte, objectifs et généralités sur la récupération d'énergie

1.1 Introduction.....	3
1.2 Les différentes formes d'énergie disponibles dans l'environnement	3
1.2.1 Energie finie (énergie électrochimique).....	3
1.2.2 Energie du rayonnement électromagnétique.....	4
1.2.3 Source rayonnantes	6
1.2.4 L'énergie thermique.....	6
1.2.5 L'énergie mécanique	8
1.2.6 Mécanisme de transduction par matériaux électro-actifs.....	9
1.3 Principales applications de la récupération d'énergie ambiante basse puissance	14
1.4 Enjeux et motivations.....	18
1.5 Conclusions.....	18

Chapitre 2 Contribution à la phase de la modélisation mécatronique du récupérateur

PZT

2.1 Introduction.....	19
2.2 Systèmes de collecte d'énergie piézoélectrique pour la suspension des voi- tures.....	20
2.2.1 Matériaux piézoélectriques	20
2.2.2 Calcul des paramètres du modèle.....	21
2.3 Comparaison entre les différentes techniques de conversion.....	23
2.3.1 Calcul des paramètres du modèle.....	23
2.3.2 Circuit électronique du système de récolte piézoélectrique	24
2.4 Méthodologie de modélisation de la mécatronique.....	25
2.4.1 Transducteur piézoélectrique monté entre le siège et la suspension du pneu	26
2.4.2 Modélisation mécatronique du transducteur piézoélectrique	27
2.5 Simulation numérique : Récupération d'énergie du système de suspension	30
2.6 Conclusion	34

Chapitre 3 Contribution à la phase d'optimisation dynamique par modèles bond graph inverses

3.1	Introduction.....	35
3.2	Modélisation par Bond Graph de suspension pour un siège intelligent.....	35
3.2.1	Évaluation de la distance d'installation des transducteurs piézoélectriques.....	36
3.2.2	Évaluation de la puissance de sortie.....	38
3.3	Modèle mécatronique de la suspension piézoélectrique combiné à la suspension du siège	40
3.3.1	Modèle mécatronique de la suspension piézoélectrique combiné à la suspension du siège.....	40
3.3.2	Modèle du contrôle de la suspension et du transducteur piézoélectrique.....	41
3.4	Évaluation de la réponse d'une moissonneuse piézoélectrique sur la suspension siège de voiture.....	43
3.5	Récolte d'énergie avec l'ensemble du système : simulations numériques.....	45
3.6	Conclusion.....	52

Chapitre 4 Contribution du Bond Graph à la modélisation et la commande des systèmes de récupération d'Énergie

4.1	Introduction.....	53
4.2	Gestion et stockage de l'énergie récupérée.....	54
4.3	Évaluation des comportements dynamiques du transducteur piézoélectrique.....	59
4.4	Schéma global du système intégré et énergie disponible.....	60
4.5	Énergie récoltable avec l'ensemble du système : Simulations numériques.....	61
4.5.1	L'équilibre dynamique.....	61
4.5.2	Résultats et discussion.....	62
4.6	Conclusion.....	65

Chapitre 5 Contrôle du chaos suivant une loi probabiliste applique aux récupérateurs piézoélectriques

5.1	Introduction.....	66
5.2	Conception de la logique floue.....	66
5.3	Identification des paramètres du récupérateur piézoélectrique.....	74
5.4	Régulation par réseaux des neurones : neuro-flou.....	78
5.4.1	Approche par réseaux neuronaux.....	80
5.4.2	Approche par les machines à vecteurs de support.....	81
5.5	Résultats des simulations et discussions.....	86
5.5.1	Flux de données principal de l'algorithme génétique.....	90
5.5.2	Optimisation des paramètres du récupérateur piézoélectrique.....	91
	Régulation par réseaux des neurones : neuro-flou.....	92
5.5.3	Plus grand exposant de Lyapunov.....	92
5.5.4	Détection du chaos.....	93

5.5.5	Modèle de demande.....	94
5.5.6	Reconstruction de données de récolte d'énergie piézoélectrique	95
5.5.7	Sélection de la temporisation	95
5.5.8	Sélection de la dimension d'encastrement	95
5.6	Conclusion	96
Conclusion Générale et Perspectives.....		96
Bibliographie.....		100
Annexes		101
A.	Conversion Directe.....	i
B.	Techniques SSD pour un système électromagnétique	v
C.	Dispositifs de récupération d'énergie intégrable a une suspension	ix
D.	L'approche multi-physique bond graph & équations d'une poutre piézoélectrique bicouche intégrable a modèle a paramètres distribues.....	xiv

Liste des figures

Chapitre 1

1.1	Réseaux rayonnement électromagnétique	4
1.2	Evaluation du rayonnement solaire [1].	5
1.3	Montre Thermique Seiko : (a) le produit ; (b) coupe transversale ; (c) modules thermoélectriques ; (d) schéma d'un module thermoélectrique. Copyright Seiko Instruments [14]	8
1.4	Chaussure dotée d'un générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus) [17]	10
1.5	Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique [19].	10
1.6	Générateurs piézoélectriques : (a) conversion par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique, (b) conversion directe.	11
1.7	Chaussures piézoélectriques développées au MIT, utilisant soit du PVDF stratifié placé sous la plante du pied, soit un biomorphe réalisé à partir de céramiques piézoélectriques (PZT) placé sous le talon [20]	13
1.8	Conversion directe : (a) principe, (b) sollicitation quasi-statique, (c) sollicitation dynamique	15
1.9	Dispositif d'étude classique : (a) schéma du dispositif, (b) sollicitation sinusoïdale [8].	16
1.10	Anguille récupératrice d'énergie [57].	17

Chapitre 2

2.1	Schéma de la dynamique principale du quart de véhicule.	20
2.2	Modèle à constantes localisées	21
2.3	Modélisation de la poutre	21
2.4	Poutre vibrante comportant des éléments piézoélectriques.	22
2.5	La commutation associées une poutre vibrante amortie par l'action d'éléments piézoélectrique.	22
2.6	Maillage de la structure (Le récupérateur).	23
2.7	Modèle électrique global du système de récolte piézoélectrique	25
2.8	Schéma d'un système masse-ressort-amortisseur simple du véhicule.	27
2.9	(a) :Résultats de simulation de la puissance maximale, (b) : récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence, (c) : 0,3 à 70 Hz d'amplitude 6 mm et (d) : 70 à 1500 Hz d'amplitude 16 mm	27
2.10	Modèle électrique du système de récolte piézoélectrique.	27

2.11	Représentation mécatronique optimale du système "homme - siège - véhicule".....	28
2.12	Représentation mécatronique d'un système "homme - siège - véhicule" pour étude vibratoire.....	29
2.13	Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,1 à 40 Hz d'amplitude 2 mm	31
2.14	Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,1 à 40 Hz d'amplitude 16 mm (K_{33} variable)	31
2.15	Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,5 à 40 Hz d'amplitude 4 mm	32
2.16	Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 10 à 70 Hz d'amplitude 6 mm.	32
2.17	Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 10 à 100 Hz d'amplitude 6 mm	33

Chapitre 3

3.1	Diagramme synoptique du récupérateur piézoélectrique	36
3.2	Puissance récupérée avec la technique SSDS récupératif : à amplitude de vibration constante et à la résonance, en fonction de k^2Q_m	36
3.3	Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie vibratoire fournie.	38
3.4	Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie fournie en fonction de la capacité C_R	39
3.5	Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie fournie en fonction de la capacité C_R normalisée par rapport à C_0 – Comparaison entre les différents points et les résultats théoriques pour différents couplages : (a) technique classique, (b) technique SSHI.....	39
3.6	Energie récupérée modélisée en utilisant le langage BG.	40
3.7	Comparaison entre les modèles théoriques pour différents couplages utilisant la technique SSHI	41
3.8	Comparaison des déformées statiques (calcul analytique) et dynamiques (simulations ANSYS ®)	42
3.9	Caractéristiques linéaires de tension du récupérateur piézoélectrique.	43
3.10	Caractéristiques non linéaires des coefficients d'amortissement verticaux des suspensions.	44
3.11	Comparaison théorique de la tension en fonction de k^2Q_m	45
3.12	Sollicitation par bruit blanc pour le système de récupération d'énergie.....	46
3.13	Sollicitation bruitée pour le système de récupération d'énergie en fonction du profil de route	46

3.14	Contrôle efficace de la puissance en fonction de k^2Q_m	47
3.15	La puissance récupérée avec la technique série D_{31} sur l'énergie récupérée avec la technique parallèle D_{33}	48
3.16	La puissance récoltée comparaison théorique en fonction de la charge totale	49
3.17	Comparaison du rapport de la puissance en fonction de la charge du véhicule.....	49
3.18	Comparaison théorique du rapport de la puissance récupérée avec la technique classique en fonction de la charge.....	50
3.19	Comparaison théorique du rapport de l'énergie récupérée avec la technique SSHI sur l'énergie récupérée et la technique classique en fonction de la charge.....	51

Chapitre 4

4.1	Circuits SSHI : (a) parallèles, (b) série.....	54
4.2	Comparaison théorique (points) et (ligne) du rapport de l'énergie récupérée avec la technique BG de l'énergie récupérée classique en fonction de k^2Q_m	55
4.3	Analyse model de la récupération d'énergie par modélisation Bond Graph.....	56
4.4	Model développé du récupérateur PZT-4K.....	58
4.5	Schéma général de la récupération et du stockage d'énergie.....	58
4.6	Schéma général de la récupération et du stockage d'énergie par modélisation Bond Graph.....	59
4.7	Comportement énergétique du récupérateur piézométrique sous vitesse maximale.....	63
4.8	La puissance récupérée par un quart du véhicule.....	63
4.9	La tension à la sortie du récupérateur après un instant de commutation.....	64
4.10	Sollicitation par un bruit blanc – LCP : (a) Au et AE, (b) Energie transférée normalisée, rapport de l'énergie transférée sur l'énergie fournie et rapport moyen de l'énergie transférée pendant une période de la plus basse fréquence de résonance sur l'énergie mécanique dans la structure.....	64

Chapitre 5

5.1	Forme d'onde de la tension piézoélectrique V , de la tension V_C sur le condensateur et du déplacement u dans le cas de la technique classique – Simulation par intégration numérique – $CR=15\mu F$, $EF=14m$	69
5.2	Evolution temporelle des énergies normalisées par rapport à l'énergie fournie EF – Simulation par intégration numérique – $CR=15\mu F$	70
5.3	Coefficient de couplage en fonction de l'épaisseur des inserts : (a) énergie élastique dans La structure pour les trois épaisseurs différentes,(b)évolution typique du coefficient de couplage.....	70
5.4	Schéma général de la récupération d'énergie.....	71

5.5	Architecture du contrôle neurone flou FLC.	71
5.6	Architecture de l'algorithme génétique proposé du chaos.....	72
5.7	Architecture du ANN pour le système véhiculaire.	72
5.8	Architecture de l'algorithme proposé pour le système chaotique.....	73
5.9	Fréquences de résonances présentes dans un véhicule en mouvement [106] : (a) modes de corps rigide dans les suspensions et les roues, (b) modes de structures du châssis et des éléments de carrosserie, et (c) résonance acoustique du compartiment passager.....	74
5.10	Puissance de sortie contrôlée par une structure FLC.....	78
5.11	Puissance de sortie contrôlée par une structure ANN à trois couches typiques.....	79
5.12	Sollicitation par un bruit blanc – amortissement énergétique et amortissement relatif au déplacement.....	88
5.13	Consommation d'énergie des véhicules électriques en fonction de la masse et de la puissance.....	88
5.14	Sollicitation du récupérateur par signal bruité.	89
5.15	Sollicitation minimale du récupérateur intégré dans une petite région Chaotique.....	89
5.16	Des séries chronologiques avec une dynamique identique, l'une commençant à une valeur initiale de 0.2.....	90
5.17	Sollicitation par un bruit blanc et métriques d'erreur RMSE des données sur les différents profils routiers.....	90
5.18	Portrait de phase de puissance pour le cas du PVEH à la production d'électricité.....	91
5.19	Diagrammes de phase de puissance de la série temporelle.....	91
5.20	Diagramme de phase de la puissance électrique récupérable.....	92
5.21	Trois modèles simulés sur différents profils routiers avec métriques d'erreur RMSE.....	92
5.22	Déplacement de la suspension et production de la puissance sous excitation aléatoire.....	92
5.23	Paramètres de filtrage de la puissance électrique par données de la route.....	93
5.24	La puissance électrique filtré à l'aide de la méthode proposée.....	93
5.25	Méthode d'information mutuelle appliquée pour calculer le temps de latence du CO2 émis.....	93
5.26	Métriques d'erreur MAE des données sur les différents profils routiers.....	94
5.27	L'exposant de Lyapunov du paramètre de taux de croissance est positif à $C = 3, 7$	94
5.28	Dynamique aléatoire de l'énergie électrique récoltable.....	94

5.29	Amortissement énergétique et sollicitation par un bruit blanc.....	95
5.30	Densité spectrale de la puissance récupérée.....	95
5.31	Contrôle de la puissance efficace en fonction de la perturbation aléatoire.....	95

Liste des tableaux

Chapitre 1

1.1	Puissance électrique maximale disponible en utilisant un générateur piézoélectrique permettant de récupérer une partie de l'énergie de mouvements humains	13
1.2	Taux de conversion maximal en conversion directe pour différents types de matériaux piézoélectriques	15

Chapitre 2

2.1	Modèle électrique du système de récolte piézoélectrique	21
2.2	Comparaison des fréquences de résonances et du coefficient de couplage pour le modèle ANSYS® et le modèle à constantes localisées.....	22
2.3	Les paramètres du modèle.....	22
2.4	Valeur des paramètres du modèle	28
2.5	Tableau 2.5 Classes de route selon la norme ISO 8608	30

Chapitre 3

3.1	Géométrie des patches piézoélectriques.....	41
3.2	Mesures et paramètres du modèle.....	50

Chapitre 5

5.1	Principaux résultats pour les trois modes d'analyse.....	71
5.2	Paramètres d'erreur de prévision de puissance électrique par données de la route	96
5.3	Quatre facteurs d'erreur des méthodes de prédiction proposées.....	96
5.4	Coefficients d'amélioration de la méthode proposée.....	96
5.5	Facteurs d'amélioration du modèle proposé vs deux modèles	96
5.6	CC de trois modèles	96
5.7	MAE (mW) de trois modèles	96

5.8	RMSE (mW) de trois modèles	96
5.9	Prévision de puissance électrique par temporisation.....	96
5.10	ARMA dans la prédiction de puissance électrique	96
5.11	Analyse LCM des performances du système	96

Glossaire

ANN : Réseau neuronal artificiel

AERS : Suspension active et régénératrice d'énergie

RMS : Racine moyenne carrée

PEVH : Récolte de vibrations

EV : Véhicule électrique

GA : Algorithme génétique

IRI : Indice de rugosité international

AS : Système Autonome

MMR : Redresseur de mouvement mécanique

EHSA : Amortisseurs à récupération d'énergie

PZT : Titano-Zirconiate de Plomb

PVDF : Film recouvert d'électrodes PEDOT/PSS

FEA : Analyse par éléments finis

BEM : Méthode des éléments de frontière

DCM : Méthode du calcul direct

FLC : Contrôle en logique floue

PID : Régulateur proportionnel-intégral-dérivé

SMC : Contrôle en mode glissant

Nomenclature

Grandeurs électromécaniques

V	Tension piézoélectrique
V_{cc}	Tension continue pour la technique SSDV
V_{DC}	Tension redressée et filtrée
V_C	Tension sur le condensateur C_R (régime pulsé)
V_S	Tension image de la déformation
I	Courant piézoélectrique
I_S	Courant dans le circuit de commutation
I_P	Courant absorbé par le pont redresseur
T	Contraintes
S	Déformations
D	Induction électrique
E	Champ électrique
Φ	Potentiel électrique
F	Force extérieure
u	Déplacement
r_j	Coordonnée temporelle du déplacement

Grandeurs énergétiques

E_F, P_F	Energie, puissance fournie
E_M	Energie mécanique
E_{PP}	Energie potentielle dans les éléments piézoélectriques
E_S	Energie extraite
E_T	Energie transférée
E_I	Energie perdue dans le dispositif de commutation
E_C	Energie cinétique
E_P	Energie potentielle
E_E	Energie électrostatique
E_e	Energie élastique
E_D, P_D	Energie, puissance perdue par pertes visqueuses
E_U, P	Energie, puissance récupérée
η	Rendement
P_j	$j^{\text{ème}}$ composante du vecteur de Poynting

Paramètres liés à l'inversion électriques et composants électriques

L_I	Inductance d'inversion
r	Résistance équivalente aux pertes pendant l'inversion
Q_I	Facteur de qualité de l'inversion électrique
γ	Coefficient d'inversion
t_i	Durée de l'inversion
R	Résistance de charge
C_R	Condensateur de filtrage ou de stockage

Caractéristiques de la poutre	
L	Longueur
b	Largeur
e_B	Epaisseur
ρ_B	Masse volumique
Y	Module d'Young
ν	Coefficient de Poisson
c_B	Raideur en déformation plane
I_B	Moment quadratique
m_B	Masse linéique
Ω_B	Volume
Caractéristiques des éléments piézoélectriques	
x_P	Position
L_P	Longueur
e_P	Epaisseur
ρ_P	Masse volumique
s^E	Souplesse en court-circuit
c^E	Raideur en court-circuit
ε^S	Permittivité à déformation nulle
ε^T	Permittivité à contrainte nulle
d	Constante piézoélectrique
e	Constante piézoélectrique
c_{PE}	Raideur en court-circuit et en déformation plane
c_{PD}	Raideur en circuit ouvert et en déformation plane
k^2_P	Carré du coefficient de couplage du matériau piézoélectrique
I_P	Moment quadratique
m_P	Masse linéique
Ω_P	Volume
Caractéristiques du système	
f_D, ω_D	Fréquence, pulsation de résonance en circuit ouvert
f_E, ω_E	Fréquence, pulsation de résonance en court-circuit
Q_m	Facteur de qualité mécanique
$\tan \delta$	Angle de perte
k^2	Carré du coefficient de couplage de la structure
λ	Coefficient de proportionnalité déplacement tension
Ω_T	Volume de la structure
Φ	Déformé

Modèle à constantes localisées	
K_1, K_2, K_3	Raideurs équivalentes de la poutre
K_{PE}	Raideur équivalente de l'élément piézoélectrique en court-circuit
K_{PD}	Raideur équivalente de l'élément piézoélectrique en circuit ouvert
M	Masse dynamique
C	Amortisseur
α_P	Coefficient piézoélectrique, facteur de force
C_{0P}	Capacité des éléments piézoélectriques
Modèle simplifié à constantes localisées	
α	Coefficient piézoélectrique global, facteur de force global
C_0	Capacité équivalente des éléments piézoélectriques
K_E	Raideur équivalente de la structure en court-circuit
K_D	Raideur équivalente de la structure en circuit ouvert
Autres	
A	Amortissement
ν	Frottement sec
β	Coefficient de proportionnalité entre tension à vide et tension SSDV
β_j	$j^{\text{ème}}$ coefficient d'application de la force
x	Coefficient d'extraction d'énergie pour la technique SSDI récupératif
h	Fonction créneau
P_{SW}	Probabilité associée au niveau de tension
v_{\min}	Tension minimale à atteindre avant d'opérer la tension
T_{es}	Temps d'estimation

INTRODUCTION GENERALE ET ETAT DE L'ART

La question de l'énergie est une problématique mondiale de taille ; le monde entier est dans une course contre la montre pour remplacer les sources d'énergie fossiles par celles renouvelables sans émission de gaz à effet de serre. La recherche scientifique est accélérée dans le sens de la production et la diversification des énergies renouvelables. D'autres thématiques sont dédiées à la gestion intelligente de la production et la consommation de l'énergie par des algorithmes génétiques.

Aujourd'hui une troisième alternative est disponible, la récupération d'énergie est une technique prometteuse qui peut aider à résoudre le défi énergétique mondial sans épuiser les ressources naturelles. C'est une solution à caractère vert de l'énergie, la récupération d'énergie peut réduire les émissions de gaz à effet de serre générées par les sources d'énergie traditionnelles. Les techniques piézoélectriques, thermoélectriques, électromagnétiques et photovoltaïques sont quelques exemples de technologies de récupération d'énergie qui peuvent être utilisées pour collecter l'énergie de l'environnement ambiant pour répondre dans des conditions précises à certains besoins en électricité. Ces technologies fonctionnent selon des principes différents et ont des exigences d'application et des rendements de conversion d'énergie différents [18]. Les capteurs ainsi que leurs fonctions électroniques associées dans le secteur automobile augmentent afin de rendre les véhicules de plus en plus compétitifs. On estime qu'en 2050, l'électronique embarquée représentera 75% de la valeur ajoutée d'une voiture [19]. Ces fonctions sont conçues pour assurer la fiabilité, la facilité d'entretien et la durabilité dans des conditions de trafic et de conditions climatiques sévères. Ces équipements peuvent être à la fois complexes comme celle d'antiblocage des roues ou simples comme la mesure de pression des pneumatiques. Ils ont tous besoin d'être approvisionnés en énergie électrique avec des niveaux différents. Il existe de nombreuses possibilités de collecter l'énergie cinétique résiduelle (vibrations, déformations, etc.) et l'énergie environnementale (solaire, chaleur, etc.) de l'environnement routier [20]. En particulier, l'énergie mécanique peut être convertie en électricité via des contraintes ou des vibrations à l'aide de transducteurs piézoélectriques placés sur la surface latérale des systèmes de suspensions. L'un des défis majeurs à venir est de proposer un récupérateur piézoélectrique autonome. Il convient également de souligner que les performances des techniques de récupération d'énergie ont fortement augmenté ces dernières années quel que soit la technologie et le matériau employés, de même que les stratégies de gestion de l'énergie avec le développement de nouveaux circuits électriques de stockage et de restitution d'énergie [21].

En parallèle, la consommation électrique des composants et des circuits diminue, ce qui accroît l'intérêt pour une nouvelle génération de circuits à récupération d'énergie [22]. C'est dans cette philosophie que l'objectif principal de la présente thèse est la récupération de l'énergie perdue sous forme de vibration dans une voiture dans un premier. Une fois nous maîtrisons tous les paramètres gouvernants cette opération, le procédé sera par la suite élargi dans d'autres applications plus importantes en termes de rendement comme les terrains de Handball et basketball. Des méthodes d'optimisation sont utilisées pour récupérer suffisamment d'énergie afin, d'alimenter les différents composants électroniques, (microélectronique ou capteurs), soit de réaliser le contrôle santé des pièces ou encore de rendre l'amortisseur au sein d'une suspension d'un véhicule semi-actif autonome en fonction du niveau d'énergie récupéré [23]. Plusieurs sources d'énergie restent peu exploitées à ce jour dans une automobile : les déplacements liés à la liaison au sol et les vibrations du moteur etc. [24].

En général, les mouvements de la roue par rapport à la caisse sont contrôlés par des systèmes dissipatifs comme les amortisseurs et cette énergie est alors dissipée sous forme de chaleur [25]. Or les mouvements de la roue, par rapport au sol ou à la caisse sont induits par l'avancement du véhicule sur un sol irrégulier. Les vibrations sont là et dommage de ne pas en profiter. De la même manière, les vibrations des moteurs thermiques sont supportées par le véhicule. Comme la suspension automobile est la pièce principale faisant la liaison entre la route et l'habitacle, elle reçoit à la fois les vibrations dues à l'état de surface de la route, au moteur et est également soumise à de grands déplacements [26]. Dans la littérature, l'énergie vibratoire récupérée peut couvrir une large bande fréquentielle. Les vibrations qui ont un grand intérêt pour notre étude, sont comprises entre 0.1Hz et 160Hz et correspondent aux modes de corps rigides et aux modes de structures. Cette thèse se focalise sur la récupération d'énergie sur les amortisseurs dans les suspensions automobiles. Compte tenu des types de déplacement disponibles dans la suspension, il est naturel de s'orienter vers des techniques piézoélectriques pour extraire l'énergie des vibrations [27]. Ces travaux de recherche ont été réalisés au sein du laboratoire génie industriel qui est pour sa part une structure de recherche pluridisciplinaire qui s'intéresse à l'intégration des énergies renouvelables et la récupération des énergies perdues par des systèmes piézoélectriques réels.

Le présent manuscrit de thèse est subdivisé en cinq chapitres, qui peuvent être énumérés de la façon suivante :

Le chapitre 1, positionne le contexte de notre étude, en analysant les flux d'énergie dans une suspension automobile en établissant un état de l'art des récupérateurs d'énergie dans la suspension. De cet état d'art, il ressort qu'une des localisations les plus propices à la récupération d'énergie dans la suspension se situe au niveau de l'amortisseur.

Bien qu'il existe d'autres emplacements, le choix concernant les récupérateurs d'énergie s'est dirigé vers l'exploitation de la vibration mécanique issue de la masse non-suspendue pour la conversion piézoélectrique. Cette solution converge avec les attentes industrielles et justifie les choix de la conception.

Dans **chapitre 2**, nous avons analysé le comportement mécanique des systèmes de suspensions en fonction d'une source d'excitation liée à la route et à l'aide de l'approche BG bien adaptée à la représentation des échanges d'énergie des systèmes multi-physique, mais aussi pour la simplicité de sa mise en œuvre et sa rapidité de calcul. De plus, la représentation des échanges d'énergie est facile par cette méthode qui sera adoptée dans notre étude.

Le chapitre 3 s'intéresse aux énergies vibratoires générées au sein du système de suspension automobile lorsque ce dernier est soumis à une excitation extérieure provenant soit du sol, soit de la caisse. La solution retenue pour effectuer le bilan en puissance sur chacun des éléments de la suspension est le langage Bond Graph en raison de la capacité de cette technique à traduire les effets physiques et les échanges énergétiques au sein d'un système.

Le chapitre 4 présente les travaux visant l'intégration d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique dans une suspension automobile. Dans un premier temps, la conversion d'énergie est modélisée à l'aide du langage Bond Graph. Par la suite, les résultats de simulation sont analysés et comparés avec ceux obtenus dans la littérature pour valider les modèles. Suite à cette analyse, une configuration optimale est proposée [169].

Le chapitre 5 constitue une synthèse de l'ensemble du travail de thèse en langage Bond Graph ; puis les résultats de simulation obtenus sont illustrés sur des cas d'études et les performances atteintes sont analysées et comparées à des mesures réalisées sur un démonstrateur. Afin de compléter l'analyse, une modélisation du circuit de restitution et du stockage d'énergie est également proposée et permet une étude qualitative et quantitative des performances des systèmes de récupération d'énergie piézoélectrique.

Les objectifs spécifiques de cette thèse sont résumés comme suit :

- La minimisation des ondulations du comportement d'hystérésis qui sont les inconvénients majeurs des matériaux piézoélectriques.
- L'obtention des fréquences de résonances constantes.
- L'aboutissement à des formes de courants appréciables et l'optimisation du taux de la conversion électrique totale.
- L'amélioration des performances du comportement dynamique du récupérateur piézoélectrique.
- L'utilisation d'un contrôle qui suit une loi probabiliste.
- L'achèvement d'une commande robuste et insensible aux perturbations externes et aux incertitudes du système.

Chapitre 1

CONTEXTE, OBJECTIFS ET GENERALITES SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE

1.1 Introduction

La notion de récupération d'énergie détermine le processus permettant de convertir une énergie ambiante perdue, dans ses divers états, en une énergie électrique exploitable alimentant un dispositif électronique. Les sources potentielles d'énergie récupérable et les moyens de récupération envisageables sont d'abord précisés. L'état de l'art concernant la récupération d'énergie à partir d'éléments piézoélectriques est ensuite présenté plus spécifiquement. Les principaux travaux antérieurs visent généralement à optimiser la partie mécanique ou électrique d'un générateur piézoélectrique. L'originalité de cette thèse est de proposer une approche globale pour optimiser la conversion électromécanique au sein des matériaux piézoélectriques mis en œuvre.

1.2 Les différentes formes d'énergie disponibles dans l'environnement

La diminution de la consommation des composants électroniques a permis l'essor d'applications mobiles sans fil. Les batteries, qui ont initialement favorisé le développement d'appareils électroniques portables, sont paradoxalement devenues un frein à cette progression, notamment à cause des problèmes de maintenance associés (recharge, remplacement). Cette tendance pose le problème des sources alternatives d'énergie. Les travaux de [1-6] récapitulent les différentes sources d'énergies envisageables. Plusieurs solutions ont été envisagées qui restent sur le même concept que les batteries classiques, c'est-à-dire qui sont basées sur des réservoirs d'énergie. Plusieurs sources d'énergie ambiante ont été envisagées pour rendre autonome des dispositifs électroniques. Ces différentes sources sont détaillées ci-après.

1.2.1 Energie finie (énergie électrochimique)

Le développement de l'électrochimie a conduit à l'émergence des appareils électroniques portables. Il s'agit principalement d'un moyen de stockage de l'énergie électrique qui permis d'embarquer de l'énergie électrique sur des systèmes mobiles [28]. Alessandro Volta est l'inventeur de la première pile chimique composée d'empilements de couples cuivre, zincs séparés par du carton imbibé d'eau salée. Depuis lors, plusieurs techniques ont été développées dans le but d'optimiser la durée de vie et la capacité des batteries.

De nos jours, nous comptons trois principales technologies de batterie : les batteries Nickel Cadmium (*Ni-Cd*), les batteries Nickel Metal (*Ni-MH*) et les batteries Lithium Ion (*Li-Ion*). Bien que cette technologie ait permis d'apporter de l'autonomie aux objets nomades, plusieurs contraintes restent à résoudre, notamment celles liées à l'autonomie limitée et au remplacement ou bien au rechargement régulier, ce qui est impossible lorsqu'il s'agit d'une alimentation des appareils enfouis ou dans des milieux hostiles. Pour pallier les problématiques précitées, une solution consiste à assister le fonctionnement de la batterie par un système récupérateur d'énergie permettant d'augmenter son autonomie. La batterie agit alors comme un tampon énergétique qui stocke constamment l'énergie récupérée du milieu ambiant et la met à disposition quand cela est nécessaire ou quand le niveau d'énergie stocké est suffisant. Nous allons maintenant nous intéresser aux principales formes d'énergies ambiantes qui peuvent être exploitées afin d'augmenter l'autonomie des batteries [29].

1.2.2 Energie du rayonnement électromagnétique

Le développement spectaculaire de la technologie des semi-conducteurs a rendu possible la parfaite maîtrise de la variation de vitesse des moteurs asynchrones à cage, ce qui a permis d'épargner les inconvénients du groupe Ward-Léonard et des moteurs Dahlander. Pour réaliser la commande des moteurs asynchrones, il est indispensable de les alimenter via des onduleurs triphasés de tension afin de fournir ou récupérer, en cas de freinage, l'énergie électrique. Notre environnement est riche en ondes électromagnétiques qui peuvent avoir plusieurs natures.

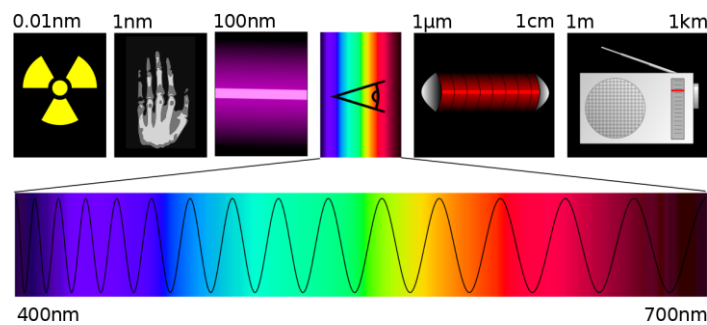


Figure 1.1 Réseaux rayonnement électromagnétique [13]

Sur la figure 1.1 nous présentons l'étendue du spectre électromagnétique présent dans notre environnement en fonction de sa nature (sources d'émission), de sa longueur d'onde et de sa fréquence : Nous remarquons que le gisement du rayonnement électromagnétique à faible impact sur la santé a essentiellement pour origine : le soleil (rayonnement Infrarouge + lumière visible) et les appareils électriques électroniques. Chaque type de rayonnement requiert un système dédié pour le transformer en énergie électrique utile.

Le rayonnement solaire : Le rayonnement naturel en provenance du soleil demeure la source d'énergie la plus abondante dans la nature. La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques [30].

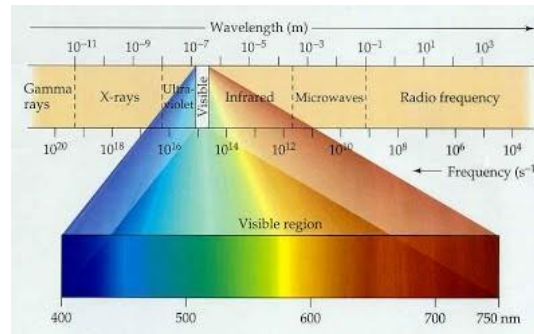


Figure 1.2 Evaluation du rayonnement solaire [12]

L'efficacité des cellules photovoltaïques varie en fonction de la technologie et de la pureté des matériaux comme montre la figure 1.2, on note un rendement entre 10% et 16 % pour les cellules du commerce, alors que des procédés avancés de fabrication en laboratoires de recherche permettent d'atteindre des rendements de l'ordre de 40% [31], leur principal inconvénient est le coût qui reste relativement élevé [16]. Il ressort de cette représentation graphique que les cellules en multi-jonction sont meilleures que les cellules simples jonction. Cependant, les cellules multi-jonction sont relativement chères à l'heure actuelle et requièrent des procédés de fabrication plus compliqués que ceux pour les cellules en silicium dont le procédé est bien maîtrisé. Il est à noter que la performance des cellules photovoltaïques est en progression continue, ce qui rend cette solution prometteuse pour l'avenir [32].

Les ondes hertziennes : Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la récupération de l'énergie issue des ondes radio fréquence, vu le nombre de sources d'onde électromagnétique émise par l'homme dans notre environnement, notamment les appareils de télécommunication, les appareils électroménagers, les lignes haute tension [33].

Cependant, l'énergie récupérable décroît rapidement avec l'augmentation de la distance source-récepteur et avec la diminution de la taille du récepteur (Récupérateur d'énergie). [34] et [35] montrent qu'un champ électrique de $1V.m^{-1}$ ne permet pas de récupérer plus de $0.26\mu W.cm^{-2}$ [36] et il est peu courant de trouver dans notre environnement ambiant un champ électrique de cette intensité sauf aux voisinages de sources puissantes comme les antennes GSM par exemple.

1.2.3 Sources Rayonnantes

Source Radiofréquence : La prolifération d'émetteurs radio dans le paysage urbain actuel permet d'envisager des solutions où les signaux radiofréquences ambiants servent de réservoir d'énergie pour des applications mobiles. Les systèmes de récupération de l'énergie RF ambiante sont toutefois très limités en puissance et nécessitent soit une grande surface réceptrice, soit d'être très près de la source émettrice. La densité de puissance p reçue par cm^2 est reliée au champ électrique E et à la résistance de radiation de l'espace libre $Z_0=377\Omega$ par (1.1). Les auteurs [9] rappelle ainsi qu'un champ électrique de 1V/m , ne permet pas de récupérer plus de $0.26\mu\text{W}/\text{m}^2$ alors que le champ maximum près d'une source ne dépasse généralement pas quelques Volts par mètre.

$$p = \frac{E^2}{Z_0} \quad (1.1)$$

Rayonnement lumineux : L'exploitation de l'énergie lumineuse a suscité de nombreux travaux scientifiques. D'important progrès ont été réalisés, comme le résume [10] dans un papier retraçant l'évolution des cellules photovoltaïques ces trente dernières années. L'apport énergétique du rayonnement lumineux est très variable suivant le type d'éclairage, ce qui conditionne bien évidemment le type d'applications envisagées. Ainsi, si le rayonnement lumineux est de l'ordre de 10 à $100\text{mW}/\text{cm}^2$ pour un éclairage solaire direct, il n'est que de 10 à $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ pour une lumière artificielle standard. Les applications des cellules photovoltaïques couvrent une très large échelle de puissance, allant de quelques microwatts pour des applications miniatures tels que les calculatrices solaires à plusieurs kilowatts dans le cas des centrales électriques solaires. Si le rendement des cellules photovoltaïque reste généralement en dessous de 20% pour les produits commerciaux courants, des modèles encore au stade de la recherche atteignent d'ores et déjà près de 35% d'efficacité. La principale limitation des systèmes de récupération de l'énergie lumineuse est bien entendue relative à la très forte sensibilité de ce type de dispositif aux conditions d'éclairage.

1.2.4 L'énergie thermique

La conversion thermoélectrique consiste à transformer un flux de chaleur circulant entre deux points à deux températures différentes en une énergie électrique. Plusieurs principes physiques ont été mis au point afin d'assurer cette transduction.

La pyroélectricité : Certains matériaux comme les cristaux pyroélectriques ont la propriété de changer de polarisation électrique sous un changement de température que ce soit temporel ou spatial. Cette variation de polarisation crée en effet une différence de potentiel temporaire et par conséquent un courant électrique si une charge électrique est connectée. Ce principe est utilisé pour convertir les variations de température rapides et continues en énergie électrique utile. Le biomorphe est en contact permanent avec une surface dont la température est susceptible de changer au cours du temps.

Lorsque la température de cette surface augmente, la poutre fléchit vers le bas grâce à la différence entre le coefficient de dilation thermique de la couche métallique et celui de la couche pyroélectrique. Après flexion, l'autre bout de la poutre touche la surface supposée froide [39]. Ceci a deux conséquences :

- (a) Une circulation de flux thermique de la surface chaude et la surface froide, ce flux est converti en énergie électrique grâce au matériau pyroélectrique,
- (b) Refroidissement de la partie métallique après contact, cette dernière tente donc de revenir vers sa position initiale, lorsque le contact avec le système. Ce principe est le plus utilisé, à petite échelle, pour la récupération des gradients partie froide a interrompu cette couche se réchauffe de nouveau et le même mécanisme se reproduit de nouveau.

La thermoélectricité classique : La différence de température entre deux points peut être utilisée pour récupérer de l'énergie par transfert de chaleur. Le cycle de Carnot permet de calculer le rendement théorique maximal d'un tel dispositif. Ce rendement est donné par (1.2), où T_H est la température haute et T_B la température basse. Cette expression montre bien que le rendement est très faible dans le cas de faibles écarts de température (en degré Kelvin). Par exemple, entre un corps humain à 37°C et une pièce à 20°C , on ne peut pas espérer obtenir un rendement supérieur à 5.5%.

$$\eta = \frac{T_H - T_B}{T_H} \quad (1.2)$$

Des micros générateurs ont néanmoins été développés, leur rendement est généralement inférieur à 10% pour des transferts de chaleur de 200°C à 20°C et inférieur à 1% pour des transferts de chaleur de 40°C à 20°C . Des applications plus coûteuses en énergie ont même été alimentées avec succès par un générateur thermoélectrique.

Ainsi, les chercheurs dans [12] ont développé un système de communication sans fil autonome tirant son énergie de la différence de température entre l'environnement ambiant et le corps humain ou de l'eau froide. Pour cette application, la puissance de sortie du générateur thermoélectrique était de 1.6mW.

Quelques applications industrielles utilisent des générateurs thermoélectriques. Parmi elles la montre bracelet Seiko Thermic représenté sur la figure 1-3. Celle-ci utilise 10 modules thermoélectriques qui génèrent suffisamment de microwatts pour entretenir le mouvement mécanique de la montre à partir du gradient thermique entre l'air ambiant et le corps humain.

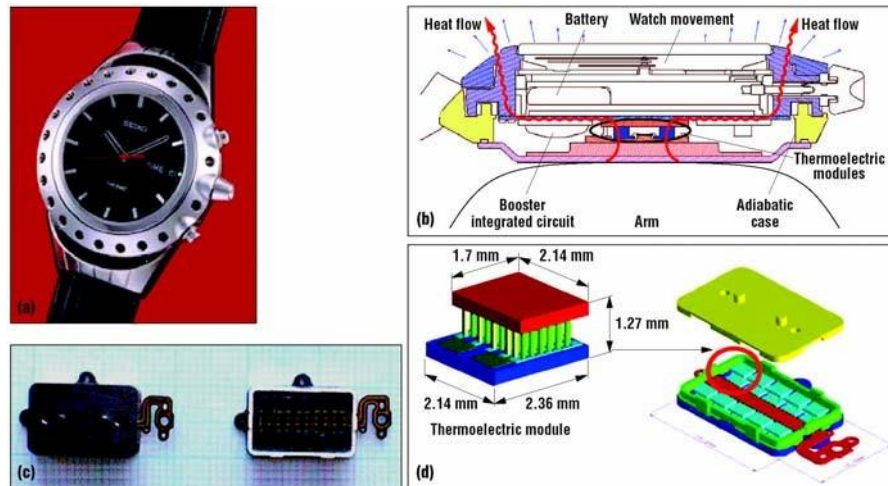


Figure 1.3 Montre Thermique Seiko : (a) le produit ; (b) coupe transversale ; (c) modules thermoélectriques ; (d) schéma d'un module thermoélectrique. Copyright Seiko Instruments [14]

1.2.5 L'énergie mécanique

L'énergie mécanique universellement présente dans notre environnement sous deux formes distinctes : déformation (déplacement relatif entre deux parties en mouvement) et vibration (une seule partie en mouvement). Dans les deux cas de figure, il est possible, grâce à un mécanisme dédié, de transformer cette énergie en une énergie électrique. Dans le cas de la déformation, il suffit d'un convertisseur qui transforme le déplacement relatif en énergie électrique, et dans le cas de la vibration, il faut d'abord créer un point de référence, par exemple une masse sismique, pour transformer la vibration en un déplacement relatif qui peut être converti en énergie électrique via un convertisseur mécanique/électrique. Nous analysons dans ce qui suit les quelques systèmes de récupération de l'énergie de déformation et de vibrations mécaniques [47].

Energie de déformation : Un objet se déforme lorsqu'il est soumis à une force, une pression, ou un poids. Parmi les sources qui existent dans notre environnement nous pouvons trouver :

- * La semelle d'une chaussure lorsque l'on marche.
- * La torsion d'un ski ou d'un surf des neiges pendant l'effort.
- * L'interrupteur soumis à une pression.
- * La déformation d'un habit lorsque celui-ci est porté ou au lavage.
- * La déformation d'objets liée à un échauffement.

Le corps humain est une source intéressante de déformation mécanique, ceci ouvre la voie à un large champ d'applications pour les systèmes de récupération d'énergie mécanique, comme par exemple l'alimentation des implants dans le corps humain, des appareils électroniques à usage quotidien...etc.

La conversion de l'énergie de déformation en une énergie électrique est souvent réalisée grâce aux matériaux dits électro actifs qui sont caractérisés par un couplage électromécanique intrinsèque [48]. Il existe différents types de matériaux électro actifs, comme par exemple les polymères ioniques, les polymères diélectriques, les piézoélectriques, les alliages magnétostrictifs. etc.

Energie de vibration : Les vibrations mécaniques sont communes dans beaucoup d'environnements. Elles vont des faibles vibrations des murs et du sol à proximité de machines tournantes aux très fortes sollicitations des pièces mécaniques en contact avec un moteur d'avion. Elles sont sujettes à de grandes variations de fréquence et d'amplitude. Le premier dispositif connu permettant de récupérer ce type d'énergie est la montre d'Abraham-Louis Perrelet en 1770 dont le mécanisme se remonte automatiquement lors des mouvements de son porteur.

La plupart des applications des réseaux de capteurs sans fil concerne des environnements riches en vibrations mécaniques (milieu industriel, transports).

L'exploitation de l'énergie vibratoire ambiante apparaît donc comme un excellent moyen de remplacer l'usage des batteries qui limite la durée de vie de ces réseaux.

1.2.6 Mécanisme de transduction par matériaux électro actifs

Par matériau électro-actif nous entendons tout matériau possédant un couplage électromécanique [52]. Ces matériaux, de par leur nature, se déforment sous l'action d'un champ électrique/magnétique, et réciproquement, ils génèrent un champ électrique/magnétique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique [53].

L'origine de ce couplage réside dans la géométrie de la structure de la matière à l'échelle microscopique, qui change de dimensions sous l'action d'un champ électrique ou magnétique, et inversement, génère un champ magnétique/électrique en opposition sous l'action d'une contrainte mécanique [54]. Nous décrivons ci-dessous quelques exemples illustratifs pour chacune de ces propriétés.

Utilisation des matériaux électrostrictifs : L'électrostriction est la propriété de certains matériaux à générer une déformation quadratique sous un champ électrique, l'effet inverse traduit la variation de la permittivité diélectrique lorsqu'une contrainte mécanique est imposée. Contrairement aux matériaux piézoélectriques où cette dépendance entre la contrainte et la polarisation est linéaire, les matériaux électrostrictifs présentent une dépendance quadratique. Cette propriété existe également dans les matériaux diélectriques de type polymères ou céramiques non symétriques comme présente la figure 1.4. Quelques exemples dérivés du PVDF présentent cette propriété : le copolymère P(VDF-TrFE), le terpolymère P(VDF-TrFE-CTFE) [58], polymères semi cristallin...etc. L'utilisation de ce type de matériau n'est pas aussi répandue que les matériaux piézoélectriques.

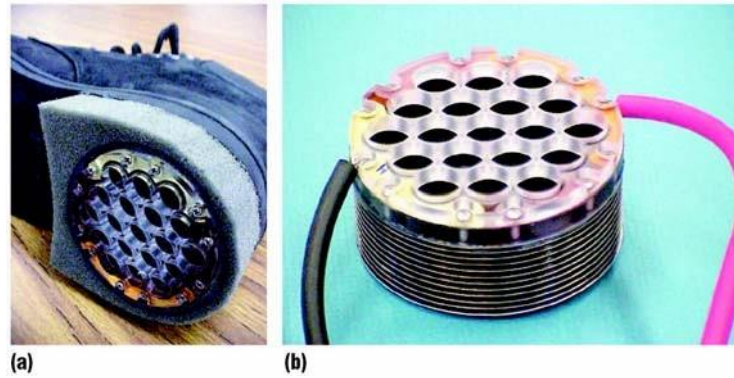


Figure 1.4 Chaussure dotée d'un générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus) [17]

Cependant, de plus en plus de laboratoires de recherche commencent à s'intéresser à ce type de conversion, notamment en raison, d'une part, des progrès réalisés dans le domaine des matériaux (amélioration du couplage électromécanique) et d'autre part, la recherche d'alternatives aux matériaux piézoélectriques durs qui fonctionnent bien mais seulement pour des fréquences relativement élevées, alors que les matériaux électrostrictifs, de par leur faible rigidité mécanique, permettent de fonctionner à basse fréquence ($< 100\text{Hz}$) et à très basse fréquence ($< 1\text{Hz}$) [59].

Utilisation des matériaux magnétostrictifs : Les matériaux magnétostrictifs désignent les matériaux ferroélectriques qui possèdent la propriété de se déformer sous l'effet d'un champ magnétique. Leur utilisation dans le domaine de la récupération de l'énergie vibratoire est souvent couplée avec des matériaux piézoélectriques. A titre d'exemple, nous présentons un système développé par [60] : l'idée est d'utiliser les vibrations pour faire déplacer un aimant permanent à proximité d'un matériau magnétostrictif.



Figure 1.5 Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique [19]

Ce dernier, collé sur une couche piézoélectrique, se déforme sous l'application d'un champ magnétique, l'énergie de cette déformation est ainsi convertie en énergie électrique grâce au matériau piézoélectrique.

Ce type de convertisseur permet de transformer une variation de champ magnétique, même lente, en énergie électrique sans passer par un bobinage dont les performances, en petites dimensions ou en très basses fréquences, sont réduites. Cet assemblage permet de résoudre la plupart des limitations que l'on peut avoir en petites dimensions avec de l'électromagnétisme comme montre la figure 1.5 [61].

Utilisation des matériaux piézoélectriques : Les micro-générateurs piézoélectriques sont basés sur l'effet direct de la piézoélectricité, à savoir que l'application d'une contrainte sur un matériau piézoélectrique électrode entraîne l'apparition d'une tension entre les électrodes. Les micro-générateurs piézoélectriques peuvent être constitués d'un système mécanique présentant une fréquence de résonance qui couple le micro-générateur aux vibrations ambiantes ou bien les éléments piézoélectriques peuvent être directement sollicités. La figure 1.6 illustre ces deux types de générateurs. La forme la plus répandue est basée sur l'utilisation d'une poutre encastrée-libre mise en oscillation sous l'effet d'une vibration mécanique. Ci-dessous sont présentées quelques configurations de générateurs piézoélectriques :

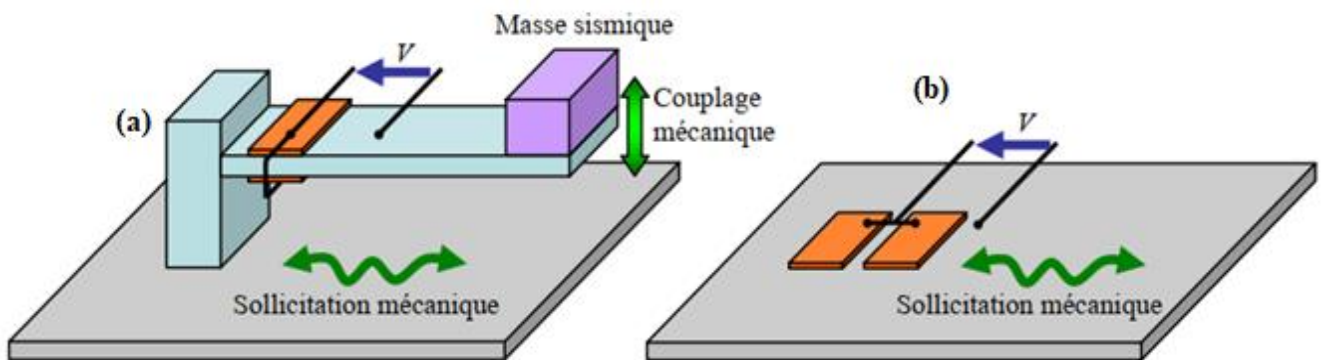


Figure 1.6 Générateurs piézoélectriques : (a) conversion par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique, (b) conversion directe

Il s'agit dans les deux cas de convertir l'énergie vibratoire de la structure vibrante représentée en gris. Dans le premier cas (a) l'énergie de la structure est transmise au système oscillant constitué par une poutre sur laquelle sont collés des inserts piézoélectriques assurant la conversion mécano-électrique et éventuellement une masse sismique permettant d'ajuster la fréquence de résonance. Dans le deuxième cas (b), les inserts piézoélectriques sont directement collés sur la structure. La différence théorique entre ces deux systèmes n'est pas franche, puisque le cas (b) peut être vu comme un agrandissement du cas (a) si la structure sur laquelle sont collés les inserts présente des résonances mécaniques. D'un point de vue pratique cependant, le cas (b) montre que l'on peut réaliser simplement un micro-générateur susceptible d'alimenter un capteur en collant des éléments piézoélectriques sur une structure vibrante.

Ceci constitue un avantage incontestable par rapport aux générateurs électromagnétiques ou électrostatiques qui sont nécessairement constitués de pièces mécaniques ayant des mouvements relatifs (déplacement d'un aimant par rapport à une bobine pour les générateurs électromagnétiques ou modification de la distance entre les électrodes pour les générateurs électrostatiques).

Dans la plupart des cas, les matériaux piézoélectriques sont rigides, ils nécessitent des efforts importants sur de faibles courses pour fonctionner d'une manière optimale. Comme les efforts d'accélération engendrés par une vibration sur une masse sismique ne sont pas très importants, on utilise des poutres de type bilame (assemblage de deux couches piézoélectriques sur un substrat) qui agissent comme un levier mécanique : une amplitude de déplacement importante en bout de poutre engendre une contrainte mécanique importante dans le matériau du bilame avec un faible taux de déformation. Toutefois, cette rigidité mécanique élevée permet difficilement d'atteindre des fréquences de résonance basses (<100 Hz) en petites dimensions. Cet abaissement de la fréquence de résonance, pour les structures intégrées sur silicium, reste un des challenges que tentent de relever de nombreux laboratoires. Néanmoins, les matériaux piézoélectriques peuvent stocker une densité d'énergie mécanique relativement importante et, selon les matériaux, en restituer une bonne partie sous forme électrique (couplage électromécanique pouvant aller de 1 % à plus de 80 %).

Energie du corps humain

Le corps humain stocke, dissipe et développe une énergie considérable par rapport à la consommation de la plupart des dispositifs électroniques portables. Il semble donc envisageable de récupérer une partie de cette énergie pour alimenter des appareils de puissance modérée. Dans les travaux [35] et [36] détaillent les sources potentielles d'énergie du corps humain. La puissance mécanique développée lors d'activités musculaires simples tels que marcher (67W), tourner une manivelle (21W), serrer avec la main (6W), etc. est comparée à la consommation de quelques appareils électriques portables courants, comme une petite radio FM (30mW), un Walkman (60mW) ou un téléphone portable (35mW en communication). Cette comparaison justifie l'idée de créer des dispositifs générateurs d'énergie qui permettent de créer de l'énergie électrique à partir d'un mouvement volontaire et spécifique de l'utilisateur. Plusieurs exemples de réalisations pratiques sont cités. Ces appareils sont généralement conçus sur le principe de la dynamo, un levier ou une manivelle permettant de mettre en mouvement une génératrice à courant continu. Les puissances générées peuvent atteindre quelques Watts ce qui rend possible l'alimentation de la plupart des systèmes électroniques portables. Il existe également des dispositifs permettant de récupérer de l'énergie lors de mouvements naturels. Les chercheurs [37] détaillent l'énergie pouvant être récupérée de cette façon. Il s'agit de l'énergie associée au mouvement des talons, à la torsion des articulations ou au déplacement du centre d'inertie du corps.

Les auteurs [38] précisent la quantité d'énergie maximale disponible en utilisant des dispositifs piézoélectriques classiques à partir de mouvements dont la fonction première n'est pas de générer de l'énergie. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 1-1. La puissance utile prend en compte les pertes mécaniques dans le dispositif de mise en contrainte des éléments piézoélectriques, le rendement de la conversion mécano-électrique et les pertes électriques dans le convertisseur permettant d'adapter la tension alternative générée sur les éléments piézoélectriques au dispositif à alimenter.

Tableau 1-1 Puissance électrique maximale disponible en utilisant un générateur piézoélectrique permettant de récupérer une partie de l'énergie de mouvements humains [38]

	Puissance mécanique récupérable	Pertes Mécaniques	Rendement Mécano-Électrique	Pertes Électriques	Puissance utile
Taper sur un clavier	7mW	10%	50%	10%	2.8mW
Mouvements des bras	3W	50%	11%	10%	150mW
Souffle	0.83W	10%	11%	10%	74mW
Marche	67W	75%	50%	10%	7.5W

Les résultats présentés dans le Tableau 1-1 sont très optimistes. En effet, les travaux réalisés par les chercheurs [39] et [40, 41] sur les chaussures piézoélectriques n'atteignent pas ces performances. Le prototype, représenté sur la figure 1.7, a été réalisé en deux versions. La première version utilise des polymères piézoélectriques (PVDF) stratifiés placés sous la plante du pied et génère 1.1mW. La deuxième version utilise un biomorphe réalisé avec des céramiques de PZT et génère 8.4mW.



Figure 1.7 Chaussures piézoélectriques développées au MIT, utilisant soit du PVDF stratifié placé sous la plante du pied, soit un biomorphe réalisé à partir de céramiques piézoélectriques (PZT) placé sous le talon [20]

La même équipe a également réalisé une paire de chaussure utilisant un micro-générateur électromagnétique. Ce dispositif est constitué d'un levier actionné à chaque fois que l'utilisateur pose le talon au sol, d'un système d'engrenage permettant d'accélérer le mouvement de rotation généré par le levier et d'une génératrice continue pour la conversion mécano-électrique.

La puissance récupérée, 250mW, est nettement plus importante que pour les chaussures piézoélectriques mais le dispositif est très complexe, fragile, cher et le levier représente un gêne pour l'utilisateur.

1.3 Récupération d'énergie à l'aide d'éléments piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques ont été utilisés dans diverses applications, notamment la santé, l'énergie et l'électrochimie. Les matériaux piézoélectriques fonctionnent efficacement dans différents domaines tels que la médecine, l'énergie et l'électrochimie. En raison de leur utilisation courante, les matériaux piézoélectriques ont attiré l'attention des chercheurs pour améliorer leur comportement piézoélectrique. Une gamme de matériaux organiques ou inorganiques (naturels ou synthétiques) sont couramment utilisés comme renforcement dans les systèmes de matériaux piézoélectriques fonctionnels pour préparer des matériaux piézoélectriques avancés ou des matériaux composites piézoélectriques. Les remplissages peuvent augmenter la maniabilité ou changer les propriétés mécaniques, thermiques et de durée de vie des matériaux, tout en contrôlant les coûts. Les matériaux produits peuvent également avoir des inconvénients, comme être fragiles ou opaques. La quantité de remplissage est très importante pour déterminer l'ampleur et le degré des changements, mais l'épaisseur, les formes et la topographie sont également des facteurs importants. Les matériaux composites ont des caractéristiques supérieures et de nouveaux usages par rapport aux matériaux à phase unique. Cependant, le PEG linéaire atteint d'excellentes performances uniquement lorsque la fréquence de vibration est fixe et correspond à sa fréquence de résonance. Si la fréquence d'excitation dérive légèrement, la puissance récupérée va considérablement diminuer. Comme la majorité des sources de vibrations dans un environnement réel présentent des fréquences variables ou des spectres aléatoires, l'approche classique PEG n'est pas toujours optimale [46].

Les matériaux piézoélectriques semblent particulièrement bien adaptés à la récupération d'énergie mécanique. Leur densité de puissance est élevée, ils sont compacts et solides et ne nécessitent pas d'entretien. Les générateurs piézoélectriques peuvent potentiellement alimenter des dispositifs électroniques allant de quelques μW à quelques centaines de mW.

1.3.1 Types de conversions

Conversion directe : Ce type de conversion correspond aux dispositifs de récupération d'énergie de type briquet ou allume-gaz, où on applique directement ou via un mécanisme de levier une contrainte sur un matériau piézoélectrique, comme illustré sur la Figure 1.8 (a). Dans cette première approche on considère le cas d'une conversion mécano-électrique directe, c'est-à-dire sans stockage intermédiaire d'énergie sous forme mécanique.

On définit le taux de conversion électromécanique comme le rapport de l'énergie électrique récupérée sur l'énergie mécanique fournie. Cette grandeur ne correspond pas à proprement parler à un rendement, car l'élément piézoélectrique restitue de l'énergie lorsque la contrainte est supprimée comme illustré sur les figures 1.8 (b) et (c).

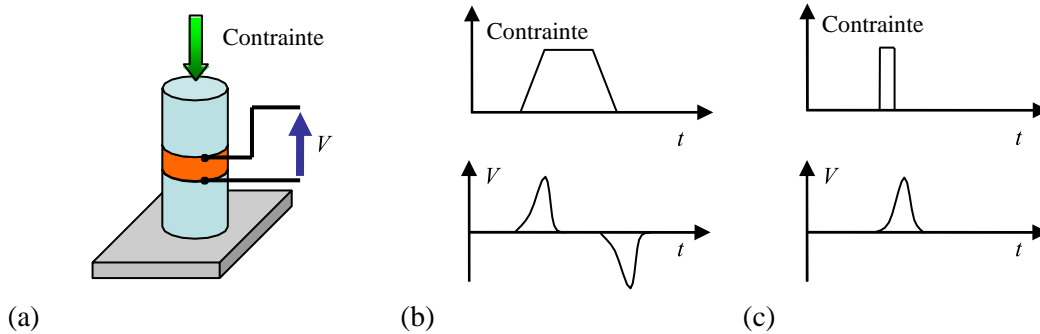


Figure 1.8 Conversion directe : (a) principe, (b) sollicitation quasi-statique, (c) sollicitation dynamique

Cependant, si l'on considère que l'énergie restituée est perdue ou inutilisable, ce qui est généralement le cas pour les micro-générateurs à conversion directe, alors le taux de conversion peut être assimilé au rendement de la conversion.

Les travaux des auteurs [42] et [43] distinguent et comparent deux cas de figures : Soit la contrainte est appliquée de façon quasi-statique et la tension générée sur l'élément piézoélectrique est bidirectionnelle, soit la contrainte est appliquée de façon dynamique (choc) et dans ce cas la tension est unidirectionnelle. Ces deux modes de sollicitations sont représentés sur les figures 1.9 (b) et (c). Alors que les travaux dans [42] indiquent que le taux de conversion électromécanique sous sollicitation quasi-statique est meilleur que dans le cas dynamique, les travaux de [43] affirment le contraire. On peut de toute façon certifier que ce rendement ne peut pas excéder le carré du coefficient de couplage du matériau piézoélectrique utilisé. Le Tableau 1-2 résume les ordres de grandeurs des rendements maximums en fonction du type de matériaux piézoélectriques.

Tableau 1-2 Taux de conversion maximal en conversion directe pour différents types de matériaux piézoélectriques

Matériaux	Taux de conversion max
polyfluorures de vinylidène (PVDF)	1-5%
Céramiques de PZT	35-50%
Monocristaux	70-90%

En pratique, la puissance récupérée par ce genre de dispositif est très faible. La mise en contrainte des matériaux piézoélectriques est en effet difficile à mettre en œuvre, et cette difficulté augmente d'autant que la quantité de matériaux piézoélectriques utilisée est importante. Ainsi, dans le cas de la chaussure piézoélectrique développée au MIT.

La faible puissance récupérée (8mW) par rapport à l'énergie mécanique disponible (67W) est principalement due à la difficulté de contraindre les éléments piézoélectriques à partir dumouvement du pied. Les matériaux piézoélectriques fonctionnent en effet sous forte contrainte et faible déformation, alors que le mouvement du pied a plutôt tendance à générer de fortes déformations mais une force relativement faible.

Conversion indirecte, systèmes vibrants : Une utilisation plus rationnelle des matériaux piézoélectriques consiste à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique au moyen de plusieurs cycles de compression - décompression successifs. Le bouton poussoir développé par les chercheurs [44] fonctionne sur ce principe. Dans ce dispositif, un élément piézoélectrique est excité sur son mode de résonance propre lors d'une action sur un bouton poussoir. L'énergie vibratoire fournie est ensuite récupérée sur plusieurs cycles d'oscillation en reliant l'élément piézoélectrique à une capacité de stockage via un pont de diode. L'énergie électrique récupérée lors d'une action sur le bouton est de l'ordre de 2mJ, ce qui est suffisant pour transmettre un code de 12 bits à l'aide d'un émetteur RF. Plutôt que d'exciter un élément piézoélectrique sur un de ses modes propres, un moyen plus simple consiste à coller des éléments piézoélectriques sur une structure vibrante.

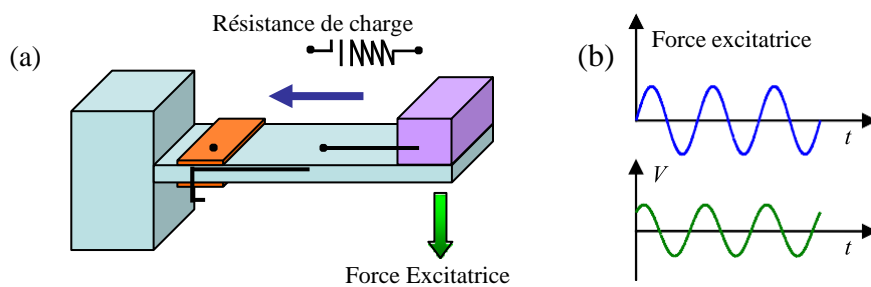


Figure 1.9 Dispositif d'étude classique : (a) schéma du dispositif, (b) sollicitation sinusoïdale

Les auteurs [46] se sont intéressés au rendement de ce dispositif lorsqu'il est excité à sa résonance par une force d'amplitude constante. Ces travaux confirment l'existence d'une valeur de résistance qui maximise le rendement. Le rendement maximum est exprimé en fonction du coefficient de couplage global k du micro-générateur et de son facteur de qualité mécanique Q . Cette expression est donnée dans (1.3). On peut constater que le rendement augmente logiquement avec le couplage et le facteur qualité mécanique.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2}{k^2 Q}} \quad (1.3)$$

En utilisant des structures suffisamment surtendues (Q élevé), on peut obtenir des rendements très importants même pour des coefficients de couplage électromécanique faibles. Ainsi, pour $Q=150$ et $k^2=5\%$, on obtient un rendement de 80%.

Si le dispositif est sollicité en régime quasi-statique, on rejoint le cas du générateur à conversion direct (non résonant) dont le taux de conversion est inférieur au carré du coefficient de couplage électromécanique, soit 5% dans ce cas.

La puissance maximale que peut produire ce type de générateur est limitée par la sollicitation maximale que l'on peut appliquer sur le dispositif avant rupture mécanique ou dépolérisation des matériaux piézoélectriques. Cette limite est fonction de la taille, de la géométrie et des matériaux utilisés dans le générateur. A titre d'exemple, le micro-générateur réalisé par les auteurs [47] est composé d'une poutre en acier de 20mm de long, 10mm de large et 0.1mm d'épaisseur sur laquelle est déposée une couche mince de matériaux piézoélectrique épaisse de 0.02mm. Il peut produire une puissance maximale de $3\mu\text{W}$.

La puissance de ce micro-générateur est limitée par sa taille extrêmement réduite, sa puissance volumique est de $150\mu\text{W}/\text{cm}^3$ environ.

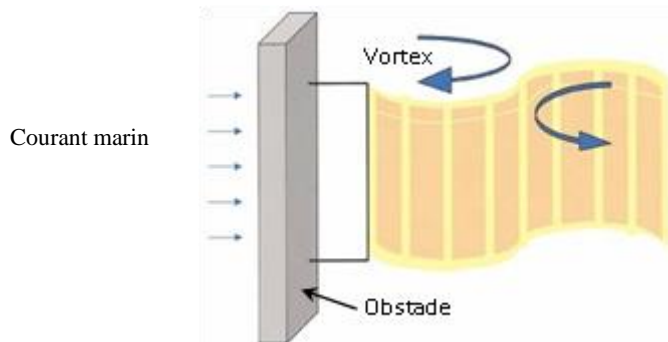


Figure 1.10 Anguille récupératrice d'énergie [57]

Le dispositif le plus simple du récupérateur piézoélectrique est représenté sur la figure 1.10. Il s'agit d'une poutre sur laquelle sont collés des éléments piézoélectriques. Une des extrémités de la poutre est encastrée dans un bâti fixe, l'autre extrémité est libre. Le système est excité par une force extérieure. L'énergie convertie est dissipée dans une résistance de charge. Le rendement de ce dispositif est le rapport de l'énergie dissipée dans la charge sur l'énergie fournie à la poutre.

Techniques de conversion piézoélectriques non linéaires : La plupart des travaux scientifiques à propos des micro-générateurs piézoélectriques concernent soit l'optimisation du couplage électromécanique soit le développement de convertisseur DC- DC permettant de maximiser le transfert de puissance par adaptation d'impédance. Nous proposons une approche différente, qui consiste à ne pas considérer séparément la structure électromécanique et le dispositif mais de faire la modélisation du système complet. Les techniques non linéaires proposées permettent d'élargir les cycles énergétiques de conversion mécano-électrique, c'est-à-dire la façon dont est extraite l'énergie mécanique de la structure et dont elle est convertie en énergie électrique. Le seul exemple de générateur piézoélectrique utilisant une technique non linéaire correspond aux travaux de [57].

Ce générateur est appelé anguille récupératrice d'énergie (Energy Harvesting Eel), il est représenté sur la figure 1.7. Il s'agit d'un dispositif utilisant des polymères piézoélectriques pour convertir l'énergie mécanique disponible dans les océans ou dans des rivières. Ces générateurs sont excités par les vortex créés par le courant marin derrière un obstacle. Le mouvement du générateur ressemble alors à celui d'une anguille. Un générateur de ce type, long de 1.3m et large de 15cm environ produit 200mW environ. Ce générateur utilise un traitement non linéaire permettant à la fois de maximiser l'énergie extraite et d'abaisser le niveau de tension.

1.4 Enjeux et perspectives

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif principal est de récupérer suffisamment d'énergie afin par exemple, soit d'alimenter un microcontrôleur, soit des capteurs, soit de réaliser le contrôle santé des pièces ou encore de rendre l'amortisseur au sein d'une suspension d'un véhicule semi-actif autonome en fonction du niveau d'énergie récupéré. Deux sources d'énergie restent peu exploitées à ce jour dans une automobile : les déplacements liés à la liaison au sol et les vibrations du moteur.

De la même manière, les vibrations des moteurs thermiques sont supportées par le véhicule. Comme la suspension automobile est la pièce principale faisant la liaison entre la route et l'habitacle, elle reçoit à la fois les vibrations dues à l'état de surface de la route, au moteur et est également soumise à de grands déplacements [18]. Dans la littérature, l'énergie vibratoire récupérée peut couvrir une large bande fréquentielle. Les vibrations qui ont un grand intérêt pour notre étude, sont incluses entre 0.5 et 150Hz et correspondent aux modes de corps rigides et aux modes de structures. Cette thèse se focalise sur la récupération d'énergie sur les amortisseurs et dans une suspension automobile. Compte tenu des types de déplacement disponibles dans la suspension, il est naturel de s'orienter vers des techniques piézoélectriques pour les vibrations.

1.5 Conclusions

Ce chapitre a donné un aperçu sur le contexte global de la récupération d'énergie à basse puissance. Nous avons présenté un certain nombre d'applications faisables ainsi que les différentes formes d'énergie potentiellement exploitables. Toute application, chaque forme d'énergie et chaque mécanisme de transduction fait l'objet d'une thématique à part entière dans la recherche scientifique. A partir du chapitre suivant, nous nous focaliserons uniquement sur la récupération de l'énergie vibratoire en présentant les principaux mécanismes mis en œuvre pour la transformation de la vibration en déplacement relatif (masse sismique/résonance) et pour la conversion de ce déplacement relatif en énergie électrique (principe électromagnétique, piézoélectrique, électrostatique), ainsi que les différents travaux effectués pour l'amélioration de son fonctionnement.

Chapitre 2

CONTRIBUTION A LA PHASE DE LA MODELISATION MECATRONIQUE DU RECUPERATEUR PZT

2.1 Introduction

La réduction du bruit et des vibrations est un sujet de recherche prioritaire dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'équipement sportif, la mesure, etc. Afin de répondre à ces préoccupations, de nombreuses méthodes d'amortissement vibratoire utilisant des matériaux piézoélectriques ont été développées. Ces matériaux, collés sur la structure à amortir, sont comprimés ou étirés lorsque la structure vibre et convertissent une part de l'énergie mécanique de la structure en énergie électrique. En transférant ou en dégradant cette énergie, on réduit l'énergie mécanique dans la structure et donc on amortit les vibrations. On distingue plusieurs types de contrôle vibratoire à base de matériaux piézoélectriques.

Les techniques dites actives utilisent un système complexe comprenant des capteurs permettant de mesurer la vibration, un calculateur permettant de déduire la tension à appliquer sur les actionneurs piézoélectriques pour contrôler la vibration, et enfin des générateurs de tension et des amplis pour alimenter ces actionneurs. Les techniques passives consistent à connecter aux éléments piézoélectriques un réseau électrique passif dissipatif. La méthode la plus efficace consiste à connecter une inductance en série avec une résistance, en parallèle avec la capacité propre des éléments piézoélectriques. L'amortissement optimal est obtenu lorsque la fréquence de résonance électrique du circuit oscillant ainsi constitué est accordée à la fréquence de résonance de la structure. Dans ces conditions, cette méthode s'avère très efficace et beaucoup plus simple que les techniques actives.

Cependant, cette technique passive présente quelques inconvénients majeurs. Pour des fréquences de résonances basses, la valeur optimale de l'inductance devient très grande et nécessite l'utilisation de circuits actifs spécifiques (gérateurs).

Un modèle simple à constantes localisées est proposé pour modéliser le comportement d'une poutre en vibration sur laquelle sont collés des inserts piézoélectriques. Ce modèle est comparé à une modélisation par éléments finis et donne des résultats équivalents pour un temps de calcul au moins 100 fois plus court.

L'exploitation théorique du modèle Bond Graph (BG) ainsi que l'étude du flux du vecteur de Poynting dans la structure permet de mettre en évidence l'augmentation des cycles d'extraction de l'énergie mécanique.

2.2 Systèmes de collecte d'énergie piézoélectrique pour la suspension des voitures

2.2.1 Matériaux piézoélectriques

L'énergie dissipée par le système de suspension peut être convertie en une autre forme utile à l'aide de différents types de collecteurs. Dans leurs travaux, les chercheurs dans [38] ont indiqué que le potentiel de puissance exploitable était compris entre 46W et 7500W. Cependant, les travaux sur la mise en œuvre du capteur piézoélectrique dans le système de suspension des voitures sont limités. Le matériau piézoélectrique peut être ajouté comme élément supplémentaire de récolte d'énergie à divers endroits du système de suspension de la voiture.

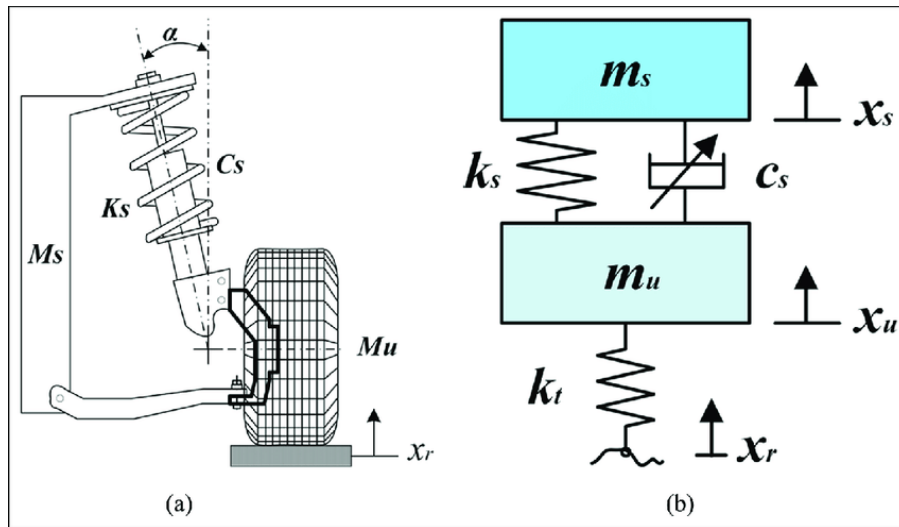


Figure 2.1 Schéma de la dynamique principale du quart de véhicule

De plus, les auteurs dans [39] ont étudié l'énergie récoltée par le matériau piézoélectrique de manière théorique et expérimentale. La figure 2.1 montre un schéma du modèle de quart de voiture (2 DOF) avec un capteur piézoélectrique placé parallèlement aux ressorts de suspension. Pour l'étude théorique, le modèle de voiture a été excité par une entrée sinusoïdale d'une amplitude de 1g (9, 8m/s²). La tension de sortie maximale et la puissance de l'élément piézoélectrique ont été enregistrées comme étant de 27, 62V et 2, 84W, respectivement. La tension et la puissance récoltées ont été affectées par les paramètres de suspension tels que la rigidité du pneu, la rigidité de la suspension et les coefficients d'amortissement. L'analyse théorique proposée a été validée expérimentalement en modélisant les masses suspendues et non suspendues comme des blocs d'aluminium avec quatre ressorts et un élément piézoélectrique entre les deux. Le montage a été soumis à une onde sinusoïdale d'une amplitude de 1, 5m/s². La tension de sortie maximale était de 0, 33V à une fréquence de 38, 58Hz. De plus, les caractéristiques du matériau piézoélectrique, telles que son type (cantilever ou pile), ses dimensions (surface A_p et épaisseur t_p), le coefficient de rigidité piézoélectrique K_p , la constante de charge d_{33} , la permittivité diélectrique ξ_{33} et le module d'élasticité E_p , ne sont pas clairement mentionnées.

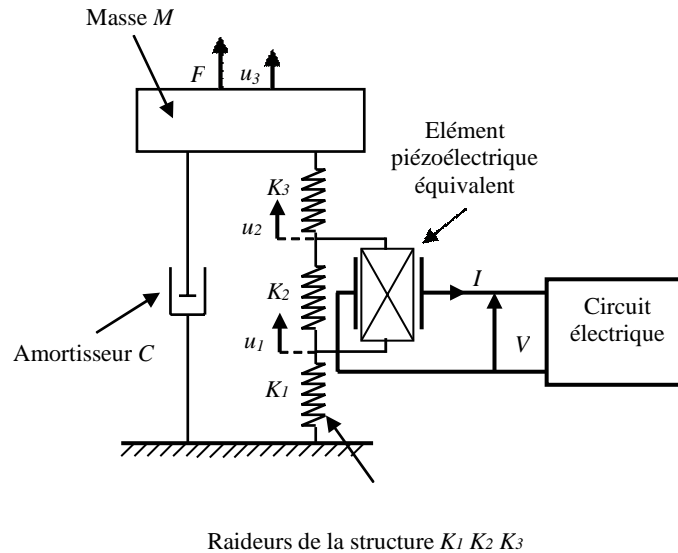


Figure 2-2 Modèle à constantes localisées

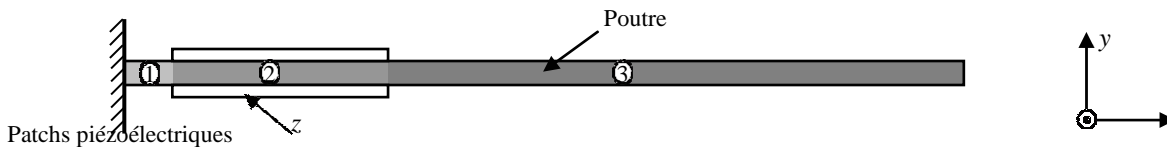


Figure 2.3 Modélisation de la poutre

2.2.2 Calcul des paramètres du modèle

On suppose que la structure peut être modélisée par le modèle à constantes localisées représenté sur la figure 2.2, où M est la masse dynamique équivalente de la structure. K_1 , K_2 , K_3 sont les raideurs équivalentes des tronçons de la poutre respectivement numérotés de 1 à 3 sur la figure 2.3. L'élément piézoélectrique équivalent correspond aux patchs piézoélectriques, c'est pourquoi il est placé en parallèle avec K_2 . C'est l'amortisseur équivalent de la structure. Le déplacement u_3 de la masse M correspond au déplacement $u_y L$ de l'extrémité libre de la poutre.

Afin de répondre à ces préoccupations, de nombreuses méthodes d'amortissement vibratoire utilisant des matériaux piézoélectriques ont été développées. Ces matériaux, collés sur la structure à amortir, sont comprimés ou étirés lorsque la structure vibre et convertissent une part de l'énergie mécanique de la structure en énergie électrique.

Tableau 2-1 Valeur des paramètres du modèle à constantes localisées

M (g)	67.1
K_1 (Nm ⁻¹)	65567
K_2 (Nm ⁻¹)	27379
K_3 (Nm ⁻¹)	42362
K_{PE} (Nm ⁻¹)	8088
α_P (N/V)	0.0189
C_{0P} (nF)	124
C (Nm ⁻¹ s ⁻¹)	0.128

En transférant ou en dégradant cette énergie, on réduit l'énergie mécanique dans la structure et donc on amortit les vibrations. On distingue plusieurs types de contrôle vibratoire à base de matériaux piézoélectriques. On considère une poutre vibrante amortie par l'action d'éléments piézoélectriques. La fixation des éléments piézoélectriques sur cette poutre est représentée en détail sur la figure 2.4. Une de ses extrémités est encastree dans une structure rigide, l'autre est libre. Des éléments piézoélectriques sont collés de part et d'autre de la poutre, près de l'encastrement, là où la déformation est la plus importante. Dans le cas considéré ici, les éléments piézoélectriques sont constitués de céramiques massives polarisées perpendiculairement à la poutre. C'est donc le couplage latérale k_{31} qui est prépondérant. Cette approche peut cependant être généralisée aux composites piézoélectriques dont la polarisation peut être parallèle à la poutre. Les deux éléments piézoélectriques sont connectés en parallèle. La masse électrique est constituée par les électrodes en contact avec la poutre.

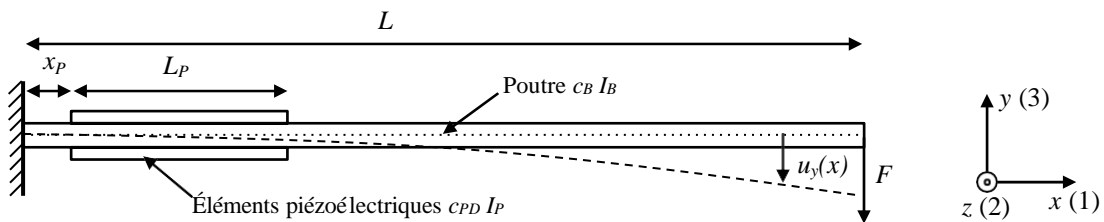


Figure 2-4 Poutre vibrante comportant des éléments piézoélectriques

Tableau 2-2 Comparaison des fréquences de résonances et du coefficient de couplage pour le modèle ANSYS® et le modèle à constantes localisées

	ANSYS®	Modèle CL	Ecart
Fréquence résonance en circuit ouvert (Hz)	63.234	64.348	1.7%
Fréquence résonance en circuit fermé (Hz)	62.128	63.331	1.9%
Coefficient de couplage k (%)	18.6	17.7	4.8%

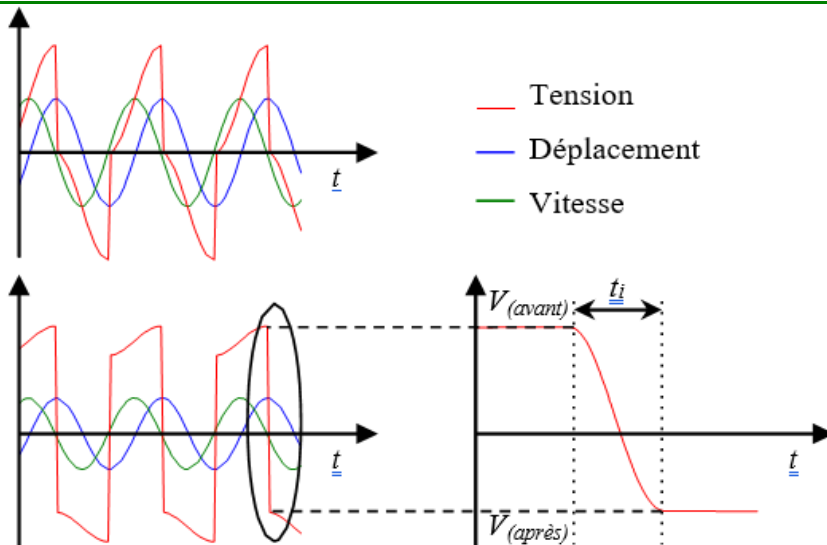


Figure 2.5 La commutation associée à une poutre vibrante amortie par l'action d'éléments piézoélectrique.

2.3 Comparaison entre les différentes techniques de conversion

Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de la perte du fonctionnement à la résonance. Ils sont dans certaines circonstances liés à la source de vibration et dans d'autres, liés à la structure de récupération de l'énergie vibratoire elle-même. Certaines études ont porté sur la récolte d'énergie à partir de la déformation des pneus de l'automobile. Lorsque le pneu s'aplatit contre la surface de la route, le matériau piézoélectrique est étiré et produit donc de l'électricité. Les chercheurs [16] ont proposé un collecteur piézoélectrique à double masse connecté au modèle de quart de voiture 1 ; la commutation associées une poutre vibrante amortie par l'action d'éléments piézoélectrique présenté à la figure 2.5. La barre du moissonneur PZT-4, dont les dimensions sont de 10cm de hauteur et de 1,5cm de largeur, a été montée sur la roue de suspension. Le modèle mathématique a été soumis à l'excitation aléatoire de la route rugueuse avec les différents profils de route B, C et D. Selon la norme ISO/T C108/SC2N 67, la rugosité de la route a été classée en partant d'une route très lisse à une route très rugueuse. Les calculs effectués par la méthode d'itération ont montré qu'une puissance de 738mW pouvait être obtenue à partir du profil de route de type D en mettant en œuvre plus de quatre barres piézoélectriques dans le système. Chaque barre avait une hauteur et une largeur de 10cm et 1,5cm, respectivement, avec une vitesse de véhicule de 35m/s. Cette puissance récoltée a également été affectée par les paramètres de la suspension et du capteur piézoélectrique. Par exemple, l'augmentation de la vitesse des voitures et la diminution de la largeur de la barre augmentaient considérablement l'énergie électrique générée par les voitures.



Figure 2.6 Maillage de la structure (Le récupérateur)

La structure complète est maillée à l'aide de 185 éléments, avec deux couches d'éléments dans l'épaisseur des patches et trois dans l'épaisseur de la poutre en acier. L'encastrement de la poutre à l'une de ses extrémités est réalisé en forçant les deux composantes du déplacement à zéro pour les nœuds correspondant comme représenté par maillage de la structure sur la figure 2.6.

2.3.1 Variation de la fréquence de vibration (causes liées à la source) :

En réalité, et pour la plupart des sources de vibration, le spectre de vibration n'est pas concentré autour d'une seule fréquence comme montre la figure 6. Pour illustrer ce constat nous proposons, ci-dessous, quelques exemples de spectre de vibration :

Sources de vibration présentant une fréquence principale qui bouge dans le temps : Les vibrations dans la voiture sont présentes dès la mise en marche du moteur et jusqu'à son arrêt et c'est essentiellement durant son fonctionnement qu'on a besoin d'effectuer des mesures et d'assurer un contrôle continu des paramètres du véhicule tels que : pression, vitesse, accélération et la température.

Comme nous pouvons le constater les deux spectres de vibrations relevés sur la carrosserie d'une voiture à deux vitesses différentes, le spectre de vibration, s'il est intégré sur une longue durée, couvre un large de gamme de fréquence (30 à 120Hz). Nous constatons que l'énergie est essentiellement concentrée sur une fréquence principale mais qui évolue dans le temps et dépend pour une bonne partie du régime moteur et de la vitesse du véhicule. Nous constatons également que les niveaux d'accélération présents sont assez importants, ce qui permet d'espérer une densité de puissance récupérée relativement élevée ($> 10\text{W/cm}^3$).

Sources de vibration aléatoire ou mélange de fréquences : Contrairement au cas de la voiture qui présente une fréquence principale qui bouge dans le temps, les vibrations que l'on peut trouver dans des escaliers ou sur les rails d'un chemin de fer sont beaucoup plus chaotiques. Il est important de comparer les différentes moissonneuses à base d'éléments piézoélectriques disponibles dans la littérature à jour, quelles que soient leurs spécifications. La figure 2.7, résume le système pour l'énergie récoltée obtenue à partir des différents dispositifs considérés. Les systèmes de récoltes sont différents en termes de configurations (cantilever et pile), d'emplacements de l'élément piézoélectrique dans le système de suspension (ressorts, amortisseurs, et roues). Les modèles de systèmes de suspension (modèle de quart de voiture ou de demi-voiture), et d'excitation de l'entrée de la route (harmonique ou aléatoire) sont différents. On peut noter que la puissance récoltée va de 0,001mW à 3,9W, ce qui est limité par rapport à l'énergie disponible/dissipée. Certains chercheurs se sont concentrés uniquement sur l'évaluation de l'énergie dissipée par les systèmes de suspension des voitures, et non sur l'énergie récoltée [83]. De plus, certains chercheurs ont évalué l'énergie récoltée en utilisant d'autres techniques plutôt que des techniques piézoélectriques [84]. Différents mécanismes ont été abordés dans la littérature, tels que l'amortisseur électromagnétique linéaire, l'hydraulique, la crémaillère, la vis à billes, et l'amortisseur électromagnétique régénératif MR. Ils se sont concentrés sur le système de suspension active, alors que nous nous concentrons sur le système de suspension passive. Pour avoir un amortisseur de suspension régénératif, il faut remplacer l'amortisseur original de la voiture par un amortisseur régénératif régénérateur.

2.3.2 Circuit électronique du système de récolte piézoélectrique

Dans un système électromécanique, le fait de convertir une part de l'énergie vibratoire en énergie électrique revient du point de vue mécanique à augmenter les pertes. Lorsqu'on impose une force excitatrice sinusoïdale d'amplitude constante, le processus de récupération d'énergie s'accompagne ainsi inévitablement d'un phénomène d'amortissement vibratoire. Ce phénomène est négligeable dans le cas de systèmes pour lesquels le produit k^2Q_m est très faible ou de systèmes excités très en dehors de leurs fréquences de résonance. Nous précisons dans cette partie sous quelle valeur de k^2Q_m l'amortissement peut raisonnablement être négligé.

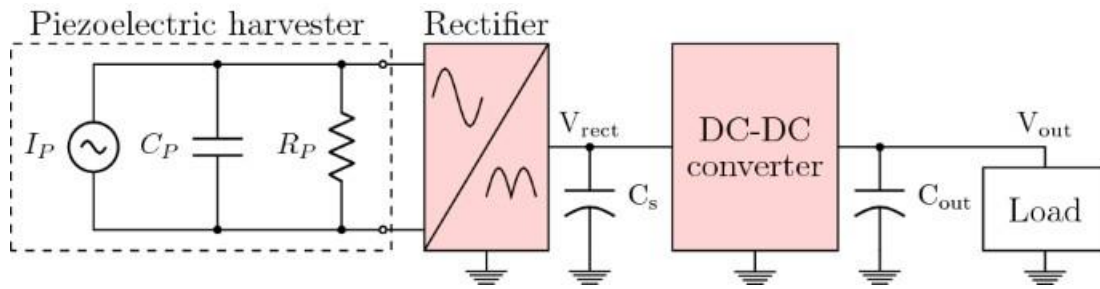


Figure 2.7 Modèle électrique global du système de récolte piézoélectrique

Le circuit intégré du système de récolte est composé du matériau piézoélectrique qui est modélisé comme une capacité piézoélectrique C_P et une résistance R_P avec la tension alternative de sortie V_P connectée au circuit redresseur externe. Le circuit redresseur est constitué d'un pont redresseur composé de quatre diodes au silicium idéales pour obtenir la tension continue de sortie V , connectée au condensateur de lissage C_e , qui est connecté en parallèle à la charge électronique externe ou à la batterie. Le condensateur de lissage est utilisé afin de réduire l'ondulation du signal de sortie AC-DC.

Le développement présenté dans cette partie n'a bien entendu pas de sens dans le cas de systèmes pour lesquels l'amplitude de la vibration est imposée, ce qui correspond, par exemple, à une excitation à l'aide d'un pot vibrant. Dans la littérature, la plupart des analyses effectuées sur les micro-générateurs piézoélectriques sont réalisées à amplitude de vibration fixée, ce qui ne correspond pas à une sollicitation réaliste des structures électromécaniques. Dans cette partie, le comportement d'un micro-générateur piézoélectrique excité à sa fréquence de résonance par une force sinusoïdale d'amplitude constante sera modélisé. Nous nous intéresserons à la puissance, au rendement et à l'amortissement induit par un tel micro-générateur, pour les quatre techniques décrites précédemment. Le carré du coefficient de couplage de la plupart des micro-générateurs piézoélectriques n'excède généralement pas quelques pourcents. Dans cette partie, nous considérerons ainsi que les pulsations de résonances ω_E en court-circuit et ω_D en circuit ouvert sont proches. La pulsation de résonance ω_r du micro-générateur chargé sera définie comme la pulsation pour laquelle la force excitatrice et la vitesse de la vibration sont en phase. Cette pulsation est nécessairement comprise entre ω_E et ω_D et par hypothèse assimilable à l'une ou l'autre de ces pulsations. On considère une structure avec un facteur de qualité mécanique fixé sur laquelle sont collés des patches piézoélectriques. L'évolution de $k^2 Q_m$ correspond à une variation de la surface d'éléments piézoélectriques connectée au dispositif de récupération d'énergie. On suppose que le comportement électromécanique est homogène sur toute la surface des patches piézoélectriques.

2.4 Méthodologie de modélisation de la mécatronique

La structure est modélisée à l'aide du modèle à constantes localisées simplifié. Les paramètres du modèle sont obtenus par identification lorsque tous les patches sont utilisés comme montre le tableau 2-3.

Le facteur de qualité mécanique de la structure est beaucoup plus élevé que celui correspondant à la structure et utilisée pour les mesures concernant l'amortissement vibratoire. Pourtant ces deux structures sont très similaires. En fait, pour de forts niveaux de sollicitation, le facteur de qualité mécanique devient fonction de l'amplitude du déplacement, à cause de l'augmentation des pertes aérodynamiques pour de grands débattements de la structure. Pour de faibles niveaux de sollicitation, Q_m reste relativement constant. Les mesures d'amortissement vibratoire ont été réalisées pour de grands déplacements de la structure en circuit ouvert, ce qui explique la valeur plus basse du facteur de qualité mécanique. On peut remarquer que lorsque les techniques d'amortissement sont activées, le déplacement diminue, et donc l'amortisseur C est surévalué, mais comme son effet est de toute façon négligeable devant l'effet d'amortissement induit par les techniques non linéaires, cette surévaluation n'est pas gênante.

Dans le cas de la modélisation mécatronique présentée ici, la sollicitation mécanique appliquée à la structure a volontairement été limitée en amplitude de façon à ce que le facteur de qualité mécanique reste constant et élevé.

Tableau 2-3 Les paramètres du modèle

f_E	60.18Hz
f_D	60.46Hz
Q_m	520
λ	31000V/m
C_0	74.9nF
a	0.0023N/V
k^2	0.92%
K_E	7730Nm ⁻¹
M	54g
C	0.039Nm ⁻¹ s ⁻¹

2.4.1 Transducteur piézoélectrique monté entre le siège et la suspension du pneu

En utilisant la propriété des matériaux piézoélectriques de générer de l'électricité, plusieurs chercheurs scientifiques ont étudié les types de collecteurs d'énergie piézoélectrique dans une grande variété d'applications. En général, la récolte d'énergie à partir de sources mécaniques fournit une puissance de sortie de 4W à 800W [90].

Les vibrations pourraient être observées à partir d'activités humaines telles que la marche [91], les battements du cœur [92], et la respiration, où l'énergie sera détectée à partir de l'expansion de la poitrine [93]. Pour une structure électromécanique donnée, il est intéressant de connaître l'énergie récupérée en fonction de la charge R_c du conducteur et la capacité C_R comme illustre le modèle sur la figure 2.8. La modélisation Bond Graph (BG) dispose de formules analytiques permettant de déterminer directement cette puissance récupérée en fonction de la résistance de charge.

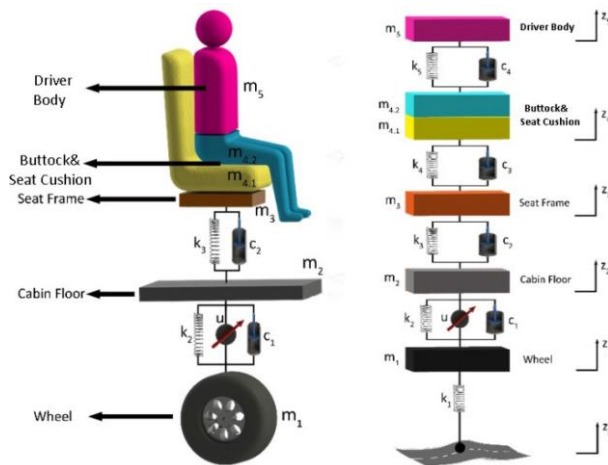


Figure 2.8 Schéma d'un système masse-ressort-amortisseur simple du véhicule.

Afin de gagner du temps par rapport aux simulations par intégration numérique, un outil de simulation bien plus rapide a été développé pour optimiser la structure comme montre la figure 2.9, basé sur une analyse énergétique récurrente sous Matlab/Simulink et 20-Sim.

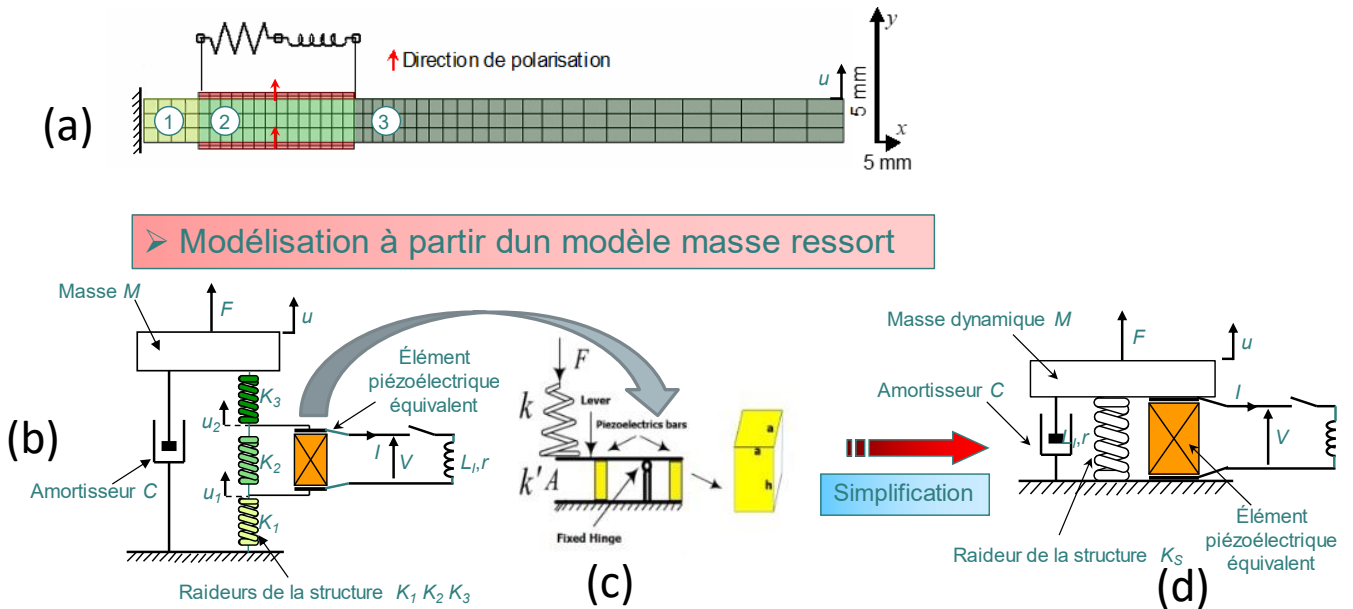


Figure 2.9 (a) : Résultats de simulation de la puissance maximale, (b) : récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence, (c) : 0,3 à 70 Hz d'amplitude 6 mm. (d) : 70 à 1500 Hz d'amplitude 16 mm

2.4.2 Modélisation mécatronique du transducteur piézoélectrique

Le système proposé utilise du plomb-zirconium-ate qui subit une transition de stade structural lorsque son infection tombe à la température de Curie [51]. Cependant, pour déterminer son aspect physique pour le flux de puissance, une unité de transducteur piézoélectrique électrifié a été modélisée par le BG sur la figure 2.8.

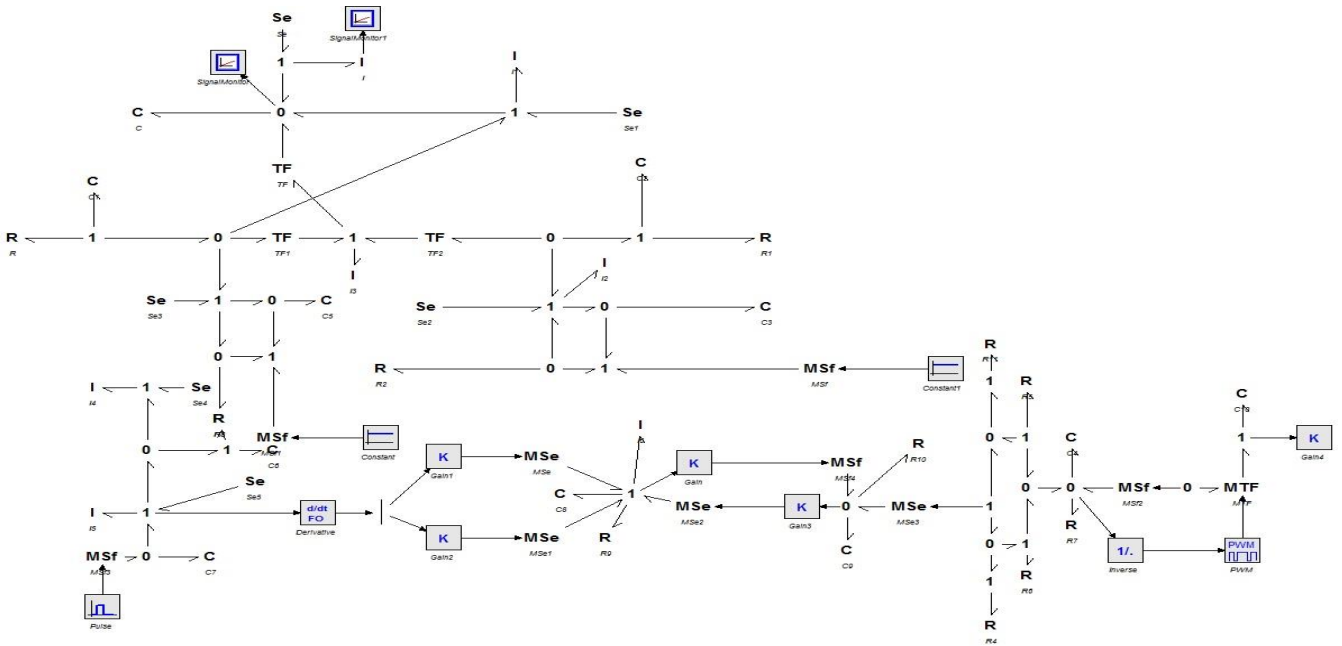


Figure 2.10 Modèle électrique du système de récolte piézoélectrique

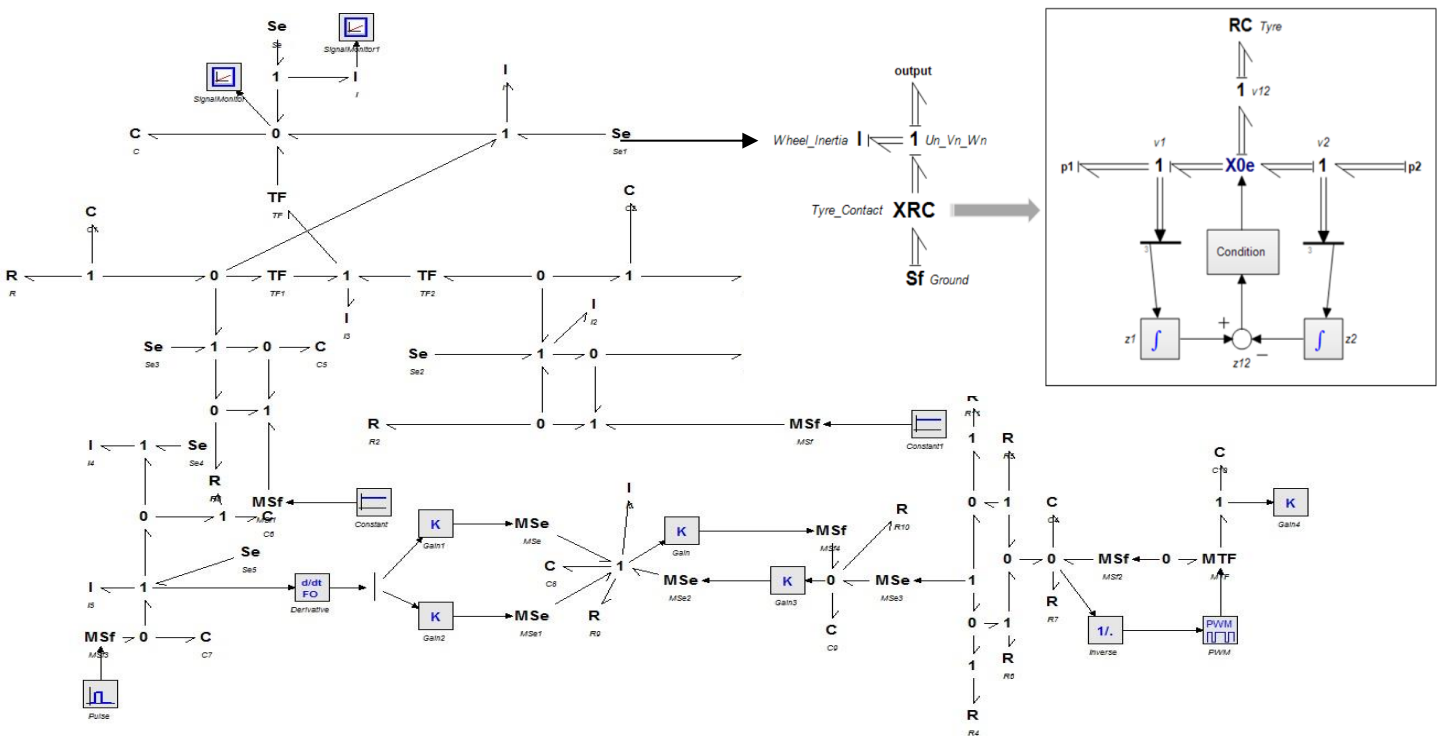


Figure 2.11 Représentation mécatronique d'un système "homme - siège - véhicule" pour étude vibratoire

Tableau 2.4 Valeur des paramètres du modèle

a	0.0026N/V
C_0	74.3nF
K_E	9600Nm ⁻¹
M	67g
C	0.12Nm ⁻¹ s ⁻¹

Cette source d'onde est une source sinusoïdale directe sur le condensateur C_{px} de son conducteur central par les caractéristiques de la suspension (ressort, masse et élément amortisseur) [96]. Ce concept est discuté et établi dans une description plus détaillée dans la représentation mécatronique du système "homme - siège - véhicule" pour étude vibratoire comme montre la figure 2.9 . La magnitude de la tension d'excitation V_{px} change avec le niveau de polarité mécanique piézoélectrique qui est supposé être continu indépendamment de la charge d'entrée externe .

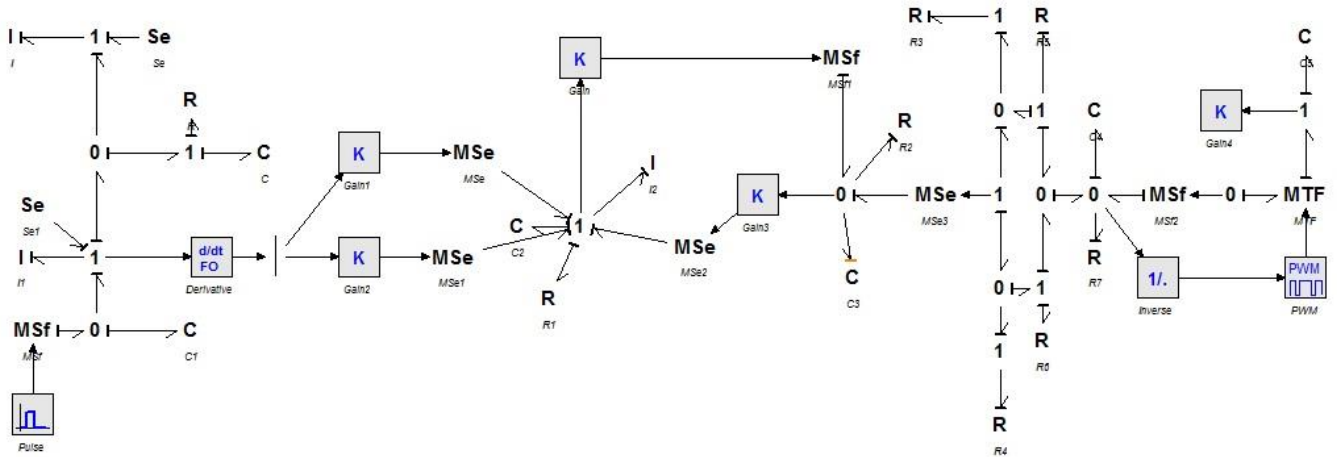


Figure 2.12 Représentation mécatronique optimale du système "homme - siège - véhicule"

Le schéma établi est conçu en tenant compte de l'élément ressort, du modèle équivalent à la masse et du schéma de l'amortisseur pour chaque mode. Le sous-système est construit avec plusieurs degrés de liberté. Ce prototype offre une grande maniabilité et fournit la différence entre l'entrée arbitraire de la surface de la route. L'entrée de perturbation w présente le mouvement de la sortie de commande z , comme illustré à la figure 2.10. Le modèle BG proposé du système de suspension du siège du conducteur affirme une vue globale du système et avec optimisation de ses paramètres. Ce modèle prend en compte toutes les perturbations mises en œuvre dans le siège du conducteur. La quantité de puissance électrique prédite est fonction du nombre de vibrations sur une route indifférente. Cette nouvelle approche permet d'estimer une puissance électrique avec une vitesse de véhicule de 50km/h. Cette amélioration permet de récupérer environ 58W d'énergie nécessaire. Dans cette section, une combinaison de la suspension de la roue de la voiture attachée au modèle du système de récolte. La sortie de tension (dans une configuration en série) ou la sortie du signal de courant (dans une configuration en parallèle) est amplifiée par les deux segments piézoélectriques séparés électriquement. Le montage en parallèle reproduit la récolte d'énergie électrique actuelle à un seul élément comme la capacité d'efficacité piézoélectrique. Ce dernier a été choisi pour augmenter la configuration de la récolte d'énergie en améliorant la tension de sortie par rapport à un arrangement d'éléments sélectionnés. La fonction d'entrée aléatoire a été appliquée au cours de changement d'hystérésis dans les boucles secondaires critiques du PH.

Cette condition est maintenue jusqu'à ce que l'énergie électrique récoltée prenne le niveau le plus élevé qui est équivalent au potentiel de sortie. L'équation est linéarisée pour une valeur spécifique de la vitesse du véhicule dans les calculs permanents. En d'autres termes, la quantité de courant et le taux de puissance des modèles soutenus d'hystérésis ont été réalisés à partir de la fréquence du PEA. La simplicité globale de l'alternative proposée a présenté un avantage dans les rapports de génération et de consommation d'énergie interne.

2.5 Simulation numérique : Récupération d'énergie du système de suspension

Dans cette section, la preuve numérique issue de la simulation a été discutée pour ce moissonneur piézoélectrique dynamique complexe. Le système présente une petite quantité de vibrations perdues qui sont converties en énergie électrique lorsque les caractéristiques du modèle prennent un niveau de valeurs différent.

Des mesures numériques sont effectuées dans cette section pour démontrer la productivité du transducteur proposé combiné au système de suspension. L'approche du stockage permet d'augmenter la production d'énergie et de réduire la consommation d'énergie. Les facteurs routiers impliqués dans ces démonstrations sont très proches des caractéristiques d'une automobile réelle (Tableau 2.4).

Tableau 2.5 Classes de route selon la norme ISO 8608

Variable	Vitesse (km/h))	Puissance (mW)
A	70 : 130	8.84
B	50 :90	13.83
C	30 :60	15.83

Les paramètres de suspension du siège de la voiture ont été adaptés aux conditions d'accélération du corps du conducteur. Cependant, l'impact des vibrations sur la masse de la voiture a été réduit. La modélisation rapide du système à l'aide de BG estime et vérifie l'implémentation du modèle réduit avec la réalité physique selon la norme ISO 8608 comme rassemblé sur le tableau 2.5. Cette approche est très intéressante pour récolter plus d'énergie électrique à partir des vibrations. L'hystérésis dans les PZTEA se produit dans des conditions de fonctionnement relativement statiques qui affectent les performances dynamiques.

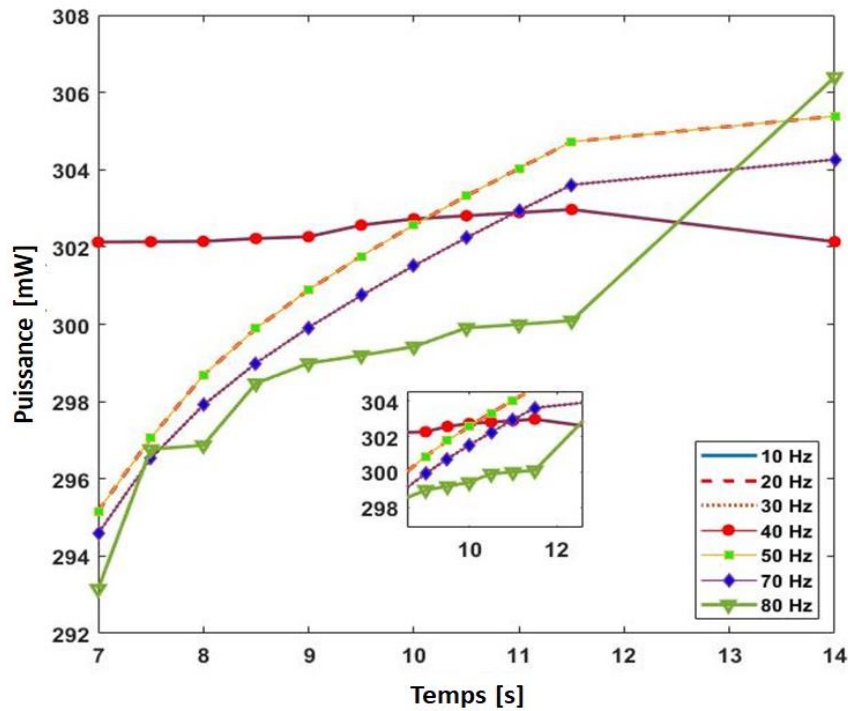


Figure 2.13 Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,1 à 40 Hz d'amplitude 2 mm.

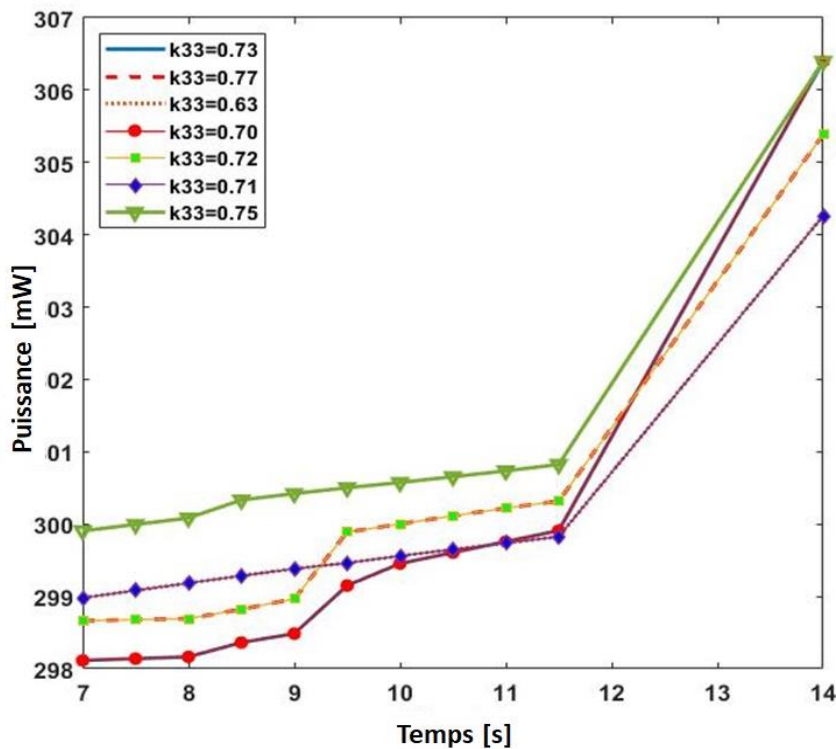


Figure 2.14 Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,1 à 40 Hz d'amplitude 16 mm (K_{33} variable)

Cependant, le comportement de l'hystérésis de la moissonneuse est analysé à l'aide du logiciel ANSYS, comme le montrent les figures 2.11 et 2.12. L'identification du modèle réciproque et de sa matrice correspondante est assurée par le BGI.

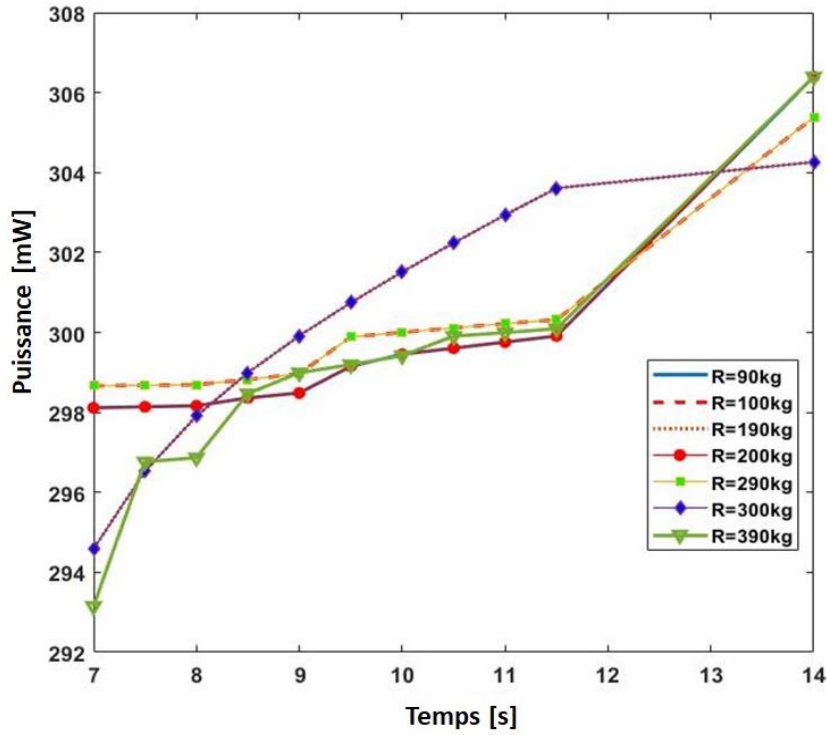


Figure 2.15 Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 0,5 à 40 Hz d'amplitude 4 mm

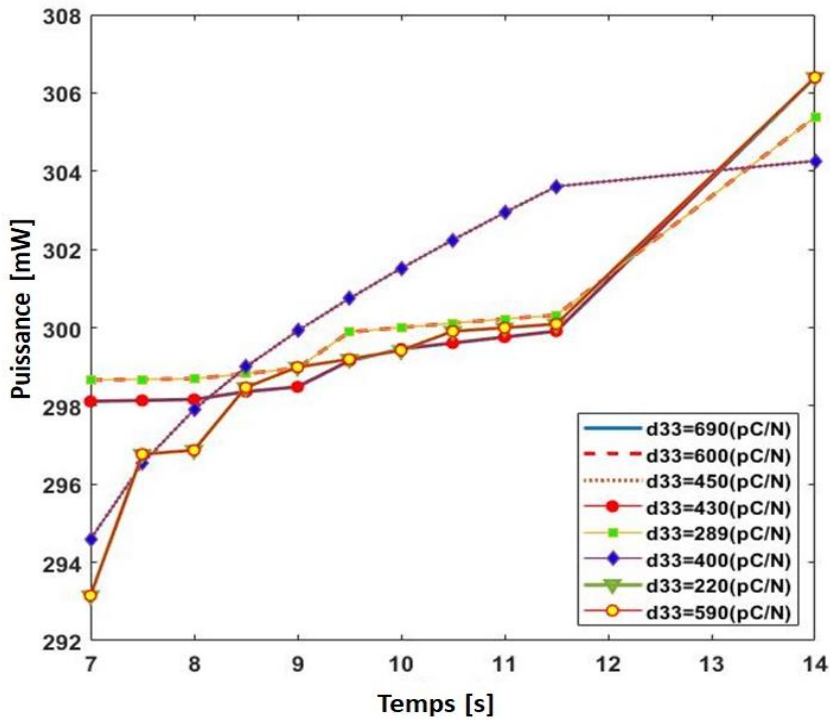


Figure 2.16 Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 10 à 70 Hz d'amplitude 6 mm.

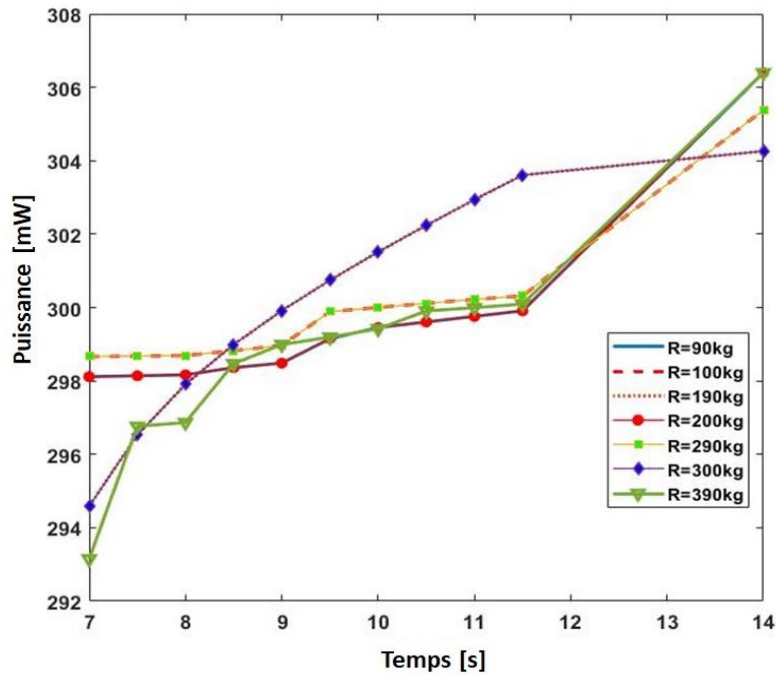


Figure 2.17 Résultats de simulation de la puissance maximale récupérée avec des perturbations sinusoïdales de fréquence 10 à 100 Hz d'amplitude 6 mm

La valeur finale de la puissance est spécifiée en fonction des fréquences naturelles ajustées de l'accélération vibratoire [1hz, 90hz] comme le montrent les figures 2.13, 2.14 et 2.15. Dans ces conditions, le retour du transducteur aux forces énergétiques est contrôlé et la simulation d'accélération potentiellement mortelles est nécessaire. Le siège du véhicule alimente tous les dispositifs par la valeur d'énergie récupérable comme indiqué dans la figure 2.12. La valeur de l'énergie récupérable est une fonction de la vitesse du véhicule dans la plage de 30m/s à 85m/s sur le profil de la route respectivement B, C et D comme présentent les figures 2.11 et 2.12. La quantité d'énergie électrique est prédite par la racine carrée de la vitesse du véhicule ainsi que par le fait que le déplacement transversal et les vitesses du véhicule sont importants. Ces simulations démontrent l'efficacité de cette approche dans la récolte de l'énergie électrique. De plus, l'augmentation de l'accélération du véhicule donne une indication sur une EE importante. L'énergie électrique a été générée sur la surface de la route en raison du fait que les déplacements et les vitesses relatives du corps suspendu et non suspendu sont tous proportionnels.

Les figures 2.13, 2.14 et 2.15 montrent que la quantité d'énergie électrique passe de 308mW à 500mW, respectivement, pendant le déplacement du véhicule à 60km/h, de 0,9W à 15W et de 10 W à 80 W, lorsque la vitesse du véhicule passe de 50 km/h à 100 km/h. Dans ce chapitre, les résultats de la simulation ont été établis pour une valeur de fréquence réglable adéquate de l'ordre de 90Hz. Les amplitudes des accélérations de la masse suspendue augmentent de manière significative, ce qui affecte la puissance de sortie. La détermination de la puissance électrique de la suspension du siège du passager (conducteur) est obtenue en examinant la gamme exacte des fréquences naturelles.

Ce système a la même géométrie physique et les mêmes caractéristiques matérielles que les résultats des simulations de modélisation précédentes. Par conséquent, dans ces conditions, il est confirmé que la quantité de vibration externe augmente le niveau de densité de tension et par conséquent l'énergie collectée est très significative. Le collecteur à transducteur adopté dans le système de suspension permet la récupération d'énergie nécessaire pour des dimensions appropriées. En outre, la fabrication et la réalisation d'un tel système est nécessaire pour noter que la définition de l'exigence d'énergie à consommer par les capteurs (figures 2.16 et 2.17). A partir des équations données par la modélisation BG, les dimensions appropriées de l'armature ont été réalisées. Les facteurs piézoélectriques sont résilients pour une longueur triviale et une grande épaisseur et viscosité. Les dimensions des dispositifs piézoélectriques proposés dans cet article ont amélioré les caractéristiques des suspensions (rigidité et amortisseurs).

2.6 Conclusion

Ce chapitre présente une méthode d'amélioration proposée pour surmonter les différents inconvénients concernant la récupération piézoélectrique conventionnelle. Ainsi, il consiste en une combinaison des stratégies de modélisation mécatronique du récupérateur non linéaires à haute performance. L'approche proposée a été appliquée tout d'abord pour maintenir un haut niveau de puissance récupérée en remplaçant les batteries conventionnelles par celle en transducteur piézoélectrique. Cette technique a amélioré considérablement les puissances récoltées avec un temps de réponse réduit. Ensuite, l'association de la suspension des quatre routes avec et la suspension du siège du conducteur a permis d'obtenir des fonctionnalités prometteuses telles qu'un maximum de l'énergie fournie, une grande robustesse face aux différentes perturbations, dégradation en chaleur des pertes visqueuses intrinsèques et une amélioration considérable de la capacité de conversion électromécanique des éléments piézoélectriques dans différentes conditions de fonctionnement.

Chapitre 3

CONTRIBUTION A LA PHASE D'OPTIMISATION DYNAMIQUE PAR MODELES BOND GRAPH INVERSES

3.1 Introduction

L'accomplissement d'une optimisation, aussi performante qu'elle soit, d'un récupérateur piézoélectrique, ne peut être satisfaisante qu'avec un modèle précis du comportement dynamique. Au paravent cette fonction était attribuée aux langages de modélisations mécatroniques, cependant, en raison de leur limite d'inconvénients et leurs multiples utilisations dans l'ingénieries. Nous avons élaboré un éventail d'algorithmes basé sur le langage BG pour estimer ce comportement dynamique. Ces algorithmes se distinguent par leurs simplicités, leurs rapidités et leurs sensibilités vis-à-vis des variations des paramètres du récupérateur ainsi que leurs robustesses même avec une large bande fréquentielle de fonctionnement. L'objectif de ce chapitre est d'effectuer une modélisation inverse basée sur le Bond Graph afin d'optimiser le récupérateur. En régime pulsé comme en régime sinusoïdal permanent, les techniques SSH permettent d'augmenter les performances des micro-générateurs piézoélectriques. Pour ces deux types de sollicitation, l'optimisation de l'énergie extraite passe par l'adaptation de l'impédance de charge. Ainsi, en régime sinusoïdal permanent, il existe une résistance de charge R_{opt} quimaximise le transfert de puissance électromécanique dans la structure, et de la même façon, en régime pulsé, il existe une capacité de stockage C_{opt} pour laquelle l'énergie extraite est maximisée. Après une étude critique et comparative des résultats de simulation, sous le logiciel MATLAB/Simulink, trois nouvelles structures sont proposées afin d'aboutir à un comportement aussi performant à large bande de fréquence. Des simulations sont proposées pour mettre la lumière sur la contribution la plus performante.

3.2 Modélisation par Bond Graph Inverse de suspension d'un siège de véhicule

La modélisation inverse basée sur le BG permet d'assurer un couplage entre le récupérateur et la suspension (roues et siège). Dans cette configuration, la tension sur la résistance de charge est continue. La version alternative de cette technique, consiste à connecter la résistance de charge directement en série avec l'inductance d'inversion.

Le courant piézoélectrique I est toujours nul, excepté pendant les phases d'inversion de la tension. On considère un pont redresseur parfait et une capacité de filtrage C_R suffisamment grande pour que la tension V_{DC} puisse être considérée constante.

3.2.1 Évaluation de la distance d'installation des transducteurs piézoélectriques

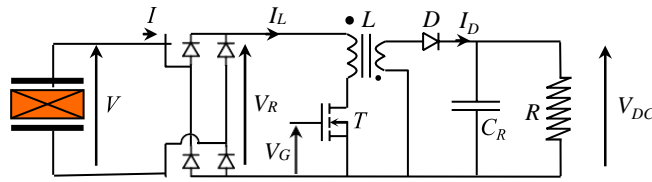


Figure 3.1 Diagramme synoptique du récupérateur piézoélectrique

La conception du dispositif nous a obligé à utiliser un convertisseur DC-DC pour alimenter la charge électrique. En réalité, l'utilisation de n'importe quelle autre technique nécessite également l'emploi d'un tel convertisseur pour une utilisation réaliste du micro-générateur. Un convertisseur doit en effet être utilisé pour adapter le niveau de tension et/ou l'impédance entre le micro-générateur et la charge. En supposant que le rendement du convertisseur sera du même ordre de grandeur que celui utilisé pour l'approche mécatronique, on peut raisonnablement avancer cette stratégie permet une diminution de 75% de la quantité de matériaux nécessaire pour obtenir la puissance P_{limite} (ou 70% de P_{limite} en tenant compte du rendement). Ajoutons à cela que plus la tension délivrée par le micro-générateur sera élevée, et moins bon sera le rendement du convertisseur chargé d'abaisser la tension à un niveau convenable pour l'alimentation d'un circuit électronique classique.

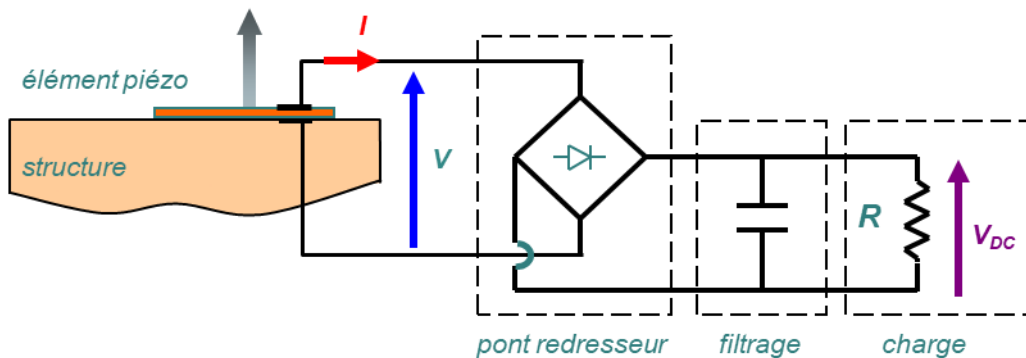


Figure 3.2 Puissance récupérée avec la technique SSDS récupératif : à amplitude de vibration constante et à la résonance, en fonction de k^2Q_m

Pour déterminer son flux de puissance d'apparence physique, un élément piézoélectrique énergétique est modélisé par un circuit synoptique utilise un convertisseur DC-DC sur la figure 3.1. La source du signal de courant est sinusoïdal parallèle noté I_{px} avec la capacité de son conducteur central noté C_{pz} [102]. Le modèle du système de suspension complet est présenté par un amortisseur ressort-masse. La taille de la tension d'excitation d'entrée V_{pz} change avec le niveau de polarisation comme montre le schéma sur la figure 3.2.

Les équations différentielles qui régissent le système de suspension de la voiture sont exprimées ci-dessous selon la deuxième loi de Newton [104] :

$$m_s \dot{z}_u = -k_t(z_u - z_r) - c_t(\dot{z}_u - \dot{z}_r) + k_s(z_s - z_u) + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) \quad (3.1)$$

$$m_s \dot{z}_s = -k_s(z_s - z_u) - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_{ss}(z_{fs} - z_s) + c_{ss}(\dot{z}_f - \dot{z}_s) + u \quad (3.2)$$

$$m_v \dot{z}_f = -k_{ss}(z_f - z_s) - c_{ss}(\dot{z}_f - \dot{z}_s) + k_c(z_c - z_f) + c_c(\dot{z}_c - \dot{z}_f) - u \quad (3.3)$$

$$m_u \dot{z}_b = -k_c(z_c - z_f) - c_c(\dot{z}_c - \dot{z}_f) \quad (3.4)$$

Le modèle intégré dans la suspension du siège est composé par le modèle du corps du conducteur et les paramètres du récupérateur. Où m_s est la masse suspendue qui caractérise le châssis du véhicule ; m_u est le poids non suspendu qui signifie l'ensemble roulis et pneus. La masse du corps du siège est représentée par m_s , et m_p est le poids du corps du conducteur. Alors que, z_u , z_c , $z_s = z_f$ et z_b sont les mouvements des masses équivalentes ; z_r est l'entrée du profil de la rue. L'amortissement et la rigidité des suspensions du système étudié sont c_{ss} et k_{ss} , respectivement. Où, k_t et c_t sont les positions de la compressibilité et la retenue des pneumatiques, respectivement. De même, c_{ss} , k_{ss} et k_c sont des coefficients d'amortissement. Enfin, u représente la matrice de la force de commande appliquée à la suspension du siège. En se basant sur les méthodes d'analyse modale [105] les équations 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 sont réarrangées comme suit :

$$[M]Z'' + [C]Z' + [K]Z = U + [C']F_0 \quad (3.5)$$

Où $[M]$ est la matrice de masse, $[C]$ est la matrice d'amortissement de type Rayleigh et $[K]$ est la matrice de rigidité.

Le vecteur U est les facteurs d'amplitudes nodales des inconnues ; et F_0 sont les valeurs d'amplitude des influences nodales. L'énergie récupérée en utilisant chacune des deux techniques est mesurée en fonction de la capacité C_R lorsque tous les patchs sont connectés ($k^2=0.94\%$), lorsque les trois quarts des patchs sont connectés (les deux rangées supérieures et la rangée inférieure la plus loin de l'encastrement – $k^2=0.62\%$), lorsque la moitié des patchs sont connectés (les deux rangées les plus loin de l'encastrement – $k^2=0.37\%$), et lorsqu'un quart des patchs sont connectés (la rangée inférieure la plus loin de l'encastrement – $k^2=0.18\%$). L'approche BG de ce système reflète les comportements dynamiques de tous les sous-systèmes (mouvements suspendus et non suspendus) et les échanges de puissance entre les éléments mécaniques [106].

1.1.1 Évaluation de la puissance de sortie

L'analyse mathématique typique du comportement des PEA comprend l'hystérésis, la fissuration et la dynamique des vibrations du véhicule [107]. Dans l'illustration suivante, un modèle rapide et fiable de l'hystérésis piézoélectrique a été proposé avec une dépendance non linéaire non seulement sur son signal de tension d'entrée mais aussi sur son déplacement d'entrée PEA dans l'axe différent. Le phénomène d'hystérésis existant entre le champ électrique (tension)-polarisation est supposé par la relation de la déformation et du déplacement causé par le profil de la route [49]. Ce phénomène est basé sur des fonctions non linéaires dans l'équation d'état qui décrit le déplacement du système (**Annexe A**). Le modèle BG ci-dessus indique cet effet d'hystérésis piézoélectrique [108]. Selon le modèle proposé, la connexion entre la force externe appliquée exercée sur le PEA et le déplacement de sortie du PEA est directe et démontre la bonne fixation. Afin d'interpréter la quantité de puissance en porte-à-faux du collecteur piézoélectrique et la conversion de la pile, un nouveau modèle de collecteur selon [109] est proposé. Même si l'égalisation générale de la transformation d'énergie utilise une technique distribuée [12], les équations sont déduites facilement en utilisant la modélisation par graphe de liaison. Concernant l'intervalle de fréquence d'excitation, il a été déterminé afin d'exploiter uniquement la fréquence de résonance initiale des patches en porte-à-faux piézoélectriques à des fins appliquées avec le corps du conducteur [14].

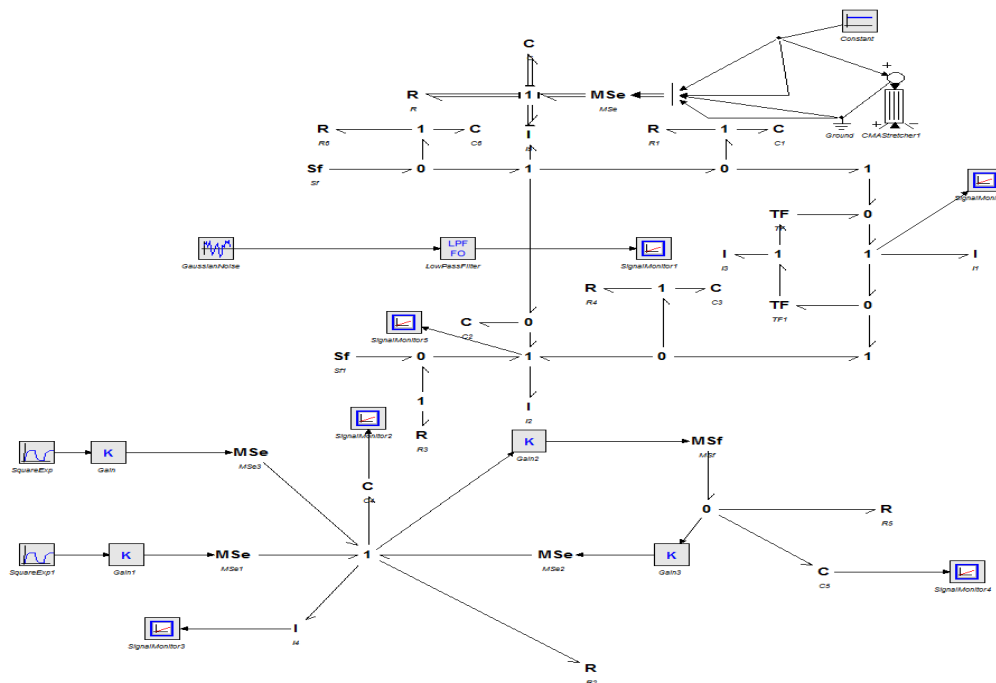


Figure 3.3 Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie vibratoire fournie

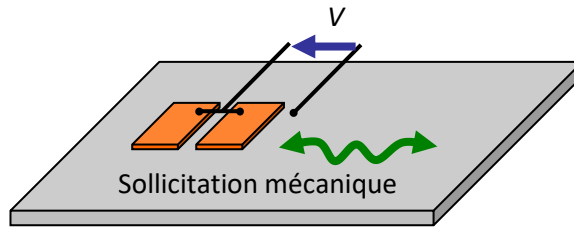


Figure 3.4 Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie fournie en fonction de la capacité C_R

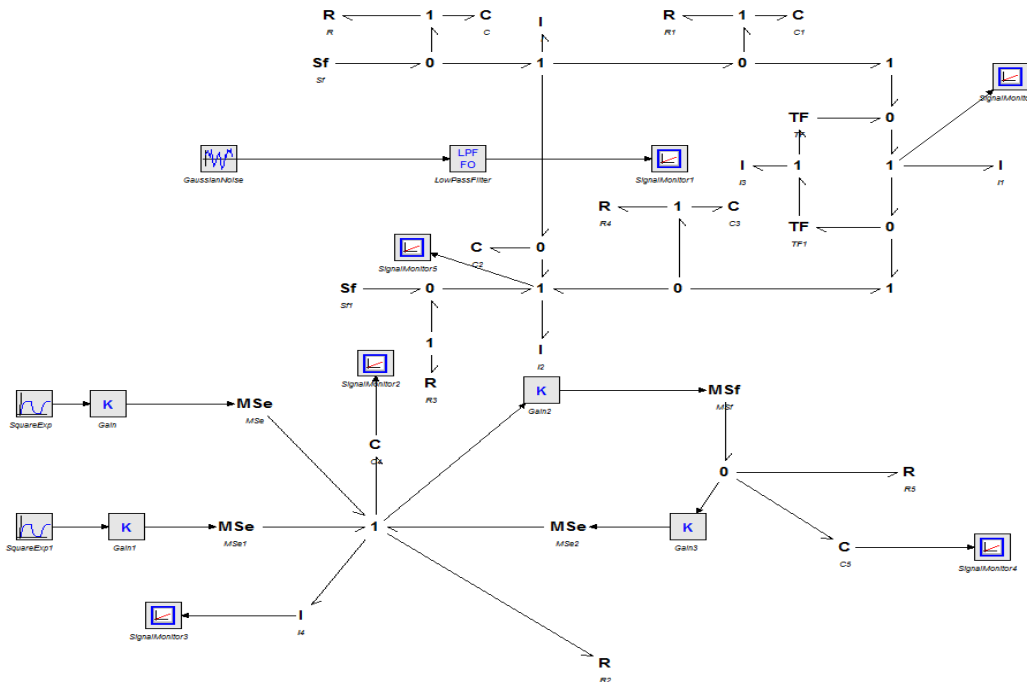


Figure 3.5 Energie récupérée normalisée par rapport à l'énergie fournie en fonction de la capacité C_R normalisée par rapport à C_0 – Comparaison entre les différents points et les résultats théoriques pour différents couplages : (a) technique classique, (b) technique SSHI

Sur la carrosserie du véhicule, les forces aérodynamiques sont divisées en une matrice de force descendante et une matrice de moment de tangage représenté sur la figure 3.3.

La source des forces aérodynamiques externes est posée sur le sol de la route et éloignée de l'essieu avant du véhicule comme montre la figure 3.4.

Dans le cas de l'amortissement vibratoire, le circuit électrique connecté aux éléments piézoélectriques doit donc être conçu pour maximiser sa propre consommation comme monté dans le modèle illustré sur la figure 3.5. Ces équations peuvent être citées, avec l'utilisation de la transformée inverse Bond Graph (**Annexe B**).

Le flux du vecteur de Poynting entrant dans une surface fermée $\partial\Omega$ est égal à la dérivée temporelle de l'énergie potentielle E_P et de l'énergie cinétique E_C dans le volume délimité par cette surface plus les pertes intrinsèques P_D dans le volume.

Ceci est résumé dans (3.6) :

$$\oint \overline{PdS} = \frac{d}{dt} (E_c + E_p) + P_D \quad (3.6)$$

3.3 Modèle mécatronique de la suspension piézoélectrique combiné à la suspension du siège

Le modèle développé est basé sur un système ressort-masse- absorbeur de chocs. Pour obtenir une vue complète du système agissant de manière adéquate pour un large spectre de perturbations du profil de la route. Le rapport de l'énergie maximale récupérée sur l'énergie maximale consommée est calculé avec cette technique en fonction du produit k^2Q_m . Ce modèle met clairement en évidence le gain apporté par la technique, qui varie entre 250% pour quatre rangées et 450% pour une rangée. Encore une fois, le récupérateur s'avère être particulièrement intéressant pour des structures présentant un faible produit k^2Q_m , ce qui signifie également qu'à quantité d'énergie récupérée donnée, la suspension permet de diminuer fortement la quantité de matériau piézoélectrique nécessaire.

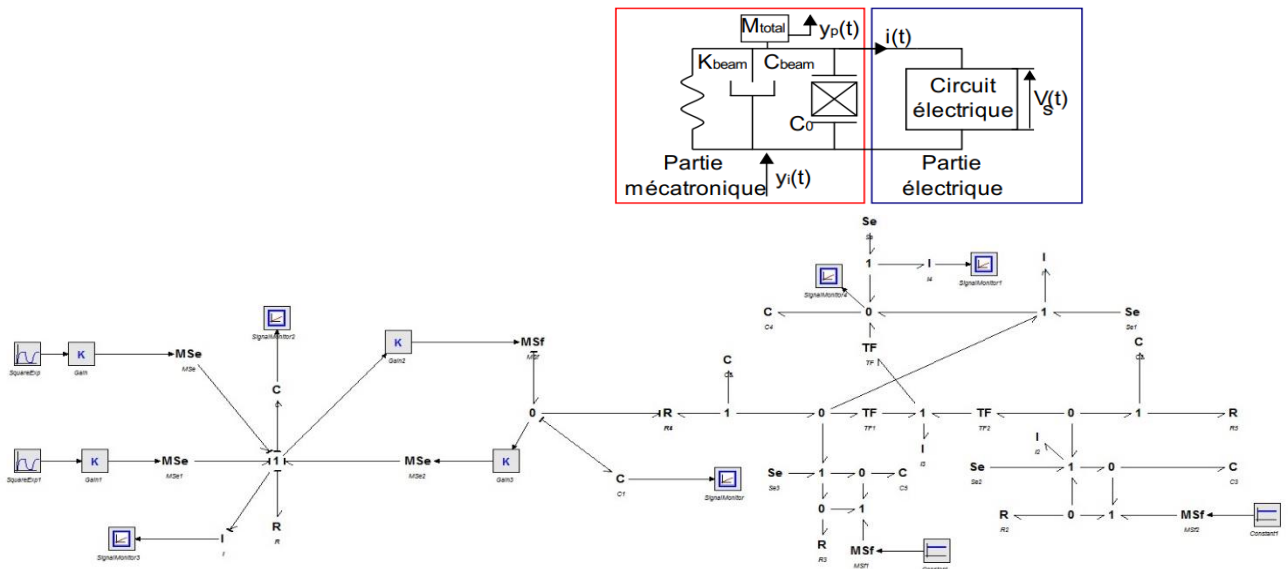


Figure 3.6 Energie récupérée modélisée en utilisant le langage BG

Toutes les raideurs sont par contre fonction de la géométrie de la structure :

$$K_{PE} = \frac{3c_{PE}I_P}{(L - x_p)^3 - (L - L_p - x_p)^3} \quad (3.7)$$

Ces équations sont dérivées des équations piézoélectriques standard (**Annexe C**) qui relie la contrainte T_3 , la déformation S_3 le champ électrique E_3 et le déplacement électrique D_3 d'un disque piézoélectrique polarisé dans la direction 3.

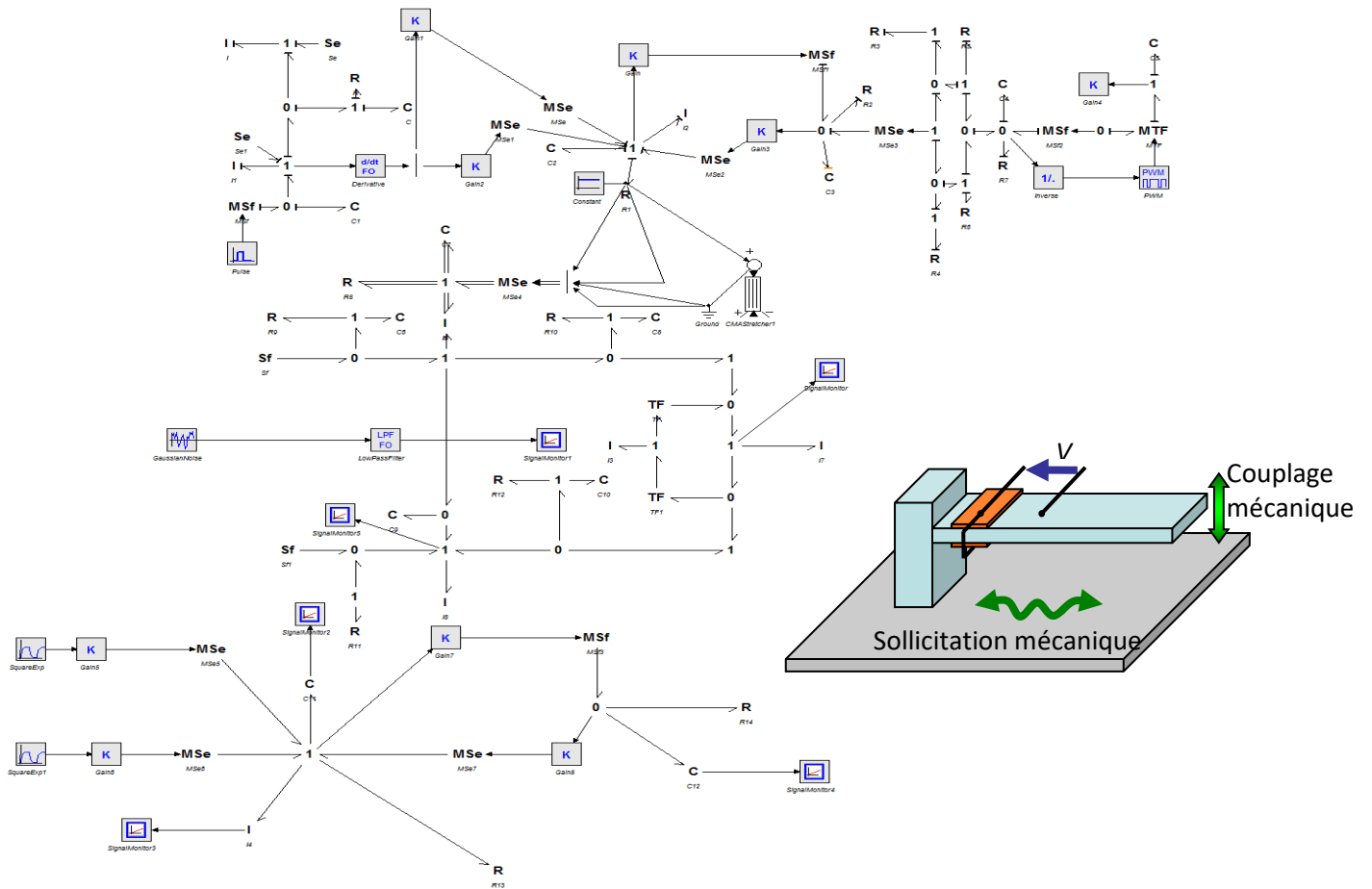


Figure 3.7 Comparaison entre les modèles théoriques pour différents couplages utilisant la technique SSHI

Tableau 3-1 Géométrie des patchs piézoélectriques

Nombre	68
Longueur	15mm
Largeur	5mm
Epaisseur	500 μ m
Eloignement de l'encastrement	14mm

3.4 Modèle du contrôle de la suspension et du transducteur piézoélectrique

À partir de ce modèle unique, on peut dériver à la fois un schéma de commande semi-actif et un système passif. Les variables d'état et les descriptions des entrées sont fournies dans le tableau 5-1. Les équations de mouvement dérivées du modèle sont présentées ci-dessous. La méthode proposée est l'analyse et la modélisation du système de suspension du siège du conducteur en utilisant le Bond Graph (BG) qui prend en compte toutes les interactions des systèmes pour bien prédire la puissance électrique en fonction des vibrations appliquées au conducteur sur différentes surfaces de la route. Cette nouvelle approche estime pour une vitesse de 40km/h une puissance électrique de l'ordre de 48W ce qui fait de cette amélioration une parfaite méthode de récupération d'énergie [111].

Dans ce chapitre, deux segments piézoélectriques séparés ont été connectés au système de suspension du siège, de manière autonome ou associée à la suspension des roues, pour une sortie de tension amplifiée (configuration en succession) ou une sortie de signal de courant (disposition en parallèle). L'assemblage en série duplique la collecte d'énergie électrique en circuit ouvert à un élément unique, et la capacité d'efficacité sera la moitié de la capacité unique. Le choix s'est porté sur la fixation parallèle afin d'augmenter la capacité de collecte d'énergie, car la configuration parallèle augmentera la tension de sortie par rapport à un arrangement d'éléments sélectionnés par rapport à un arrangement d'éléments sélectionnés, et en doublant le condensateur pratique.

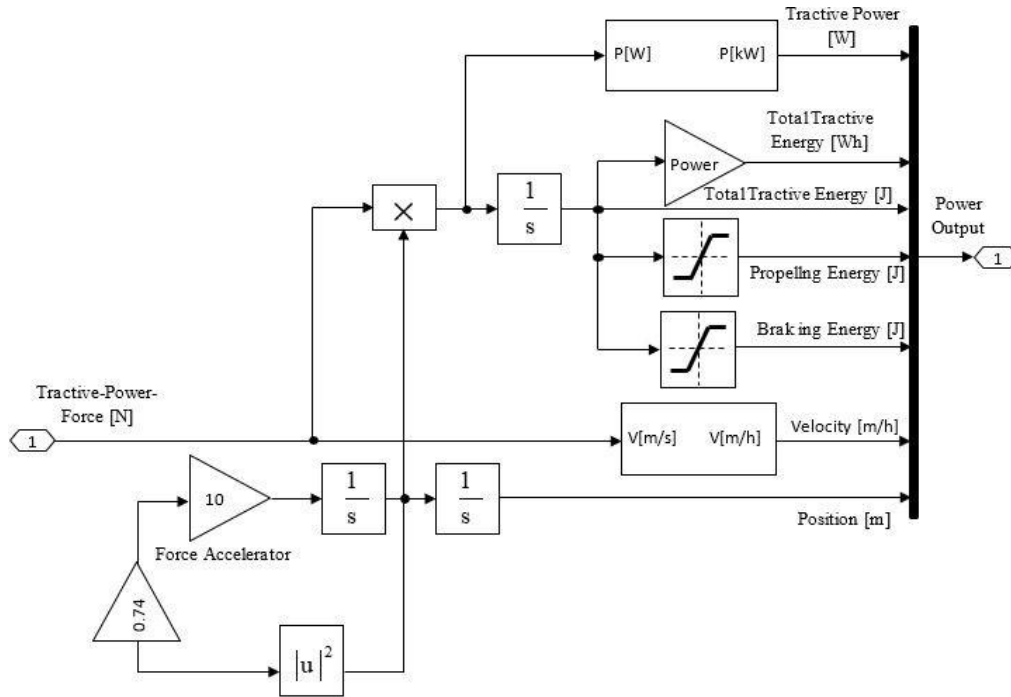


Figure 3.8 Comparaison des déformées statiques (calcul analytique) et dynamiques (simulations ANSYS ®)

Cependant, toutes les équations de la dynamique du véhicule sont résolues par les techniques de Bond Graph Inverse (BGI), comme le montre la figure 3.7. La configuration à un seul élément a également été testée et les résultats sont proposés comme valeur de référence pour les données de l'étude. La figure 3.8 illustre l'analyse des boucles critiques et des boucles secondaires dans la fonction d'hystérésis de la PEA (équations (3.6) et (3.7)). Les impacts du changement de cours de la fonction aléatoire d'entrée sont pris en compte dans d'autres termes donnés dans la figure 3.9, pour estimer l'effet d'hystérésis. Le taux de la PEA est séparé du taux actuel récemment amélioré de ce fait des modèles d'hystérésis soutenus qui ont été développés dans cette modélisation. La simplicité de la solution proposée présente un rapport de gain de production et de consommation électrique interne. A partir des équations données par la modélisation BG, on peut obtenir des dimensions appropriées de l'armature qui est résiliente sans oublier les facteurs piézoélectriques [113].

De plus, les équations d'état sont données par la modélisation BG ; elles traitent des dimensions appropriées de l'armature avec les facteurs piézoélectriques résilients [66]. Le comportement de la moissonneuse piézoélectrique est programmé dans deux modèles BG différents couplés à des signaux routiers d'entrée. La partie de la figure 4 modélise la dynamique de translation de la suspension du véhicule. Le modèle le long de l'axe vertical répond aux équations (5.8) and (5.9), où le MSF appelé "Road2" représente la vitesse verticale du système produite par la rugosité de la route. L'élément C reçoit la rigidité verticale de la suspension et du pneu, et l'élément I présente la masse non suspendue. La multi liaison est une cardinalité causale 1 car elle traite de la translation verticale et du plan horizontal. Le MSe dénoté par le "comportement d'hystérésis piézoélectrique produit dans l'axe longitudinal et latéral les forces extraites dans la figure 3.4. La puissance électrique captée peut être calculée maintenant parce que tous les signaux nécessaires sont disponibles.

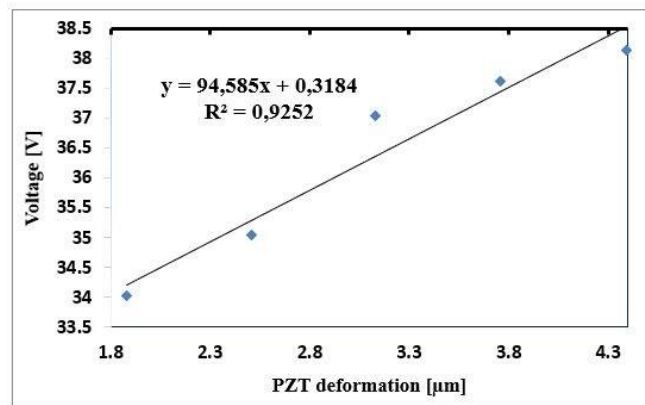


Figure 3.9 Caractéristiques linéaires de tension du récupérateur piézoélectrique

L'élément C reçoit la rigidité verticale de la suspension et du pneu, et l'élément I présente la masse non suspendue. La multi liaison est une cardinalité causale 1 car elle traite de la translation verticale et du plan horizontal. Le MSe dénoté par le "comportement d'hystérésis piézoélectrique produit dans l'axe longitudinal et latéral les forces extraites dans la figure 3.10. La puissance électrique captée peut être calculée maintenant parce que tous les signaux nécessaires sont disponibles. En outre, le modèle proposé dans ce document ne modifie pas les caractéristiques des suspensions ni la rigidité des amortisseurs.

3.5 Évaluation de la réponse d'une moissonneuse piézoélectrique sur la suspension d'un siège de voiture

L'idée de la théorie du Bond Graph vise à modéliser le comportement dynamique du système, contrairement à la stratégie de modélisation traditionnelle. La sortie d'un modèle de système contrôleur est fondée sur l'application des fonctions Bond Graph Inverse (BGI) sur les entrées (flow) et les sorties (effort).

Cette opération est appelée le processus du contrôleur de microsysteme. Une entrée nette sera transformée en divers diagrammes de blocs des fonctions de transfert correspondantes en fonction de leur valeur. En outre, la sortie du système du contrôleur est obtenue à partir de sa représentation graphique de notre système dynamique physique par diverses fonctions de transfert, qui peuvent être appliquées comme un ensemble d'entrées [114].

En général, les algorithmes de contrôle classiques utilisent l'équation d'Euler Lagrange [108], qui traite les entrées des systèmes non linéaires comme expliqué dans la section d'introduction. Après de nombreuses expériences, analyses et études menées par les chercheurs, il s'avère que la technique de contrôle classique n'est pas efficace pour les systèmes dynamiques complexes. La méthode que nous proposons vise à résoudre un des problèmes de contrôle par une approche mécatronique utilisant les techniques BGI. De nombreux chercheurs ont étudié le contrôle de la vitesse d'un véhicule en analysant le modèle mathématique à un seul degré de liberté (SDOF). Ce modèle néglige les propriétés dynamiques du véhicule et entraîne un manque de précision dans l'estimation de la quantité de vibrations. Sur la base des travaux récents [115], le modèle BG a été choisi dans le présent document pour contrôler la récolte d'énergie par vibration.

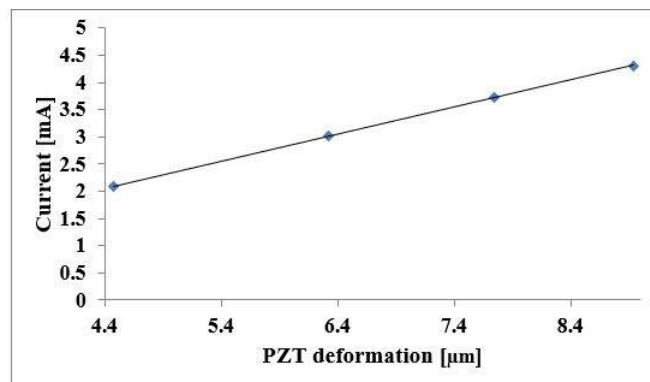


Figure 3.10 Caractéristiques non linéaires des coefficients d'amortissement verticaux des suspensions

Le modèle de moissonneuse piézoélectrique avec un système de suspension du siège a été simulé pour différents profils de route (classe A, B et C) afin de calculer la puissance électrique efficace. Le modèle proposé a été corrélé avec les valeurs des caractéristiques du modèle de suspension standard spécifiées dans la norme ISO 8608 (tableau 2.5) pour comprendre le confort de conduite du passager ou du conducteur. La fixation de la substance piézoélectrique de la moissonneuse aux suspensions se fait via un amortissement rotatif qui permet le tangage de la moissonneuse alors que les suspensions restent en position verticale. Le système inférieur de la moissonneuse avec la suspension est connecté directement au cadre de la suspension de la roue représentant la dynamique de translation et de rotation.

MATLAB/Simulink est utilisé comme outil pour contrôler le modèle de véhicule avec une suspension de siège active et un système de moissonneuse piézoélectrique. Bien qu'une petite approximation de l'angle des roues du véhicule soit faite, les équations du mouvement peuvent être résolues dans l'espace d'état. En négligeant la plage de tension de sortie des poutres piézoélectriques qui est en moyenne inférieure à la plage de tension de sortie du capteur piézoélectrique PZTk-6.

Le système développé par la technique du Bond Graph présente un schéma complet du VEH et des boucles d'hystérésis mesurées de l'actionneur cantilever piézoélectrique. La quantité importante d'énergie récoltée par rapport au mouvement du véhicule a été récoltée. Le résultat de la simulation est tracé avec l'aimable autorisation de COMSOL (figures 3.10 et 3.11). Une compensation d'hystérésis très efficace a été confirmée à l'aide de ce modèle.

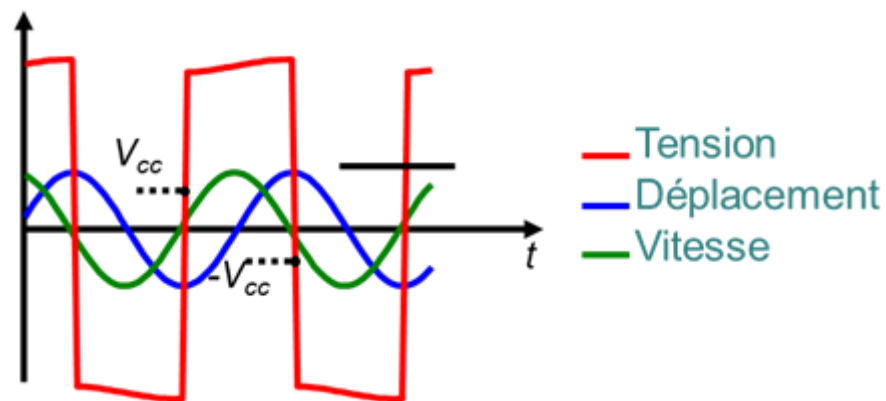


Figure 3.11 Comparaison théorique de la tension en fonction de k^2Qm

3.6 Récolte d'énergie avec l'ensemble du système : simulations numériques

Afin de prouver l'efficacité du système global proposé, dans cette étude, deux simulations sont effectuées ; la première est réalisée avec le logiciel 20-Sim (une série gratuite) pour des patches de capteurs piézoélectriques plumés sur des systèmes de suspension (siège du conducteur et suspension des roues).

L'analyse critique du capteur piézoélectrique à son mode de vibration fondamental montre la capacité du dispositif à optimiser l'intervalle entre la ligne centrale de la suspension et les cristaux de la couche piézoélectrique. La seconde est réalisée pour la première fois sur les logiciels COMSOL et Simulink de la moissonneuse piézoélectrique avec une variation instantanée de la vitesse du véhicule et une rugosité aléatoire de la route.

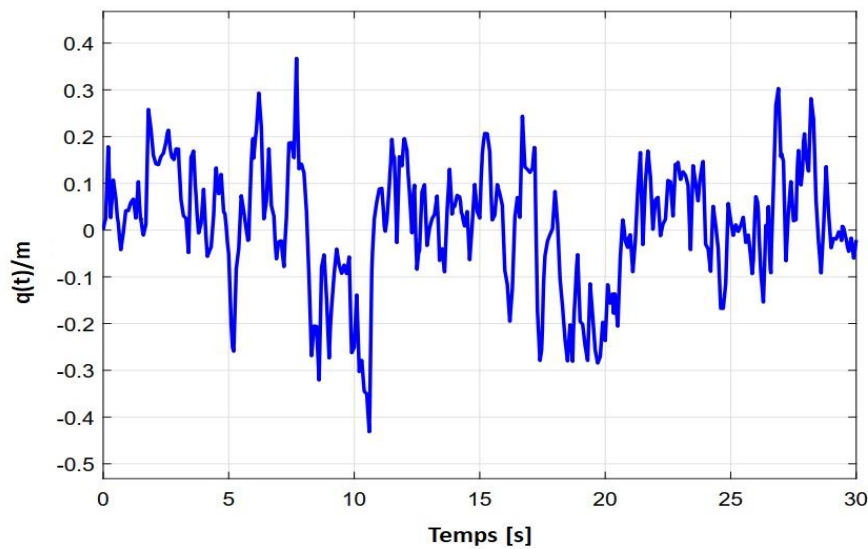


Figure 3.12 Sollicitation par bruit blanc pour le système de récupération d'énergie

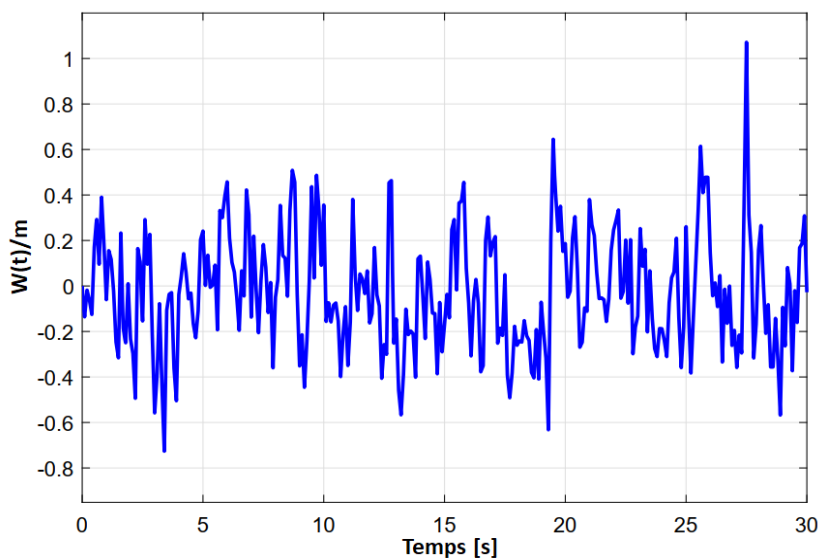


Figure 3.13 Sollicitation bruitée pour le système de récupération d'énergie en fonction du profil de route

Dans le domaine de l'automobile, il est possible d'utiliser cette théorie pour récupérer l'énergie et fournir de l'électricité pour des besoins de faible quantité, comme pour les capteurs sans fil et les accessoires de voiture, ainsi que d'autres types de capteurs intégrés dans les véhicules modernes. Cet article a proposé un processus élémentaire pour modéliser et concevoir un collecteur piézoélectrique à faible coût de la manière la plus efficace. L'analyse modale des poutres piézoélectriques à l'aide de COMSOL Multiphysics (Figures 3.12 et 3.13) est effectuée pour spécifier les valeurs de la constante piézoélectrique standard d_{33} et les monocristaux. Cette approche permet également de mesurer les valeurs d_{33} dans différentes directions de la poutre unique et du cristal pour le matériel piézoélectrique.

En même temps, ce modèle fournit des informations détaillées sur le comportement et la vitesse du système ; il est adéquat d'utiliser le spectre de la tension générée pour approvisionner le contrôleur intégré pour différentes implémentations. La méthode proposée pour modéliser le système de suspension du siège de la voiture à l'aide du graphique de Bond garantit une grande quantité d'énergie électrique et prend en compte toutes les interactions du système afin de prédire l'énergie électrique collectée par la vibration du siège du conducteur pour les différentes classes de route (A, B, C et D).

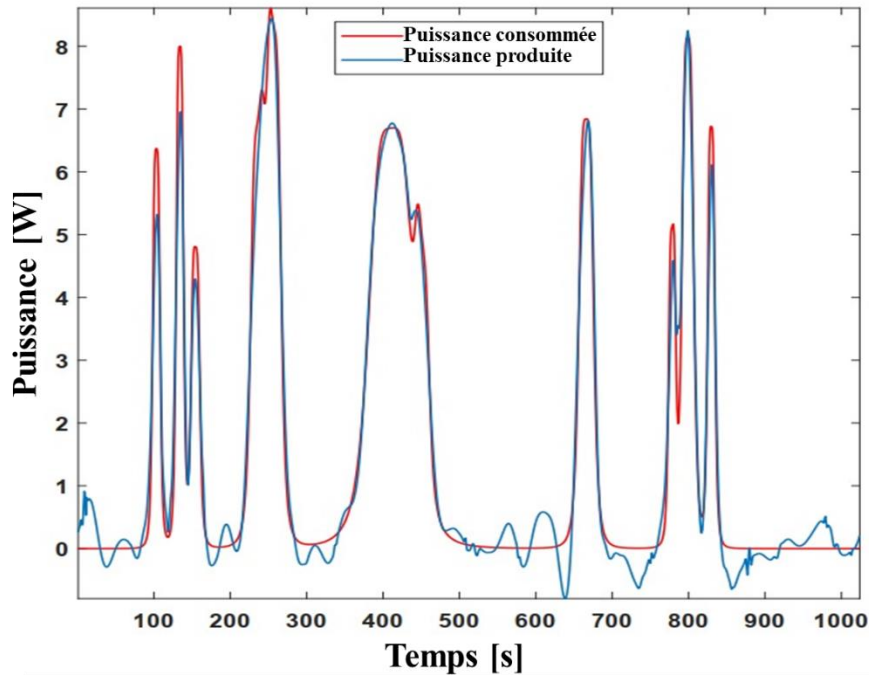


Figure 3.14 Contrôle efficace de la puissance en fonction de k^2Qm

Les paramètres de la classe de route pour les différentes classes sont présentés dans la figure 3.14 . Les résultats de simulation spécifiés prouvent la performance du système et assurent la viabilité de nos approches. Ces résultats assurent une puissance de 4.7W pendant 5min de conduite, ce qui constitue une source d'énergie électrique adaptée aux besoins de l'environnement pour un signal d'entrée de vitesse du véhicule qui est fixé à 70km/h , et le profil de la route pour la catégorie C.

Les résultats des simulations numériques sont conduits dans cette partie pour illustrer la productivité du capteur piézoélectrique proposé intégré dans le système de suspension et l'approche de stockage pour augmenter la production d'énergie et réduire la consommation d'énergie.

Les paramètres utilisés dans les simulations sont similaires à ceux d'une voiture réelle ; les caractéristiques de la suspension du siège de l'automobile ont été optimisées en fonction de la condition d'accélération du corps du conducteur afin de diminuer l'impact des vibrations sur la masse de la voiture.

La simplicité de l'approche rend ce contrôle plus intéressant afin de récolter plus d'énergie électrique à partir des vibrations et d'assurer une estimation rapide des performances. La figure 3.14 montre un bon contrôle de la vitesse du véhicule qui suit la forme d'onde sinusoïdale de référence et une bonne réduction.

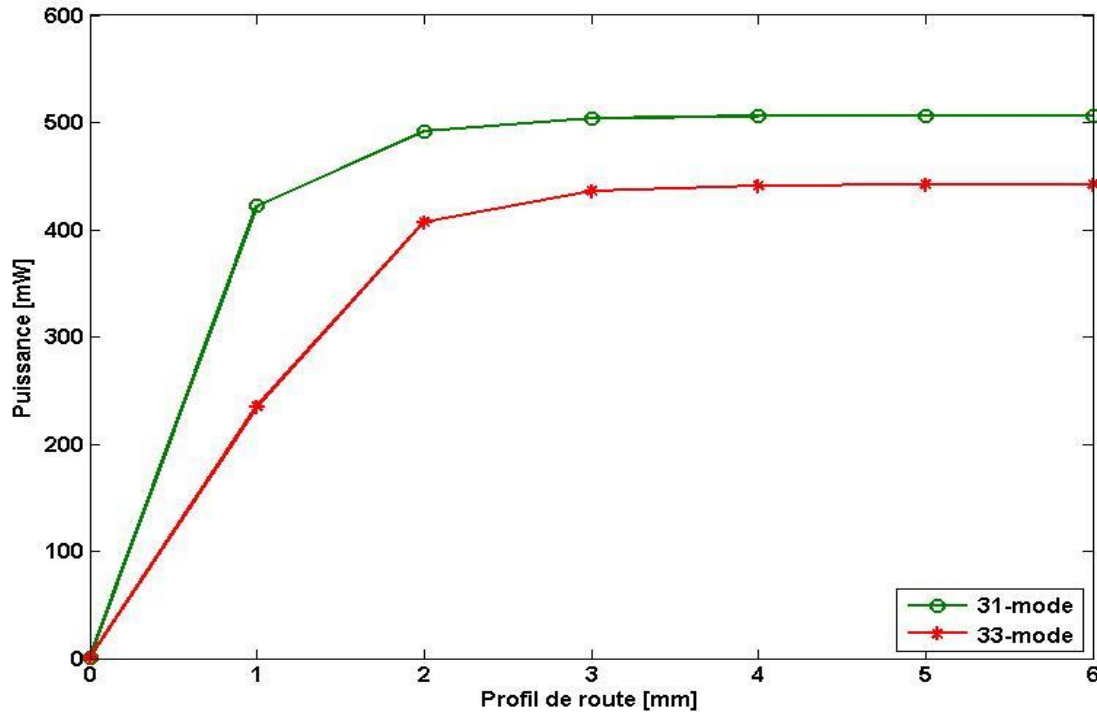


Figure 3.15 La puissance récupérée avec la technique série D 31 sur l'énergie récupérée avec la technique parallèle D33

La quantité d'énergie prédite comme montre la figure 3.15 sera exploiter afin de connecter un circuit adaptatif à la puissance électrique de sortie par la structure du collecteur piézoélectrique.

Afin d'étudier l'efficacité de la récolte d'énergie piézoélectrique à partir des vibrations de la route, le siège du conducteur est amélioré en intégrant un système de poutre piézoélectrique dans la suspension du siège, cette poutre est caractérisée par les coefficients d'amortissement D_{31} et D_{33} .

Cette solution est prometteuse pour récolter de plus en plus d'énergie lorsque la masse du véhicule est plus importante. Cette méthode assure la quantité d'énergie nécessaire pour alimenter électriquement les dispositifs de la voiture pendant le déplacement sans utiliser la batterie. Un dispositif de suspension de sièges vibrants génère une vibration sur les poutres piézoélectriques qui est une tension alternative. Le graphique de liaison pris en charge par la cellule de stockage de la performance électrochimique nécessite une tension continue.

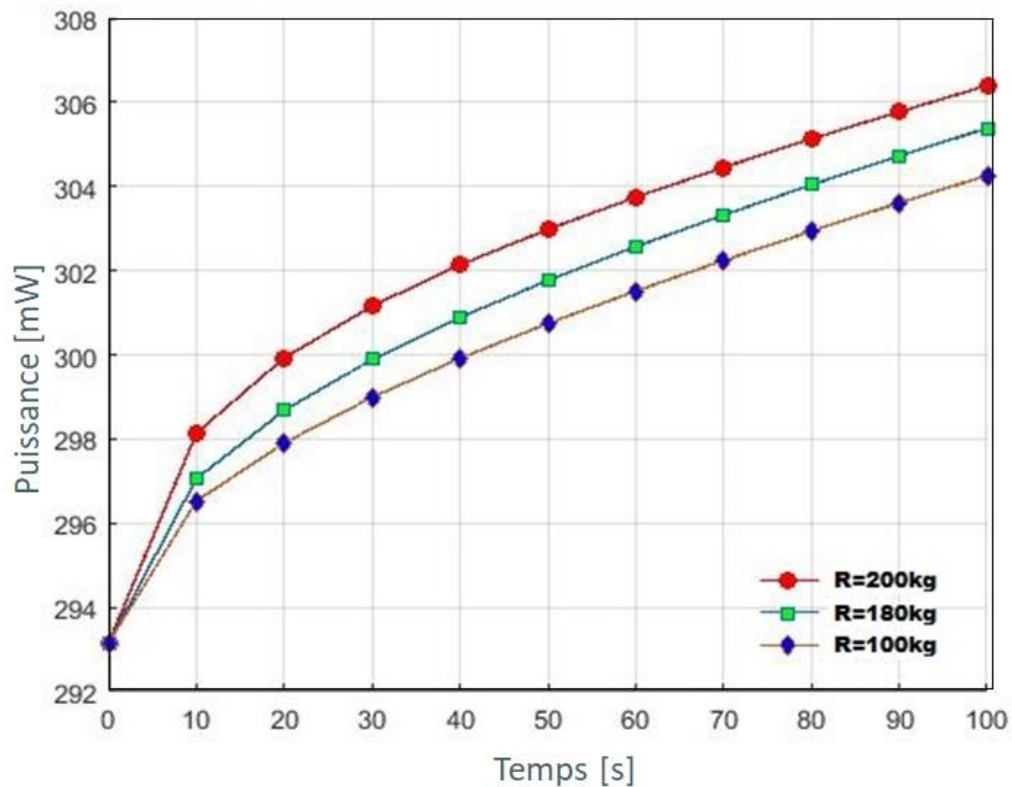


Figure 3.16 La puissance récoltée comparaison théorique en fonction de la charge totale
 Dans ces circonstances, la simulation de la réponse piézoélectrique à des forces et des accélérations dynamiques potentiellement dangereuses pour la vie est souhaitée. Ils sont également utilisés dans le développement de sièges de véhicules et dans le cas de modèles de bras de main ; la valeur de l'énergie est représentée sur les figures 3.16 et 3.17 en fonctions de la masse totale du véhicule .

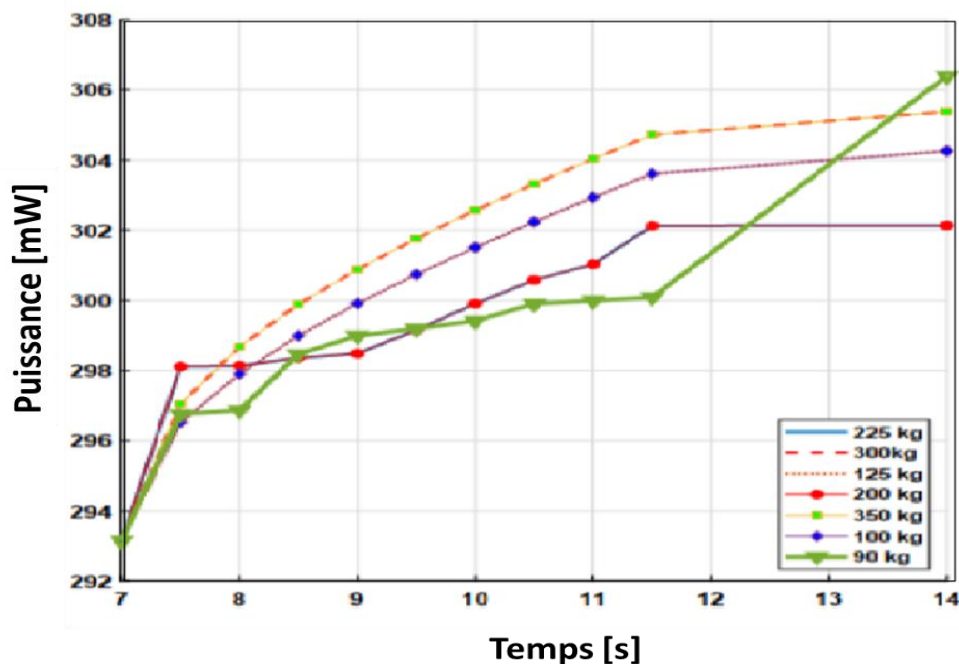


Figure 3.17 Comparaison du rapport de la puissance en fonction de la charge du véhicule

De la figure 3.17, on peut observer qu'en termes de vitesse du véhicule dans un intervalle de 20m/s à 75m/s sur un profil routier de catégorie B, C et D, ne représente aucun pic d'hystérésis avec une grande précision.

L'évaluation de la puissance électrique pour la suspension du siège du véhicule est basée sur l'examen de l'intervalle de fréquence précis et de la vibration externe de la suspension entre le plancher de la cage et le corps du siège. Ces prototypes reprennent la géométrie réelle et les mêmes caractéristiques de substance avec les résultats des simulations de modélisation.

La puissance finale est généralement considérée comme un impact combiné de l'attitude du capteur piézoélectrique et de la dynamique de déplacement de la structure des poutres. La quantité de puissance électrique augmente de manière significative lorsque le déplacement transversal et la vitesse du véhicule sont importants sur les différentes surfaces de la route. En outre, les déplacements relatifs et les vitesses du corps suspendu et du corps non suspendu sont tous proportionnels à la racine carrée de la vitesse du véhicule.

Tableau 3-2 Mesures et paramètres du modèle

f_E	60.18Hz
f_D	60.46Hz
Q_m	520
λ	31000V/m
C_0	74.9nF
α	0.0023N/V
k^2	0.92%
K_E	7730Nm ⁻¹
M	54g
C	0.039Nm ⁻¹ s ⁻¹

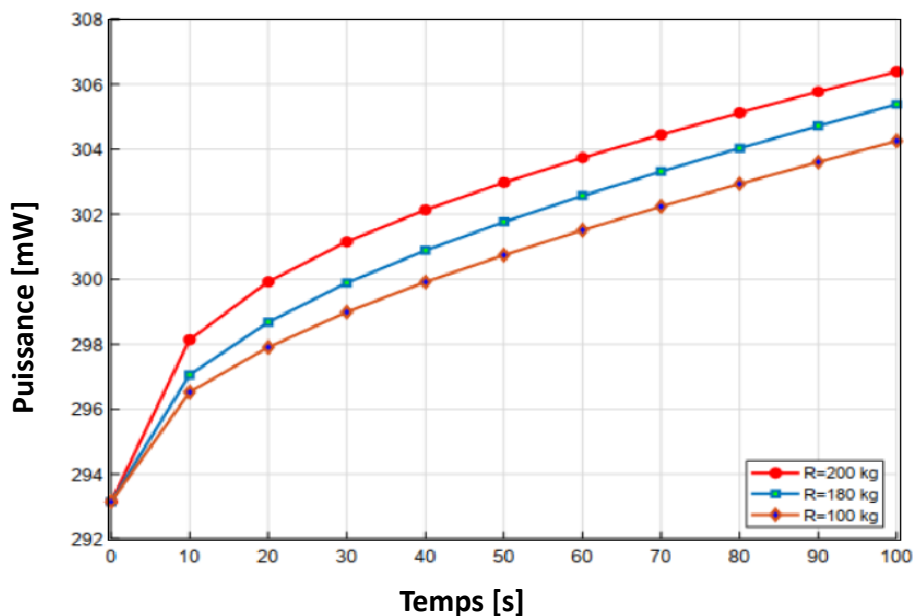


Figure 3.18 Comparaison théorique du rapport de la puissance récupérée avec la technique classique en fonction de la charge

La figure 3.19 montre que la tension électrique augmente linéairement avec l'augmentation de la vitesse du véhicule qui se traduit directement par la valeur importante de la puissance récupérée. En particulier, l'accélération croissante indique que la récupération de l'énergie électrique est importante pour améliorer le confort de conduite. Les résultats montrent que l'énergie électrique augmente respectivement entre 3 et 5 W, à 70 km / h, également de 0,6 W à 08 W et de 0,2 W à 10 W, lorsque la vitesse du véhicule augmente de 60 km / h à 90 km / h.

Dans cette partie, les résultats des simulations ont été acquis pour une valeur de fréquence établie appropriée de 80 Hz. Il est également confirmé que dans les conditions susmentionnées, le niveau de tension et la récupération d'énergie étaient extrêmement élevés.

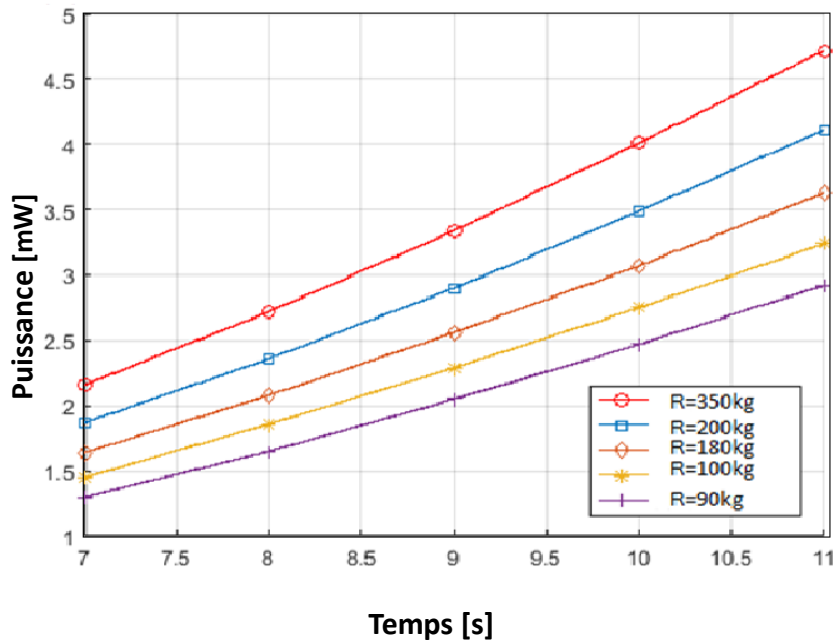


Figure 3.19 Comparaison théorique du rapport de l'énergie récupérée avec la technique SSHI sur l'énergie récupérée et la technique classique en fonction de la charge

La figure 3.19 montre la valeur efficace de la comparaison des PVHE pour tous les modèles de charges de véhicules. Il ressort des figures 3.17 et 3.18 que les amplitudes des accélérations du corps du conducteur sont considérablement augmentées. Ces simulations confirment l'efficacité de l'importance de l'utilisation du cantilever piézoélectrique pour récolter l'énergie électrique. La poutre piézoélectrique utilisée dans le système proposé donne la récupération d'énergie nécessaire. Les dimensions de la moissonneuse sont adaptées à la fabrication et à la réalisation d'un tel système puis il faut noter que cette approche a optimisé l'énergie consommée par les capteurs.

Pour comparer les phénomènes d'hystérésis et les performances des techniques de modélisation proposées, les erreurs de résolution des équations sous l'entrée de commande aléatoire dans les systèmes existants dans l'équation (3.6) sont validées les résultats sont présentés à la figure 3.14.

Il est clair que la stabilité du système est garantie et que les phénomènes d'hystérésis convergent immédiatement vers zéro, ce qui implique que les vibrations linéaires et non linéaires des perturbations du profil de la route et des incertitudes externes sont efficacement exploitées en un temps fini.

3.7 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est de construire un système de capteur piézoélectrique amélioré en utilisant les outils BG. Le système est appliqué à la suspension du siège de la voiture pour quantifier et collecter l'énergie des vibrations de l'équipement causées par l'impact du profil de la route. La simulation numérique est effectuée sur un modèle complet de voiture avec des paramètres spécifiques, ainsi que sur la source externe de vibrations. L'adoption du BG dans cette étude donne une bonne occurrence de la quantité d'énergie électrique dans la fréquence de résonance piézoélectrique. De plus, suite à une variation instantanée de la vitesse du véhicule, la magnitude de la puissance dans la poutre piézoélectrique atténue la perturbation de la route. Cette méthode prédit l'énergie électrique de sortie des dispositifs de charge, comme le montre la figure 3.19, pour différentes dimensions de suspension. Les résultats numériques ont confirmé la faisabilité et l'efficacité du modèle proposé en augmentant l'énergie électrique récoltée de 3 à 5 W, de 0,2 W à 10 W et de 1 à 40 W pendant les mouvements de l'automobile sur route de classe C. Cette étude a montré des résultats remarquables en atteignant la meilleure performance de 32,2% dans le confort de conduite par rapport aux modèles précédents dans la littérature.

Chapitre 4

CONTRIBUTION DU BOND GRAPH A LA MODELISATION ET LA COMMANDE DES SYSTEMES DE RECUPERATION D'ENERGIE

4.1 Introduction

Comme mentionné dans le chapitre précédent, la technique de modélisation mécatronique proposée consiste à récolter l'énergie des modes non contrôlés, afin d'utiliser cette énergie pour améliorer les performances de contrôle sur les modes ciblés. Une contribution importante de ce chapitre est le développement d'un modèle de voiture avec une pile piézoélectrique intégrée pour évaluer le potentiel de récupération d'énergie du système de suspension de la voiture. Le système de suspension régénérative de la voiture est modélisé mathématiquement à l'aide de la transformation de Laplace et simulé à l'aide de MATLAB/Simulink. Deux piles piézoélectriques sont installées en série avec les ressorts de suspension avant et arrière pour maintenir les performances du système de suspension d'origine en termes de qualité de conduite et de confort. Le modèle de demi-voiture est soumis à une excitation harmonique avec une accélération de 0, 5g et une vitesse de 9, 17rad/s. Pour un PEG linéaire par-morceaux, la force de rappel est linéaire par-morceaux. Cependant, le comportement de ces systèmes est globalement non linéaire. Une telle raideur linéaire par-morceaux peut être réalisée physiquement en ajoutant des butées mécaniques à un oscillateur linéaire classique, ce qui élargi de façon significative la réponse fréquentielle. La tension et la puissance récupérées sont testées à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. L'influence des différents paramètres de l'empilement piézoélectrique (nombre de couches d'empilement et surface/épaisseur) et de la suspension de la voiture (rigidité suspendue et non suspendue et coefficients d'amortissement) est examinée. De plus, l'effet des irrégularités d'amplitude de la route est pris en compte. Les résultats montrent que la tension et la puissance maximales générées à la fréquence d'excitation de 1, 46Hz sont respectivement de 33, 51V et 56, 25mW.

Dans le chapitre précédent, les nouvelles techniques ont été présentées, expliquant comment l'énergie récoltée est utilisée. Dans ce chapitre, des techniques de récolte d'énergie sont proposées pour atteindre les exigences en termes de tension et d'énergie pour les techniques BG. Une des originalités de ce travail est le point de vue modal, en effet les techniques de récolte d'énergie doivent être redéfinies dans la base modale.

4.2 Gestion et stockage de l'énergie récupérée

Afin d'alimenter un système électronique en aval du système de récupération d'énergie, il est nécessaire à la fois, de gérer son utilisation de façon optimale et adaptée à la consommation [27] et de la stocker. Dans les parties qui suivent, nous détaillerons les techniques de gestion de l'énergie visant à améliorer le rendement des récupérateurs ainsi que les techniques de stockage actuelles.

a) Extraction de l'énergie

Il existe un grand nombre de techniques d'extraction servant à optimiser l'énergie en sortie du récupérateur et ce, même lorsque cette dernière est de faible niveau. Le schéma général est illustré à la figure 4.1.

Une donnée essentielle est que le circuit d'extraction de l'énergie modifie les grandeurs électriques en sortie du récupérateur.

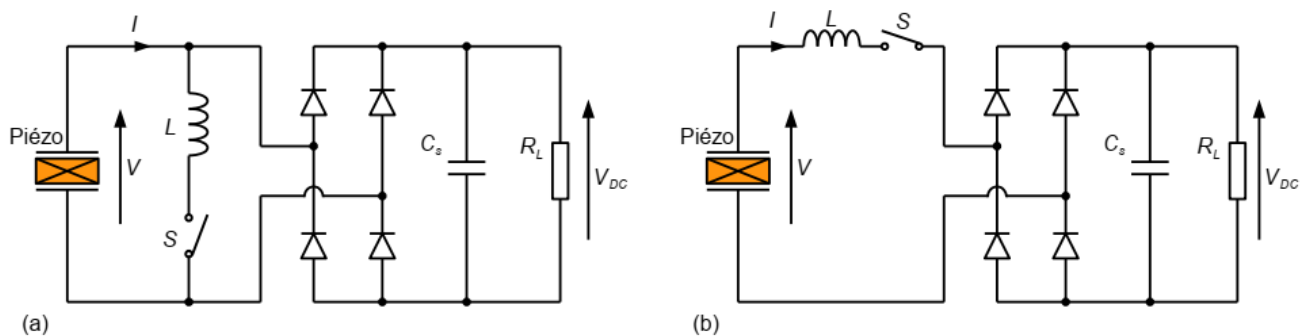


Figure 4.1 Circuits SSHI : (a) parallèles, (b) série

Il est donc nécessaire d'extraire efficacement l'énergie électrique à sa source et de la convertir en énergie utilisable. Ces deux fonctions sont souvent réalisées par le même circuit. L'EEC standard se compose d'un redresseur en pont complet et d'un condensateur de lissage. Il s'agit du circuit d'extraction le plus simple.

Toutefois, il présente une faible efficacité d'extraction et ses performances sont dépendantes de la charge électrique R_L . Les techniques d'extraction d'énergie non linéaires à l'aide d'interrupteurs synchrones sont de bonnes alternatives pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie.

Les circuits d'extraction de l'énergie sont tous non-linéaires et l'exemple d'application est le récupérateur piézoélectrique. Nous présenterons dans un premier temps le circuit Standard qui consiste à connecter directement l'élément piézoélectrique et le système de stockage à travers un pont de diode.

Les auteurs dans [111] confrontent leurs performances. Concrètement, les approches non linéaires offrent une meilleure récupération de l'énergie par rapport à une approche dite classique mais en utilisant moins de matériaux actifs. Chacune des techniques peut être classée en fonction de plusieurs critères comme l'énergie récupérée, le niveau de tension le plus faible pour que la technique fonctionne, l'indépendance par rapport à la charge appliquée au système et la facilité d'intégration du système. La technique de récupération d'énergie dite Standard se détache des autres méthodes de par sa facilité d'intégration, quoiqu'en termes de récupération d'énergie ce ne soit pas la méthode la plus efficace. Les techniques de type SECE et DSSH/ESSG sont quant à elles des techniques indépendantes de la charge.

Lorsque les tensions à récupérer sont faibles, il est plus approprié d'utiliser les techniques SSHI MR et Hybride. En ce qui concerne la récupération d'énergie lorsque le couplage est faible, les techniques du Schéma actif d'Ericson et à Injection d'énergie sont celles qui sont mises en avant ainsi que les techniques DSSH/EESG. Lorsque les déplacements sont à amplitude constante, toutes les techniques sont appropriées à l'exception de la technique Standard. Néanmoins, les techniques à Schéma actif d'Ericsson et à Injection d'énergie se détachent avec de meilleures performances. De cette analyse, nous pouvons en conclure que les techniques les plus adaptées à la récupération d'énergie pour notre cas d'étude où la tension est faible sont les SSHI.

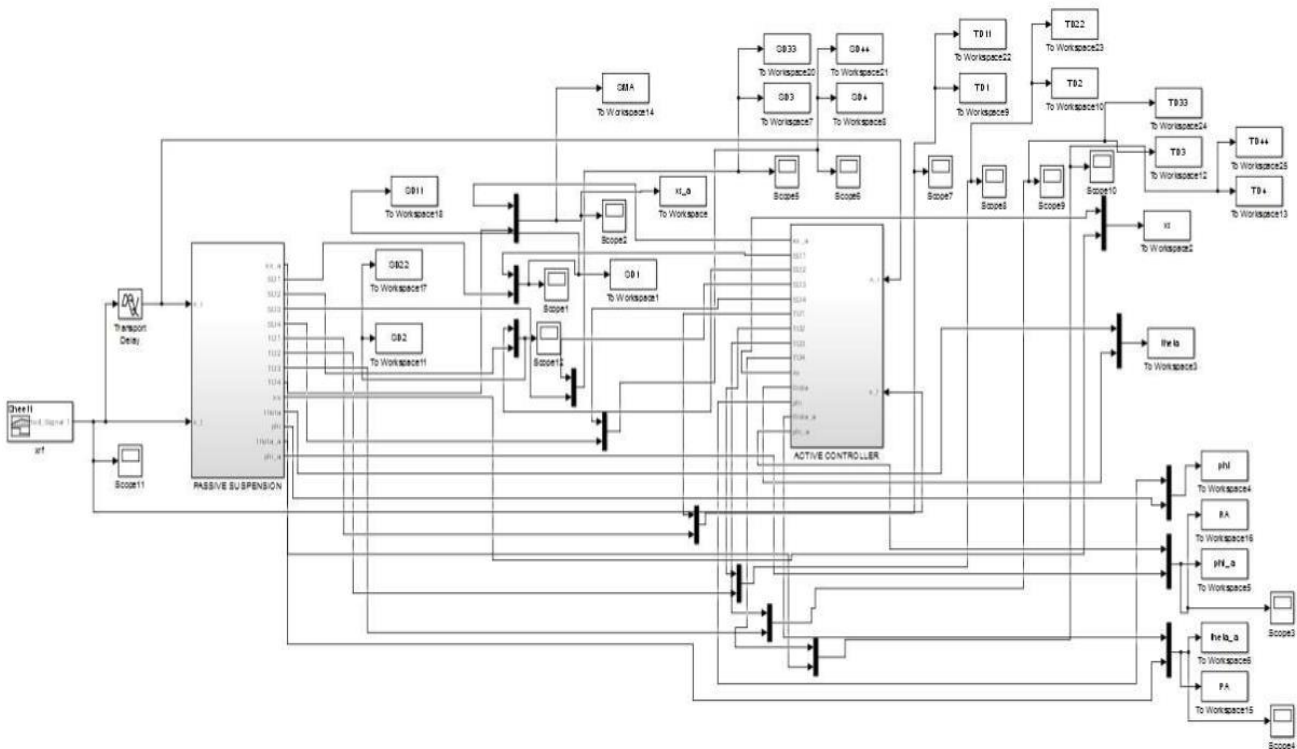


Figure 4.2 Comparaison théorique (points) et (ligne) du rapport de l'énergie récupérée avec la technique BG de l'énergie récupérée classique en fonction de k^2Q_m

Bien que cette configuration soit simple à réaliser, les auteurs [12] analysent le seuil de tension des diodes pour lequel la puissance peut être récupérée et montrent que ce dernier est problématique pour les applications dont la tension est faible. Les études de [187] et [17] servent quant à elles à comprendre pourquoi la puissance en sortie d'un récupérateur d'énergie électromagnétique non-linéaire transférée à la charge dépend fortement de la tension en sortie du pont de diode et du type de circuit d'extraction. On peut noter également que la puissance extraite est maximale quand la charge est dite optimale. Du fait de sa simplicité de mise en œuvre, ce dispositif est universellement employé, c'est pourquoi nous le comparerons aux autres techniques non-linéaires d'extraction d'énergie.

Les techniques non-linéaires de type SSH (Synchronized Switch Harvesting), consistent à traiter la tension de sortie en la reliant de manière très brève soit à des éléments inductifs, soit capacitifs ou bien à des sources de tension comme c'est le cas des techniques SSHI Parallèle, SSHI Série, SSHI MR et SSHI Hybride. Bien qu'utilisées dans un premier temps par les auteurs suivants [99], le développement et l'amélioration de ces techniques est le fruit du travail de l'équipe des chercheurs [123]. Elles permettent d'extraire environ dix fois plus d'énergie si on les compare à la technique Standard, avec une tension en sortie des SSH identique. Chacune des techniques a fait l'objet d'une analyse complète et détaillée en (Annexe D) et a des avantages et des inconvénients.

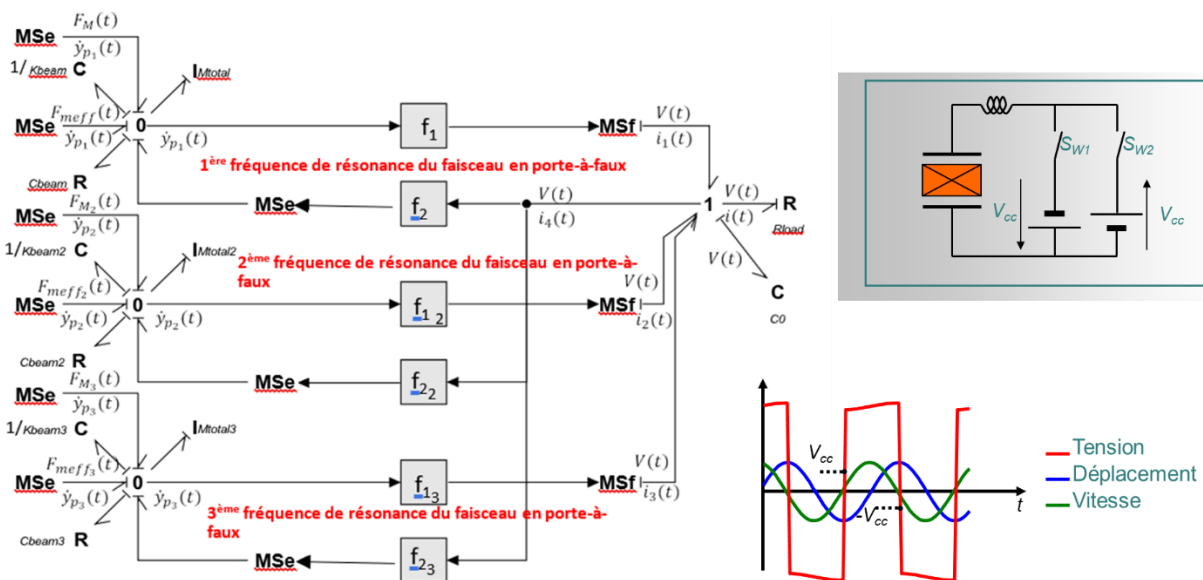


Figure 4.3 Analyse model de la récupération d'énergie par modélisation Bond Graph.

La présentation des techniques d'extraction de l'énergie a été faite dans le cadre de la récupération d'énergie piézoélectrique. Cependant, elles sont tout à fait applicables en conservant les mêmes avantages et inconvénients dans le cadre de récupération électromécanique comme illustré sur la figure 4.3.

Les auteurs dans [115] ont réalisé une étude comparative adaptée au récupérateur électromagnétique et piézoélectrique pour quatre circuits d'extraction différents : Standard, SECE, SSHI Parallèle et Série afin d'en déduire le rendement et la puissance moyenne à la fréquence de résonance des systèmes. Il en ressort des similitudes et une dualité avec les récupérateurs d'énergie piézoélectrique.

b) Stockage de l'énergie

Généralement, l'énergie fournie par les récupérateurs d'énergie n'est ni constante, ni maximale sur de longues périodes de temps. En outre, la consommation d'énergie des circuits alimentés sera beaucoup plus élevée que l'énergie récoltée sur de courtes durées. Ainsi l'ajout d'éléments de stockage afin d'emmagasiner puis restituer cette même énergie au circuit que l'on vise à alimenter est nécessaire comme montre la figure 4.2. De toute évidence, les batteries et les condensateurs sont les solutions les plus classiques connues depuis des siècles. En règle générale, les batteries (Lithium-ion) et les condensateurs ou supercondensateurs rechargeables sont privilégiés dans le domaine de la récupération d'énergie. Par définition, une batterie ou un accumulateur électrochimique est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux de façon à créer un générateur électrique de tension et de capacité désirée. Les accumulateurs sont souvent câblés en série afin d'obtenir la tension souhaitée. Le montage parallèle permet d'augmenter le courant, le but étant d'obtenir une tension et un courant suffisant pour une alimentation donnée d'un système. Grâce à la réversibilité au sein de ces éléments, il est possible de les recharger à partir d'une source électrique comme un réseau embarqué, un générateur, etc., l'autonomie étant dépendante du niveau d'énergie stockée dans chacun des éléments. Les batteries en Lithium-ion et celles en Nickel-hydrure se détachent des autres batteries, car elles possèdent une haute densité en énergie pour un poids très faible. Elles sont peu sensibles à l'effet mémoire et ont toutes deux une faible autodécharge, ainsi qu'une durée satisfaisante d'autonomie.

À cela, on peut ajouter que les batteries en lithium-ion nécessitent peu de maintenance et que celles en Nickel-hydrure sont simples à transporter. Les batteries Lithium-ion sont très utilisées dans le domaine des systèmes embarqués bien que les courants de charge et de décharge admissibles soient plus faibles qu'avec les autres techniques. Elles doivent être toutefois employées avec précaution dû au risque d'explosion. Pour la batterie en Ni-MH, il est important de souligner qu'elle ne supporte pas le dépassement de charge, et que la détection de la fin de charge est difficilement détectable. Elles équipent essentiellement les voitures hybrides car elles peuvent supporter de forts courants de charge et de décharge, ce qui n'est pas le cas pour les batteries en Lithiumion et sont plus sûres en cas de surchauffe. Les condensateurs sont des composants passifs qui sont exploités dans tous les domaines de l'électronique [17]. Leurs performances électriques dépendent de la nature du diélectrique et de la structure électrode-isolant-électrode.

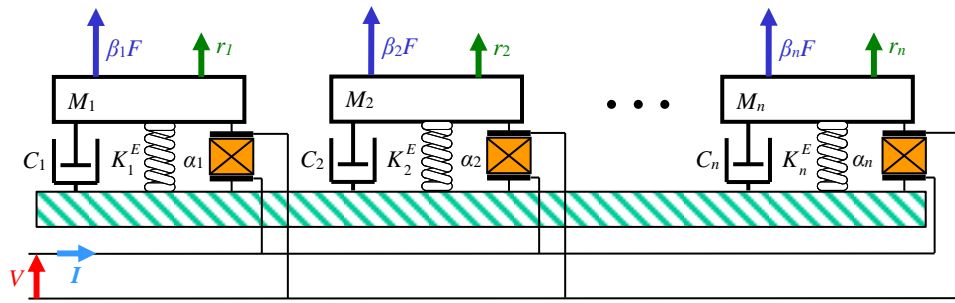


Figure 4.4 Model développé du récupérateur PZT-4K.

La figure 4.4 donne un exemple de structure d'un condensateur C_R . Les principales fonctions assurées par les condensateurs sont : l'accord, le découplage, la liaison, le filtrage, la compensation de température, le stockage de l'énergie et la mémoire RC.

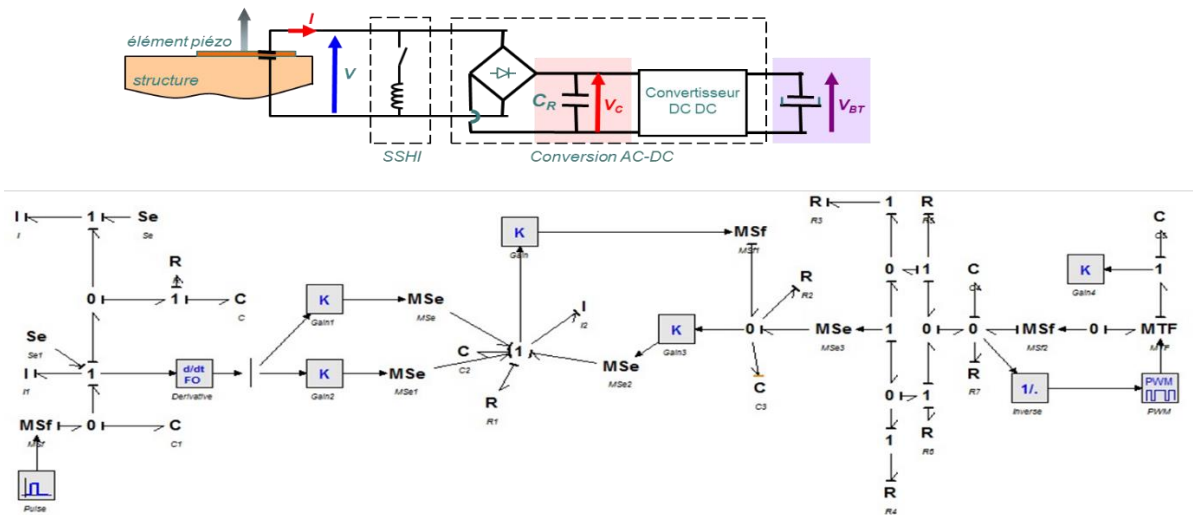


Figure 4.5 Schéma général de la récupération et du stockage d'énergie

L'accord caractérise les condensateurs pouvant être utilisés dans les circuits oscillants, les filtres ou encore les circuits à constante de temps. Les pertes sont faibles et sont très stables par rapport à la température, au temps et à une tension continue appliquée. Les condensateurs concernés sont le polypropylène, le polycarbonate, le polysulfure de phénylène, et la céramique PZT-k4. Le découplage réduit ou bien supprime une composante alternative parasite pour les fréquences élevées. Les valeurs d'impédance doivent être faibles aux fréquences d'utilisation avec une capacité élevée. Toutes les familles sont concernées sauf le PZT-k4. Le filtrage réduit ou élimine une composante alternative passive de la tension continue. La capacité doit être élevée avec de faibles valeurs de résistance et d'inductance. Les condensateurs non concernés sont le polystyrène, le polypropylène et le polycarbonate. La compensation en température compense la dérive positive d'un composant si le condensateur a un coefficient positif et est stable dans le temps.

Peu de condensateurs sont concernés, seul le polystyrène. Le stockage d'énergie délivre une puissance très élevée pour un intervalle de temps très court ou bien une tension continue durant un temps très long (super capacité) comme pour les condensateurs de type polypropylène, aluminium et tantale. La mémoire RC stocke une information sous forme d'une charge électrique. Le condensateur doit avoir une résistance d'isolement élevée et pouvoir restituer dans un temps très court la charge emmagasinée (Figure 4.5). De cet état de l'art, nous pouvons noter que seuls les condensateurs de type polypropylène, aluminium et tantale sont appropriés dans le cadre de la récupération d'énergie. Nous nous intéresserons donc qu'à ces trois types de condensateurs. Il existe trois grandes familles de condensateur suivant la nature de leurs isolants et la valeur de la permittivité associée : céramique, film plastique et électrochimique. Le choix du type de condensateur dépend de l'application visée en prenant en compte la valeur de la capacité recherchée et du comportement du di- électrique en fonction des conditions d'utilisation, de même que les contraintes de fiabilité et de coût. Les super condensateurs sont des dispositifs de stockage d'énergie. Ils se positionnent entre les accumulateurs électrochimiques et les condensateurs. Ils sont constitués de deux électrodes et d'un électrolyte.

4.3 Évaluation des comportements dynamiques du transducteur piézoélectrique

Ils sont classés en deux groupes selon que le stockage de l'énergie s'effectue sous forme électrostatique ou électrochimique. La technologie au charbon fonctionne sur le principe électrostatique.

L'électricité est stockée dans la double couche électrochimique existant à l'interface électrode/électrolyte comme le montre la figure 4.5. L'électrolyte est soit à conduction ionique, soit aqueuse ou bien organique. L'électrolyte à conduction ionique permet d'obtenir une forte puissance (10kW/kg), due à une grande conductivité au détriment d'une faible densité d'énergie (1,1Wk/kg) tandis que l'électrolyte organique aide à avoir une plus forte densité de puissance (jusqu'à 4,2Wh/kg) comme modalisé en utilisant le BG sur la figure 4.6.

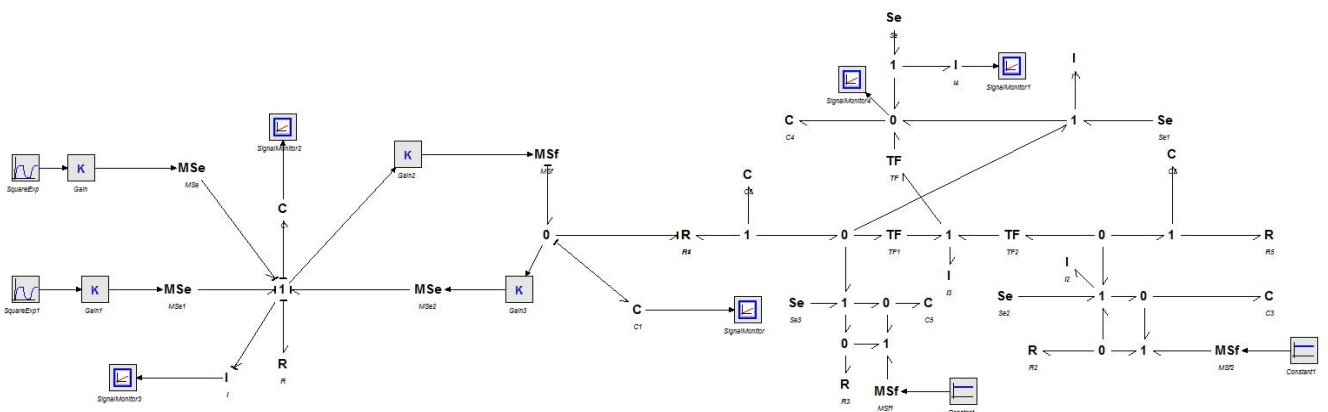


Figure 4.6 Schéma général de la récupération et du stockage d'énergie par modélisation Bond Graph.

La seconde technologie dite électrochimique est basée sur des réactions faradiques à l'interface électrode/électrolyte. Le matériau de l'électrode est constitué soit par un oxyde de métal de transition non stœchiométrique (matériau d'insertion), soit par un polymère conducteur. L'électrolyte est soit composée d'acide sulfurique, soit d'un sel dissous dans un solvant aqueux ou organique. Le comportement capacitif est lié au blocage inhérent à la pénétration des ions dans la réaction interfaciale électrolyte/matériau d'électrodes. Pour l'ensemble de ces systèmes de stockage, certaines limites sont à prendre en compte lors de leur intégration au système final. Par exemple, les batteries Li-ion ne peuvent pas être chargées directement si la tension en sortie du récupérateur est inférieure à 3.7V d'où l'importance du choix du circuit d'extraction de l'énergie. En outre, leur encombrement ne doit pas être négligé lors de leur intégration. Enfin, l'usage et la vitesse avec lesquels l'élément de stockage est utilisé, influence fortement sa durée de vie. L'exploitation de condensateurs ou supercondensateurs en raison de leurs plus grandes densités de stockage présente l'avantage d'être moins influencée par la vitesse à laquelle l'énergie est stockée dans ou en dehors de ceux-ci. Comme l'interaction entre le circuit d'extraction d'énergie et le condensateur est négligeable, la modification du circuit d'extraction ne modifie en rien son action sur l'élément de stockage. Cependant à la vue de la large gamme de tension pour laquelle ils fonctionnent, la régulation en tension devient plus complexe. Face à nos contraintes d'encombrement et aux faibles tensions récupérées à stocker pendant un intervalle de temps très court, les supercondensateurs semblent la solution de stockage la plus appropriée cependant ils sont sujet à des courants de fuites élevés. La revue de littérature réalisée dans les parties ci-dessus nous a permis d'introduire l'ensemble des techniques de récupération d'énergie et de restitution de cette énergie.

4.4 Schéma global du système intégré et énergie disponible

Le patch céramique de type PVDF de matériaux piézoélectriques a été fixé à la suspension du siège du véhicule électrique (EV). La vibration du mouvement du véhicule supposé vertical ainsi que nous avons négligé les mouvements de tangage et de roulis. La poutre piézoélectrique intégrée au siège du conducteur est soumise à des perturbations dont les propriétés mécaniques sont complexes.

L'action de la dynamique de la moissonneuse et de l'hystérésis piézoélectrique est supposée être une force génératrice absolue pour le mouvement vertical du châssis du système qui donne le mouvement d'assimilation pour la suspension du siège complet. Le corps du conducteur est modélisé avec une masse, un ressort et un amortisseur dans le schéma BG qui présente une transition de phase causée par la masse du châssis du véhicule. La conversion d'énergie, dans cet article, est basée sur une méthodologie distribuée, l'approche BG qui facilite la tâche par une simple inversion de causalité. De plus, la solution des équations d'état peut être facilement déterminée.

En ce qui concerne l'échelle de fréquence d'excitation d'entrée, elle fonctionne uniquement avec la fréquence de résonance initiale de la poutre piézoélectrique pour la sécurité du conducteur et le confort de conduite. Enfin, les propriétés et les dimensions du système de suspension ont un impact sur la puissance générée par le capteur d'énergie piézoélectrique. Pour cette raison, la relation entre la pression moyenne et la déviation maximale de la poutre en fil homogène est analysée avec une charge ponctuelle exercée en $x = L$. En outre, un nouvel outil de représentation graphique est utilisé pour modéliser l'interaction entre les connexions d'écoulement et les efforts extérieurs. Les caractéristiques associées sont calculées avec les équations de mouvement dans les conditions d'équilibre. La modélisation améliorée est basée sur la décomposition du système matriciel masse-ressort-amortisseur pour chaque mode flexible à plusieurs degrés de liberté. Ce modèle permet d'obtenir un contrôle performant pour un large spectre de perturbations de la route. Ce modèle donne une quantité d'énergie électrique agréable et diminue le gain de perturbation de la route (signal d'entrée w) pour le signal du coefficient de régulation (sortie z) comme indiqué sur la figure 4.3. Le système de capteur piézoélectrique est modélisé dans la figure 4.5, en fonction des paramètres de suspension qui ont été proposés dans la référence [127] ; les auteurs confirment que pour une quantité de perturbation finie le système de capteur piézoélectrique régénère une grande énergie électrique. Afin d'augmenter la tension de sortie, le système se connecte en série ou augmente le courant de sortie standard en parallèle, ces deux arrangements permettant une augmentation de la puissance électrique. La connexion fixe dupliquera la tension en circuit ouvert accumulée à un facteur unique, et la capacité pratique sera de $C = 1/2\Omega$ de l'impédance de capacité théorique. La sélection utilise la connexion collatérale pour augmenter la quantité de puissance électrique, car la connexion analogique doublera le débit par rapport à un schéma d'élément unique, et multipliera la puissance électrique efficace. Dans une large gamme d'applications piézoélectriques, les phénomènes d'hystérésis et la dynamique d'oscillation ont une influence négative, car les concepts d'hystérésis sans taux sont associés au prototype de dynamique de perturbation. Ce phénomène s'est transformé en modèles d'hystérésis dépendant de la vitesse des comportements PEA [127].

4.5 Énergie récoltable avec l'ensemble du système : Simulations numériques

4.5.1 L'équilibre dynamique

Pour une formulation précise de cette approche, une simulation numérique va être analysée et discutée dans cette section. Les résultats de la simulation montrent un succès important de notre modélisation améliorée de la suspension de siège impartiale puisqu'elle élimine l'utilisation de batteries comme présenté dans la figure 4.4. De plus, cette approche de conversion proposée optimise la consommation d'énergie des véhicules électriques.

Cette approche de modélisation utilisant le Bond Graph pour le système de suspension du siège de la voiture permet de prendre en compte toutes les interactions du système pour prédire la puissance électrique par la vibration du siège du conducteur. La grande quantité d'énergie électrique récoltée par ce modèle de moissonneur piézoélectrique sur une route de classe C de vibration est exposée dans la figure 4.2. Le résultat important est la puissance électrique régénérée importante ($P = 5W$) .

Cette dernière est une source autonome d'énergie électrique adaptée à l'environnement de la fonction. Les paramètres utilisés dans la simulation et les facteurs de suspension du siège du véhicule ont été calculés par l'analyse fonctionnelle de l'équation de puissance, en fonction de l'accélération du corps conducteur et du véhicule.

L'approche développée donne une estimation rapide des paramètres pour vérifier la mise en œuvre de la modélisation qui réduit la matrice de masse. Pour cette raison, l'efficacité de la récolte d'énergie piézoélectrique a été étudiée à partir des vibrations de la route, nous améliorons le siège du conducteur en intégrant le système de poutre piézoélectrique dans la suspension du siège. Cette solution est prometteuse pour améliorer la puissance électrique lorsque la masse du véhicule est plus importante.

4.5.2 Résultats et discussion

Dans cette partie, différentes perturbations de la route à 15m/s sont appliquées pour obtenir le comportement du capteur piézoélectrique et la régénération de l'énergie électrique, comme le montrent les figures 4.7 et 4.8. De plus, la vitesse du véhicule en fonction des déformations du capteur piézoélectrique est analysée comme exposé dans la figure 4.7. Une grande rugosité de la route provoque de grands déplacements verticaux, et donc d'augmenter les performances du système de récolte et la régénération de l'énergie électrique en quantité. Ces résultats confirment l'efficacité de cette approche et assure une grande quantité d'énergie électrique sans utiliser la batterie comme le présente la figure 4.9. En conséquence, le profil de route standard provoque un mouvement relatif du véhicule avec les amplitudes élevées de la route respectivement 0.32m, 0.52m, et 0.99m la puissance récoltée est 3W, 4.3W et 4.7W comme le montre la figure 4.10 d'un véhicule suspendu de masse 340kg et non suspendu de masse 180kg animé par la fonction aléatoire de la route pour le déplacement transversal. La fonction aléatoire a été appliquée afin d'avoir un profil de route réel pour la classe C, le bruit blanc qui est la perturbation de la route figure 4.7. Ces résultats montrent clairement la relation entre les charges et la puissance. Comme il est exposé dans la figure 4.8, l'approche proposée offre de meilleurs résultats par rapport à la littérature dans les domaines de la récolte d'énergie. Cette simulation confirme que les systèmes de cantilever piézoélectriques fournissent une source permanente d'énergie électrique. Les figures 4.7 et 4.9 présentent respectivement les courbes de convergence vers la puissance de consommation et de production à l'équilibre du système.

Dans cette partie, différentes perturbations de la route à 15m/s sont appliquées pour obtenir le comportement du capteur piézoélectrique et la régénération de l'énergie électrique, comme le montrent les résultats de la simulation.

De plus, la vitesse du véhicule en fonction des déformations du capteur piézoélectrique est analysée comme exposé dans la figure 4.7.

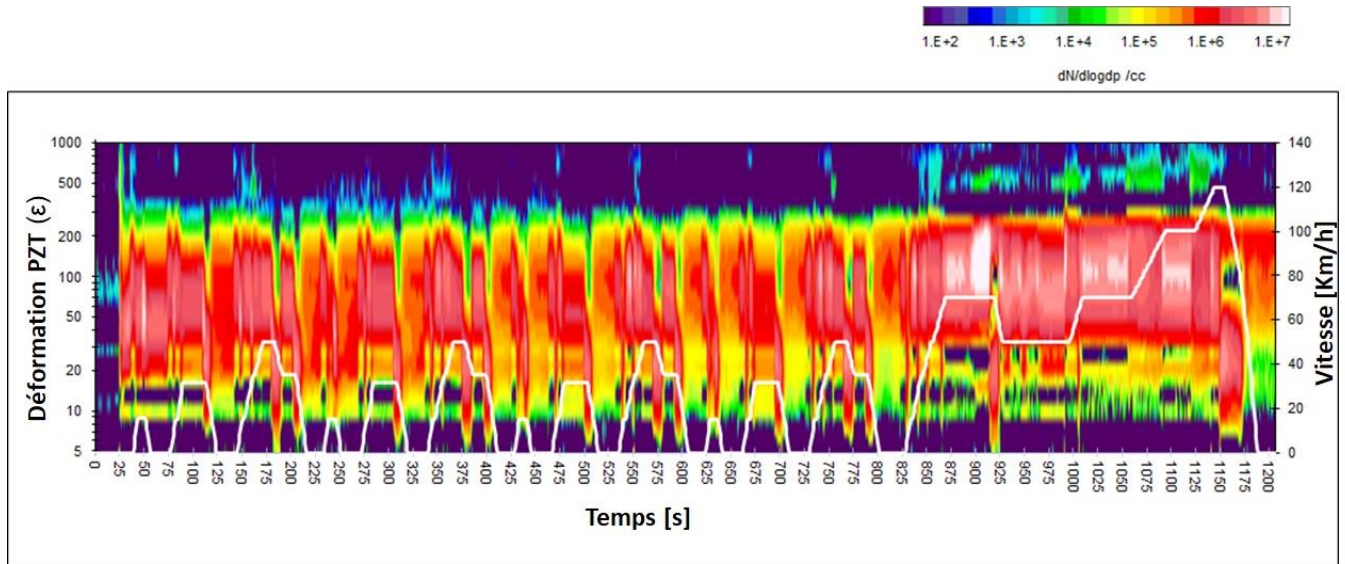


Figure 4.7 Comportement énergétique du récupérateur piézométrique sous vitesse maximale.

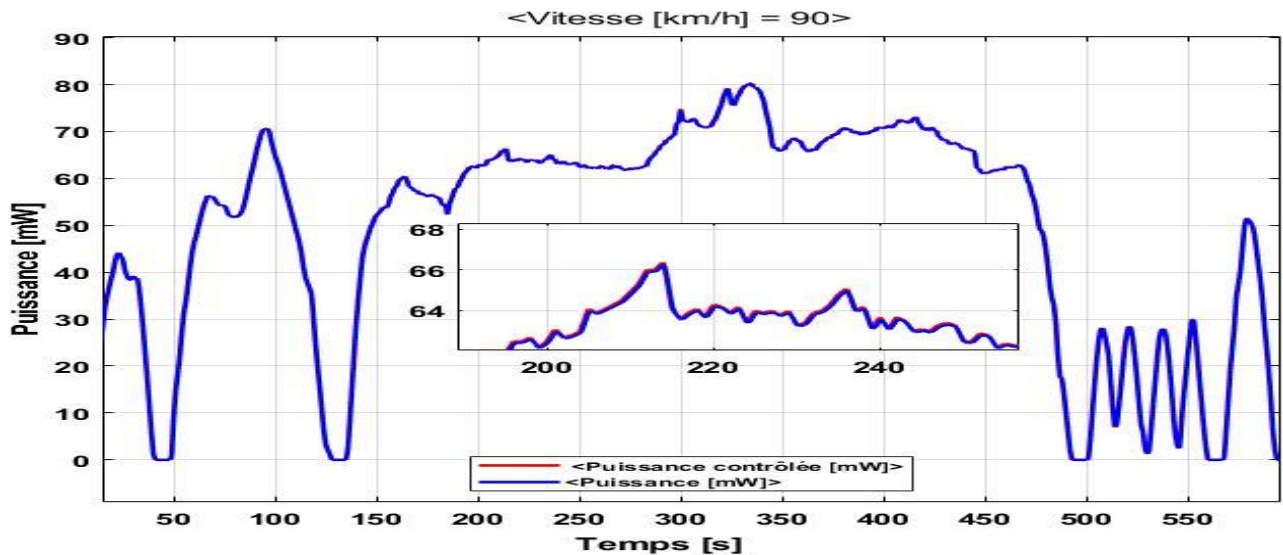


Figure 4.8 La puissance récupérée par un quart du véhicule.

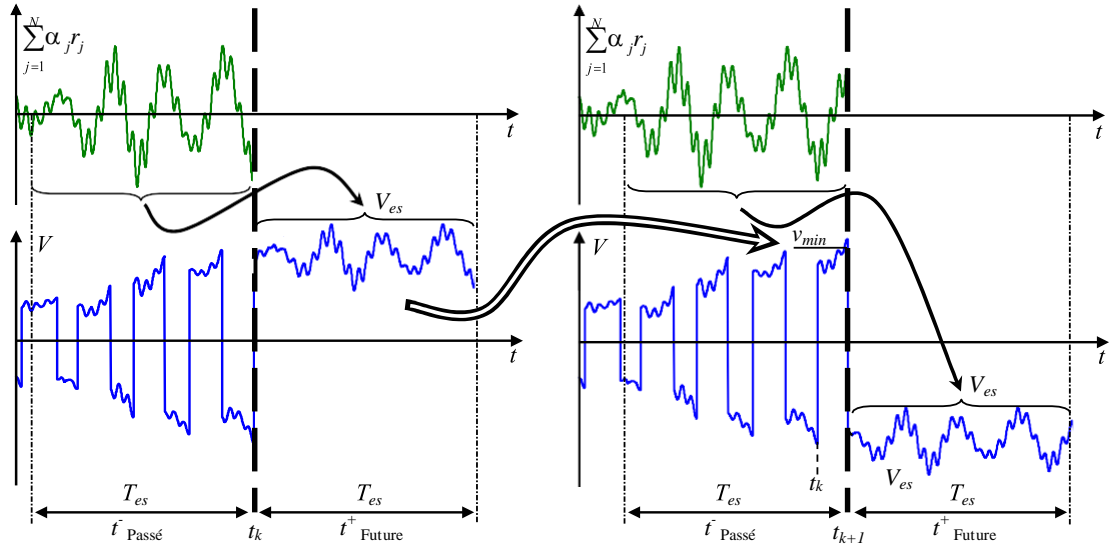


Figure 4.9 La tension à la sortie du récupérateur après un instant de commutation.

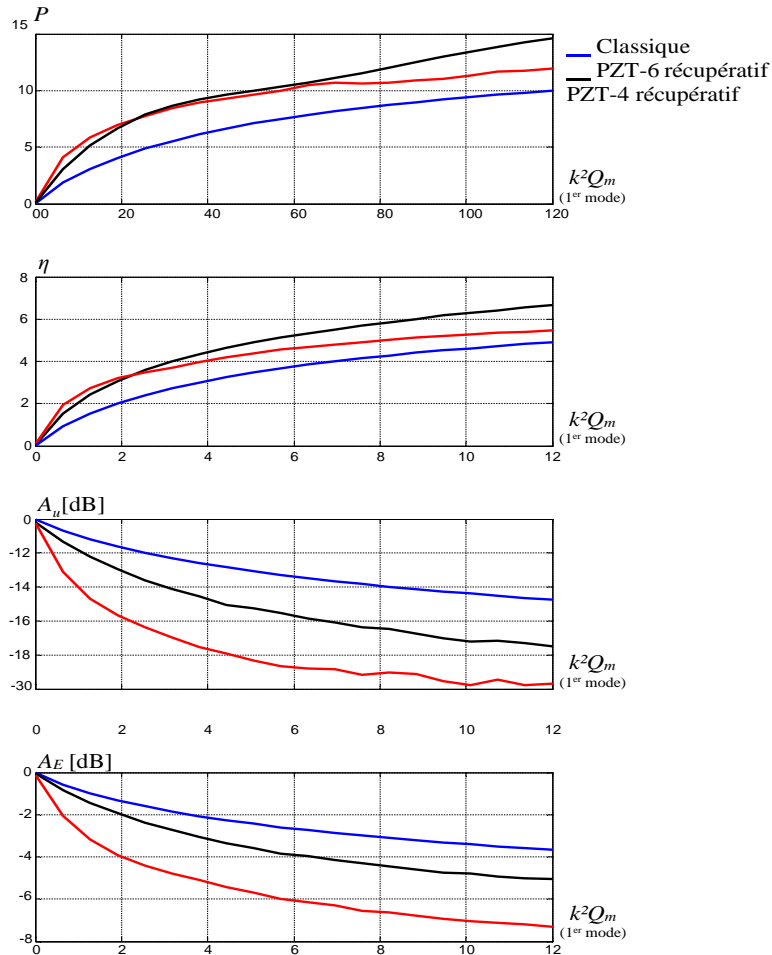


Figure 4.10 Sollicitation par un bruit blanc – LCP : (a) A_u et A_E , (b) Energie transférée normalisée, rapport de l'énergie transférée sur l'énergie fournie et rapport moyen de l'énergie transférée pendant une période de la plus basse fréquence de résonance sur l'énergie mécanique dans la structure

4.6 Conclusion

L'objectif principal de ce chapitre est d'améliorer un système piézoélectrique intégré au siège de la voiture pour quantifier et convertir l'énergie des vibrations mécaniques des équipements complexes et des perturbations de la route. Le système fournit une énergie électrique durable et améliore la magnitude de la tension dans le but d'augmenter les capacités de puissance des substances piézoélectriques. De plus, ce modèle a augmenté la fréquence de résonance de ce piézoélectrique qui affecte le paramètre du circuit électrique pour charger les micro et nanodispositifs du véhicule. En conclusion, les résultats de la simulation confirment que l'utilisation de la moissonneuse piézoélectrique attachée à la suspension du siège assure une excellente production d'énergie électrique pour l'alimentation du dispositif autonome. De plus, la modélisation de ce système par l'outil de modélisation Bond Graph améliore la vue d'ensemble de la dynamique du véhicule. Enfin, à l'aide de résultats numériques, nous avons montré que la récolte de l'énergie vibratoire est bénéfique pour la suspension du siège.

Chapitre 5

CONTROLE DU CHAOS SUIVANT UNE LOI PROBABILISTE APPLIQUE AUX RECUPERATEURS PIEZOELECTRIQUES

5.1 Introduction

Les véhicules routiers subissent des vibrations lorsqu'ils se déplacent, principalement en raison des irrégularités de la surface de la route, des forces motrices déséquilibrées, des forces aérodynamiques, etc. Ces vibrations nuisent au confort de conduite et à la tenue de route des véhicules. Mais le confort de conduite et la tenue de route sont des exigences contradictoires à atteindre simultanément. Récemment, les techniques d'intelligence artificielle sont apparues comme des moyens prometteurs pour résoudre les problèmes du contrôle non linéaire, en particulier, le contrôle basé sur la logique floue qui est capable de gérer les systèmes complexes ou faiblement modélisés, de plus, il présente des performances robustes et une faible dépendance mathématique aux paramètres du système de suspension [100]. La conception du contrôleur en logique floue ne nécessite pas de modèle mathématique exact du système et peut gérer toutes les non- linéarités et les incertitudes.

Dans ce chapitre, nous considérons le cas où de l'énergie est apportée ponctuellement à la structure électromécanique. Ce type de comportement correspond par exemple à une structure excitée par un pulse de force, ou par une sollicitation statique suivie d'un lâcher. La fonction du dispositif de récupération d'énergie est alors de convertir l'énergie présente dans la structure après chaque sollicitation mécanique et de la stocker sur un condensateur. Nous nous intéresserons ainsi à une structure ayant une certaine énergie interne initiale que l'on cherche à transférer en énergie électrostatique sur un condensateur de stockage. Pendant le processus de récupération d'énergie, l'excitation mécanique externe est supposée nulle et la structure est supposée vibrer en régime pseudo périodique autour d'une de ses fréquences de résonance. Nous considérons que le modèle à constantes localisées est suffisant pour décrire le comportement de la structure électromécanique. Ceci sous-entend que le mouvement engendré par la sollicitation mécanique est pseudo sinusoïdale et donc que la réponse de la structure électromécanique peut être assimilée à celle d'un second ordre.

5.2 Conception de la logique floue

La logique floue est rapidement devenue l'une des technologies actuelles les plus performantes pour le développement de systèmes de contrôle sophistiqués. La raison en est très simple. La logique floue répond parfaitement à ces applications car elle ressemble à la prise de décision humaine avec une capacité à générer des solutions précises à partir d'informations certaines ou approximatives.

5.2.1 Développement d'un contrôle efficace basé sur la logique floue intelligent

La fonction principale du système de suspension du véhicule est de minimiser l'accélération verticale transmise au passager qui assure directement le confort de la route. Le processus de récupération d'énergie est terminé lorsque la tension V_C n'augmente plus, c'est-à-dire quand la valeur absolue de V devient toujours inférieure à V_C .

L'amortissement actif comble une lacune importante dans les méthodes de conception d'ingénierie laissées vacantes par des approches purement mathématiques (par exemple, la conception de commandes linéaires) et des approches purement logiques (par exemple, des systèmes experts) dans la conception de systèmes. Alors que d'autres approches nécessitent des équations précises pour modéliser les comportements du monde réel, la conception floue peut s'adapter aux ambiguïtés du langage et de la logique humains du monde réel.

Notre objectif est de contrôler la force (αV) générée sur la structure mécanique par l'élément piézoélectrique afin d'amortir le système ou de le positionner précisément. Des lois de contrôle permettent, à partir d'informations mesurées, d'établir la tension adéquate à appliquer, en plus, un intérêt particulier est consacré à l'opérateur d'hystérésis qui dépend de la charge électrique q . Cette modélisation mécatronique a servi de base à la réalisation de contrôleurs pour l'asservissement d'actionneurs piézoélectriques. Un contrôle fin des actionneurs piézoélectriques permet alors d'optimiser la gestion de la pulvérisation du gazole et donc d'améliorer la combustion, ce qui conduit à un meilleur rendement du moteur et à un rejet de pollution moindre.

Afin de maîtriser la quantité de carburant injectée, les travaux réalisés ont visé le contrôle de la force générée par un actionneur piézoélectrique. Deux actionneurs sont utilisés : PEA1 qui est l'actionneur à contrôler, et PEA2 qui est utilisé pour simuler une charge mécanique dynamique. Le schéma de principe du contrôleur est représenté sur la figure B-1 (**Annexe B**). La boucle de contre-réaction inclut un modèle de détection qui calcule les grandeurs mécaniques (force, déplacement) en fonction de grandeurs électriques (tension, courant), ce qui permet de ne pas utiliser de capteurs mécaniques, coûteux et encombrants. Enfin, les résultats de simulation sont faits à titre critique et comparatif à l'aide du logiciel 20-Sim.

5.2.2 Théorie de la logique floue

Le principe du contrôle par la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens où les variables traitées ne sont pas des variables logiques mais des variables linguistiques. Dans la théorie des ensembles classiques, il n'y a que deux situations acceptables pour un élément, appartenir ou ne pas appartenir à un ensemble, ceci est traduit par un degré d'appartenance nul ou égal à 1. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini.

Lotfi Zadeh a tenté de sortir de cette logique booléenne en introduisant la notion de l'ensemble flou : permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à un ensemble, c'est-à-dire que le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0,1]. Dans la théorie classique les contours des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous, les contours sont graduels, ou encore flous. En effet, à titre d'exemple si la température d'un liquide est prise comme variable linguistique, et si encore le terme « Chaud » définit l'ensemble de toutes les températures plus élevées que 40°C, dans le cas où la température mesurée est de 39.99°C ne sera pas considérée comme chaud, donc elle n'appartient pas à l'ensemble des températures chaudes [$\mu(39.99) = 0$]. La terminologie, pour cet exemple, est résumée comme suit :

- Variable flou (linguistique) : Température ;
- Valeur d'une variable linguistique : Froid, Tiède, Chaud ;
- Ensembles flous : « Froid », « Tiède », « Chaud » ;
- Univers de discours (Plage des valeurs) : (0, 20, 40, 60,...) ;
- Fonction d'appartenance : $\mu_A(x) = a$ ($0 \leq a \leq 1$), exemple : $\mu_{\text{Tiède}}(25) = 0.25$
- Degré d'appartenance : a.

5.2.3 Raisonnement par la logique floue

En général, la prise de la décision d'un système basé sur la logique floue utilise la connaissance humaine présentée sous forme des règles floues appelées aussi règles d'inférence, liées entre elles par des opérateurs flous : « OU », « ET », « ALORS ». Elles sont exprimées sous la forme suivante [94] et [97] : SI (condition) ALORS (conclusion). Une règle floue est donc une combinaison entre une condition (nommée prédicat ou prémisse) et une conclusion, le prédicat peut prendre plusieurs variables liées entre elles par des opérateurs déjà mentionnés. Il est composé de quatre blocs [178] :

- Une interface de fuzzification à l'entrée ;
- Une base de connaissance ;
- Une logique de prise de décision (ou bloc d'inférence) ;
- Une interface de défuzzification en sortie.

La méthode de défuzzification choisie est souvent liée à la puissance de calcul du système flou [Meu03], parmi lesquelles les types suivants :

- Méthode par valeur maximum.
- Méthode de la moyenne des maximas.
- Méthode du centre de gravité.

5.2.4 La commande directe du récupérateur piézoélectrique par la logique floue

Les performances du système peuvent être améliorées si le vecteur de tension sélectionné dépend de la valeur de l'erreur de la puissance de sortie. Dans ce but, un contrôleur basé sur la logique floue (FLC) est utilisé pour remplacer les contrôleurs conventionnels.

Le nombre de fonction d'appartenance n'est pas précis, son choix dépend de l'application et de la précision désirée, en générale, on utilise trois, cinq ou encore sept pour augmenter la précision, mais, aussi augmenter le temps du calcul [99].

La FLC proposée a trois sorties qui sont les équations d'états de la suspension automobile (S_a , S_b et S_c) et trois entrées qui sont : l'erreur du courant $e_{(C_e)}$, l'erreur de la tension $e_{(\psi)}$ et la puissance.

Des fonctions d'appartenances trapézoïdales sont choisies pour les deux ensembles flous (P et N). Concernant la deuxième entrée du FLC proposé qui est l'erreur de la qualité de l'inversion électrique, elle est fuzzifiée en trois variables linguistiques :

- (a) La variable linguistique N est attribuée à l'erreur négative.
- (b) La variable linguistique P est attribuée à l'erreur positive.
- (c) La variable linguistique Z est attribuée à l'erreur nulle.

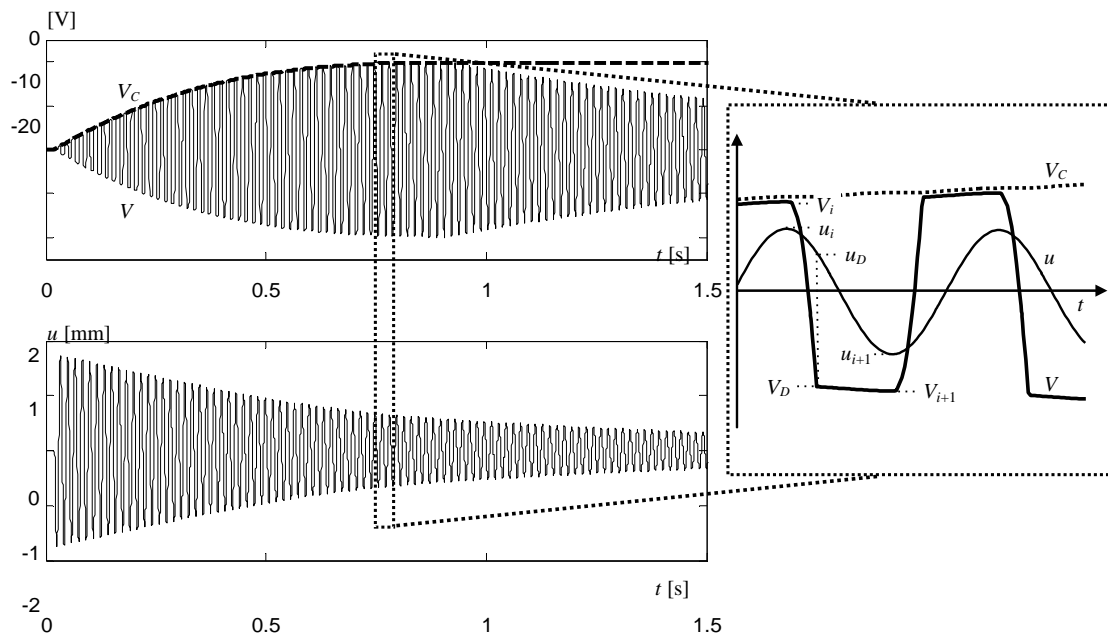


Figure 5.1 Forme d'onde de la tension piézoélectrique V , de la tension V_C sur le condensateur et du déplacement u dans le cas de la technique classique – Simulation par intégration numérique – $C_R=15\mu F$, $E_F=14mJ$

A chaque instant $t > t_0$, l'énergie fournie E_F peut être considérée comme la somme de l'énergie E_R restant dans la structure électromécanique, de l'énergie E_D dissipée sous forme de pertes visqueuses et de l'énergie E_U récupérée sur le condensateur CR .

A chaque période d'échantillonnage T_e , une estimation du courant et de la tension est faite connaissant les courants piézoélectriques mesurés et le vecteur tension imposée. Cette estimation est basée sur la méthode en calcul direct. La puissance est également estimée puis comparée à sa référence, l'erreur est régulée par un contrôleur PI comme montre la figure 5.1. Les principaux résultats de ces trois analyses sont résumés dans le tableau 5-1 et sont en excellent accord. Les modèles (ii) et (iii) sont parfaitement identiques, ainsi les différences entrles résultats sont uniquement dues aux erreurs numériques lors de l'intégration des équations constitutives (Figure 5.2).

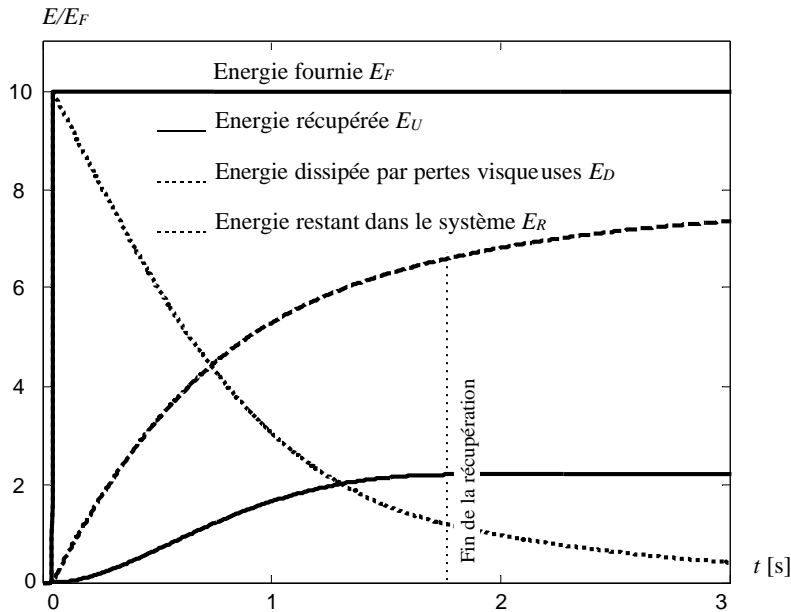


Figure 5.2 Evolution temporelle des énergies normalisées par rapport à l'énergie fournie E_F – Simulation par intégration numérique – $C_R=15\mu F$

Les principaux résultats de ces trois analyses sont résumés dans le tableau 5-9 et sont en excellent accord. Les différences entre les résultats sont uniquement dues aux erreurs numériques lors de l'intégration des équations constitutives.



Figure 5.3 coefficient de couplage en fonction de l'épaisseur des inserts : (a) énergie élastique dans la structure pour trois épaisseurs différentes, (b) évolution typique du coefficient de couplage

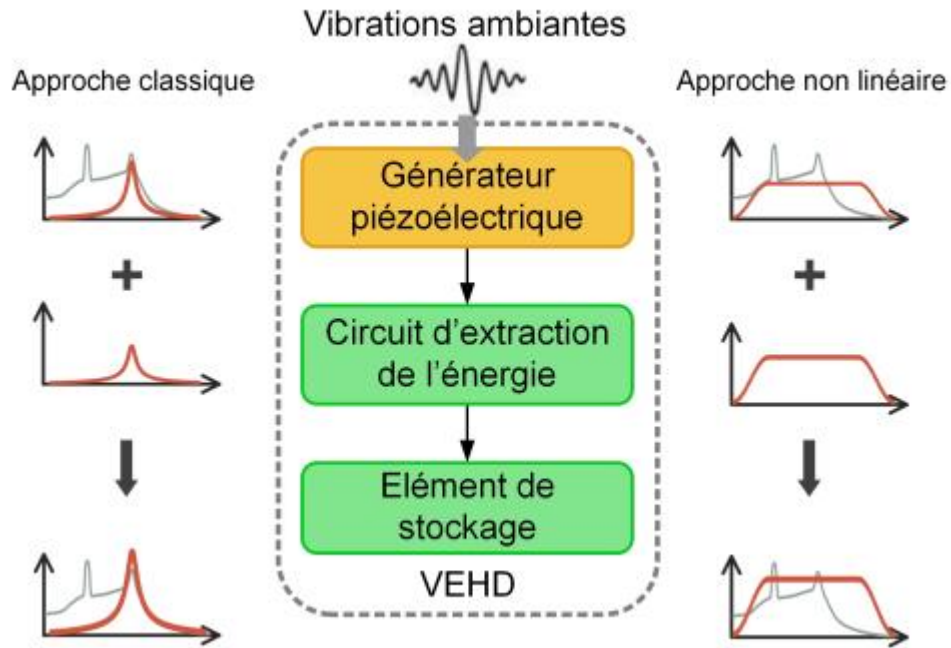


Figure 5 .4 Schéma général de la récupération d'énergie

Tableau 5-1 Principaux résultats pour les trois modes d'analyse

	ANSYS ®	Modèle BG	Modèle BG simplifié
Déplacement max en circuit ouvert (mm)	2.22	2.19	2.27
Déplacement max avec R_a (mm)	0.487	0.597	0.597
Déplacement max (mm)	0.0558	0.0467	0.0457
Amortissement avec R_a (dB)	-12.2 dB	-12.3 dB	-12.6 dB
Amortissement (dB)	-33.3 dB	-33.4 dB	-33.9 dB
Angle de perte en circuit ouvert	0.61 %	0.64 %	0.65 %
Angle de perte avec R_a	4.10 %	4.10 %	4.11 %
Angle de perte	26.4 %	26.9 %	26.7 %

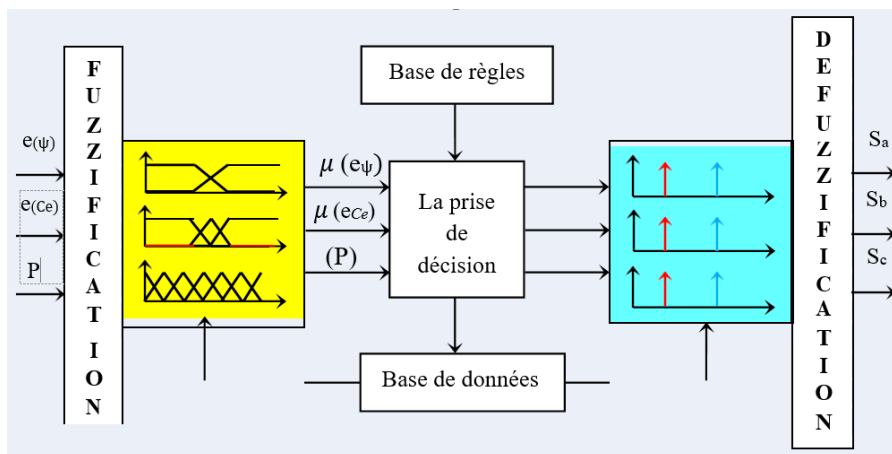


Figure 5 .5 Architecture du contrôle neurone flou

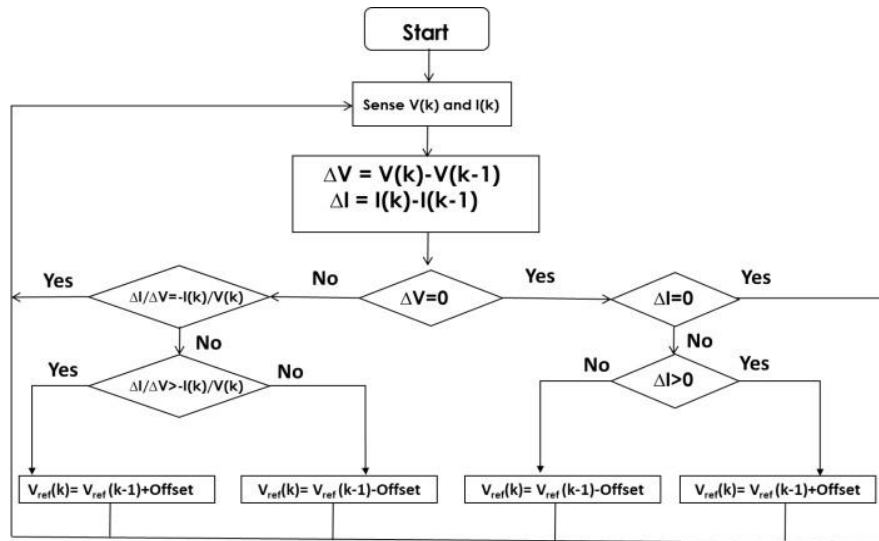


Figure 5.6 Architecture de l’algorithme génétique proposé du chaos

L’objectif principal est de définir l’existence du chaos dans la dynamique du système de récolte d’énergie proposé. La gestion de l’énergie récoltée dépend également des différents types de niveaux de stockage et des classes de moissonneurs.

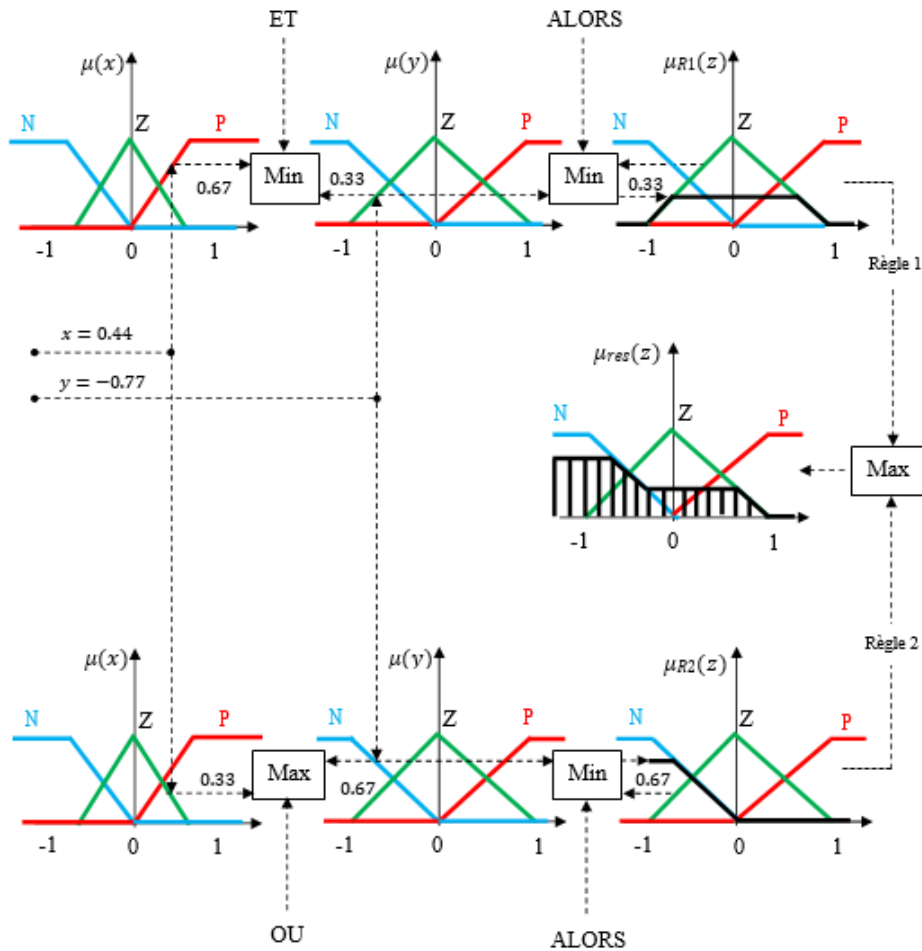


Figure 5.7 Architecture du ANN pour le système véhiculaire.

Tout d'abord, l'exposant de Lyapunov a été calculé [113], pour la restauration de l'intervalle de phase afin de visualiser l'évolution de l'état de phase de ce cadre au cours du temps comme le montre la figure 5.7. La deuxième étape a consisté à faciliter l'analyse du modèle en utilisant le bond graph inverse (BGI) [132]. La qualité de la dynamique de la moissonneuse doit être rapide avec un nombre arbitraire de poutres piézoélectriques [103]. La structure de la modélisation proposée avec la transduction de la moissonneuse piézoélectrique (PHT) [104] est montrée dans l'équation 5.5.

5.2.5 Formulation du problème

Les règles de contrôle permettent de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou, elles doivent être exprimées en fonction des variables d'entrée et de sortie. Ces techniques étant relativement nouvelles dans la communauté piézoélectrique [135], il est important de bien préciser les termes employés et de développer suffisamment les méthodes utilisées [136]. Nous commençons par définir et expliquer la terminologie utilisée en logique floue, la théorie des ensembles flous et ainsi que le mode de raisonnement propre aux variables floues [137]. Nous développons une méthode de synthèse d'un régulateur flou et abordons les étapes nécessaires à la réalisation de l'inférence floue [138].

Les méthodes et propriétés de l'apprentissage des réseaux de neurones sont également abordées. Enfin, une méthode d'optimisation par algorithme génétique est présentée. Les notions, directement inspirées de la théorie de l'évolution, qui interviennent dans ces algorithmes sont explicitées. Dans cette section, l'accent est mis aussi bien sur la conception des contrôleurs que sur leur utilisation.

Par la suite, la commande vectorielle ainsi que les modèles utilisés pour la simulation et pour le contrôle du système sont présentées.

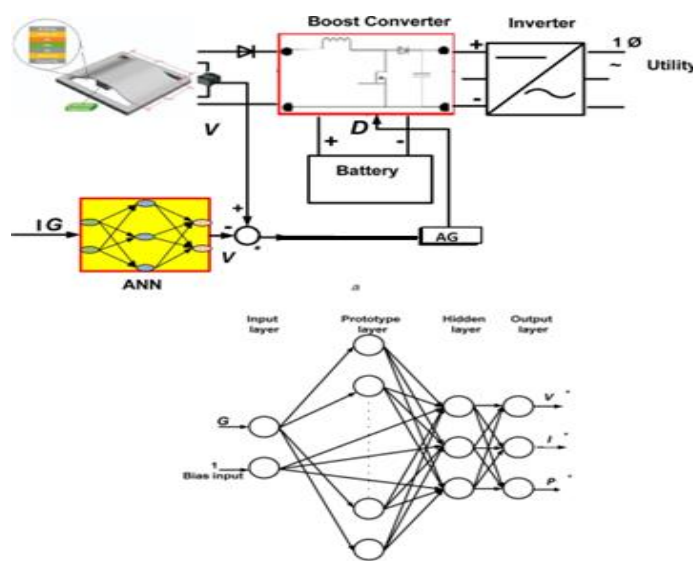


Figure 5.8 Architecture de l'algorithme proposé pour le système chaotique

Ceci afin de se familiariser avec une manière de raisonner différente par rapport à l'approche à laquelle on est habitué dans la résolution de certains problèmes. Les systèmes non linéaires ont une richesse intrinsèque et le chaos est une des réponses possibles de ces systèmes. Ce type de comportement a plusieurs caractéristiques typiques qui incluent la dépendance sensible des conditions initiales et l'existence d'un nombre infini d'orbites périodiques instables (UPO). Le contrôle du chaos exploite la richesse inhérente au comportement chaotique et peut être compris comme l'utilisation de petites perturbations pour la stabilisation d'un UPO. Les UPO faisant partie de la dynamique du système, la stabilisation de ces orbites est associée à une faible consommation d'énergie. Cette idée peut être utilisée pour conférer de la flexibilité au système et aussi pour obtenir des systèmes avec une réaction rapide à un stimulus spécifique.

5.3 Identification des paramètres du récupérateur piézoélectrique

L'objectif principal est de définir l'existence du chaos dans la dynamique du système de récolte d'énergie proposé. La gestion de l'énergie récoltée dépend également des différents types de niveaux de stockage et des classes de moissonneurs. Les règles de contrôle permettent de déterminer la décision ou l'action à la sortie du contrôleur flou, elles doivent être exprimées en fonction des variables d'entrée et de sortie la communauté piézoélectrique [135], il est important de bien préciser les termes employés et de développer suffisamment les méthodes utilisées [136].

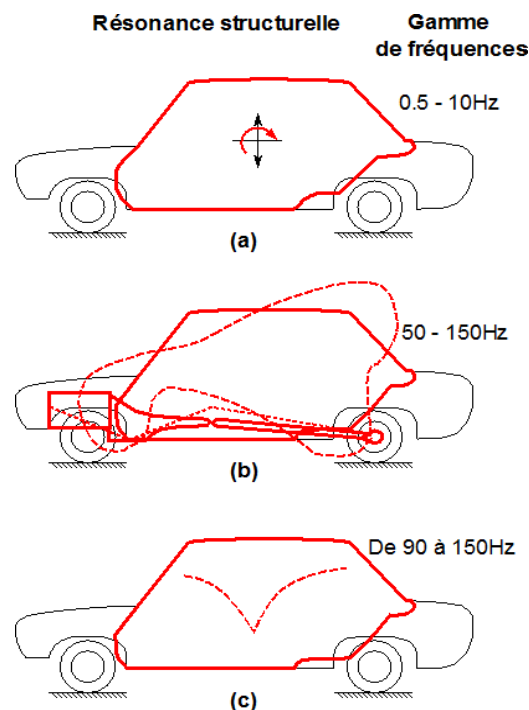


Figure 5.9 Fréquences de résonances présentes dans un véhicule en mouvement [106] : (a) modes de corps rigide dans les suspensions et les roues, (b) modes de structures du châssis et des éléments de carrosserie, et (c) résonance acoustique du compartiment passager

Nous commençons par définir et expliquer la terminologie utilisée en logique floue, la théorie des ensembles flous et ainsi que le mode de raisonnement propre aux variables floues [137]. Par définition, les modes de corps rigide correspondent aux modes des masses indéformables entrant en résonance sur différentes fixations élastiques. À titre d'exemple, on peut citer les modes de moteur, les modes de rebond de la roue ou de battement, les modes de train avant et arrière, les modes du pare-chocs ou des parois de l'habitacle. On parle généralement d'approche à paramètres localisés quand on considère que les grandeurs physiques et le comportement d'un système sont homogènes au sein d'un domaine délimité pour des frontières virtuelles. Cela se traduit en mécanique par une représentation de type systèmes masse-ressort à un ou plusieurs degrés de liberté en fonction du nombre de masses choisies. Nous développons une méthode de synthèse d'un régulateur flou et abordons les étapes nécessaires à la réalisation de l'inférence floue [138]. Tout d'abord, l'exposant de Lyapunov a été calculé [113], pour la restauration de l'intervalle de phase afin de visualiser l'évolution de l'état de phase de ce cadre au cours du temps comme le montre la figure 5.7. La deuxième étape a consisté à faciliter l'analyse du modèle en utilisant le bond graph inverse (BGI) [132]. La qualité de la dynamique de la moissonneuse doit être rapide avec un nombre arbitraire de poutres piézoélectriques [103]. La structure de la modélisation proposée avec la transduction de la moissonneuse piézoélectrique (PHT) [104] est montrée dans l'équation 5.5. Nous mettons en œuvre les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres du récupérateur piézoélectrique. Les paramètres nécessaires à la simulation du fonctionnement du système se divisent en paramètre électrique et mécanique.

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \sum_{i=0}^m \frac{|y_i - y_i|}{m} \\ p = \sqrt{\sum_{i=0}^m \left(\frac{|y_i - y_i|}{m} \right)^2} \\ V_E = \sqrt{\sum_{i=0}^m \left(\frac{|y_i - y_i| - IMRE}{m} \right)^2} \\ I_C = \frac{COV(y, y)}{\sqrt{D_y * D_y}} \\ P_E = \frac{1}{m} * \sum_{i=0}^m \frac{|y_i - y_i|}{|y_i|} * 100 \end{array} \right. \quad (5.1)$$

Nous montrons plus loin que les paramètres électriques requis sont (R_s , τ_s , τ_r et δ). Généralement, le système d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultante « $\mu_{res}(V)$ » pour la variable de sortie, il s'agit d'une information floue que les actionneurs ne peuvent pas exécuter, il convient de la transformer en une grandeur de commande numérique : c'est le but de l'étape de défuzzification. Dans ce travail, la méthode par valeur maximum est utilisée comme critère pour la défuzzification, la valeur de sortie est choisie comme l'abscisse de la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence floue [88].

5.3.1 Flux de données principal de l'algorithme génétique

Par conséquent, la population GA est décrite par la matrice L dans (6), où chaque faisceau piézoélectrique est un vecteur avec U inconnues qui sont modifiées aléatoirement par les opérateurs GA connus pour la vitesse et la charge [34]. Fondamentalement, l'opérateur de mutation est une fonction aléatoire uniforme qui choisit au hasard n'importe quel élément (poutre) du système. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. La puissance de la récolte utilise deux points d'arrêt pour générer une nouvelle consommation de véhicule, comme le montre la figure 5.10. Dans cette figure, la quantité de puissance Pz est formée par la première série de faisceaux Px, la deuxième série de faisceaux Py et la troisième série de faisceaux Px faisceaux. Par conséquent, en suivant la figure 5.11, la métaheuristique GA dans "Algorithme génétique (I)" génère toutes les inconnues de la matrice de population P par une fonction uniforme aléatoire. D'autre part, dans « Algorithme génétique (II) » et « Algorithme génétique (III) », la population initiale est remplie par les meilleures solutions candidates des exécutions GA précédentes, visant à converger avec le plus petit nombre d'itérations. Afin d'illustrer cette procédure et de la valider, l'équation dynamique du système peut être exprimée par les équations suivantes :

$$I_Z a_{us}'' = F_V + V * F_V + V * F_{SprtY} + w * F_{SprtX} + C_{ty} (-Z_1' + V * \varphi_1' - V * Z_{nfst}') + C_{ty} (-Z_1' - w * \varphi_1' - w * Z_{nfst}') \quad (5.2)$$

$$M_{Body} Z_{us}'' = -F_V + F_{SprtY} + F_{SprtX} + C_{ty} (-Z_1' + V * \varphi_1' - V * Z_{nfst}') + C_{ty} (-Z_1' - w * \varphi_1' - w * Z_{nfst}') \quad (5.3)$$

$$M_{ns} Z_{nsY}'' = F_{SprtY} + C_{Vy} (-Z_1' + V * \varphi_1' * Z_{nsY}') + K_{Vy} (Z_{CY} - Z_{nsY}) \quad (5.4)$$

$$M_{ns} Z_{nsX}'' = F_{SprtX} + C_{Vx} (-Z_1' + V * \varphi_1' * Z_{nsX}') + K_{Vx} (Z_{CX} - Z_{nsX}) \quad (5.5)$$

$$F_{CX} = K_{Vx} (Z_{CX} * x - Z_{nsX} * y) \quad (5.6)$$

$$F_{CY} = K_{Vy} (Z_{CY} * x - Z_{nsY} * y) \quad (5.7)$$

Où K_0 est la raideur équivalente du système en court-circuit ($K_0 = K_{S0} + K_p$), M_{Body} est la masse de la voiture (suspendue et non suspendue), K_{vy} est la rigidité de la suspension, K_{tx} , est la rigidité de la suspension des pneus, C_{wX} est le coefficient d'amortissement des ressorts et C_{vy} est le coefficient d'amortissement des pneus. Soit $P = [M, nG_{sj}, Q_{sj}, E_{cj} o, \{Vi(.)\}]$ représente la quantité de puissance électrique, où $M = \{1, 2\}$ est le signal d'entrée de l'ensemble d'analyse fonctionnelle. Nous supposons que la stratégie de récolte d'énergie est E_{sj} , Q_{sj} , G_{cj} et PZT_j sont des ensembles compacts et convexes avec des contraintes maximales et minimales données par l'analyse fonctionnelle. Ainsi, pour chaque ISP_j que nous considérons comme la modélisation de la stratégie respective dans les intervalles de solutions fermés. Afin de maximiser leur production d'énergie, chaque poutre piézoélectrique ISP_j produit une quantité de puissance e_{sj} , QoS q_{sj} , à moindre coût g_{cj} . Formellement, le problème de l'hystérésis piézoélectrique peut être exprimé comme suit : $H = [M, nK_{sj}, Q_{sj}, D_{cj} o, \{Vi(.)\}]$.

$$\dot{x}(t) = Q(x, t) + B(t) \quad (5.8)$$

$$B(t) = K((1 - R)S_\tau - x) \quad (5.9)$$

$$S_\tau = \sum_{i=1}^m R_i^{m-i} - x \quad (5.10)$$

Sa modélisation est décrite dans la section suivante. L'objectif principal de l'optimisation est de maximiser l'interconnexion des moissonneuses-batteuses piézoélectrique entre deux suspensions de dimensions (largeur et hauteur) et de propriétés électriques différentes. La première condition considère la puissance de sortie avec un fort contraste d'indice de déformation entre le noyau et le substrat. L'entrée de tension analogique est limitée de 0 à 3 V, la valeur numérique du CAN peut être calculée par l'équation suivante, où ADCLO est la valeur de référence de masse pour le CAN. La méthode proposée, comme déjà mentionné, a été motivée par des optimisations échouées précédentes avec GA considérant que chaque élément de récolteur contient de nombreux termes harmoniques sous les limitations de calcul, comme décrit dans la section d'introduction. Ainsi, compte tenu de l'optimisation du niveau multi-symétrique (MSL) présentée ici, chaque exécution GA a été effectuée par 100 générations pour itérer le long de leurs 150 moissonneuses piézoélectriques, correspondant au hasard à une recombinaison de 90%. Le taux de mutation similaire avec une génération de nombres de fonctions aléatoires uniformes en un seul point, qui est également appliqué pour générer la valeur du gène dans l'intervalle [0,1]. Ce nombre limité de générations pour chaque exécution. Une poutre en vibration équipée de patches piézoélectriques peut être modélisée autour d'une fréquence de résonance par un modèle mécanique simple du type de celui représenté sur la figure 2.9. Nous avons montré que ce modèle était suffisant pour prendre en compte les effets non linéaires dus au traitement particulier de la tension avec la technique SSDI.

Les paramètres de ce modèle peuvent être calculés à partir de la géométrie et des propriétés physiques des matériaux utilisés. En simplifiant ce modèle, nous avons montré que l'amortissement à la résonance due à la technique SSDI est uniquement fonction du couplage électromécanique k de la structure, du facteur de qualité mécanique Q_m et de la qualité de l'inversion électrique γ . Lorsque le système électromécanique est déjà existant, il est possible d'obtenir les paramètres du modèle simplifié par identification, à partir de quelques mesures expérimentales simples.

5.4 Régulation par réseaux des neurones : neuro-flou

5.4.1 Plus grand exposant de Lyapunoy

Pouvoir récupérer et contrôler le flux de puissance maximal du matériau piézoélectrique est un défi requis en raison des applications en nanotechnologie [128]. Ce travail propose un nouveau générateur de faible puissance à haut rendement basé sur le chaos vrai nombre aléatoire alimenté à l'aide de la récupération d'énergie piézoélectrique [142]. Pour améliorer la robustesse et les performances de la puissance de sortie récupérée et prévue d'un récolteur piézoélectrique, une analyse théorique basée sur le contrôle dynamique du chaos (CDC) est adoptée pour remplacer les comparateurs traditionnels de récolteuse et d'hystérésis piézoélectrique [143]. Par conséquent, un schéma de contrôle du comportement chaotique utilisant une moissonneuse régénérative pour un véhicule électrique (EV) étendu moderne est proposé [144]. Simultanément, le modèle de récupération d'énergie et la fonction de contrôle du chaos sont conçus à l'aide d'un algorithme génétique (GA) [145] pour la première fois afin d'étendre l'endurance de la batterie. D'autre part, le comportement chaotique de l'abatteuse a été contrôlé et un maximum de 350,43 mW de puissance récoltable sur une charge optimale de 90 kg au niveau de la route C (18 Hz) à une vitesse du véhicule de 80 km/h a été produit [112].

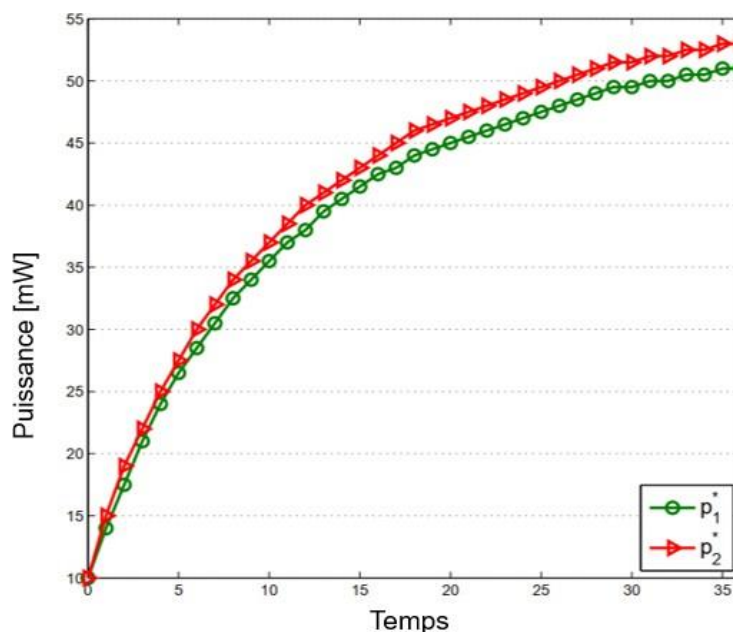


Figure 5.10 Puissance de sortie contrôlée par une structure FLC

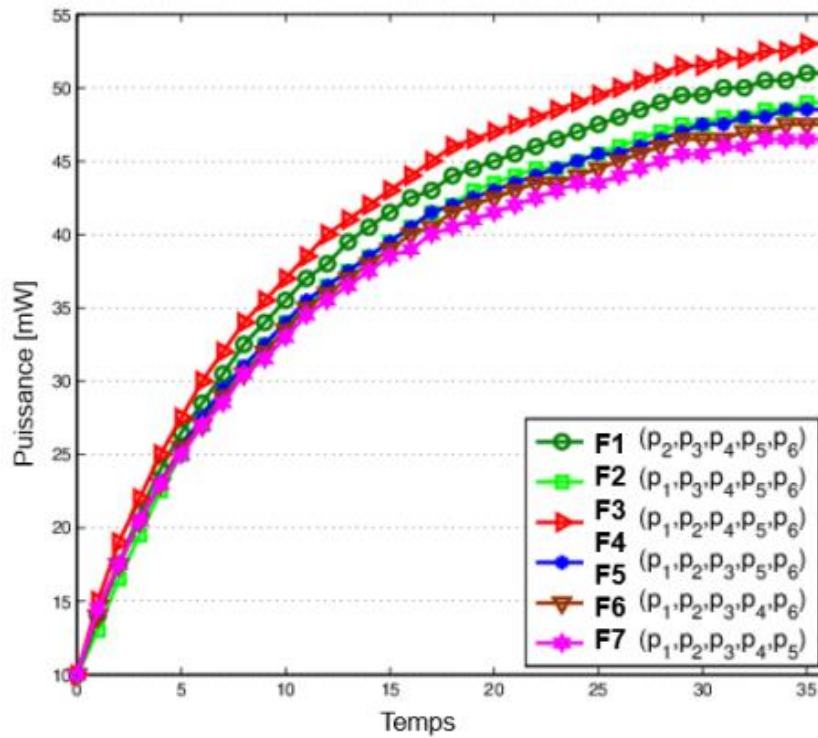


Figure 5.11 Puissance de sortie contrôlée par une structure ANN à trois couches typiques

Enfin, des simulations numériques et des mesures théoriques sous l'excitation de la rugosité de la route indiquent que la puissance récoltée est significativement augmentée lorsque la moissonneuse subit un mouvement chaotique. Une productivité plus élevée jusqu'à 64,98 % au maximum et 54,24 % en moyenne a été atteinte dans la simulation. La stabilité du système est la preuve que l'approche proposée est bénéfique et prometteuse pour contrôler et générer de l'énergie utilisée pour la mise en œuvre d'énergie propre dans les véhicules électriques à longue portée. Afin de distinguer les caractéristiques de la FLC et de mettre en évidence les améliorations apportées par une modélisation BG, plusieurs simulations sont faites sur le récupérateur piézoélectrique commandé par la DTC floue avec une boucle externe de puissance contrôlée par un régulateur dynamique.

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & \dots & \dots & L_{1n} \\ & \dots & & \\ & & \dots & \\ L_{n1} & \dots & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad 0 \leq L_{ij} \leq 3, \sum_{j=1, i=n}^{j=n, i=1} L_{ij} = P_{elePZT} \quad (5.11)$$

5.4.2 Détection du chaos

L'énergie récoltée à partir de l'environnement vibratoire de la route entre deux systèmes de moissonneuses sur suspension. Afin de quantifier la présence de chaos dans le comportement dynamique du moissonneur piézoélectrique, il est calculé comme suit :

$$\lim_{z \rightarrow z_0} \log \frac{I(\alpha_0 - z)}{|z - z_0|} \quad (5.12)$$

Soit l'exposant de Lyapunov local de ce système dynamique comme $Z : z \rightarrow z_0$ par rapport à la direction d'excitation limite. Soit E_{pc} l'énergie produite pour le système moissonneur au moyen des exposants de Lyapunov qui est une approche populaire dans les domaines du chaos [140] prenant en compte la sensibilité à la condition initiale. Le circuit de récolte d'énergie peut être idéalisé par une résistance variable $R(t)$ qui absorbe l'énergie électrique. L'exposant de Lyapunov quantifie la divergence des trajectoires par rapport aux points qui ont été initialement calculés, montrant la dégradation de la prédictibilité au cours du temps [134]. Ce nombre limité de générations pour chaque exécution de l'algorithme génétique développé (GA I, GA II et GA III) a été considéré pour effectuer les simulations dans une machine d'exécution virtuelle. En outre, un modèle de réseau hiérarchique est considéré avec les forces d'entrée F_{input} et F_{pzt} ou l'équation de Lagrange p qui est utilisée pour dériver les équations du mouvement du système :

$$m_d(Z''_{nsX}) - K_s(Z_b - Z_s) - C_s(-Z'_s + Z'_b) = F_f + F_r \quad (5.13)$$

Où F_f et F_r désignent les forces de contact pneu-route dans les directions indiquées sur la figure 5.8. La correction du comportement dynamique précis du véhicule simulé dépend des caractéristiques réelles des pneus et représente la force électrique dans l'équation (5.5) [86]. Le couplage entre les systèmes électrique et mécanique est effectué par un facteur non linéaire [16], généré par le solénoïde d'énergie cinétique du système comme écrit ci-dessous :

$$E_m = \frac{m}{2} [r(w't)^2 + r^2(w' - \alpha')^2] + \frac{J_f}{2} (w' - \alpha')^2 + \frac{J_r}{2} (\alpha' \xi) \quad (5.14)$$

Où m est la masse du système, J_f et J_r sont les moments d'inertie de la position initiale du piézoélectrique avant la première excitation.

L'énergie potentielle est :

$$E_p = \frac{\overline{K_d Q}}{2} * \zeta \quad (5.15)$$

Où kaQ est la rigidité pour la masse-ressort-amortisseur équivalente du moissonneur piézoélectrique. Lorsqu'une paire de forces parallèles de magnitude égale ($mg \ll F$) est appliquée aux deux bornes piézoélectriques dans des directions opposées comme présenté dans l'équation 5.6. Par conséquent, les forces de contact pneu-route sont présentées comme suit :

$$F_f = D * \sin\{C_f \tan^{-1}(B_f(1 - E_f)\alpha_f + E_f \tan^{-1}(B_f\alpha_f))\} \quad (5.16)$$

$$F_r = D * \sin\{C_r \tan^{-1}(B_r(1 - E_r)\alpha_r + E_r \tan^{-1}(B_r\alpha_r))\} \quad (5.17)$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur à 3, on obtient :

$$F_f \approx D^* \left\{ Y_f - \frac{1}{6} Y_f^3 \right\} \quad (5.18)$$

$$F_r \approx D^* \left\{ Y_r - \frac{1}{6} Y_r^3 \right\} \quad (5.19)$$

Finalement,

$$\begin{aligned} Y_f &= C_f \left[B_f \alpha_f - E_f \frac{(B_f \alpha_f)^3}{3} + \frac{1}{3} (B_f \alpha_f - E_f \frac{(B_f \alpha_f)^3}{3})^3 \right] \\ &\approx C_f \left[B_f \alpha_f - E_f \frac{(B_f \alpha_f)^3}{3} + \frac{(B_f \alpha_f)^3}{9} \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} Y_r &= C_r \left[B_r \alpha_r - E_r \frac{(B_r \alpha_r)^3}{3} + \frac{1}{3} (B_r \alpha_r - E_r \frac{(B_r \alpha_r)^3}{3})^3 \right] \\ &\approx C_r \left[B_r \alpha_r - E_r \frac{(B_r \alpha_r)^3}{3} + \frac{(B_r \alpha_r)^3}{9} \right] \end{aligned} \quad (5.21)$$

D'autre part l'équation décrivant la dynamique du circuit électrique est donnée par :

$$L(x)Q'' + RQ' + \frac{Q}{C(x)} = V \quad (5.22)$$

Où Q_0 est le courant électrique dans le circuit, V est la source de tension, R est la résistance électrique, $L(x)$ est l'inductance et $C(x)$ est la capacité. En conséquence, la plupart des chercheurs ont développé de nombreuses caractéristiques des transducteurs piézoélectriques afin d'améliorer leurs performances [140]. Le comportement dynamique chaotique du système piézoélectrique de récupération d'énergie par vibration (VEH) avec des propriétés physiques d'ordre fractionnaire sous des excitations périodiques désordonnées aléatoires est étudié [141]. En utilisant l'outil aléatoire de Melnikov, une base de carré moyen est employée pour modéliser les conditions nécessaires pour le mouvement chaotique de cette série de temps stochastique [127].

Le système peut être écrite comme :

$$Z'' + \frac{d}{m} * Z' + \frac{K_1}{m} * Z * (Z^2 + 1) = \frac{A_1 \mu_0 N^3 (Q')^2}{2m(l-x)^2} + \frac{Q^2}{(2m\epsilon_0 A_C)} \quad (5.23)$$

$$F_f \approx (K_1 \alpha_f + K_2 \alpha_f^3) \quad (5.24)$$

$$F_r \approx (K_3 \alpha_r + K_4 \alpha_r^3) \quad (5.25)$$

Avec,

$$K_1 = D_f E_f C_f * \frac{B_f^3}{3} + D_f C_f * \frac{B_f^2}{3} + D_f * \frac{(C_f B_f)^3}{6}$$

$$K_2 = D_f E_f C_f$$

$$K_3 = D_r E_r C_r * \frac{B_r^3}{3} + D_r C_r * \frac{B_r^2}{3} + D_r * \frac{(C_r B_r)^3}{6}$$

$$K_4 = D_r E_r C_r$$

L'exposant de Lyapunov global de Z est défini comme la limite à ∞ :

$$\lim_{\delta T \rightarrow \alpha_0} \left\{ \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow z_0} \log \frac{I(\alpha_0 - z)}{|z - z_0|} \right\} \quad (5.26)$$

Par la suite on obtient,

$$e^{\lambda t} \approx \frac{I(\alpha_0 - z)}{|z - z_0|} \quad (5.27)$$

Nous supposons que les vecteurs E_{prd} et E_d sont fixés à certains points prédéterminés E_1, E_2 , et que le profil de la route est chaotique (classe de route générée aléatoirement). L'énergie produite E_{prd} est donnée par :

$$E_{prd} \approx \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \frac{x - \mu}{\sigma}}{\xi(E_1, E_2)} = -2\alpha_1^2 \quad (5.28)$$

Cela signifie que l'utilité de E_{prd} est concave. Par la suite, nous montrerons qu'aux stratégies d'extraction des vibrations qui maximisent l'amplitude de la tension (V^*) si la condition d'optimalité : $\delta \Pi(p, E) / \delta p^2 = 0$ est vérifiée. Dans ce cas d'étude λ est positif, alors une méthode de divergence exponentielle des trajectoires environnantes et le chaos qui en résulte sera observé. Il existe plusieurs approches pour évaluer l'exposant de Lyapunov maximal sur la base de l'observation des données de séries temporelles. En outre, le prédicteur d'énergie utilisé pour prouver que le point V^* est un point interne de l'intervalle $[V_{1min}, V_{max}]$ et joue un rôle important, où V_{1min} est la tension minimale du capteur piézoélectrique, et V_{max} est l'amplitude maximale de la tension. Nous notons que, V_{1min} , est une fonction des E_1 et E_2 fixés par le système PH, E_1, E_2 , cette condition nous permettra d'éliminer explicitement les stratégies qui entraîneront des profits négatifs pour la production d'énergie, ainsi, utilisant la formule de puissance nous déduisons que : $V_{imin} = \gamma_i(\lambda E_{1i} + \mu E_{2i})$.

L'énergie électrique E_{prd} transférée à la résistance, dissipée par effet Joule, correspond à la totalité de l'énergie convertie de la source d'excitation et se calcule en intégrant le carré de la tension de la résistance V_{imoy} divisé par R_{piezo} . Pour maximiser cette énergie récoltée, la résistance a été fixée pour correspondre à l'impédance interne de l'élément piézoélectrique $R_{\text{piezo}} = w \cdot C_{\text{piezo}}$. De plus, ce dispositif de captage étant de petite taille, la méthode adéquate est l'algorithme de Rosenstein. Dans le domaine des systèmes de mesure dynamiques, il est essentiel de comprendre la dynamique interne de base d'un système non linéaire avant d'observer la réponse du système (dans le cadre de travaux numériques ou expérimentaux). Pour comprendre la dynamique interne d'un système, il faut disposer d'une série chronologique uniforme d'un ou de plusieurs paramètres sur plusieurs décennies successives. Ce domaine de l'analyse des séries temporelles non linéaires a fait des tentatives significatives pour fournir des moyens d'identifier les séries temporelles complexes. En outre, pour différencier la dynamique déterministe chaotique de petites dimensions et le mouvement stochastique des systèmes dynamiques. Afin de diagnostiquer les systèmes dynamiques, les outils de l'exposant de Lyapunov sont utilisés pour estimer le comportement dynamique, bien qu'ils nécessitent de grandes quantités de données. Cependant, les auteurs de [146] ont proposé un test beaucoup plus simple pour la présence de chaos déterministe [138].

Pour maximiser son profit, E_{prd} dans différents niveaux de route, selon les conditions initiales du système :

$$P_1 = \frac{r_1 + \alpha_1^2 P_2}{2\alpha_1} \quad (5.29)$$

Avec,
$$r_1 = D_0^1 + (\beta_1^1 + \alpha_1^1 \gamma^2)(\lambda E_{P_1} + \mu E_{C_1}) - \beta_1^2 (E_{P_2} + \mu E_{C_2})$$

D'autre part, nous considérons que E_{prd} est bornée, cette approche modifie les décisions de sortie en fonction du profil de la route : $\text{IRI} = \Pi(\delta p_i)/(\delta p)$. L'équation dynamique pour les décisions d'entrée d'amplitude de tension s'écrit comme suit :

$$P_2(n+1) = P_2(n) + \theta_2 P_2(n) * \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{\frac{1}{n} \frac{x - \mu}{\sigma}} \quad (5.30)$$

Ce processus renvoie la valeur de l'exposant de Lyapunov pour le stockage des ressources énergétiques en utilisant la composante du vecteur de sortie pour une utilisation future. Les vecteurs des exposants de Lyapunov en pointillés dans la figure 5.12 montrent comment la disponibilité du chaos déterminé mécaniquement dans le cas alternatif.

Soit $Z(n)$ une plage de temps unidimensionnelle qui sera considérée comme une entrée pour tester $Z(i)$ avec $i = 1, 2, \dots, n$ les données $Z(n)$ sont déployées pour faire fonctionner le système bidimensionnel proposé. La moyenne temporelle est un carré médian du mouvement du véhicule et est déterminée par :

$$D_{sp}(n) = \lim_{\delta n \rightarrow e^{\delta}} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ([P(j+n) - P(j)]^2 + [Q(j+n) - Q(j)]^2) \quad (5.31)$$

$n=1,2,3,\dots$ et $N=$ nombre des couches ANN

Le taux de croissance du déplacement est donné par :

$$K_{err} = \lim_{\delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \frac{\log(D_{sp}(n))}{\log(t)} \quad (5.32)$$

On peut prouver, sous les conditions initiales de Laplace, que les limites $D_{sp}(t)$ et K_{err} sont atteintes, et K égal à D_{pzt} signifiant une dynamique régulière, ou une dynamique chaotique pour K égal à $D_{pzt} + D_{susp}$.

La reconstruction de la fonction de demande pour tous les composants du système est prise en considération. Cela permettra de construire l'ensemble de données pour l'entrée de l'algorithme génétique et d'inclure le comportement du système dans le processus de prévision en utilisant la synchronisation du chaos projectif. Le théorème le plus significatif pour la reconstruction de l'espace de phase est appelé la méthode du retard de Taken. La fonction d'énergie électrique E_i du système de récolte dépend également du profil routier p_i et de la masse du véhicule peut fixer par les conducteurs, où p_i est le vecteur de la classe de route CP qui ne contient pas d'accélération p_i de CP_i . En d'autres termes, la demande énergétique dépend de $P = (P_1, P_2)$ et de $C = (C_1, C_2)$. De plus ; D_i est décroissante par rapport à p_i et croissante par rapport à p_j , lorsque $j \sim i$. Alors qu'elle est croissante par rapport à C_i et décroissante par rapport à C_j , lorsque $j = i$. Ensuite, la fonction de demande de consommation électrique CP_i du VE peut être calculé comme suit :

$$E_i(p, c) = e_i + \alpha^i p_i + \beta^i c_i + \sum_{i=1, j=1}^2 (\alpha_i^j p_j + \beta_i^j c_j) \quad (5.33)$$

$$C_{p_{i+1}} = E_{(i+1)}(p, c) * e_i + \alpha^i p_i + \beta^i c_i + \sum_{i=1, j=1}^2 (\alpha_i^j p_j + \beta_i^j c_j) \quad (5.33)$$

Supposons que Z_t est une série temporelle générée par un processus inconnu, avec $t = 1; \dots, N$. Ensuite, le principe de Hamilton a été utilisé pour caractériser l'équation dynamique de la moissonneuse piézoélectrique :

$$K_p = \frac{1}{2} \iint ([\rho_s h_s + (\rho_s h_s + \rho_p h_p) S(x, y)] \frac{\delta w(x, y, t)^2}{\delta t}) dx dy \quad (5.34)$$

Où $\delta w(*)$ est la fonction delta de Dirac. En plus de ce qui précède pour évaluer les performances du patch piézoélectrique. Ce modèle a été conçu pour fournir une meilleure compréhension du comportement sous-jacent en utilisant l'attracteur dynamique. En outre, différents signaux ont été générés à partir de la série initiale Z_t de la structure de base employant le patch piézoélectrique. En outre, $P_{x(i+1)}$ et $P_{y(i+1)}$ sont les coordonnées du coin inférieur gauche de l'unité cellulaire i^{th} , tandis que P_{xj} et P_{yj} sont les coordonnées du coin supérieur droit de l'unité cellulaire j^{th} . Ainsi, l'attracteur du système est reconstruit à partir des séries temporelles observées. Pour cette forme, les vecteurs $(N - m + 1)$ à m -Dimensions, sont Z_t^m $t = 1, \dots, (N - m + 1)$, où m représente une base de données historique des valeurs des composantes consécutives de la série étudiée, déplacées par un délai ou une période de temps fixe τ :

$$x_1^n = (x_t, x_{t+\tau}, x_{t+2\tau}, \dots, x_{t+m*\tau}) \quad (5.35)$$

où x est le point de données reconstruit dans l'espace supérieur $(m-1)$; N et N_0 sont respectivement les nombres de données initiales et de valeurs de données reconstruites. En outre, t et m sont des facteurs spécifiques des séries temporelles de reconstruction, exprimés en fonction du temps de retard et de la dimension intégrée. En général, les points de la série de données temporelles pour une variable donnée du domaine temporel, comprennent généralement un prédicat dynamique du système sous-jacent basé sur le théorème de Taken. Les équations d'état fournissent les valeurs observées comme quantité de puissance optimale P_m . Cette reconstruction de l'espace de phase dans ce travail est une grande opportunité pour améliorer la qualité et l'efficacité du traitement des données des séries chronologiques chaotiques. Les résultats de cette approche ont confirmé l'efficacité du système sous un délai optimal pour la dimension d'encastrement piézoélectrique. Les données de phase, lorsque l'entrée initiale est définie comme x_n , la sortie dans la nouvelle forme de l'espace peut être décrite par la relation entre x_i et $x_{(i+1)}$ comme exprimé dans l'équation 5.35. Dans cette partie, la méthode de rétroaction réciproque est améliorée, basée sur un outil mécatronique simple appelé Bond Graph et plus efficace pour analyser les données de l'énergie de récolte piézoélectrique. En supposant que le couple de données d'entrée discrètes (vitesse du véhicule et le niveau de la route) du dispositif de récolte d'énergie a été extrait sous la forme de S_p et Q_p , la dépendance mutuelle est calculée sur la base de la valeur initiale de S_{pi} et Q_{pi} dans l'équation suivante :

$$I_p(X, Y) = \sum_{i=1}^n X_i Y_i [H_p(X) - H_p(X / Y)] = H_p(X) + H_p(Y) - H_p(X * Y) \quad (5.36)$$

Où, $I_p(X, Y)$ sont les valeurs efficaces des paramètres communs de l'entropie de puissance entre X et Y ; $H_p(*)$ décrit l'entropie du collecteur d'énergie.

La fonction $H_p(X|Y)$ a supprimé l'incertitude du système de X selon la fiabilité de l'état du système de Y , ainsi lorsque $H_p(X|Y)$ est petit la valeur de $I_p(X, Y)$ est grande.

$$H(x) = \sum P(x) * \log(P(X / Y)) \quad (5.37)$$

Définir la dimension intégrée optimale comme un facteur impliquant la longueur de la zone de phase récupérée. La méthode d'échantillonnage utilisée est celle des faux voisins les plus proches (FNN) qui réussit à traiter ce problème, elle est donc utilisée pour identifier la dimension intégrée dans la taille suivante qui diminue l'erreur du système à zéro lorsque l'état d'attracteur est entièrement exposé. Le calcul de la dimension intégrée peut être considéré comme la description du (FNN) pour définir le point le plus proche de $x(i)$ comme $x'(i)$ dans une période de temps donnée, la distance séparant ces deux points adjacents a été calculée à l'aide de la formule ci-dessous :

$$R_m = \|x(i) - x'(i)\| \quad (5.38)$$

$R_m(I)$ indique la relation de deux points dans un espace vectoriel à deux dimensions.

5.5 Résultats des simulations et discussions

La simulation est faite sous MATLAB/SIMULINK utilisant un récupérateur piézoélectrique PZT-8K. En général, deux types de mesures d'erreur sont mis en œuvre dans le programme de prévision, en fonction des différentes caractéristiques de ce dernier [131]. A cet effet, les erreurs longitudinales et transversales sont décrites dans cette section. La première catégorie a été évaluée dans l'algorithme de prédiction génétique ; la performance du système a prouvé la corrélation du coefficient de prédiction avec le décalage temporel et une mesure standard a été améliorée (CC) comme on le voit dans le tableau 5.6. Les équations de ces métriques sont présentées comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - y_i|}{N} \\ RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{|y_i - y_i|^2}{N}} \\ SDofAE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(|y_i - y_i| - IMAE)^2}{N}} \\ CC = \frac{COV(X, Y)}{\sqrt{D_x D_y}} \\ MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - y_i|}{N} * 100 \end{array} \right. \quad (5.39)$$

Le deuxième type évalue l'amplitude, qui analyse : l'erreur quadratique moyenne (ASE), l'erreur quadratique moyenne racine (RMSE), la moyenne de l'erreur active (MAE), la variance typique de l'erreur totale (SDofAE), et le niveau d'erreur absolu relatif minimum (MAPE).

Pour l'estimation de la mesure, les erreurs longitudinales devraient être plus faibles, ce qui indique une différence de magnitude mineure. De même, la valeur de CC doit être proche de 1 pour s'assurer que la différence de délai ou la valeur de la corrélation est minimale. La durée de vie des capteurs et des dispositifs sans fil d'un véhicule a été limitée en raison de la capacité limitée des batteries du système, et le remplacement des batteries est assez long et coûteux. La pertinence des séries à deux entrées est transformée en petits vecteurs lorsque le décalage temporel prend une valeur plus importante. Ces outils prédictifs élaborés par l'approche utilisent une séquence temporelle qui reflète l'énergie électrique produite par le moissonneur piézoélectrique amélioré. Le processus AGA est le suivant :

Étape 1 : En supposant que les données d'entrée de l'énergie électrique traitée sont $Z(t)$, l'analyse multi résolution a été utilisée pour fournir l'ensemble de sortie le plus approprié pour l'analyse du temps de retard τ et la longueur intégrée m , dans chaque cas, comme demandé dans le schéma proposé.

Étape 2 : Tout d'abord, il s'agit d'une décomposition de notre série de période recollectée comme $Z(t)$ en utilisant l'équation 5.34 le supremum de Lyapunov a été élaboré pour vérifier que les données reconstruites sont réalisables.

Étape 3 : Les données reconstruites ont été approuvées à l'aide de la transformation en ondelettes discrètes DWT et l'algorithme BGI a été appliqué aux vecteurs reconstruits (NN, SVM et RF) pour les modèles reconstruits basés sur les données pour la prévision des trains ferroviaires.

Étape 4 : Après cela, les trois schémas C_1 , C_2 et C_3 sont obtenus respectivement. L'état historique Z_t à la durée τ a fourni les estimations d'erreur les plus faibles.

La fonction de probabilité de transition minimale P des vecteurs de Markov a été établie sur la base de la formule précédemment expliquée dans les équations 5.32 et l'équation 5.36.

Étape 5 : La méthode de transition approximative (ATM) appliquée à chaque type individuel de modèle η et les vecteurs de Markov spécifiés ont été élaborés en fonction de ces modèles. En outre, les résultats attendus Y_1 , Y_2 et Y_3 sont obtenus en fonction de chaque modèle. L'énergie prévue est obtenue à partir de la série temporelle originale.

Par conséquent, les prévisions cumulatives calculées à partir des mesures de la puissance électrique sont rapportées par Y . Dans ce cas, 75 % des données sont réservées.

Le graphique de ces exposants a été conçu avec une partie lisse qui prouve que les paramètres du système ont été correctement choisis.

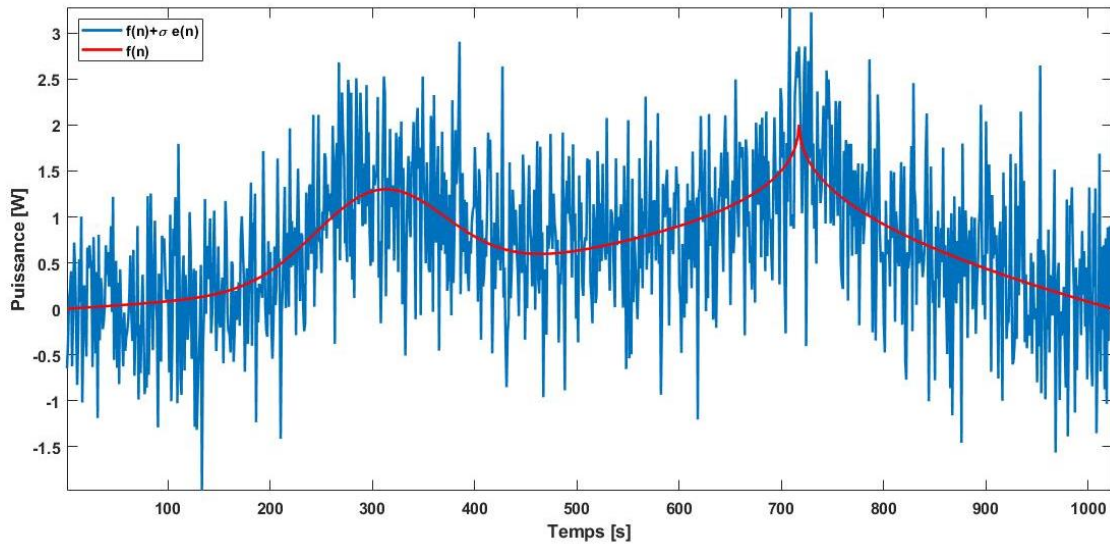


Figure 5.12 Sollicitation par un bruit blanc – amortissement énergétique et amortissement relatif au déplacement

Compte tenu du caractère commun de la propagation de la récolte d'énergie en 2020 la collecte de données [111]. Pour les 6 premiers mois supposés être comme base de données dans l'AG et la formation de données aux 6 derniers mois de 2020 pour la validation et le test. Selon cette série de données, les paramètres du modèle de récupération et l'exposant de Lyapunov ont été obtenus. En outre, pour tester la pertinence de la valeur des paramètres, l'entrée initiale de AGA est nécessaire. Figure 5.13 (maillage du moissonneur piézoélectrique) indique les résultats de la dimension intégrée du moissonneur piézoélectrique en maintenant la période de retard $\tau = 3.5s$.

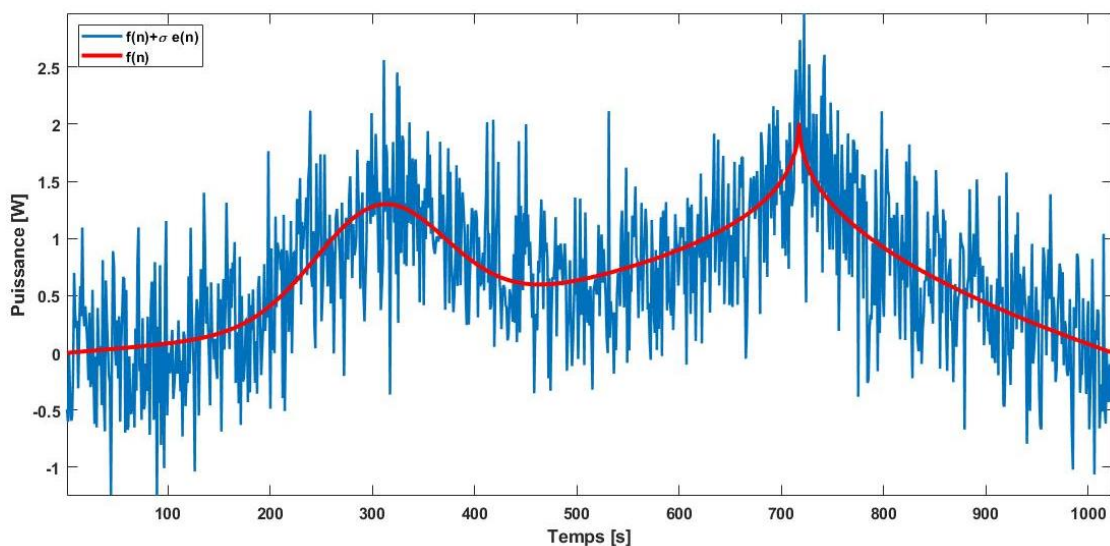


Figure 5.13 Consommation d'énergie des véhicules électriques en fonction de la masse et de la puissance.

L'axe X montre le format intégré du moissonneur piézoélectrique en améliorant de 1 à 7, également l'axe Y est la proportion de faux points de contiguïté au sein de tous les éléments dans la longueur d'onde corrigée du moissonneur. La figure 5.12 explique les résultats du laps de temps du système. Le coude a esquissé les mesures du taux de rétroaction lié lorsque la durée de la période de retard est de $\tau = 0,3s$ modifiée à $\tau = 1s$.

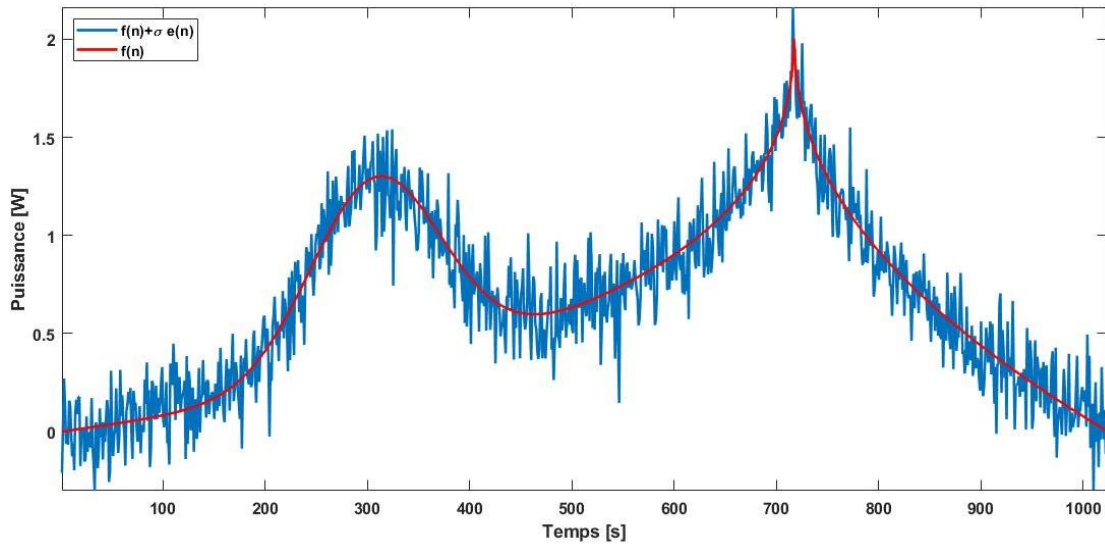


Figure 5.14 Sollicitation du récupérateur par signal bruité

Étant donné la commodité de la série par le temps de retard τ est déterminé une fois que la valeur de rétroaction réciproque atteint à la valeur minimale de la première fréquence. La pertinence des deux séries devient faible lorsque le temps de retard devient plus important.

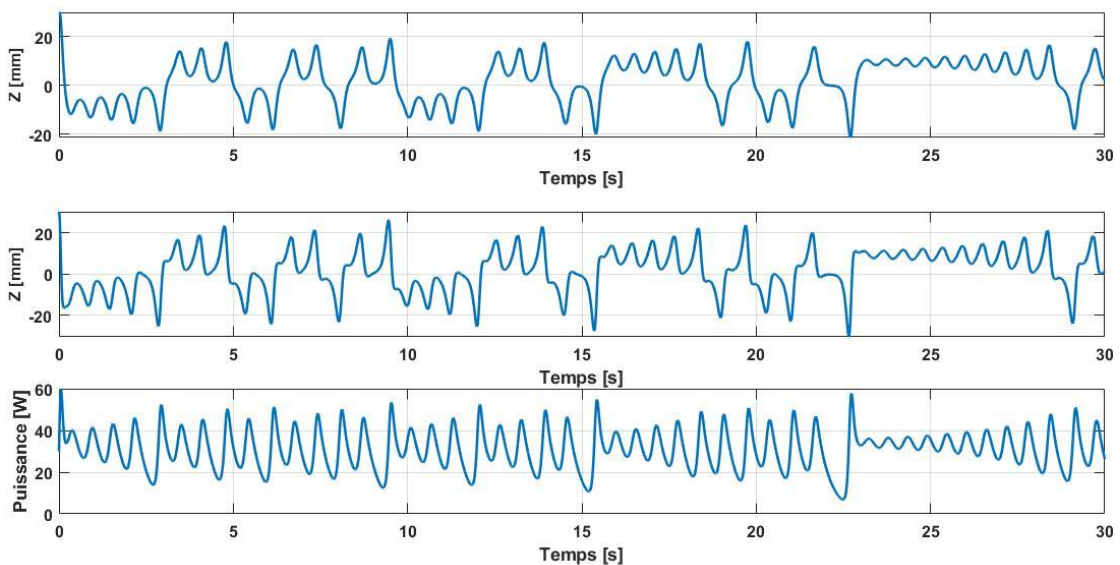


Figure 5.15 Sollicitation minimale du récupérateur intégré dans une petite région

Chaotique

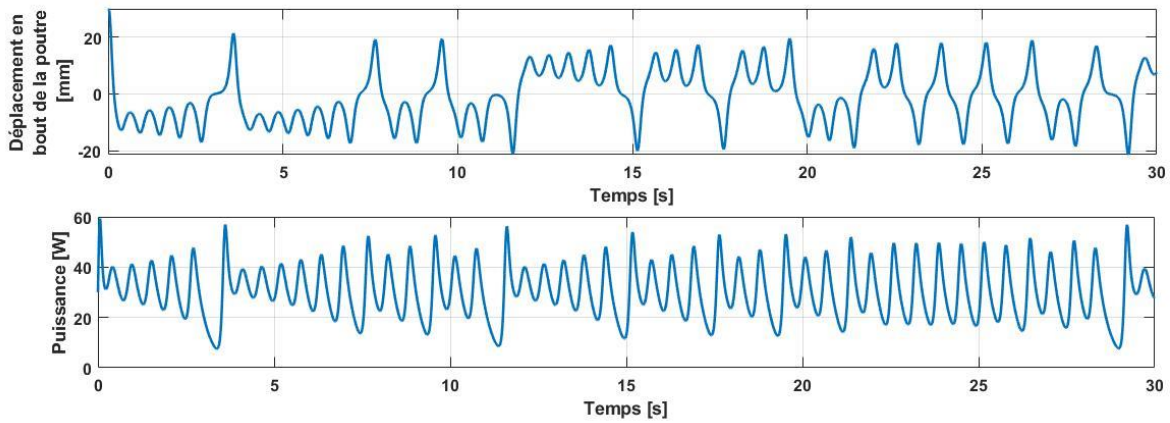


Figure 5.16 Des séries chronologiques avec une dynamique identique, l'une commençant à une valeur initiale de 0.2.

En fonction de ce délai, la puissance de sortie maximale est décalée à $\tau = 3, 5s$ lorsque les paramètres individuels des plaques piézoélectriques sont supposés être mutuellement adjacents. Une fois le niveau d'épaisseur sélectionné à $bth = 20$, la proportion de proches voisins parasites est de 0 avec les caractéristiques du système de reconstruction $m = 100$ et $\tau = 3, 5s$. Cela signifie que le cadre de la moissonneuse piézoélectrique le dispositif entier est complètement étendu dans l'espace dimensionnel de phase $m = 5$. En conséquence, sur la base des résultats obtenus présentés par les figures 5.7 et 5.8 les données de puissance électrique sont reconstruites sur la base de l'équation 5.34 avec $m = 5$ et $\tau = 3.5s$. L'équilibre de la formule de Lyapunov est étudié par le coefficient de gradient, la valeur maximale de $l = 0.009544$ présentée à la figure 5.30.

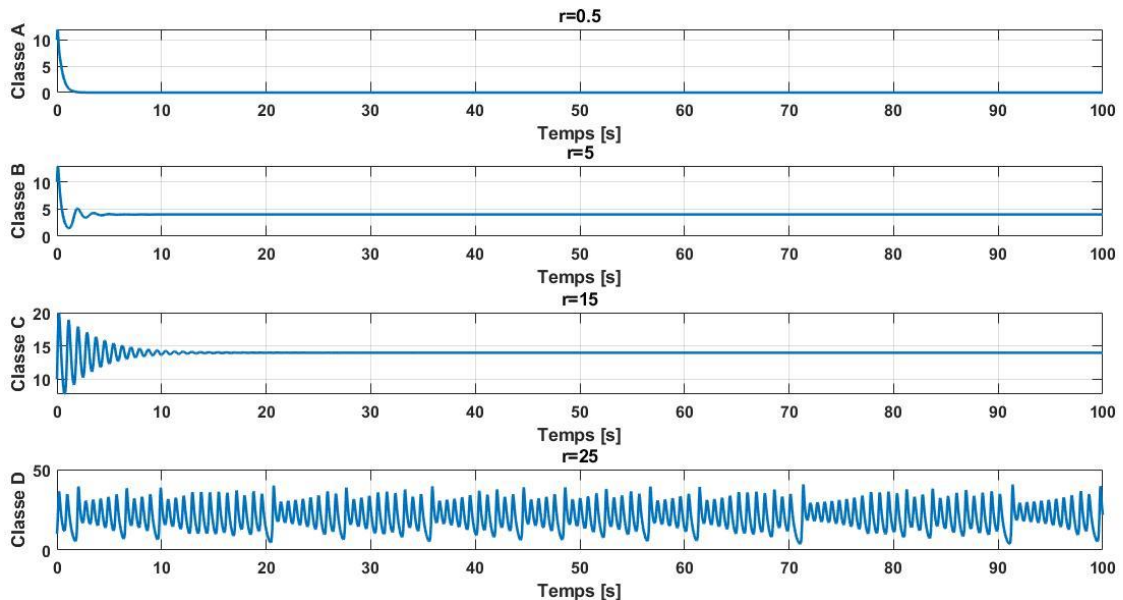


Figure 5.17 Sollicitation par un bruit blanc et métriques d'erreur RMSE des données sur les différents profils routiers.

Les résultats numériques ont confirmé que les données de puissance électrique récoltée ont été étendues pour ($l > 0$). Pour analyser la performance du modèle reconstruit, la valeur de la prédiction théorique (utilisant MATLAB) avec l'entrée reconstruite est comparée dans le tableau 5.1.

Il en résulte que ce système est soumis à une prédiction à court terme qui a peu de différence sur la valeur de CC. La comparaison prouve que les ensembles de données recombinaés sont nettement plus rapides selon les approches MAE, RMSE et SDofAE. Pour cette raison, la métrique d'erreur RMSE est choisie dans cette étude de cas.

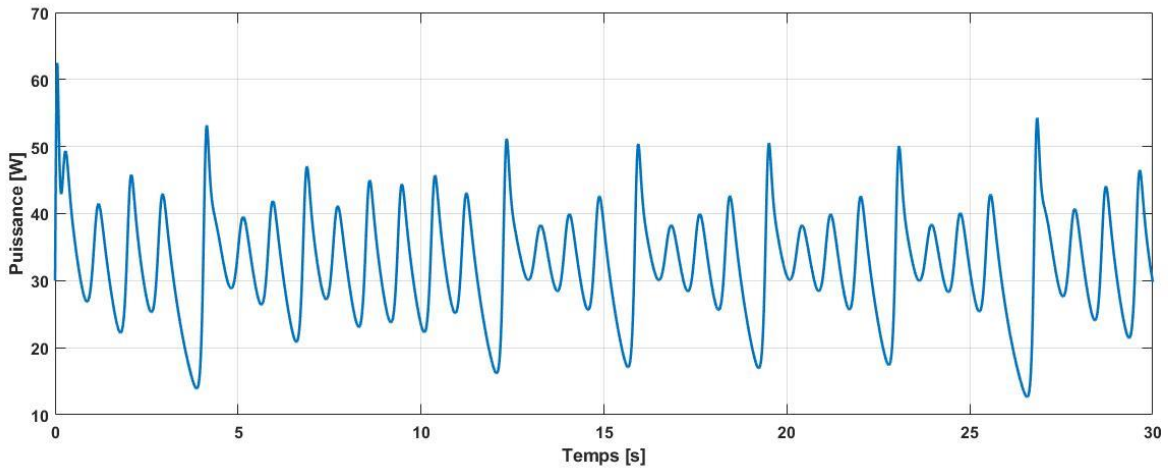


Figure 5.18 Portrait de phase de puissance pour le cas du PVEH à la production d'électricité.

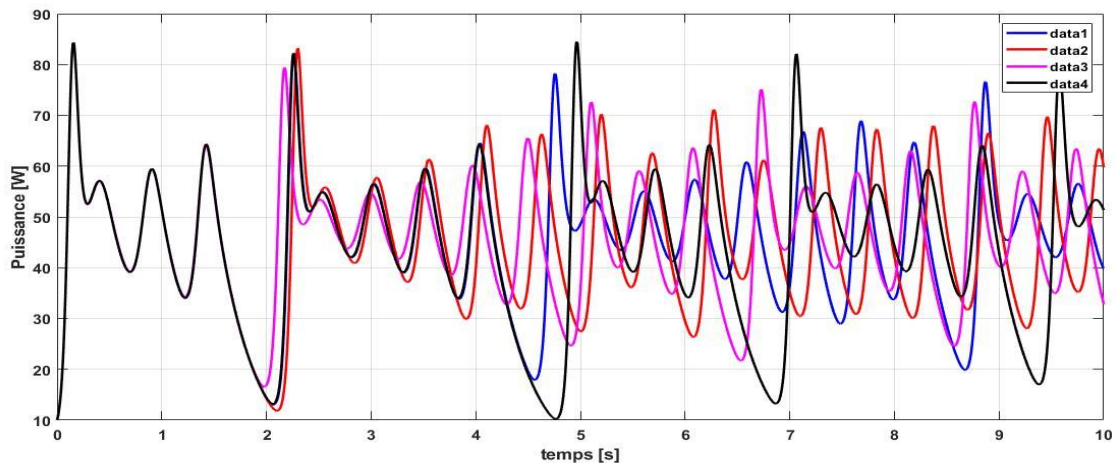


Figure 5.19 Diagrammes de phase de puissance de la série temporelle.

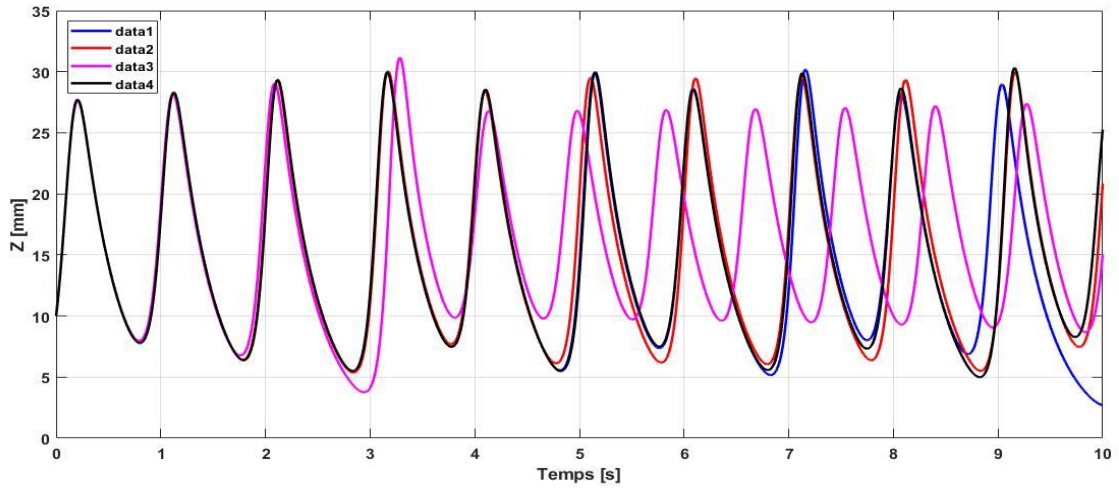


Figure 5.20 Diagramme de phase de la puissance électrique récupérable

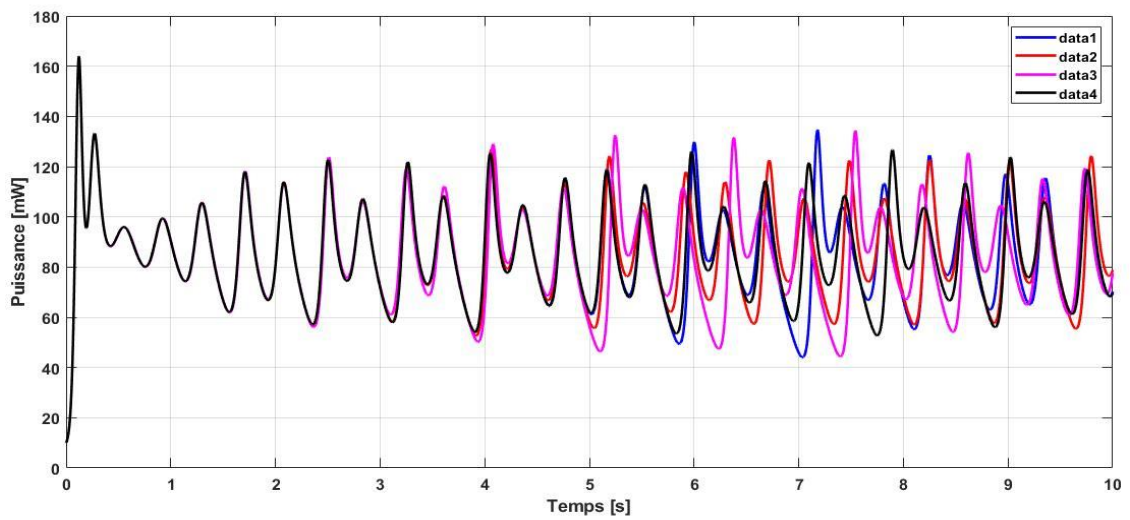


Figure 5.21 Trois modèles simulés sur différents profils routiers avec métriques d'erreur RMSE.

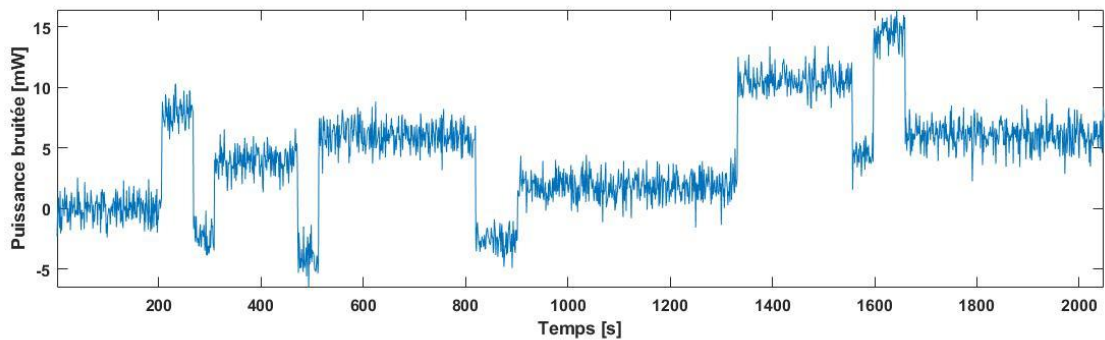


Figure 5.22 Déplacement de la suspension et production de la puissance sous excitation aléatoire.

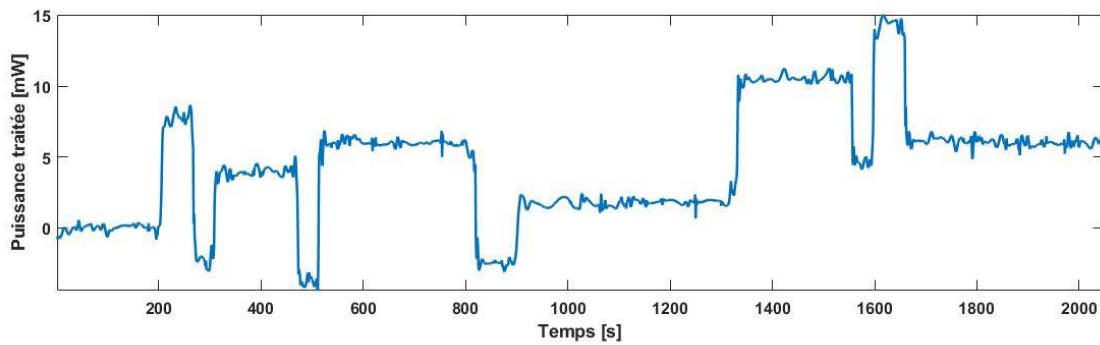


Figure 5.23 Paramètres de filtrage de la puissance électrique par données de la route

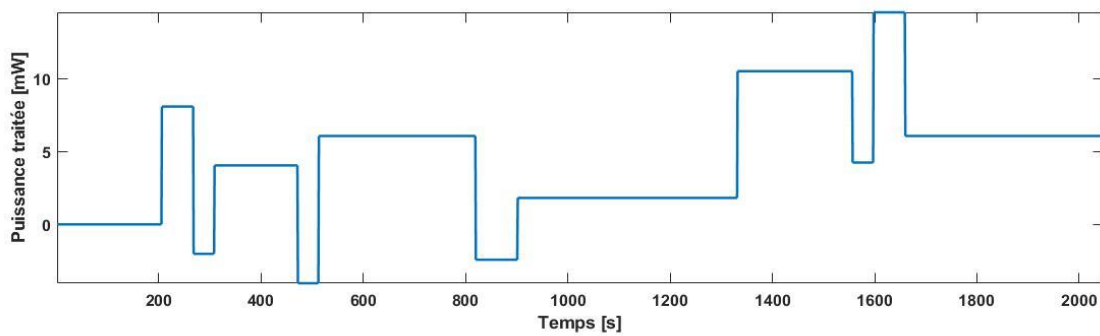


Figure 5.24 La puissance électrique filtré à l'aide de la méthode proposée

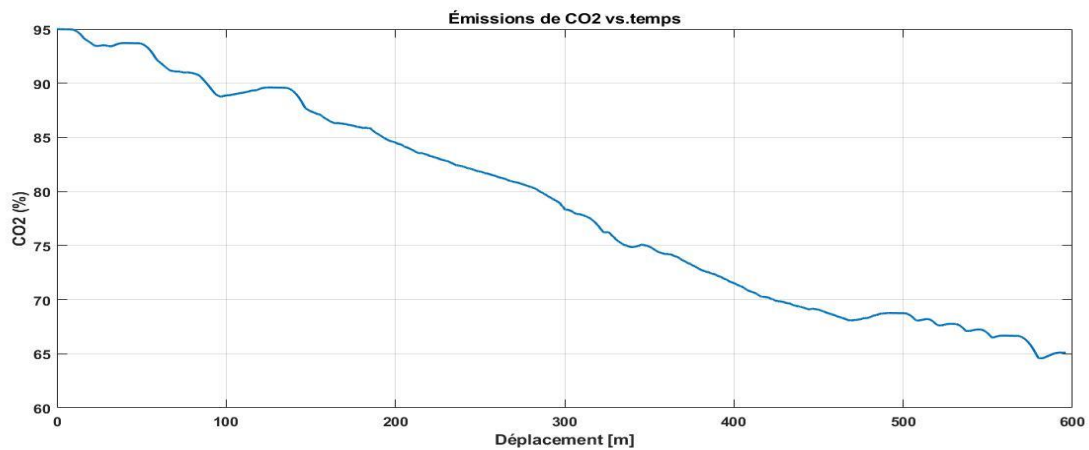


Figure 5.25 Méthode d'information mutuelle appliquée pour calculer le temps de latence du CO2 émis.

En conséquence, sur la base des résultats obtenus sont présentés sur les figures 5.24 et 5.25 les données de puissance électrique sont reconstruites et sont ulistrés sur les figures 5.26 , 5.27, 5.28 avec $m = 5$ et $\tau = 3.5s$. L'équilibre de la formule de Lyapunov est étudié par le coefficient de gradient, la valeur maximale de $l = 0.009544$ présentée sur les figures 5.30 et 5.31.

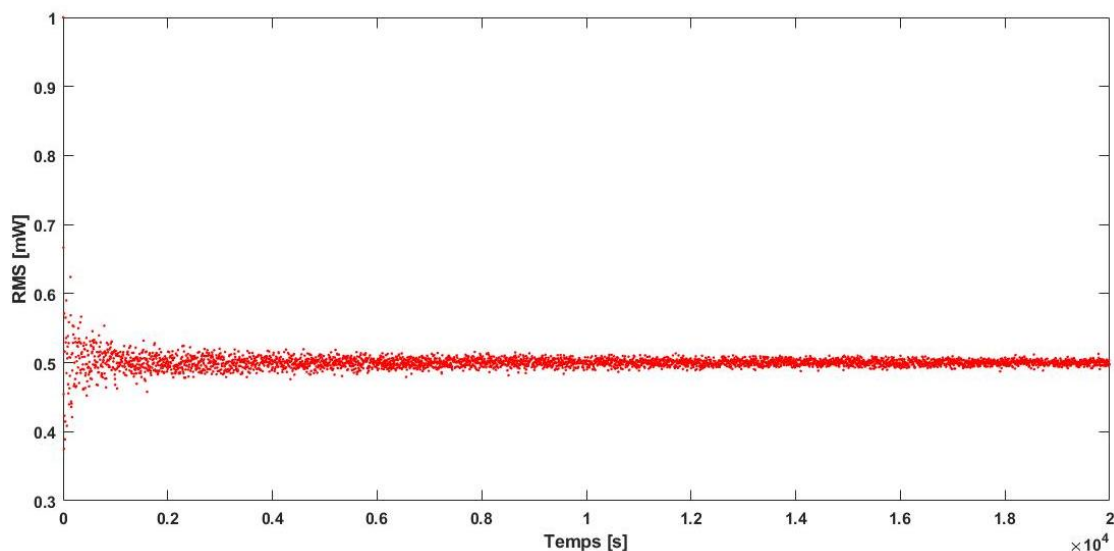


Figure 5.26 Métriques d'erreur MAE des données sur les différents profils routiers.

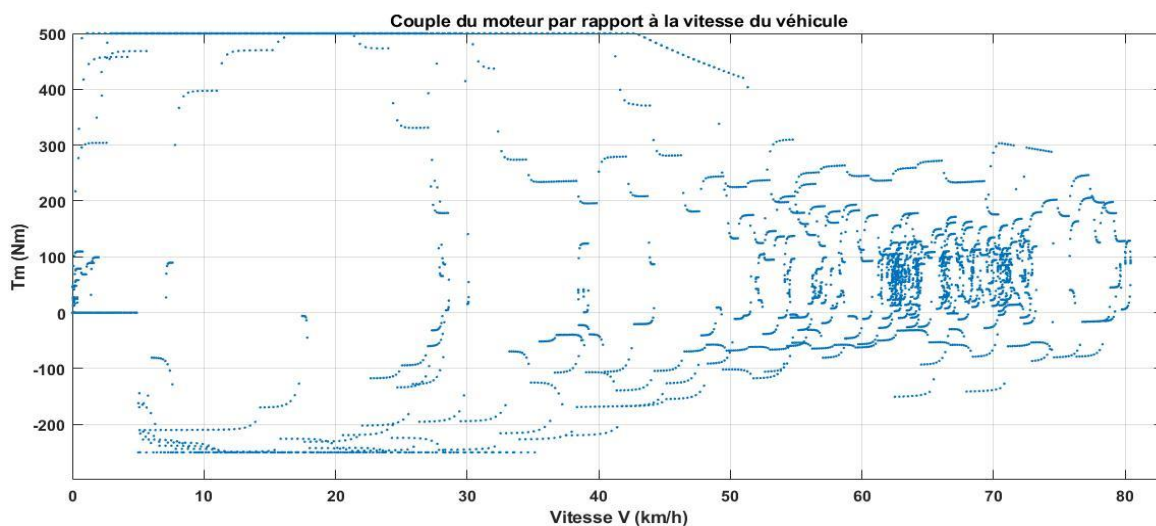


Figure 5.27 L'exposant de Lyapunov du paramètre de taux de croissance est positif à $C = 3, 7$.

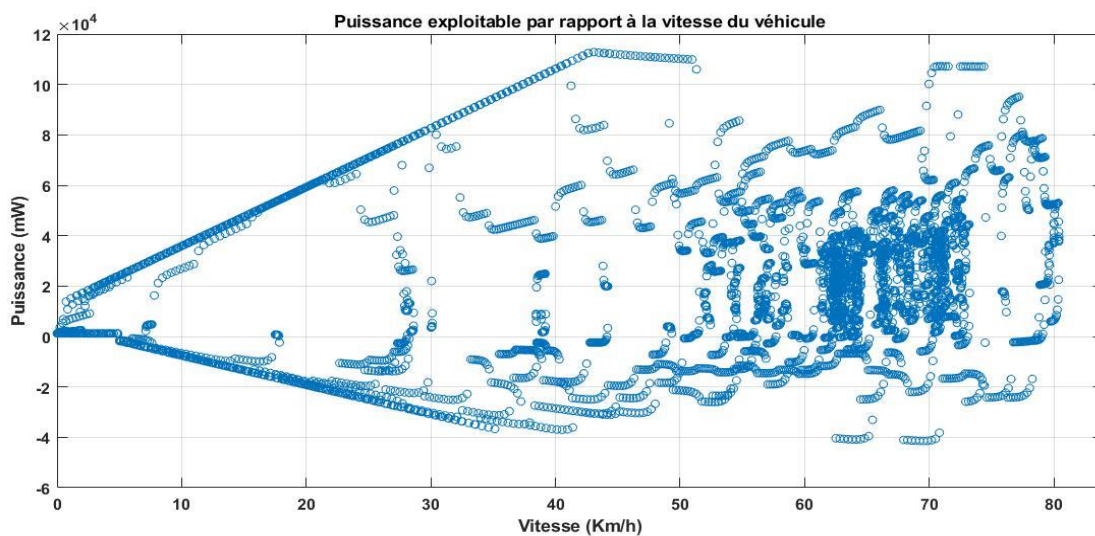


Figure 5.28 Dynamique aléatoire de l'énergie électrique récoltable.

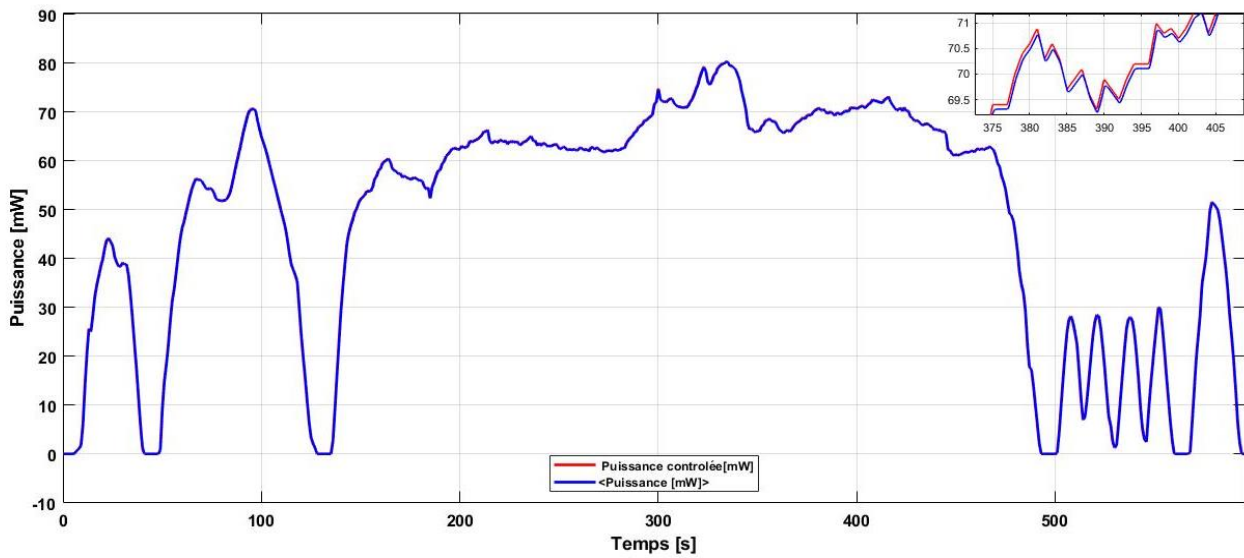


Figure 5.29 Amortissement énergétique et sollicitation par un bruit blanc

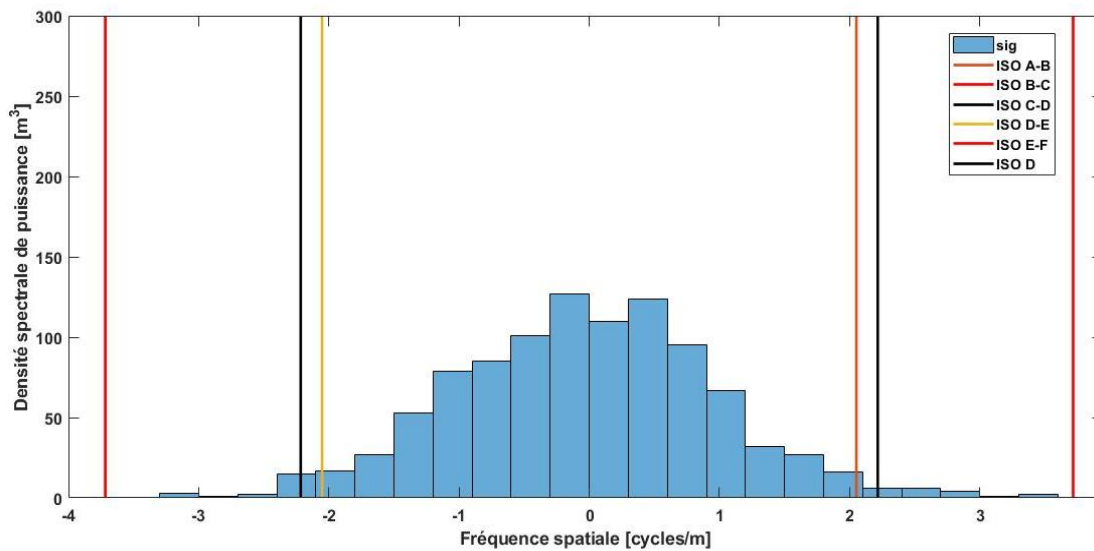


Figure 5.30 Densité spectrale de la puissance récupérée

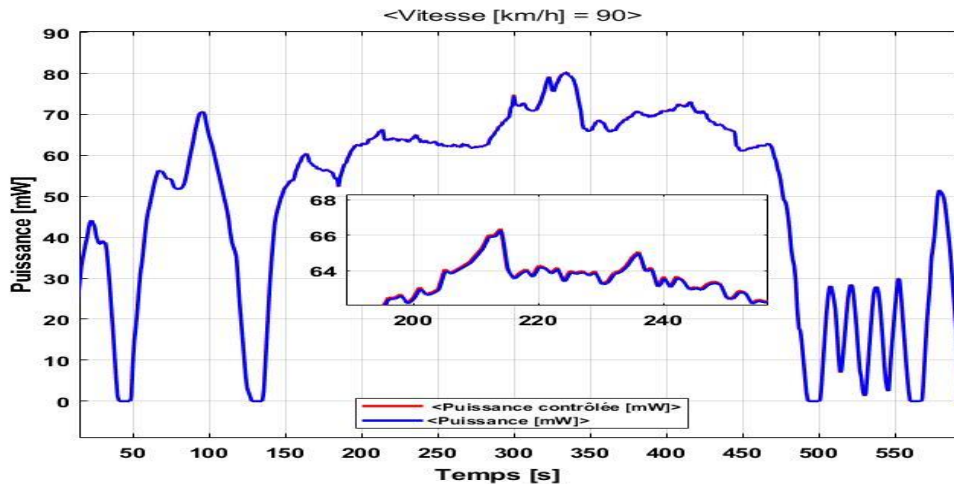


Figure 5.31 Contrôle de la puissance efficace en fonction de la perturbation aléatoire

Tableau 5-2 : Paramètres d'erreur de prévision de puissance électrique par données de la route

	IMAE(%)	IRSE(%)	IFAE(%)
Prpsed mdl1	29	20	19
Prpsed mdl2	28	22	16
Prpsed mdl3	39	16	12

Tableau 5-3: Quatre facteurs d'erreur des méthodes de prédiction proposées

	IMAE(%)	IRSE(%)	IFAE(%)
Prpsed mdl1	29	20	19
Prpsed mdl2	28	22	16
Prpsed mdl3	39	16	12

Tableau 5-4: Coefficients d'amélioration de la méthode proposée

	MAE(mW)	RSE(mW)	CC	SFAE	MPE(%)
ARMA	26	52	0.8	50	15
MSAR	22	45	0.8	41	14
LCM	19	37	0.8	35	13
Prpsed	16	22	0.8	23	7.4

Tableau 5-5: Facteurs d'amélioration du modèle proposé vs deux modèles

	IMAE(%)	IMSE(%)	ISE(%)
Prpsed mdl vs RARMA	22.5	30.4	39.5
Prpsed mdl vs RMSAR	20.5	28.1	45.1
Prpsed mdl vs LCMML	18.1	19.1	19.5

Tableau 5-6: CC de trois modèles

	IME(%)	IRE(%)	ISE(%)
Prpsed mdl vs ARMA	32.5	40.4	49.5
Prpsed mdl vs MSAR	30.5	38.1	35.1
Prpsed mdl vs LCM	19.1	22.1	18.5

Tableau 5-7: MAE (mW) de trois modèles

	MA(mW)	RME(mW)	CC	SDE(mW)	ME(mW)
Mod1	28.5	42.4	0.85	35.2	15.1
Mod2	26.2	34.2	0.85	36.2	14.8
Mod3	28.3	45.3	0.89	34.2	18.3
Pred	16.8 6	29.3	0.85	30.2	7.8

Tableau 5-8: RMSE (mW) de trois modèles

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h
MSAR	0.8	0.9	0.9	0.9	0.5	0.8	0.4
LCM	0.8	0.5	0.9	0.9	0.4	0.9	0.6
Prosed	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.5	0.8

5.6 Conclusion

Ce chapitre aborde, dans un premier temps, la réalisation du contrôle de la puissance récupérée par la logique floue. Pour cela, le dimensionnement du récupérateur et du circuit de restitution d'énergie a été fait, ensuite la partie commande neurone-floue et de la partie puissance a été achevée.

Les résultats des simulations ont confirmé la robustesse de la stratégie de commande. En effet, même avec une large gamme de fréquence variant entre 2Hz et 5KHz. Il faut signaler que les résultats obtenus avec la fréquence de résonance 50HZ sont meilleurs dans la mesure où le dimensionnement s'est basé sur cette fréquence.

La deuxième partie de ce chapitre se focalise sur la détection du comportement chaotique du système en insérant en plus dans le modèle développé une suspension des quatre roues et du siège conducteur. La stratégie de contrôle proposée utilise deux boucles de régulation pour la tension et le courant. La simulation sur les logiciels 20-Sim et MATLAB/SIMULINK ont permis de vérifier cette technique de commande et de valider les modèles proposés.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La récupération d'énergie vibratoire est un sujet de recherche très complexe ayant pour objectif principal de réaliser des circuits de récupération d'énergie autonome avec des composants qui consomment très peu d'énergie. Cette thèse s'est intéressée au développement d'un générateur piézoélectrique pour la récupération d'énergie, et du circuit d'extraction associé. La transduction piézoélectrique est parmi les technologies les plus étudiées pour convertir l'énergie mécanique des vibrations ambiantes en électricité. Ainsi, l'optimisation d'un récupérateur d'énergie passe souvent par l'optimisation de sa tension générée, en plus de la puissance, pour atteindre des niveaux de tension suffisants avant l'étage de redressement. Ce travail a présenté dans un premier temps l'étude d'un circuit non linéaire d'extraction de l'énergie, proposant une alternative au circuit classique d'extraction de l'énergie, et dans un second temps la conception d'un récupérateur piézoélectrique en considérant le circuit d'extraction utilisé, de manière à récupérer plus de 90% de sa puissance limite. Les systèmes de récupération d'énergie basés sur les transductions piézoélectriques ont été étudiés grâce à un modèle normalisé permettant d'écrire la puissance récupérée par l'un ou l'autre de la même manière. Cette puissance dépend de trois paramètres caractéristiques adimensionnels : le coefficient de couplage, décrivant l'efficacité de la conversion piézoélectrique, le facteur de pertes résistives, d'autant plus grand que les pertes sont importantes et le facteur de qualité mécanique. Il est montré qu'un générateur inertiel résonant, piézoélectrique peut être caractérisé entièrement à partir de ces trois paramètres. Une représentation fidèle de ces paramètres nous donne les niveaux de puissance normalisés qu'un générateur peut récupérer. Ainsi, en relevant et en calculant les paramètres caractéristiques des générateurs de la littérature, il est possible de comparer aisément leurs puissances normalisées (c'est à dire la proportion de puissance récupérable en fonction de la puissance limite de ce générateur). L'étude théorique, confirmée par une validation numérique, et par une analyse des générateurs précédemment développés montre le fonctionnement dual des générateurs piézoélectriques, les ordres de grandeurs de leurs paramètres caractéristiques respectifs ainsi que les marges de progression possibles. Dans le cas des générateurs piézoélectriques nous avons confirmé que les pertes résistives sont moins importantes que les générateurs magnétiques. Cependant, la majorité récupère moins de 70 % de leur puissance limite du fait des forts coefficients de pertes. Ce sujet est toutefois un domaine convoité et propice ; il suffit d'observer l'explosion récente du nombre de publications et de brevets sur cette thématique (chaussure piézoélectrique, bouton poussoir. . .).

La réalisation de macro-générateurs autonomes correspond à un réel besoin, que ce soit pour l'alimentation des dispositifs électroniques portables à usage courant, ou dans le cadre des réseaux de capteurs sans fil.

A travers cette thèse nous avons proposé une méthodologie efficace pour effectuer le choix d'un matériau et plus globalement le cheminement pour atteindre une solution optimale...

Pour conclure cette étude, dans **le chapitre 5**, les modèles Bond Graph des deux récupérateurs validés numériquement dans **les chapitres 3 et 4** ont été intégrés aisément, dans le cas de quart et de demi-véhicule présentés **dans le chapitre 1** de par leurs formes graphiques et leurs natures physiques, au modèle BG pour conclure sur les possibilités d'alimenter des systèmes connexes. L'énergie globale récupérable sur le véhicule en sortie des convertisseurs a pu alors être quantifiée. Cette étude démontre la faisabilité d'utiliser les récupérateurs piézoélectriques puisque des sollicitations d'entrée ponctuelles comme le dos d'âne standard et des sollicitations continues avec des profils de route différents de type excellent à médiocre avec une charge résistive en sortie des récupérateurs, puis avec un circuit électronique de restitution et de stockage de l'énergie, ont conduit à la récupération d'énergie très utile. De ces simulations, on peut conclure qu'il est tout à fait possible d'alimenter un circuit connexe avec une puissance continue de 0.33W lorsque la route est de qualité médiocre et ce avec des niveaux d'énergie différents en sortie des deux récupérateurs.

Il est tout à fait possible d'obtenir un système unique assurant la conversion et la mise en place des opérations d'autodiagnostic des défauts de la structure.

Enfin, des simulations sur route verticale ont été entreprises avec succès et comparés avec des résultats de simulation issus du modèle BG complet intégrant la poutre piézoélectrique. Un tel résultat sera fortement apprécié pour des installations industrielles de puissances moyennes et fortes où l'utilisation des récupérateurs piézoélectriques est encore plus justifiée. Cette thèse nous a permis de répondre à notre problématique de départ qui était de quantifier l'énergie récupérable à partir des convertisseurs piézoélectriques implantés dans une suspension automobile lorsque le véhicule est en mouvement. On sait dorénavant qu'il est possible d'alimenter par intermittence des capteurs de mesure ou bien des actionneurs avec le convertisseur piézoélectrique.

En tant que perspectives de ce travail de thèse :

La première perspective est de réaliser des essais sur route intégrant les deux technologies de récupération d'énergie avec des circuits d'extraction d'énergie adaptés. Les concepts étant développés et la faisabilité étant démontrée, une nouvelle phase d'optimisation est nécessaire. Il serait souhaitable d'améliorer les performances des systèmes de récupération piézoélectrique, mais aussi celles du circuit de restitution de l'énergie en se basant sur des techniques non linéaires. Pour la récupération d'énergie piézoélectrique, il serait possible d'utiliser les techniques non-linéaires afin d'accroître le rendement du convertisseur facilitant ainsi le travail en basse fréquence.

En outre ce travail, l'intégration des systèmes de récupération d'énergie dans la suspension du véhicule pourrait être repensée et améliorée [131].

Cette remarque se porte tout particulièrement sur le système de conversion piézoélectrique. Son positionnement devra à terme s'adapter au mieux à la géométrie de la suspension sans gêner son comportement dynamique. La conception des récupérateurs d'énergie devrait être plus robuste et faciliter les opérations de maintenance, en vue d'une implantation durable au sein du véhicule. En effet, le travail en basse fréquence du convertisseur piézoélectrique nous a conduits à la réalisation de configurations fragiles. Des études de fatigues devront être menées aux fréquences de résonance du véhicule en phase avec la réalité afin d'en dégager les pistes d'amélioration. Pour finir, la miniaturisation des convertisseurs piézoélectriques devra être repensée et le rendement des systèmes de récupération mais aussi du circuit du circuit d'extraction de l'énergie devront être soumis à des améliorations.

D'autre part :

- L'expansion de l'application de l'approche en mode glissant d'ordre élevé avec des fonctions d'évaluation pour la conception des commandes et des observateurs.
- L'association du schéma de commande en logique floue avec une suspension active.
- L'estimation de la puissance par application des approches à intelligence artificielle ou encore par des algorithmes indépendants du modèle des systèmes de suspensions.
- La validation expérimentale de toutes les approches de commande et d'observation avec des véhicules réels.

Bibliographie

- [1] C. Tang, "Design and analysis of an integrated suspension tilting mechanism for narrow urban vehicles," *Mechanism and Machine Theory*, p. 14, 2018.
- [2] M. Taktak, S. Triki, and A. Kamoun, "Real time algorithm based on time series data abstraction and hybrid bond graph model for diagnosis of switched system," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 59, pp. 51–72, Mar. 2017.
- [3] S. Sukumaran, S. Chatbouri, D. Rouxel, E. Tisserand, F. Thiebaud, and T. Ben Zineb, "Recent advances in flexible PVDF based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, p. 1045389X2096605, Oct. 2020.
- [4] P. Ailliot and V. Monbet, "Markov-switching autoregressive models for wind time series," *Environmental Modelling & Software*, vol. 30, pp. 92–101, Apr. 2012.
- [5] W. Marquis-Favre, E. Bideaux, O. Mechin, S. Scavarda, F. Guillemard, and M. Ebalard, "Mechatronic bond graph modelling of an automotive vehicle," *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 12, pp. 189–202, Apr. 2006.
- [6] I. A. Ivan, J. Agnus, M. Rakotondrabe, P. Lutz, and N. Chaillet, "PMN-PT piezoelectric material and related applications in Silicon-integrated devices like microactuators and energy harvesters," in *CAS 2011 Proceedings (2011 International Semiconductor Conference)*, (Sinaia, Romania), pp. 149–152, IEEE, Oct. 2011.
- [7] A. Homayouni-Amlashi, T. Schlinquer, A. Mohand-Ousaid, and M. Rakotondrabe, "2D topology optimization MATLAB codes for piezoelectric actuators and energy harvesters," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Oct. 2020.
- [8] J. Hirst, J. Wang, M. R. A. Nabawy, and A. Cioncolini, "Long-term power degradation testing of piezoelectric vibration energy harvesters for low-frequency applications," *Engineering Research Express*, vol. 2, p. 035026, Sept. 2020.
- [9] Y. Fu, H. Ouyang, and R. B. Davis, "Effects of electrical properties on vibrations via electromechanical coupling in triboelectric energy harvesting," *Journal of PhysicsD : Applied Physics*, vol. 53, p. 215501, May 2020.
- [10] Q. Zhao, L. Wang, K. Zhao, and H. Yang, "Development of a Novel Piezoelectric Sensing System for Pavement Dynamic Load Identification," *Sensors*, vol. 19, p. 4668, Oct. 2019.
- [11] L. Huang, R. Wang, Z. Yang, and L. Xie, "Energy Harvesting Backpacks for Human Load Carriage : Modelling and Performance Evaluation," p. 13, 2020.
- [12] W. Wu, S. Zhang, and Z. Zhang, "Mathematical Simulations and On-Road Experimentations of the Vibration Energy Harvesting from Mining Dump Truck Hydro-Pneumatic Suspension," *Shock and Vibration*, vol. 2019, pp. 1–16, Nov. 2019.
- [13] T. Darabseh, D. Al-Yafeai, and A.-H. I. Mourad, "Energy harvesting from car suspension system : Mathematical approach for half car model," *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 15, no. 1, p. 21, 2021.
- [12] R. Tavares and M. Ruderman, "Energy harvesting using piezoelectric transducers for suspension systems," *Mechatronics*, vol. 65, p. 102294, Feb. 2020.
- [13] Y. Djeriri, "Lyapunov-Based Robust Power Controllers for a Doubly Fed Induction Generator," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 16, Dec. 2020.
- [14] I. A. for Vehicle System Dynamics, *The dynamics of vehicles on roads and tracks : proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015), Graz, Austria, 17-21 August 2015. Volume 2 : Rail*. Boca Raton London New York Leiden : CRC Press, a Balkema book, 2016. Meeting Name : Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics OCLC : 950262550.

- [15] P. Zhou, Z. Yao, J. Ma, and Z. Zhu, “A piezoelectric sensing neuron and resonance synchronization between auditory neurons under stimulus,” *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 145, p. 110751, 2021.
- [16] C. Chen, X. Wang, Y. Wang, D. Yang, F. Yao, W. Zhang, B. Wang, G. A. Sewvandi, D. Yang, and D. Hu, “Additive manufacturing of piezoelectric materials,” *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 52, p. 2005141, 2020.
- [17] N. Sezer and M. Koç, “A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting,” *Nano Energy*, vol. 80, p. 105567, 2021.
- [18] K. Dong, X. Peng, and Z. L. Wang, “Fiber/fabric-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for flexible/stretchable and wearable electronics and artificial intelligence,” *Advanced Materials*, vol. 32, no. 5, p. 1902549, 2020.
- [19] L. Lu, W. Ding, J. Liu, and B. Yang, “Flexible pvdf based piezoelectric nanogenerators,” *Nano Energy*, vol. 78, p. 105251, 2020.
- [20] G. Chen, Y. Li, M. Bick, and J. Chen, “Smart textiles for electricity generation,” *Chemical Reviews*, vol. 120, no. 8, pp. 3668–3720, 2020.
- [21] M. Zhu, T. He, and C. Lee, “Technologies toward next generation human machine interfaces : From machine learning enhanced tactile sensing to neuromorphic sensory systems,” *Applied Physics Reviews*, vol. 7, no. 3, p. 031305, 2020.
- [22] D. Groppi, A. Pfeifer, D. A. Garcia, G. Krajačić, and N. Duić, “A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110183, 2021.
- [23] I. Torun, N. Celik, M. Ruzi, and M. S. Onses, “Transferring the structure of paper for mechanically durable superhydrophobic surfaces,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126543, 2021.
- [24] B. Ambrożkiewicz, G. Litak, and P. Wolszczak, “Modelling of Electromagnetic Energy Harvester with Rotational Pendulum Using Mechanical Vibrations to Scavenge Electrical Energy,” *Applied Sciences*, vol. 10, p. 671, Jan. 2020.
- [25] H. M. Baskonus, Z. Hammouch, T. Mekkaoui, and H. Bulut, “Chaos in the fractional order logistic delay system : Circuit realization and synchronization,” (Rhodes, Greece), p. 290005, 2016.
- [26] Y. Touati, R. Merzouki, and B. Ould Bouamama, “Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach : Application to intelligent autonomous vehicle,” *Mechatronics*, vol. 22, pp. 1148–1160, Dec. 2012.
- [27] B. Ren, J. Dai, and Q.-C. Zhong, “UDE-Based Robust Output Feedback Control With Applications to a Piezoelectric Stage,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, pp. 7819–7828, Sept. 2020.
- [28] D. Szpica and M. Kuszniar, “Modelling of the Low-Pressure Gas Injector Operation,” *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 14, pp. 29–35, Mar. 2020.
- [29] P. Suresh, U. Saravanakumar, and M. S. Hussein Al Salameh, eds., *Advances in Smart System Technologies : Select Proceedings of ICFSSST 2019*, vol. 1163 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore : Springer Singapore, 2021.
- [30] C.-C. Chen and S.-C. Chang, “Stability, Bifurcation, and Quenching Chaos of a Vehicle Suspension System,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [31] L. I. Silva, G. A. Magallan, P. M. de la Barrera, C. H. De Angelo, and G. O. Garcia, “Modeling of electric vehicles dynamics with Multi-Bond Graphs,” in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (Lille, France), pp. 1–7, IEEE, Sept. 2010.
- [32] L. Silva, G. Magallan, C. De Angelo, and G. Garcia, “Vehicle dynamics using multi-bond graphs : Four wheel electric vehicle modeling,” in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, (Orlando, FL), pp. 2846–2851, IEEE, Nov. 2008.

- [33] R. Salazar, "Fatigue in piezoelectric ceramic vibrational energy harvesting_ A review," *Applied Energy*, p. 26, 2020.
- [34] S. Ragavan, M. Shanmugavel, B. Shirinzadeh, and V. Ganapathy, "Unified modelling framework for UAVs using Bond Graphs," in *2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, (Kochi, India), pp. 21–27, IEEE, Nov. 2012.
- [35] B. Ould Bouamama, G. Biswas, R. Loureiro, and R. Merzouki, "Graphical methods for diagnosis of dynamic systems : Review," *Annual Reviews in Control*, vol. 38, no. 2, pp. 199–219, 2014.
- [36] H. M. Baskonus, Z. Hammouch, T. Mekkaoui, and H. Bulut, "Chaos in the fractional order logistic delay system : Circuit realization and synchronization," (Rhodes, Greece), p. 290005, 2016.
- [37] W. J. Smith, "Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO2 emissions from transport?," *Energy*, vol. 35, pp. 4514–4521, Dec. 2010.
- [38] M. R. Kiran, O. Farrok, R. Islam, and W. Xu, "Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology," vol. 8, p. 23, 2020.
- [39] I. Torun, N. Celik, M. Ruzi, and M. S. Onses, "Transferring the structure of paper for mechanically durable superhydrophobic surfaces," *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126543, 2021.
- [40] B. Ambrozkiewicz, G. Litak, and P. Wolszczak, "Modelling of Electromagnetic Energy Harvester with Rotational Pendulum Using Mechanical Vibrations to Scavenge Electrical Energy," *Applied Sciences*, vol. 10, p. 671, Jan. 2020.
- [41] Y. Touati, R. Merzouki, and B. Ould Bouamama, "Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach : Application to intelligent autonomous vehicle," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 1148–1160, Dec. 2012.
- [42] B. Ren, J. Dai, and Q.-C. Zhong, "UDE-Based Robust Output Feedback Control With Applications to a Piezoelectric Stage," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, pp. 7819–7828, Sept. 2020.
- [43] D. Szpica and M. Kuszniar, "Modelling of the Low-Pressure Gas Injector Operation," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 14, pp. 29–35, Mar. 2020.
- [44] P. Suresh, U. Saravanakumar, and M. S. Hussein Al Salameh, eds., *Advances in Smart System Technologies : Select Proceedings of ICFSSST 2019*, vol. 1163 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore : Springer Singapore, 2021.
- [45] C.-C. Chen and S.-C. Chang, "Stability, Bifurcation, and Quenching Chaos of a Vehicle Suspension System," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [46] L. I. Silva, G. A. Magallan, P. M. de la Barrera, C. H. De Angelo, and G. O. Garcia, "Modeling of electric vehicles dynamics with Multi-Bond Graphs," in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (Lille, France), pp. 1–7, IEEE, Sept. 2010.
- [47] L. Silva, G. Magallan, C. De Angelo, and G. Garcia, "Vehicle dynamics using multi-bond graphs : Four wheel electric vehicle modeling," in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, (Orlando, FL), pp. 2846–2851, IEEE, Nov. 2008.
- [48] R. Salazar, "Fatigue in piezoelectric ceramic vibrational energy harvesting_ A review," *Applied Energy*, p. 26, 2020.
- [49] S. Ragavan, M. Shanmugavel, B. Shirinzadeh, and V. Ganapathy, "Unified modelling framework for UAVs using Bond Graphs," in *2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, (Kochi, India), pp. 21–27, IEEE, Nov. 2012.
- [50] B. Ould Bouamama, G. Biswas, R. Loureiro, and R. Merzouki, "Graphical methods for diagnosis of dynamic systems : Review," *Annual Reviews in Control*, vol. 38, no. 2, pp. 199–219, 2014.

- [51] W. J. Smith, “Can EV (electric vehicles) address Ireland’s CO₂ emissions from transport?,” *Energy*, vol. 35, pp. 4514–4521, Dec. 2010.
- [52] M. R. Kiran, O. Farrok, R. Islam, and W. Xu, “Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology,” vol. 8, p. 23, 2020.
- [53] I. Torun, N. Celik, M. Ruzi, and M. S. Onses, “Transferring the structure of paper for mechanically durable superhydrophobic surfaces,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 405, p. 126543, 2021.
- [54] B. Ambrozkiewicz, G. Litak, and P. Wolszczak, “Modelling of Electromagnetic Energy Harvester with Rotational Pendulum Using Mechanical Vibrations to Scavenge Electrical Energy,” *Applied Sciences*, vol. 10, p. 671, Jan. 2020.
- [55] H. M. Baskonus, Z. Hammouch, T. Mekkaoui, and H. Bulut, “Chaos in the fractional order logistic delay system : Circuit realization and synchronization,” (Rhodes, Greece), p. 290005, 2016.
- [56] Y. Touati, R. Merzouki, and B. Ould Bouamama, “Robust diagnosis to measurement uncertainties using bond graph approach : Application to intelligent autonomous vehicle,” *Mechatronics*, vol. 22, pp. 1148–1160, Dec. 2012.
- [57] B. Ren, J. Dai, and Q.-C. Zhong, “UDE-Based Robust Output Feedback Control With Applications to a Piezoelectric Stage,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, pp. 7819–7828, Sept. 2020.
- [58] D. Szpica and M. Kuszniar, “Modelling of the Low-Pressure Gas Injector Operation,” *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 14, pp. 29–35, Mar. 2020.
- [59] P. Suresh, U. Saravanakumar, and M. S. Hussein Al Salameh, eds., *Advances in Smart System Technologies : Select Proceedings of ICFSSST 2019*, vol. 1163 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Singapore : Springer Singapore, 2021.
- [60] C.-C. Chen and S.-C. Chang, “Stability, Bifurcation, and Quenching Chaos of a Vehicle Suspension System,” *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pp. 1–12, 2018.
- [61] L. I. Silva, G. A. Magallan, P. M. de la Barrera, C. H. De Angelo, and G. O. Garcia, “Modeling of electric vehicles dynamics with Multi-Bond Graphs,” in *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (Lille, France), pp. 1–7, IEEE, Sept. 2010.
- [62] L. Silva, G. Magallan, C. De Angelo, and G. Garcia, “Vehicle dynamics using multi-bond graphs : Four wheel electric vehicle modeling,” in *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, (Orlando, FL), pp. 2846–2851, IEEE, Nov. 2008.
- [63] R. Salazar, “Fatigue in piezoelectric ceramic vibrational energy harvesting_ A review,” *Applied Energy*, p. 26, 2020.
- [64] S. Ragavan, M. Shanmugavel, B. Shirinzadeh, and V. Ganapathy, “Unified modelling framework for UAVs using Bond Graphs,” in *2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, (Kochi, India), pp. 21–27, IEEE, Nov. 2012.
- [65] B. Ould Bouamama, G. Biswas, R. Loureiro, and R. Merzouki, “Graphical methods for diagnosis of dynamic systems : Review,” *Annual Reviews in Control*, vol. 38, no. 2, pp. 199–219, 2014.
- [66] W. J. Smith, “Can EV (electric vehicles) address Ireland’s CO₂ emissions from transport?,” *Energy*, vol. 35, pp. 4514–4521, Dec. 2010.
- [67] M. R. Kiran, O. Farrok, R. Islam, and W. Xu, “Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology,” vol. 8, p. 23, 2020.

- [68] H. Zhang, J. Liu, E. Wang, S. Rakheja, and C.-Y. Su, “Nonlinear Dynamic Analysis of a Skyhook-Based Semi-Active Suspension System With Magneto-Rheological Damper,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, pp. 10446–10456, Nov. 2018.
- [69] S. Xie, X. Hu, S. Qi, and K. Lang, “An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles,” *Energy*, vol. 163, pp. 837–848, Nov. 2018.
- [70] C. Gijón-Rivera and J. L. Olazagoitia, “Methodology for Comprehensive Comparison of Energy Harvesting Shock Absorber Systems,” p. 28, 2020.
- [71] G. Genta and L. Morello, *The Automotive Chassis. Volume 2 : System design /Giancarlo Genta ; Lorenzo Morello*. Mechanical Engineering Series, Cham : Springer, second edition ed., 2020.
- [72] G. Genta and L. Morello, *The automotive chassis*. Mechanical engineering series, Dordrecht : Springer, 2009. OCLC : ocn316513661.
- [73] C. Wei and H. Taghavifar, “A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system : Half-vehicle model,” *Energy*, vol. 134, pp. 279–288, Sept. 2017.
- [74] M. Edla, Y. Y. Lim, R. V. Padilla, and D. Mikio, “Design and Application of a Self-Powered Dual-Stage Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting Systems,” vol. 9, p. 13, 2021.
- [75] M. Edla, Y. Y. Lim, R. V. Padilla, and M. Deguchi, “An Improved Rectifier Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting from Human Motion,” p. 24, 2021.
- [76] D. Correia and A. Ferreira, “Energy Harvesting on Airport Pavements : State-of-the-Art,” p. 20, 2021.
- [77] C. Wei and X. Jing, “A comprehensive review on vibration energy harvesting : Modelling and realization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1–18, July 2017.
- [78] J. Yao, M. Wang, Z. Li, and Y. Jia, “Research on Model Predictive Control for Automobile Active Tilt Based on Active Suspension,” *Energies*, vol. 14, p. 671, Jan. 2021.
- [79] Y. C. Shu and I. C. Lien, “Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems,” *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 1499–1512, Dec. 2006.
- [80] K. Kuru, D. Ansell, W. Khan, and H. Yetgin, “Analysis and Optimization of Unmanned Aerial Vehicle Swarms in Logistics : An Intelligent Delivery Platform,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15804–15831, 2019.
- [81] V. Kumar, V. Rastogi, and P. Pathak, “Simulation for whole-body vibration to assess ride comfort of a low–medium speed railway vehicle,” *SIMULATION*, vol. 93, pp. 225–236, Mar. 2017.
- [82] S. Kopylov, Z. Chen, and M. A. A. Abdelkareem, “Implementation of an Electromagnetic Regenerative Tuned Mass Damper in a Vehicle Suspension System,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 110153–110163, 2020.
- [83] T. Tan, “Piezoelectric autoparametric vibration energy harvesting with chaos control feature,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 16, 2021.
- [84] Z. Vakulov, A. Geldash, D. Khakhulin, M. V. Il’ina, O. I. Il’in, V. S. Klimin, V. N. Dzhuplin, B. G. Konoplev, Z. He, and O. A. Ageev, “Piezoelectric Energy Harvester Based on LiNbO₃ Thin Films,” p. 14, 2020.
- [85] A. Quattrocchi, R. Montanini, S. D. Caro, S. Panarello, T. Scimone, S. Foti, and A. Testa, “A New Approach for Impedance Tracking of Piezoelectric Vibration Energy Harvesters Based on a Zeta Converter,” p. 14, 2020.
- [86] T. L. Pereira, A. S. de Paula, A. T. Fabro, and M. A. Savi, “A NUMERICAL ANALYSIS OF THE ELECTRICAL OUTPUT RESPONSE OF A NONLINEAR PIEZOELECTRIC OSCILLATOR SUBJECTED TO A HARMONIC AND RANDOM EXCITATION,” p. 11, 2016.

- [87] K. D. Rao and K. Pavani, "Modelling and Vibration Control of Suspension System for Automobiles using LQR and PID Controllers," p. 5, 2015.
- [88] S. D. Hong, K.-B. Kim, W. Hwang, Y. S. Song, J. Y. Cho, S. Yeong Jeong, J. H. Ahn, G.-H. Kim, H. Cheong, and T. H. Sung, "Enhanced energy-generation performance of a landfilled road-capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 215, p. 112900, July 2020.
- [89] A. Geweda, M. El-Gohary, A. El-Nabawy, and T. Awad, "Improvement of vehicle ride comfort using genetic algorithm optimization and PI controller," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 56, pp. 405–414, Dec. 2017.
- [90] G. Yakubu, G. Sani, S. B. Abdulkadir, A. A. Jimoh, and M. Francis, "FULL CAR ACTIVE DAMPING SYSTEM FOR VIBRATION CONTROL," *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, vol. 6, pp. 1–17, Mar. 2020.
- [91] A. Aldair and E. Alsaedee, "Regeneration Energy for Nonlinear Active Suspension System Using Electromagnetic Actuator," *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, vol. 16, pp. 113–125, Dec. 2020.
- [92] A. Heidarian and X. Wang, "Review on Seat Suspension System Technology Development," p. 20, 2019.
- [93] L. V. Meetei and D. Kumar Das, "Fully Active Suspension Design using Super Twisting Sliding Mode Control based on Disturbance Observer and Ensemble Kalman Filter," in *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, (Kolkata, India), pp. 253–257, IEEE, Feb. 2020.
- [94] P. Krasilnikov, T. Gurina, and V. Svetlova, "Bifurcation study of a chaotic model variable-length pendulum on a vibrating base," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 105, pp. 88–98, Oct. 2018.
- [95] X. Tang, D. Ning, H. Du, W. Li, and W. Wen, "Takagi-Sugeno Fuzzy Model-Based Semi-Active Control for the Seat Suspension With an Electrorheological Damper," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 98027–98037, 2020.
- [96] W. Feng, Q. Li, Q. Lu, C. Li, and B. Wang, "Group Relevance Vector Machine for sparse force localization and reconstruction," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 161, p. 107900, Dec. 2021.
- [97] M. Gao, Y. Wang, Y. Wang, Y. Yao, P. Wang, Y. Sun, and J. Xiao, "Modeling and experimental verification of a fractional damping quad-stable energy harvesting system for use in wireless sensor networks," *Energy*, vol. 190, p. 116301, Jan. 2020.
- [98] D. Liu, Y. Xu, and J. Li, "Randomly-disordered-periodic-induced chaos in a piezoelectric vibration energy harvester system with fractional-order physical properties," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 399, pp. 182–196, July 2017.
- [99] A. Kumar, S. F. Ali, and A. Arockiarajan, "Enhanced Energy Harvesting from Non-linear Oscillators via Chaos Control," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 1, pp. 35–40, 2016.
- [100] X. Huang and B. Yang, "Improving energy harvesting from impulsive excitations by a nonlinear tunable bistable energy harvester," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 158, p. 107797, Sept. 2021.
- [101] K. Kecik, "Simultaneous vibration mitigation and energy harvesting from a pendulum-type absorber," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 92, p. 105479, Jan. 2021.
- [102] M. Liu, J. Mi, W.-C. Tai, and L. Zuo, "A novel configuration for high power-output and highly efficient vibration energy harvesting," *Applied Energy*, vol. 295, p. 116957, Aug. 2021.
- [103] R. Toyabur, M. Salauddin, H. Cho, and J. Y. Park, "A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric-electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations," *Energy Conversion and Management*, vol. 168, pp. 454–466, July 2018.

- [104] Z. Zhang, X. Zhang, W. Chen, Y. Rasim, W. Salman, H. Pan, Y. Yuan, and C. Wang, "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle," *Applied Energy*, vol. 178, pp. 177–188, Sept. 2016.
- [105] M. Wiecek and M. Lewandowski, "A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm," *Applied Energy*, vol. 192, pp. 222–233, Apr. 2017.
- [106] L. Suganthi, S. Iniyan, and A. A. Samuel, "Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 585–607, Aug. 2015.
- [107] V. Ravi, M. Monica, S. Amuthameena, S. Divya, S. Jayashree, and J. Varshini, "Sliding Mode Controller for Two Conical Tank Interacting Level System," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 573, pp. 273–278, June 2014.
- [108] F. Gao, H. Dai, J. Qi, and Z. Wang, "Vehicle-Level Electromagnetic Compatibility Prediction Based on Multi-Port Network Theory," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 20, pp. 1277–1285, Dec. 2019.
- [109] A. Wijata, K. Polczyński, and J. Awrejcewicz, "Theoretical and numerical analysis of regular one-side oscillations in a single pendulum system driven by a magnetic field," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 150, p. 107229, Mar. 2021.
- [110] D. K. Sah and T. Amgoth, "Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks : A Survey," *Information Fusion*, vol. 63, pp. 223–247, Nov. 2020.
- [111] R. Kumar, S. Gupta, and S. F. Ali, "Energy harvesting from chaos in base excited double pendulum," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 124, pp. 49–64, June 2019.
- [112] A. Amini, z. Ekici, and K. Yakut, "Experimental Study of Regenerative Rotational Damper in Low Frequencies," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 21, pp. 83–90, Feb. 2020.
- [113] M. A. A. Abdelkareem, L. Xu, J. Zou, M. K. A. Ali, F. A. Essa, A. Elagouz, and M. A. Hassan, "Energy-Harvesting Potential and Vehicle Dynamics Conflict Analysis under Harmonic and Random Road Excitations," pp. 2018–01–0568, Apr. 2018.
- [114] J. B. Ashtekar and A. G. Thakur, "SIMULINK MODEL OF SUSPENSION SYSTEM AND IT'S VALIDATION ON SUSPENSION TEST RIG," p. 8, 2014.
- [115] M. Avesh, R. Srivastava, and R. C. Sharma, "Parametric Optimization for the Design of Passenger Vehicle Suspension System with the Application of Genetic Algorithm," *International Journal of Vehicle Structures and Systems*, vol. 11, Aug. 2019.
- [116] M. Gholikhani, H. Roshani, S. Dessouky, and A. Papagiannakis, "A critical review of roadway energy harvesting technologies," *Applied Energy*, vol. 261, p. 114388, Mar. 2020.
- [117] B. Huang, C.-Y. Hsieh, F. Golnaraghi, and M. Moallem, "Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 357, pp. 16–34, Nov. 2015.
- [118] T. Huguet, M. Lallart, and A. Badel, "Orbit jump in bistable energy harvesters through buckling level modification," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 128, pp. 202–215, Aug. 2019.
- [119] B. Lafarge, S. Grondel, C. Delebarre, and E. Cattan, "A validated simulation of energy harvesting with piezoelectric cantilever beams on a vehicle suspension using Bond Graph approach," *Mechatronics*, vol. 53, pp. 202–214, Aug. 2018.
- [120] J. Lee and B. Choi, "Development of a piezoelectric energy harvesting system for implementing wireless sensors on the tires," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 32–38, Feb. 2014.

- [121] J. Mi, L. Xu, S. Guo, M. A. A. Abdelkareem, L. Meng, and L. Zuo, "The Dimension Match and Parameters Setting of the Hydraulic Motor for the Hydraulic-Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber," in *Volume 3 : 19th International Conference on Advanced Vehicle Technologies ; 14th International Conference on Design Education ; 10th Frontiers in Biomedical Devices*, (Cleveland, Ohio, USA), p. V003T01A019, American Society of Mechanical Engineers, Aug. 2017.
- [122] E. H. A. Niasar, M. Dahmardeh, and H. S. Gogarchin, "Optimization of a piezoelectric energy harvester considering electrical fatigue," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 31, pp. 1443–1454, July 2020.
- [123] S. Touairi and M. Mabrouki, "Mechatronic modeling and control of energy recovery in motorcycle tires," in *2020 IEEE 6th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, pp. 1–5, Apr. 2020.
- [124] S. Touairi and M. Mabrouki, "Optimization of Energy Harvesting System design by Functional Analysis," in *2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, pp. 1–6, Apr. 2020.
- [125] X. Xie and Q. Wang, "A mathematical model for piezoelectric ring energy harvesting technology from vehicle tires," *International Journal of Engineering Science*, vol. 94, pp. 113–127, Sept. 2015.
- [126] L. Yu, S. Huo, W. Xuan, and L. Zuo, "Assessment of Ride Comfort and Braking Performance Using Energy-Harvesting Shock Absorber," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, vol. 8, pp. 482–491, Apr. 2015.
- [127] L. V. V. Gopala Rao and S. Narayanan, "Optimal response of half car vehicle model with sky-hook damper based on LQR control," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 8, pp. 488–496, June 2020.
- [128] P. Hosseinnezhad, S. Behnia, and S. Fathizadeh, "Dynamical stabilities of photosynthesis systems : Quantum chaos approach," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 139, p. 110279, Oct. 2020.
- [129] M. Liu, W.-C. Tai, and L. Zuo, "Vibration energy-harvesting using inerter-based two-degrees-of-freedom system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 146, p. 107000, Jan. 2021.
- [130] H. Taghavifar, "A novel energy harvesting approach for hybrid electromagnetic-based suspension system of off-road vehicles considering terrain deformability," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 146, p. 106988, Jan. 2021.
- [131] S. Behnia, F. Rahimi, and M. Khodavirdizadeh, "Controlling of the light in photonic resonator lattice : Quantum chaos approach," *Optics Communications*, vol. 446, pp. 171–177, Sept. 2019.
- [132] D. N. Butusov, D. O. Pesterev, A. V. Tutueva, D. I. Kaplun, and E. G. Nepomuceno, "New technique to quantify chaotic dynamics based on differences between semi-implicit integration schemes," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 92, p. 105467, Jan. 2021.
- [133] F. Cakmak Bolat, S. Basaran, and M. Kara, "Investigation of energy harvesting in composite beams with different lamination angles under dynamic effects," *Composite Structures*, vol. 270, p. 114056, Aug. 2021.
- [134] A. Chakrabarti and M. Arora, eds., *Industry 4.0 and Advanced Manufacturing : Proceedings of I-4AM 2019*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Singapore : Springer Singapore, 2021.
- [135] S. Touairi, Y. Khouya, C. Bahanni, Z. Khaouch, and M. Mabrouki, "Mechatronic Control and Modeling of a Piezoelectric Actuator," in *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, (Fez, Morocco), pp. 1–6, IEEE, Apr. 2019.
- [136] S. Touairi, A. Bouzid, and M. Mabrouki, "Road handling of regenerative motorcycle suspensions and energy harvesting," (Khouribga, Morocco), p. 020017, 2021.

- [137] S. Touairi, Y. Khouya, C. Bahanni, and M. Mabrouki, "Sliding-Mode Control of Piezoelectric Actuator using Bond Graph," in *2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, (Kenitra, Morocco), pp. 1–7, IEEE, Apr. 2019.
- [138] S. Touairi and M. Mabrouki, "Control and modelling evaluation of a piezoelectric harvester system," *International Journal of Dynamics and Control*, Mar. 2021.
- [139] J. Wang, Z. Su, H. Li, L. Ding, H. Zhu, and O. Gaidai, "Imposing a wake effect to improve clean marine energy harvesting by flow-induced vibrations," *Ocean Engineering*, vol. 208, p. 107455, July 2020.
- [140] R. Wang, E. Kalnay, and B. Balachandran, "Neural machine-based forecasting of chaotic dynamics," *Nonlinear Dynamics*, vol. 98, pp. 2903–2917, Dec. 2019.
- [141] X.-S. Wang and B. P. Mann, "ATTRACTOR SELECTION IN NONLINEAR ENERGY HARVESTING USING DEEP REINFORCEMENT LEARNING," p. 20,2020.
- [142] H. Zerimeche, T. Houmor, and A. Berkane, "Combination synchronization of different dimensions fractional-order non-autonomous chaotic systems using scaling matrix," *International Journal of Dynamics and Control*, July 2020.
- [143] Q. Xiong, B. Qin, X. Li, and L. Zuo, "A Rule-Based Damping Control of MMR-Based Energy-Harvesting Vehicle Suspension," in *2020 American Control Conference (ACC)*, (Denver, CO, USA), pp. 2262–2267, IEEE, July 2020.

Annexe A

Conversion Directe

A.1 Principe général

Dans cette approche, on considère le cas d'une conversion électromécanique directe, c'est à dire sans stockage intermédiaire d'énergie sous forme mécanique (le stockage intermédiaire en question pourrait être, par exemple, une masse en mouvement ou une structure vibrante). Ce type de conversion directe est notamment utilisé dans le cas de briquets et d'allume-gaz piézoélectriques.

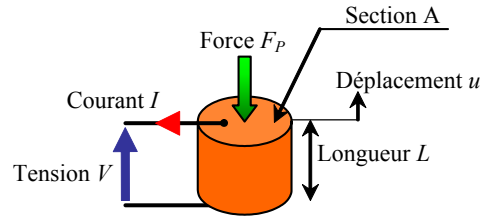
L'axe préférentiel de compression est l'axe de polarisation (d'indice 33) car il permet d'exploiter au mieux l'efficacité de conversion du matériau piézoélectrique. Les équations (A.1) décrivent le comportement local du matériau. Les coefficients piézoélectriques utilisés sont définis dans le [Tableau A-1](#).

$$\begin{cases} S = s_{33}^E T + d_{33} E \\ D = d_{33} T + \varepsilon_{33}^T E \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

On considère un barreau piézoélectrique cylindrique de section A et de longueur L , soumis à une force F_P colinéaire à son axe de polarisation. Ce dispositif est représenté dans la [Figure A-1](#). Le terme u désigne le déplacement de la face supérieure du cylindre sous l'effet de la force F_P , c'est à dire la variation de sa longueur L . V est la tension générée sur l'élément piézoélectrique et I est le courant extrait. Ces grandeurs macroscopiques sont reliées aux grandeurs locales par les [Eqs. \(A.2\)](#). Le comportement macroscopique du système est alors décrit par les [Eqs. \(A.3\)](#).

$$F_P = -AT, \quad V = \frac{E}{L}, \quad I = -A \frac{dD}{dt}, \quad u = SL \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{cases} u = -\frac{s_{33}^E L}{A} F + d_{33} V \\ I = d_{33} \frac{dF}{dt} - \frac{\varepsilon_{33}^T A}{L} \frac{dV}{dt} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Figure A-1 Cylindre piézoélectrique soumis à une force F_p

s_{33}^E	Souplesse, électrodes en court-circuit ($\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)
s_{33}^D	Souplesse, électrodes en circuit ouvert ($\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$)
ε_{33}^T	Permittivité à contrainte constante (F/m)
d_{33}	Coefficient piézoélectrique ($\text{m} \cdot \text{V}^{-1}$)

Tableau A-1 Coefficients piézoélectriques

A.2 Cycles de conversion

Les cycles de conversion qui maximisent l'énergie électrique extraite lors d'une conversion directe sont du type décharge électrique à contrainte constante. Nous détaillerons les deux cycles associés à ce type de conversion.

A.2.1. Cycle avec une phase d'extraction d'énergie

Pour décrire ce cycle, on considère un état initial dans lequel la céramique n'est chargée ni électriquement ni mécaniquement. En circuit ouvert, le matériau est soumis à une contrainte maximale par l'intermédiaire d'une force $F_{p_{\max}}$ appliquée sur le cylindre. Sous l'effet de la contrainte, des charges électriques sont créées et un champ électrique interne apparaît. On procède alors à l'extraction de l'énergie électrique du cylindre piézoélectrique, tout en maintenant la contrainte mécanique à sa valeur maximale.

Les étapes de conversion d'énergie représentées par les cycles $T(S)$ et $D(E)$ représentés sur la [Figure A-2](#) sont les suivantes :

- Départ du cycle (en O) : en circuit ouvert, la céramique est mise en contrainte jusqu'à la valeur T_{\max} . Le champ électrique atteint alors E_{\max} :

$$E_{\max} = -\frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T} T_{\max} \quad (\text{A.4})$$

- La décharge électrique est effectuée en faisant transiter l'énergie accumulée sur la capacité propre de la céramique vers un réservoir d'énergie annexe. Cette séquence est supposée suffisamment lente pour que la contrainte reste constante. De ce fait, on passe du circuit ouvert (en A) à l'état déchargé (en B) sur la droite $T=T_{\max}$.
- Le cycle se termine (en O) lorsque le cylindre est déchargé mécaniquement, la céramique étant court-circuitée.

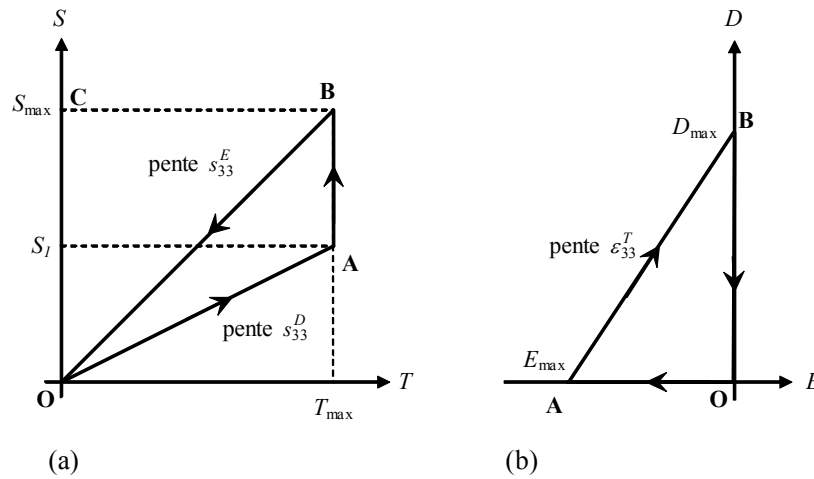


Figure A-2 Premier cycle de type décharge à contrainte constante : (a) Diagramme $S(T)$, (b) diagramme $D(E)$

L'énergie volumique mécanique W_M (J/m^3) reçue par le matériau piézoélectrique est définie par l'aire (OABC) du diagramme $S(T)$:

$$W_M = \int_0^{S_{\max}} T dS = S_{\max} T_{\max} - \frac{1}{2} S_1 T_{\max} = \left(s_{33}^E - \frac{1}{2} s_{33}^D \right) T_{\max}^2 \quad (\text{A.5})$$

L'énergie volumique électrique W_E (J/m^3) délivrée par le matériau piézoélectrique est définie par l'aire (OAB) du diagramme $D(E)$ ou du diagramme $S(T)$:

$$W_E = \int_0^{D_{\max}} E dD = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T} T_{\max}^2 = \frac{1}{2} \left(s_{33}^E - s_{33}^D \right) T_{\max}^2 \quad (\text{A.6})$$

D'après cette équation, l'énergie volumique dépend, d'une part, des paramètres piézoélectriques du matériau considéré et, d'autre part, de la contrainte maximale admissible par ce matériau.

La part d'énergie non convertie sous forme électrique pendant la phase de compression est stockée sous forme mécanique dans le cylindre piézoélectrique (déformation élastique). Cette énergie est restituée à l'environnement mécanique lors de la décompression du cylindre. Elle est ici considérée comme perdue. Suivant cette hypothèse, le rendement de conversion du matériau est donné par (A.7).

$$\eta^T = \frac{W_E}{W_M} = \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E + d_{33}^2} = \frac{k_{33}^2}{1 + k_{33}^2} \quad (\text{A.7})$$

Où k_{33} est le coefficient de couplage électromécanique du matériau :

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} \quad (\text{A.8})$$

Le rendement maximum d'un générateur à conversion directe utilisant ce cycle de conversion est donc strictement inférieur au carré de son coefficient de couplage et ne peut excéder $1/2$.

A.2.2. Cycle avec deux phases d'extraction d'énergie

La différence avec le cycle décrit au paragraphe A.2.1 est la mise à profit de la décompression du matériau pour récupérer de l'énergie. Les étapes du cycle décrit ci-dessous sont illustrées par les diagrammes $T(S)$ et $D(E)$ de la **Figure A-3**:

- Départ du cycle (en O) : en circuit ouvert, la céramique est mise en contrainte jusqu'à la valeur T_{\max} . Le champ électrique atteint alors E_{\max} .
- La décharge électrique est effectuée en faisant transiter l'énergie accumulée sur la capacité propre de la céramique vers un réservoir d'énergie annexe. Comme pour le cycle précédent, cette séquence est supposée suffisamment lente pour que la contrainte reste constante. On passe ainsi du circuit ouvert (en A) à l'état déchargé (en B) sur la droite $T=T_{\max}$.
- En circuit ouvert, la contrainte appliquée sur la céramique passe de T_{\max} à 0 lorsque la contrainte est annulée. Le champ électrique passe alors de 0 à $-E_{\max}$ (en F).
- Une opération de décharge de l'énergie électrique accumulée dans la céramique piézoélectrique est alors effectuée, donnant lieu à un deuxième transfert vers le réservoir d'énergie annexe. Le cycle se termine lorsque le champ électrique s'annule (en O).

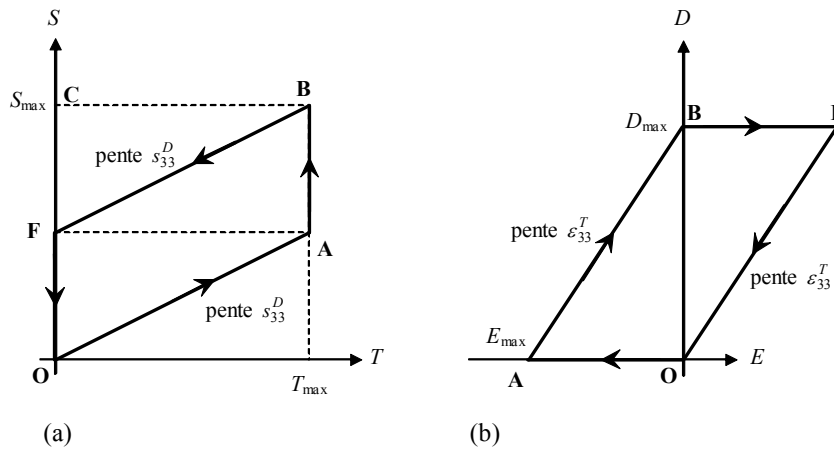


Figure A-3 Deuxième cycle de type décharge à contrainte constante : (a) Diagramme $S(T)$, (b) diagramme $D(E)$

L'énergie volumique électrique W_E (J/m^3) délivrée par le matériau piézoélectrique est deux fois plus grande que pour le cycle précédent. Elle est donnée par l'aire (OABF) du diagramme $D(E)$ ou du diagramme $S(T)$:

$$W_E = \int_0^{D_{\max}} E dD = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T} T_{\max}^2 = (s_{33}^E - s_{33}^D) T_{\max}^2 \quad (\text{A.9})$$

L'énergie mécanique fournie au matériau étant identique au cas précédent, le rendement de conversion du matériau est donné par (A.10). Il est deux fois plus grand que pour le cycle précédent, mais reste strictement inférieur au carré du coefficient de couplage du matériau.

$$\eta^T = \frac{W_E}{W_M} = \frac{2d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T s_{33}^E + d_{33}^2} = \frac{2k_{33}^2}{1 + k_{33}^2} \quad (\text{A.10})$$

Annexe B

Techniques SSD pour un système électromagnétique

B.1 Modélisation

On considère une structure électromécanique vibrante, dont le couplage entre les grandeurs électriques et mécaniques est assuré par un dispositif électromagnétique basé, par exemple, sur le mouvement relatif entre un aimant permanent et une bobine. Autour d'une fréquence de résonance, cette structure peut être modélisée par le système représenté sur la [Figure B-1](#).

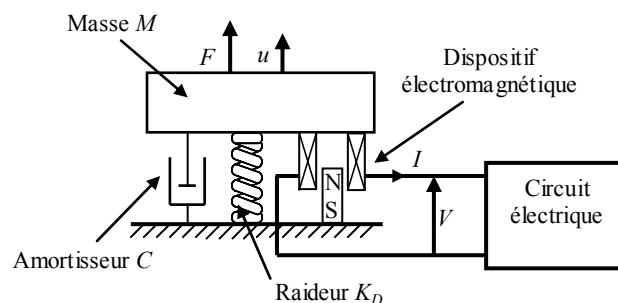


Figure B-1 Modélisation de la structure électromécanique

En circuit ouvert, la tension aux bornes de la bobine est proportionnelle à la vitesse de la vibration et la force exercée par la bobine sur la masse M est nulle. En court-circuit, la bobine exerce une force proportionnelle à l'intensité électrique dans le court-circuit. Les équations constitutives du modèle sont données par (B.1) et (B.2). \mathcal{G} est le coefficient électromagnétique global de la structure. Il correspond au coefficient de proportionnalité entre la tension et la vitesse en circuit ouvert et au coefficient de proportionnalité entre la force et le courant en court-circuit.

$$V = -L_0\dot{I} + \mathcal{G}\dot{u} \quad (\text{B.1})$$

$$F = M\ddot{u} + C\dot{u} + K_D u + \mathcal{G}I \quad (\text{B.2})$$

K_D correspond à la raideur de la structure en circuit ouvert ($I=0$). La raideur équivalente de la structure en court-circuit est K_E , dont l'expression est donnée par (B.3). Contrairement aux structures équipées d'inserts piézoélectriques, la raideur en court-circuit est ici supérieure à la raideur en circuit ouvert. Le coefficient de couplage est défini comme le rapport de l'énergie magnétique stockée dans la bobine court-circuitée sur l'énergie élastique dans la structure. Il peut être exprimé en fonction de \mathcal{G} , K_E et L_0 ou en fonction de K_D et K_E , comme le montre (B.4).

$$K_E = K_D + \frac{\mathcal{G}^2}{L_0} \quad (\text{B.3})$$

$$k^2 = \frac{\frac{1}{2}L_0 I^2}{\frac{1}{2}K_E u^2} = \frac{\mathcal{G}^2}{K_E L_0} = \frac{K_E}{K_E - K_D} \quad (\text{B.4})$$

L'expression de la plus haute pulsation de résonance (en court-circuit) est donnée par (B.5), et l'expression du facteur de qualité mécanique par (B.6).

$$\omega_E = \sqrt{\frac{K_E}{M}} \quad (\text{B.5})$$

$$Q_m = \frac{K_E}{C\omega_E} \quad (\text{B.6})$$

On s'intéresse maintenant au bilan énergétique (B.7) de la structure. L'énergie fournie à la structure est égale à la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie élastique, de l'énergie perdue dans l'amortisseur et de l'énergie transférée. L'énergie transférée E_T correspond à la part d'énergie mécanique convertie en énergie électrique. Son expression est donnée par (B.8).

$$\int F\dot{u}dt = \frac{1}{2}M\dot{u}^2 + \frac{1}{2}K_D u^2 + \int C\dot{u}^2 dt + \mathcal{G} \int I\dot{u}dt \quad (\text{B.7})$$

$$E_T = \mathcal{G} \int I\dot{u}dt \quad (\text{B.8})$$

L'optimisation de la conversion électromécanique dans une structure équipée d'un système électromagnétique passe ainsi par la maximisation de l'énergie transférée E_T .

Toutes les expressions précédentes montrent la parfaite dualité entre les systèmes piézoélectriques et électromagnétiques. Cette dualité est synthétisée dans le **Tableau B-1**.

Piézoélectricité	Electromagnétisme
α	\mathcal{G}
C_0	L_0
K_E	K_D
K_D	K_E
V	I
Circuit ouvert	Court-circuit
$E_T = \alpha \int V \dot{u} dt$	$E_T = \mathcal{G} \int I \dot{u} dt$

Tableau B-1 Dualité piézoélectricité – électromagnétisme

B.2 Application des techniques SSD

Les dispositifs de commutations SSD dans le cas de structures équipées de systèmes électromagnétiques se déduisent des dispositifs SSD correspondant à des structures équipées d'éléments piézoélectriques en exploitant la dualité courant – tension, inductance– capacité et circuit ouvert – court-circuit.

Dans le cas de la technique SSDS le dispositif de commutation est constitué par un simple interrupteur électronique normalement fermé. Dans le cas de la technique SSDI, un condensateur C_I est connecté en parallèle avec l'interrupteur. L'interrupteur est pratiquement toujours fermé, sauf quand un extremum de déplacement est détecté. L'interrupteur est alors ouvert. Dans le cas de la technique SSDS, le courant est alors brièvement ramené à zéro. Dans le cas de la technique SSDI, l'inductance propre L_0 du système électromagnétique et le condensateur C_I forment un circuit oscillant. L'interrupteur est maintenu ouvert jusqu'à ce que le courant sur les éléments piézoélectriques soit inversé, c'est-à-dire au bout d'un temps t_i correspondant à une demi pseudo période du circuit oscillant. Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes du système électromagnétique est nulle et le courant évolue comme le déplacement. Les dispositifs de commutation correspondant aux techniques SSD ainsi que les formes d'ondes associées sont représentés sur la Figure B-2.

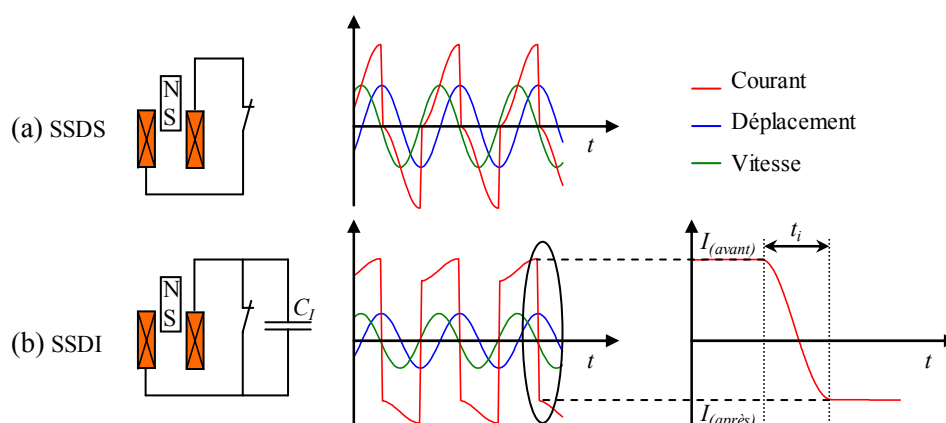


Figure B-2 Techniques SSD, dispositifs de commutation et formes d'ondes typiques pour une structure équipée d'un système électromagnétique : (a) SSDS, (b) SSDI

Les expressions des amortissements induits par les techniques SSDS et SSDI dans le cas de structures équipées d'un système électromagnétique se déduisent facilement des expressions obtenues dans le cas de structures équipées d'éléments piézoélectriques. Ces expressions sont respectivement données par (B.9) et (B.10).

$$A_{SSDS} = 20 \log \left(\frac{C \omega_E}{C \omega_E + \frac{4g^2}{\pi L_0}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{1 + \frac{4}{\pi} k^2 Q_m} \right) \quad (\text{B.9})$$

$$A_{SSDI} = 20 \log \left(\frac{C \omega_E}{C \omega_E + \frac{4g^2}{\pi L_0} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{1 + k^2 Q_m \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right) \quad (\text{B.10})$$

L'expression des amortissements en fonction du couplage électromécanique et du facteur de qualité mécanique est indépendante du type de couplage électromécanique utilisé (piézoélectricité ou électromagnétisme).

B.3 Limites

La parfaite dualité entre les systèmes électromagnétiques et piézoélectriques est une vision très théorique. En réalité, les systèmes électromagnétiques sont moins performants car les pertes y sont plus importantes que dans les systèmes piézoélectriques.

Il est en effet possible de stocker de l'énergie sur la capacité propre d'un élément piézoélectrique en circuit ouvert car les pertes diélectriques (modélisée par une résistance en parallèle avec C_0) sont très faiblesⁱ. Il est par contre pratiquement impossible de stocker de l'énergie dans l'inductance propre d'un système électromagnétique court-circuité, car l'énergie sera très vite dissipée dans la résistance constituée par l'enroulement de la bobine (modélisée par une résistance en série avec L_0).

ⁱ Ces pertes ont toujours été négligées dans ce manuscrit

Annexe C

DISPOSITIFS DE RECUPERATION D'ENERGIE INTEGRABLE A UNE SUSPENSION

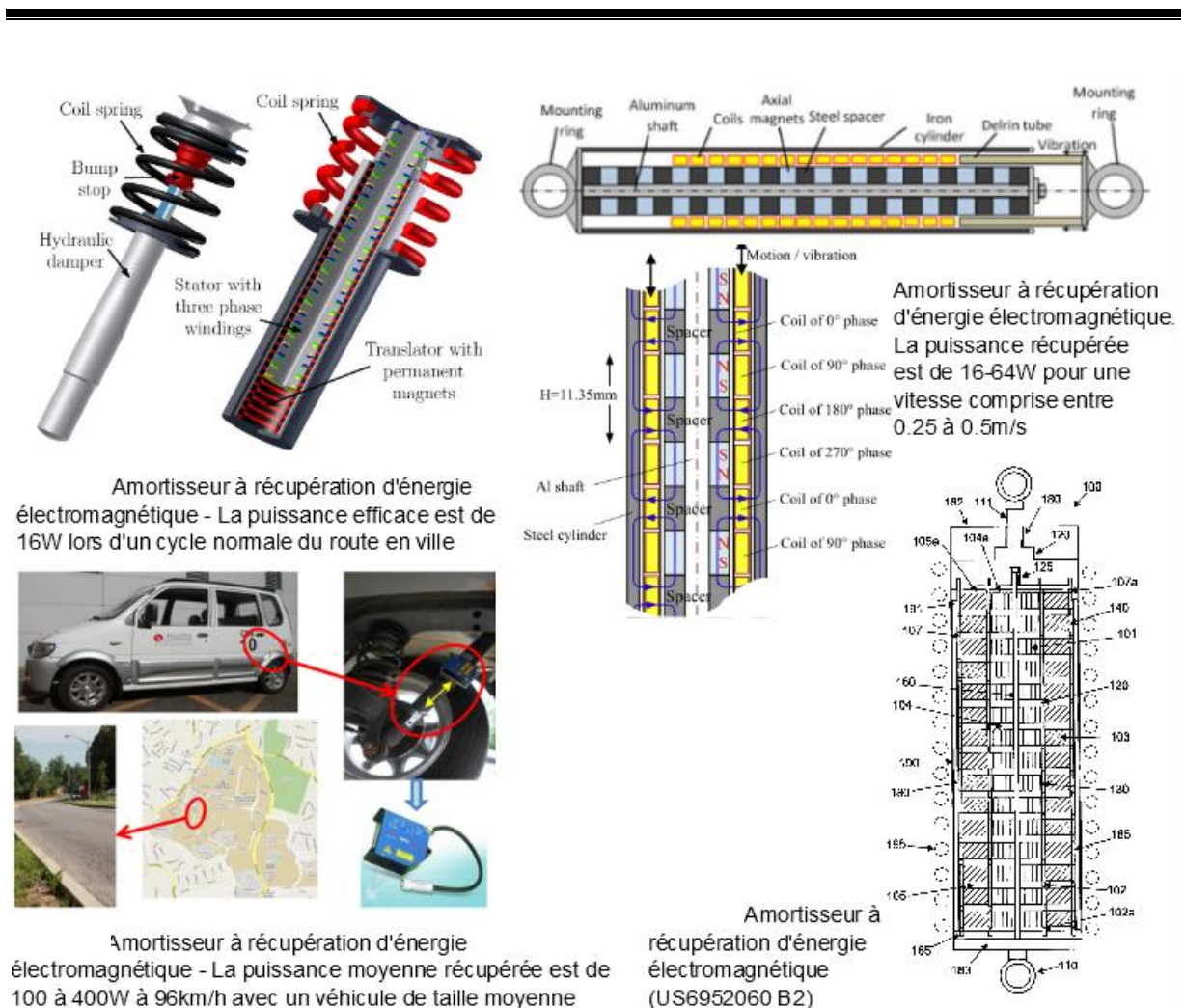


Figure C.1 Exemples de dispositifs de récupération d'énergie électromagnétique intégrables dans les amortisseurs automobiles [123].

Référence	Type structure	Matériau	Masse en bout de poutre Oui/Non	Élément additionnel	Couverture de la poutre par les électrodes	Excitation (accélération, force ou pression)	P_{\max}	U_{\max}	1 ^{er} Fréquence propre
[MAK 11]	Bicouche	PZT	Oui	Butée	Totale	1.73m/s^2	$\sim 4.62\mu\text{W}$	0.129V	155Hz
[JEM 16]	Uni-couche	PZT 5A	Non	-	Partielle	-	$\sim 0.5\text{mW}$	~ 100 à 1000V	100.09Hz
[WIC 12]	Bicouche	PZT	Oui, masse magnétique	Aimants	Totale	-	0.04W (Puissance normalisée)	37V	34.1Hz
[CHA 08]	Uni-couche	PZT	Oui	Aimants	Totale	2.25m/s^2	$240\text{-}280\mu\text{W}$	-	22-32Hz
[LI 16]	Uni-couche	PVDF	Oui	-	Totale	9.81m/s^2	$0.35\mu\text{W}$ (16Hz)	-	15-22Hz
[LUM 16]	Uni-couche	PZT 5A4E	Oui	-	Totale	1m/s^2	50mW	$\sim 13\text{V}$	$\sim 18.5\text{Hz}$
[FRA 17]	Bicouche	PZT 5A	Oui	-	Partielle	-	$\sim 10\text{W/g}$	$\sim 10\text{V/g}$	$\sim 15\text{Hz}$
[TOY 17]	Uni-couche	PZT	Oui	-	Totale	$<0.4\text{g}$	$249\mu\text{W}$ (16Hz)	8.5V	10-20Hz
[LUO 17]	Uni-couche	PZT	Oui	Cuivre	Totale	$0.5\text{-}1.5\text{g}$	$151.3\mu\text{W}$ (14Hz, $<1\text{g}$)	15.28V	9.1-15.1 Hz
[MAN 10b]	Uni-couche	PVDF	Oui	Aimants	Totale	-	$8\text{-}140\mu\text{W}/\text{m}^2\text{s}^{-4}$	$3\text{-}44\text{V}/\text{ms}^{-2}$	3.19-12Hz
[LI 11]	-	PVDF	-	-	-	Vitesse du vent 4m/s	$610\mu\text{W}$	-	3Hz

Tableau C. 1. Récupérateur piézoélectrique à basse fréquence

Référence	Type structure	Matériau	Masse en bout de poutre Oui/Non	Élément additionnel	Couverture de la poutre par les électrodes	Excitation (accélération, force ou pression)	P_{\max}	U_{\max}	1 ^{er} Fréquence propre
[BIS 13]	Multi-couche	PVDF	Non	-	-	0.1-0.2g	$2\mu W$	-	2Hz
[SHU 10]	Uni-couche	PVDF	Non	-	Totale	3 moments de flexions à 3N	$0.0005\mu W$	-	2Hz
[DEM 10]	Bicouche	PZT 5A	Non	-	Partielle	10m/s	$0.1\mu W$	-	1.68Hz
[REN 09]	Bicouche	PZT céramique	Oui	-	Totale	Agité à la main, des balles frappent le piézoélectrique	$47\mu W$	-	1Hz
[PLA 05]	Multicouche	PZT céramique	Non	-	Totale	900N	$265\mu W$	-	1Hz
[REZ 17]	Uni-couche	PZT	Oui	Ressort	Partielle	Amplitude de 0.02	0.06-0.19W	0.25-0.45V	0.9-1.6Hz
[HWA 14]	Uni-couche	PMN-PT simple cristal	Non	-	-	Moment de flexion pour une pression de 0.36%	$6.7\mu W$	-	0.3Hz

Tableau C.2. Récupérateur piézoélectrique à basse fréquence (suite du Tableau 1)

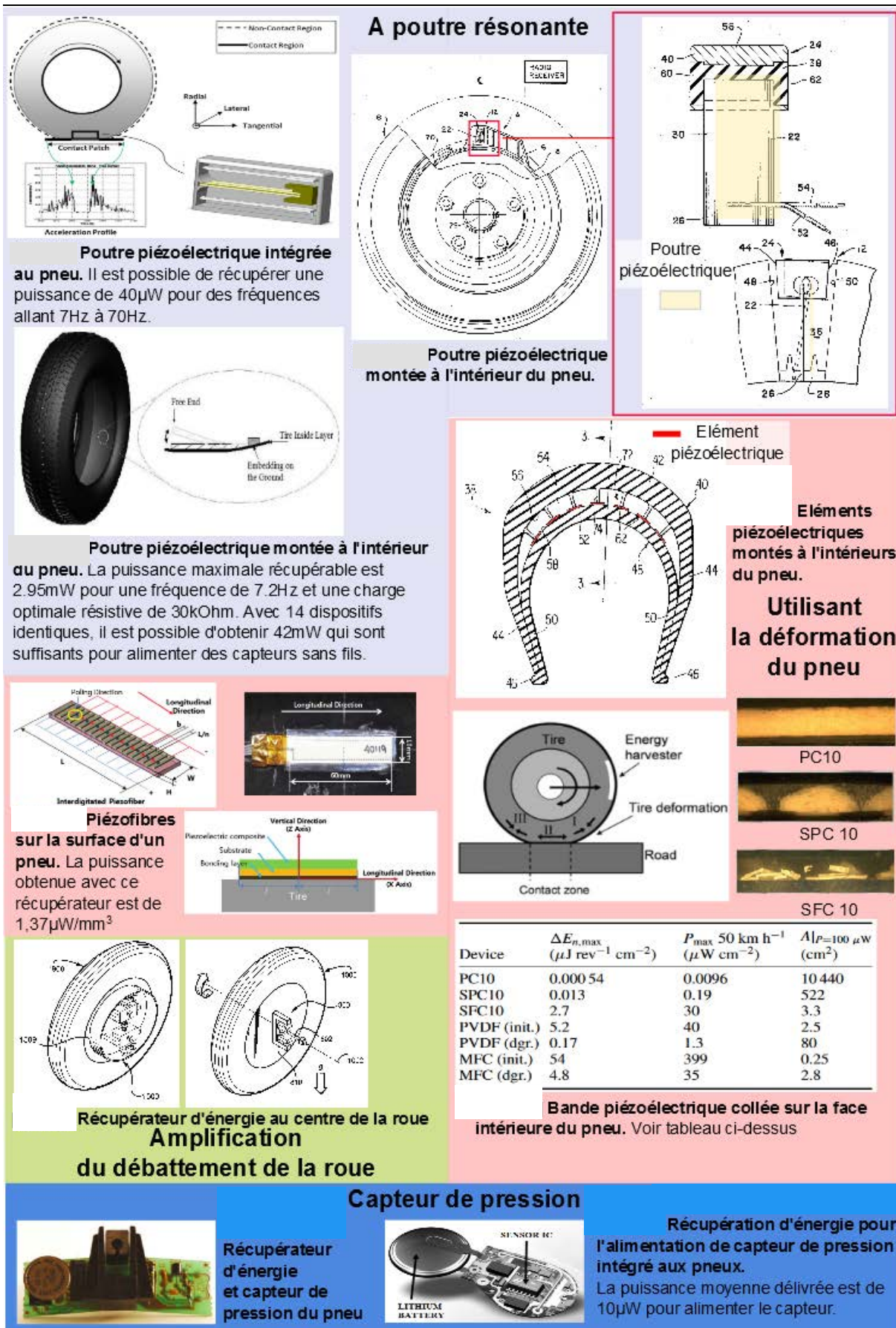


Figure C.2 Exemples de dispositifs de récupération d'énergie piézoélectrique intégrables dans les connexions planes telles que le pneu dans une suspension automobile [134].

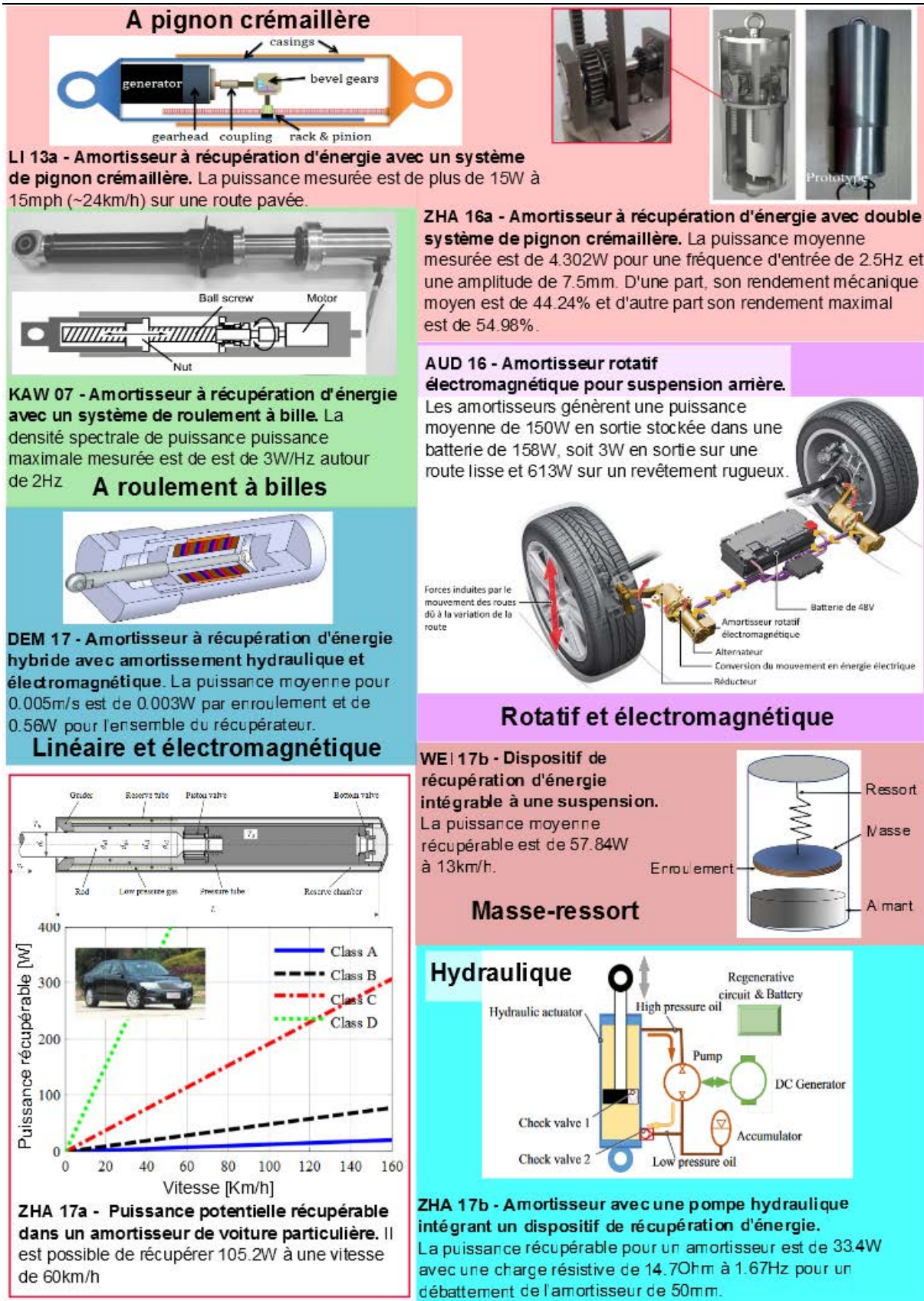


Figure C.3. Exemples de dispositifs de récupération d'énergie intégrables dans les éléments flexibles tels que l'amortisseur dans une suspension automobile [140].

Annexe D

L'APPROCHE MULTI-PHYSIQUE BOND GRAPH & ÉQUATIONS D'UNE POUTRE PIEZOELECTRIQUE BICOUCHE INTEGRABLE A MODELE A PARAMETRES DISTRIBUES

Le langage Bond Graph est un outil graphique défini par Payner en 1961, formalisé puis mis en pratique au cours des années suivantes. Ces principales caractéristiques sont d'être l'intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques. Ce langage donne accès à la représentation des transferts d'énergétique au sein du système et une représentation explicite des relations cause à effet (causalité).

Pour réaliser une modélisation en langage Bond Graph, généralement, il nécessaire d'établir dans un premier temps le Bond Graph à mots du système. Cette représentation est une première étape vers la description énergétique du système et de ses composants. Une analyse physique du système et de ses interactions de puissance permet sa conception. Contrairement aux blocs diagrammes classiques, les entrées et les sorties de chaque sous-système sont définies par leurs variables de puissance (ou généralisées) représentables par des paires effort-flux (e, f) désignées par une demi flèche :

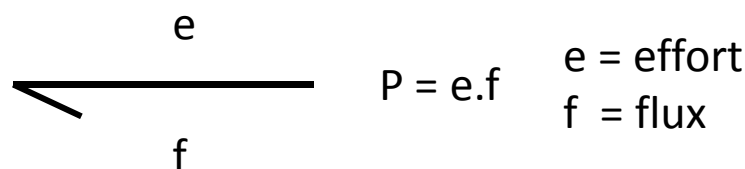


Figure A8. Variables de puissance (ou généralisées)

Pour une application spécifique, les puissances (1, 2) sont nommées comme précédemment :

$$(Tension, courant) = (U, i) \tag{D.1}$$

$$(Force, Vitesse) = (F, \dot{y}) \tag{D.2}$$

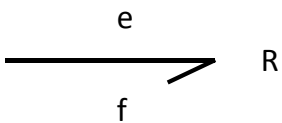
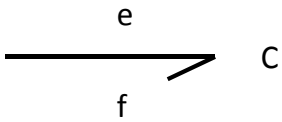
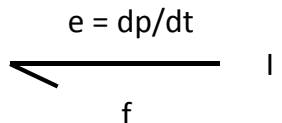
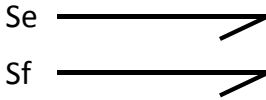
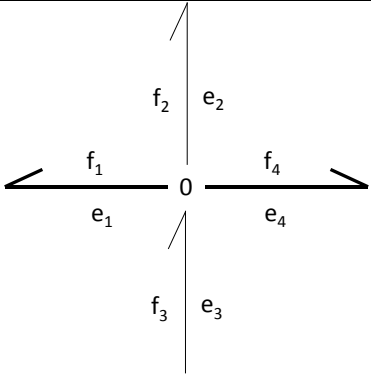
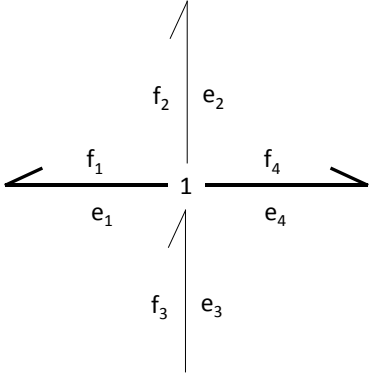
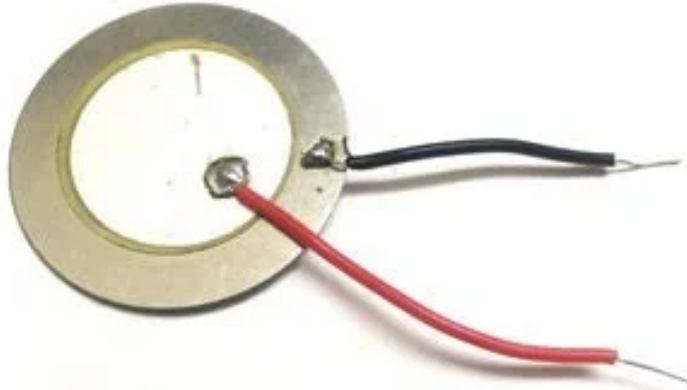
Elément Bond Graph	Représentation Bond Graph	Rôle
Elément R (dissipatif)		modélise tout phénomène physique liant la variable d'effort à la variable de flux <u>comme</u> : Résistance électrique, phénomène de frottement, commutation en électronique, ...
Elément C (accumulateur d'énergie potentielle)		modélise tout phénomène physique liant la variable d'effort et à la variable de déplacement <u>comme</u> : condensateur, ressort, tout phénomène élastique et compressible, ...
Elément I (accumulateur d'énergie cinétique)		modélise tout phénomène physique liant la variable de flux à la variable du moment <u>comme</u> : inductance, masse en translation, inertie, en rotation, ...
Elément Se et Sf		modélise tout phénomène fournissant de la puissance au système Se et Sf sont des entrées non commandées, Mse et Msf sont des entrées commandées
Jonction 0	 $e_1 = e_2 = e_3 = e_4$ $f_1 + f_2 - f_3 + f_4 = 0$	couple les éléments sous un même effort
Jonction 1	 $e_1 + e_2 - e_3 + e_4 = 0$ $f_1 = f_2 = f_3 = f_4$	couple les éléments sous un même flux

Tableau D.1. Éléments Bond Graph



Le matériau piézoélectrique est défini par les équations constitutives de la piézoélectricité (1), (2) et (3) pour le mode 31. Où, T est la contrainte mécanique, S est la déformation mécanique, E est le champ électrique, D est le déplacement électrique. Les matériaux piézoélectriques sont supposés isotropes avec une même densité ρ_p .

Le tenseur des contraintes d'une couche de matériau piézoélectrique suivant la direction longitudinale (l'axe \vec{x}) est T_1^p et suivant la direction transverse T_5^p . C_{11}^E et C_{55}^E sont le module de Young du matériau piézoélectrique suivant la direction longitudinale et transverse. e_{31} est une constante piézoélectrique et E_3 est le champ électrique suivant la direction \vec{y} . S_1^p et S_5^p sont les tenseurs de déformations du matériau.

D'après les conditions aux limites de cette poutre, les équations consécutives de la piézoélectricité dans le matériau piézoélectrique (1), (2), (3) sont les suivantes :

$$T_1^p = C_{11}^E S_1^p - e_{31} E_3 \quad (D.3)$$

$$T_5^p = C_{55}^E S_5^p \quad (D.4)$$

La déformation axiale du matériau piézoélectrique est représentée par une des relations consécutives de la piézoélectricité donnant le déplacement électrique D_3 suivant l'axe \vec{y} (3).

$$D_3 = e_{31}S_1^p + \varepsilon_{33}^S E_3 \quad (D.5)$$

D_3 est le déplacement électrique dans le composant. ε_{33}^S est la permittivité du matériau piézoélectrique pour une contrainte constante.

$$\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \quad (D.6)$$

Les tenseurs des contraintes T_1^S et T_5^S du matériau inerte (non piézoélectrique) sont les suivants :

$$T_1^S = C_{11,S}S_1^S \quad (D.7)$$

$$T_5^S = C_{55,S}S_5^S \quad (D.8)$$

D'après les équations fondamentales de la dynamique, l'équation mécanique d'une poutre piézoélectrique bicouche avec terme d'amortissement permet le couplage du déplacement transverse $y_p(x, t)$ de la poutre et de la tension $v(t)$.

$$\begin{aligned} m_{eff} \frac{\partial^4 y_p(x, t)}{\partial t^4} + c_s I \frac{\partial^5 y_p(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial y_p(x, t)}{\partial t} + Y I_t \frac{\partial^4 y_p(x, t)}{\partial x^4} \\ + v v(t) \frac{\partial(\delta(x) - \delta(x - L))}{\partial x} = - \left(m_{eff} + M \delta(x - L) \right) \frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (D.9)$$

$$v = \frac{e_{31}b}{2t_p} \left(\frac{t_s^2}{4} - \left(t_p + \frac{t_s}{2} \right)^2 \right) \quad (D.10)$$

Le terme $\delta(x)$ correspond à un élément de la section transverse. m_{eff} est la masse de la poutre (matériau inerte et matériaux piézoélectriques) en fonction de l'expression

suivant $m_{eff} = \rho_s S_s + 2\rho_p S_p$. M est la masse en bout de poutre. YI_t est l'expression du moment d'inertie de la poutre.

$$YI_t = C_{11}^S \frac{bt_s^3}{12} + 2C_{11}^E b \left(\frac{t_p^3}{12} + t_p \left(\frac{t_p + t_s}{2} \right)^2 \right) \quad (D.11)$$

v est le terme de couplage liant l'expression mécanique et électrique de la poutre.

D'après les lois de Kirchhoff, l'équation électrique suivante est obtenue:

$$i(t) = \frac{C_0}{2} \dot{V}(t) + \frac{V(t)}{R_{load}} \quad (D.12)$$

C_0 est la capacité interne du matériau piézoélectrique soit $C_0 = \varepsilon_{33}^S \frac{bL}{t_p}$. Cette équation correspond à une configuration dont les deux couches piézoélectriques sont connectées en série.

Le terme de découplage $y_p(x, t)$ s'exprime de la manière suivante :

$$y_p(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) y_{p_r}(t) \quad (D.13)$$

Ce terme est intégré à l'équation mécanique et électrique. Pour simplifier l'écriture de l'expression mécanique (10) tous les termes sont intégrés une fois ainsi que le terme $\phi_r(x)$.

$$\begin{aligned} m_{eff} \left(\int_0^L \phi_r(x)^2 dx \right) \frac{d^2 y_{p_r}(t)}{dt^2} + c_s I \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{d^5 \phi_r(x) y_{p_r}(t)}{dx^4 dt} dx \right) \\ + c_a \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{dy_{p_r}(t)}{dt} dx \right) + YI_t \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{\partial^4 \phi_r(x)}{\partial x^4} dx \right) y_{p_r}(t) \\ + v \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{\partial(\delta(x) - \delta(x-L))}{\partial x} dx \right) V(t) \\ = - \left(\int_0^L \phi_r(x) (m_{eff} + M\delta(x-L)) dx \right) \frac{d^2 y_i(t)}{dt^2} \end{aligned} \quad (D.14)$$

L'expression (11) peut aussi s'exprimer suivant la forme suivante :

$$\begin{aligned}
& m_{eff} \left(\int_0^L \phi_r(x)^2 dx \right) \frac{d^2 y_{p_r}(t)}{dt^2} + c_s I \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{d^5 \phi_r(x) y_{p_r}(t)}{dx^4 dt} dx \right) \\
& + c_a \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{dy_{p_r}(t)}{dt} dx \right) + Y I_t \left(\int_0^L \phi_r(x) \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx \right) y_{p_r}(t) \quad (\mathbf{D.15}) \\
& - v \phi_r(L) V(t) = - \left(m_{eff} \int_0^L \phi_r(x) dx + M \phi_r(L) \right) \frac{d^2 y_i(t)}{dt^2}
\end{aligned}$$

De même, l'équation électrique doit être exprimée en fonction du terme de couplage inclus dans l'expression de $i(t)$.

$$\frac{C_0}{2} \dot{V}(t) + \frac{V(t)}{R_{load}} = i(t) \quad (\mathbf{D.16})$$

$i(t)$ est l'expression de la source de courant :

$$i(t) = \sum_{r=1}^{\infty} A_r \frac{dy_{p_r}(t)}{dt} \quad (\mathbf{D.17})$$

$$A_r = -e_{31} t_{ps} b \int_0^L \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} dx \quad (\mathbf{D.18})$$

$$A_r = - \frac{e_{31} (t_p + t_s) b}{2} \frac{d \phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L} \quad (\mathbf{D.19})$$

t_{ps} est la distance entre l'axe neutre et le centre du matériau piézoélectrique. t_p et t_s sont respectivement l'épaisseur de la couche piézoélectrique et du matériau inerte.

La résolution de ce système de deux équations (mécanique et électrique) est non triviale. Les fréquences propres introduites par $\phi_r(x)$ sont exprimables en fonction de cette fonction :

$$\phi_r(x) = \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \cosh \frac{\lambda_r}{L} x + \zeta_r \left(\sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sinh \frac{\lambda_r}{L} x \right) \quad (\mathbf{D.20})$$

Où ζ_r est obtenu avec l'expression suivante :

$$\zeta_r = \frac{\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r + \lambda_r \left(\frac{M}{m_{eff} L} \right) (\cos \lambda_r - \cosh \lambda_r)}{\cos \lambda_r + \cosh \lambda_r - \lambda_r \left(\frac{M}{m_{eff} L} \right) (\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r)} \quad (D.21)$$

Les conditions d'orthogonalités données par les équations (19) et (20), doivent être respectées afin de résoudre ce système d'équation (18) [ERT 11] et de trouver les solutions de l'équation (21).

$$\int_0^L \phi_r(x) m_{eff} \phi_s(x) dx + \phi_s(L) M \phi_r(L) + \left. \frac{d\phi_s(x)}{dx} I_t \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} = \delta_{rs} \quad (D.22)$$

$$\int_0^L \phi_s(x) Y I_t \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx - \phi_s(L) Y I_t \left. \frac{d^3 \phi_r(x)}{dx^3} \right|_{x=L} + \left. \frac{d\phi_s(x)}{dx} Y I_t \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} \right|_{x=L} = y_{p_r}^2 \delta_{rs}$$

Avec δ_{rs} le symbole de Kronecker. $\delta_{rs} = 1$, lorsque $r = s$, et égal à zéro lorsque $r \neq s$.

L'équation caractéristique pour trouver les fréquences propres (λ_r pour chaque mode r) est la suivante :

$$\begin{aligned} 1 + \cos \lambda_r \cosh \lambda_r + \frac{\lambda M}{m_{eff} L} (\cos \lambda_r \sinh \lambda_r - \sin \lambda_r \cosh \lambda_r) \\ - \frac{\lambda_r^3 I_t}{m_{eff} L^3} (\cosh \lambda_r \sin \lambda_r - \sinh \lambda_r \cos \lambda_r) + \frac{\lambda_r^4 I_t M}{m_{eff}^2 L^4} (1 - \cos \lambda_r \cosh \lambda_r) \\ = 0 \end{aligned} \quad (D.23)$$

De plus, l'équation modale du mouvement obtenue à partir de l'équation (7) peut être réduite sous forme canonique (22).

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{p_r}(t) + 2\xi_r \omega_r \dot{y}_{p_r}(t) + \omega_r^2 y_{p_r}(t) + v \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} v(t) \\ = - \left(m_{eff} \int_0^L \phi_r(x) dx + M \phi_r(L) \right) \frac{d^2 y_i(t)}{dt^2} \end{aligned} \quad (D.24)$$

Les pulsations propres du système s'expriment en fonction des solutions de l'équation (21) respectant les conditions d'orthogonalités (19) et (20) du moment d'inertie de la poutre, de la masse de la poutre et de sa longueur. Chaque solution de l'équation (21) permet la déduction des fréquences propres ($f_r = \frac{\omega_r}{2\pi}$) de la poutre à partir de l'expression des pulsations propres du système ω_r (23).

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI_t}{m_{eff} L^2}} \quad (D.25)$$

$$\chi_r = v \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L} \quad (D.26)$$

Les effets de la déformation $c_s I_t$ et de l'amortissement visqueux de l'air est c_a sont remplacés par le coefficient mécanique ξ_r . ξ_r est spécifique au mode et est déterminé expérimentalement.

$$\xi_r = \frac{c_s I_t \omega_r}{2YI_t} + \frac{c_a}{2m_{eff} \omega_r} \quad (D.27)$$

D'après (12) et (13), la tension de sortie des éléments piézoélectriques aux bornes d'une résistance R_{load} en fonction de l'ensemble des fréquences propres de la poutre peut être déduite (25). La rotation des matériaux de la poutre n'est pas prise en compte.

$$V(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j \omega A_r F_{meff}}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j \omega \xi_r \omega_r}}{\frac{1}{R_{load}} + \frac{j \omega C_0}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j \omega A_r \chi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j \omega \xi_r \omega_r}} e^{j \omega t} \quad (D.28)$$

Sachant que la puissance récupérée est déduite de l'équation (25) en fonction d'une charge résistive R_{load} est la suivante :

$$P(t) = \frac{V(t)^2}{R_{load}} \quad (D.29)$$