



**HAL**  
open science

# Conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes

Valérie Dupé

► **To cite this version:**

Valérie Dupé. Conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes. Electronique. université Bordeaux I, 2011. Français. NNT : . tel-00858692

**HAL Id: tel-00858692**

**<https://theses.hal.science/tel-00858692>**

Submitted on 10 Sep 2013

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

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



# THÈSE

PRÉSENTÉE A

## L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR

Par Valérie DUPÉ

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Électronique

### CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE DE MICROSYSTÈMES AUTONOMES

Directeur de recherche : M. Xavier Fischer - I2M UMR CNRS 5295/ESTIA, Bidart  
Encadrant de recherche : M. Renaud Briand - IMS UMR CNRS 5218/ESTIA, Bidart

Soutenue le : 28 novembre 2011

Devant la commission d'examen formée de :

|                       |                           |                          |                    |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|
| M. BERNARD Alain      | Professeur                | École Centrale de Nantes | Président          |
| M. COUPELLIER Daniel  | Professeur                | ENSIAME                  | Rapporteur         |
| M. MARÉCHAL Yves      | Professeur                | Grenoble INP             | Rapporteur         |
| Mme DUFOUR Isabelle   | Professeure               | Université Bordeaux 1    | Examinatrice       |
| M. ESCRIBA Christophe | Maître de conférences     | INSA, LAAS-CNRS          | Examinateur        |
| M. SÉBASTIAN Patrick  | Maître de conférences HDR | Université Bordeaux 1    | Examinateur        |
| M. BRIAND Renaud      | Directeur R&D             | Aquitaine Électronique   | Encadrant de thèse |
| M. FISCHER Xavier     | Enseignant chercheur HDR  | ESTIA                    | Directeur de thèse |



---

*À mes parents,  
À mes frères et sœurs,  
À Christophe*

*La force motrice plus puissante que l'électricité,  
la vapeur et l'énergie atomique, c'est la volonté*  
***Albert Einstein***

*On se lasse de tout excepté d'apprendre*  
***Virgile***

---

---

---

---

# La métaphore de la grenouille

*Il était une fois une course de grenouilles.*

*L'objectif était d'arriver en haut d'une grande tour.*

*Beaucoup de gens se rassemblèrent pour les voir courir.*

*En fait, les gens ne croyaient pas possible que les grenouilles atteignent le sommet et ne cessaient de crier : " Inutile ! Elles n'y arriveront jamais ! "*

*Les grenouilles commencèrent peu à peu à se décourager. Les gens continuaient : "Vraiment pas la peine ! Elles n'y arriveront jamais ! "*

*Peu à peu, les grenouilles se découragèrent totalement, sauf une qui continuait envers et contre tout ...*

*À la fin, toutes abandonnèrent, sauf cette grenouille qui, seule et au prix d'un énorme effort, rejoignit la cime.*

*L'une d'entre elles s'approcha pour lui demander comment elle avait fait pour terminer l'épreuve.*

*Elle s'aperçut alors que la grenouille qui était arrivée au sommet était sourde.*

## **Moralité**

***Soyez toujours sourd quand quelqu'un vous dit que vous ne pouvez réaliser vos rêves.***

*Anonyme*

---

---

---

---

# Remerciements

Cette thèse a été pour moi l'opportunité d'affiner et d'accroître mes connaissances et de m'enrichir tant professionnellement que personnellement grâce aux diverses personnes que j'ai côtoyées et qui m'ont transmis leur passion du métier de la recherche. Après ces trois années, le temps est venu de mettre un terme à ma thèse en remerciant les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à son bon déroulement.

Tout d'abord, je tiens à remercier les Professeurs Yves Maréchal et Daniel Coutellier d'avoir accepté de juger ce travail en tant que rapporteurs, ainsi que le Professeur Alain Bernard d'avoir accepté de présider mon jury de thèse. Je remercie également Isabelle Dufour, Patrick Sébastian et Christophe Escriba pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux de recherche en acceptant de participer à mon jury de thèse. Je remercie chacun d'eux pour les précieux conseils qui m'ont permis d'améliorer le présent manuscrit et d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon encadrant de thèse, Renaud Briand, enseignant-chercheur à l'ESTIA et responsable du département de R&D, au sein de la société Aquitaine Électronique, pour m'avoir accordé sa confiance au cours de mes stages s'inscrivant dans le cursus de l'école d'ingénieurs ESTIA et ensuite dans le cadre de ma thèse, malgré les multiples rebondissements lors de la recherche de financements. Je le remercie de m'avoir accompagnée, conseillée et aidée à découvrir le monde de la recherche et de m'avoir transmis une partie de ses savoirs et savoir-faire. Merci de m'avoir consacré du temps même lorsque tu n'en avais pas, au détriment de certaines heures de sommeil ou de détente.

J'exprime également toute ma gratitude à mon directeur de thèse, Xavier Fischer, enseignant-chercheur HDR à l'ESTIA pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse pluridisciplinaire, pour m'avoir guidée et soutenue durant ces trois années de travail. Je le remercie d'avoir suivi ce travail avec autant de rigueur que de sympathie et de m'avoir formé aux principaux aspects des métiers de la recherche et de l'enseignement.

J'adresse ensuite mes remerciements à Monsieur Jean-Roch Guiresse, Directeur de l'ESTIA, pour m'avoir permis d'effectuer ma thèse au sein de son établissement.

Je tiens à souligner l'estime que je porte à Patrick Sébastian pour son soutien et son encadrement scientifique qui m'ont été bénéfiques pour mener à bien ce travail. Je le remercie de m'avoir accordé de son temps et permis de progresser dans mes recherches.

Je remercie aussi mes collègues de l'équipe de recherche MiCA, Guillaume Terrasson et Iván Estévez, pour leur aide et leur sympathie tout au long de ma thèse, ainsi que pour leur implication dans la préparation et l'organisation de la soutenance.

Je remercie Bruno Bluteau, collègue de bureau du mardi, pour avoir partagé une partie de ses connaissances et de sa culture et pour m'avoir parfois aidée à dépasser mes appréhensions.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes collègues d'ESTIA Recherche qui ont su m'apporter leur soutien tout au long de ce travail et avec lesquels j'ai pu passer de très bons moments au bureau et ailleurs.

---



Je remercie tout particulièrement les doctorants et jeunes docteurs de l'ESTIA pour les bons moments passés ensemble : Olivier Hugues et Sébastien Bottecchia pour leurs discussions passionnées en informatique et leur admiration inconditionnelle face aux produits de la pomme ; Aitor Etxeberria pour sa gentillesse, pour m'avoir permis de pratiquer l'espagnol et d'apprendre quelques notions de la langue Basque ; Alexis Clay pour ses chansons qui restent en tête ; Olivier Pialot, toujours accompagné de sa tasse de café, pour ses discussions parfois longues.

Merci à Stéphane Kreckelbergh, Ionel Vechiu, Alexis Clay, Guillaume Terrasson, Guillaume Rivière, Nicolas Verdon pour les parties de pala dans une ambiance toujours bon enfant, avec parfois quelques taquineries.

Je remercie également les différents stagiaires qui ont travaillé à ESTIA Recherche.

Pour résumer, je tiens à exprimer ma profonde sympathie à tous ceux que j'ai pu côtoyer et qui, par leurs attentions, leurs compétences et leurs conseils, m'ont permis de réaliser ce travail de recherche dans de bonnes conditions.

Je voudrais maintenant faire un clin d'œil particulier Monsieur Gérard Abad, pour ses conseils durant ma scolarité et même ensuite. Peut-être que le chemin que j'ai suivi a été influencé par certaines de ses paroles. C'est promis, si je ne sais pas où je vais, je me souviendrai d'où je viens !

Je remercie Morgane avec qui j'ai partagé des moments remplis d'innocence et d'insouciance dans la cour de récréation de l'école primaire de Biaudos. Je la remercie pour son soutien à travers nos échanges épistolaires.

Je remercie également Alice, Alexandra, Stéphanie, Agnès et Denise pour leur amitié et leur bonne humeur.

Merci à tous mes amis, aussi bien proches que lointains, sans oublier tous les membres du club de pelote de Saint Laurent de Gosse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents qui ont toujours tout sacrifié pour leurs enfants et qui nous ont toujours soutenus dans nos choix. Je les remercie pour leur soutien sans faille, leur présence, leur confiance et les valeurs qu'ils m'ont transmises. Je ne serais jamais arrivée là sans eux.

Je remercie également mes frères, Pascal et Alain, et ma sœur Francine pour tous les bons moments que nous avons passé ensemble et les nombreux à venir, pour leur soutien et pour tout ce qu'ils ont pu m'apporter pour franchir les obstacles les plus difficiles.

J'ai également une pensée pour mes neveux, Lucas et Enzo (et les futurs à venir), qui apportent de la joie de vivre au quotidien.

Un grand merci à toute ma famille.

---

## Remerciements

---

J'adresse mes remerciements les plus sincères à Christophe pour sa présence, son soutien sans faille, sa patience et ses encouragements tout au long de ces travaux. Merci pour ton aide, pour savoir trouver les mots qu'il faut quand il le faut et pour ta présence à mes côtés.

Une pensée particulière pour ma grand-mère, qui nous a quittés trop tôt.

Enfin, merci à tous ceux qui ont une place ici et que j'ai pu oublier.

---



# CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE DE MICROSYSTEMES AUTONOMES

## Résumé

Toute action naturelle crée de l'énergie perdue qui pourrait être exploitée pour alimenter nos appareils électriques et mobiles. Nos environnements physiques disposent d'un nombre élevé de micro-sources d'énergies ; certes chacune est de faible puissance, mais leur multiplicité pourrait s'avérer significative, notamment dans le cadre du fonctionnement de microsystemes.

C'est le principe précédent qui a conduit nos travaux sur la problématique de la conception de **microsystemes autonomes**. Ainsi, pour être innovante, l'ingénierie de microsystemes doit à la fois s'appuyer sur la culture de l'électronique, de la mécanique mais aussi de l'énergétique. Le processus de conception est fortement pluridisciplinaire et son efficacité réside dans la capacité à mettre en œuvre des méthodologies et des outils :

- de **conception collaborative**,
- de capitalisation des **connaissances techniques**,
- d'ingénierie **multi-physique**,
- d'ingénierie **intégrée**.

Sur la base de ces fondamentaux, nous avons développé un outil d'aide à la conception. La méthodologie sous-jacente permet :

- 1- l'analyse et la structuration d'un problème de conception d'un microsysteme autonome** : cette phase conduit l'identification, la description fonctionnelle et environnementale du système et de son environnement.
- 2- la modélisation des connaissances** : une analyse architecturale conduit à la description des composants et des interactions liées au microsysteme (directement ou indirectement) puis à la modélisation des comportements,
- 3- la qualification énergétique et le couplage physique** : la réutilisation structurée des modèles de connaissances est pilotée pour coupler les modèles physiques et décrire les sources, les puits et les mécanismes énergétiques des environnements,
- 4- la conduite de la recherche de concepts innovants** : la base de connaissances, les critères de qualification et la description fonctionnelle préalablement construits sont agencés dans une seule méthode de conception virtuelle pour rechercher des concepts de solutions innovants,
- 5- le pré-dimensionnement** : tout en assurant l'intégration des outils spécialisés de simulation (méthode des éléments finis et simulation fonctionnelle), le pré-dimensionnement de microsystemes autonomes est supportée selon un schéma synthétique, assurant un raisonnement abductif (ou bottom-up).

La conjonction des raisonnements physiques, l'intégration des méthodes et des cultures métiers, l'exploration virtuelle des espaces de solutions et la modélisation constituent les bases d'un nouveau moyen d'aide à la conception de microsystemes autonomes. Cette approche a été déployée pour la conception d'un capteur piézoélectrique autonome.

**Mots-clés** : conception pluridisciplinaire et collaborative, conception intégrée, modélisation de système, récupération d'énergie, microsources d'énergie, modèle de connaissance, couplage multi-physique, microsysteme autonome.

---

---

---

## MULTIDISCIPLINARY DESIGN OF AUTONOMOUS MICROSYSTEMS

### Summary

Any natural action creates lost energy which could be exploited to supply our electrical and mobile appliance. Our physical environments have a high number of micro-energy sources. Admittedly, each one provides low power but their multiplicity could be significant, in particular within the framework of the microsystem operation.

The previous observation guided our works towards the problematic of **autonomous microsystem design**. Thus, to be innovative, microsystems engineering must lean on electronic, mechanical and energy domains. The design process is highly multidisciplinary and its efficiency depends on the ability to implement methods and tools:

- of **collaborative design**
- of capitalization of **technical knowledge**
- of **multiphysic engineering**
- of **integrated design**.

Based on these fundamentals, we developed a design support tool. The underlying methodology enables:

- 6- the design problem analysis and structuring of an autonomous microsystem:** this phase leads to the identification and functional and environmental description of the system and its environment
- 7- the knowledge modelling:** an architectural analysis gives the description of components and interactions related to the microsystem (directly or indirectly). Then, it leads to a behaviour modelling.
- 8- the energy qualification and physical coupling:** the structured reuse of knowledge models is guided to couple physical models and describe the sources, sinks and the energy mechanism of the environment.
- 9- the control of innovative concept search:** the knowledge base, qualification criteria and functional description, previously constructed, are combined in an unique virtual design approach dedicated to search innovative concepts as a solution
- 10- the predimensioning:** this phase ensures the integration of specific simulation tools (finite elements method and functional simulation). The predimensioning of autonomous microsystems is supported by a synthetic scheme based on an abductive reasoning (bottom-up).

The combination of physical reasoning, the integration of methods and engineering domains, the virtual exploration of solution spaces and the modelling represent a new way to support autonomous microsystem design. This approach was applied to the design of an autonomous piezoelectric sensor.

**Keywords:** multi-domain and collaborative design, integrated design, system modelling, energy harvesting, micro-energy sources, knowledge model, multiphysic coupling, autonomous microsystem.

---

---

---

---

# Table des matières

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

## **CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART : CONCEPTION DE MICROSYSTÈMES AUTONOMES**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1.1. La conception de produits .....</b>                                 | <b>6</b>  |
| 1.1.1. Types de raisonnement et approches de conception .....               | 10        |
| 1.1.2. Modélisation descendante (déductive ou top-down) .....               | 11        |
| 1.1.3. Modélisation ascendante (abductive ou bottom-up) .....               | 11        |
| 1.1.4. Approche hybride (inductive ou meet-in the middle).....              | 12        |
| 1.1.5. Outils pour la conception de produits .....                          | 13        |
| <b>1.2. Les microsyntèmes .....</b>   | <b>15</b> |
| 1.2.1. Historique.....  | 15        |
| 1.2.2. Définition et architecture .....                                     | 17        |
| 1.2.3. Caractéristiques des microsyntèmes.....                              | 19        |
| 1.2.4. La conception actuelle de microsyntèmes.....                         | 20        |
| 1.2.5. Complexité de conception des microsyntèmes .....                     | 20        |
| <b>1.3. Énergie et microsyntèmes.....</b>                                   | <b>22</b> |
| 1.3.1. Définition de la notion d'autonomie .....                            | 22        |
| 1.3.2. Récupération d'énergie .....   | 23        |
| 1.3.3. Sources d'énergie et principes de conversion.....                    | 25        |
| 1.3.3.1. Différentes sources d'énergie ambiante .....                       | 25        |
| 1.3.3.2. Energie générée par l'Homme .....                                  | 29        |
| 1.3.3.3. Bilan sur les sources d'énergie et les syntèmes de conversion..... | 29        |
| 1.3.4. Stockage de l'énergie.....   | 31        |
| 1.3.4.1. Différents moyens de stockage.....                                 | 31        |
| 1.3.4.2. Tableau comparatif des moyens de stockage de l'énergie .....       | 33        |
| <b>1.4. Conclusion.....</b>   | <b>34</b> |



## **CHAPITRE II : PROBLÉMATIQUES SUR LA CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE DE MICROSYSTEMES AUTONOMES**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.1. Conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes.....</b>                            | <b>36</b> |
| 2.1.1. Approche pluridisciplinaire .....   | 36        |
| 2.1.2. Processus de conception pluridisciplinaire de microsystemes.....                              | 38        |
| 2.1.3. Notre approche : la conception intégrée de microsystemes.....                                 | 39        |
| <b>2.2. Modélisation du problème de conception.....</b>  | <b>40</b> |
| 2.2.1. Analyse et structuration du problème .....  | 40        |
| 2.2.2. Notre modélisation du problème de conception : description par l'analyse du cycle de vie..... | 41        |
| 2.2.3. Notre modélisation du problème de conception : description architecturale.....                | 42        |
| <b>2.3. Qualification énergétique et modélisation système .....</b>                                  | <b>47</b> |
| 2.3.1. Spécificités énergétiques.....  | 47        |
| 2.3.2. Notre approche : qualification énergétique.....   | 50        |
| <b>2.4. Pré-dimensionnement de microsystemes autonomes .....</b>                                     | <b>51</b> |
| 2.4.1. Notre solution logicielle.....  | 51        |
| 2.4.2. Outil développé.....  | 51        |
| <b>2.5. Cas de validation : contexte et définition du besoin.....</b>                                | <b>53</b> |
| <b>2.6. Conclusions .....</b>  | <b>57</b> |

## **CHAPITRE III : NOTRE DÉVELOPPEMENT : MODÉLISATION DU PROBLÈME DE CONCEPTION ET QUALIFICATION ÉNERGÉTIQUE**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.1. Introduction .....</b>                            | <b>60</b> |
| <b>3.2. Notre analyse du problème de conception .....</b> | <b>60</b> |
| 3.2.1. Microsystemes autonomes embarqués.....             | 60        |
| 3.2.2. Structuration des systemes énergétiques.....       | 61        |
| 3.2.3. Représentation organique.....                      | 61        |
| 3.2.4. Décomposition fonctionnelle .....                  | 62        |
| 3.2.5. Décomposition Source/Système/Puits .....           | 63        |
| 3.2.5.1. Source .....                                     | 64        |
| 3.2.5.2. Système.....                                     | 64        |
| 3.2.5.3. Puits .....                                      | 66        |
| <b>3.3. Modélisation du problème de conception.....</b>   | <b>67</b> |
| 3.3.1. Notre méthodologie .....                           | 67        |
| 3.3.1.1. Définition du contexte et du besoin.....         | 67        |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 3.3.1.2.    | Décomposition fonctionnelle.....  | 67        |
| 3.3.1.3.    | Décomposition organique.....  | 68        |
| 3.3.2.      | Outil développé.....  | 69        |
| 3.3.3.      | Cas de validation : modélisation du problème de conception.....             | 72        |
| 3.3.3.1.    | Décomposition fonctionnelle.....  | 72        |
| 3.3.3.2.    | Décomposition organique.....  | 73        |
| <b>3.4.</b> | <b>Qualification énergétique et modélisation système .....</b>              | <b>75</b> |
| 3.4.1.      | Notre méthodologie .....  | 75        |
| 3.4.1.1.    | Qualification des sources d'énergie et des puits .....                      | 75        |
| 3.4.1.2.    | Sélection de l'architecture du récupérateur d'énergie .....                 | 80        |
| 3.4.2.      | Outil développé.....  | 84        |
| 3.4.3.      | Cas de validation : qualification énergétique et modélisation système ..... | 85        |
| 3.4.3.1.    | Qualification des sources.....  | 85        |
| 3.4.3.2.    | Sélection de l'architecture du système.....                                 | 87        |
| <b>3.5.</b> | <b>Conclusions .....</b>  | <b>91</b> |

## **CHAPITRE IV : NOTRE DÉVELOPPEMENT : ÉTAPE DE PRÉ-DIMENSIONNEMENT**

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| <b>4.1.</b> | <b>Pré-dimensionnement .....</b>                              | <b>94</b>  |
| 4.1.1.      | Introduction.....   | 94         |
| 4.1.2.      | Notre approche : modélisation système .....                   | 95         |
| 4.1.2.1.    | Présentation globale de l'outil de simulation .....           | 95         |
| 4.1.2.2.    | Présentation des différentes entités.....                     | 96         |
| 4.1.2.3.    | Recherche d'une solution satisfaisante .....                  | 102        |
| 4.1.3.      | Outil développé.....  | 103        |
| <b>4.2.</b> | <b>Cas de validation : résultats de simulation .....</b>      | <b>106</b> |
| 4.2.1.      | Récupération d'énergie mécanique des vibrations .....         | 106        |
| 4.2.1.1.    | Conversion électromagnétique .....                            | 107        |
| 4.2.1.2.    | Conversion piézoélectrique .....                              | 108        |
| 4.2.2.      | Récupération d'énergie solaire .....                          | 111        |
| 4.2.3.      | Conclusion sur l'architecture du récupérateur d'énergie ..... | 112        |
| 4.2.4.      | Recherche d'une solution satisfaisante.....                   | 112        |
| 4.2.4.1.    | Recherche des composants les plus adaptés.....                | 112        |
| 4.2.4.2.    | Recherche des paramètres les plus adaptés .....               | 113        |
| <b>4.3.</b> | <b>Conclusions .....</b>                                      | <b>115</b> |

## CHAPITRE V : CONCEPTION DÉTAILLÉE D'UN RÉCUPÉRATEUR PIÉZOÉLECTRIQUE ET INTÉGRATION AUX MICROSYSTEMES

|  |            |
|--|------------|
| <b>5.1. Conception détaillée et intégration .....</b>  | <b>118</b> |
| 5.1.1. Récapitulatif des résultats précédents pour le cas de validation .....                    | 118        |
| 5.1.2. Objectifs .....   | 120        |
| 5.1.3. Notre méthode.....  | 120        |
| 5.1.3.1. Modèles génériques réutilisables.....   | 120        |
| 5.1.3.2. Interactions entre domaines et acteurs.....   | 121        |
| 5.1.4. Application à la conception d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique.....              | 122        |
| 5.1.4.1. Conversion piézoélectrique .....  | 122        |
| 5.1.4.2. Configurations usuelles .....   | 123        |
| 5.1.4.3. Sélection du matériau .....   | 124        |
| 5.1.4.4. Modèles analytiques : différents niveaux de modélisation.....                           | 125        |
| 5.1.4.5. Étapes de modélisation et de simulation.....  | 130        |
| <b>5.2. Conception détaillée pour le cas de validation : à partir de composants existants ..</b> | <b>131</b> |
| 5.2.1. Matériau .....  | 131        |
| 5.2.2. Conditions initiales et conditions aux limites .....                                      | 132        |
| 5.2.3. Analyse de la partie mécanique .....  | 133        |
| 5.2.4. Analyse de la partie électronique.....  | 135        |
| <b>5.3. Conception détaillée pour le cas de validation : cas d'une conception spécifique.. 1</b> | <b>39</b>  |
| 5.3.1. Sélection du matériau.....  | 139        |
| 5.3.2. Conditions initiales et conditions aux limites .....                                      | 140        |
| 5.3.3. Analyse .....   | 141        |
| 5.3.4. Démarche de conception et de modélisation des convertisseurs AC/DC.....                   | 144        |
| <b>5.4. Validation de la méthode par une approche expérimentale.....</b>                         | <b>150</b> |
| 5.4.1. Description du banc de tests .....  | 150        |
| 5.4.2. Analyse des résultats expérimentaux .....   | 152        |
| 5.4.2.1. Vérification des modèles .....  | 152        |
| 5.4.2.2. Étude statistique.....  | 158        |
| 5.4.2.3. Tests expérimentaux .....   | 159        |
| 5.4.2.4. Comparaisons et améliorations.....  | 162        |
| 5.4.3. Bilan.....  | 164        |
| <b>5.5. Conclusions .....</b>  | <b>164</b> |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b> | <b>165</b> |
|--|------------|

|                      |            |
|----------------------|------------|
| <b>ANNEXES .....</b> | <b>169</b> |
|----------------------|------------|

## **ANNEXE A : LA PIÉZOÉLECTRICITÉ**

|  |            |
|--|------------|
| <b>A.1. Introduction .....</b>   | <b>172</b> |
| <b>A.2. Définition de la piézoélectricité .....</b>                    | <b>172</b> |
| A.2.1. Effet piézoélectrique direct .....                              | 174        |
| A.2.2. Effet piézoélectrique inverse.....                              | 175        |
| <b>A.3. Les différents matériaux piézoélectriques.....</b>             | <b>175</b> |
| A.3.1. Les cristaux .....  | 175        |
| A.3.2. Les céramiques.....   | 175        |
| A.3.3. Les polymères .....   | 176        |
| A.3.4. Les composites.....   | 176        |
| A.3.5. Observations générales .....                                    | 176        |
| <b>A.4. Standards de la piézoélectricité.....</b>                      | <b>177</b> |
| <b>A.5. Équations de la piézoélectricité .....</b>                     | <b>178</b> |
| <b>A.6. Modélisation de la piézoélectricité .....</b>                  | <b>180</b> |
| A.6.1. Définition des constantes électriques.....                      | 180        |
| A.6.2. Définition des constantes mécaniques .....                      | 181        |
| A.6.3. Définition des constantes piézoélectriques .....                | 182        |
| A.6.4. Conditions aux limites .....                                    | 183        |
| A.6.5. Couplage électromagnétique.....                                 | 184        |
| A.6.6. Facteur de qualité.....   | 185        |
| <b>A.7. Types de conversion piézoélectrique .....</b>                  | <b>186</b> |
| A.7.1. Conversion directe .....  | 186        |
| A.7.2. Conversion indirecte .....                                      | 187        |
| <b>A.8. Caractéristiques des convertisseurs piézoélectriques .....</b> | <b>188</b> |
| A.8.1. Généralités .....   | 188        |
| A.8.1.1. Capacité équivalente du matériau piézoélectrique .....        | 188        |
| A.8.1.2. Fréquence de résonance.....                                   | 189        |
| A.8.1.3. Tension en circuit ouvert .....                               | 189        |
| A.8.1.4. Puissance en sortie d'une structure résonante .....           | 190        |
| A.8.1.5. Estimation de l'amortissement électrique .....                | 190        |
| A.8.1.6. Estimation de l'amortissement mécanique.....                  | 191        |

|  |     |
|--|-----|
| A.8.1.7. Facteur de qualité.....   | 191 |
| A.8.2. Influence de la différence de fréquence .....                             | 191 |
| A.8.3. Influence des coefficients d'amortissement sur la puissance .....         | 193 |
| A.8.4. Influence de $\xi_e$ et $\xi_m$ sur la puissance, lorsque $f = f_n$ ..... | 194 |

## **ANNEXE B : OUTIL DÉVELOPPÉ**

|  |            |
|--|------------|
| <b>B.1. Présentation générale.....</b>   | <b>196</b> |
| <b>B.2. Présentation de la base de données.....</b>                              | <b>196</b> |
| B.2.1. Analyse et structuration du problème .....                                | 197        |
| B.2.2. Description architecturale .....  | 197        |
| B.2.3. Qualification énergétique.....  | 198        |
| B.2.4. Pré-dimensionnement .....   | 199        |
| <b>B.3. Description de l'outil.....</b>  | <b>200</b> |
| B.3.1. Description du projet.....  | 200        |
| B.3.2. Définition du problème .....  | 202        |
| B.3.3. Structuration du problème.....  | 204        |
| B.3.3.1. Définition et caractérisation des sources .....                         | 205        |
| B.3.3.2. Définition et caractérisation des puits .....                           | 207        |
| B.3.3.3. Définition et caractérisation des autres entités .....                  | 208        |
| B.3.3.4. Définition et caractérisation des interactions.....                     | 210        |
| B.3.3.5. Evaluation des différentes architectures du récupérateur d'énergie..... | 211        |
| B.3.3.6. Aide à la décision .....  | 216        |
| B.3.4. Définition des modèles .....  | 222        |
| B.3.4.1. Identification et formalisation des variables.....                      | 222        |
| B.3.4.2. Définition des relations.....   | 223        |
| B.3.4.3. Caractérisation des relations .....                                     | 224        |
| B.3.4.4. Définitions des domaines de validité.....                               | 226        |
| B.3.5. Modélisation multiphysique, pré-dimensionnement.....                      | 227        |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>  | <b>233</b> |
| <b>PUBLICATIONS PERSONNELLES .....</b>   | <b>245</b> |

---

# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I. 1 : Étapes du processus de conception .....                                    | 9  |
| Figure I. 2 : Processus de conception séquentiel.....                                    | 10 |
| Figure I. 3 : Interaction simultanée .....   | 11 |
| Figure I. 4 : Types de raisonnement de conception.....                                   | 13 |
| Figure I. 5 : Outils utilisés dans le processus de conception de produits.....           | 15 |
| Figure I. 6 : Évolution des applications des microsystèmes [source YOLE].....            | 17 |
| Figure I. 7 : Architecture d'un microsystème .....                                       | 19 |
| Figure I. 8 : Principe de fonctionnement d'un microsystème.....                          | 19 |
| Figure I. 9 : Domaines de la physique impliqués dans la conception de microsystèmes..... | 20 |
| Figure I. 10 : Méthode de conception des microsystèmes .....                             | 21 |
| Figure I. 11 : Transformations d'énergies libres et exemples de convertisseurs .....     | 25 |
| Figure I. 12 : Transformations en énergies chimiques et en énergies libres .....         | 26 |
| Figure I. 13 : Comparaison des densités d'énergie [Roundy, Wright et al., 2003].....     | 30 |
| Figure I. 14 : Énergie et principes de conversion [Flipsen, 2005] .....                  | 31 |
| Figure I. 15 : Diagramme de Ragone pour différents moyens de stockage d'énergie.....     | 33 |
|  |    |
| Figure II. 1 : Architecture d'un microsystème autonome.....                              | 37 |
| Figure II. 2 : Représentation de notre méthodologie.....                                 | 39 |
| Figure II. 3 : Notre approche : modélisation du problème de conception.....              | 41 |
| Figure II. 4 : Loi d'intégralité des parties .....                                       | 42 |
| Figure II. 5 : De l'architecture fonctionnelle aux blocs fonctionnels .....              | 42 |
| Figure II. 6 : Décomposition fonctionnelle .....   | 43 |
| Figure II. 7 : Organigramme Technique étendu aux milieux extérieurs .....                | 45 |
| Figure II. 8 : Modèle de représentation des composants.....                              | 46 |
| Figure II. 9 : Bloc Diagramme Fonctionnel .....  | 46 |
| Figure II. 10 : Graphe d'association substances-champs.....                              | 47 |
| Figure II. 11 : Notre approche : qualification énergétique et modélisation système ..... | 47 |
| Figure II. 12 : Notre approche : pré-dimensionnement.....                                | 51 |
| Figure II. 13 : Conception multidisciplinaire .....                                      | 52 |
| Figure II. 14 : Représentation de la poutre.....   | 53 |
| Figure II. 15 : Profil de consommation du microsystème sur un cycle.....                 | 56 |
| Figure II. 16 : Représentation de notre méthodologie.....                                | 57 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure III. 1 : Modélisation du problème de conception.....  | 60  |
| Figure III.2 : Décomposition en système et super-système .....   | 62  |
| Figure III. 3 : Représentation détaillée du système et du sous système .....                                   | 62  |
| Figure III. 4 : Représentation globale du problème de conception .....   | 63  |
| Figure III. 5 : Notre approche : analyse du problème de conception et description architecturale .....         | 67  |
| Figure III. 6 : Structuration du problème .....  | 68  |
| Figure III. 7 : Définition des entités et graphe des interactions avec l'outil développé .....                 | 69  |
| Figure III. 8 : Architecture du récupérateur d'énergie.....  | 70  |
| Figure III. 9 : Décomposition des flux et des effets .....   | 70  |
| Figure III. 10 : Démarche et outils associés à la phase de modélisation du problème de conception.....         | 71  |
| Figure III. 11 : Décomposition en système et super-système .....   | 72  |
| Figure III. 12 : Premier niveau de décomposition de l'organigramme technique étendu.....                       | 73  |
| Figure III. 13 : Modèle bloc des composants du système .....   | 74  |
| Figure III. 14 : Qualification énergétique et modélisation système .....                                       | 75  |
| Figure III. 15 : Décomposition CTOC du récupérateur d'énergie.....   | 81  |
| Figure III. 16 : Aide à la définition de l'architecture du système .....                                       | 84  |
| Figure III. 17 : Démarche et outils associés à la phase de qualification énergétique.....                      | 85  |
| Figure III. 18 : Architectures retenues pour les différentes sources.....                                      | 91  |
| Figure III. 19 : Arbre des choix.....  | 92  |
|  |     |
| Figure IV. 1 : Modélisation du problème de conception : pré-dimensionnement.....                               | 94  |
| Figure IV. 2: Représentation de l'outil de simulation.....   | 95  |
| Figure IV. 3 : Principe de fonctionnement de l'outil de simulation .....                                       | 96  |
| Figure IV. 4 : Définition des paramètres et évaluation de l'énergie.....                                       | 103 |
| Figure IV. 5 : Paramètre des blocs du microsysteme.....  | 104 |
| Figure IV. 6 : Décomposition de la phase de pré-dimensionnement .....  | 105 |
| Figure IV. 7 : Représentation du signal vibratoire .....   | 106 |
| Figure IV. 8 : Profil énergétique pour la conversion électromagnétique .....                                   | 107 |
| Figure IV. 9 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie piézoélectrique (PVDF).....                     | 109 |
| Figure IV. 10 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie piézoélectrique (PZT).....                     | 110 |
| Figure IV. 11 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie solaire (silicium monocristallin).....         | 111 |
| Figure IV. 12 : Evolution de l'autonomie avec la fréquence du microcontrôleur pour les deux transmetteurs..... | 114 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure V. 1 : Récapitulatif des résultats de notre méthode pour le cas de validation .....                         | 118 |
| Figure V. 2 : Représentation de la boucle métier .....   | 121 |
| Figure V. 3 : Film piézoélectrique déposé sur la poutre .....  | 123 |
| Figure V. 4 : Modèle à faible couplage du transducteur .....   | 126 |
| Figure V. 5 : illustration des modes 31 et 33 pour les matériaux piézoélectriques.....                             | 127 |
| Figure V. 6 : Structure cantilever .....   | 127 |
| Figure V. 7 : Représentation équivalente du convertisseur piézoélectrique .....                                    | 128 |
| Figure V. 8 : Procédure d'analyse en éléments finis sous Ansys .....   | 131 |
| Figure V. 9 : Représentation de la structure cantilever .....  | 133 |
| Figure V.10 : Représentation de la déformation (en %) .....  | 134 |
| Figure V.11 : Représentation de la tension (en V) .....  | 134 |
| Figure V.12 : Représentation du déplacement (en m).....  | 134 |
| Figure V. 13 : Modélisation du circuit de récupération d'énergie.....  | 135 |
| Figure V. 14 : Simulation du circuit de récupération d'énergie (CMBP08).....                                       | 136 |
| Figure V. 15 : Topologie d'un régulateur LDO .....   | 137 |
| Figure V. 16 : Modélisation du convertisseur intégrant le régulateur LDO .....                                     | 137 |
| Figure V. 17 : Simulation du convertisseur intégrant le régulateur LDO .....                                       | 138 |
| Figure V. 18 : Représentation de la structure cantilever .....   | 141 |
| Figure V.19 : Représentation de la déformation (en %) .....  | 141 |
| Figure V.20 : Représentation de la tension (en V).....   | 142 |
| Figure V.21 : Représentation du déplacement (en m).....  | 142 |
| Figure V. 22 : Représentation du circuit de redressement .....   | 144 |
| Figure V. 23 : Circuit équivalent d'un convertisseur piézoélectrique .....   | 145 |
| Figure V. 24 : Circuit équivalent de la partie électrique du convertisseur piézoélectrique<br>(étapes 1 et 2)..... | 146 |
| Figure V. 25 : Circuit équivalent pour l'étape 1 (D1 et D4 passantes).....   | 147 |
| Figure V. 26 : Schéma du circuit réalisé .....   | 149 |
| Figure V. 27 : Représentation des signaux générés par le système.....  | 150 |
| Figure V. 28 : Schéma de conditionnement électronique .....  | 151 |
| Figure V. 29 : Banc expérimental réalisé à partir de composants du commerce .....                                  | 152 |
| Figure V. 30 : Évolution de la tension en fonction du déplacement .....  | 153 |
| Figure V. 31 : Schéma équivalent de l'élément piézoélectrique (basses fréquences) .....                            | 154 |
| Figure V. 32 : Décharge du condensateur piézoélectrique dans la résistance piézoélectrique<br>.....                | 154 |
| Figure V. 33 : Circuit équivalent du dispositif.....   | 155 |



|  |     |
|--|-----|
| Figure V. 34 : Évolution de l'énergie en fonction du déplacement et de la fréquence de sollicitation .....                 | 156 |
| Figure V. 35 : Évolution de l'énergie en fonction du déplacement et de la fréquence de sollicitation .....                 | 157 |
| Figure V. 36 : Mesure de la tension générée par l'élément piézoélectrique CMPB08.....                                      | 159 |
| Figure V. 37 : Mesure des signaux en entrée et en sortie du régulateur et de la tension de commande de l'application ..... | 160 |
| Figure V. 38 : Bilan énergétique .....   | 162 |
| Figure V. 39 : Illustration de la puce réalisée .....  | 163 |
|  |     |
| Figure A. 1 : Sollicitations mécaniques des structures cristallines .....  | 173 |
| Figure A. 2 : Organigramme des 32 classes cristallines .....   | 173 |
| Figure A. 3 : Modèle simplifié d'une structure cristalline unidimensionnelle.....  | 174 |
| Figure A. 4 : Illustration de l'effet piézoélectrique direct .....   | 174 |
| Figure A. 5 : Illustration de l'effet piézoélectrique inverse .....  | 175 |
| Figure A. 6 : Direction des forces affectant un matériau piézoélectrique.....  | 179 |
| Figure A. 7 : Conversion directe : (a) principe, (b) sollicitation quasi-statique, (c) sollicitation dynamique .....       | 186 |
| Figure A. 8 : Illustration de la conversion indirecte (a) principe, (b) sollicitation sinusoïdale .....                    | 188 |
| Figure A. 9 : Représentation géométrique de l'élément piézoélectrique.....   | 188 |
| Figure A. 10 : Evolution de la puissance de sortie pour $\xi_e = \xi_m = 5.46e-3$ .....                                    | 192 |
| Figure A. 11 : Évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'amortissement .....        | 193 |
| Figure A. 12 : Évolution de la puissance lorsque $f = f_n$ .....   | 193 |
| Figure A. 13 : Évolution de la puissance en fonction de $\xi_e$ , pour $\xi_m = 0.01$ et $f_n = f$ .....                   | 194 |
|  |     |
| Figure B. 1 : Tables liées à la phase d'analyse et de structuration du problème .....                                      | 197 |
| Figure B. 2 : Tables liées à la phase de description architecturale.....   | 198 |
| Figure B. 3 : Tables liées à la phase de qualification énergétique .....   | 199 |
| Figure B. 4 : Tables liées à la phase de pré-dimensionnement .....   | 200 |
| Figure B. 5 : Présentation de l'onglet "description du projet" de l'interface développée .....                             | 201 |
| Figure B. 6 : Rapports générés pour la description du projet.....  | 202 |
| Figure B. 7 : Présentation de l'onglet "définition du problème" de l'interface développée....                              | 203 |
| Figure B. 8 : Rapports générés pour la définition du problème .....  | 204 |
| Figure B. 9 : Représentation globale du Système et du Super-système.....   | 205 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure B. 10 : Définition des sources (exemple pour la source d'énergie thermique et la radiofréquence)..... | 207 |
| Figure B. 11 : Définition des puits .....  | 208 |
| Figure B. 12 : Définition des autres entités .....   | 209 |
| Figure B. 13 : Représentation graphique des différentes entités.....   | 209 |
| Figure B. 14 : Définition des interactions .....   | 210 |
| Figure B. 15 : Graphe entités-interactions .....   | 211 |
| Figure B. 16 : Récupérateur d'énergie : classification des Sources.....                                      | 212 |
| Figure B. 17 : Récupérateur d'énergie : choix du convertisseur.....  | 213 |
| Figure B. 18 : Récupérateur d'énergie : choix des transmetteurs .....  | 214 |
| Figure B. 19 : Récupérateur d'énergie : choix de l'opérateur .....   | 215 |
| Figure B. 20 : Récupérateur d'énergie : caractérisation des différentes entités.....                         | 215 |
| Figure B. 21 : Aide à la décision : classification des Sources.....  | 216 |
| Figure B. 22 : Aide à la décision : paramètres pour la conversion électromagnétique .....                    | 217 |
| Figure B. 23 : Modèle au niveau système du récupérateur d'énergie.....                                       | 218 |
| Figure B. 24 : Paramètres pour la conversion piézoélectrique (PZT).....                                      | 219 |
| Figure B. 25 : Profil énergétique pour la conversion piézoélectrique (PZT).....                              | 220 |
| Figure B. 26 : Paramètres pour le convertisseur photovoltaïque composé de silicium monocristallin .....      | 221 |
| Figure B. 27 : Profil énergétique pour le convertisseur photovoltaïque monocristallin .....                  | 221 |
| Figure B. 28 : Onglet modèle : définition des variables.....   | 223 |
| Figure B. 29 : Définition des relations .....  | 224 |
| Figure B. 30 : Onglet modèle : définition des relations .....  | 226 |
| Figure B. 31 : Onglet modèle : définition des domaines de validité .....                                     | 227 |
| Figure B. 32 : Onglet conception préliminaire.....   | 228 |
| Figure B. 33 : Exemple de rapport généré pour l'architecture globale du récupérateur d'énergie .....         | 228 |
| Figure B. 34 : Représentation des contraintes appliquées.....  | 229 |
| Figure B. 35 : Représentation de la tension lors de l'étude statique.....                                    | 229 |
| Figure B. 36 : Représentation du schéma électronique de conversion.....                                      | 230 |
| Figure B. 37 : Représentation du circuit et simulation.....  | 230 |



---

# Liste des tableaux

|  |     |
|--|-----|
| Tableau I.1 : Méthodes de conception .....   | 7   |
| Tableau I.2 : Les principales applications des microsystèmes [Tabeling, 2003].....   | 17  |
| Tableau I.3 : Comparaison entre la récupération d'énergie macroscopique et microscopique   | 23  |
| Tableau I.4 : Ordres de grandeur de la puissance solaire reçue par unité de surface.....   | 26  |
| Tableau I.5 : Liste de sources de vibrations avec leur accélération maximale et la fréquence associée.....                                       | 28  |
| Tableau I.6 : Source d'énergie ambiantes et convertisseurs associés.....   | 30  |
| Tableau I. 7 : Comparaison des différents moyens de stockage de l'énergie.....   | 33  |
|  |     |
| Tableau II. 1 : Description des flux et des variables duales associées.....  | 44  |
| Tableau II. 2 : Paramètres géométriques de la poutre (en acier).....   | 53  |
| Tableau II. 3 : Caractéristiques des paramètres de l'application .....   | 54  |
| Tableau II, 4 : Consommation du microsysteme.....  | 54  |
|  |     |
| Tableau III. 1 : Sources d'énergie et convertisseurs associés.....   | 66  |
| Tableau III. 2 : Principes de transduction .....   | 66  |
| Tableau III. 3 : Identification et caractérisation des sources d'énergie ambiantes.....  | 73  |
| Tableau III. 4 : Décomposition des flux en flux élémentaires .....   | 74  |
| Tableau III. 5 : Evaluation des sources et des puits .....   | 80  |
| Tableau III. 6 : Convertisseurs de tension classiques.....   | 82  |
| Tableau III. 7 : Evaluation des systèmes.....  | 83  |
| Tableau III. 8 : Classification des sources.....   | 86  |
| Tableau III. 9 : Identification et caractérisation des flux et effets fonctionnels et antagonistes pour les convertisseurs.....                  | 88  |
| Tableau III. 10 : Identification et caractérisation des flux et effets fonctionnels et antagonistes pour les transmetteurs (AC/DC et DC/DC)..... | 90  |
|  |     |
| Tableau IV. 1 : Paramètres de modélisation de l'éclairage solaire.....   | 98  |
| Tableau IV. 2 : Paramètres de modélisation de la puissance extraite d'une source vibratoire.   | 99  |
| Tableau IV. 3 : Paramètres de modélisation d'énergie thermique extraite par un thermogénérateur .....  | 99  |
| Tableau IV. 4 : Paramètres de modélisation de l'énergie reçue .....  | 100 |

|   |     |
|---|-----|
| Tableau IV. 5 : Paramètres pour la modélisation d'énergie extraite d'un fluide en mouvement .....   | 100 |
| Tableau IV. 6 : Consommation des transmetteurs CC1100 et TR1000 .....   | 112 |
| Tableau IV. 7 : Comparaison de l'autonomie pour les deux transmetteurs ( $f_{\mu c} = 4$ MHz) ...   | 113 |
| Tableau IV. 8 : Evolution de l'autonomie en fonction de la fréquence .....  | 113 |
|   |     |
| Tableau V. 1 : Paramètres de modélisation .....   | 124 |
| Tableau V. 2 : Comparaisons de matériaux piézoélectriques .....   | 125 |
| Tableau V. 3 : Variables intervenant dans le modèle fonctionnel du convertisseur piézoélectrique .....  | 126 |
| Tableau V. 4 : Variables présentes dans le modèle structurel du convertisseur piézoélectrique .....   | 130 |
| Tableau V. 5 : Caractéristiques de l'élément piézoélectrique CMBP08 .....   | 132 |
| Tableau V. 6 : Modèle utilisé pour la simulation .....  | 132 |
| Tableau V. 7 : Propriétés du matériau piézoélectrique (PSI 5A S4 ENH) .....   | 140 |
| Tableau V. 8 : Modèle utilisé pour la simulation .....  | 140 |
| Tableau V.9 : Évolution de la tension générée par le convertisseur en fonction de l'épaisseur de l'élément piézoélectrique .....                                      | 144 |
| Tableau V.10 : Récapitulatif des modèles associés .....   | 146 |
| Tableau V. 11 : Effets et coefficients estimés pour l'énergie pour des basses fréquences et différents déplacements (unités codées) .....                             | 158 |
| Tableau V. 12 : Effets et coefficients estimés pour l'énergie pour un déplacement de 1mm et des fréquences proches de la fréquence de résonance (unités codées) ..... | 158 |
|   |     |
| Tableau A. 1 : Constante de la piézoélectricité .....   | 178 |
| Tableau A. 2 : Équations de la piézoélectricité .....   | 178 |
| Tableau A. 3 : Paramètres de modélisation des matériaux piézoélectriques .....  | 179 |
| Tableau A. 4 : Taux de conversion maximal pour différents types de matériaux piézoélectriques en conversion directe .....   | 187 |
|   |     |
| Tableau B. 1 : Identification des variables .....   | 222 |
| Tableau B. 2 : Nature des relations en fonction des variables .....   | 224 |

# Nomenclature

| Symbole                  | Description                                    | Unité                                |
|--------------------------|--|--------------------------------------|
| [c]                      | Matrice de rigidité                            | -                                    |
| [e]                      | Matrice piézoélectrique                        | -                                    |
| [ $\epsilon_p$ ]         | Matrice de permittivité relative               | -                                    |
| $\Delta$                 | Variation relative                             | variable méthodologique              |
| $\Delta T_g$             | Gradient de température                        | K                                    |
| $\mu$                    | Perméabilité magnétique                        | H/m                                  |
| $\mu$                    | Désirabilité globale                           | variable méthodologique              |
| A                        | Accélération                                   | m/s <sup>2</sup>                     |
| a                        | Azimut   | -                                    |
| a                        | Coefficient de connexion                       | -                                    |
| A                        | Surface  | m <sup>2</sup>                       |
| B                        | Champ magnétique                               | T                                    |
| B <sub>b</sub>           | Largeur  | mm                                   |
| b <sub>e</sub>           | Coefficient d'amortissement électrique         | kg/s                                 |
| b <sub>m</sub>           | Coefficient d'amortissement mécanique          | kg/s                                 |
| b <sub>m</sub>           | Coefficient d'amortissement                    | N/m                                  |
| C                        | Flux   | -                                    |
| C                        | Capacité                                       | F                                    |
| C <sub>in_storage</sub>  | Capacité                                       | F                                    |
| C <sub>out_storage</sub> | Capacité                                       | F                                    |
| C <sub>p</sub>           | Capacité piézoélectrique                       | F                                    |
| C <sub>st</sub>          | Capacité                                       | F                                    |
| D                        | Distance relative                              | variable méthodologique              |
| d                        | Constante de charge piézoélectrique            | C/N                                  |
| D <sub>0</sub>           | Rayonnement diffus reçu par un plan horizontal | Wh/m <sup>2</sup>                    |
| d <sub>31</sub>          | Coefficient de déformation (d31)               | m/V                                  |
| d <sub>31</sub>          | Coefficient piézoélectrique                    | C/N                                  |
| d <sub>33</sub>          | Coefficient de déformation (d33)               | m/V                                  |
| d <sub>b</sub>           | Densité  | kg/m <sup>3</sup>                    |
| d <sub>E</sub>           | Constante piézoélectrique                      | C/N                                  |
| d <sub>i</sub>           | Désirabilité individuelle                      | variable méthodologique              |
| D <sub>inst</sub>        | Débit d'instruction instantané                 | kbit/s                               |
| D <sub>source</sub>      | Densité de puissance                           | W/m <sup>2</sup> ou W/m <sup>3</sup> |
| E                        | Champ électrique                               | N/C                                  |
| E                        | Énergie  | J                                    |
| $\dot{E}$                | Dérivée temporelle de l'énergie                | W                                    |
| $\epsilon$               | Permittivité diélectrique                      | F/m                                  |

|                   |  |                         |
|-------------------|--|-------------------------|
| $\epsilon_0$      | Permittivité diélectrique ( $\epsilon/\epsilon_0$ )                        | F/m                     |
| EIA               | Flux/effet antagoniste   | variable méthodologique |
| $E_{off}$         | Énergie (veille)   | $\mu J$                 |
| $E_{on}$          | Énergie consommée (état actif)   | $\mu J$                 |
| $\epsilon_r$      | Permittivité relative  | -                       |
| $E_{st}$          | Énergie  | J                       |
| F                 | Effort   | N                       |
| f                 | Fréquence  | Hz                      |
| F                 | Fréquence relative   | Hz                      |
| $f_{\mu c}$       | Fréquence de traitement du microcontrôleur                                 | Hz                      |
| g                 | Accélération gravitationnelle  | $kg/m^2$                |
| $G_0$             | Rayonnement global reçu par un plan horizontal                             | $Wh/m^2$                |
| h                 | Hauteur  | m                       |
| $H_b$             | Hauteur de la poutre   | m                       |
| $h_m$             | Hauteur de la masse  | m                       |
| I                 | Intensité  | A                       |
| I                 | Intensité relative   | variable méthodologique |
| i                 | Intensité  | A                       |
| I                 | Éclairement solaire estimé à partir de la formule de Kasten [Kasten, 1997] | $Wh/m^2$                |
| $i_0$             | Intensité  | A                       |
| IA                | Caractérisation des flux   | variable méthodologique |
| $I_{cons}$        | Intensité consommé   | A                       |
| $I_{off}$         | Consommation en courant (veille)   | $\mu A$                 |
| $I_{on}$          | Consommation en courant (état actif)                                       | mA                      |
| $I_p$             | Courant piézoélectrique  | A                       |
| J                 | Inertie  | $kg/m^3$                |
| k                 | Coefficient de couplage  | -                       |
| $k_{31}$          | Coefficient de couplage ( $k_{31}$ )                                       | CV/Nm                   |
| $k_{33}$          | Coefficient de couplage ( $k_{33}$ )                                       | CV/Nm                   |
| L                 | Inductance   | H                       |
| $L_b$             | Longueur   | mm                      |
| $l_b$             | Longueur de la poutre  | m                       |
| $l_e$             | Longueur de l'électrode  | m                       |
| $l_m$             | Longueur de la masse   | m                       |
| m                 | Masse  | kg                      |
| M                 | Niveau relatif   | variable méthodologique |
| m                 | Nombre de couples d'éléments thermoélectriques                             | -                       |
| min               | Minimum  | -                       |
| N                 | Nature relative  | variable méthodologique |
| n                 | Coefficient de conversion  | -                       |
| $N_{bits\_rec}$   | Nombre de bits reçus   | -                       |
| $N_{bits\_trans}$ | Nombre de bits transmis  | -                       |
| $N_{inst}$        | Nombre d'instructions  | -                       |
| P                 | Puissance  | Watt                    |
| $P_0$             | Puissance émise  | W                       |

|                |   |                |
|----------------|---|----------------|
| $P_{conso}$    | Puissance consommée                             | W              |
| $P_i$          | Puissance reçu                                  | W              |
| $P_{off}$      | Puissance moyenne consommée (veille)            | $\mu W$        |
| $P_{off\_moy}$ |   | W              |
| $P_{offi}$     | Puissance consommé par l'élément i (veille)     | mW             |
| $P_{on}$       | Puissance moyenne consommée (état actif)        | mW             |
| $P_{on\_moy}$  |   | W              |
| $P_{oni}$      | Puissance consommé par l'élément i (état actif) | $\mu A$        |
| $P_r$          |   | W              |
| $P_{recup}$    | Puissance récupérée                             | W              |
| q              | Charge  | C              |
| R              | Distance de transmission                        | m              |
| $R_b$          | Résistance                                      | W              |
| $R_g$          | Résistance électrique                           | $\Omega$       |
| $R_p$          | Résistance piézoélectrique                      | c              |
| S              | Section   | $m^2$          |
| S              | Déformation                                     | -              |
| s              | Inverse de la constante élastique               | $m^2/N$        |
| S''            | Dérivée de la contrainte                        |                |
| S' ; V'        | Dérivée   |                |
| $S_{dsip}$     | Taille du dispositif                            | $m^2$ ou $m^3$ |
| t              | Temps   | s              |
| T              | Période de mesure                               | s              |
| T              | Contrainte                                      | Pa             |
| $t_c$          | Épaisseur de la poutre centrale                 | m              |
| $t_{charge}$   | Temps de charge                                 | s              |
| $t_{cycle}$    | Période de fonctionnement du capteur            | s              |
| $T_{cycle}$    | Temps   | s              |
| $T_{in}$       | Effort d'entrée                                 | N              |
| $t_{led\_on}$  | Temps   | s              |
| $t_{off}$      | Temps à l'état de veille                        | s              |
| $t_{offi}$     | Temps   | s              |
| $t_{on}$       | Temps à l'état actif                            | s              |
| $t_{oni}$      | Durée d'activité                                | s              |
| tp             | Épaisseur de la couche piézoélectrique          | m              |
| $t_{sens}$     | Temps de mesure du capteur                      | s              |
| U              | Flux/effet utile                                | -              |
| u              | Tension   | V              |
| U(t)           | Tension de charge                               | V              |
| $U_0$          | Tension   | V              |
| $U_{final}$    | Tension   | V              |
| $U_R$          | Tension   | V              |
| V              | Volume  | $m^3$          |
| v              | Vitesse du fluide                               | m/s            |
| V              | Tension   | V              |



|                    |  |          |
|--------------------|--|----------|
| $\nu$              | Coefficient de Poisson                       | -        |
| $V_{com}$          | Tension                                      | V        |
| $V_{in}$           | Tension                                      | V        |
| $V_{in\_storage}$  | Tension                                      | V        |
| $V_{out}$          | Tension                                      | V        |
| $V_{out\_storage}$ | Tension                                      | V        |
| $V_s$              | Tension                                      | V        |
| $V_{th}$           | Tension de seuil                             | V        |
| $V_{topt}$         | Tension                                      | V        |
| $W$                | Vitesse de rotation                          | $s^{-1}$ |
| $w$                | Largeur de la poutre                         | m        |
| $W$                | Energie                                      | J        |
| $w_i$              | Coefficient                                  | -        |
| $w_m$              | Largeur de la masse                          | m        |
| $Y$                | Module d'young                               | GPa      |
| $y$                | Module d'young                               | GPa      |
| $Y$                | Déplacement en entrée                        | m        |
| $y_h$              | Modulé d'Young poutre                        | Pa       |
| $y_p$              | Module d'Young piézoélectrique               | Pa       |
| $Z_{eq}$           | Impédance                                    | V/A      |
| $\alpha$           | Coefficient de Seebeck                       | V/K      |
| $\alpha$           | Rendement                                    | -        |
| $\beta_b$          | Coefficient d'amortissement                  | kg/s     |
| $\gamma$           | Angle  | radian   |
| $\lambda$          | Longueur d'onde                              | m        |
| $\xi_e$            | Rapport d'amortissement mécanique            | -        |
| $\xi_m$            | Rapport d'amortissement électrique           | -        |
| $\xi_T$            | Rapport d'amortissement                      | -        |
| $\rho$             | Débit massique                               | $kg/m^3$ |
| $\tau$             | Temps  | s        |
| $\omega$           | Pulsation de la source de vibration          | radian   |
| $\omega_n$         | Pulsation naturelle du système de conversion | radian   |

---

---

---

---

---

# Introduction générale

## 1. Contexte

Le travail de thèse s'est déroulé au sein du laboratoire I2M (Institut de Mécanique de Bordeaux, I2M UMR CNRS 5295), en partenariat avec le laboratoire IMS (Intégration du Matériau au Système, UMR CNRS 5218). Elle a été mise en œuvre à ESTIA Recherche (École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées, Bidart). La thèse a été supportée et financée par l'agglomération Côte Basque-Adour et la Chambre de Commerce et d'Industrie de Bayonne Pays Basque.

Les travaux ont débuté en 2008, dans le cadre du projet transfrontalier Freno-Feel. Ce projet était le fruit d'une collaboration entre ESTIA et CITEAN (Centre d'Innovation Technologique en Automobile de Navarre).

## 2. Les microsystemes

La thèse s'articule autour de la thématique des microsystemes.

Les progrès en électronique et le développement des applications portables favorisent l'émergence des microsystemes dans de nombreux domaines (automobile, aéronautique, médecine, télécommunications...). Ces dispositifs sont souvent produits en série, ce qui diminue leurs coûts de fabrication. De plus, la miniaturisation des composants permet de multiplier les fonctionnalités intégrées aux systèmes.

Les microsystemes sont issus d'un détournement des technologies utilisées pour l'industrie microélectronique par l'ajout de parties mobiles et des couches actives ou non sur du silicium.

Ce sont des systèmes regroupant plusieurs fonctionnalités, et couplant plusieurs phénomènes physiques. Leur conception implique donc des connaissances dans diverses disciplines telles que l'électronique, l'informatique, la mécanique, mais aussi l'optique, la chimie ou la mécanique des fluides.

Ces petits dispositifs complexes s'intègrent dans des systèmes de plus grande taille et interagissent avec leur environnement. Le domaine des microsystemes est en plein développement et possède encore quelques lacunes en termes de conception et d'autonomie.

## 3. La conception de microsystemes

Les microsystemes intègrent des composants de natures différentes et sont le siège de multiples phénomènes physiques. Par conséquent, leur conception requiert des compétences dans plusieurs domaines de l'ingénierie tels que :

- la mécanique,
- la science des matériaux,
- l'électronique,
- l'énergétique,
- l'automatique.

Cependant, peu d'experts possèdent l'ensemble des connaissances nécessaires à la conception de microsystemes. Cette tâche fait donc intervenir divers acteurs. Une bonne gestion des Hommes et des connaissances est alors essentielle. De plus, comme pour tout produit, la conception de microsysteme s'inscrit dans un processus.

#### **4. L'autonomie dans les microsystemes**

L'autonomie est également un facteur important car les solutions actuelles, proposées par les batteries, ne sont pas satisfaisantes en termes :

- d'encombrement,
- de poids,
- d'opérations de maintenance,
- de durée de vie,
- de respect de l'environnement.

C'est pour cette raison que nous considérons la récupération d'énergie comme alternative pour alimenter ces dispositifs. Notre environnement regorge de sources d'énergie inexploitées. La récupération de cette énergie ambiante peut s'avérer suffisante pour alimenter des microsystemes. En effet, ces derniers ont une faible consommation grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique et à l'introduction de rapports cycliques. La source est alors remplacée par un récupérateur d'énergie.

#### **5. Notre solution à la conception de microsystemes autonomes**

Ce travail de thèse porte sur la problématique de conception de microsystemes autonomes capables de récupérer l'énergie dont ils ont besoin dans leur environnement proche.

A partir des observations précédentes, nous constatons que pour être innovante, l'ingénierie des microsystemes doit s'appuyer sur la culture de l'électronique, de la mécanique et de l'énergétique.

En effet, le processus de conception est largement pluridisciplinaire et son efficacité repose sur la mise en œuvre de méthodes et d'outils :

- de conception collaborative,
- de gestion des connaissances,
- d'ingénierie multiphysique.

Dans le chapitre I, le contexte de l'étude est présenté, en introduisant les notions de conception de produits, de pluridisciplinarité et d'autonomie.

Nous montrons que la conception de produits hétérogènes implique le développement de processus pour gérer efficacement les Hommes et les connaissances. Ceci se vérifie encore plus dans le cadre des microsystemes qui, de par leur architecture, sont des dispositifs hétérogènes qui requièrent des compétences dans différents domaines de l'ingénierie.

Le nombre d'éléments, leur nature et les interactions rendent le processus de conception complexe. Il apparaît donc essentiel d'intégrer les différentes disciplines et de faire collaborer les différents experts intervenant dans le processus.

Nous mettons également en évidence un autre enjeu lié aux microsystemes, à savoir leur autonomie. Pour pallier les limitations actuelles des batteries, nous considérons la récupération de l'énergie présente dans l'environnement. Ceci est possible grâce à la faible consommation des microsystemes. Ce processus implique la conception de récupérateurs intégrant une source, un système de conversion et des éléments de stockage.

Dans le chapitre II, nous exposons les problématiques liées à la conception de microsystemes autonomes.

Tout d'abord, nous présentons les enjeux de la conception de microsystemes autonomes, à savoir :

- l'aspect pluridisciplinaire,
- la gestion des connaissances et développement d'outils,
- la mise en place d'une approche d'aide au choix.

Le but principal de cette thèse est donc :

- de proposer une démarche et un outil pour conduire la conception de microsystemes,
- de permettre une approche pluridisciplinaire pour la conception de microsystemes,
- de renforcer les collaborations et les échanges entre experts,
- de gérer les connaissances.

Pour cela, nous avons développé une approche visant à choisir l'architecture la plus adaptée, pour une application donnée. Cette approche s'articule autour de quatre phases principales :

- l'analyse et la structuration du problème de conception,
- la description architecturale,
- la qualification énergétique et la modélisation système,
- le pré-dimensionnement.

Nous avons déployé cette approche dans le cadre de la conception d'un microsysteme autonome. Ce cas de validation sera déroulé tout au long de ce manuscrit.

Les premières étapes de notre démarche sont décrites dans le chapitre III. Ces étapes concernent l'analyse et la structuration du problème, la description architecturale du microsysteme et sa qualification énergétique. L'objectif étant de classer les sources d'énergie à partir de critères de qualification et de mettre en évidence les architectures possibles.

Ces étapes prennent en compte l'aspect pluridisciplinaire des microsystemes et se basent sur une analyse des flux et des effets et une modélisation du comportement des composants. Les flux et effets sont caractérisés par rapport au flux fonctionnel. Les premières étapes visent à diminuer le nombre de solutions possibles en vue de l'obtention des solutions les plus adaptées.

Nous présentons également la solution logicielle mise en œuvre pour supporter ces étapes, avant de les illustrer à travers notre cas de validation. Cet outil est alimenté par une base de données et intègre des critères de qualification, pour faciliter la comparaison des architectures et faciliter l'exploration d'un espace de solutions, en fonction des spécifications de l'application.

Le chapitre IV est axé sur la phase de pré-dimensionnement, à travers l'outil de simulation que nous avons développé et une modélisation du système global. L'objectif est d'évaluer rapidement la quantité d'énergie qui peut être récupérée pour les architectures retenues lors des étapes précédentes.

De plus, le modèle développé peut permettre d'évaluer l'influence de certains paramètres du système étudié, sur l'autonomie globale du dispositif.

Le chapitre V présente la phase de conception détaillée pour un récupérateur d'énergie piézoélectrique. Une caractéristique de cette étape est l'intégration de différents outils et la création de passerelles pour garantir la pluridisciplinarité de la conception et assurer une communication entre les différents domaines de l'ingénierie.

Au cours de ce chapitre, nous étudions deux types de conception : à partir de composants existants ou la conception de nouveaux éléments spécifiques à l'application.

Enfin, la dernière partie de ce manuscrit est dédiée aux conclusions générales de ce travail et aux perspectives de recherche qui en découlent.

---

# Chapitre I. État de l'art : conception de microsystemes autonomes

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 1.1.     | La conception de produits .....                                    | 6  |
| 1.1.1.   | Types de raisonnement et approches de conception .....             | 10 |
| 1.1.2.   | Modélisation descendante (déductive ou top-down) .....             | 11 |
| 1.1.3.   | Modélisation ascendante (abductive ou bottom-up) .....             | 11 |
| 1.1.4.   | Approche hybride (inductive ou meet-in the middle).....            | 12 |
| 1.1.5.   | Outils pour la conception de produits .....                        | 13 |
| 1.2.     | Les microsystemes .....  | 15 |
| 1.2.1.   | Historique.....  | 15 |
| 1.2.2.   | Définition et architecture .....                                   | 17 |
| 1.2.3.   | Caractéristiques des microsystemes.....                            | 19 |
| 1.2.4.   | La conception actuelle de microsystemes.....                       | 20 |
| 1.2.5.   | Complexité de conception des microsystemes .....                   | 20 |
| 1.3.     | Énergie et microsystemes.....                                      | 22 |
| 1.3.1.   | Définition de la notion d'autonomie .....                          | 22 |
| 1.3.2.   | Récupération d'énergie .....                                       | 23 |
| 1.3.3.   | Sources d'énergie et principes de conversion.....                  | 25 |
| 1.3.3.1. | Différentes sources d'énergie ambiante .....                       | 25 |
| 1.3.3.2. | Énergie générée par l'Homme .....                                  | 29 |
| 1.3.3.3. | Bilan sur les sources d'énergie et les systèmes de conversion..... | 29 |
| 1.3.4.   | Stockage de l'énergie.....   | 31 |
| 1.3.4.1. | Différents moyens de stockage.....                                 | 31 |
| 1.3.4.2. | Tableau comparatif des moyens de stockage de l'énergie .....       | 33 |
| 1.4.     | Conclusion.....  | 34 |



## 1.1. LA CONCEPTION DE PRODUITS

Dans l'industrie, la conception de produits résulte de la mise en commun d'idées, de compétences et de savoir-faire de divers acteurs, spécialisés dans divers domaines de l'ingénierie.

Selon Otto et Wood [Otto et Wood, 2001], la conception de produit est définie comme "l'ensemble des activités techniques mises en œuvre pour satisfaire les besoins du marché et les perspectives de l'entreprise". Elle apporte donc une réponse à un besoin formalisé. Le produit conçu est le résultat d'un compromis [Guidat, Boly et al., 1993] [Matthews, Blessing et al., 2002] qui satisfait plus ou moins les contraintes, parfois contradictoires, du produit [Jansen, 1990].

Tout ceci implique :

- une bonne gestion des ressources humaines pour faciliter la collaboration entre les experts et répondre au caractère multidisciplinaire du processus de conception,
- une bonne gestion des connaissances pour aider la diffusion et l'organisation de l'information au sein de l'organisation considérée.

L'innovation, c'est-à-dire la création d'un produit ou d'un concept nouveau, est également importante pour les entreprises. Elle passe par la maîtrise des Physiques et de leur couplage car aujourd'hui, les produits innovants sont nécessairement multi-technologiques. Les entreprises doivent donc réussir à intégrer et agencer les connaissances. Pour cela, les experts et les connaissances sont organisés dans des processus. Ces derniers se basent sur des solutions logicielles efficaces et nouvelles.

Selon Suh [Suh, 1990], plusieurs pratiques et démarches de conception existent, mais une trame est commune aux activités de conception [Suh90]. Un processus standard de conception de produit se décompose de la manière suivante :

- connaître et comprendre les besoins du client,
- définir le problème à résoudre pour satisfaire les besoins,
- conceptualiser la solution,
- analyser pour optimiser la solution proposée,
- vérifier la conception obtenue pour voir si elle répond aux besoins clients initiaux.

Ainsi, le processus de conception a été structuré par de nombreux auteurs, parmi lesquels nous pouvons citer Pahl et Beitz [Pahl et Beitz, 1984], Priest [Priest, 1988], Pugh [Pugh, 1991], Ullman [Ullman, 1997] et Ulrich et Eppinger [Ulrich et Eppinger, 2000]. Comme le montre le Tableau I.1, la structuration varie en fonction des auteurs. Cependant, le processus de conception s'articule toujours autour des phases suivantes :

- définition du besoin,
- analyse conceptuelle et créativité,
- conception architecturale,
- conception détaillée,
- fabrication.

| Pahl et Beitz                | Priest                    | Pugh                     | Ullman                           | Ulrich et Eppinger           |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Clarification de la tâche | 1. Définition du besoin   | 1. Marketing             | 1. Définition des spécifications | 1. Besoin du client          |
| 2. Recherche de concepts     | 2. Recherche de concepts  | 2. Spécifications        | 2. Recherche de concepts         | 2. Spécifications du produit |
| 3. Conception architecturale | 3. Conception détaillée   | 3. Recherche de concepts | 3. Conception du produit         | 3. Génération de concepts    |
| 4. Conception détaillée      | 4. Évaluation et tests    | 4. Fabrication           | 4. Fabrication                   | 4. Sélection de concepts     |
|                              | 5. Fabrication et support | 5. Vente                 | 5. Service                       | 5. Architecture du produit   |
|                              |                           |                          | 6. Recyclage du produit          | 6. Conception industrielle   |
|                              |                           |                          |                                  | 7. Prototype                 |

**Tableau I.1 : Méthodes de conception**

D'après [Oosterman, 2001 ; Mejía Gutiérrez et Pailhès, 2007], nous pouvons extraire trois étapes importantes du processus de conception (Figure I. 1) :

- l'analyse du besoin,
- la conception préliminaire qui inclut :
  - o la recherche de concepts,
  - o la conception architecturale ou pré-dimensionnement
- la conception détaillée.

Chacune de ces étapes est décomposée en sous étapes, comme l'ont décrit [Cavaillès, 1991] et [SAE, 2004].

Tout d'abord, la phase d'analyse du besoin vise à analyser le problème. Elle aboutit à l'inventaire et à la caractérisation de l'ensemble des spécifications. Le cahier des charges fonctionnelles constitue la toute première représentation technique du produit. Il en décrit son comportement attendu dans toutes les situations de vie qui composent son cycle de vie.

Ensuite, la conception préliminaire se divise en deux étapes :

- la recherche de concepts : il s'agit de la détermination des principes de solutions. Ces principes constituent une première réponse au fonctionnement "physique" du produit. Ils doivent assurer une adaptabilité du produit dans chaque situation de vie et répondre aux exigences fonctionnelles.
- la conception architecturale : cette étape conduit à la définition :
  - o des types de composants formant le produit
  - o des couplages, des liaisons entre les composants.

Ainsi, la solution obtenue maîtrise les interactions entre les composants et fournit le pré-dimensionnement des composants en donnant différents choix morphologiques, matériels et valeurs intrinsèques.

Enfin, la conception détaillée offre une description complète de la conception. Chaque élément de l'architecture choisie est dimensionné voire optimisé. Les plans, la nomenclature et les procédés de fabrication et de contrôle sont déterminés.

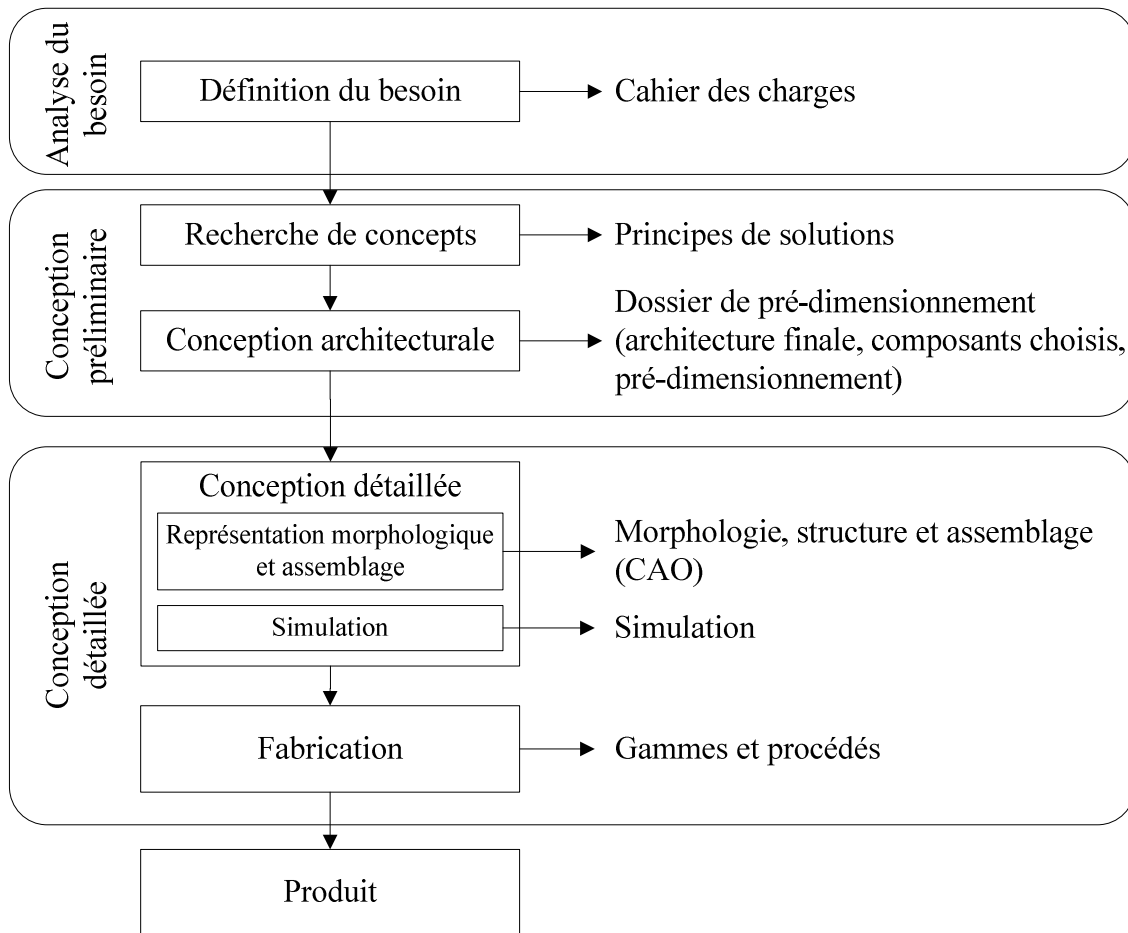


Figure I. 1 : Étapes du processus de conception

L'innovation requiert une meilleure gestion des processus, en organisant les Hommes et les connaissances et en intégrant de nouveaux outils. Ainsi, les industries ont évolué de l'ingénierie séquentielle vers l'ingénierie concourante et simultanée. Certaines ont également adopté l'ingénierie collaborative grâce aux outils informatiques qui facilitent la définition de prototypes virtuels et le partage d'informations.

Il existe différentes solutions pour une conception multi-technologique :

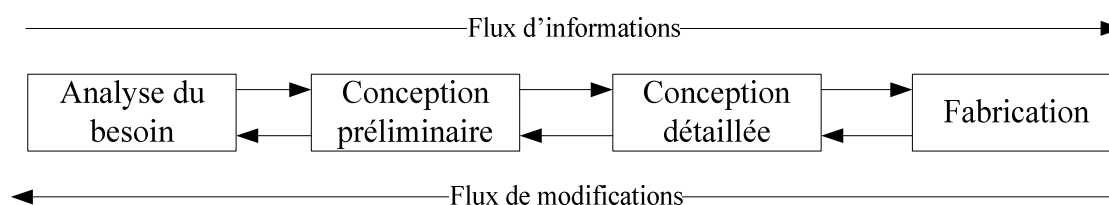
#### a. La conception séquentielle

Beaucoup de processus de conception suivent une approche séquentielle. Les activités sont partagées entre des départements spécifiques.

L'approche séquentielle présente l'avantage d'être exhaustive et explicite dans le détail diverses tâches de conception. En revanche, elle ne crée pas de réelle communication entre les spécialistes intervenant dans le processus [Clausing, 1997].

De plus, cette méthode de conception itérative et séquentielle peut entraîner des retards et des coûts élevés et ne présente pas d'interactivité forte entre les différents acteurs, ni de couplages entre les physiques [Fleming et Koppelman, 1996].

Aujourd'hui, les outils PLM (Product Lifecycle Management) améliorent le processus séquentiel en facilitant le partage des informations entre les experts. Mais l'itérativité reste et allonge les délais, interdisant parfois les couplages par contradictions insolubles.



**Figure I. 2 : Processus de conception séquentiel**

Pour pallier les inconvénients de l'approche séquentielle, les industriels ont cherché de nouvelles méthodes de travail. L'objectif principal étant de réduire les délais et les coûts de développement en favorisant les échanges entre départements.

### **b. La conception simultanée (ou concurrente)**

Historiquement, l'ingénierie simultanée est apparue pour substituer l'ingénierie séquentielle [Clark et Fujimoto, 1991] [Canty, 1987].

Le processus de conception simultanée propose la réalisation des tâches de façon simultanée, dans l'optique de raccourcir les temps d'étude et d'accélérer la mise sur le marché du produit [Charney, 1991]. Les étapes se chevauchent et toutes les disciplines concernées sont considérées dès le début du projet [Decreuse et Feschotte, 1998]. Cette approche de conception intègre donc les différentes disciplines impliquées dans le processus et favorise ainsi les interactions entre les métiers [Prasad, 1996] (Figure I. 3).

A partir des observations précédentes, nous constatons que la conception simultanée limite les itérations et garantit la qualité fonctionnelle du produit. Elle est également adaptée à un travail pluridisciplinaire car elle regroupe les différents experts et renforce l'interaction entre les différents domaines impliqués.

De plus, elle considère tous les facteurs qui affectent le produit au cours de son cycle de vie [Winner, Pennell et al., 1988 ; AFNOR, 1991]. Cependant, cette démarche n'est pas encore mise en œuvre car les outils pour renforcer les interactions manquent encore aujourd'hui.

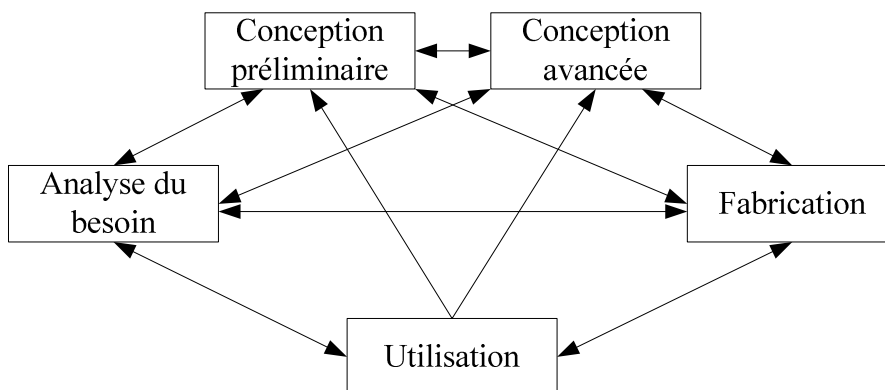


Figure I. 3 : Interaction simultanée

### c. La conception distribuée et collaborative

Pour faire face à l'évolution des marchés et à l'expansion des entreprises, le développement d'Internet a permis d'améliorer la communication tout en limitant les coûts [Riboulet, Marin et al., 2002]. Des méthodes de conception collaborative ont alors été mises en place [Grudin, 1994], [Harvey et Koubez, 1998], [Nelson et Monplaisir, 1999], [Shen, 2003], [Molina, Aca et al., 2005] et [Mejía Gutiérrez, Fischer et al., 2008].

Désormais, l'interactivité doit se faire dans le temps et dans l'espace afin de garantir la collaboration entre les différents acteurs impliqués dans la conception d'un produit. Ceci pose des problèmes techniques et organisationnels qui requièrent des outils :

- de communication interpersonnelle ou de groupe,
- d'organisation et de coordination des groupes et des activités,
- de partage d'informations, d'applications et de ressources,
- de définition spatio-temporelle de la coopération : de la distance spatiale entre les membres d'une équipe (réalité/virtualité géographique) et de la distance temporelle dans l'interaction (couplage entre séquentialité et parallélisme).

A l'heure actuelle, ces outils ne sont pas assez développés, ce qui freine l'utilisation de cette approche.

#### 1.1.1. Types de raisonnement et approches de conception

Les méthodes actuelles de conception reposent sur des approches structurées et basées sur la validation, à différents niveaux de modélisations, de représentations des bibliothèques de composants dans un environnement CAO (Conception Assistée par Ordinateur).

Des approches ont été adoptées pour supporter la conception :

- l'approche descendante (aussi appelée déductive ou top-down),
- l'approche ascendante (abductive ou bottom-up),
- l'approche hybride (inductive ou meet-in the middle).

La méthode descendante est une approche de modélisation système haut niveau, partant des exigences de chaque partie. En revanche, la méthode ascendante part d'une analyse de l'existant et d'un balayage des technologies éligibles. Enfin, l'approche hybride est centrée sur une convergence des deux méthodes précédentes. L'objectif de ces approches est de diminuer le nombre de cycles "conception, fabrication, tests" et de réduire ainsi le temps de conception.

Généralement, le processus de conception suit le schéma classique de la Figure I. 1.

### **1.1.2. Modélisation descendante (déductive ou top-down)**

L'approche de modélisation descendante se fait du niveau système vers le niveau physique, pour aboutir à une architecture à partir des spécifications. Lors du processus, le système est décomposé en sous-systèmes qui sont à leurs tours décomposés jusqu'à obtenir des éléments simples (niveau composant). A chaque phase de décomposition, les éléments sont optimisés afin de satisfaire les spécifications de l'application.

Cette approche est basée sur un raisonnement déductif. Les concepteurs émettent des hypothèses ou des choix de conception. Ensuite, la phase suivante vise à valider ces choix ou à les remettre en cause. Cette étape requiert une validation par la simulation. Lorsque les choix considérés ne sont pas satisfaisants, une nouvelle phase de conception est nécessaire. Le raisonnement déductif est donc itératif (Figure I. 4). Ce raisonnement séquentiel reste cependant le plus utilisé aujourd'hui.

Richard Feynman a fait une importante critique contre l'approche descendante dans son rapport sur l'accident de la navette spatiale Challenger de 1986 [Feynman]. Selon lui, cette approche oblige à prendre des décisions de conception prématurées et rend bien plus complexes les corrections de conception que l'approche ascendante où les acteurs partent en permanence de ce qui est bien connu et maîtrisé.

### **1.1.3. Modélisation ascendante (abductive ou bottom-up)**

L'approche de conception ascendante implique le développement de chaque composant du niveau physique jusqu'au niveau système. Les différents composants sont associés pour former des blocs qui sont eux-mêmes assemblés pour constituer le microsysteme.

Cette approche de modélisation se base sur un raisonnement abductif. Ce raisonnement part de valeurs objectifs approximatives du cahier des charges et doit permettre, à partir des conclusions attendues, de remonter aux hypothèses éligibles [Leake, 1993]. Le raisonnement abductif permet de donner une meilleure explication du phénomène observé. Cela passe par l'évaluation des variables constituant les hypothèses du problème de conception (Figure I. 4).

L'avantage de cette approche réside dans l'emploi de modèles physiques de solutions existantes, ce qui garantit la faisabilité du système final. Par contre, un grand nombre de solutions sont possibles à cause de la taille des bibliothèques des modèles. Il apparaît donc un problème de sectionnement de l'espace de recherche qui peut être traité de diverses manières : à partir de la logique floue [Serna Vázquez, 2007] ou de la considération d'une approche multi-agents [Mejía-Gutiérrez, 2008], par exemple. Par ailleurs, comme les modèles physiques utilisés sont assez complexes, il n'existe pas d'outil qui puisse réellement faire de l'abduction.

Le principe de la conception ascendante constitue l'approche traditionnelle de conception et continue d'être efficace pour des systèmes simples, ce qui n'est plus le cas pour des systèmes complexes [Chou et Sheu, 2002] [Chang, Charbon et al., 1997].

L'approche ascendante nécessite donc une modélisation mathématique des connaissances et un traitement des modèles de connaissances par un outil combinatoire et de satisfaction globale [Fischer, 2000].

En résumé, les principales limites de l'approche ascendante sont :

- le nombre de solutions possibles,
- la mise en œuvre des solutions à travers la traduction des connaissances et la description exhaustive des modèles,
- le manque d'outils pour gérer les acteurs et les connaissances et modéliser ces dernières.

#### 1.1.4. Approche hybride (inductive ou meet-in the middle)

L'approche hybride est le résultat d'un compromis entre les approches descendante et ascendante. Elle vise à concevoir une architecture matérielle en s'appuyant sur des bibliothèques de composants de référence, associés à des modèles de composants réalisables avec les technologies actuelles. Dans ce processus, les étapes de conception sont divisées en étapes successives permettant d'augmenter le niveau de détail de description du système. Elle s'adapte facilement à la conception de microsystèmes embarqués complexes et hétérogènes.

L'approche hybride est basée sur le type de raisonnement inductif. Il consiste à ne considérer que les règles constituant le raisonnement et à donner des valeurs cohérentes à toutes les variables du problème (Figure I. 4).

Cette approche garantit l'existence de solutions physiques à chaque étape et converge vers une solution unique. De plus, comme elle est basée sur l'exploration d'une base de données de modèles physiques, les paramètres liés aux solutions technologiques sont directement extraits et injectés dans une simulation de haut niveau. Enfin, le processus est répété jusqu'à ce que tous les paramètres physiques répondent aux exigences et aux contraintes de l'application.

Des outils sont en cours de développement pour soutenir l'approche hybride [Nasreddine, 2010].

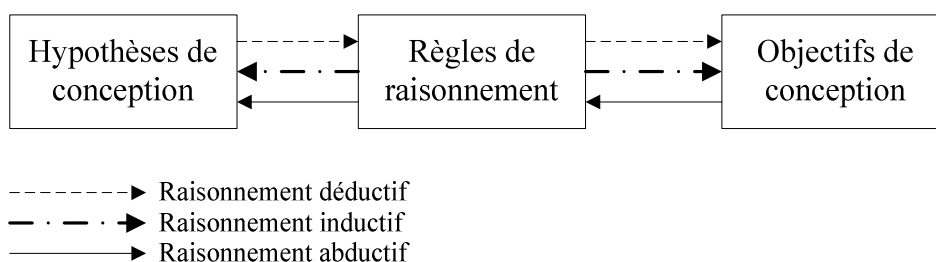


Figure I. 4 : Types de raisonnement de conception

### 1.1.5. Outils pour la conception de produits

De nombreux outils ont été développés dans différents domaines [Pahl et Beitz, 1984] [Teorey, Yang et al., 1986] [Yan, 1992] [Choley]. L'objectif est d'assurer la création rapide d'un produit fiable répondant au cahier des charges.

Ainsi, dans le domaine de l'ingénierie mécanique, les méthodes et outils suivants sont couramment utilisés :

- l'analyse fonctionnelle,
- la méthode APTE,
- le SADT (Structured Analysis and Design Technique) [Rausand et Hoyland, 2004],
- les méthodes IDEF (Integrated DEFINitions) pour modéliser les fonctions, décrire les procédés et faire de la conception orientée objet [Mayer, 1995],
- le FAST (Function Analysis System Technique Diagram) [Younker, 2003],
- la démarche et le logiciel de conduite d'études MAL'IN pour adapter les outils issus de la théorie TRIZ et de l'analyse fonctionnelle,
- le logiciel "Constraint Explorer" pour la résolution de Problème de Satisfaction de Contraintes (PSC).

Pour l'électronique, les langages de description matérielle (VHDL : Very High Level Language, Verilog) sont utilisés pour représenter et simuler le comportement et l'architecture d'un système électronique numérique. Il existe aussi des outils de synthèse logique tels que Design compiler, RC ou Leonard. Ces outils compilent la description fonctionnelle d'un circuit à l'aide d'un outil de synthèse et d'une bibliothèque de composants (Figure I. 5).

Cependant, ces outils présentent quelques limites. Le SADT a été initialement prévu comme un outil de description et d'analyse. Il est dépourvu de toute analyse séquentielle.

Le principal inconvénient du SADT est de ne pas permettre la simulation de la structure générée : aucune validation n'est alors effectuée avant la phase de pré-dimensionnement. De ce fait, pour ces méthodologies et langages, la validation du modèle est liée directement au savoir-faire du concepteur, puisque la simulation réaliste du modèle est pour l'instant impossible.



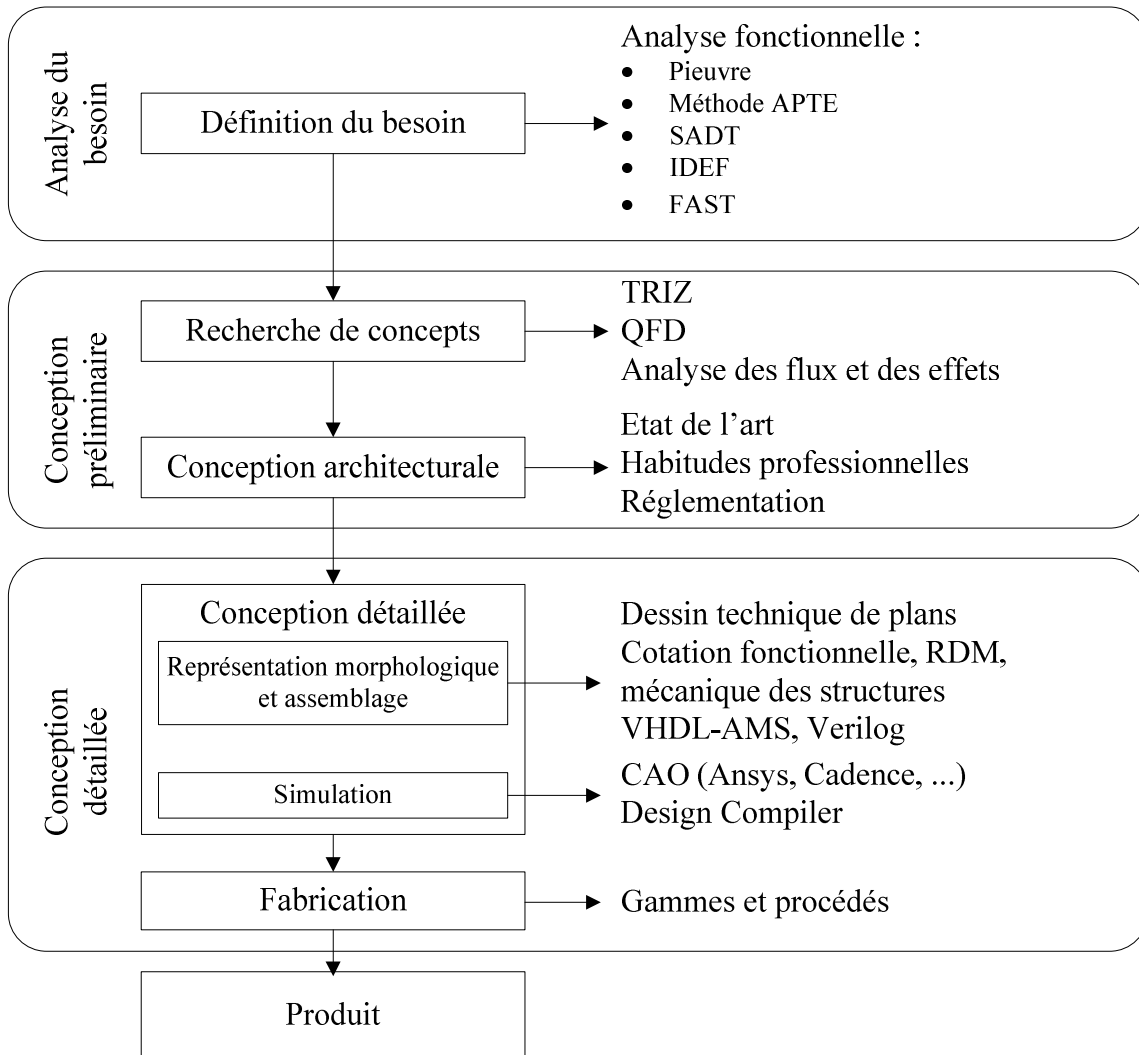


Figure I. 5 : Outils utilisés dans le processus de conception de produits

Pour améliorer le processus de conception, il faudrait soit interfacier les outils utilisés, soit intégrer ces outils au sein d'un environnement unique. Or, de nombreux outils sont utilisés dans la conception de produits. De ce fait, l'interfaçage de tous ces outils entre eux paraît difficile à faire. L'intégration de ces outils semble plus facile à réaliser, en choisissant pour chaque niveau les outils et méthodologies les plus pertinentes.

Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à la conception de microsysteme. Nous décrivons ces dispositifs ci-après.

## 1.2. LES MICROSYSTEMES

Ces dernières années, de nombreux efforts ont été faits pour miniaturiser toute sorte de systèmes : mécaniques, électromécaniques, thermiques, fluidiques, etc. Ceci est motivé par les objectifs de performance et de réduction des coûts et par des perspectives de production en série. Cette volonté de miniaturisation a donné naissance aux Microsystemes. Ces dispositifs ont des appellations différentes en fonction des pays. Ils sont nommés :

- M.E.M.S. (Micro Electro Mechanical Systems) aux États-Unis,
- Micromachines au Japon,
- MST (Microsystems Technologies) en Europe,
- microsystemes en France.

L'idée des microsystemes a été évoquée pour la première fois par Richard Feynman dans son discours à Caltech, en 1959, intitulé « There is plenty of room at the bottom » [Feynman, 1992]. Il présentait l'intérêt de la miniaturisation des machines mais sans application concrète clairement définie.

De nos jours, les microsystemes ont des tailles comprises entre la centaine de micromètres et quelques millimètres. Cependant, la notion de microsysteme concerne parfois des dispositifs multifonctionnels dont la taille est supérieure au centimètre.

Les microsystemes sont des systèmes complexes. Cette complexité provient principalement de l'association d'éléments de natures et de fonctionnalités différentes. De plus, ils sont le siège d'interactions relatives à l'association des sous systèmes, à la cohabitation de divers phénomènes physiques ou à l'application visée.

Dans un premier temps, nous faisons un historique des microsystemes. Puis, nous introduisons l'architecture et les caractéristiques de ces dispositifs. Enfin, nous mettons en avant les sources de complexité dans la conception des microsystemes.

### 1.2.1. Historique

Les premiers microsystemes ont été développés vers 1970 avec la technologie MEMS qui associe des techniques de micro-usinage, de micromécanique et de microélectronique. Tout d'abord, la diminution de la taille de ces systèmes mécaniques a permis l'association avec la microélectronique. Ensuite, leur miniaturisation de l'ensemble du dispositif a rendu possible l'intégration sur des circuits intégrés, également appelés puces, et le développement des microsystemes dits intelligents.

Le concept de microsysteme apparaît vraiment à la fin des années 1980, aux États-Unis, suite à des recherches réalisées à l'université de Berkeley, pour intégrer sur une même puce de silicium des capteurs, des modules de traitement du signal et des actionneurs. Des travaux antérieurs avaient déjà conduit à l'intégration de certains types de capteurs avec leur unité de traitement (capteurs thermiques, de vision, magnétiques, etc.). La nouveauté réside dans l'introduction d'actionneurs électrostatiques, sous forme de mouvement rotatif ou linéaires.

Dans la suite, nous énumérons les dates marquantes de l'histoire des microsystemes.

- Le Docteur Charles S. Smith découvre l'effet piézoélectrique en 1954.



| Domaines                                     | Dispositifs/Applications  | Sociétés   |
|--|---|--|
| Centrales inertielle                         | Accéléromètres,<br>Capteurs de vitesse<br>Capteurs de vibration               | Texas Instruments, Boeing,<br>Motorola, Analog Devices,<br>Sarcos                        |
| Microfluidique et test<br>Processus chimique | Puce ADN<br>Laboratoire sur puce<br>Capteurs chimiques<br>Contrôleurs de flux | Berkeley Micro Instruments,<br>Hewlett Packard, Xerox,<br>Canon, Epson, Caliper, Agilent |
| MEMS optiques<br>(MOEMS)                     | Écrans<br>Interrupteurs optiques  | Tanner, SDL, GE, Samoff,<br>Northrop_Grumman   |
| Mesure de pression                           | Capteurs de pression pour<br>applications médicales et<br>industrielles       | Goodyear, Delco, Motorola,<br>Ford, Siemens, Texas<br>Instruments                        |
| Radiofréquence                               | Interrupteurs RF<br>Filtres<br>Capacités<br>Inducteurs<br>Antennes            | Rockwell, Analog Devices,<br>Texas Instruments   |

**Tableau I.2 : Les principales applications des microsystemes [Tabeling, 2003]**

Les microsystemes sont utilisés dans de nombreux domaines tels que [Culler, Estrin et al., 2004] [Akyildiz, Su et al., 2002] :

- l'industrie automobile [Härtl, Franz et al.] [Sven Krueger et Grace],
- le bâtiment et les applications domotiques [Mainwaring, 2002] [Perillo et Heinzelman, 2005]
- le médical [L.Schwiebert, 2001] [Coulombe et Sawan, 2007] [Salo, Kirstein et al., 2004]
- la détection d'événements et la surveillance d'environnements [Garcia-Sanchez, Garcia-Sanchez et al., 2010] [F. Mattern, 2004] [Werner-Allen, 2005] [Zhang, Cheng et al., 2005]
- etc.

### **1.2.2. Définition et architecture**

Un microsysteme est un dispositif miniaturisé, basé sur des technologies telles que :

- la microélectronique,
- la micromécanique,
- la photonique,

- la radiofréquence
- les technologies de conception.

Il s'agit d'un système intelligent miniaturisé intégrant des capteurs et/ou des actionneurs associés à une unité de traitement et de contrôle, comme le montre la Figure I. 7 [Williams et Yates, 1998] [Beeby, Tudor et al., 2006] [Senturia, 2001].

Les microsystèmes interagissent donc avec leur environnement par le biais de capteurs et d'actionneurs et communiquent, échantent des données avec une base de contrôle ou avec d'autres microsystèmes proches [Rabaey, Ammer et al., 2000 ; Hitachi, 2003]. De plus, ils peuvent agir directement sur le milieu dans lequel ils se trouvent et/ou transmettre ces données à d'autres systèmes qui agiront à leurs tours. C'est en cela que les microsystèmes sont dit intelligents (Figure I. 8).

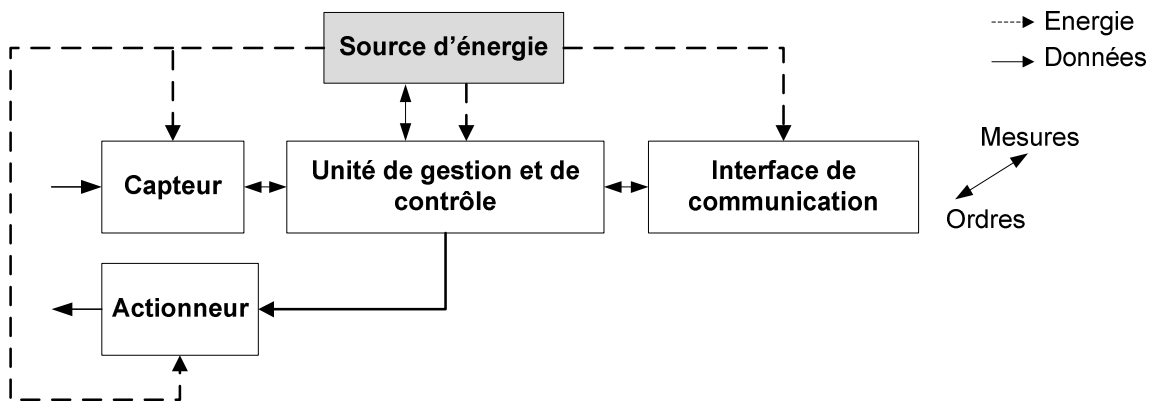


Figure I. 7 : Architecture d'un microsysteme

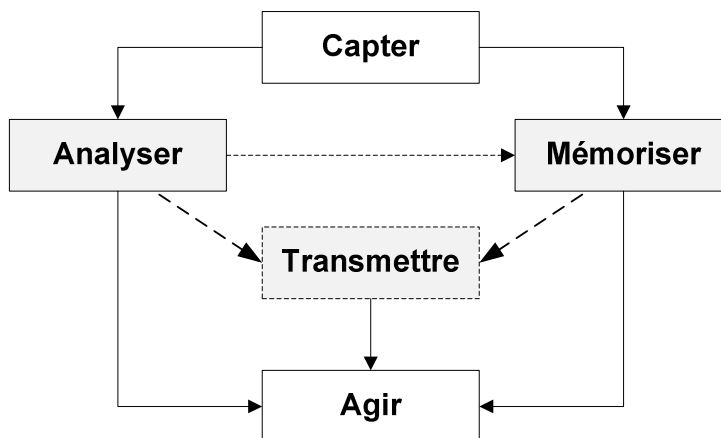


Figure I. 8 : Principe de fonctionnement d'un microsysteme

### 1.2.3. Caractéristiques des microsystèmes

Les microsystèmes sont des petits dispositifs fabriqués à l'aide de micro-technologies qui dérivent des technologies de la microélectronique. Leurs dimensions peuvent aller de la centaine de microns à quelques centimètres. En pratique, un microsystème désigne un système complet ou un composant qui peut être inclus dans un système. Cette miniaturisation autorise la multiplication des fonctionnalités intégrées dans ces dispositifs et permet ainsi de répondre à de nouveaux besoins. En dépit de la diversité d'applications, les microsystèmes ont des caractéristiques communes.

En effet, la miniaturisation implique une diminution de la taille et du poids. La consommation énergétique est également diminuée et les performances sont améliorées [Gilbert et Balouchi, 2008] [Roundy, Steingart et al., 2004]. Les microsystèmes sont souvent produits en masse, ce qui en réduit le coût. Par ailleurs, du point de vue scientifique, ils permettent d'explorer des objets de plus en plus petits.

Comme nous l'avons vu à la section précédente, les microsystèmes datent du début de la microélectronique.

Au départ, l'idée était de réduire les coûts et d'intégrer des capteurs et des circuits sur la même puce. Ce travail était initialement réalisé par des ingénieurs spécialisés en microélectronique ayant souvent des difficultés à comprendre les aspects mécaniques de ces dispositifs. Ce qui a conduit à la conception de systèmes efficaces du point de vue électronique [Senturia, 2001] mais pas toujours du point de vue mécanique.

Ensuite, les microsystèmes ont évolué avec l'introduction de la micromécanique, via des parties mobiles (ressorts, poutres, etc.) en employant les technologies de la microélectronique.

Maintenant, les microsystèmes s'interfacent avec des méthodes et technologies d'autres disciplines comme la micromécanique, la micro-optique, la chimie, la biochimie, l'électromagnétique, etc. (Figure I. 9).

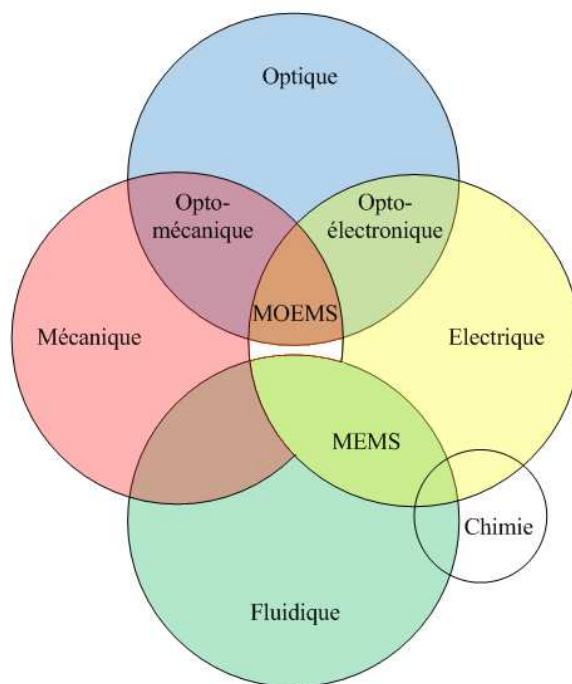


Figure I. 9 : Domaines de la physique impliqués dans la conception de microsystèmes

La complexité des microsystèmes, leur multidisciplinarité, l'hétérogénéité des matériaux et les interfaces avec l'environnement extérieur rendent leur conception délicate. Pour soutenir cette tâche, il est important de développer la collaboration et les échanges d'informations entre les spécialistes des différents domaines impliqués.

#### 1.2.4. La conception actuelle de microsystèmes

La conception de microsystème commence, comme celle de tout produit, par la définition des besoins et des fonctions que doit assurer le système à concevoir. Cette phase est alors suivie par la conception physique du composant. Ensuite, des modèles HDL (Hardware Description Languages) sont le plus souvent utilisés (Figure I. 10).

La modélisation des fonctions électro-mécaniques requiert un couplage entre différentes simulations, à plusieurs étapes de la conception. Une difficulté majeure dans la conception des microsystèmes est le manque d'informations et de liens entre les différents types de simulations effectuées. Ainsi, sans la présence d'interfaces permettant un transfert automatique, un passage manuel des informations augmente le risque de pertes de l'information, et donc d'erreurs dans la conception du microsystème.

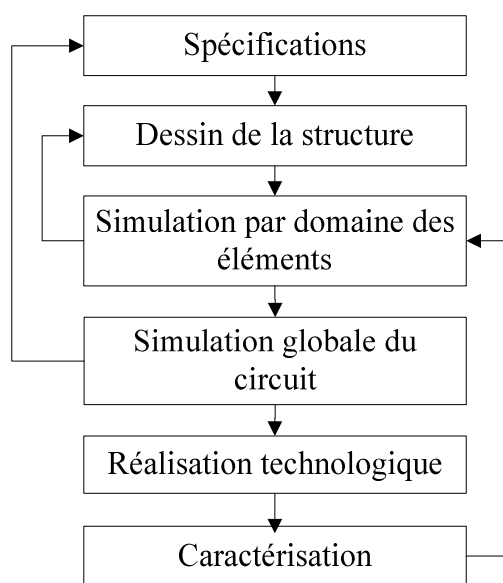


Figure I. 10 : Méthode de conception des microsystèmes

#### 1.2.5. Complexité de conception des microsystèmes

Les microsystèmes sont constitués d'une grande diversité de composants pouvant être assemblés de différentes façons. Le choix de ces modes d'assemblage se fait durant la phase de conception. Cette phase commence par les spécifications du microsystème à réaliser jusqu'à la fabrication du prototype.

De plus, les microsystèmes apportent une contrainte supplémentaire de part leur caractère pluridisciplinaire. De ce fait, leur conception requiert la mise en collaboration de nombreux acteurs, outils et méthodes appartenant à divers domaines d'activité. Dans cette section, nous

exposons les points qui motivent l'introduction de méthodes de conception pour les microsystemes.

Les microsystemes presentent un fort caractere pluridisciplinaire car ils integrent differentes technologies liees a l'electronique, la mecanique, l'energetique, l'automatique, etc. Cette heterogeneite est une source de complexite. En effet, le couplage des divers domaines implique des difficultes de representation et de caracterisation.

Les microsystemes presentent aussi de nombreuses interactions prenant des formes differentes. Nous trouvons donc :

- des interactions entre les elements du microsysteme, entraînant une dependance entre les elements.
- des interactions entre les disciplines, liees a l'heterogeneite des systemes et a la cohabitation de multiples phenomenes physiques.
- des interactions avec l'environnement proche du microsysteme.

A partir de ces observations, nous constatons que la complexite de conception des microsystemes provient du nombre de constituants, de leur nature et du type d'interaction. Pour concevoir un microsysteme, il faut donc pouvoir représenter son comportement global en integrant les differents couplages. Pour ce faire, il semble essentiel de représenter les fonctionnalites et le comportement des differents elements.

Au cours du processus de conception, il est donc important :

- d'identifier les objectifs du systeme,
- de caracteriser l'architecture et le role des sous-systemes,
- de modeliser chaque sous-systeme en considerant le caractere pluridisciplinaire,
- d'identifier les parametres essentiels.

A travers ces points, nous voyons que les aspects de description, de modelisation et de simulation sont primordiaux.

La description vise a identifier les elements du systeme et les interactions entre ces elements. La modelisation consiste a construire des modeles permettant de decrir les phenomenes a observer. Enfin, la simulation permet de prévoir l'evolution du systeme dans le temps, face a la variation de certains parametres.

Les approches de conception de microsystemes actuelles proposent une approche descendante qui passe par une etape de prototypage virtuel pour aider le concepteur a analyser son fonctionnement, faire des choix et predire ses performances [Schmitt, Nicot et al., 2007].

Les microsystemes sont maintenant largement utilises. Ils sont constitues de composants standards : capteurs, traitement du signal, processeur et communication. Il est donc utile de mettre en oeuvre une methode supportee par un ensemble d'outils de conception qui puisse aider le concepteur a rapidement identifier les principaux parametres qui caracterisent une application.

De nos jours, de nombreux outils existent pour concevoir des systemes electroniques. Chaque outil est adapte a un niveau d'abstraction et a un domaine. De plus, ils utilisent une grande variete de langages tels que MAST, VHDL-AMS, langage C++, etc. Un des enjeux de la conception des microsystemes est la mise en commun des methodes et outils developpes



dans les domaines de la robotique, l'automatique, la microélectronique, la micromécanique et l'informatique.

De façon générale, pour gérer l'hétérogénéité des microsystèmes et la complexité du processus de conception, les différents outils doivent intégrer :

- la modélisation en diagrammes blocs pour faciliter le passage entre les différents niveaux et décrire le système de manière hiérarchique,
- le concept de réutilisation,
- des modèles basés sur des équations et des descriptions mathématiques,
- une modélisation basée sur les lois de conservation de l'énergie,
- la possibilité de co-simulation avec d'autres outils.

### **1.3. ÉNERGIE ET MICROSYSTÈMES**

#### **1.3.1. Définition de la notion d'autonomie**

La notion d'autonomie dans les microsystèmes s'attache aux aspects relatifs à la communication et à l'énergie. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement à l'autonomie en énergie.

Malgré la diversité des microsystèmes, tous possèdent des caractéristiques communes :

- la taille,
- la durée de vie,
- l'adaptation à l'environnement extérieur.

Au vu de ces caractéristiques, nous constatons que l'intégration et la disponibilité des sources d'énergie dans des volumes très petits est un enjeu pour répondre à la contrainte d'autonomie des microsystèmes.

Dans la majorité des cas, ces derniers sont alimentés par des batteries qui restreignent leur durée de vie. En effet, leur capacité est limitée en poids et en volume et elles ne permettent pas toujours de satisfaire les contraintes d'autonomie imposées par les microsystèmes dont la durée de vie doit être de plusieurs années.

Nous constatons que les progrès dans les différents domaines de la microélectronique ont été beaucoup plus importants que ceux réalisés dans les technologies des batteries.

En effet, l'accroissement des performances des capacités des batteries est insuffisant en comparaison avec celles des composants électroniques [Starner, 2003].

A partir de ces observations, il faudrait accroître les dimensions des batteries pour augmenter l'autonomie d'un microsystème, ce qui va à l'encontre de l'objectif d'intégration et de miniaturisation de ces dispositifs. Cette limitation montre l'intérêt des recherches effectuées pour rendre les microsystèmes autonomes en énergie, en considérant notamment la récupération d'énergie de l'environnement (ou énergie ambiante).

Par ailleurs, les batteries imposent des opérations de maintenance. Ces dernières ne sont pas toujours possibles car les microsystemes sont parfois déployés dans des endroits étendus et inaccessibles. Elles entraînent également des coûts importants et vont à l'encontre des problématiques actuelles de respect de l'environnement.

L'extension de cette durée de vie est donc un enjeu. Nous remarquons que les microsystemes évoluent souvent dans des environnements composés de diverses sources d'énergie. C'est pour cela que la récupération d'énergie apparaît être une alternative intéressante pour substituer ou suppléer les solutions actuelles. En effet, en comparaison avec l'énergie stockée dans les batteries, l'environnement représente une source d'énergie relativement illimitée.

La récupération d'énergie est possible grâce à la faible consommation des microsystemes [Gilbert et Balouchi, 2008] [Roundy, Steingart et al., 2004] [Terrasson, Briand et al., 2009]. En effet, les sources ambiantes fournissent une quantité d'énergie comparable à la consommation des microsystemes, allant du microwatt à quelques centaines de milliwatts. Cette notion est définie dans le paragraphe suivant.

### 1.3.2. Récupération d'énergie

La notion de récupération d'énergie ("energy scavenging" ou "energy harvesting" en anglais) est définie comme la conversion d'énergie ambiante (c'est-à dire l'énergie disponible dans l'environnement du microsysteme) en énergie électrique exploitable.

Les débuts de la récupération d'énergie datent des moulins à vent et à eau. Depuis des siècles, les Hommes ont cherché des solutions pour stocker l'énergie du mouvement, du soleil ou de la chaleur. La différence réside dans le fait que de nos jours, la récupération d'énergie est motivée par le désir de suppression de câbles, pour avoir des dispositifs nomades, et de suppression des batteries, pour augmenter la durée de vie et répondre aux problématiques actuelles d'écologie [Raju, 2010].

La récupération d'énergie à l'échelle macroscopique diffère de celle à l'échelle microscopique du point de vue des niveaux de tensions employés, des applications visées et des technologies utilisées (Tableau I.3). Cependant, toutes deux visent à alimenter un dispositif ou un réseau.

| Échelle       | Source d'énergie  | Solutions                      | Objectifs                         |
|---------------|---|--------------------------------|-----------------------------------|
| Macroscopique | Sources d'énergie renouvelable (solaire, vent, géothermie, etc.)                | Solutions de gestion d'énergie | Réduire la dépendance au pétrole  |
| Microscopique | Sources d'énergie de l'environnement (vibration, chaleur du corps humain, etc.) | Solutions faible consommation  | Obtenir des systèmes "perpétuels" |

**Tableau I.3 : Comparaison entre la récupération d'énergie macroscopique et microscopique**

La considération de la récupération d'énergie nous amène à la notion d'énergie dont la propriété principale est de se conserver (Premier Principe de la Thermodynamique). L'énergie se transforme donc d'une forme à une autre. Selon Wiesenfeld [Wiesenfeld, 2005], il existe deux formes d'énergie : l'énergie libre et l'énergie stockée.

### a) Énergie libre

L'énergie libre regroupe les énergies suivantes :

- l'énergie cinétique qui apparaît quand le système est en mouvement
- l'énergie thermique (calorifique) mise en jeu quand la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état.
- l'énergie électrique due au déplacement des électrons dans la matière.
- l'énergie rayonnante : elle désigne l'énergie transportée par un rayonnement (lumière visible, infrarouges, ultraviolets, rayons X, rayons gamma...).

La Figure I. 11 présente des exemples de transformations et de convertisseurs d'énergie libres [Wiesenfeld, 2005].

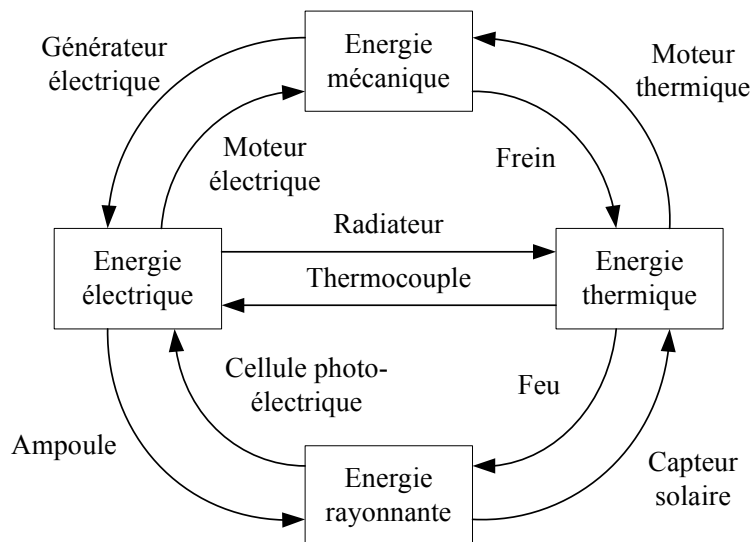


Figure I. 11 : Transformations d'énergies libres et exemples de convertisseurs

### b) Énergie stockée

Parmi les sources d'énergie stockée, nous trouvons :

- l'énergie potentielle : énergie de gravitation, traduite par l'attraction entre deux corps et énergie élastique, associée à la déformation des objets élastiques.
- l'énergie chimique : énergie associée à la liaison des atomes dans une molécule (Figure I. 12).
- l'énergie nucléaire : énergie produite par le noyau des atomes qui subissent des transformations.

L'énergie n'existe qu'en présence d'un gradient. De ce fait, la récupération d'énergie est un problème dynamique, à quatre dimensions : trois spatiales et une temporelle.

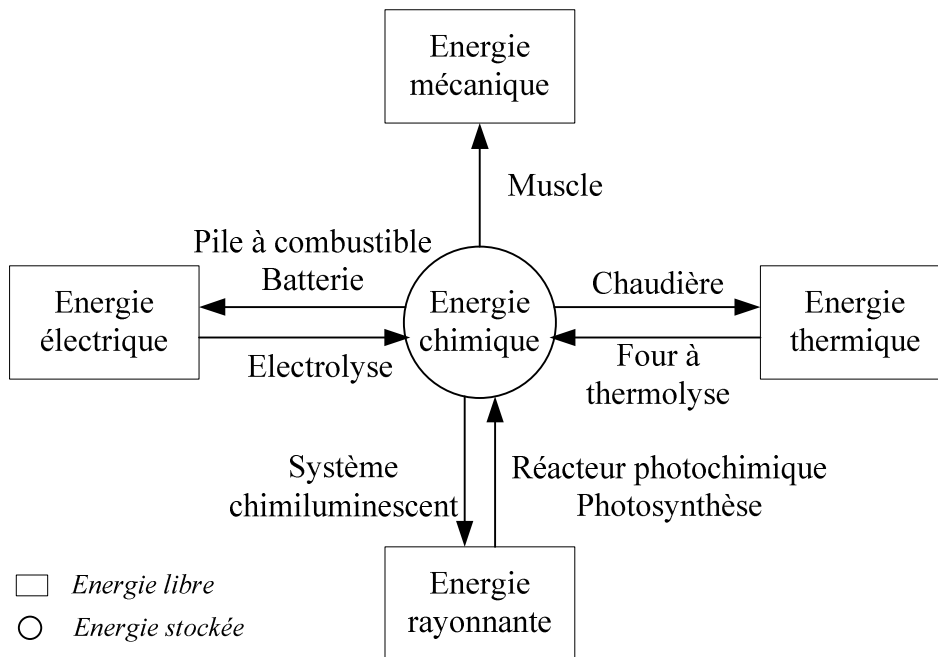


Figure I. 12 : Transformations en énergies chimiques et en énergies libres

### 1.3.3. Sources d'énergie et principes de conversion

#### 1.3.3.1. Différentes sources d'énergie ambiante

L'environnement regorge d'une grande variété de sources telles que :

- l'énergie thermique [Strasser, Aigner et al., 2002],
- le rayonnement solaire [Jiang, Polastre et al. ; Raghunathan, Kansal et al., 2005 ; H. Dubois-Ferrière, L. Fabre et al., 2006] [Simjee et Chou],
- l'énergie mécanique [Roundy, Wright et al., 2003 ; Beeby, Tudor et al., 2006],
- l'énergie d'un fluide en mouvement [Federspiel and Chen, 2003 ; Chou., 2006],
- etc. [Kansal et Srivastava, 2003].

#### Énergie thermique

L'énergie peut être récupérée à partir de gradients de température naturellement disponibles dans l'environnement [Lawrence, Snyder et al., 2002] [Haidar et Ghojel, 2001] [Jung, Lauterbach et al., 2003] [Starnier, 1996].

Ce mode de récupération se base sur l'effet thermoélectrique, découvert par le physicien Thomas Johann Seebeck, en 1821. Cet effet se traduit par le passage d'un courant électrique dans un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur. Ainsi, les sources thermoélectriques convertissent la différence de température entre deux milieux en électricité. Une approximation du rendement est donnée par le rendement de Carnot.

Le rendement est donc limité pour de faibles gradients de température. Cependant, un nombre important de recherches a été réalisé pour convertir l'énergie thermique en électricité.

Le plus souvent, cette action est réalisée à partir de générateurs thermoélectriques qui exploitent l'effet Seebeck.

Par exemple, Stordeur et Stark [Stordeur et Stark, 1997] ont conçu un microgénérateur capable de générer  $15 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  à partir d'un gradient thermique de  $10^\circ\text{C}$ .

Applied Digital Solutions a également développé un générateur thermoélectrique capable de générer  $40 \mu\text{W}$  avec un gradient de  $5^\circ\text{C}$ , une surface de  $0,5 \text{ cm}^2$  et une épaisseur de quelques millimètres [Whalen, Thompson et al., 2003] [Brett, Warneke et al., 2002] [Bennett, Selfridge et al., 2001].

### Énergie rayonnante

Nous pouvons distinguer trois types de rayonnement [Mazria, 2001] :

- le rayonnement solaire,
- le rayonnement infrarouge,
- les ondes radiofréquence.

#### a) Rayonnement solaire

Dans les couches supérieures de l'atmosphère, la quantité d'énergie solaire atteignant une surface normale aux rayons est de  $1350 \text{ W}/\text{m}^2$ . L'effet de la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement solaire réduit considérablement cette valeur. La réduction est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante ; elle est donc une fonction directe de la hauteur du soleil. En été, la densité de flux atteignant une surface peut valoir de  $900$  à  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ , dans les meilleures conditions.

Le Tableau I.4 regroupe quelques ordres de grandeur du rayonnement solaire en fonction des conditions climatiques.

| Éclairement             | Puissance ( $100000 \text{ lux} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ )                                  |
|-------------------------|---|
| Grand soleil            | $1000 \text{ W}/\text{m}^2$   |
| Couvert haut            | $400$ à $500 \text{ W}/\text{m}^2$  |
| Pluie                   | $50 \text{ W}/\text{m}^2$   |
| Intérieur               | $300 \text{ lux} = 300 \text{ lumens}/\text{m}^2 = 3 \text{ W}/\text{m}^2$                      |
| Ampoule de $60\text{W}$ | $5 \text{ mW}/\text{cm}^3$ à $10 \text{ cm}$ / $0,567 \text{ mW}/\text{cm}^3$ à $35 \text{ cm}$ |

**Tableau I.4 : Ordres de grandeur de la puissance solaire reçue par unité de surface**

Le rayonnement solaire est déjà largement exploité pour alimenter des applications comme les calculatrices, les montres ou les chargeurs.

La conversion d'énergie solaire en énergie électrique se fait à partir de cellules photovoltaïques. Une cellule standard donne  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$  avec la lumière solaire et  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  avec un éclairage artificiel. Actuellement, leur efficacité est comprise entre 15 et 20 % avec la lumière du soleil mais cette efficacité diminue fortement avec un éclairage

artificiel [Kribus, 2002]. Par ailleurs, les études actuelles portent sur de nouveaux matériaux ou sur l'empilement de cellules, pour accroître les rendements à des valeurs proches de 35 %.

### **b) Rayonnement infrarouge**

Le rayonnement infrarouge est moins présent et est disponible à proximité des sources très chaudes (dont la température est supérieure à 800 K). La conversion se fait à partir de cellules photovoltaïques adaptées aux longueurs d'ondes de ce rayonnement. Généralement, elle se déroule en deux étapes : l'énergie thermique est d'abord transformée en rayonnement infrarouge puis en électricité. Ce processus est appelé conversion thermo-photovoltaïque [Cordero, Ginige et al., 2002] [Dimatteo, Greiff et al., 2003].

### **c) Ondes radiofréquence**

Les ondes radio sont moins sensibles aux obstacles que le rayonnement solaire. L'énergie qui peut être récupérée est cependant limitée (quelques  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ) et nécessite que le système de récupération d'énergie (antenne) ait une grande surface équivalente (cela traduit l'importance de la surface de réflexion d'un faisceau électromagnétique) ou qu'il soit très proche de l'émetteur.

Une application spécifique de ce type de source est l'alimentation des capteurs lorsque l'on approche un appareil communicant, ce qui amène le capteur à se réveiller, à effectuer la mesure et à transmettre l'information, puis à retourner en veille (principe de fonctionnement de la RFID (Radio Frequency Identification)) [Friedman, Heinrich et al., 1997].

La puissance générée peut être évaluée à partir de l'équation de Schmith [Smith, 1998]

## **Énergie acoustique**

La quantité d'énergie récupérable à partir de cette source est très faible, sauf dans des environnements ayant des niveaux sonores élevés. Roundy [Roundy, Steingart et al., 2004] estime que l'énergie récupérée à partir d'un signal de 100 dB est environ égale à  $0,96 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ .

Liu et al. ont développé un récupérateur d'énergie acoustique basé sur un résonateur électromagnétique de Helmholtz (EMHR) [Liu, Phipps et al., 2008]. Il se compose d'un orifice et d'une cavité qui mettent une membrane piézoélectrique en vibration. L'énergie acoustique est transformée en énergie mécanique lorsque le son arrive sur l'orifice et entraîne une variation de pression qui génère une vibration de la membrane. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de récupérer 30 mW à partir d'un son de 160 dB, avec ce type de récupérateur.

## **Énergie mécanique**

### **a) Énergie mécanique liée à la circulation de fluide**

L'énergie éolienne a toujours été utilisée à grande échelle comme source d'énergie. Des études ont été menées pour essayer de générer de l'énergie à partir de dispositifs de petites tailles (de l'ordre du  $\text{cm}^3$ ). La puissance fournie  $P$  est proportionnelle à la section  $S$  de l'interface de captation, au cube de la vitesse  $v$  du fluide et à son débit massique  $\rho$ . Par conséquent, la puissance est fortement dépendante de la vitesse de déplacement du fluide.

### b) Énergie mécanique liée à une variation de pression

L'énergie peut être récupérée en exploitant les variations de pression entre deux éléments. Une étude simple et rapide des conditions atmosphériques sur la planète révèle que la variation journalière de pression est d'environ 677 Pa, ce qui correspond à une variation d'énergie de  $1,16 \cdot 10^{-5}$  J, soit une densité de puissance de  $7,8 \text{ nW/cm}^3$  [Roundy, Steingart et al., 2004].

Il n'existe pas à l'heure actuelle de dispositifs pour exploiter la variation de pression naturelle. Cependant, l'horloge d'atmosphère (Atmos), construite en Suisse par Jaeger-LeCoultre, en 1935, obtient l'énergie nécessaire par de petites variations de température et de pression atmosphérique de l'environnement. Elle peut alors fonctionner pendant des années sans intervention humaine.

### c) Énergie mécanique liée à la déformation

L'énergie mécanique des vibrations ou de la déformation est omniprésente.

Un exemple de génération d'énergie à partir d'un mouvement de rotation est la souris d'ordinateur autonome sans fil citée par Mikami et al. [Mikami, Matsuno et al., 2006]. Le système est conçu pour une interface de très faible consommation et pour des communications à faible distance ; il peut récupérer jusqu'à  $50 \mu\text{W}$  pour une surface de  $0,1 \text{ cm}^2$ .

Il existe déjà des exemples commerciaux alimentés par le mouvement (lampe torche développée par la société Applied Innovative Technologies, montre Seiko Kinetics).

Selon une étude réalisée par Roundy et al. [Roundy, Wright et al., 2003], les vibrations sont une source d'énergie très intéressante, avec une densité comprise entre 50 et  $250 \mu\text{W/cm}^2$ . Ils ont mesuré les vibrations de sources de natures différentes. Le Tableau I.5 représente l'amplitude maximale en accélération des vibrations, ainsi que la fréquence à laquelle ce pic a lieu.

| Source de vibrations     | Accélération maximale ( $\text{m/s}^2$ ) | Fréquence où l'accélération est maximale (Hz) |
|--------------------------|--|---|
| Machine 3 axes           | 10                                       | 70  |
| Sèche linge              | 3,5                                      | 121   |
| Micro-onde               | 2,25                                     | 121   |
| Terrasse en bois         | 1,3                                      | 385   |
| Fenêtre proche d'une rue | 0,7                                      | 100   |
| Machine à laver          | 0,5                                      | 109   |
| Réfrigérateur            | 0,1                                      | 240   |

**Tableau I.5 : Liste de sources de vibrations avec leur accélération maximale et la fréquence associée**

Les dispositifs de récupération d'énergie peuvent être électromécaniques ou piézoélectriques. Les premiers étant largement utilisés et étudiés. Roundy, Wright et Rabaey [Roundy, 2003] ont montré que les systèmes de récupération de l'énergie à partir des vibrations peuvent se modéliser par un dispositif masse-ressort. L'accélération mécanique

résulte de la vibration qui, en retour, met la masse en oscillation. Ce déplacement cause des forces de frottement et d'amortissement. Cette énergie d'amortissement est alors convertie en énergie électrique à travers un champ électrique (électrostatique), un champ magnétique (électromagnétique) ou la déformation d'un élément piézoélectrique.

### 1.3.3.2.Énergie générée par l'Homme

Il est également possible de récupérer l'énergie à partir des activités humaines, [Shenck et Paradiso, 2001]. En effet, le corps humain brûle environ 10,5 MJ par jour. Selon Roundy, cela correspond à une dissipation de puissance de 121 W [Roundy, 2003]. Starner a proposé d'utiliser cette énergie pour alimenter des dispositifs électroniques [Starner, 1996]. Par exemple, certaines montres sont déjà alimentées à partir du mouvement du poignet ou du gradient thermique entre la peau et l'air (montres Seiko).

Des études réalisées au MIT montrent que la plus grande quantité d'énergie et la plus exploitable est celle générée au niveau du talon et de la flexion du pied, lors de la marche [Shenck et Paradiso, 2001]. Une chaussure piézoélectrique a donc été conçue. Elle peut générer  $330 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  lorsqu'une personne marche. Le principal problème reste le transport de cette énergie depuis le pied jusqu'à l'application à alimenter.

De plus, les sources mentionnées précédemment sont des sources dites passives car l'Homme n'a pas besoin de faire d'autre action que celle qu'il a prévue de faire. A l'inverse, il existe aussi des énergies actives qui requièrent une action spécifique de l'Homme. Par exemple, Freeplay commercialise des produits alimentés par un ressort que l'utilisateur monte. Ces produits sont utiles mais pas applicables pour des applications de microsystèmes autonomes car elles seraient inutilisable et chères.

### 1.3.3.3.Bilan sur les sources d'énergie et les systèmes de conversion

La Figure I. 13 compare les densités d'énergie de différentes sources au cours du temps. Si la durée de vie des capteurs n'est que de quelques années, les batteries constituent la source d'énergie la plus simple à mettre en œuvre. De plus, si l'énergie solaire disponible dans l'environnement du capteur est suffisante, les panneaux photovoltaïques sont une bonne solution. Par contre, pour de longues durées de vie ou lorsque l'énergie solaire est insuffisante, la conversion des vibrations est une alternative intéressante parce que les vibrations sont présentes dans de nombreux environnements.

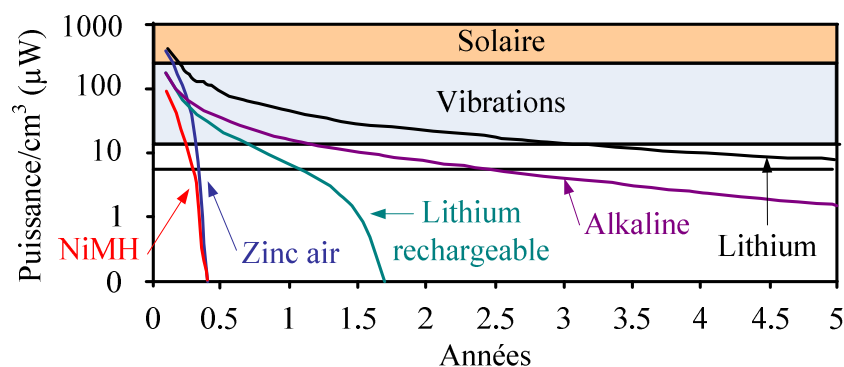


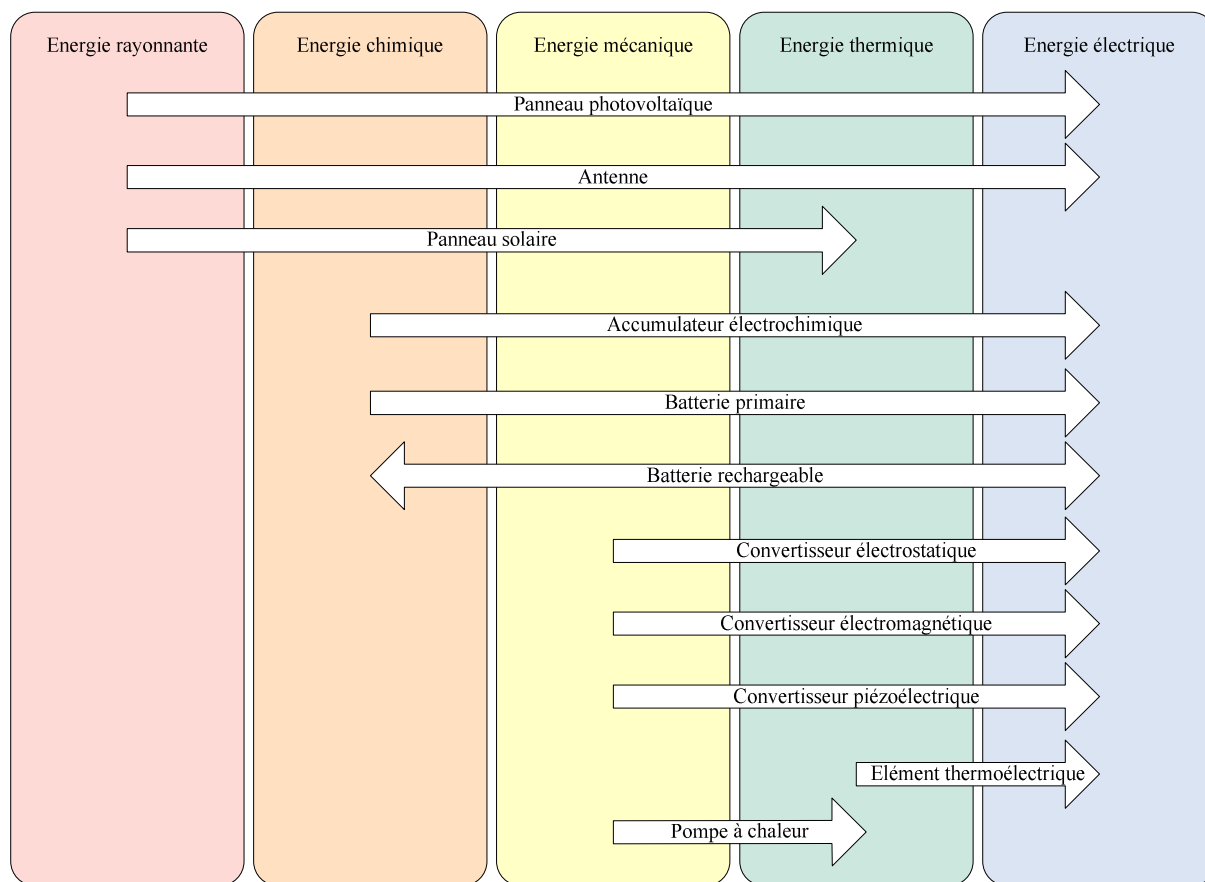
Figure I. 13 : Comparaison des densités d'énergie [Roundy, Wright et al., 2003]



Le Tableau I.6 résume les densités d'énergie disponibles dans notre environnement et la Figure I. 14 récapitule les différentes technologies de conversion d'énergie ambiante en énergie électrique.

| Source                 | Référence   | Énergie disponible     |
|------------------------|---|------------------------|
| Solaire direct         | [Thomas, Qidwai et al., 2006]                           | 100 mW/cm <sup>2</sup> |
| Solaire diffus         |   | 0.1 mW/cm <sup>2</sup> |
| Mouvement humain       | [Mitcheson, Green et al.]<br>[Shenck et Paradiso, 2001] | 4 μW/cm <sup>3</sup>   |
| Machine                | [Roundy et Wright, 2004]                                | 800 μW/cm <sup>3</sup> |
| Thermique              | [Roundy et Wright, 2004]                                | 15 μW/cm <sup>2</sup>  |
| Radiofréquence (GSM)   | [Hagerty, Helmbrecht et al., 2004]<br>[Yeatman, 2004]   | 1 μW/cm <sup>2</sup>   |
| Air (débit = 30 l/min) | [Federspiel et Chen, 2003]                              | 1 mW/cm <sup>2</sup>   |

**Tableau I.6 : Source d'énergie ambiantes et convertisseurs associés**



**Figure I. 14 : Énergie et principes de conversion [Flipsen, 2005]**

### 1.3.4. Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est une problématique importante dans de nombreuses applications (télécommunication, sauvegarde mémoire, appareils médicaux, véhicules électriques et hybrides...). Ces dispositifs doivent répondre à des spécifications en termes :

- d'énergie stockée (en Wh),
- de puissance maximale (en W),
- de poids,
- d'encombrement,
- de durée de vie,
- de coût.

L'énergie électrique peut se stocker de différentes manières :

- sous forme électrostatique, en accumulant des charges électriques dans un ou plusieurs condensateurs. Les avantages par rapport aux batteries classiques sont un gain de poids et un fonctionnement possible par très grand froid. Toutefois, le prix de l'énergie stockée est élevé.
- sous forme électromagnétique, en établissant un courant électrique dans une bobine autour d'un circuit magnétique, de telle sorte que l'énergie nécessaire pour mettre en mouvement les charges électriques puisse être restituée par induction. La durée de stockage reste faible en raison des pertes par effet Joule.
- sous forme électrochimique, qui présente la caractéristique intéressante de fournir une tension qui dépend peu de sa charge ou du courant débité.

Le stockage de l'énergie électrique requiert donc des systèmes d'accumulation mécaniques, électrostatiques, magnétiques ou électrochimiques associés à des convertisseurs électroniques de puissance.

#### 1.3.4.1. Différents moyens de stockage

##### a) Les condensateurs

La capacité d'un condensateur est déterminée par la géométrie des armatures (la surface spécifique  $S$  et la distance  $e$ ) et par la nature de l'isolant (appelé diélectrique), caractérisé par sa permittivité  $\epsilon$ . Les condensateurs sont classés en fonction de leur technologie (électrolytiques non électrolytiques).

##### b) Les supercapacités (ou super-condensateurs)

Les supercapacités fournissent des meilleures énergies volumiques que dans les condensateurs (5 à 15Wh/kg) mais coûtent plus cher et ont une constante de décharge plus élevée. Dans le plan énergie-puissance, elles se positionnent entre les accumulateurs et les condensateurs classiques (Figure I. 15) et ont deux fonctions principales :

- elles peuvent être utilisées comme source d'énergie et remplacent alors les accumulateurs électrochimiques, en offrant plus de sûreté de fonctionnement.

- elles sont aussi employées comme source de puissance. Ils viennent en complément des accumulateurs. Cela permet un gain de volume et de masse.

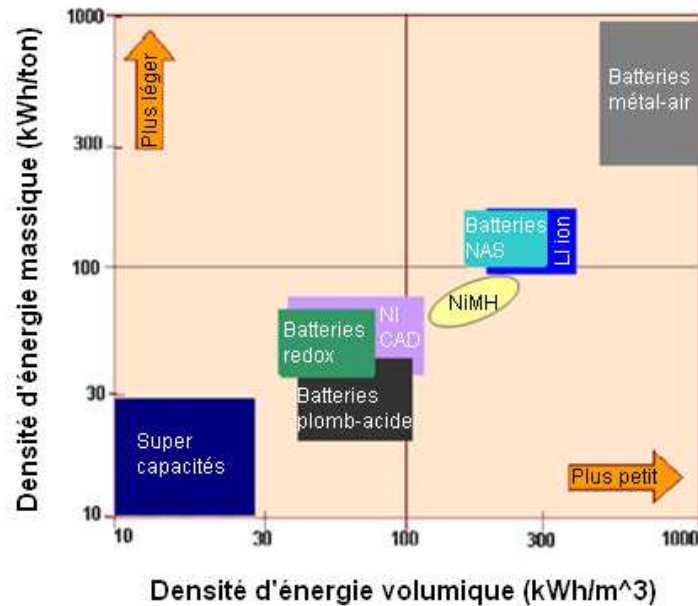


Figure I. 15 : Diagramme de Ragone pour différents moyens de stockage d'énergie

### c) Les accumulateurs électrochimiques

Ils sont constitués par un couple électrochimique composé de deux électrodes séparées par un électrolyte et aux interfaces desquelles interviennent des réactions d'oxydation ou de réduction qui cèdent ou absorbent des électrons.

La durée minimale de décharge des accumulateurs électrochimiques descend difficilement en dessous du quart d'heure.

### d) Les inductances

L'énergie magnétique  $W = \frac{1}{2} LI^2$  est stockée dans l'air et l'énergie volumique  $\frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu}$  est proportionnelle au carré de l'induction.

Les pertes par effet Joule ne permettent pas de la conserver au-delà de quelques secondes. C'est pour cela que sont utilisés des bobinages supraconducteurs tels que les solénoïdes ou les tores.

### e) SMES (Superconducting Magnet Energy Storage)

Une bobine supraconductrice court-circuitée sur elle-même représente un stockeur d'énergie idéal puisque les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide.

Les SMES ont un temps de réponse très court, une charge et une décharge rapides, ne sont pas limités en fréquence, ont un rendement élevé et une longue durée de vie.

Par contre, ils font intervenir des courants assez forts et ont un coût important.

### f) Les volants d'inertie

L'énergie cinétique est stockée dans un volant d'inertie ( $W=J\Omega^2/2$ ).

Il faut des matériaux à haute résistance de traction pouvant atteindre des vitesses périphériques élevées. Pour accumuler l'énergie, un moteur accélère le disque. Pour utiliser l'énergie, on branche un générateur électrique. Le rendement de ce système est supérieur à l'utilisation d'accumulateurs chimiques.

### g) Le stockage hydraulique

Ce principe est utilisé pour les grandes énergies (10 GW et 100 MW). Il suffit de construire un réservoir à une hauteur  $h$  par rapport au système pompe/turbine ( $W = mgh$ ). Son coût est très faible mais ce dispositif est difficilement transportable.

## 1.3.4.2. Tableau comparatif des moyens de stockage de l'énergie

Le Tableau I. 7 compare les différents types de stockage. A partir de ce tableau, il apparaît que les technologies de stockage offrent des fonctions différentes en termes de puissance et d'énergie. En effet, certaines permettent de rendre des systèmes autonomes (batteries, pile à combustible), d'autres peuvent fournir des puissances importantes sur une durée plus ou moins longue (batteries de puissance, condensateurs). Pour des durées supérieures à la seconde les super-condensateurs sont efficaces.

| Performances en 2010 [Enea consulting ;Vulvox] | Accumulateur électrochimique |           |          |           | Inertiel    | Inductif    | Condensateur          | Supercapacité              |
|--|------------------------------|-----------|----------|-----------|-------------|-------------|-----------------------|----------------------------|
|  | Pb-acide                     | Ni-Cd     | NaS      | Lithium   |             |             |                       |                            |
| Densité d'énergie W.h/kg                       | 30                           | 50        | 120      | [10;100]  | 25          | 4           | [10 ; 100]            | [1 ; 10]                   |
| Densité de puissance W/kg.crête                | 80                           | 200       | 150      | $< 10^3$  | 2000        | $28*10^6$   | $> 10^6$              | $10^4$                     |
| Cyclabilité                                    | 50- 80% de PdD               | 1500      | 100      | $10^3$    | Très élevée | Très élevée | Très élevée $10^{10}$ | Élevée $10^6$              |
| Maturité industrielle                          | Oui                          | Oui       | Débuts   | Oui       | Non         | Oui         | Oui                   | Oui : petits<br>Non : gros |
| Temps minimal de charge/ décharge              | 15min                        | 15min     | 45min    | 0,3h-5h   | 1min        | <1ms        | $\mu$ s-ms            | 1s - 30s                   |
| Durée de stockage                              | > 1mois                      | 1 mois    | qq jours | qq jours  | qq min      | > 1h        | qq s                  | qq min                     |
| Coût   | 170€/kWh                     | 1500€/kWh | 150€/kWh | 470 €/kWh | > 150€/kwh  | ?           | qq 5€/kWh             | qq 10€/kWh                 |
| Rendement                                      | 60-65 %                      | 60-65 %   | 70-80 %  | 70-85 %   | 90-95 %     |             | > 95 %                | 85-98 %                    |

**Tableau I. 7 : Comparaison des différents moyens de stockage de l'énergie**

## 1.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la problématique de conception de produits ainsi que la nécessité d'introduire des processus pour gérer les acteurs et les connaissances. Tout ceci permet à l'entreprise de gagner du temps et donc d'être plus compétitive par rapport à ses concurrents.

Nous avons vu qu'il existe différents processus dont l'apparition est liée à l'évolution des exigences clients, aux changements des technologies, aux contraintes environnementales fortes, à une augmentation de la concurrence et à une réduction des délais de fabrication.

Après avoir décrit les principes de l'ingénierie séquentielle, ses limitations ont été mises en évidence. Ce processus entraîne un manque de collaboration entre les métiers dans l'entreprise, ce qui provoque une augmentation de la durée de développement du produit.

Face à ces limitations, les industriels ont cherché à développer d'autres méthodes de travail. C'est ainsi que l'ingénierie simultanée ou collaborative est apparue. Ses apports principaux sont la mise en parallèle des activités de conception et l'implication de toutes les compétences dès le début du processus. Cependant, la communication entre les acteurs reste difficile à cause du manque d'outils.

Cette collaboration est rendue encore plus compliquée par l'expansion géographique des entreprises. Des processus de conception collaborative se sont alors développés. Cependant, malgré les progrès en informatique, des efforts restent à faire pour développer des outils permettant :

- de gérer les Hommes dans l'espace et dans le temps,
- de gérer et de modéliser les connaissances pour prendre en compte le caractère multidomaine des produits.

Ensuite, nous avons introduit le contexte d'étude de cette thèse, à savoir les microsystemes. Après avoir décrit leurs éléments et leurs domaines d'application, nous avons mis en évidence leurs spécifications. De par leur architecture, les microsystemes sont des dispositifs hétérogènes qui nécessitent des compétences multidisciplinaires lors de leur conception.

Le nombre d'éléments, leur nature et les interactions entre eux rendent le processus de conception difficile. L'enjeu est d'intégrer les différents domaines de l'ingénierie et de faire collaborer les experts ayant des connaissances et des outils spécifiques.

Enfin, nous avons mis en évidence un autre enjeu lié aux microsystemes, à savoir leur autonomie. Pour pallier les limitations actuelles des batteries en termes de poids, de taille, de coût, de maintenance et de durée de vie, nous considérons la récupération de l'énergie présente dans l'environnement. Ceci est possible grâce à la faible consommation des microsystemes. De plus, la considération de la récupération d'énergie pour alimenter les microsystemes implique la conception de récupérateur intégrant une source, un système de conversion et des éléments de stockage.

Dans le chapitre suivant, nous exposerons notre problématique liée à la conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes capables de récupérer l'énergie de leur environnement pour fonctionner.

---

## Chapitre II. Problématiques sur la conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.1.   | Conception multidisciplinaire de microsystemes autonomes .....                                 | 36 |
| 2.1.1. | Approche pluridisciplinaire .....  | 36 |
| 2.1.2. | Processus de conception pluridisciplinaire de microsystemes .....                              | 38 |
| 2.1.3. | Notre approche : la conception integree de microsystemes .....                                 | 39 |
| 2.2.   | Modelisation du probleme de conception .....   | 40 |
| 2.2.1. | Analyse et structuration du probleme .....   | 40 |
| 2.2.2. | Notre modelisation du probleme de conception : description par l'analyse du cycle de vie ..... | 41 |
| 2.2.3. | Notre modelisation du probleme de conception : description architecturale .                    | 42 |
| 2.3.   | Qualification energetique et modelisation systeme.....   | 47 |
| 2.3.1. | Specificites energetiques .....  | 47 |
| 2.3.2. | Notre approche : qualification energetique .....   | 50 |
| 2.4.   | Pre-dimensionnement de microsystemes autonomes.....  | 51 |
| 2.4.1. | Notre solution logicielle .....  | 51 |
| 2.4.2. | Outil developpe.....   | 51 |
| 2.5.   | Cas de validation : contexte et definition du besoin.....                                      | 53 |
| 2.6.   | Conclusions .....  | 57 |

## 2.1. CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE DE MICROSYSTEMES AUTONOMES

La conception de microsysteme induit une gestion de projets associant des disciplines et des technologies differentes. Afin de faciliter l'integration de solutions faisant intervenir des domaines scientifiques distincts, il est necessaire de mettre en place des outils et methodes capables de soutenir le travail de cooperation entre les acteurs du projet de conception.

Dans ce chapitre, nous presentons notre demarche multidisciplinaire d'aide a la conception de microsystemes autonomes recuperant l'energie de l'environnement. Cette approche permet de repondre aux enjeux imposes par la conception de microsystemes en couplant les differents domaines impliquees.

Apres avoir evalue les enjeux de la conception de microsystemes, nous presenterons notre demarche globale. Ensuite, nous detaillerons le cas de validation que nous allons traiter tout au long de ce rapport, pour illustrer les differentes etapes de la demarche mise en oeuvre.

### 2.1.1. Approche pluridisciplinaire

Les microsystemes font intervenir differents domaines de l'ingenierie tels que :

- la Mecanique,
- l'Electronique,
- l'Energetique,
- l'Automatique,
- la Science des Materiaux.

Dans notre etude, nous nous focalisons principalement sur les domaines suivants, fondamentaux pour la conception de microsystemes autonomes : la mecanique (conception), l'electronique (microsystemes) et l'energetique (autonomie).

Les microsystemes regroupent donc plusieurs axes d'etude : electronique [Arriuria, 2008], transmission [Terrasson, 2008] et energie embarquee [Marzencki, 2007]. Nous nous interessons ici a la partie "energie embarquee" du microsysteme qui devient un enjeu important face au developpement des microsystemes et a leur contrainte d'autonomie. Cette derniere avoisine la dizaine d'annees. Par ailleurs, cette contrainte d'autonomie est egalement renforcee par le fait que les microsystemes sont souvent deployes en reseaux, dans des environnements etendus et peu accessibles, ne permettant pas la realisation d'operations de maintenance.

Enfin, la consideration de la recuperation d'energie entraine une architecture specifique pour la source d'energie [Dupé et Briand, 2010] [Briand, Fischer et al., 2010]. Comme l'illustre la Figure II. 1, la source d'energie est remplacee par un recuperateur d'energie compose :

- d'un convertisseur d'energie pour transformer le signal d'entree en energie electrique,
- de convertisseurs de tension pour redresser (lorsque besoin est) et adapter le signal au reste du circuit,
- d'un element de stockage

- d'une unité de traitement et de contrôle de l'énergie et des informations.

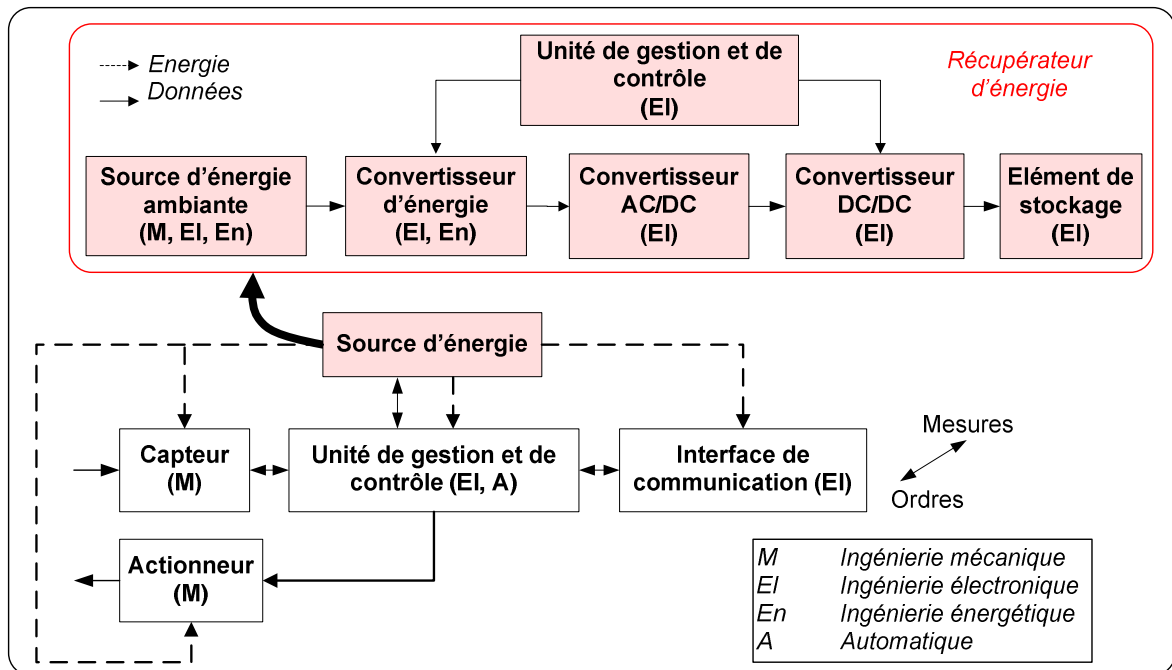


Figure II. 1 : Architecture d'un microsystème autonome

Le choix de l'architecture de ce récupérateur d'énergie dépend de l'application considérée et apparaît comme une tâche multidisciplinaire (Figure II. 1). En effet, l'énergétique intervient dans le choix et la modélisation des sources d'énergie. Ensuite, des disciplines telles que la mécanique, les sciences des matériaux ou l'optique sont nécessaires pour le choix des convertisseurs d'énergie alors que l'électronique et l'automatique prédominent au niveau des convertisseurs de tension et du contrôle du système.

Nous constatons donc que la conception de microsystèmes autonomes, et plus particulièrement de récupérateurs d'énergie, est un problème de technologie à grande échelle incluant des composants multiples (circuits électroniques, éléments mécaniques, etc.) et multiphysique (mécanique, électronique, énergétique, etc.) [Senturia, 2001] [Hamon, 2005] [Zénati, 2006].

La source d'énergie va dépendre de l'environnement proche du microsystème et va directement influencer la quantité d'énergie récupérée ainsi que le choix du microgénérateur et des convertisseurs utilisés [Ammar, 2006] [Despesse, 2005] [Dupé, Briand et al, 2010] [Dupé, Terrasson et al., 2010]. Par conséquent, une des difficultés consiste à choisir la source la plus adaptée à une application donnée, parmi toutes les alternatives possibles.

A travers ces remarques, émanent les problématiques suivantes, liées à l'énergie :

- les ressources énergétiques et le principe de conservation
- les procédés de récupération
- les principes de stockage.



### 2.1.2. Processus de conception pluridisciplinaire de microsystemes

La conception de microsysteme fait intervenir des experts dans des domaines tres divers de l'ingenierie. Chacun ayant des connaissances, des methodes et des outils de travail specifiques. C'est pourquoi la reussite de cette conception passe par la communication entre ces acteurs pour repondre aux facteurs de competitivite mais egalement aux preoccupations et contraintes venant des metiers situes en aval du processus de developpement [Prasad, 1996], et a la mise en parallele des activites dans le processus de developpement des produits [Eppinger, Krishnan et al., 1997].

Pour limiter les barrieres entre les differents departements de l'entreprise [Vasilash, 1990] [Whitney, 1992], l'ingenierie integree a apporte des elements de reponses, en proposant un cadre nouveau, adapte au processus de developpement des produits.

Selon Tichkiewitch [Tichkiewitch, Chapa et al., 1995], "la notion de conception integree inclut l'integration du cycle de vie du produit pendant la phase de conception par l'integration de l'ensemble des acteurs devant a court ou moyen terme intervenir dans l'histoire de ce produit".

Ainsi, parmi les objectifs de la conception integree, nous pouvons citer :

- l'amelioration de la qualite [Yeh, 1992],
- la minimisation des couts [Miles et Swif, 1992],
- la reduction des temps de developpement [Burman, 1992],
- l'amelioration de la flexibilite,
- l'augmentation de la productivite et de l'efficacite.

Le but de cette methode est donc d'arriver a une meilleure collaboration et coordination des equipes intervenant tout au long de la conception par la mise en commun des connaissances des metiers de la conception.

Pour atteindre les objectifs de l'ingenierie integree, les approches se sont orientees vers la cooperation et la coordination entre les equipes multifonctionnelles et pluridisciplinaires [Ranky, 1994], afin de considerer les interactions entre les differents domaines d'activites. Le premier enjeu consiste a travailler en equipes projet. Le second objectif est la mise en oeuvre de [Sapuan, Osman et al., 2006] :

- methodes telles que les approches QFD (Quality-Functional Deployment) ou DFX (Design for X),
- systemes d'information (CAO, GDT, etc.) permettant de supporter les methodes.

De meme, X. Fischer montre que la conception integree s'appuie sur [Fischer, 2000] :

- l'integration des outils, pour ameliorer la communication entre les outils utilises par les differents acteurs de la conception,
- l'integration des fonctions, qui vise a un partage des cultures des differents metiers pour limiter les erreurs dues a des contradictions dans les choix techniques.

Tous ces objectifs sont en adequation avec ceux recherches pour la conception de microsystemes autonomes. Aujourd'hui, il n'existe pas de reels outils pour realiser cela.

### 2.1.3. Notre approche : la conception intégrée de microsystèmes

Notre travail présente plusieurs enjeux :

- proposer une démarche et un outil interactif pour conduire la conception de microsystèmes autonomes,
- permettre une approche pluridisciplinaire des microsystèmes dans le processus de conception pour prendre en compte leur hétérogénéité et créer de dispositifs efficaces,
- renforcer les collaborations et échange entre les différents experts,
- estimer rapidement la quantité d'énergie récupérée et l'autonomie atteinte pour faciliter les choix,
- garantir l'intégration des connaissances,
- conduire la conception préliminaire de microsystèmes autonomes par la gestion et la modélisation des connaissances.

Notre processus de conception s'articule sur les phases suivantes (Figure II. 2).

- analyse et une structuration du problème de conception,
- description architecturale,
- qualification énergétique,
- pré-dimensionnement.

Par ailleurs, nous avons développé une interface en langage JAVA et MySQL comme système de gestion de bases de données, afin de supporter notre démarche. Cette interface ainsi que l'architecture de la base de données sont détaillées dans l'annexe B. Cette base de données permet la réutilisabilité des modèles et l'automatisation du traitement des informations. Elle contient des données issues de la littérature et est enrichie au fur et à mesure de son utilisation.

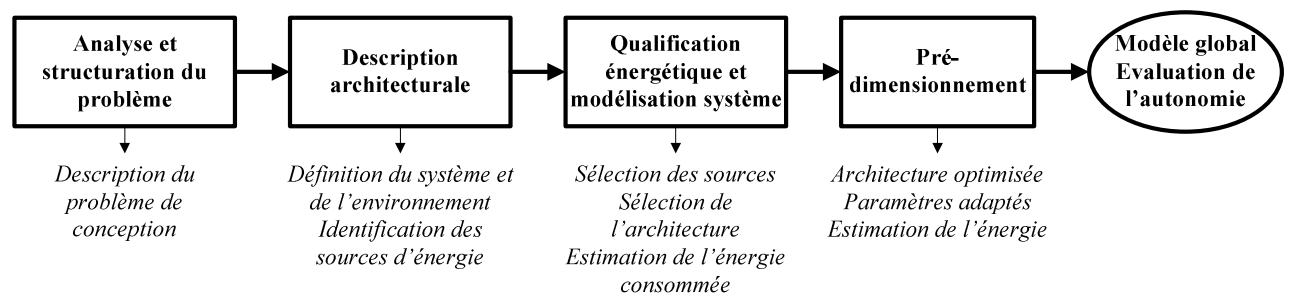


Figure II. 2 : Représentation de notre méthodologie

## 2.2. MODÉLISATION DU PROBLÈME DE CONCEPTION

### 2.2.1. Analyse et structuration du problème

Différentes étapes et méthodes sont utilisées lors de la phase d'analyse et de structuration du problème de conception.

La conception d'un produit est soumise à des contraintes. L'ensemble de ces contraintes est spécifié à l'aide de fonctions. Ces fonctions sont spécifiées par des méthodes et constituent une partie du cahier des charges du produit [AFNOR, 1991],

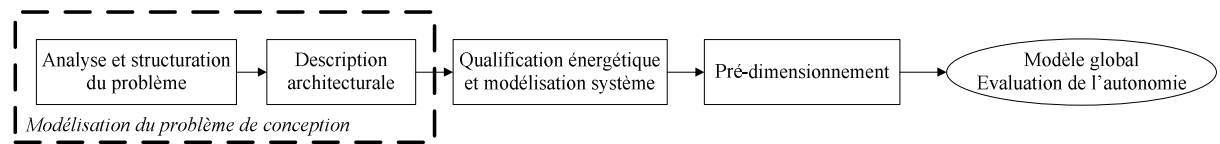
A partir des objectifs fixés par l'ensemble des fonctions, les méthodes d'analyse fonctionnelles proposent un schéma pour conduire la conception, à travers des outils tels que :

- la méthode pieuvre (société APTE) basée sur une représentation graphique pour identifier les interactions du produit avec son environnement [Boulet et Ballieu, 1995] [Constant, 1996].
- la méthode SADT [Lissandre, 1990] (Structural Analysis and Design Technique de la société IGL Technology) qui considère une suite de diagrammes d'activité [Con96].
- la méthode FAST (Functional Analysis System Technique) consiste à représenter les fonctions en suivant un enchaînement logique et en répondant aux questions : pourquoi, comment et quand [Tassinari, 1995].
- l'étude du cycle de vie [Tassinari, 1995]: cette approche consiste à identifier les fonctions pour toutes les situations de vie du produit. Ces situations de vie peuvent également être décomposées en moments significatifs [Doré, Pailhès et al., 2005] [Doré, Pailhès et al., 2007].
- la méthode SAFE (Sequential Analysis of Functional Element) préconise de rechercher les fonctions à partir de séquences d'utilisation du produit.
- l'analyse des mouvements et des efforts [Tassinari, 1995] : cette approche passe par l'identification des fonctions et une étude des flux autour d'un produit.
- le graphe de liaison et outils issus de la recherche [Constant, 1996] pour l'analyse fonctionnelle des mécanismes.

Ces méthodes proposent des démarches pour trouver des concepts techniques respectueux des objectifs du cahier des charges.

L'analyse et la structuration du problème sont donc formalisées autour de techniques et de méthodes. L'utilisation de l'une ou l'autre dépend du domaine d'activité et du degré de maîtrise des acteurs impliqués.

### 2.2.2. Notre modélisation du problème de conception : description par l'analyse du cycle de vie



**Figure II. 3 : Notre approche : modélisation du problème de conception**

La description du problème de conception est abordée par les fonctions que le produit doit satisfaire, dans une situation de vie donnée. Pour cela, nous mettons en œuvre une description basée sur l'analyse du cycle de vie, ou plus communément sur les comportements requis ou subits dans chaque situation de vie.

Cette description permet (Figure II. 3) :

- l'analyse et la structuration du problème de conception,
- la description architecturale.

#### **Décomposition fonctionnelle**

Nous adoptons ensuite une représentation organique car le comportement d'un microsystème est fortement lié à l'environnement dans lequel il se trouve. Nous adoptons donc un point de vue fonctionnel en décomposant le problème de conception en Système et Sous- Système [Scaravetti, Nadeau et al., 2003].

#### **Décomposition organique**

Un microsystème est un système comprenant des fonctionnalités telles que la perception de l'environnement (par le biais de capteurs), le traitement et l'analyse des données, la prise de décision, la communication avec l'extérieur ou l'action sur l'environnement (avec des actionneurs).

Par conséquent, nous réalisons une décomposition organique principalement basée sur les outils d'analyse fonctionnelle suivants : l'Organigramme Technique et le Diagramme Bloc Fonctionnel [Pailhes, Sallaou et al., 2007]. Ces outils vont mettre en évidence les entités du système et les contraintes de conception. Cette décomposition vise à faciliter le travail de conception en décomposant le problème en sous-problèmes, moins complexes.

#### **Définition des flux**

La décomposition organique conduit à l'identification des différentes entités qui composent le système et le super-système, ainsi que des flux qui circulent entre-elles. C'est pourquoi nous observons le système d'un point de vue énergétique, basé sur la loi d'intégralité des parties définie par la méthode TRIZ [Savransky, 2000] et reprise par Nadeau et al. [Nadeau, Pailhes et al., 2005].

Elle distingue quatre éléments principaux nécessaires à la réalisation de l'action fonctionnelle requise. Ces éléments sont classés en tant que :

- convertisseurs,
- transmetteurs,
- opérateurs,
- contrôleurs.

La loi stipule que la réalisation d'une fonction est issue de la transformation d'une énergie qui s'accompagne d'un changement de nature (convertisseur C), cette énergie est transmise (transmetteur T), un opérateur (O) réalise ensuite l'action (Figure II. 4). La loi d'intégralité des parties considère qu'un système est plus optimal lorsqu'il contient une fonction de contrôle assurée par un composant contrôleur [Pailhes, Sallaou et al., 2007] [Sallaou, 2008]. Nous adoptons cette décomposition pour notre système puisque le récupérateur d'énergie doit transformer, transmettre et gérer des flux.

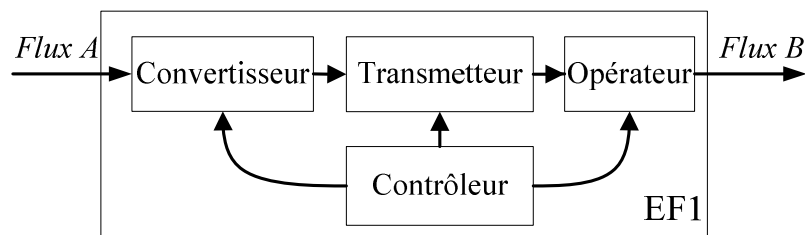


Figure II. 4 : Loi d'intégralité des parties

### 2.2.3. Notre modélisation du problème de conception : description architecturale

#### Décomposition fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle est obtenue en regroupant les diagrammes FAST de chaque fonction. Cette architecture décrit les différents niveaux systémiques et met en évidence les blocs fonctionnels à considérer [Cavaillès, 1995]. Un bloc fonctionnel est une entité autonome. Avec cette vision, le produit est vu comme une association de blocs fonctionnels qui interagissent (Figure II. 5).

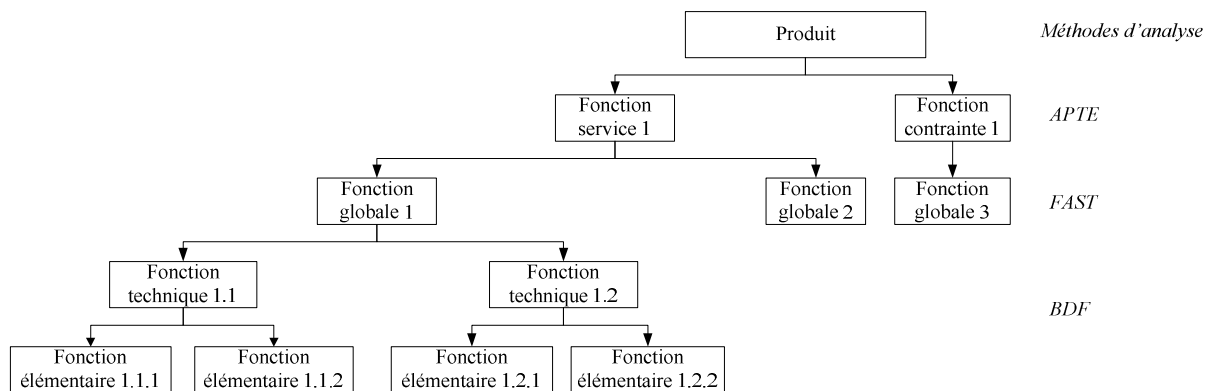
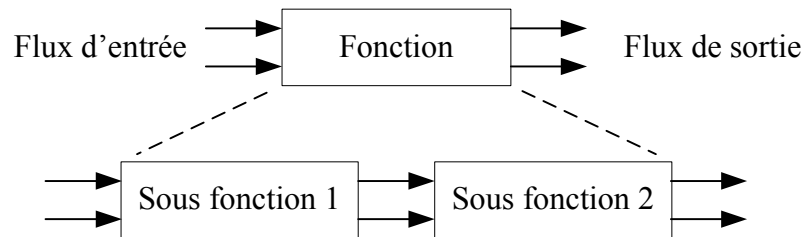


Figure II. 5 : De l'architecture fonctionnelle aux blocs fonctionnels [Nadeau, Pailhes et al., 2006]

D'autres auteurs [Pahl et Beitz, 1984] [Stone, Wood et al., 2000] ont introduit la décomposition fonctionnelle qui découpe la fonction globale en sous fonctions (Figure II. 6). Ces dernières sont classées en fonctions principales et auxiliaires. Les fonctions principales sont les sous-fonctions remplissant directement la fonction globale et les fonctions auxiliaires contribuent indirectement à la fonction globale. La fonction est définie ici comme tout mécanisme par lequel les transformations d'un élément de base "Matière (M), Énergie (E) ou Signal (S)" en un autre se produisent dans une entité.



**Figure II. 6 : Décomposition fonctionnelle**

Cette représentation requiert l'identification des flux. Les différentes entités sont représentées par une boîte noire définissant la fonction du produit. Les flux entrants et sortants sont identifiés. Ils représentent les flux en interaction avec le produit.

### **Flux et effets**

Pahl et Beitz [Pahl et Beitz, 1984] ont décomposé la notion de flux en :

- Matière (M),
- Énergie (E)
- Signal (S).

Une classification de ces flux a été introduite dans [Hirtz, Stone et al., 2002] (Tableau II. 1). Les flux sont ainsi classés en flux élémentaires et sont associés à des actions listées dans des bases fonctionnelles, comme illustré par Scaravetti dans [Scaravetti, Nadeau et al., 2003]. Les flux représentent les entrées et sorties de chaque entité du Système.

Ces flux sont caractérisés par des variables duales caractérisant l'effort et l'écoulement. Ainsi, la puissance générée est estimée à partir de ces deux grandeurs, suivant (II. 1).

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} = F \cdot C \quad (\text{II. 1})$$

| Classe primaire | Classe secondaire |  | Effort (F)           | Flux (C)               |
|-----------------|-------------------|--|----------------------|------------------------|
| Matière         | Humain            |  | Force                | Vitesse                |
|                 | Gaz               |  | Pression             | Vitesse des particules |
|                 | Liquide           |  | Pression             | Flux volumique         |
|                 | Solide            |  | Affinité             | Taux de réaction       |
|                 | Plasma            |  | Force électromotrice | Courant                |
|                 | Mélange           |  | Effort               | Flux                   |
| Signal          | Statut            |  |                      |                        |
|                 | Contrôle          |  |                      |                        |
| Énergie         | Humain            |  | Force                | Vitesse                |
|                 | Acoustique        |  | Pression             | Vitesse des particules |
|                 | Biologique        |  | Pression             | Flux volumique         |
|                 | Chimique          |  | Affinité             | Taux de réaction       |
|                 | Électrique        |  | Force électromotrice | Courant                |
|                 | Électromagnétique |  | Effort               | Flux                   |
|                 | Hydraulique       |  | Pression             | Flux volumique         |
|                 | Magnétique        |  | Force magnétomotrice | Flux magnétique        |
|                 | Mécanique         |  | Effort               | Flux                   |
|                 | Pneumatique       |  | Pression             | Débit massique         |
|                 | Nucléaire         |  | Intensité            | Taux de décroissance   |
|                 | Thermique         |  | Température          | Flux de chaleur        |

**Tableau II. 1 : Description des flux et des variables duales associées**

### Décomposition organique

Dans différents travaux de la littérature, la décomposition d'un problème de conception facilite l'analyse. En effet, les concepteurs ont progressivement proposé des outils permettant de réduire la complexité des problèmes de conception.

La plupart des solutions proposées consiste à décomposer le problème de conception en sous-problèmes plus simples. La définition complète d'une solution de conception passe par le choix des composants et des variables liées à ces composants. Ce qui nécessite en plus d'une décomposition fonctionnelle une décomposition organique du produit à concevoir.

Cette décomposition organique est principalement basée sur les outils suivants [Pailhes, Sallaou et al., 2007]:

- l'Organigramme Technique (OT),

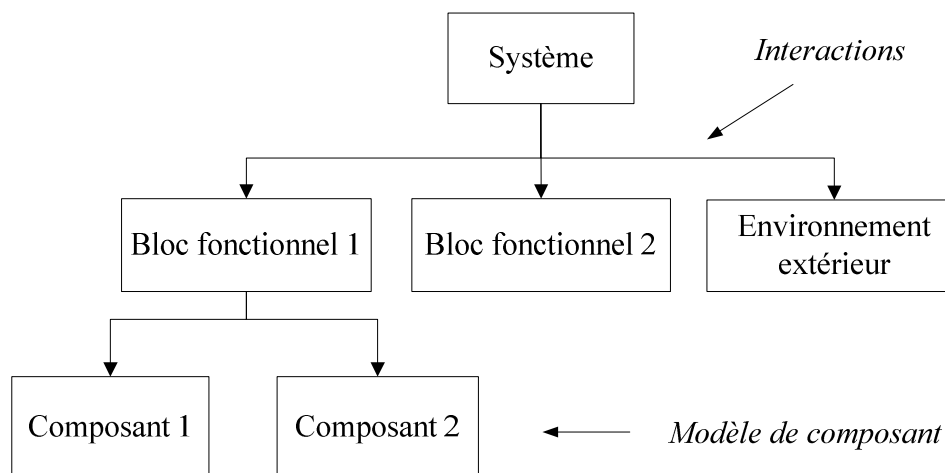
- le Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF),
- le Graphe Substances Champs (GSC).

### ***Organigramme technique***

La décomposition organique vise à diviser le produit en entités. L'organigramme technique permet de réaliser cette décomposition en plusieurs niveaux. Le système est donc divisé en blocs fonctionnels qui sont eux-mêmes divisés en composants, comme le montre la Figure II. 7. Par ailleurs, les méthodes MAL'IN [Vernat, Nadeau et al., 2009] [Nadeau J. P., 2006] conseillent de prendre en compte les éléments de l'environnement extérieur ayant une influence sur le système. L'organigramme technique identifie ainsi les éléments à modéliser. Plus précisément, il fournit :

- une liste des composants du système,
- les contraintes entre les différents éléments,
- les conditions aux limites,
- les variables de conception,
- les modèles de composants.

Cependant, il ne donne aucune indication relative aux flux mis en jeu dans les composants ou au niveau des interactions. Ces données sont pourtant nécessaires à la conception du système. Ces interactions sont identifiées à l'aide du Bloc Diagramme Fonctionnel qui propose une représentation des flux entre les différents composants.

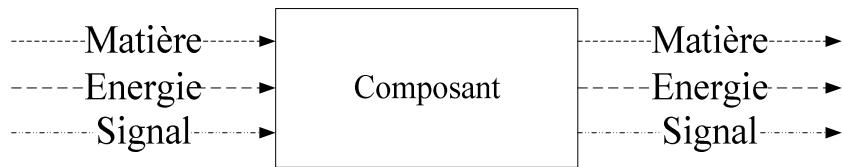


**Figure II. 7 : Organigramme Technique étendu aux milieux extérieurs**

### ***Bloc Diagramme Fonctionnel (BDF)***

La représentation en blocs peut se faire à différents niveaux. Cet outil représente les différents composants, la circulation des flux, les interactions entre les composants ainsi que les composants d'interaction. Il est basé sur l'identification des flux définis par Pahl et Beitz. Chaque composant est alors représenté par un bloc dont les flux d'entrée et de sortie sont de la matière, de l'énergie ou un signal (Figure II. 8).

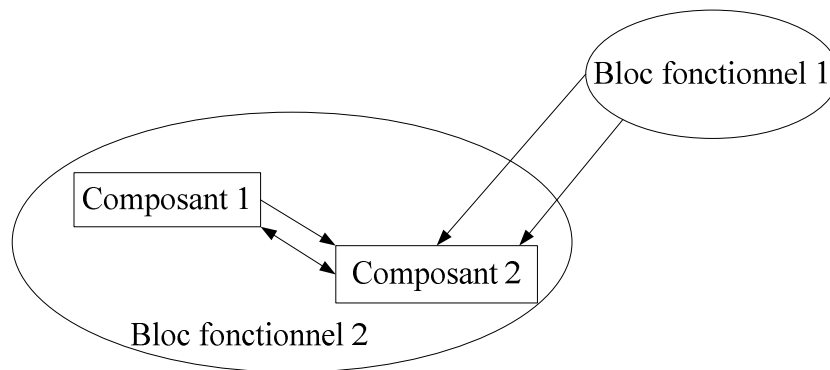




**Figure II. 8 : Modèle de représentation des composants**

Le Bloc Diagramme Fonctionnel (Figure II. 9) permet de discerner les phénomènes physiques qui interviennent dans la conception du système, c'est-à dire les phénomènes liés aux interactions entre composants (représentés par les flux) ou les phénomènes liés au comportement des composants.

Cet outil présente cependant des limites. En effet, il ne prend pas en compte les couplages physiques entre les flux. De même, les phénomènes physiques qui n'apparaissent pas comme des flux fonctionnels (effets induits ou antagonistes) ne sont pas identifiés par le BDF. Ils doivent tout de même être pris en compte pour la modélisation. Pour répondre à ce besoin, le Graphe Substances Champs a été introduit.



**Figure II. 9 : Bloc Diagramme Fonctionnel**

### ***Graphe Substances Champs (GSC)***

Cet outil est issu de la théorie TRIZ [Savransky, 2000] et présente l'avantage de permettre une analyse exhaustive des éléments du produit et des phénomènes physiques générés. Les éléments sont appelés substances et sont définis comme des éléments à masse non nulle et/ou volume non nul. Les phénomènes physiques constituent les champs et désignent les effets physiques réalisant une action.

Les BDF font apparaître les interactions entre les substances (associations). Les milieux extérieurs sont intégrés comme des blocs à part entière dans le diagramme. L'utilisation de verbes d'action pour exprimer l'influence d'une substance sur l'autre permet d'identifier rapidement les types d'effets physiques mis en jeu. Ce type de graphes fournit une représentation similaire au BDF mais avec un niveau de détail plus important.

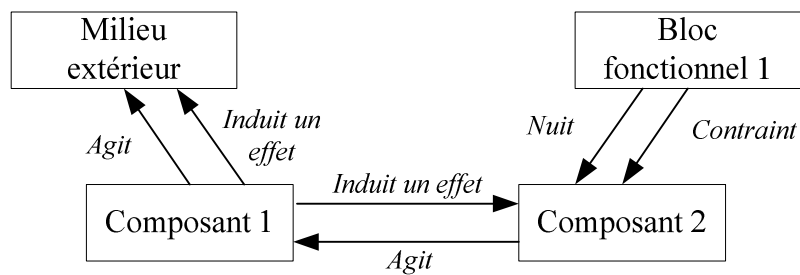


Figure II. 10 : Graphe d'association substances-champs

### 2.3. QUALIFICATION ÉNERGÉTIQUE ET MODÉLISATION SYSTÈME

Après la modélisation du problème de conception, nous proposons une étape de qualification énergétique et de modélisation système (Figure II. 11).

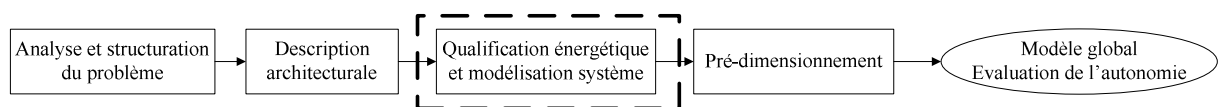


Figure II. 11 : Notre approche : qualification énergétique et modélisation système

#### 2.3.1. Spécificités énergétiques

Nous nous intéressons à la conception de microsystèmes autonomes. Les approches énergétiques constituent alors une phase majeure de notre démarche. Au delà d'un outil générique de conception, nous avons donc dû regarder la problématique spécifique de la conception de systèmes énergétiques.

Les entités réalisent des fonctions en transformant les flux d'énergie d'entrée en flux de sortie, ce qui génère des effets fonctionnels ou induits qui sont qualifiés :

- d'utiles (notés U),
- de neutres (EIN),
- d'antagonistes (EIA).

Les effets fonctionnels sont utiles (U) et contribuent à la réalisation de la fonction principale alors que les effets induits sont neutres (EIN) ou antagonistes (EIA). Dans le dernier cas, ils sont susceptibles de détériorer le système ou d'entraîner des dysfonctionnements de l'entité considérée, comme une usure prématurée, du bruit, une surchauffe, des déformations, etc. Tous ces effets sont liés à des phénomènes physiques décrits par des lois de conservation, des conditions initiales et des conditions aux limites nécessaires pour la phase de conception détaillée [Scaravetti, Pailhes et al., 2005] [Altschuller, 1984].

L'identification de ces effets est importante puisqu'ils ont un impact direct sur le rendement global du système, en modifiant la nature et/ou le comportement des entités qui les constituent. De plus, l'identification de ces flux peut aussi permettre d'anticiper certains problèmes en introduisant, dès les premières phases de conception, des entités visant à éliminer ou réduire l'impact d'effets antagonistes. Par exemple, si l'étude laisse apparaître la génération d'un flux de chaleur important pouvant conduire à une surchauffe, l'ajout d'un système de refroidissement sera considéré.

Pour aider les concepteurs dans leurs prises de décision, des méthodes ont déjà été développées :

- approche par la simulation,
- approche par la recherche opérationnelle,
- les probabilités,
- approche par optimisation des contraintes,
- résolution par satisfaction de contraintes,
- aide à la décision multicritères.

### **Approche par la simulation**

L'approche dite évaluative est très répandue. Le concepteur fixe certains paramètres du système et un modèle simulant son comportement est utilisé pour évaluer ses performances. Si la réponse n'est pas satisfaisante, le modèle est modifié jusqu'à obtenir des résultats en adéquation avec les spécificités fixées du produit.

Cette approche présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et de s'appliquer à tous types de systèmes. De plus, elle permet la conception par adaptation d'une solution existante. En revanche, les relations entre les paramètres ne sont pas explicites. L'approche reste donc en grande partie expérimentale.

### **Approche par la recherche opérationnelle**

La recherche opérationnelle est définie comme "l'ensemble des méthodes et techniques rationnelles d'analyse et de synthèse des phénomènes de management du système d'information utilisables pour élaborer de meilleures décisions".

Elle consiste à modéliser mathématiquement le problème de conception afin de déterminer l'optimum d'une fonction. Lorsque le modèle est linéaire et que les variables sont réelles, il existe des outils comme l'algorithme du Simplex ou la méthode des points intérieurs.

En conception, ces conditions sont rarement présentes. Par conséquent, cette approche est difficile à mettre en œuvre.

### **Les probabilités**

Une autre approche propose d'utiliser les probabilités pour définir les meilleurs choix de décision. Elle repose sur le concept suivant :

- un ensemble d'actions possibles,
- un ensemble d'états incertains de la nature,
- des conséquences mesurées.

Ces trois premières approches visent à tout quantifier à l'aide d'outils mathématiques. Néanmoins, elles ne prennent pas en compte l'antagonisme de certains critères et ne peuvent pas évaluer des critères non quantifiables.

### **Approche par satisfaction de contraintes**

Il est possible de poser le problème de conception comme un problème d'optimisation sous contrainte. L'objectif est de guider le processus de conception par la recherche d'un compromis.

Le problème est alors décrit sous la forme d'un ensemble de contraintes sur des variables. Une contrainte exprime une relation entre différentes variables. Pour chaque variable, un domaine de valeurs est défini. Une contrainte peut porter sur des variables qui prennent leurs valeurs sur des domaines entiers, réels, symboliques, etc.

Résoudre un problème, c'est trouver pour chaque variable au moins une valeur respectant l'ensemble des contraintes. Un CSP (Constraint Satisfaction Problem) est cohérent (ou consistant) s'il admet au moins une solution. S'il n'existe aucune solution (CSP sur-contraint), il faut relâcher certaines contraintes. S'il existe trop de solutions (CSP sous-contraint), il faut prendre la première solution, ou bien celle qui optimise une fonction de coût donnée.

Cette approche reste difficile à mettre en œuvre à cause de la phase d'optimisation. En effet, il faut modéliser toutes les relations et contraintes entre les variables du problème de conception. Aujourd'hui, la résolution reste délicate.

### **Aide à la décision multicritères**

Pour réduire l'espace des solutions possibles, une évaluation de ces solutions est nécessaire. L'aide à la décision multicritères peut guider le concepteur dans ces choix, et également prendre en compte des objectifs contradictoires, ce que la recherche opérationnelle classique ne peut réaliser.

Cette approche peut s'utiliser dans les cas suivants :

- problématique de choix : sélectionner la ou les meilleures solutions.
- problématique de tri : segmenter l'ensemble des solutions en les affectant à des catégories préalablement définies.
- problématique de rangement : ranger les solutions en classes d'équivalence de la meilleure à la moins bonne.
- problématique de description : décrire dans un langage approprié les solutions et leurs conséquences.

Pour cela, la méthode se décompose en quatre étapes principales :

- identifier l'ensemble des actions à examiner,
- modéliser les préférences du décideur (définition de critères)
- évaluer les actions à l'aide des critères,
- agréger les résultats.

L'agrégation des résultats se fait à l'aide de fonction de désirabilité, comme celles définies par Harrington [Harrington, 1965]. La fonction de désirabilité est ainsi calculée en deux étapes. La première consiste à définir les coefficients de désirabilité individuels pour chaque critère. La deuxième étape vise à estimer la désirabilité globale de l'entité, en combinant les critères et en prenant en compte les poids associés.

### **2.3.2. Notre approche : qualification énergétique**

Nous proposons d'ajouter à notre processus de conception de microsystemes autonomes une spécificité énergétique basée sur (Figure II. 11) :

- la sélection des sources d'énergie : classification des sources et choix des plus intéressantes.
- la sélection de l'architecture : différentes architectures possibles classées par ordre d'efficacité énergétique.
- l'estimation de l'énergie consommée : premier bilan énergétique du système.

Nous avons distingué les entités suivantes dans le problème de conception : les sources, le système et les puits, où les sources et les puits sont considérés du point de vue du système

La source et le puits appartiennent au super-système et interagissent avec le système au travers de flux. En effet, le système extrait des flux d'une source et en rejette dans un puits. La qualité des flux mis en jeu va influencer les choix de conception.

Pour qualifier ces éléments et aider le concepteur dans le choix des solutions, nous avons défini des critères de qualification. Ces critères sont ensuite associés à des coefficients de désirabilité. Ainsi, le nombre de solutions possibles est réduit.

## 2.4. PRÉ-DIMENSIONNEMENT DE MICROSYSTEMES AUTONOMES

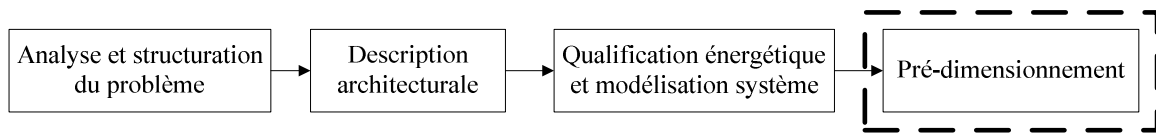


Figure II. 12 : Notre approche : pré-dimensionnement

### 2.4.1. Notre solution logicielle

La phase de pré-dimensionnement utilise des modèles physiques à partir des variables pertinentes du problème de conception et des relations entre ces variables.

Face à la complexité et à l'hétérogénéité des produits, différents outils sont nécessaires :

- des outils généralistes tels que Matlab ou Scilab,
- des outils de calcul formel,
- des outils multiphysiques 1D comme Modelica ou VHDL-AMS,
- des outils multiphysiques 2D ou 3D comme Ansys, Comsol ou FEMM.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le principal problème reste l'intégration de tous ces outils tout en permettant un processus de conception intégrée et pluridisciplinaire. Une solution consisterait à créer un outil unique mais cela reste encore difficile à réaliser.

De plus, dans la majorité des cas, les concepteurs ont déjà l'habitude de travailler avec des logiciels spécifiques et l'introduction d'un nouvel outil entraîne un temps de formation durant lequel la personne n'est pas productive. Du point de vue de l'entreprise, ce point est pénalisant. Une alternative repose sur la mise en relation de tous ces outils de manière à faciliter le passage d'information de l'un à l'autre.

### 2.4.2. Outil développé

Dans le cadre de nos travaux, nous avons préféré créer des passerelles entre les logiciels existants et souvent reconnus comme des standards, au lieu de les remplacer par un seul. Le but étant d'améliorer la communication et la collaboration entre les différents acteurs.

Dans notre cas, nous avons choisi des outils présents dans notre laboratoire, de façon à faciliter l'intégration de la démarche et faire le lien avec des outils ou projets déjà développés.

Nous considérons principalement trois logiciels :

- un logiciel de conception assistée par ordinateur, ANSYS, qui offre de multiples fonctionnalités et bibliothèques de modèles Il est principalement utilisé pour la modélisation des convertisseurs d'énergie (analyse thermique, électromagnétique, fluide, mécanique, etc.).
- un logiciel d'interface pour récupérer les données, les transmettre à chacun des

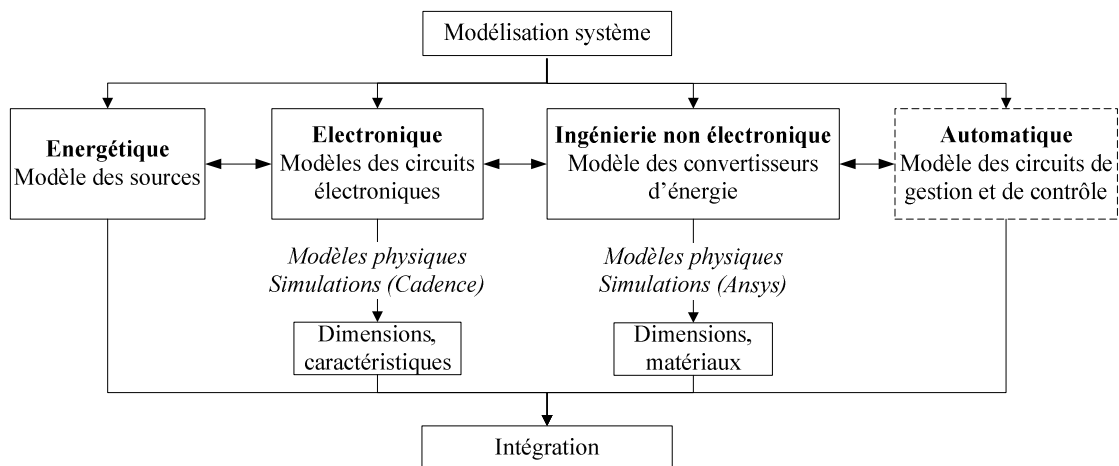
autres logiciels et éventuellement réaliser des simulations au niveau système ; l'échange de données se faisant sous forme de scripts. Pour faire le lien avec les outils précédents, nous avons choisi Matlab.

- les logiciels de simulation et de conception électronique Protel DXP et Cadence. Ils seront utilisés pour la modélisation des convertisseurs de tension. Cadence offre la possibilité de créer des masques en vue de réaliser des systèmes sur puces.

Ces différents logiciels sont largement utilisés dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Ils peuvent cependant être remplacés par d'autres. Leur utilisation sera fortement dépendante de l'application considérée. C'est pour cette raison que nous allons détailler cette partie à travers notre cas d'étude (Figure II. 13).

Pour la phase d'aide au choix, nous nous basons sur une modélisation au niveau système, à partir de blocs contenant les variables de conception associées. Nous pouvons ainsi simuler l'architecture globale. Cette simulation de haut niveau permet d'obtenir des simulations globales et de comparer les meilleures architectures, issues des phases précédentes.

Cette modélisation est basée sur des bases de données de composants existants. Ainsi, notre démarche permet de mettre en évidence la conception spécifique avec des outils dédiés.



**Figure II. 13 : Conception multidisciplinaire**

De plus, des liens entre les différents outils cités ci-dessus permettent d'optimiser les paramètres. A travers cette approche, nous gardons une spécialisation, tout en améliorant la collaboration. Le but étant de permettre à plusieurs personnes de travailler ensemble, tout en restant spécialisées.

Le système d'aide à la décision comprend les éléments suivants :

- une base de connaissance pour faciliter le recensement des solutions possibles,
- des modèles de comportements physiques du système et de ses composants,
- d'un outil de résolution pour comparer les différentes solutions,
- d'une interface pour visualiser les résultats.

Ainsi, notre modélisation permet :

- d'avoir une vision complète du problème de conception dès le début du processus,
- de définir les architectures possibles pour résoudre le problème de conception,
- de qualifier les solutions,
- d'intégrer des outils de modélisation et de simulation,
- de visualiser les solutions.

## 2.5. CAS DE VALIDATION : CONTEXTE ET DÉFINITION DU BESOIN

Pour illustrer notre démarche, nous considérons un cas de validation dont l'objectif est d'alimenter un microsystème en récupérant l'énergie présente dans son environnement proche. Ce microsystème doit surveiller les vibrations d'une structure située à proximité de la poutre encastree à l'une de ses extrémités comme le montre la Figure II. 14. Ses caractéristiques géométriques et matérielles sont résumées dans le Tableau II. 2.

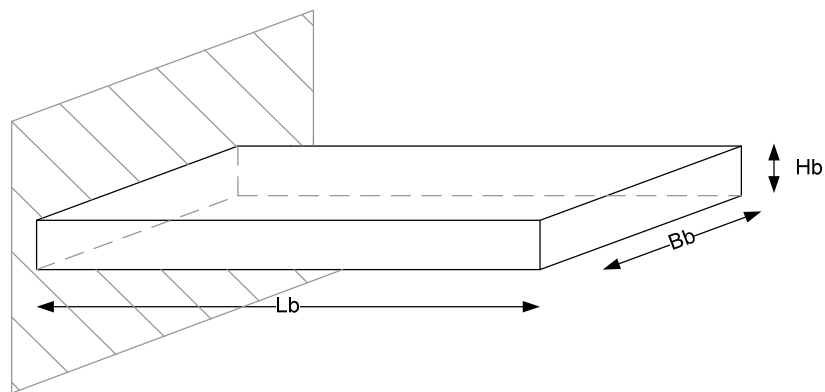


Figure II. 14 : Représentation de la poutre

| Grandeur                    | Symbole   | Valeur  |
|-----------------------------|-----------|---------|
| Longueur                    | $L_b$     | 60 mm   |
| Largeur                     | $B_b$     | 25 mm   |
| Hauteur                     | $H_b$     | 2 mm    |
| Coefficient de Poisson      | $\nu$     | 0,3     |
| Module d'Young              | $Y$       | 210 GPa |
| Densité                     | $d_b$     | 7,5     |
| Coefficient d'amortissement | $\beta_b$ | 13,3    |

Tableau II. 2 : Paramètres géométriques de la poutre (en acier)



### Spécifications de l'application

Le système ne doit pas avoir besoin d'opération de maintenance doit atteindre une durée de vie d'au moins 7 ans.

Pour l'étude, nous considérons un accéléromètre numérique (le LIS3LV02DL de ST Microelectronics) pour mesurer l'amplitude des vibrations de la poutre. Il sera placé sur cette dernière et devra effectuer une mesure toutes les 60s. Cette mesure sera ensuite traitée et stockée par un microcontrôleur (PIC18F46J50) avant d'être envoyée à une station de contrôle, par liaison radio, à l'aide du transmetteur CC110.

Le capteur LIS3LV02DL fonctionne entre 2,16 et 3,6 V. Il consomme 650  $\mu$ A durant sa phase active et 1  $\mu$ A en état de veille. Il réalise une mesure à la fréquence de 640 Hz avec une résolution de 3,9 mg, ce qui est suffisant pour notre étude. Le microcontrôleur fonctionne à la fréquence de 4 MHz. La trame des données à transmettre est composée de 200 bits. Elle contient l'identifiant du nœud, son état et la mesure du capteur. De plus pour s'assurer de la bonne réception des données, un accusé de réception de 30 bits est envoyé. Le Tableau II. 3 récapitule les paramètres importants de l'application.

| Grandeur                                   | Symbole           | Valeur    |
|--|-------------------|-----------|
| Nombre d'instructions                      | $N_{inst}$        | 46000     |
| Débit instantané                           | $D_{inst}$        | 30 kbit/s |
| Nombre de bits transmis                    | $N_{bits\_trans}$ | 200       |
| Nombre de bits reçus                       | $N_{bits\_rec}$   | 30        |
| Fréquence de traitement du microcontrôleur | $f_{\mu c}$       | 4 MHz     |
| Période de mesure                          | $T$               | 60 s      |

Tableau II. 3 : Caractéristiques des paramètres de l'application

Le temps d'activité du microcapteur est donné par l'équation (II. 2). Il dépend de la durée de mesure du capteur  $t_{sens}$ , du temps de traitement des données du microcontrôleur et de l'activité de l'émetteur et du récepteur (Tableau II. 3).

| Composant          | $I_{on}$ (mA) | $I_{off}$ ( $\mu$ A) | $P_{on}$ (mW) | $P_{off}$ ( $\mu$ W) | $t_{on}$ (ms) | $t_{off}$ (s) | $E_{on}$ ( $\mu$ J) | $E_{off}$ ( $\mu$ J) |
|--------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|---------------------|----------------------|
| Capteur            | 0,65          | 1                    | 2,145         | 3,3                  | 7,812         | 59,992        | 16,756              | 197,974              |
| Microcontrôleur    | 2,90          | 7                    | 9,57          | 23,1                 | 26,972        | 59,973        | 258,122             | 1385,376             |
| Émetteur           | 17            | 0,4                  | 56,1          | 1,32                 | 6,6600        | 59,993        | 373,626             | 79,191               |
| Récepteur          | 15            | 0,4                  | 49,5          | 1,32                 | 1,0000        | 59,999        | 49,5                | 79,198               |
| Total              |               |                      | 25,878        | 29,042               | 26,9720       | 59,973        | 698,005             | 1741,741             |
| Total sur le cycle |               |                      | 0,011         | 29,042               | 26,9720       | 59,973        | 698,005             | 1741,741             |

Tableau II, 4 : Consommation du microsysteme

$$t_{on} = t_{sens} + \frac{N_{inst}}{f_{\mu C}} + \frac{N_{bits\_trans} + N_{bits\_rec}}{D_{inst}} \quad (II. 2)$$

Le Tableau II, 4 résume le courant ( $I$ ), la puissance ( $P$ ), l'énergie ( $E$ ), les durées du temps d'activité ( $on$ ) et du temps de veille ( $off$ ) pour estimer la puissance qui doit être récupérée pour rendre le microsystème autonome.

Comme la quantité d'énergie récupérée à partir des sources d'énergie considérées est généralement faible (de l'ordre du  $\mu W$  à la centaine de  $mW$ ), il est essentiel que la consommation du microsystème soit minimale. Pour cela, nous lui assignons un fonctionnement périodique faisant alterner une phase active, caractérisée par une forte consommation d'énergie, avec une phase de veille durant laquelle la consommation est faible. Le fonctionnement du microsystème est donc séquencé en diverses tâches qui demandent un pic de puissance durant un intervalle de temps fini et généralement court devant la période de veille. En effet, dans la majorité des applications, le temps de veille représente plus de 99 % du cycle de fonctionnement total.

Les tâches considérées dans notre application sont (Figure II. 15) :

- l'acquisition de données,
- le traitement des données,
- l'émission des données à une station de contrôle ou un autre microsystème,
- la réception d'un accusé de réception pour s'assurer que la transmission s'est déroulée normalement.

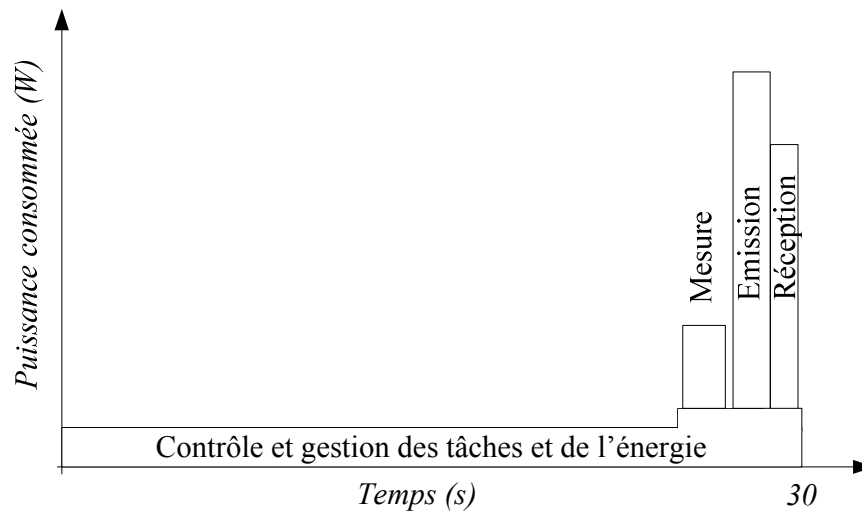
Ici, la fonction de mesure nécessite environ 2,1 mW pendant 7,8 ms tandis que 105,6 mW pendant 7,66 ms sont requis pour l'émission et la réception des données (56,1 mW pendant 6,66 ms pour l'envoi et 49,5 mW pendant 1 ms pour la réception de l'accusé). Le reste du temps (soit 59,9s ou encore 99,9 % du temps), le microsystème est en veille et sa consommation est d'environ 30  $\mu W$ .

La fonction de récupération d'énergie, quant à elle, se fait en continu. Seules les tâches de mesure, traitement et transmission des données ont des durées limitées. Cette énergie peut-être utilisée directement pour alimenter le système, ou stockée avant utilisation. Dans la majorité des cas, l'élément de stockage est une supercapacité ou une batterie rechargeable. La première solution offrant moins de contraintes au niveau du profil de charge et autorisant des pics de décharge brefs. La seconde solution, en revanche, est plus adaptée à des sources stables et continues et présente une densité d'énergie plus importante. Comme nous ne connaissons pas encore la source qui sera retenue, nous considérons une supercapacité pour stocker l'énergie, afin d'englober tous les cas.

De plus, pour les systèmes de récupération d'énergie, plusieurs stratégies sont envisageables. Une stratégie consiste à n'effectuer les opérations gourmandes en énergie que lorsque la quantité récupérée et stockée (dans une supercapacité ou une batterie rechargeable) est suffisante. L'autre stratégie consiste à imposer un fonctionnement cyclique au microsystème. Comme notre cahier des charges impose une périodicité fixe de mesure et d'envoi des données, nous sommes dans le second cas. C'est pourquoi nous couplons notre supercapacité à une batterie non rechargeable. Cette dernière prendra le relais en cas de charge insuffisante de la supercapacité et garantira la fiabilité du dispositif.

Pour évaluer la quantité d'énergie minimale que la source doit fournir afin de rendre le

système complètement autonome, nous avons calculé l'énergie moyenne consommée par chaque élément durant les phases actives et de veille. Ainsi, nous avons déduit, les puissances moyennes consommées par le microsystème durant ces deux états, respectivement  $P_{on}$  et  $P_{off}$ , en considérant la durée de la phase active  $t_{on}$  et la période  $t_{cycle}$ . A partir du Tableau II, 4, nous constatons que la source d'énergie doit fournir au minimum  $40 \mu\text{W}$  pour pouvoir alimenter le capteur correctement durant son fonctionnement cyclique.



**Figure II. 15 : Profil de consommation du microsystème sur un cycle**

Par ailleurs, la poutre est soumise à un effort cyclique et unidirectionnel dont l'amplitude maximale et la fréquence valent respectivement  $1,245 \text{ m/s}^2$  et  $6,28 \text{ Hz}$ .

Elle est également soumise à un rayonnement solaire et un gradient thermique constant. Il y a aussi un rayonnement radiofréquence compris entre  $0,001$  et  $0,01 \text{ mW/cm}^2$ . Les autres sources d'énergie sont négligées.

L'objectif de l'étude est de sélectionner la source d'énergie la plus adaptée à l'application considérée afin d'en déduire l'architecture du récupérateur d'énergie qui va absorber et convertir cette énergie. Elle sera présentée tout au long de ce document et servira d'illustration.

## 2.6. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons exposé les problématiques liées à la conception de microsystemes autonomes.

Dans un premier temps, nous avons présenté les enjeux de la conception de microsystemes, à savoir :

- la prise en compte du caractère pluridisciplinaire de ces dispositifs,
- la gestion des connaissances à travers le développement d'outils,
- la mise en place d'une approche pour aider les différents acteurs dans l'organisation des tâches et le choix de solutions.

Dans un second temps, nous avons présenté l'approche adoptée pour la conception de microsystemes autonomes (Figure II. 16). La démarche proposée est une démarche pluridisciplinaire de conception intégrant un processus d'aide à la décision, basé sur l'identification, l'analyse, la modélisation et la minimisation des flux et effets antagonistes et des outils de conception à différents niveaux. Le but étant de choisir la meilleure configuration d'un microsysteme embarquant une solution de récupération avec une contrainte d'autonomie, de manière à spécifier la conception en explorant un espace de solutions et en respectant les contraintes de l'application.

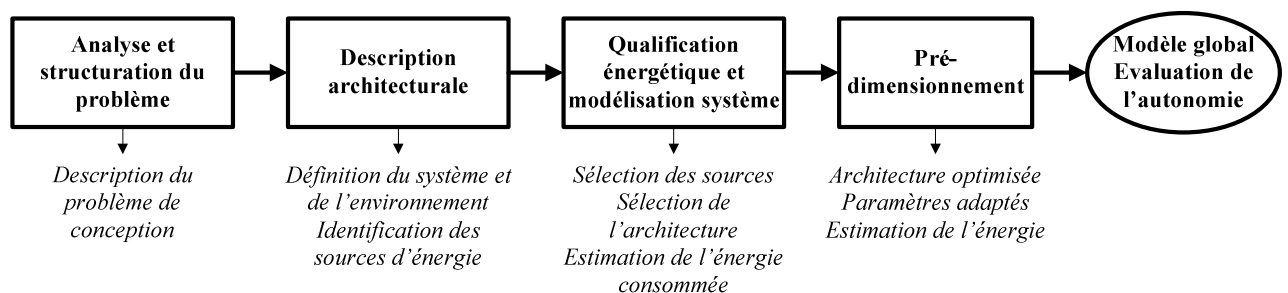


Figure II. 16 : Représentation de notre méthodologie

Le système d'aide à la décision va permettre de réduire le nombre d'itérations. Il va aussi permettre la recherche de toutes les architectures possibles parmi plusieurs concepts de solutions, en intégrant le caractère multi-domaine.

Pour finir, nous avons présenté le contexte et les objectifs de notre cas d'étude qui concerne le développement d'un microsysteme autonome dédié à la surveillance d'une structure.



---

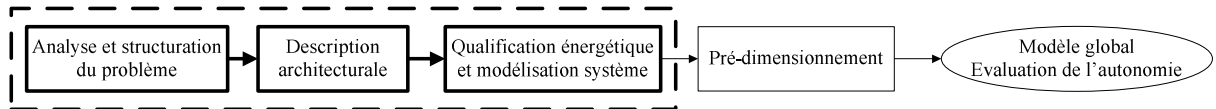
# Chapitre III. Notre développement : modélisation du problème de conception et qualification énergétique

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 3.1.     | Introduction .....  | 60 |
| 3.2.     | Notre analyse du problème de conception .....                               | 60 |
| 3.2.1.   | Microsystèmes autonomes embarqués .....                                     | 60 |
| 3.2.2.   | Structuration des systèmes énergétiques .....                               | 61 |
| 3.2.3.   | Représentation organique .....  | 61 |
| 3.2.4.   | Décomposition fonctionnelle.....  | 62 |
| 3.2.5.   | Décomposition Source/Système/Puits.....                                     | 63 |
| 3.2.5.1. | Source.....   | 64 |
| 3.2.5.2. | Système .....   | 64 |
| 3.2.5.3. | Puits.....  | 66 |
| 3.3.     | Modélisation du problème de conception .....                                | 67 |
| 3.3.1.   | Notre méthodologie .....  | 67 |
| 3.3.1.1. | Définition du contexte et du besoin.....                                    | 67 |
| 3.3.1.2. | Décomposition fonctionnelle.....  | 67 |
| 3.3.1.3. | Décomposition organique.....  | 68 |
| 3.3.2.   | Outil développé.....  | 69 |
| 3.3.3.   | Cas de validation : modélisation du problème de conception .....            | 72 |
| 3.3.3.1. | Décomposition fonctionnelle.....  | 72 |
| 3.3.3.2. | Décomposition organique.....  | 73 |
| 3.4.     | Qualification énergétique et modélisation système.....                      | 75 |
| 3.4.1.   | Notre méthodologie .....  | 75 |
| 3.4.1.1. | Qualification des sources d'énergie et des puits .....                      | 75 |
| 3.4.1.2. | Sélection de l'architecture du récupérateur d'énergie .....                 | 80 |
| 3.4.2.   | Outil développé.....  | 84 |
| 3.4.3.   | Cas de validation : qualification énergétique et modélisation système ..... | 85 |
| 3.4.3.1. | Qualification des sources.....  | 85 |
| 3.4.3.2. | Sélection de l'architecture du système.....                                 | 87 |
| 3.5.     | Conclusions .....   | 91 |

### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les trois premières étapes de notre approche, à savoir (Figure III. 1) :

- l'analyse et la structuration du problème,
- la description architecturale (identification et description des entités),
- la qualification énergétique et la modélisation système.



**Figure III. 1 : Modélisation du problème de conception**

Ces étapes reposent sur une représentation fonctionnelle des microsystemes et visent à mettre en évidence les sources d'énergie possibles avant de proposer des architectures de récupérateurs d'énergie adéquates. Les données sont principalement qualitatives et sont issues de la littérature ou d'expérimentations spécifiques.

Nous commencerons d'abord par présenter et définir les notions et méthodes sur lesquelles nous nous basons. Ensuite, les objectifs, les approches et les résultats de chaque étape seront détaillés et illustrés à travers le cas de validation présenté au chapitre II.

### 3.2. NOTRE ANALYSE DU PROBLÈME DE CONCEPTION

#### 3.2.1. Microsystemes autonomes embarqués

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, un microsysteme est un dispositif intelligent miniaturisé intégrant des capteurs et/ou des actionneurs associés à une unité de traitement [Dupé et Briand, 2010]. Les microsystemes interagissent donc avec leur environnement par le biais de ces capteurs et actionneurs et communiquent avec une station de contrôle distante ou avec d'autres microsystemes situés à proximité [Rabaey, Ammer et al., 2000 ; Hitachi, 2003].

Pour atteindre la durée de vie des microsystemes et limiter les opérations de maintenance, nous remplaçons la source d'énergie par un récupérateur captant l'énergie de son environnement.

Dans le processus de récupération d'énergie, l'énergie ambiante doit être extraite et convertie en énergie exploitable puis, transportée jusqu'à l'application. C'est pourquoi, la récupération d'énergie implique la considération d'éléments spécifiques :

- une source d'où l'énergie est extraite,
- un convertisseur pour la transformer,
- des éléments de transport.

Comme nous considérons des microsources fournissant une quantité d'énergie environ égale à celle requise par le microsystème, l'optimisation de l'efficacité énergétique est primordiale. Elle passe par la minimisation des pertes énergétiques. La conception de dispositifs efficaces énergétiquement est déjà un enjeu mais l'originalité provient de l'abondance et de la multiplicité des sources disponibles pour alimenter les microsystèmes autonomes. Effectivement, dans presque toutes les applications, le concepteur doit choisir une source parmi plusieurs. Jusqu'à présent, ce choix s'est basé sur l'expérience professionnelle des concepteurs car il n'existe pas d'approche systématique pour les aider dans les phases initiales du processus de conception.

Notre objectif est de développer un outil d'aide à la décision dédié aux premières phases du processus de conception et plus particulièrement, entre la phase de recherche de concept et de conception architecturale. L'approche se base sur la décomposition du produit en Sources, Système et Puits, sur la définition de critères de qualification des différentes alternatives. De plus, notre méthode considère l'identification, l'analyse, la modélisation et la minimisation des flux et des effets antagonistes.

### **3.2.2. Structuration des systèmes énergétiques**

Notre démarche débute par une description du problème à travers les étapes suivantes :

- définition précise du produit,
- identification des situations de vie et éventuellement division en moments significatifs,
- identification l'environnement du produit,
- identification des fonctions pour une situation de vie donnée. Ces fonctions sont identifiées via des interactions entre le produit et l'environnement. Elles sont directes (association du produit à d'autres éléments de l'environnement) ou indirectes (liaison entre deux élément de l'environnement).

### **3.2.3. Représentation organique**

Les microsystèmes sont des dispositifs de petites tailles équipés d'éléments de mesures, de communication et d'intelligence embarquée qui doivent être autonomes énergétiquement. Ainsi, leur comportement dépend fortement de l'environnement dans lequel ils évoluent, surtout lorsqu'ils sont alimentés par l'énergie qu'ils récupèrent de leur environnement.

Nous considérons le microsystème comme un produit associant des composants afin de répondre à un besoin spécifique. Nous nous plaçons donc dans un point de vue fonctionnel qui passe par la décomposition du problème en Système (le récupérateur d'énergie) et Sous-système (l'environnement). Ces éléments sont eux-mêmes divisés en entités fonctionnelles (notées EF) et en entités environnantes (notées EE), respectivement (Figure III. 3).

Une entité fonctionnelle est associée à des actions et à des flux, alors qu'une entité environnante ne sera liée qu'à des flux. Parmi les entités environnantes du super-système, nous pouvons distinguer des ressources énergétiques comme le rayonnement solaire, les fluides en mouvement, des micro-organismes, des câbles, d'autres microsystèmes, des stations



de contrôle, etc. Tous ces éléments interagissent au travers de flux (Figure III.2). Ces notions sont définies dans la section suivante.

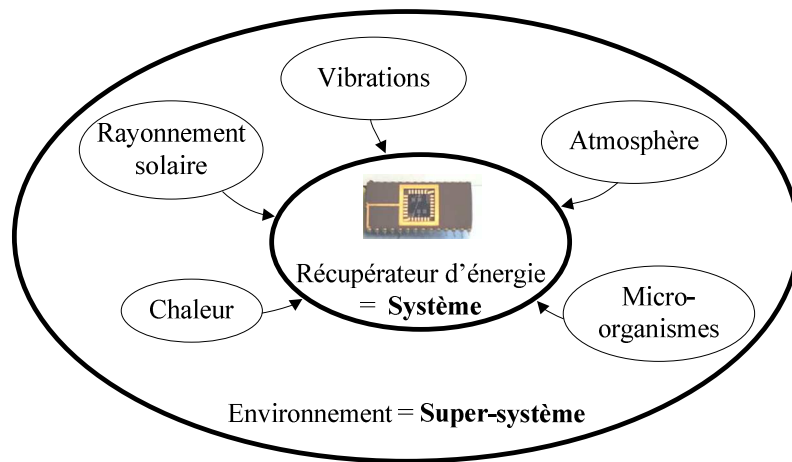


Figure III.2 : Décomposition en système et super-système

### 3.2.4. Décomposition fonctionnelle

La décomposition fonctionnelle conduit à l'identification des différentes entités qui composent le système et le super-système, ainsi que des flux qui circulent entre-elles. Cette identification est nécessaire dans la conception de microsystèmes autonomes alimentés par l'énergie récupérée dans leur environnement.

Pour analyser énergétiquement le système, nous considérons la loi d'intégralité des parties définie par la méthode TRIZ et reprise par Nadeau et al. La décomposition du système est alors représentée par la Figure III. 3.

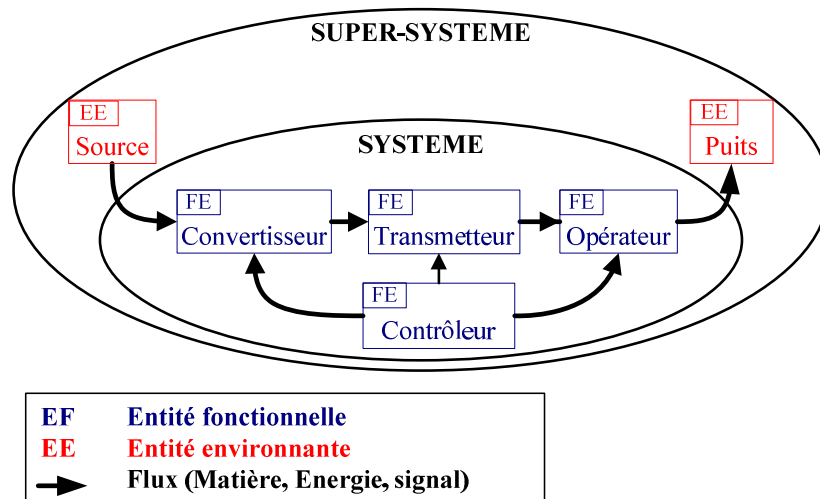


Figure III. 3 : Représentation détaillée du système et du sous système

### 3.2.5. Décomposition Source/Système/Puits

Dans notre étude, les flux sont extraits du super-système et y sont ensuite rejetés. Puis, ils sont transmis aux entités environnantes. Le problème se décompose donc en trois catégories distinctes : les sources, le système et les puits, où les sources et les puits sont considérés du point de vue du système (Figure III. 3 et Figure III. 4).

D'un point de vue fonctionnel, la source et le puits appartiennent au super-système et interagissent avec le système au travers de flux. En effet, le système extrait des flux d'une source et en rejette dans un puits. Ces notions sont détaillées dans les prochains paragraphes.

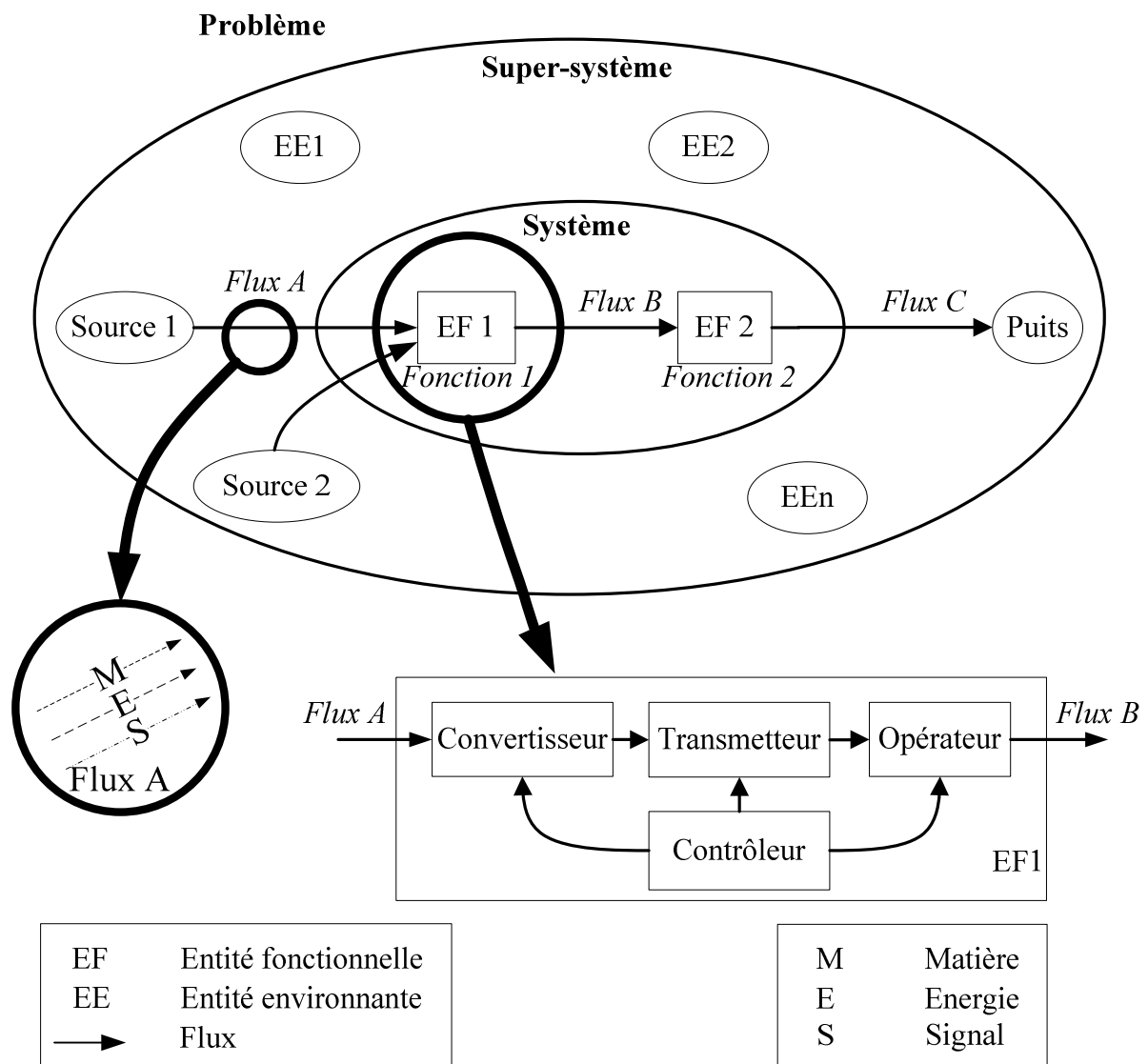


Figure III. 4 : Représentation globale du problème de conception

### 3.2.5.1. Source

Une source est une entité environnante capable d'émettre ou de recevoir des flux provenant du système ou du super-système. Ces flux sont divisés en flux élémentaires pour faciliter l'identification des effets fonctionnels et antagonistes, à l'aide de bases de données existantes. Par exemple, un fluide en mouvement transporte de l'énergie hydraulique mais également des flux de matière tels que des microorganismes, ou de la poussière.

Le Tableau III. 1 liste les sources potentielles lorsque l'on considère la récupération d'énergie, à savoir :

- l'énergie solaire,
- l'énergie mécanique des vibrations et de la déformation,
- l'énergie thermique,
- les ondes électromagnétiques,
- les fluides en mouvement.

Une comparaison directe de ces sources est difficile parce que certaines sont caractérisées par leur densité d'énergie (comme les batteries) alors que les autres sont caractérisées par leur densité de puissance (énergie solaire, par exemple). En outre, certaines sources ne que bidimensionnelles. Leur mesure est donc surfacique (en  $W/m^2$ ) au lieu d'être volumique ( $W/m^3$ ).

Dans notre approche, les sources sont identifiées en analysant le super-système et sont ensuite associées à des flux qui sont quantifiés via des bases de données issues d'études ou de mesures spécifiques.

L'identification de ces flux est facilitée par la classification de Thomas et Seah [Thomas, Qidwai et al., 2006 ; Seah et Tan, 2010], qui considère trois grandes catégories de sources d'énergie :

- l'énergie rayonnante : elle englobe l'énergie dite photonique (rayonnement solaire et éclairage artificiel) et l'énergie électromagnétique (disponible sous forme de champ magnétique oscillant)
- l'énergie mécanique : incluant le vent, l'écoulement de fluides, les mouvements oscillatoires ou vibratoires générés par le corps humain ou près de structures et de machines
- l'énergie thermique générée par diverses sources comme le rayonnement solaire, l'air ambiant, le sol ou les conduits d'échappement.

### 3.2.5.2. Système

Le système extrait des flux de la source avant de transformer et de transporter le flux fonctionnel au bon lieu, avec la bonne intensité et la bonne nature pour assurer un fonctionnement correct du puits. Son efficacité est évaluée en examinant la différence de nature entre l'entrée (extrait de la source) et la sortie (fournie au puits) et les effets antagonistes.

En effet, la conversion et le transfert de flux sont associés à des coefficients permettant de prendre en compte l'hétérogénéité des flux extraits et la technologie employée pour la

conversion. Ainsi, la conversion d'énergie mécanique issue des vibrations en énergie électrique n'est pas totale. En effet, une partie du flux d'entrée est transformé en énergie thermique, signal (bruit) et en matière (corrosion, usure, frottement). Ces flux antagonistes entraînent des effets pouvant conduire à une détérioration du système.

Le Tableau III. 1 liste également les différentes technologies de conversion existantes qui permettent de générer de l'énergie électrique en fonction de la nature de l'énergie récupérée. Chaque technologie possède ses propres spécificités et est associée à un rendement qui permet d'estimer la quantité d'énergie récupérée à partir de celle disponible dans l'environnement. Toutes ces valeurs sont issues de la littérature et représentent des valeurs moyennes à partir de dispositifs expérimentaux ou commercialisés.

Par exemple, nous voyons à partir de ce tableau qu'il existe trois types de convertisseurs pour transformer l'énergie mécanique des vibrations ou de la déformation en énergie électrique. Tout d'abord, les convertisseurs électrostatiques ne sont pas réellement appropriés à la problématique de récupération d'énergie car ils nécessitent une source de tension externe, telle qu'une batterie, pour fonctionner [Roundy, 2003].

Ensuite, les convertisseurs électromagnétiques sont plus efficaces pour des fréquences faibles allant de quelques hertz à la dizaine de kilohertz alors que les convertisseurs piézoélectriques sont utilisés pour des moyennes et des hautes fréquences, de 50 kHz à quelques MHz [Poulin, Sarraute et al., 2004]. Par ailleurs, les rendements des convertisseurs dépendent aussi de leur structure et leur composition. En effet, les travaux de Anton [Anton et Sodano, 2007] montrent que les céramiques PZT (Titano-Zirconate de Plomb) sont plus performantes que les autres matériaux piézoélectriques comme le PVDF (Polyfluorure de vinylidène) ou les fibres composites (MFC).

| Source                               | Référence  | Énergie disponible     | Convertisseur                   | Rendement moyen           | Paramètres   | Énergie récupérée             |
|--------------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------|
| Solaire direct                       | [Thomas, Qidwai et al., 2006]                        | 100 mW/cm <sup>2</sup> | Panneau photovoltaïque          | 4-40 %                    | Matériaux, taille, technologie                       | 4-40 mW/cm <sup>2</sup>       |
|                                      |  |                        | Panneau solaire                 | 80 %                      |  | 80 mW/cm <sup>2</sup>         |
| Solaire diffus                       |  | 0.1 mW/cm <sup>2</sup> | Panneau photovoltaïque          | 4-40 %                    |  | 0.004-0.04 mW/cm <sup>2</sup> |
|                                      |  |                        | Panneau solaire                 | 80 %                      |  | 0.08 mW/cm <sup>2</sup>       |
| Énergie mécanique : mouvement humain | [Mitcheson, Green et al.] [Shenck et Paradiso, 2001] | 4 μW/cm <sup>3</sup>   | Convertisseur électrostatique   | 0,32 %                    | Distance   | 0.0128 μW/cm <sup>3</sup>     |
|                                      |  |                        | Convertisseur électromagnétique | 6-20 %                    | Matériaux, accélération, fréquence, masses, rigidité | 0.24-0.8 μW/cm <sup>3</sup>   |
|                                      |  |                        | Convertisseur piézoélectrique   | PVDF 0,5-5%<br>PZT 35-50% |  | 0,02-2 μW/cm <sup>3</sup>     |
| Énergie mécanique :                  | [Roundy et Wright,                                   | 800 μW/cm <sup>3</sup> | Convertisseur électrostatique   | 0.32 %                    | Distance   | 2,56 μW/cm <sup>3</sup>       |

|                     |                                    |                              |                                 |                                       |  |                                      |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| machine             | 2004]                              |                              | Convertisseur électromagnétique | 6-20 %                                | Matériaux, accélération, fréquence, masses, rigidité | 48-160 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$     |
|                     |                                    |                              | Convertisseur piézoélectrique   | 0,5-50 %<br>PVDF 0,5-5%<br>PZT 35-50% |  | 4-400 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$      |
| Thermique           | [Roundy et Wright, 2004]           | 15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ | Module thermoélectrique         | 0,1-3 %                               | Gradient thermique, matériaux                        | 0,015-0,45 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ |
| Radiofréquence GSM  | [Hagerty, Helmbrecht et al., 2004] | 0.39 $\text{W}/\text{cm}^2$  | Antenne                         | 50 %                                  | Fréquence  | 0,195 $\text{W}/\text{cm}^2$         |
| Air<br>D = 30 l/min | [Federspiel et Chen, 2003]         | 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$    | Turbine                         | 5-11 %                                | Vitesse, nature du fluide, structure                 | 0,05-0,11 $\text{mW}/\text{cm}^2$    |

**Tableau III. 1 : Sources d'énergie et convertisseurs associés**

### 3.2.5.3. Puits

Le puits est un réservoir absorbant des flux. Dans le cadre des microsystèmes autonomes, le puits est un capteur et/ou un actionneur associé à une interface de communication pour échanger des données avec l'unité de gestion du système.

Il convient de noter que le puits peut être totalement défini par les spécifications de l'application. Si ce n'est pas le cas, le choix sera guidé par la grandeur à mesurer ou l'action à effectuer et les contraintes de l'application, comme l'illustre le Tableau III. 2.

| Type de capteur         | Grandeur     | Principe de transduction                      |
|-------------------------|--------------|---|
| Propriétés de contact   | Déformation  | Piezorésistif (jauge de contrainte)           |
|                         | Force        | Piézoélectrique, piézorésistif                |
|                         | Vibration    | Piezoélectrique, piezorésistif, son, ultrason |
| Propriétés physiques    | Pression     | Piezorésistif, capacitif                      |
|                         | Température  | Thermistance, thermocouple                    |
| Propriétés de mouvement | Déplacement  | Magnétique, capteur de contact                |
|                         | Vitesse      | Effet Hall, optoélectronique                  |
|                         | Accélération | Piezorésistif                                 |

**Tableau III. 2 : Principes de transduction**

### 3.3. MODÉLISATION DU PROBLÈME DE CONCEPTION

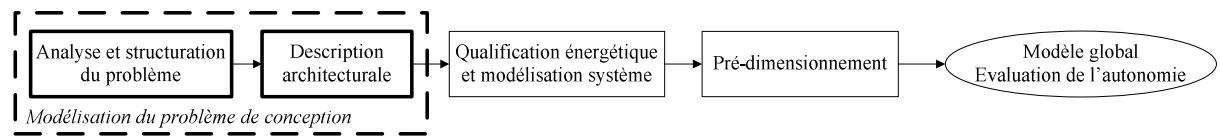


Figure III. 5 : Notre approche : analyse du problème de conception et description architecturale

Le fonctionnement d'un microsysteme est fortement dépendant de son environnement. Comme nous considérons un point de vue fonctionnel, nous décomposons le système en entités. L'objectif de cette étape est d'identifier et de qualifier les différentes entités du système et de son environnement ainsi que les sources présentes.

#### 3.3.1. Notre méthodologie

##### 3.3.1.1. Définition du contexte et du besoin

Notre approche débute par la formulation du besoin. Dans un contexte spécifique, ce besoin est déterminé par des contraintes techniques, économiques, sociologiques et de matière. Le contexte de l'étude doit être défini précisément afin d'identifier le système et de mettre en évidence les contraintes et les données essentielles à la conception du système.

Un système évolue dans un environnement et son comportement dépend de la situation de vie dans laquelle il se trouve. Nous devons donc identifier les situations de vie, l'environnement externe et les fonctions associés à une situation de vie donnée.

Les situations de vie sont des phases du cycle de vie d'un produit liées aux différents environnements dans lesquels il évolue. Elles peuvent être divisées en moments significatifs (Figure III. 6). Un moment significatif est caractérisé par un comportement unique du produit et un seul comportement des interfaces entre le produit et l'environnement. L'environnement extérieur est relié au système via les échanges de flux.

##### 3.3.1.2. Décomposition fonctionnelle

Pour chaque situation de vie, les fonctions sont définies en mettant en évidence les interactions entre le produit et son environnement. Ces interactions peuvent être [Fischer, 2006]:

- physiques (entre deux composants du système),
- sensorielles (entre les Hommes et les objets matériels),
- cognitives (entre les Hommes).

De plus, ces interactions sont soit directes soit indirectes. Lorsqu'elles sont directes, elles associent une entité du système à une entité de l'environnement. Quand elles sont indirectes,

elles relient deux entités de l'environnement. Pour représenter ces interactions, nous utilisons le diagramme d'interactions, comme l'illustre la Figure III. 6.

Cette étape conduit à la définition des spécifications du système qui guideront le choix des solutions techniques. La description de l'environnement aide à identifier les différentes sources d'énergie disponibles.

### 3.3.1.3. Décomposition organique

Nous adoptons une approche organique pour décomposer le système. Plus particulièrement, nous utilisons les outils décrits dans le chapitre II :

- l'organigramme technique (OT),
- le bloc diagramme fonctionnel (BDF).

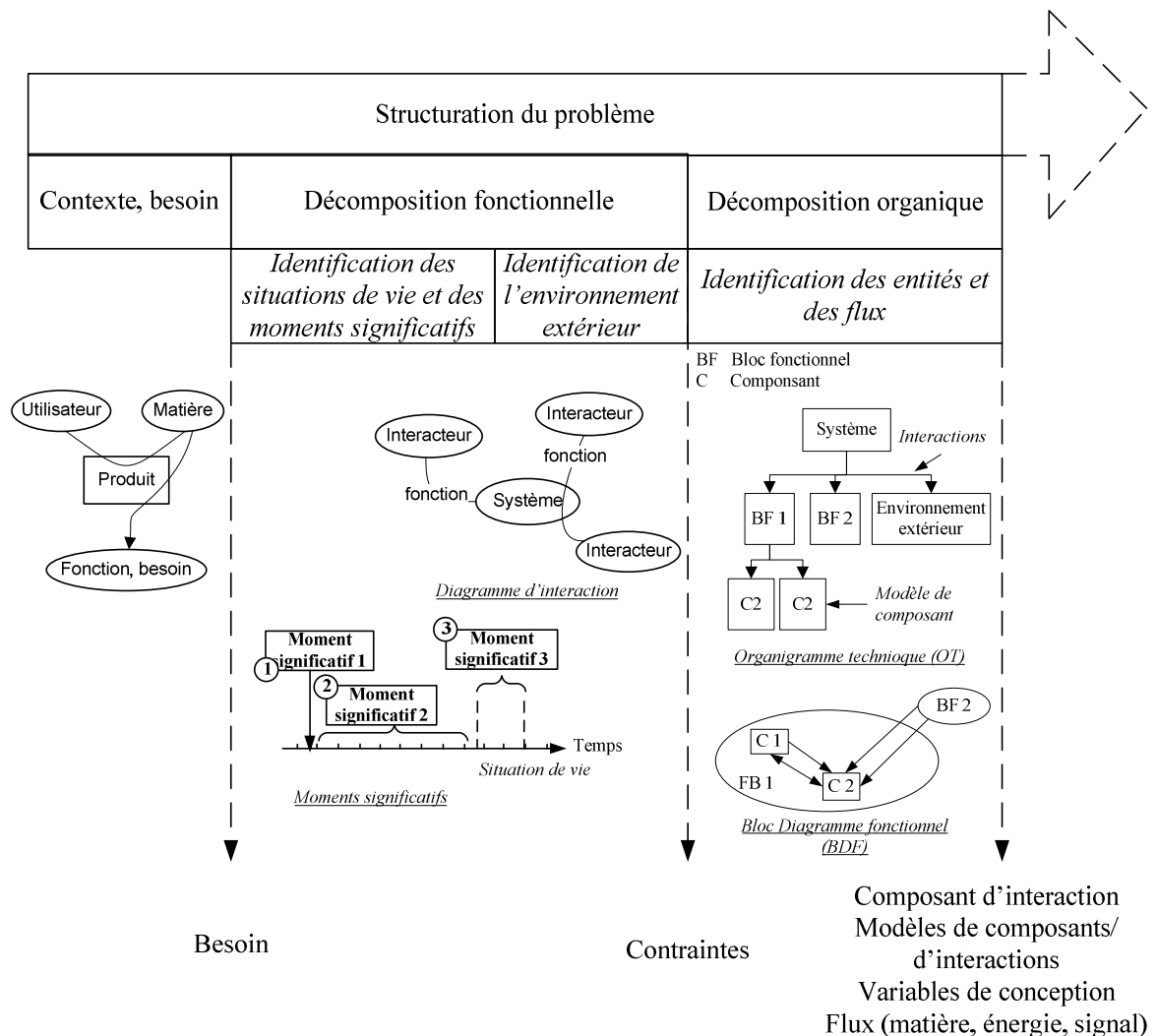


Figure III. 6 : Structuration du problème

### 3.3.2. Outil développé

Cette décomposition est guidée par l'outil que nous avons développé. Il est connecté à une base de données pour guider les concepteurs dans leurs choix.

En fonction des sources d'énergie considérées (Figure III. 7), des solutions de convertisseurs sont proposées (Figure III. 8). La décomposition des flux est également guidée (Figure III. 9).

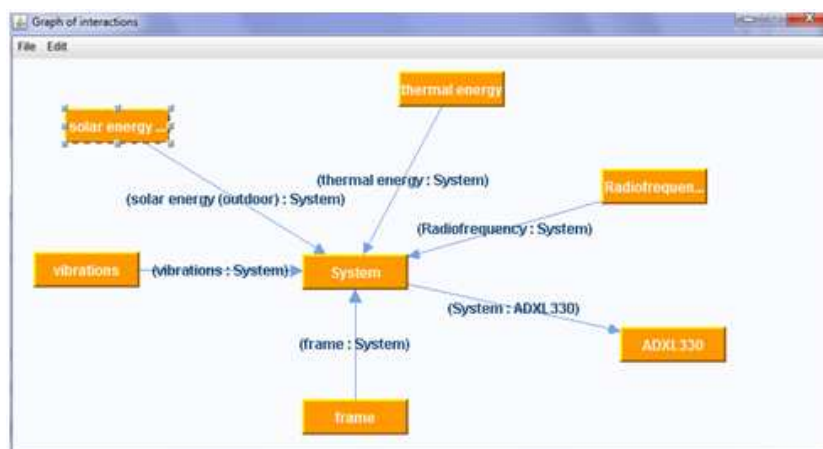
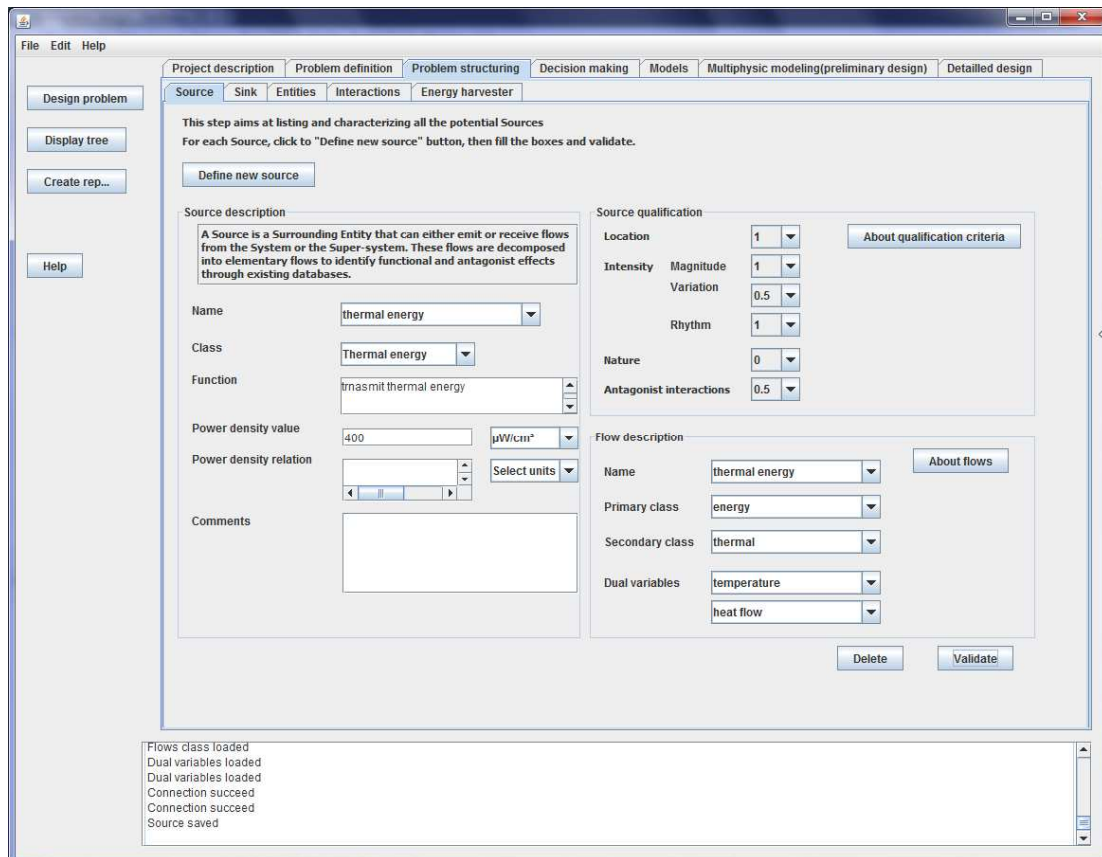


Figure III. 7 : Définition des entités et graphe des interactions avec l'outil développé



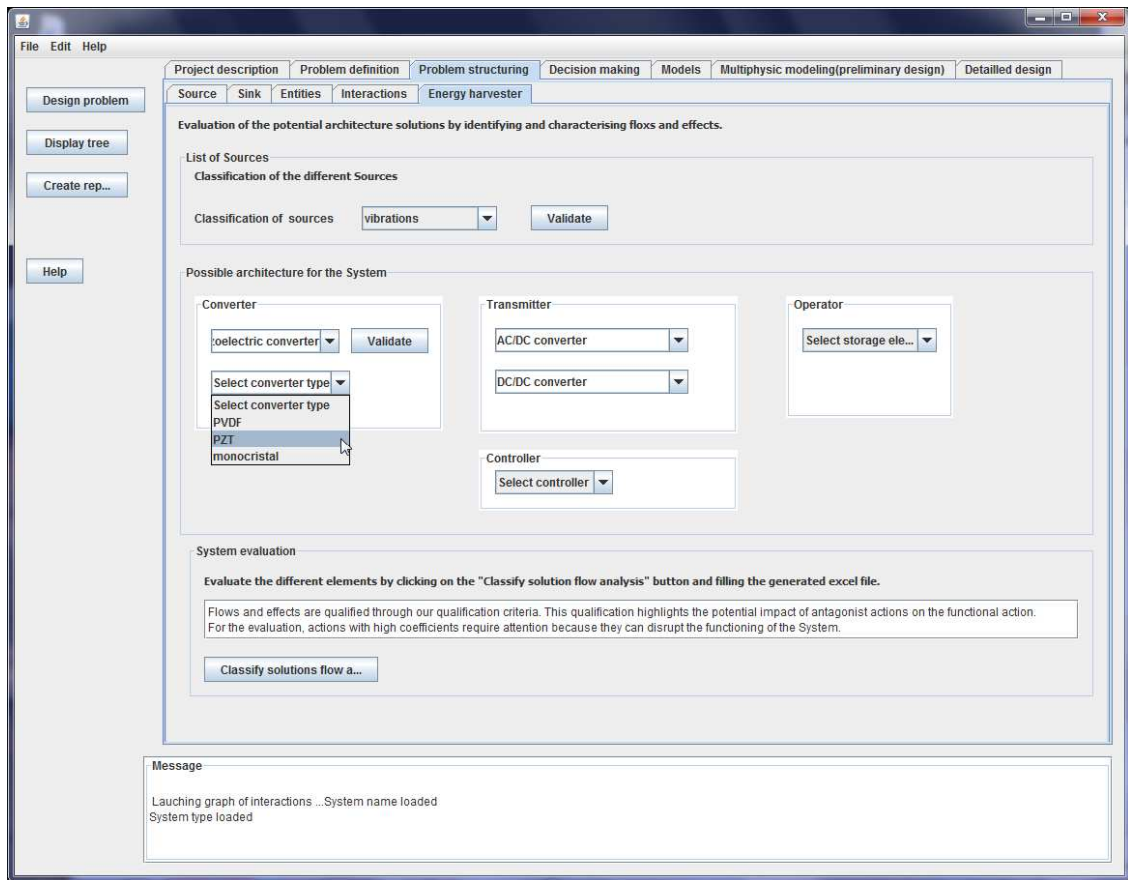


Figure III. 8 : Architecture du récupérateur d'énergie

| Modelling level   | Availability | Verb of functional action | Flow                     | Effect                            | Antagonist interactions |        |                   |                    |           |        | Total |
|-------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------|-------------------|--------------------|-----------|--------|-------|
|                   |              |                           |                          |                                   | Qualification           |        | Relative location | Relative intensity |           |        |       |
|                   |              |                           |                          |                                   | Flow                    | Effect |                   | Magnitude          | Variation | Rhythm |       |
|                   | 1            | Transform                 | Mechanical to electrical | Conversion into electrical energy | U                       | U      | 1                 | 1                  | 1         | 1      | 5     |
|                   | 1            | Transform                 | Mechanical to thermal    | Friction                          | INU                     | INU    | 1                 | 1                  | 1         | 1      | 5     |
|                   | 1            | Transform                 | Mechanical to acoustic   | Noise                             | INU                     | INU    | 1                 | 0                  | 1         | 0      | 3     |
|                   | 1            | Transform                 | Material                 | Corrosion                         | INU                     | INU    | 1                 | 0                  | 1         | 0      | 3     |
| Modelling level 1 |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |        |                   |                    |           |        | 0     |

Figure III. 9 : Décomposition des flux et des effets

La Figure III. 10 résume les différentes étapes de la phase de modélisation du problème de conception ainsi que les outils associés et les résultats obtenus.

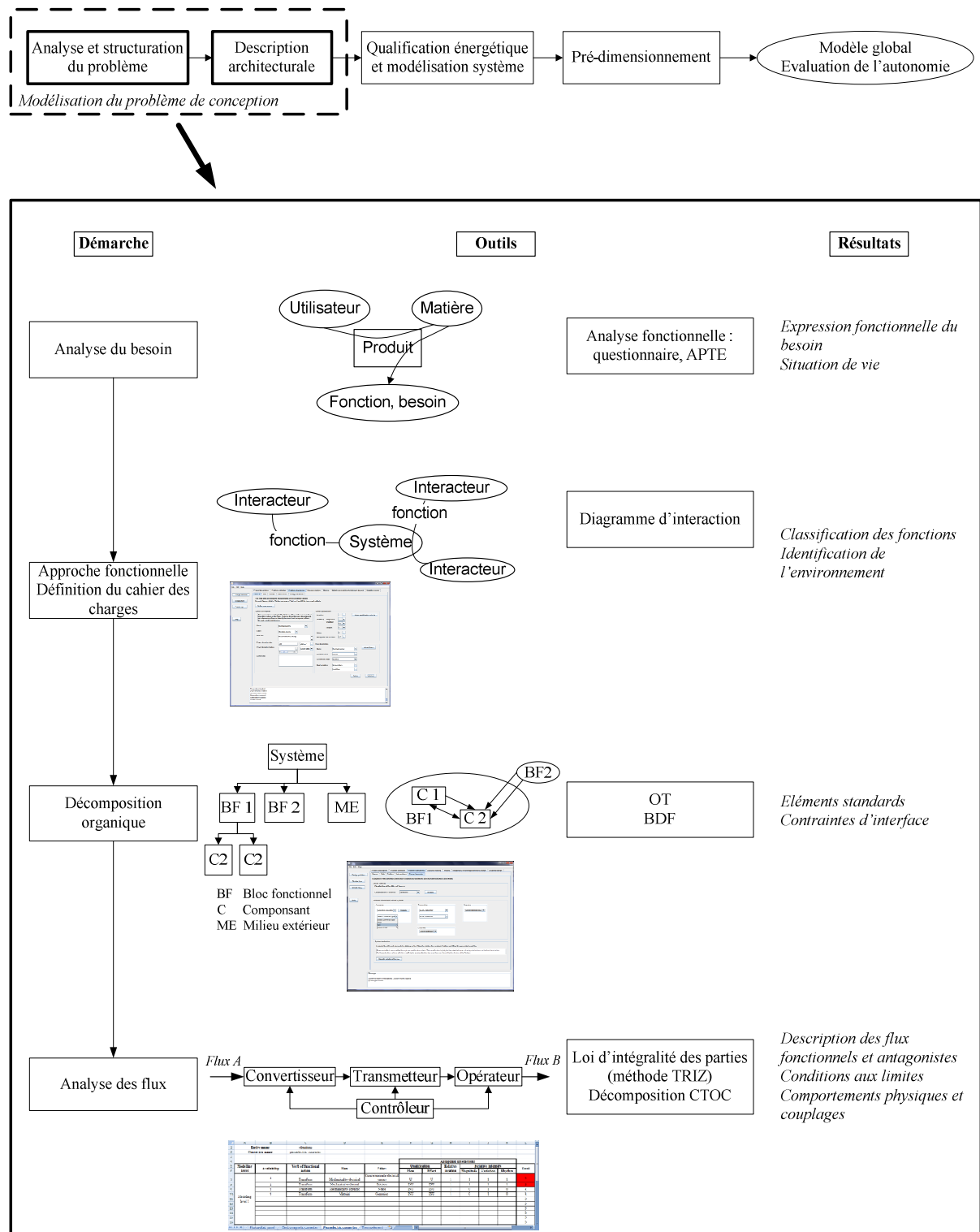


Figure III. 10 : Démarche et outils associés à la phase de modélisation du problème de conception

### 3.3.3. Cas de validation : modélisation du problème de conception

#### 3.3.3.1. Décomposition fonctionnelle

Dans notre cas, le puits est fixé, il s'agit d'un accéléromètre. Il reste à identifier les entités qui vont interagir sur notre système.

La Figure III. 11 représente le diagramme d'interaction de l'application considérée. Le système devra récupérer l'énergie de son environnement afin d'alimenter un capteur, tout en résistant aux contraintes environnementales telles que les vibrations, le rayonnement solaire et les conditions de température.

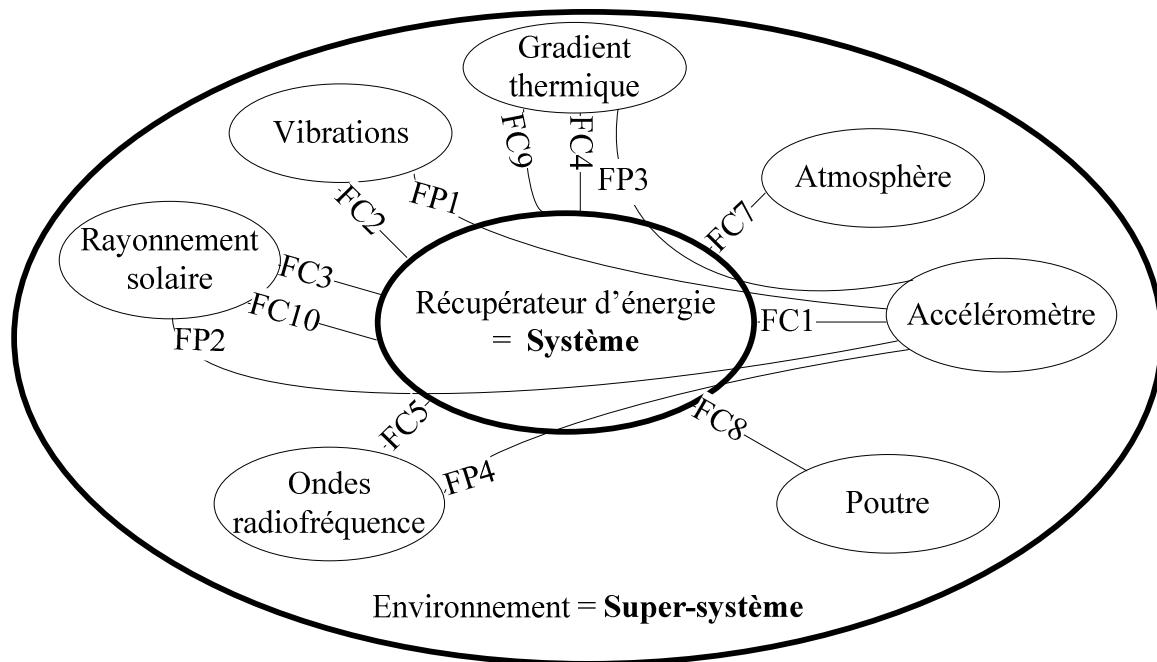


Figure III. 11 : Décomposition en système et super-système

D'après la section précédente, l'environnement du capteur est formé de différentes sources d'énergie, à savoir :

- l'énergie solaire,
- l'énergie mécanique de déformation,
- l'énergie mécanique issue des vibrations,
- l'énergie thermique,
- l'énergie des ondes radiofréquence.

Le Tableau III. 3 regroupe ces sources ainsi que la densité de puissance qu'elles fournissent.

| Source                  | Caractéristiques                         | Densité de puissance disponible |
|-------------------------|--|---------------------------------|
| Solaire                 | Rayonnement direct                       | 100 mW/cm <sup>2</sup>          |
| Vibrations, déformation | f = 6,28 Hz ; A = 1,245 m/s <sup>2</sup> | 7,18 mW/cm <sup>3</sup>         |
| Énergie thermique       | Gradient thermique = 5°C                 | 40 μW/cm <sup>2</sup>           |
| Radiofréquence          | GSM, Wifi                                | 0,1 μW/cm <sup>2</sup>          |

Tableau III. 3 : Identification et caractérisation des sources d'énergie ambiantes

### 3.3.3.2. Décomposition organique

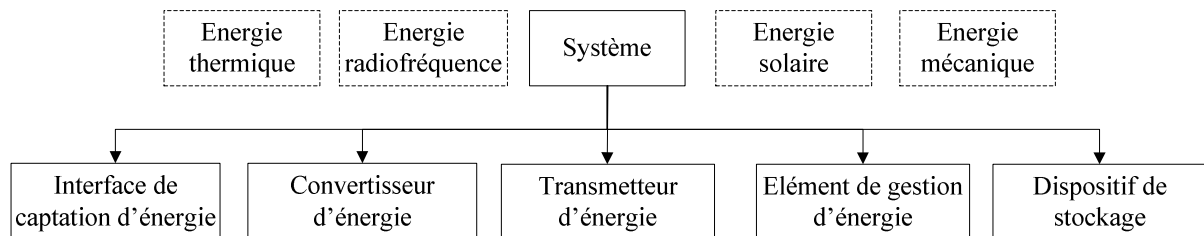


Figure III. 12 : Premier niveau de décomposition de l'organigramme technique étendu

La modélisation des entités sous forme de blocs (Figure III. 12) met en évidence les liens du produit avec l'extérieur, en identifiant les flux d'entrée et de sortie. La décomposition des flux en flux élémentaires va permettre d'identifier les effets induits par la réalisation de fonctions. Cette décomposition est obtenue à partir de bases fonctionnelles, intégrées dans l'outil que nous avons développé.

A partir du Tableau III. 4, nous constatons que le rayonnement solaire peut se décomposer en flux élémentaires de natures différentes. En effet, le rayonnement transmet un flux d'énergie électromagnétique mais également thermique et chimique ainsi qu'un flux de matière présente sous divers états (poussière, microorganismes,...).

| Flux                | Verbe d'action | Flux élémentaire |                   | Qualification |
|---------------------|----------------|------------------|-------------------|---------------|
| Rayonnement solaire | Transporter    | Matière          | Gaz               | EIA           |
|                     |                |                  | Liquide           | EIA           |
|                     |                |                  | Solide            | EIA           |
|                     |                | Énergie          | Acoustique        | EIN           |
|                     |                |                  | Chimique          | EIA           |
|                     |                |                  | Électromagnétique | U             |
|                     |                |                  | Thermique         | EIA           |

|   |             |         |                   |     |
|---|-------------|---------|-------------------|-----|
| Énergie mécanique des vibrations et de la déformation | Transporter | Énergie | Mécanique         | U   |
|   |             |         | Thermique         | EIA |
| Gradient thermique                                    | Transporter | Énergie | Thermique         | U   |
|   |             | Matière | Gaz               | EIA |
| Ondes radiofréquence                                  | Transporter | Énergie | Électromagnétique | U   |

Tableau III. 4 : Décomposition des flux en flux élémentaires

A partir de cette décomposition, nous pouvons identifier les entrées et sorties des différents composants du système et ainsi mettre en évidence les effets fonctionnels et antagonistes. Par exemple, comme le montre la Figure III. 13, la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique génèrera également de la chaleur (énergie thermique) et du bruit (énergie acoustique). Dans ce cas, lors de la conception du système, il faut prendre en compte ces effets induits qui peuvent conduire à une détérioration du système.

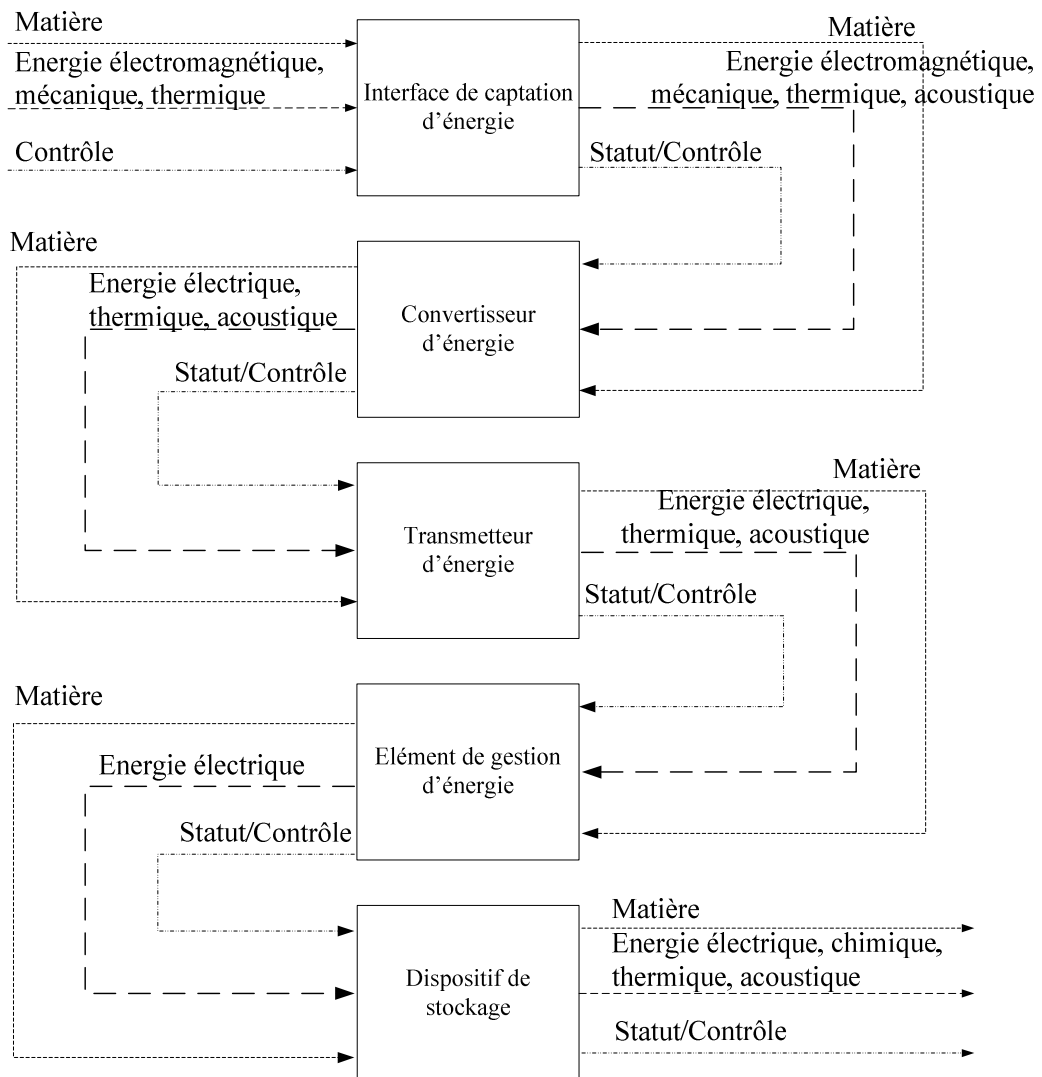


Figure III. 13 : Modèle bloc des composants du système

### 3.4. QUALIFICATION ÉNERGÉTIQUE ET MODÉLISATION SYSTÈME

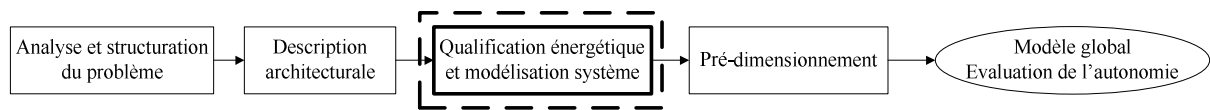


Figure III. 14 : Qualification énergétique et modélisation système

Dans la section précédente, nous avons présenté l'identification des entités et des flux du système. Il reste maintenant à proposer les différentes architectures possibles pour le récupérateur d'énergie, à travers une qualification énergétique et une modélisation au niveau système (Figure III. 14). Cette étape s'attache à la conception architecturale du système de récupération d'énergie. Les objectifs sont :

- la qualification et la quantification des sources,
- la sélection de l'architecture du récupérateur d'énergie.

#### 3.4.1. Notre méthodologie

##### 3.4.1.1. Qualification des sources d'énergie et des puits

###### 3.4.1.1.1. Critères de qualification des entités

Les sources, le système et les puits sont caractérisés par des critères de qualification visant à classer les différentes alternatives afin de faciliter le choix du concepteur.

Comme nous l'avons décrit auparavant, l'action fonctionnelle que nous considérons est réalisée par une chaîne énergétique au cours de laquelle les flux sont captés, transformés et transportés d'une source à un puits, en passant par le système. L'extraction se fait à travers une interface qui limite la quantité d'énergie récupérée par sa surface de réception. Chaque étape de la chaîne énergétique est associée à un rendement. Ce coefficient représente le rapport entre le flux d'énergie sortant et le flux d'énergie entrant et permet de mesurer l'intensité relative de chaque flux.

Ces coefficients dépendent de la nature des flux mis en jeu ainsi que des technologies utilisées. Ils mettent également en évidence les difficultés de conception liées à la distance, l'intensité, la nature et la qualification des flux.

Dans le cadre de la récupération d'énergie pour alimenter des microsystemes autonomes, les sources proches du puits sont privilégiées, de manière à limiter l'introduction d'éléments de transport pour conduire le flux entre ces deux entités qui génèrent des pertes économiques et énergétiques.

De plus, les pertes énergétiques sont également susceptibles de générer des effets antagonistes pouvant détériorer ou altérer les performances du système et du super-système. Parmi les effets antagonistes possibles, nous pouvons citer les pertes sous forme de chaleur qui sont une source potentielle de surchauffe ainsi que l'introduction de câbles qui augmente

le poids du système et limite donc son intégration.

De la même manière, nous favoriserons les sources dont la densité d'énergie est voisine de celle requise par le puits pour limiter le nombre de convertisseur et ainsi minimiser les pertes énergétiques et les effets antagonistes. Cette stratégie permet également d'éviter de surdimensionner le système, de prévenir des usures prématurées et de jouer ainsi sur le coût et la durée de vie du système. En effet, les sources générant une forte densité d'énergie ne sont pas réellement adaptées à l'alimentation des microsystemes car elles fournissent des courants et /ou tension importants. Par conséquent, des convertisseurs sont nécessaires pour obtenir un signal utilisable, ce qui entraîne, là encore, des pertes énergétiques et des effets antagonistes. Par exemple, de plus en plus d'électronique est embarquée dans les voitures. Tous ces capteurs, fonctionnant dans des gammes de tensions allant de 3 à 5 V, sont alimentés par la batterie 12 V ou 24 V disponible à bord du véhicule. Ils ont la particularité de toujours consommer (alternant entre un état actif et un état de veille), même lorsque la voiture est à l'arrêt. Or, les batteries ne sont pas adaptées à ce type d'utilisation et sont conçues pour fournir une grande puissance durant des intervalles de temps finis. Cette mauvaise utilisation a un impact sur la durée de vie de la batterie, en accélérant son vieillissement.

De plus, l'efficacité énergétique du système dépend de la nature des flux d'entrée et de sortie et des variables associées, énumérées dans le Tableau II [Hirtz, Stone et al., 2002]. Selon Nadeau et Sallaou [Sallaou, 2008], deux flux sont de nature différente lorsqu'ils sont associés à des variables différentes. La conversion d'un flux en un autre est plus ou moins complexe et certaines transformations sont irréversibles. Cette irréversibilité s'explique par une dégradation partielle de l'énergie : une partie se transforme en anergie et ne peut donc pas être récupérée par le système sans l'apport d'un travail externe. Pour maximiser le rendement du système, nous chercherons à maximiser les énergies nobles (aussi appelées exergies), exploitables sans conversion préalable.

A partir de ces observations et recommandations, nous avons choisi de caractériser les entités en termes d'espace, de temps, de nature et de classification des flux. Pour ce faire, nous avons défini les critères de qualifications suivants :

- distance relative  $D$  (CQ1),
- intensité relative  $I$  (CQ2),
- nature relative  $N$  (CQ3),
- caractérisation des flux  $IA$  (CQ4).

Tous ces critères sont évalués à l'aide d'un coefficient compris entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 sera un gage de qualité de l'élément considéré.

#### 3.4.1.1.2. Distance relative $D$ (CQ1)

La distance relative ( $D$ ) mesure la distance entre le système considéré et le super-système. Cette distance peut se décrire de manière qualitative en évaluant si les entités sont proches ou lointaines. La description peut également se faire quantitativement avec des mesures physiques de distance. Dans les deux cas, les distances maximales et minimales associées aux coefficients 0 et 1 seront définies par le concepteur, en fonction de l'application et des contraintes imposées.

*Pour évaluer la distance relative entre les entités, nous utilisons le schéma suivant :*

- Si les entités sont très proches, la valeur du coefficient sera voisine de 1.
- Si les entités sont distantes, le coefficient sera proche de 0,5.
- Si les entités sont éloignées, le coefficient sera proche de 0.

Notons que cette évaluation peut-être affinée, en utilisant les fonctions de désirabilité de Harrington, notamment.

#### *3.4.1.1.3. Intensité relative $I$ (CQ2)*

L'intensité relative ( $I$ ) est analysée sous trois aspects correspondant aux variations du système à différents échelles :

- le niveau ( $M$ ),
- la variation ( $\Delta$ ),
- le rythme ( $F$ ).

Tout d'abord, le niveau de l'intensité ( $M$ ) représente la dérivée d'ordre zéro. Elle évalue si la quantité de flux fourni par la source est du même ordre de grandeur que celle dont le puits a besoin, en considérant la densité d'énergie. Ce paramètre prend en compte les contraintes de tailles liées au dispositif étudié. Il représente la quantité d'énergie qui peut être extraite de la source, à travers une interface et se présente comme le rapport entre une variable conservative (énergie, puissance,...) et une variable intensive (masse, volume, surface,...).

Ensuite, la dérivée d'ordre un examine les variations d'intensité ( $\Delta$ ) pour comparer l'évolution des flux entrants et sortants. Ainsi, si les flux évoluent dans le même sens (l'augmentation de l'un entraîne l'augmentation de l'autre), l'évolution est dite favorable et est associée à un coefficient proche de 1. Si le flux d'entrée n'évolue pas avec le flux de sortie, l'évolution est qualifiée de neutre et est associée à une valeur moyenne. Par contre, si les flux évoluent en sens contraires, l'évolution est défavorable et le coefficient est voisin de zéro.

Enfin, les autres dérivées décrivent les rythmes des flux. Le but étant d'observer la disponibilité, la périodicité des flux. Pour les microsystemes autonomes, il s'agit d'un paramètre clé qui permettra au concepteur de savoir s'il devra intégrer un élément de stockage ou récupérer de l'énergie de différentes sources. Ce critère est évalué au travers de fréquences.

#### *Évaluation du niveau*

- Si le niveau de flux extractible est largement supérieur à celui requis, le coefficient  $M$  est proche de 0,5.
- Si le niveau est supérieur ou égal et proche, le coefficient  $M = 1$ .
- Si le niveau est inférieur ou égal, le coefficient  $M = 0$ .



*Évaluation de la variation*

- Si les flux d'entrée et de sortie évoluent dans le même sens,  $\Delta = 1$  (évolution favorable).
- Si le flux d'entrée ne varie pas avec celui de sortie,  $\Delta = 0,5$  (évolution neutre).
- Si les flux évoluent en sens inverses,  $\Delta = 0$  (évolution défavorable).

*Évaluation du rythme*

- Si les flux d'entrée et de sortie sont disponibles au même rythme ou si le flux d'entrée est toujours disponible,  $F = 1$ .
- S'ils sont disponibles au même rythme, cycliquement,  $F = 0,5$ .
- S'ils ne sont pas disponibles au même rythme,  $F = 0$ .

*3.4.1.1.4. Nature relative N (CQ3)*

La nature relative (N) s'attache aux variables associées aux flux d'entrée et de sortie et donne des informations sur le processus de transformation du flux d'entrée en un autre type de flux. Le but est d'identifier les processus irréversibles.

De plus, nous introduisons des rapports énergétiques qui donnent des informations sur les performances du système. Ces variables sont représentées par un rapport entre les flux de sortie et d'entrée et mesurent l'intensité de ces flux, afin d'estimer l'énergie qui peut être récupérée. Nous distinguons trois types de rapports énergétiques :

- le rapport énergétique de conversion (efficacité de conversion),
- le rapport de transmission énergétique (efficacité énergétique),
- le coefficient énergétique associé à une combinaison de conversion et de transmission.

*La nature relative est évaluée de la façon suivante :*

- Si les variables duales des flux sont identiques,  $N = 1$ .
- Si l'énergie de la source est noble,  $N = 0,5$ .
- Si les variables sont différentes, que l'énergie de sortie doit être noble et que celle de la source ne l'est pas,  $N = 0$ .

*3.4.1.1.5. Interactions antagonistes IA (CQ4)*

La réalisation d'une action fonctionnelle implique des conversions et transfert de flux qui sont soit utiles soit inutiles, à cause de l'hétérogénéité des flux. Les effets inutiles peuvent dégrader les composants du système. Pour minimiser ces effets antagonistes à l'action fonctionnelle, les flux sont divisés en flux élémentaires. Puis, les actions associées sont identifiées et qualifiées. Cette démarche met en évidence les entités ayant le plus petit nombre d'effets antagonistes et guide le concepteur dans ses choix.

*Les interactions antagonistes sont évaluées à travers l'efficience du système :*

- Si la source est efficiente quelle que soit l'échelle, IA = 1.
- Si elle est efficiente au niveau du sous-système, IA = 0,5.
- Si elle n'est pas efficiente, IA = 0.

#### 3.4.1.1.6. Agrégation

Comme cela a été précisé au début de cette section, les critères sont évalués à l'aide de valeurs décimales appartenant à l'intervalle [0 ; 1]. Des poids sont aussi associés aux différents critères, en fonction de leur importance dans l'application. Ces coefficients sont ensuite agrégés pour obtenir une classification des entités.

Dans notre étude, la désirabilité globale est obtenue en faisant la somme pondérée des désirabilités individuelles (III.1).

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n d_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{III.1})$$

Pour approfondir sur ce point et tester la robustesse de la méthode, il faudrait étudier l'influence des poids sur la classification finale des entités. Il serait également intéressant d'implémenter d'autres méthodes d'agrégation pour obtenir l'indice de désirabilité globale.

Parmi les méthodes envisageables, nous distinguons :

- la moyenne géométrique, proposée par Derringer (III.2) [Derringer et Suich, 1980]

$$\mu = \left( \prod_i^k d_i \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{III.2})$$

où  $d_i$  représente les désirabilités individuelles et  $k$  le nombre de critères.

- le produit des désirabilités  $d_i$  à la puissance inverse de la somme des poids  $w_i$ , proposé par Harrington (III.3) [Harrington, 1965]

$$\mu = \left( \prod_i^k d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_i w_i}} \quad (\text{III.3})$$

- le minimum, défini par Kim et Lin (III.4) [Kim et Lin, 2000].

$$\mu = \min_i(d_i) \quad (\text{III.4})$$

Les critères de qualification cités précédemment sont évalués. Chaque entité est ainsi examinée et la démarche aboutit à une hiérarchisation qui permet au concepteur de ne retenir que les meilleures solutions (Tableau III. 5).

| Critère    | Distance relative        | Intensité relative   |               |                | Nature relative         | Interactions antagonistes    |                           |
|------------|--------------------------|--|---------------|----------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
|            |                          | Valeur   | Variation     | Rythme         | Conversion              | Source/Puits<br>→ Système    | Système →<br>Source/Puits |
| Évaluation | Coefficient entre 0 et 1 |  |               |                |                         |                              |                           |
| Paramètre  | Distance [m]             | Densité de puissance [W/m <sup>2</sup> ou W/m <sup>3</sup> ] | Rendement [%] | Fréquence [Hz] | Rapport énergétique [-] | Flux et actions antagonistes |                           |

**Tableau III. 5 : Évaluation des sources et des puits**

Généralement, le puits sera fixé par l'application. C'est pourquoi, dans le reste du rapport, nous nous focaliserons principalement sur l'étude des sources. Le choix de ces sources va entraîner différentes architectures possibles pour le système de récupération d'énergie. Ces alternatives sont listées dans des bases de données, issues de la littérature. Le choix est facilité par l'interface développée.

### 3.4.1.2. Sélection de l'architecture du récupérateur d'énergie

#### 3.4.1.2.1. Décomposition CTOC du récupérateur d'énergie

Comme le montre la Figure III. 15, le système de récupération d'énergie se divise donc selon les blocs fonctionnels suivants :

- un convertisseur d'énergie pour extraire et transformer l'énergie ambiante en énergie électrique (Convertisseur),
- des convertisseurs de tension pour adapter le flux au reste du système. Notons que ces éléments sont communément appelés convertisseurs mais d'un point de vue énergétique, il s'agit en réalité de transmetteur car ils ne change pas la nature du flux traité (Transmetteur).
- un élément de stockage de l'énergie pour jouer le rôle d'étage tampon entre la source et le puits (Opérateur),
- une unité de traitement et de contrôle qui va récupérer, traiter et envoyer les données via un émetteur (Contrôleur).

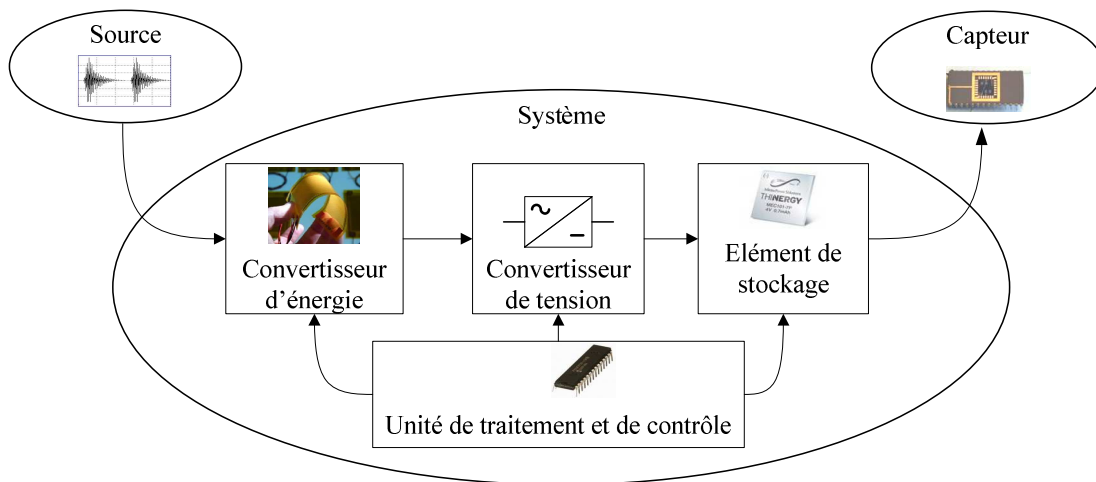


Figure III. 15 : Décomposition CTOC du récupérateur d'énergie

Le Tableau III. 1 regroupe les principales sources et technologies de convertisseurs d'énergie que l'on peut trouver dans la littérature. Chaque convertisseur possède ses propres spécificités et conditions de fonctionnement optimales.

De la même manière, nous avons classé les types de convertisseurs de tension existants. Il en existe deux grandes catégories :

- les convertisseurs AC/DC qui vont transformer un signal alternatif en signal continu,
- les convertisseurs DC/DC dont le rôle est d'adapter le signal au circuit auquel ils sont connectés.

Parmi les convertisseurs AC/DC classiques, également appelés redresseurs, nous trouvons des circuits passifs comme les diodes ou les ponts de diodes dont l'efficacité est limitée par la tension de seuil des diodes. Il existe aussi des circuits actifs tels que les redresseurs sans seuil qui associent un amplificateur opérationnel et une diode et qui nécessitent, par conséquent d'être alimentés.

En ce qui concerne les capteurs DC/DC, il existe des dispositifs à découpage comprenant des composants passifs et des interrupteurs commandés et offrant des rendements de l'ordre de 80 à 90 %. Il y a aussi des circuits à base de capacités commutées, facilement intégrables et fonctionnant à basse tension. Le Tableau III. 6 résume les convertisseurs classiques cités ci-dessus, ainsi que leur rendement, avantages et inconvénients.

| Transmetteurs       | Rendement (%)   | Avantages                                  | Inconvénients    |
|---------------------|---|--|------------------|
| Convertisseur AC/DC |   |  |                  |
| Diode               | Proportionnel à $V_{th}/V$<br>$V_{th}$ : tension de seuil de la diode<br>$V$ : tension d'entrée | Facile à concevoir<br>Convertisseur passif | Tension de seuil |
| Pont de diodes      | Proportionnel à $V_{th}/V$  | Facile à concevoir<br>Convertisseur passif | Tension de seuil |

|                                      |  |                                       |   |
|--------------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Redresseur sans seuil                | -  | Pas de chute de tension               | Convertisseur actif   |
| Convertisseur DC/DC                  |  |                                       |   |
| Convertisseur à découpage            | 80 – 90 %  | Rendement (90%)                       | Éléments passifs<br>Pertes de puissance<br>Intégration de l'inductance<br>Courant et tension d'entrée |
| Convertisseurs à capacités commutées | Proportionnel à $V_{out}/(X.V_{in})$<br>$V_{out}$ : tension de sortie<br>$V_{in}$ : tension d'entrée | Facile à intégrer<br>Tension d'entrée | Commande des transistors  |

**Tableau III. 6 : Convertisseurs de tension classiques**

### 3.4.1.2.2. Évaluation du système

Les composants du système vont dépendre du choix de la source et du puits. Par exemple, la récupération d'énergie mécanique issue des vibrations peut se faire avec trois types de convertisseur : électrostatique, électromagnétique et piézoélectrique. Un redresseur sera ensuite nécessaire pour transformer le signal alternatif en signal continu.

Pour évaluer le système, nous considérons les critères suivants :

- disponibilité de la technologie,
- liste des effets physiques désirés et des effets antagonistes (pour les éliminer ou les valoriser).

#### **Disponibilité**

Ce critère évalue si le composant est commercialisé ou testé en laboratoire seulement. Cet aspect a un impact sur la réalisation du système et les concepteurs doivent savoir si leur solution est réalisable, et sous quelles conditions. Après avoir examiné la faisabilité de la solution, notre démarche propose d'analyser les actions fonctionnelles et antagonistes, pour sélectionner le système le plus efficace.

La disponibilité est évaluée comme suit :

- si la technologie est disponible en laboratoire, le critère vaut 0,
- si elle est disponible dans le commerce, le critère vaut 1.

#### **Effets physiques**

Les flux et effets sont alors qualifiés à l'aide des mêmes critères que les sources et les puits, sauf le critère concernant la nature et les interactions antagonistes. Là encore, la décomposition des flux et des effets est guidée par des tables, intégrées dans l'outil développé.

### **Qualification des flux et des effets**

Comme nous l'avons vu précédemment, les flux peuvent être utiles ou antagonistes à l'action fonctionnelle.

- utiles à l'action fonctionnelle (U),
- neutres (EIN),
- antagonistes et nuisibles à l'action fonctionnelle (EIA).

### **Distance**

- si l'effet se produit au même lieu que l'effet fonctionnel recherché,  $D \rightarrow 1$ ,
- sinon,  $D \rightarrow 0$

### **Intensité**

#### **Valeur**

- si l'effet se produit proportionnellement (quantités d'énergie équivalentes) à l'effet fonctionnel désiré,  $D \rightarrow 1$ ,
- sinon,  $D \rightarrow 0$ .

#### **Variation**

- si l'effet évolue dans le même sens que l'effet fonctionnel désiré,  $\Delta \rightarrow 0$ ,
- sinon,  $\Delta \rightarrow 0$ .

#### **Rythme**

- si l'effet se produit au même rythme que l'effet fonctionnel,  $F = 1$ ,
- sinon,  $F \rightarrow 0$ .

Pour l'évaluation, les effets avec un coefficient élevé sont critiques.

Cette qualification met en avant les actions antagonistes et leur impact sur le système. Les coefficients individuels sont ensuite agrégés. Les actions ayant des coefficients élevés devront être analysées attentivement car ils seront susceptibles de perturber le fonctionnement du système. Toutes ces informations sont résumées dans le Tableau III. 7.

| Critère    | Disponibilité               | Interactions antagonistes                    |      |   |               |                                     |  |                    |                |        |
|------------|-----------------------------|--|------|---|---------------|-------------------------------------|--|--------------------|----------------|--------|
|            |                             | Verbe  | Flux | Effet   | Qualification |                                     | Distance relative                        | Intensité relative |                |        |
|            |                             |  |      |   | Flux          | Effet                               |  | Valeur             | Variation      | Rythme |
| Évaluation | Valeur discrète $\{0 ; 1\}$ | Valeur discrète à partir de bases de données |      | Valeur discrète adimensionnelle $\{U ; INU ; INE\}$ |               | Valeur adimensionnelle entre 0 et 1 |  |                    |                |        |
| Paramètre  | {laboratoire-industrie}     | Verbe-Flux-Effet                             |      |   |               | Distance [m]                        | Densité de puissance [W/m <sup>2</sup> ] | Rapport [%]        | Fréquence [Hz] |        |

**Tableau III. 7 : Évaluation des systèmes**

### 3.4.2. Outil développé

Toutes les étapes sont supportées par des outils afin de guider le concepteur dans ses choix. Nous avons ainsi créé une base de données contenant les informations relatives à la qualification des entités et aux différents convertisseurs existants. Cette base de données est connectée à l'outil que nous avons développé pour supporter notre approche (Figure III. 16).

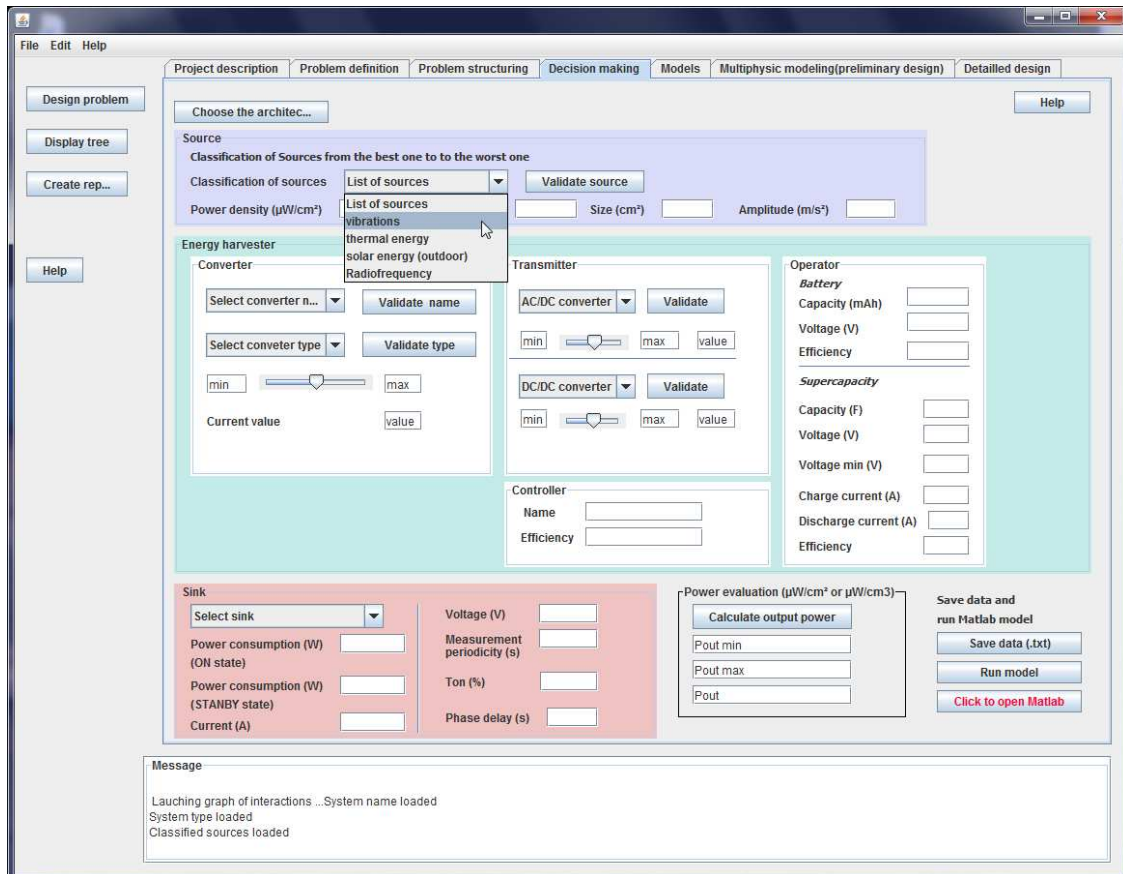


Figure III. 16 : Aide à la définition de l'architecture du système

La Figure III. 17 illustre cette étape, en détaillant les méthodes et outils utilisés et mis en œuvre.

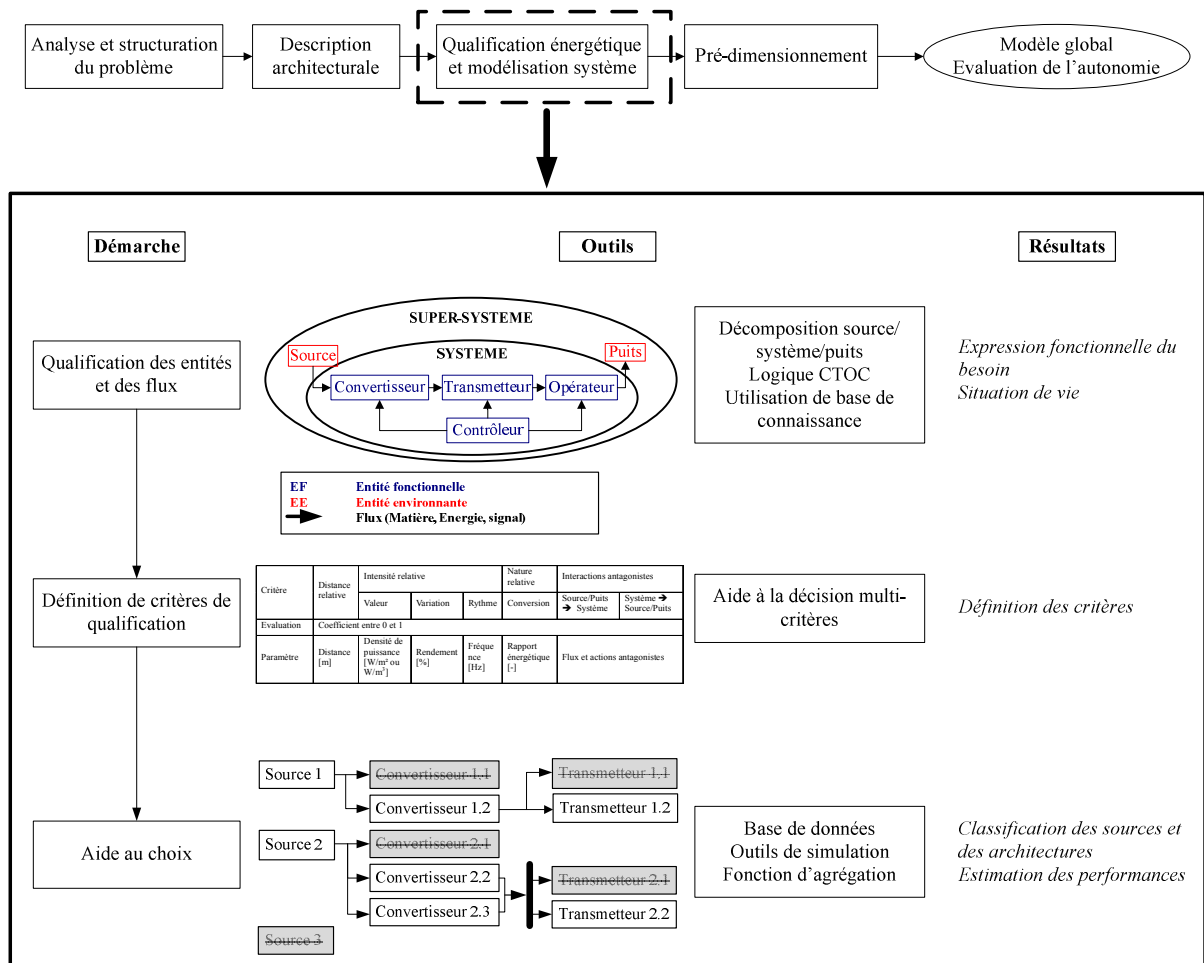


Figure III. 17 : Démarche et outils associés à la phase de qualification énergétique

### 3.4.3. Cas de validation : qualification énergétique et modélisation système

#### 3.4.3.1. Qualification des sources

Pour notre étude, le cahier des charges impose des contraintes élevées pour l'autonomie et donc l'efficacité du système. Les critères évaluant le niveau de l'intensité et la nature sont donc associés à des poids plus élevés que les autres critères. La qualification des sources est présentée dans le Tableau III. 8.

Le détail de la caractérisation des sources est présenté ci-après.

#### Vibrations

La source de vibration est très proche du système

$$D = 1$$

La puissance disponible est proche et supérieure à celle requise

$$M = 1$$

Le microsystème n'a pas d'influence sur la source

$$A = 0,5$$



|   |            |
|---|------------|
| La source n'est pas toujours disponible                                 | $F = 0,5$  |
| L'énergie de la source est noble mais est différent de celle du système | $N = 0,5$  |
| La source est efficiente au niveau du sous-système                      | $IA = 0,5$ |

**Solaire**

|   |                |
|---|----------------|
| La source de rayonnement est très proche du système                             | $D = 1$        |
| La puissance disponible est très supérieure à celle requise par le microsystème | $M = 0,5$      |
| Le microsystème n'a pas d'influence sur la source                               | $\Delta = 0,5$ |
| La source est disponible cycliquement   | $F = 0,5$      |
| L'énergie de la source est noble mais est différente de celle du système        | $N = 0,5$      |
| La source est efficiente au niveau du sous-système                              | $IA = 0,5$     |

**Ondes radiofréquence**

|  |                |
|--|----------------|
| La source d'émission est éloignée du système                               | $D = 1$        |
| La puissance disponible est inférieure à celle requise par le microsystème | $M = 0$        |
| Le microsystème n'a pas d'influence sur la source                          | $\Delta = 0,5$ |
| La source est toujours disponible  | $F = 1$        |
| L'énergie de la source est noble mais est différente de celle du système   | $N = 0,5$      |
| La source est efficiente quelle que soit l'échelle                         | $IA = 1$       |

**Thermique**

|  |                |
|--|----------------|
| La source de rayonnement est très proche du système                        | $D = 1$        |
| La puissance disponible est inférieure à celle requise par le microsystème | $M = 0$        |
| Le microsystème n'a pas d'influence sur la source                          | $\Delta = 0,5$ |
| La source est toujours disponible  | $F = 1$        |
| L'énergie de la source n'est pas noble                                     | $N = 0$        |
| La source n'est pas efficiente   |                |

| Sources                 | D        | I        |          |          | N        | IA       | μ        |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                         |          | M        | Δ        | F        |          |          |          |
| Vibrations, déformation | 1        | 1        | 0,5      | 0,5      | 0,5      | 0,5      | 6,5      |
| Solaire                 | 1        | 0,5      | 0,5      | 0,5      | 0,5      | 0,5      | 5        |
| Ondes radiofréquence    | 0,5      | 0        | 0,5      | 1        | 0,5      | 1        | 4        |
| Gradient thermique      | 1        | 0        | 0,5      | 1        | 0        | 0        | 3        |
| <b>Poids</b>            | <b>1</b> | <b>3</b> | <b>1</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>1</b> | <b>9</b> |

Tableau III. 8 : Classification des sources

La classification par ordre de préférence est la suivante :

- énergie mécanique des vibrations et de la déformation,
- énergie solaire,
- énergie radiofréquence,
- énergie thermique.

A partir de ce premier classement, nous éliminons les deux dernières sources. Pour la suite de l'étude, nous nous focalisons donc sur les deux premières sources, listées ci-dessus. Il faut maintenant déterminer l'architecture du récupérateur d'énergie. Notons qu'à cette étape, le concepteur est libre de considérer les sources qu'il veut, en fonction des écarts entre chacune.

### 3.4.3.2. Sélection de l'architecture du système

Après avoir sélectionné les sources les plus intéressantes, il reste à déterminer l'architecture des systèmes de récupération d'énergie associés. A partir de la littérature, nous constatons que plusieurs alternatives sont possibles pour une même source d'énergie. Afin de les discriminer, nous utilisons les critères de qualification que nous avons définis.

La première étape consiste à qualifier les convertisseurs. Les différentes technologies de conversion sont présentées dans le Tableau III. 1. Notons que pour ce tableau, nous n'avons pas représenté la disponibilité car tous les dispositifs étudiés sont disponibles dans le commerce.

Dans le but de minimiser le nombre d'entités, nous nous focalisons sur les convertisseurs qui transforment directement l'énergie extraite de l'environnement en énergie électrique. De ce fait, nous ne retenons que les panneaux photovoltaïques pour la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. En effet, les panneaux solaires produisent de l'énergie thermique qui doit encore être transformée en énergie électrique, ce qui induit des pertes énergétiques. De même, nous écartons la solution de conversion électrostatique pour l'énergie mécanique car elle n'est pas appropriée à la problématique de récupération d'énergie à cause de la nécessité d'avoir une source externe pour l'initialisation.

La décomposition des flux et l'analyse des effets induits associés permettent d'éliminer certaines architectures. Le coefficient obtenu met en évidence les effets les plus importants qui ont lieu en même temps que l'action fonctionnelle mais qui peuvent altérer le système.

Par exemple, si nous considérons le premier cas présenté dans le Tableau III. 9, nous constatons que la conversion d'énergie solaire en énergie électrique s'accompagne d'une génération de chaleur. Comme cet effet se produit au même lieu et à la même intensité que le flux fonctionnel (la conversion d'énergie solaire en énergie électrique), il doit être pris en compte lors de la conception afin d'éviter toute dégradation du système. Les autres effets sont moins importants car ils n'interviennent pas sur la même échelle de temps.

A partir du Tableau III. 9, nous constatons que le convertisseur électromagnétique entraîne plus d'effets induits avec des hauts coefficients que le convertisseur piézoélectrique. Cette analyse peut servir à éliminer certaines alternatives ou simplement à titre informatif pour que le concepteur prenne ces éléments en compte lors de la conception du système.

Nous allons approfondir l'étude pour les quatre solutions présentées dans le Tableau III. 9.

| Convertisseur                   | Verbe d'action fonctionnelle | Flux                                    | Effet                            | Interactions antagonistes |       |   |   |          |   | $\mu$ |
|---------------------------------|------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------|-------|---|---|----------|---|-------|
|                                 |                              |   |                                  | Qualification             |       | D | I |          |   |       |
|                                 |                              |   |                                  | Flux                      | Effet |   | M | $\Delta$ | F |       |
| Panneau photovoltaïque          | Transformer                  | Électromagnétique en électrique         | Conversion en énergie électrique | U                         | U     | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Électromagnétique en énergie thermique  | Surchauffe                       | EIA                       | EIA   | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Électromagnétique en énergie acoustique | Bruits                           | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transformer                  | Électromagnétique en matière            | Corrosion                        | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transporter/accumuler        | Matière                                 | Encrassement                     | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
| Convertisseur électromagnétique | Transformer                  | Mécanique en électrique                 | Conversion en énergie électrique | U                         | U     | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en thermique                  | Frottement                       | EIA                       | EIA   | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en magnétique                 | Perturbations électromagnétiques | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 1 | 3     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en acoustique                 | Bruit                            | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en matière                    | Corrosion                        | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transporter/accumuler        | Matière                                 | Encrassement                     | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
| Convertisseur piézoélectrique   | Transformer                  | Mécanique en électrique                 | Conversion en énergie électrique | U                         | U     | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en thermique                  | Frottements                      | EIA                       | EIA   | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en acoustique                 | Bruit                            | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transformer                  | Mécanique en matière                    | Corrosion                        | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
|                                 | Transporter/accumuler        | Matière                                 | Encrassement                     | EIA                       | EIA   | 1 | 0 | 1        | 0 | 2     |
| Poids                           | -                            | -                                       | -                                | -                         | -     | 1 | 1 | 1        | 1 | 4     |

Tableau III. 9 : Identification et caractérisation des flux et effets fonctionnels et antagonistes pour les convertisseurs

De la même manière, nous effectuons une analyse des flux et effets fonctionnels et antagonistes pour les transmetteurs. Pour cette décomposition, détaillée dans le Tableau III. 10, nous avons étudié les convertisseurs de tension classiques listés dans le Tableau III. 6.

A travers cette étude, nous constatons que le redresseur sans seuil présente plus d'effets antagonistes que le pont de diodes. En ce qui concerne les convertisseurs de tension DC/DC, les convertisseurs à découpage a plus d'effets négatifs.

Dans notre cas, nous nous orientons donc vers un pont de diodes pour redresser le signal en sortie du convertisseur d'énergie, lorsque cela est nécessaire (pour la récupération d'énergie mécanique des vibrations). Ensuite, nous choisissons un convertisseur DC/DC à capacités commutées pour adapter signal au reste du circuit.

| Transmetteur<br>Disponibilité | Verbe<br>d'action<br>fonctionnelle | Flux                                    | Effet  | Interactions antagonistes |       |   |     |          |   | $\mu$ |
|-------------------------------|------------------------------------|---|--|---------------------------|-------|---|-----|----------|---|-------|
|                               |                                    |   |  | Qualification             |       | D | I   |          |   |       |
|                               |                                    |   |  | Flux                      | Effet |   | M   | $\Delta$ | F |       |
| Pont de diodes                | Adapter                            | Énergie électrique                      | Adaptation d'un signal sinusoïdal en signal continu    | U                         | U     | 1 | 1   | 1        | 1 | 4     |
|                               | Diminuer                           | Énergie électrique                      | Diminution de la tension (tension de seuil des diodes) | EIA                       | EIA   | 1 | 1   | 1        | 1 | 4     |
|                               | Transformer                        | Énergie électrique en énergie thermique | Effet Joule  | EIA                       | EIA   | 1 | 0,5 | 1        | 1 | 3,5   |
| Redresseur sans seuil         | Adapter                            | Énergie électrique                      | Adaptation d'un signal sinusoïdal en signal continu    | U                         | U     | 1 | 1   | 1        | 1 | 4     |
|                               | Diminuer                           | Énergie électrique                      | Pertes électriques                                     | EIA                       | EIA   | 1 | 1   | 1        | 1 | 4     |
|                               | Transformer                        | Énergie électrique en énergie thermique | Effet Joule  | EIA                       | EIA   | 1 | 0,5 | 1        | 1 | 3,5   |
|                               | Changer                            | Énergie électrique                      | Consommation d'énergie                                 | EIA                       | EIA   | 1 | 0,5 | 1        | 1 | 3,5   |
| Poids                         | -                                  | -                                       | -  | -                         | -     | 1 | 1   | 1        | 1 | 4     |

| Transmetteur<br>Disponibilité             | Verbe<br>d'action<br>fonctionnelle | Flux   | Effet                               | Interactions antagonistes |       |   |              |          |   | $\mu$ |
|---|------------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------|-------|---|--------------|----------|---|-------|
|   |                                    |  |                                     | Qualification             |       | D | I            |          |   |       |
|   |                                    |  |                                     | Flux                      | Effet |   | M            | $\Delta$ | F |       |
| Convertisseur à<br>découpage              | Adapter                            | Énergie<br>électrique                            | Adaptation du<br>signal à la charge | U                         | U     | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Pertes de<br>commutation            | EIA                       | EIA   | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Chute de tension                    | EIA                       | EIA   | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Pertes capacitives                  | EIA                       | EIA   | 1 | 0,<br>5<br>1 | 1        | 1 | 3,5   |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Pertes inductives                   | EIA                       | EIA   | 1 | 0,<br>5      | 1        | 1 | 3,5   |
|   | Transformer                        | Énergie<br>électrique en<br>énergie<br>thermique | Effet Joule                         | EIA                       | EIA   | 1 | 0,<br>5      | 1        | 1 | 3,5   |
| Convertisseur à<br>capacités<br>commutées | Adapter                            | Énergie<br>électrique                            | Adaptation du<br>signal à la charge | U                         | U     | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Chute de tension                    | EIA                       | EIA   | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Pertes de<br>commutation            | EIA                       | EIA   | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |
|   | Transformer                        | Énergie<br>électrique en<br>énergie<br>thermique | Effet Joule                         | EIA                       | EIA   | 1 | 0,<br>5      | 1        | 1 | 3,5   |
|   | Diminuer                           | Énergie<br>électrique                            | Pertes capacitives                  | EIA                       | EIA   | 1 | 0,<br>5      | 1        | 1 | 3,5   |
| Poids                                     | -                                  | -  | -                                   | -                         | -     | 1 | 1            | 1        | 1 | 4     |

**Tableau III. 10 : Identification et caractérisation des flux et effets fonctionnels et antagonistes pour les transmetteurs (AC/DC et DC/DC)**

Cette étape aide donc le concepteur à diminuer le nombre de solutions parmi les solutions envisageables. Dans un premier temps, nous avons modélisé chaque entité du système par des rendements issus de la littérature. Ainsi, en fonction de l'énergie disponible en entrée, nous pouvons évaluer l'énergie en sortie du système. Cette simple évaluation donne une première hiérarchisation des différentes architectures. Les architectures retenues sont représentées sur la Figure III. 18.

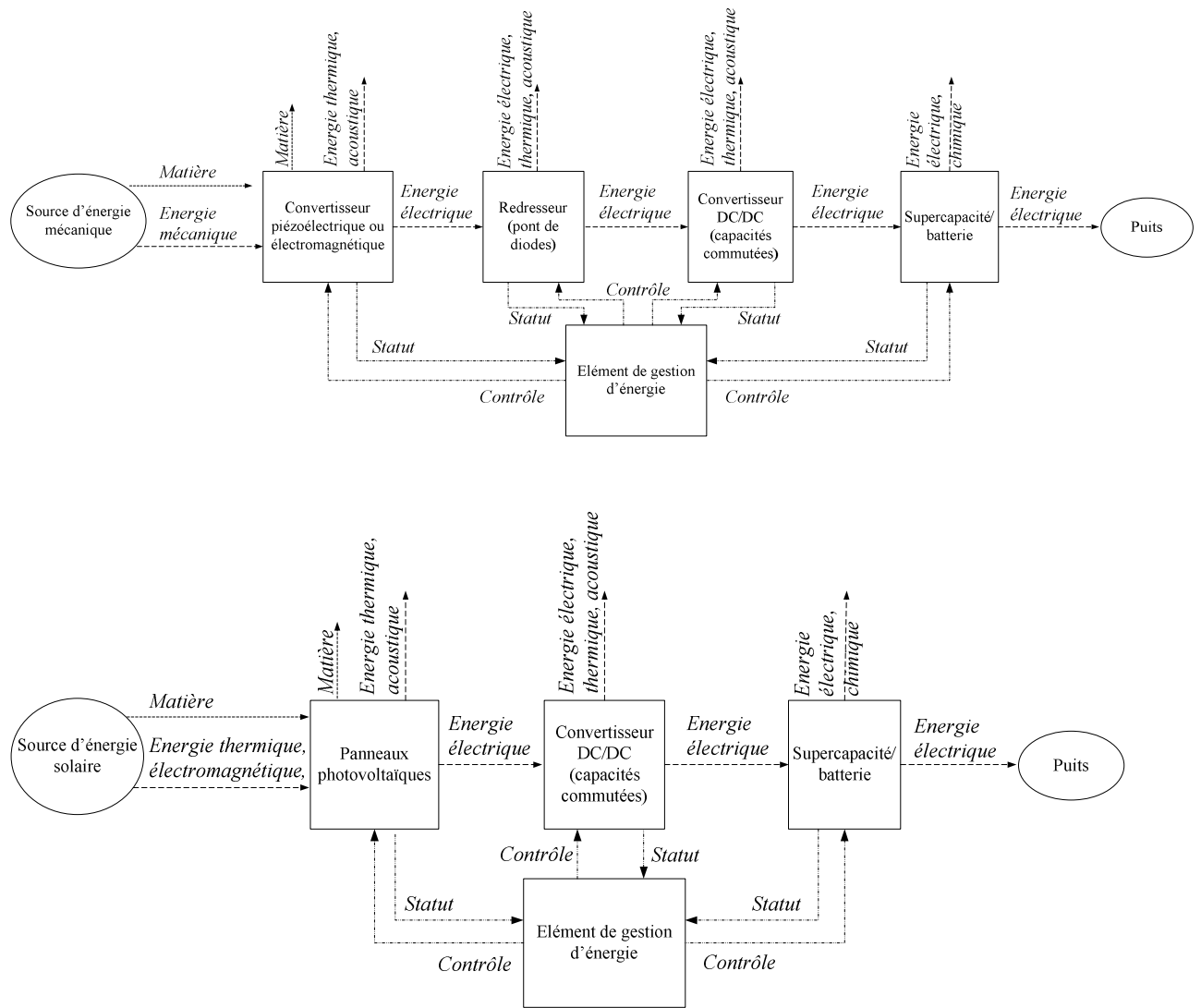


Figure III. 18 : Architectures retenues pour les différentes sources

### 3.5. CONCLUSIONS

Les premières étapes de notre approche visent à diminuer le nombre d'alternatives possibles pour satisfaire au mieux les spécifications d'une application donnée, notamment en termes d'autonomie et d'utilisation de sources d'énergie ambiantes (Figure III. 19). En nous appuyant sur des outils d'analyse fonctionnelle, nous prenons en compte le microsystème dans son environnement. Nous pouvons ainsi identifier les sources d'énergie potentielles pour alimenter le microsystème considéré et mettre en évidence les flux et effets induits pour chaque source.

Ensuite, ces sources sont classées à l'aide des critères de qualification que nous avons définis. Cette classification vise à réduire le nombre de sources susceptibles d'être utilisées. A partir de là, le concepteur analyse les architectures possibles du récupérateur d'énergie, en utilisant les données de la littérature ou des résultats expérimentaux. Il peut ainsi estimer

simplement l'énergie récupérée pour chaque cas étudié et en éliminer certains.

En d'autres termes, ces étapes préliminaires visent à diminuer le nombre de sources d'énergie candidates pour alimenter le microsystème. Notre outil ne dispose pas de système expert, la décision revient au concepteur, à partir de ses connaissances personnelles, de celles d'une tierce personne ou au travers des informations renseignées dans la base de données pour chaque composant.

Nous avons également développé un outil de simulation pour affiner ces différentes alternatives et évaluer plus précisément l'énergie récupérée et l'impact sur l'autonomie globale du microsystème. Cet outil est présenté dans la section suivante.

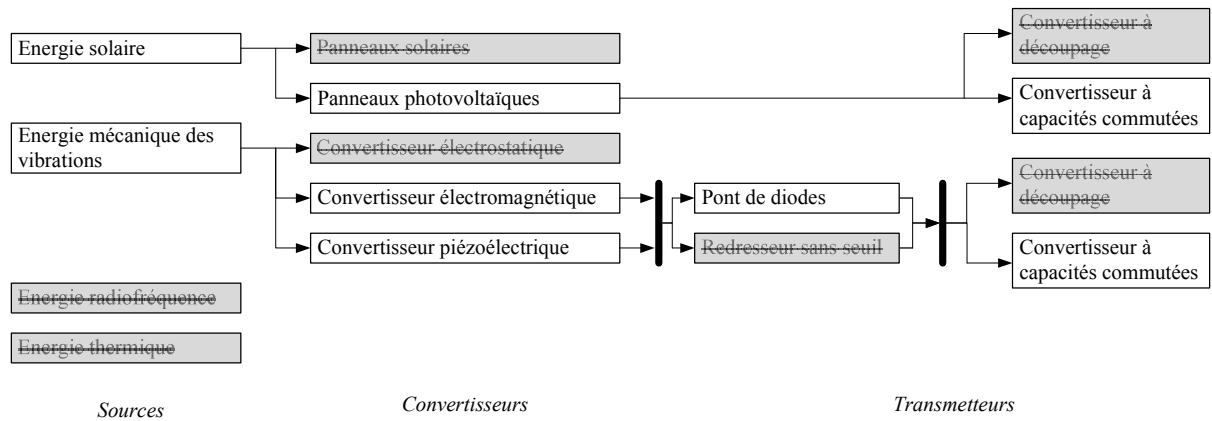


Figure III. 19 : Arbre des choix

---

## Chapitre IV. Notre développement : étape de pré-dimensionnement

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 4.1.     | Pré-dimensionnement.....                                     | 94  |
| 4.1.1.   | Introduction .....   | 94  |
| 4.1.2.   | Notre approche : modélisation système.....                   | 95  |
| 4.1.2.1. | Présentation globale de l'outil de simulation.....           | 95  |
| 4.1.2.2. | Présentation des différentes entités .....                   | 96  |
| 4.1.2.3. | Recherche d'une solution satisfaisante .....                 | 102 |
| 4.1.3.   | Outil développé.....   | 103 |
| 4.2.     | Cas de validation : résultats de simulation.....             | 106 |
| 4.2.1.   | Récupération d'énergie mécanique des vibrations.....         | 106 |
| 4.2.1.1. | Conversion électromagnétique .....                           | 107 |
| 4.2.1.2. | Conversion piézoélectrique .....                             | 108 |
| 4.2.2.   | Récupération d'énergie solaire.....                          | 111 |
| 4.2.3.   | Conclusion sur l'architecture du récupérateur d'énergie..... | 112 |
| 4.2.4.   | Recherche d'une solution satisfaisante .....                 | 112 |
| 4.2.4.1. | Recherche des composants les plus adaptés.....               | 112 |
| 4.2.4.2. | Recherche des paramètres les plus adaptés .....              | 113 |
| 4.3.     | Conclusions .....  | 115 |



## 4.1. PRÉ-DIMENSIONNEMENT

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé les premières étapes de notre approche d'aide à la conception de microsystemes autonomes. Ainsi, nous avons sélectionné les meilleures sources, parmi celles possibles, et nous avons choisi le principe de conversion associé à chacune.

Il faut à présent choisir la technologie de conversion et obtenir une représentation physique du système de récupération d'énergie. Pour cela, nous avons développé un outil de simulation qui intègre les paramètres des différentes entités et évalue l'énergie récupérée pour estimer l'autonomie du microsysteme. Par ailleurs, l'outil de simulation permet également d'augmenter l'autonomie du microsysteme, en optimisant sa consommation à travers le choix des composants et les paramètres de chacun.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord notre outil de simulation. Puis, nous aborderons une phase d'amélioration de la consommation du microsysteme. Enfin, nous terminerons par l'intégration de nos travaux pour la phase de conception détaillée (Figure IV. 1). Toutes ces étapes seront illustrées à travers notre cas d'application.

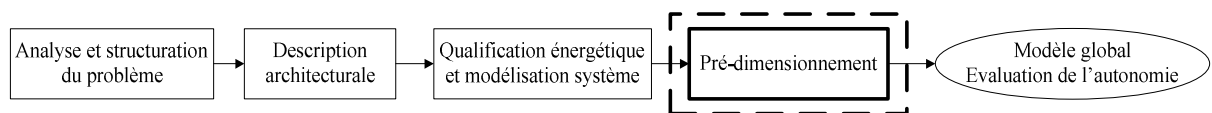


Figure IV. 1 : Modélisation du problème de conception : pré-dimensionnement

### 4.1.1. Introduction

Nous avons implémenté ce modèle sous Matlab/Simulink car ce logiciel est adapté à la simulation de systèmes hétérogènes et intègre de nombreux modèles.

De plus, ce choix nous permet de relier ces travaux avec d'autres précédemment développés au sein d'ESTIA Recherche (outil de modélisation de la consommation d'un nœud au sein d'un réseau de microcapteurs [Terrasson, Briand et al., 2009], simulation d'un accéléromètre capacitif et de son convertisseur sigma-delta [Arriuria, 2008]), ou dans d'autres laboratoires (simulation de récupération d'énergie à l'aide de la librairie SimPower (TIMA)).

Enfin, Matlab/Simulink constitue également une passerelle vers d'autres langages de modélisation tels que SystemC qui permet de modéliser des systèmes matériels mais aussi mixtes et hétérogènes et offre la possibilité de modéliser plusieurs niveaux de comportements avec le même langage de programmation. Il s'agit d'un langage standardisé, conforme au souci de réutilisabilité.

## 4.1.2. Notre approche : modélisation système

### 4.1.2.1. Présentation globale de l'outil de simulation

La Figure IV. 2 présente l'interface de l'outil développé. Chaque bloc est paramétrable en fonction du type d'énergie récupérée, du type de convertisseur utilisé et des éléments de stockage.

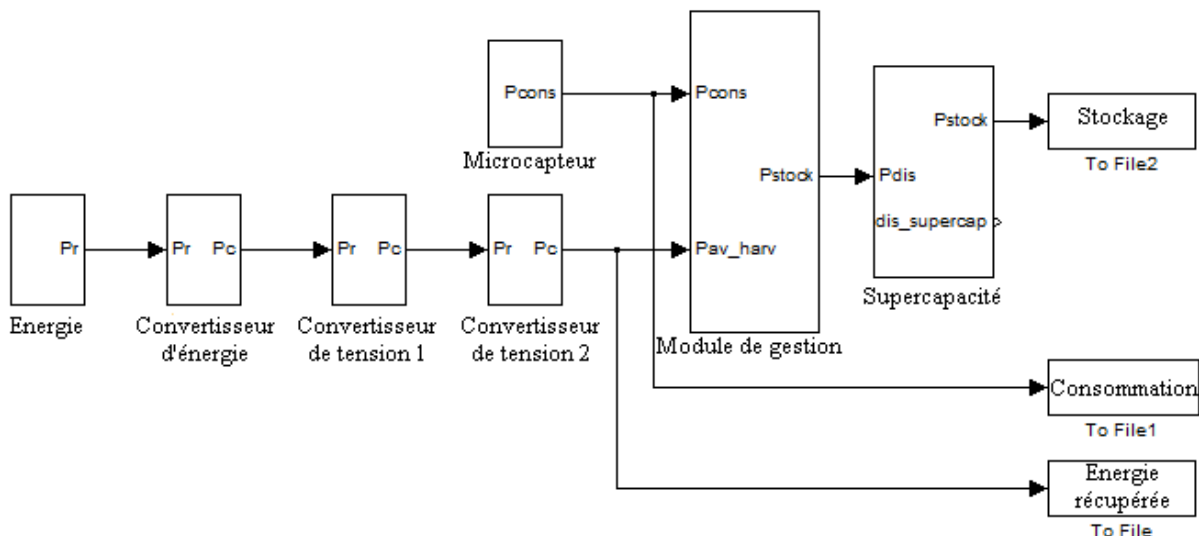


Figure IV. 2: Représentation de l'outil de simulation

Le principe de fonctionnement du modèle est représenté par la Figure IV. 3. La première étape consiste à initialiser les paramètres liés à l'application. Plus précisément, il s'agit des paramètres suivants :

- le débit instantané  $D_{inst}$ ,
- les nombres de bits émis et reçus, respectivement  $N_{bits\_trans}$  et  $N_{bits\_rec}$ ,
- la périodicité des mesures  $T_{cycle}$ ,
- les consommations des différentes entités pendant les phases actives ( $P_{oni}$ ) et les phases de veille ( $P_{offi}$ ),
- les durées d'activité ( $t_{oni}$ ) et de veille ( $t_{offi}$ ) pour chaque entité.

A partir de ces données, nous pouvons évaluer la consommation moyenne du microsystème en activité et en état de veille (IV. 1).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{on\_moyen} = \frac{\sum_i P_{oni} \cdot t_{oni}}{t_{on}} \\ P_{off\_moyen} = \frac{\sum_i P_{offi} \cdot t_{offi}}{t_{off}} \end{array} \right. \quad (IV. 1)$$

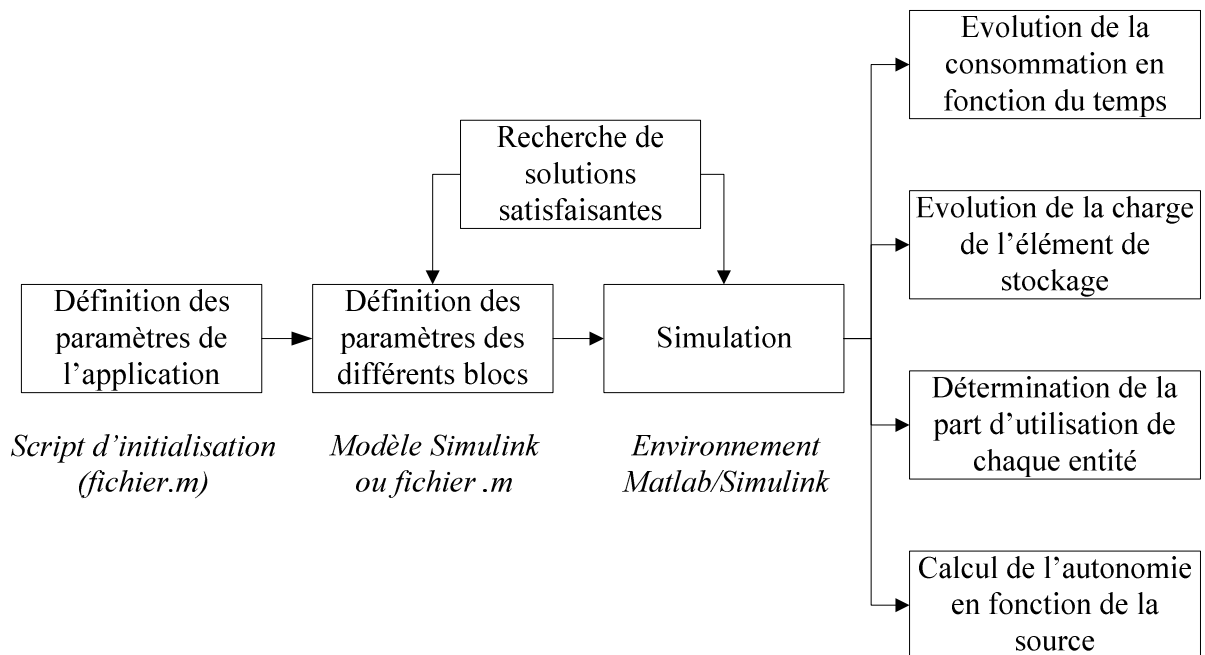


Figure IV. 3 : Principe de fonctionnement de l'outil de simulation

L'objectif de cette étape est de fournir un bilan énergétique du système global de récupération d'énergie et d'évaluer l'autonomie ainsi atteinte, pour les différentes architectures à étudier plus en détails. Nous allons présenter ces différents blocs.

#### 4.1.2.2. Présentation des différentes entités

Comme nous l'avons vu dans les sections précédentes, un microsysteme se décompose en trois catégories principales :

- une unité de production d'énergie, composée des convertisseurs d'énergie (Convertisseur) et de tension (Transmetteur)
- un élément de stockage qui est le plus souvent constitué d'une supercapacité ou d'une batterie rechargeable ou d'une association des deux (Opérateur)
- un module de contrôle et de gestion (Contrôleur).

Les différents modèles associés aux blocs sont détaillés ci-après.

#### 4.1.2.2.1. Génération d'énergie

##### a. Source et interface

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, il existe de nombreuses données concernant les quantités d'énergie fournies par les sources présentes dans l'environnement. Le plus souvent, ces données sont issues d'expérimentations et dépendent donc des conditions dans lesquelles elles ont été réalisées.

En pratique, le concepteur peut soit utiliser des données moyennes présentes dans la littérature, soit mesurer expérimentalement la densité d'énergie de la source considérée, soit l'estimer de façon théorique à partir de modèles existants.

De plus, l'énergie réellement captée de l'environnement dépend de l'interface d'extraction liée aux dimensions du convertisseur d'énergie.

Par conséquent, nous avons modélisé les sources de manière à pouvoir estimer la puissance moyenne qu'elles peuvent fournir, en fonction des conditions environnementales. Ainsi, elles sont représentées par leur densité de puissance,  $D_{source}$  en  $W/m^2$  ou  $W/m^3$  et la taille du dispositif de conversion,  $S_{disp}$  en  $m^2$  ou  $m^3$ , pour estimer la puissance récupérée,  $P_{recup}$ , exprimée en W (IV.2).

$$P_{recup} = S_{disp} \cdot D_{source} \quad (IV.2)$$

L'expression de la densité d'énergie dépend totalement de la nature de la source considérée. Si nous reprenons les principales sources utilisées pour résoudre des problématiques de récupération d'énergie, nous pouvons voir qu'elles diffèrent au niveau du flux émis et du mode de transmission de ce flux. Nous détaillons les paramètres influant sur la densité d'énergie qu'une source peut délivrer et les expressions des densités d'énergie et puissances extraites des sources.

##### Solaire

L'éclairement solaire global  $G$ , exprimé en  $Wh/m^2$  est la somme d'un éclairement direct  $S$  (IV.3) et d'un éclairement diffus  $D$  (IV.4) dont les expressions, issues des travaux de [Boubekri, Chaker et al., 2007], sont données ci-après.

$$S(i, \gamma) = I(\sin(i) \cdot \cos(h) \cdot \cos(a - \gamma) + \cos(i) \cdot \sin(h)) \quad (IV.3)$$

$$D(i) = \left( \frac{1 + \cos(i)}{2} \right) D_0 + \left( \frac{1 - \cos(i)}{2} \right) a * G_0 \quad (IV.4)$$

Les différents paramètres utilisés sont détaillées dans le Tableau IV. 1.

| Grandeur   | Symbole  | Unité             |
|--|----------|-------------------|
| Angle par rapport au sud   | $\gamma$ | radian            |
| Angle par rapport à l'horizontale  | $i$      | radian            |
| Azimut   | $a$      | -                 |
| Hauteur angulaire  | $h$      | radian            |
| Éclairement solaire estimé à partir de la formule de Kasten [Kasten, 1997] | $I$      | Wh/m <sup>2</sup> |
| Rayonnement diffus reçu par un plan horizontal                             | $D_0$    | Wh/m <sup>2</sup> |
| Rayonnement global reçu par un plan horizontal                             | $G_0$    | Wh/m <sup>2</sup> |

Tableau IV. 1 : Paramètres de modélisation de l'éclairement solaire

### Énergie mécanique des vibrations et de la déformation

D'après les travaux de Williams et Yates [Williams et Yates, 1998], la puissance extraite avec un système résonnant est proportionnelle (IV.5) :

- à la masse,
- au carré du maximum de l'accélération du signal d'entrée,
- à l'inverse de la fréquence.

$$P_{out} = \frac{m\xi_e\omega_n\omega^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 Y^2}{\left(2\xi_T\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2} \quad (IV.5)$$

$$\text{avec } \begin{cases} b_m = 2m\xi_m\omega_n \\ b_e = 2m\xi_e\omega_n \end{cases}$$

| Grandeur                                     | Symbole          | Unité            |
|--|------------------|------------------|
| Masse  | $m$              | kg               |
| Accélération maximale                        | $A = \omega^2 Y$ | m/s <sup>2</sup> |
| Déplacement en entrée                        | $Y$              | m                |
| Pulsation de la source de vibration          | $\omega$         | radian           |
| Pulsation naturelle du système de conversion | $\omega_n$       | radian           |
| Coefficient d'amortissement mécanique        | $b_m$            | kg/s             |
| Coefficient d'amortissement électrique       | $b_e$            | kg/s             |

|                                    |                               |   |
|------------------------------------|-------------------------------|---|
| Rapport d'amortissement mécanique  | $\zeta_e$                     | - |
| Rapport d'amortissement électrique | $\zeta_m$                     | - |
| Rapport d'amortissement            | $\zeta_T = \zeta_m + \zeta_e$ | - |

**Tableau IV. 2 : Paramètres de modélisation de la puissance extraite d'une source vibratoire**

La puissance générée est maximale lorsque la pulsation de la source ( $\omega$ ) et celle du système de conversion ( $\omega_n$ ) sont égales. Avec cette hypothèse, (IV.6) est simplifiée :

$$P_{\max} = \frac{m \zeta_e A^2}{4 \omega \zeta_T^2} \quad (\text{IV.6})$$

### Énergie thermique

L'énergie récupérée à partir d'un gradient thermique est représentée par l'équation (IV.7), issue des travaux de Strasser et al. [Strasser, Aigner et al., 2002]. La puissance est proportionnelle au gradient de température et dépend de la nature de l'élément de conversion.

$$P = \frac{m^2 \cdot \alpha^2}{4 \cdot R_g} \cdot (\Delta T_g)^2 \quad (\text{IV.7})$$

| Grandeur                                       | Symbole      | Unité |
|--|--------------|-------|
| Nombre de couples d'éléments thermoélectriques | $m$          | -     |
| Coefficient de Seebeck                         | $\alpha$     | V/K   |
| Gradient de température                        | $\Delta T_g$ | K     |
| Résistance électrique                          | $R_g$        | ohm   |

**Tableau IV. 3 : Paramètres de modélisation d'énergie thermique extraite par un thermogénérateur**

### Énergie des ondes électromagnétiques

L'énergie récupérée à partir des ondes électromagnétiques est donnée par l'équation (IV.8). Elle varie en fonction de la puissance d'émission, de la longueur d'onde et de la distance du récepteur.

$$P = \frac{P_0 \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad (\text{IV.8})$$

| Grandeur                 | Symbole   | Unité |
|--------------------------|-----------|-------|
| Puissance émise          | $P_o$     | W     |
| Distance de transmission | $R$       | m     |
| Longueur d'onde          | $\lambda$ | m     |

Tableau IV. 4 : Paramètres de modélisation de l'énergie reçue

### Énergie d'un fluide en mouvement

Pour un fluide en mouvement, la puissance est proportionnelle à la surface de l'interface de captation ( $S$ ), au cube de la vitesse du fluide ( $v$ ) et à sa nature via le débit massique ( $\rho$ ).

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{IV.9})$$

| Grandeur          | Symbole | Unité             |
|-------------------|---------|-------------------|
| Débit massique    | $\rho$  | kg/m <sup>3</sup> |
| Section           | $S$     | m <sup>2</sup>    |
| Vitesse du fluide | $v$     | m/s               |

Tableau IV. 5 : Paramètres pour la modélisation d'énergie extraite d'un fluide en mouvement

L'estimation de la puissance moyenne est utilisée pour modéliser les sources à partir de signaux en créneaux dont la périodicité et le temps à l'état haut dépendent de la fréquence de la source.

#### b. Convertisseur/Transmetteur

En première approximation, les convertisseurs d'énergie et de tension sont simplement modélisés par le biais de rendements, notés  $\alpha$ , afin de déduire la puissance de sortie,  $P_o$ , en fonction de celle d'entrée,  $P_i$  (IV.10).

$$P_o = \alpha \cdot P_i \quad (\text{IV.10})$$

Les rendements sont stockés dans la base de données de l'outil développé et proviennent de la littérature. Ainsi, des rendements minimal et maximal sont associés à chaque type de convertisseur identifié.

#### 4.1.2.2.2. Stockage

La majorité des microsystèmes autonomes intègre une supercapacité et une batterie afin d'assurer un fonctionnement correct et de pallier le caractère imprédictible et variable et des sources d'énergie ambiantes.

Dans notre modélisation, nous avons choisi de coupler une supercapacité et une batterie non rechargeable pour les raisons suivantes.

Tout d'abord, une capacité se charge sans protocole spécifique. Dans notre cas, elle se chargera au rythme de la source. Les batteries rechargeables ont de meilleures performances mais nécessitent de suivre un profil de charge spécifique. De plus, ce profil de charge est différent pour chaque batterie et impose généralement une charge avec un fort courant ou avec un courant constant pour les batteries Lithium-ion, par exemple.

Ce type de charge est impossible à réaliser à partir de vibrations, à moins d'utiliser un circuit de charge complexe. Toutefois, de tels circuits entraînent une dissipation de puissance et donc une diminution du rendement global du système.

La seconde raison est la courte durée de vie des batteries qui doivent être changées au bout d'un ou deux ans de fonctionnement. Les capacités offrent, au contraire, une durée de vie théoriquement infinie.

Il est vrai que les batteries ont une plus grande densité d'énergie que les capacités mais les nouvelles supercapacités ont progressé à ce niveau et atteignent désormais des valeurs appropriés aux applications des microsystèmes [Raible et Michel, 1998]. Les batteries rechargeables Lithium-ion ont une densité d'énergie maximale de  $1000 \text{ J/cm}^3$ . En pratique, pour les batteries commercialisées, les valeurs varient entre  $100$  et  $700 \text{ J/cm}^3$ . Pour les supercapacités, les densités d'énergie se situent entre  $10$  et  $90 \text{ J/cm}^3$ , soit dix fois moins que les batteries rechargeables. Toutefois, même  $5 \text{ J}$  suffiraient à utiliser un nœud de  $100 \mu\text{W}$  durant dix heures, sans fournir d'énergie en entrée [Roundy, 2003].

Pour modéliser le fonctionnement de la supercapacité, nous considérons une charge à tension constante et une décharge à courant constant. La tension de charge,  $U(t)$ , est déterminée par la sortie du récupérateur d'énergie tandis que le courant de décharge  $I_{cons}$  est fixé par le microsystème.

$$U(t) = U_{final} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{IV.11})$$

$$U(t) = U_0 - I_{cons} \cdot \frac{t}{C} \quad (\text{IV.12})$$

$U_0$  et  $U_{final}$  représentent respectivement les tensions initiale et finale de l'élément de stockage. Cette tension ne peut excéder la tension maximale  $U_{max}$  et ne doit pas décroître en dessous d'un seuil minimal pour assurer le fonctionnement de l'électronique de traitement.

$\tau$  est la constante de charge qui dépend de l'impédance de l'élément de charge. Enfin,  $C$  est la capacité de cet élément.



Il convient de noter que nous considérons des modèles idéaux qui ne prennent pas en compte les effets thermiques et de vieillissement car l'objectif est d'obtenir une estimation rapide de l'énergie récupérée et de l'autonomie du système. Des modèles plus complexes seront considérés lors de la phase de conception détaillée.

#### 4.1.2.2.3. Gestion d'énergie

Le module de gestion d'énergie dirige le flux d'énergie et choisit si le capteur est directement alimenté par la source d'énergie ambiante, par la supercapacité ou par la batterie. Pour cela, la puissance récupérée  $P_{recup}$  est comparée avec la puissance consommée par le microsysteme  $P_{conso}$ . Nous avons donc implémenté les cas suivants :

- si  $P_{recup} > P_{conso}$ , le microsysteme est alimenté par la source d'énergie directement et l'excédent recharge la supercapacité tant que le seuil maximal n'est pas atteint.
- si  $P_{recup} = P_{conso}$ , le microsysteme est alimenté par la source directement
- si  $P_{recup} < P_{conso}$ , le microsysteme est alimenté par la supercapacité, jusqu'à son seuil de tension minimal, puis par la batterie.

#### 4.1.2.3. Recherche d'une solution satisfaisante

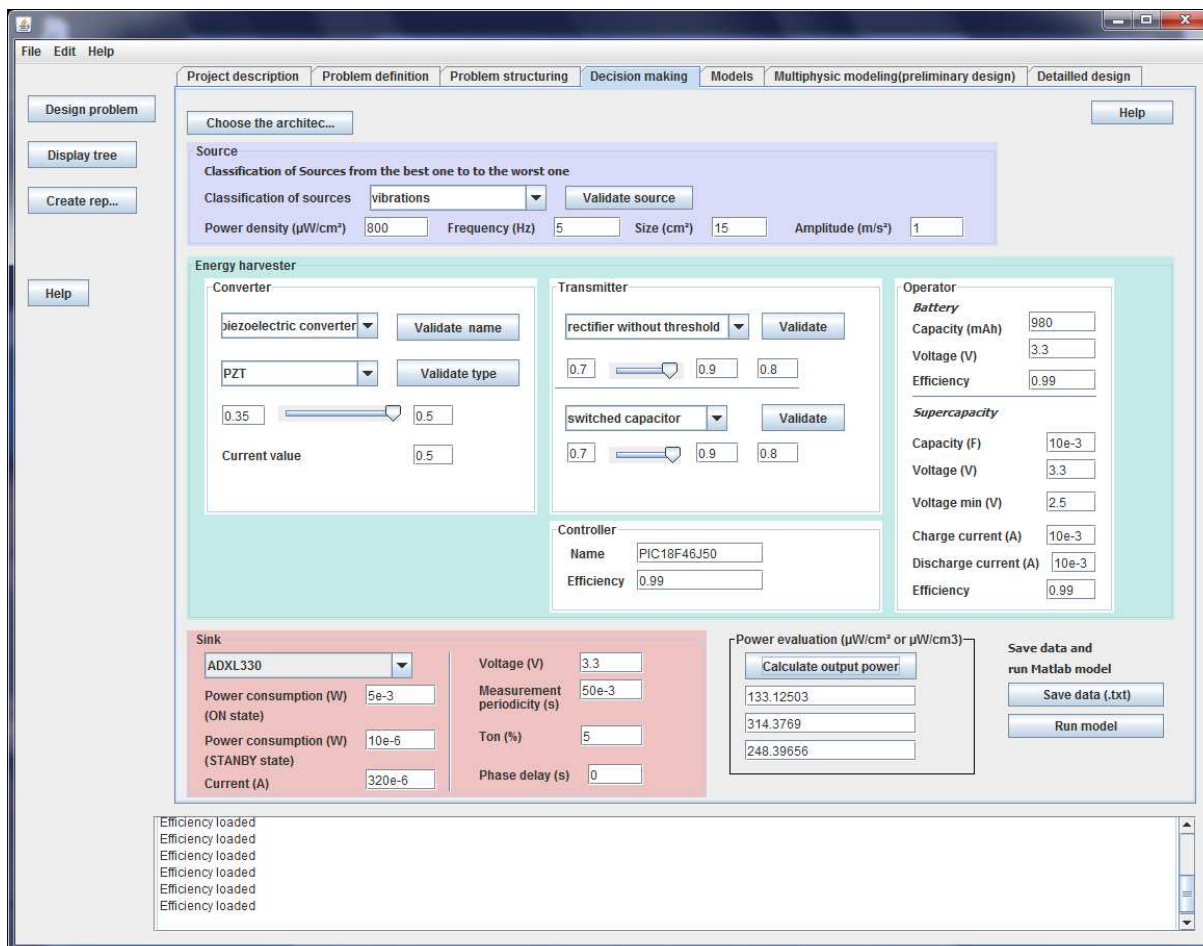
Lorsque la structure du récupérateur d'énergie est fixée et que tous les éléments sont choisis, il est possible d'optimiser la consommation du microsysteme en comparant la consommation globale pour différents composants et en évaluant l'influence de paramètres de fonctionnement qui agissent directement sur la consommation du microsysteme. Pour cela, nous envisageons deux types d'optimisation :

- Optimisation de l'architecture (optimisation matérielle) pour choisir le composant le plus adapté aux contraintes de l'application. A partir des bases de données de composants, le concepteur a la possibilité d'en étudier différents qui répondent aux besoins de l'application. L'objectif principal est de trouver le composant le plus adapté en termes de fonctionnalités et de consommation.
- Optimisation des paramètres (optimisation logicielle) pour adapter au mieux le fonctionnement des éléments du microsysteme. Les paramètres principaux sont : le temps de mesure du capteur, la fréquence du microcontrôleur et le fonctionnement du module de transmission de données, au travers des protocoles de communication. Le concepteur peut ainsi comparer différentes configurations et améliorer l'autonomie du microsysteme.

Cette phase vise à améliorer les performances du microsysteme en termes de consommation afin de maximiser l'autonomie du dispositif considéré.

### 4.1.3. Outil développé

Cette étape de pré-dimensionnement est supportée par la modélisation du système sous Matlab. Tous les paramètres de ce modèle proviennent de l'outil que nous avons développé en Java (Tableau IV. 4 et Figure IV. 5).



```

1 %+-----+
2 %|           Project description           |
3 %+-----+
4 clear all
5 % Source_name: vibrations
6
7 % Power density (µW/cm²)
8
9 density = 418;
10
11 % Size (cm²)
12
13 size = 1;
14
15 % Frequency (Hz);
16
17 frequency = 1/317;
18
19 % Period (T);
20

```

Figure IV. 4 : Définition des paramètres et évaluation de l'énergie

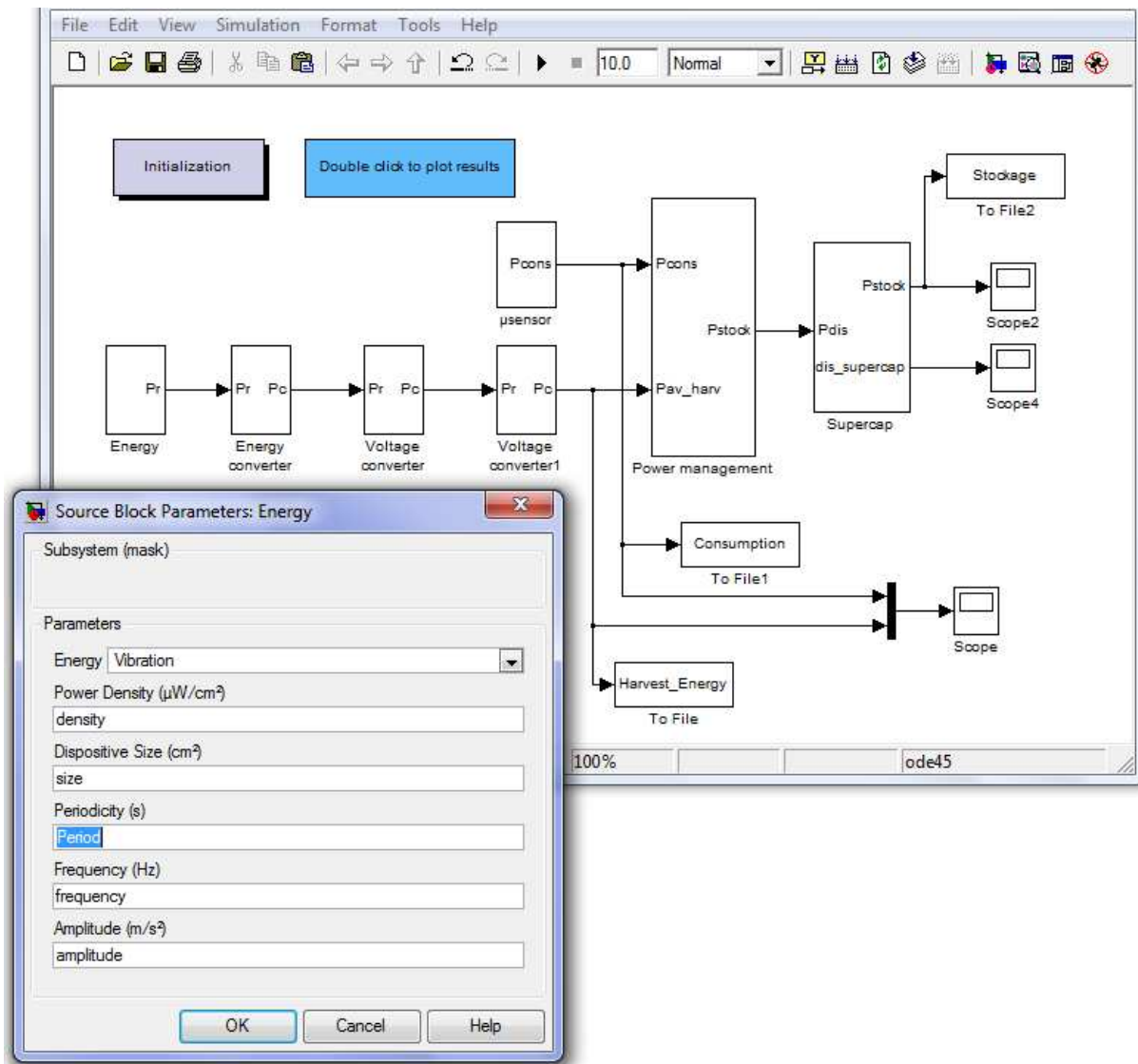


Figure IV. 5 : Paramètre des blocs du microsystème

La Figure IV. 6 récapitule les méthodes et outils utilisés dans la phase de pré-dimensionnement.

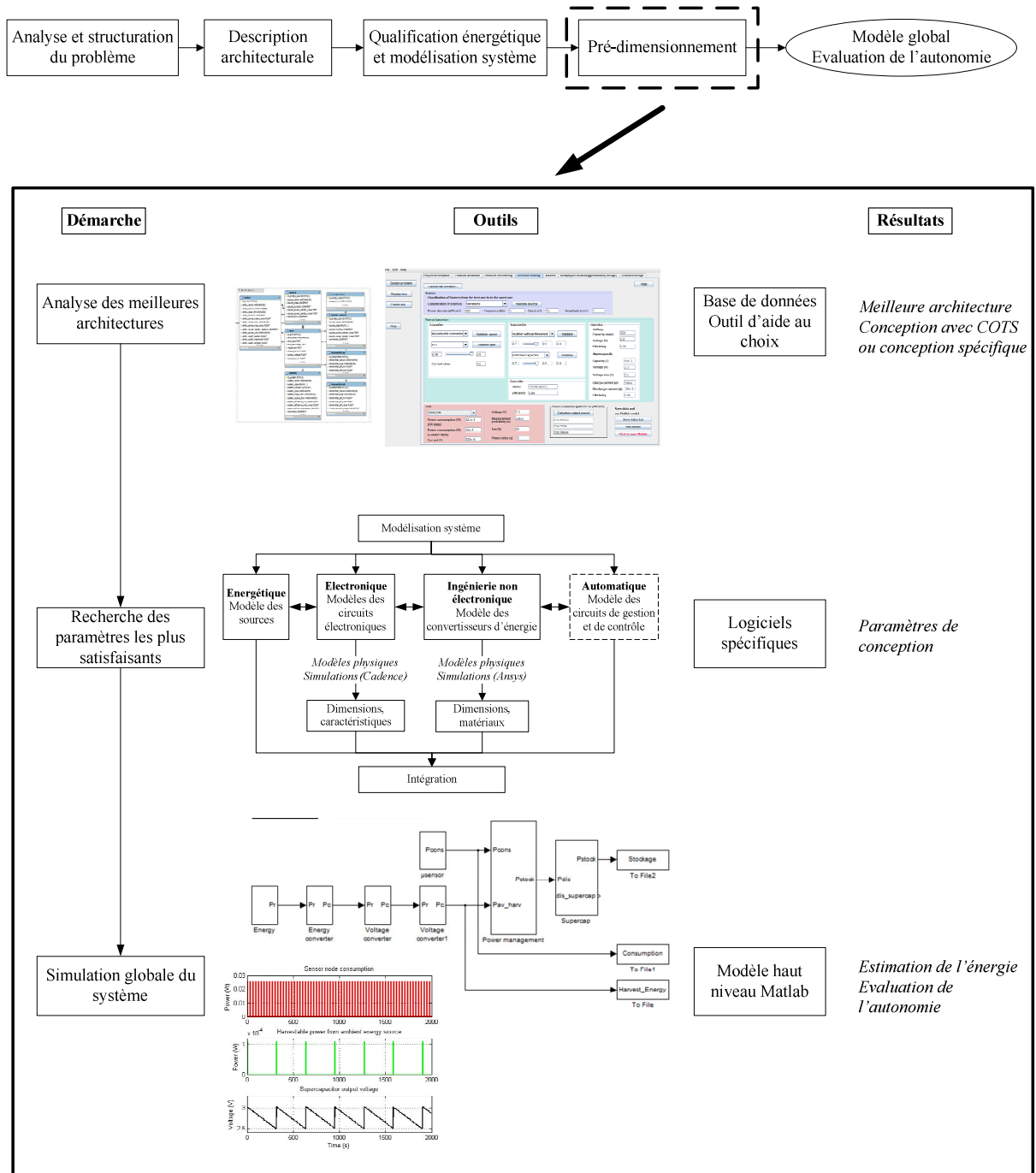


Figure IV. 6 : Décomposition de la phase de pré-dimensionnement

## 4.2. CAS DE VALIDATION : RÉSULTATS DE SIMULATION

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que les sources les plus adaptées à notre application étaient le rayonnement solaire et l'énergie mécanique issue des vibrations et de la déformation.

Nous allons maintenant analyser plus précisément les architectures retenues pour le récupérateur d'énergie, à partir de notre outil de simulation et nous les comparons avec une solution ne contenant qu'une batterie non rechargeable.

Les caractéristiques des éléments de microsystème, présentés au chapitre II induisent un courant moyen de  $12,32 \mu\text{A}$ . En considérant une batterie de  $1200 \text{ mAh}$ , l'autonomie est de 5 ans et demi environ.

### 4.2.1. Récupération d'énergie mécanique des vibrations

A partir des résultats de l'analyse précédente, nous avons retenu les principes de conversion électromagnétique et piézoélectrique. Pour l'ensemble des figures, le niveau de charge de la batterie n'est pas représenté sur le graphe.

Dans notre exemple, la source vibratoire est caractérisée par une fréquence de  $6,28 \text{ Hz}$  et une amplitude maximale de  $1,24 \text{ m/s}^2$ , ce qui donne une quantité d'énergie récupérée voisine de  $7,18 \text{ mW}$ . La source est donc représentée par un signal en créneaux représentant la puissance moyenne générée (Figure IV. 7).

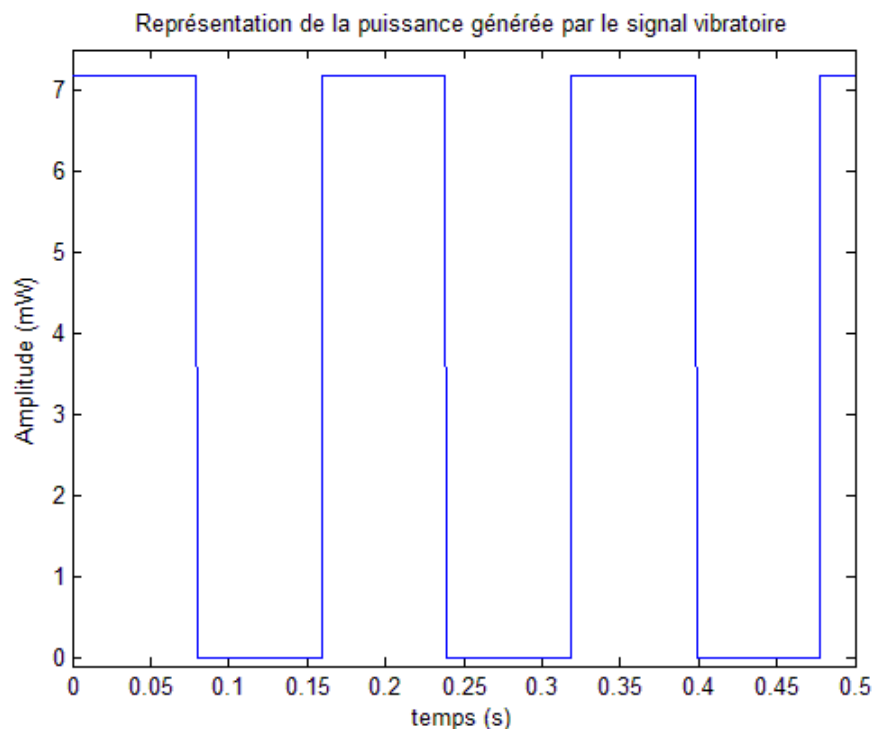


Figure IV. 7 : Représentation du signal vibratoire

### 4.2.1.1. Conversion électromagnétique

Nous constatons, sur la Figure IV. 8, que la quantité d'énergie récupérée (en vert) par le récupérateur d'énergie est insuffisante pour alimenter seule le capteur. En effet, l'utilisation de la batterie est nécessaire entre deux périodes de la source, lorsque la supercapacité atteint son seuil de charge minimal. Toutefois, la source permet d'augmenter l'autonomie du microsystème. En effet, cette dernière est estimée à 35 ans. Avec la batterie seule, cette autonomie atteint 5 ans et demi. Par ailleurs, l'énergie de la source est insuffisante pour charger totalement la supercapacité, au cours du cycle de fonctionnement du microsystème.

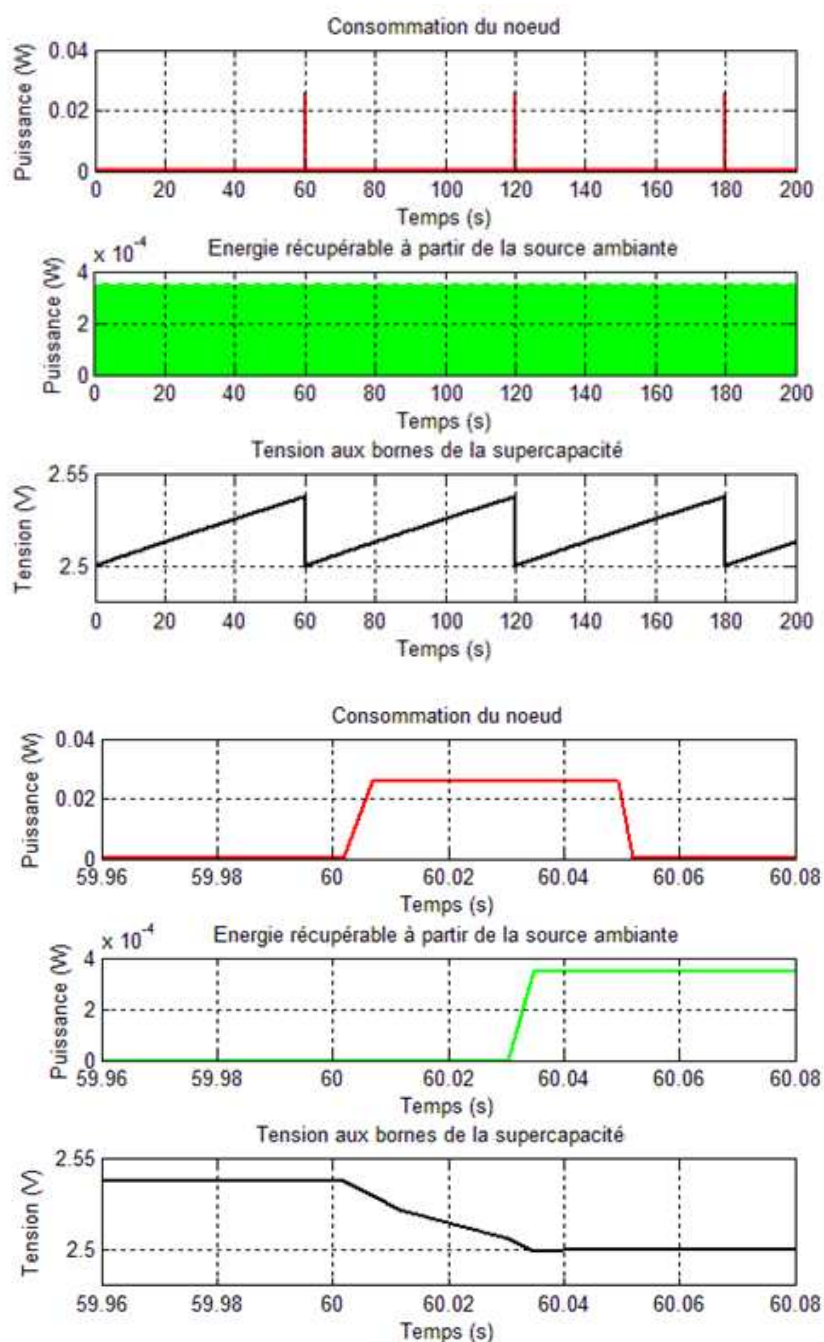
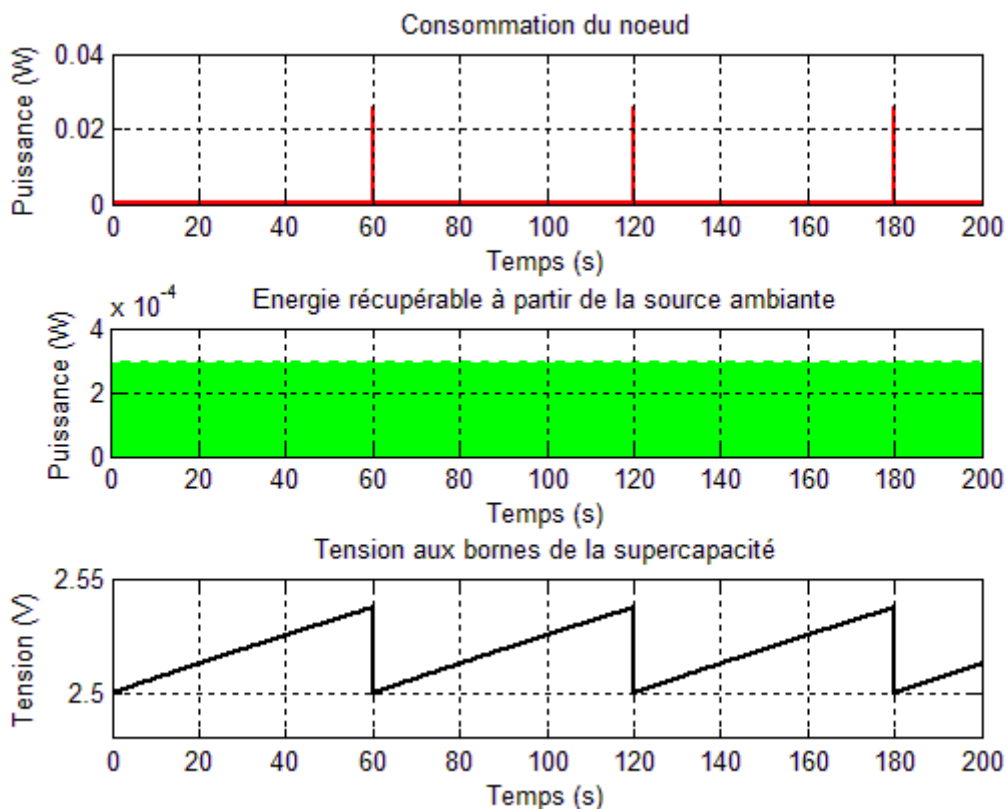


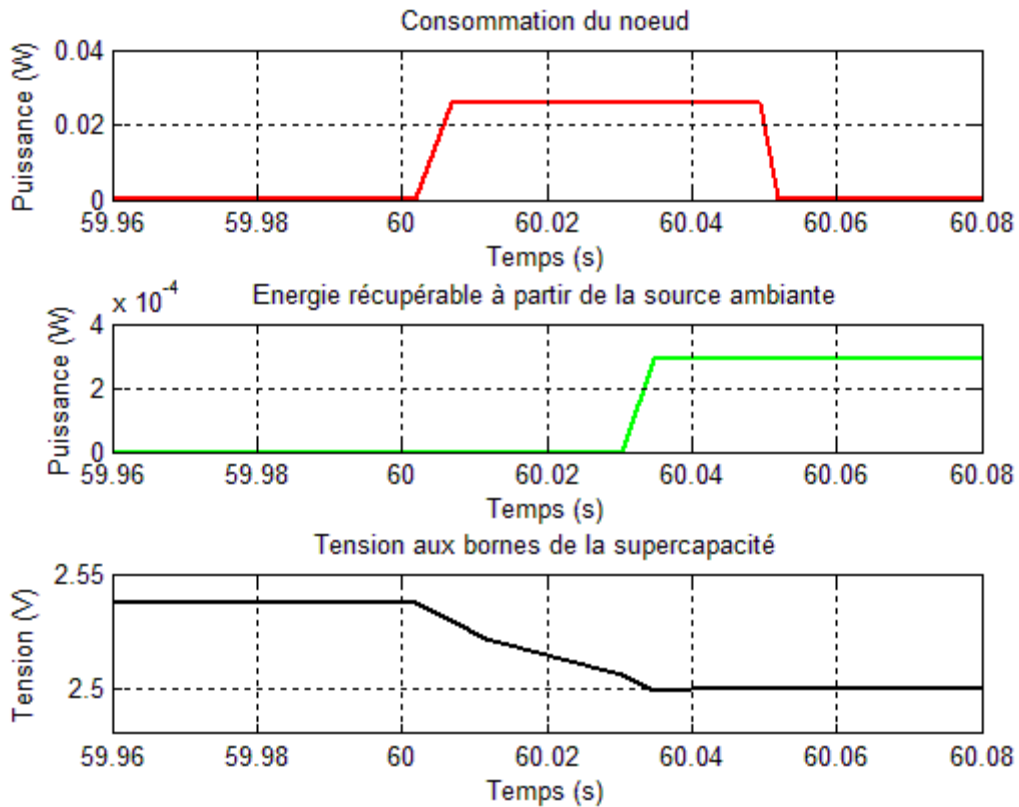
Figure IV. 8 : Profil énergétique pour la conversion électromagnétique

#### 4.2.1.2. Conversion piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont configurables de diverses manières et possèdent des propriétés différentes en fonction de leur polarisation et de la direction de l'effort qui leur est appliqué. Il existe à ce jour de nombreux matériaux. Les plus courants, dans le cadre de la récupération d'énergie, sont les céramiques PZT (Titano-Zirconate de Plomb). Bien que ce matériau soit largement utilisé en tant de convertisseur d'énergie, sa fragilité entraîne certaines limitations au niveau de la contrainte qu'il peut, sans risque, absorber sans être endommagé. Pour éliminer cet inconvénient et améliorer l'efficacité des matériaux piézoélectriques, des chercheurs en ont développé et testé d'autres, plus flexibles. Parmi ces derniers, le plus utilisé est le PVDF (polyfluorure de vinylidène). Il s'agit d'un polymère piézoélectrique beaucoup plus souple que le PZT mais dont les propriétés sont inférieures au PZT. Le PVDF est cependant intéressant pour des applications soumises à une forte résistance à la tension et une raideur faible. Nous nous sommes restreints à ces deux types de matériaux pour notre cas de validation.

Nous constatons, sur la Figure IV. 9, que la quantité d'énergie récupérée par le récupérateur d'énergie formé de PVDF est suffisante pour alimenter le capteur en état de veille. Cependant, l'énergie récupérée n'est pas suffisante pour alimenter le capteur lors de sa phase active.





**Figure IV. 9 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie piézoélectrique (PVDF)**

En revanche, nous constatons, sur la Figure IV. 10, que la quantité d'énergie récupérée (en vert) avec un récupérateur à base de PZT est suffisante pour alimenter périodiquement le capteur. L'autonomie est alors théoriquement infinie. En pratique, elle sera limitée par la durée de vie des composants utilisés.



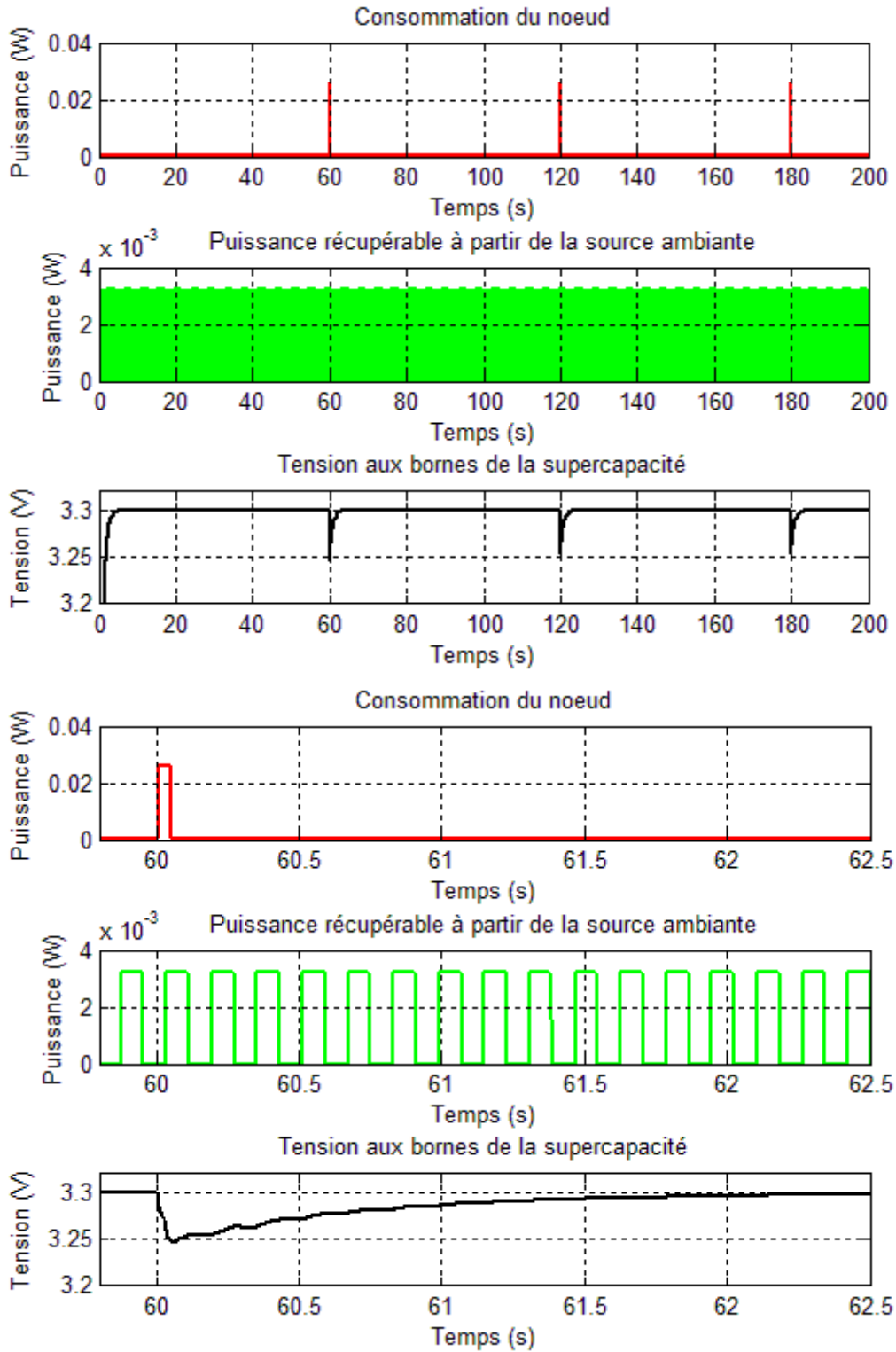


Figure IV. 10 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie piézoélectrique (PZT)

#### 4.2.2. Récupération d'énergie solaire

D'après notre étude précédente, la conversion d'énergie solaire la plus efficace se fait à l'aide de panneaux photovoltaïques. Il en existe différents types, avec des rendements mais aussi des coûts différents. Parmi eux, nous distinguons :

- les cellules multi-jonction,
- le silicium monocristallin,
- le silicium polycristallin,
- les cellules en couche mince,
- le silicium amorphe en couche mince.

Pour modéliser la source d'énergie solaire, nous nous basons sur un ensoleillement moyen de 5 heures, afin de prendre en compte les variations au cours des saisons.

Les profils énergétiques obtenus pour ces matériaux sont similaires. Seule la quantité d'énergie récupérée de l'environnement varie à cause des rendements associés à ces matériaux. La Figure IV. 11 illustre la tension aux bornes de la supercapacité en fonction de la quantité d'énergie récupérée et de la consommation du microsystème, pour un panneau en silicium monocristallin. Nous voyons que la quantité d'énergie récupérée est toujours suffisante pour alimenter le capteur durant la journée. En revanche, l'absence de rayonnement solaire la nuit pose problème et impose l'utilisation de la batterie dont l'autonomie sera de 7 ans environ.

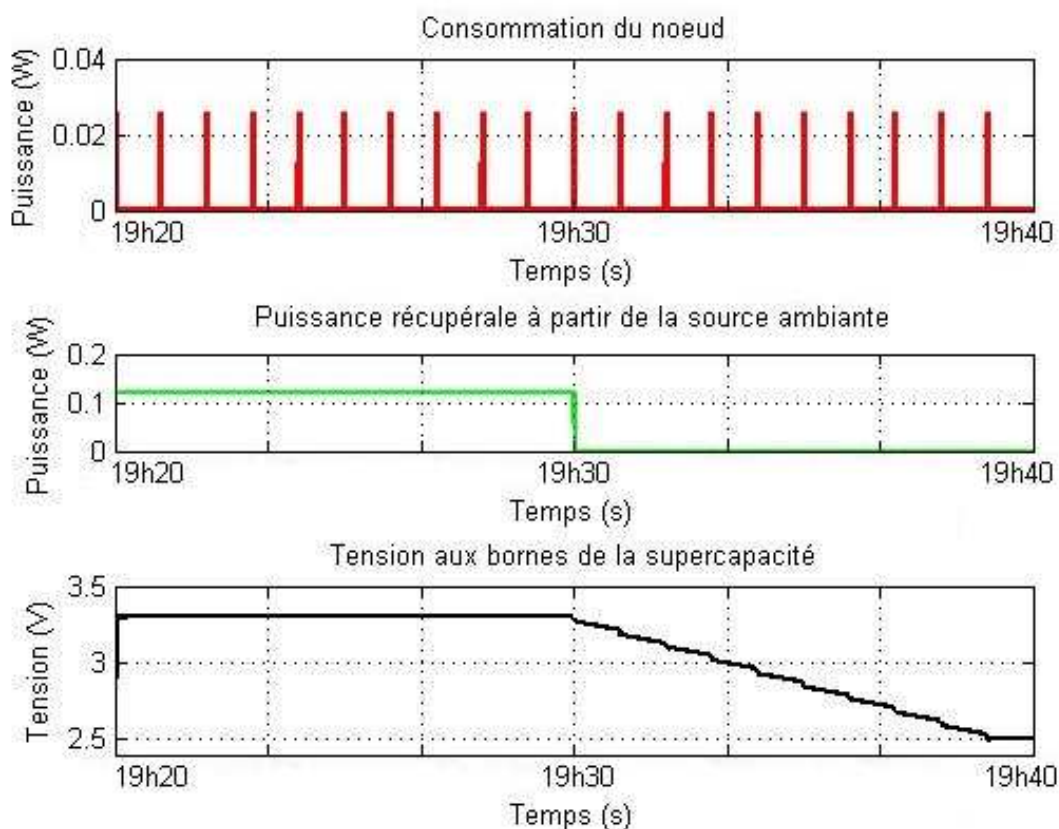


Figure IV. 11 : Profil énergétique pour la conversion d'énergie solaire (silicium monocristallin)

### 4.2.3. Conclusion sur l'architecture du récupérateur d'énergie

Dans cette partie, nous avons étudié les architectures suivantes :

- récupérateur d'énergie mécanique basé sur la conversion électromagnétique,
- récupérateur d'énergie mécanique basé sur la conversion piézoélectrique (PZT et PVDF),
- récupérateur d'énergie solaire à l'aide de panneaux photovoltaïques.

Les résultats permettent d'écarter la conversion d'énergie mécanique issue des vibrations à partir de matériaux PVDF et par électromagnétisme. Les autres architectures permettent de satisfaire la contrainte d'autonomie fixée par le cahier des charges. Cependant, l'autonomie sera plus grande en considérant la récupération d'énergie mécanique basée sur la conversion piézoélectrique. Dans la suite, nous détaillerons donc l'architecture du récupérateur d'énergie basé sur le principe de conversion piézoélectrique. Néanmoins, afin d'optimiser l'efficacité du système, une solution consisterait à hybrider les deux sources d'énergie retenues.

Pour la récupération d'énergie mécanique des vibrations, nous utilisons une supercapacité et non une batterie rechargeable car elles ne nécessitent pas de profil de charge particulier.

En revanche, la continuité de la source solaire durant la journée permet d'utiliser une batterie rechargeable.

### 4.2.4. Recherche d'une solution satisfaisante

#### 4.2.4.1. Recherche des composants les plus adaptés

Dans le cadre de l'étude, nous comparons deux transmetteurs différents : le CC1100 et le TR1100, dont les caractéristiques principales sont résumées dans le Tableau IV. 6. Nous constatons alors que l'autonomie globale du microsystème est supérieure avec le transmetteur TR1000. En effet, l'autonomie augmente de plus d'une année si l'on considère la récupération d'énergie mécanique des vibrations. La différence reste moindre pour les deux autres sources d'alimentation considérées : 3 mois et demi environ pour la batterie et 6 mois pour le solaire (Tableau IV. 7).

| Composant | Fonction  | $I_{on}$ (mA) | $I_{off}$ ( $\mu$ A) | $t_{on}$ (ms) |
|-----------|-----------|---------------|----------------------|---------------|
| CC1100    | Émission  | 17            | 0,4                  | 6,6           |
|           | Réception | 15            | 0,4                  | 1             |
| TR1000    | Émission  | 12            | 0,5                  | 6,6           |
|           | Réception | 4,8           | 0,5                  | 1             |

Tableau IV. 6 : Consommation des transmetteurs CC1100 et TR1000

| Composant | $P_{on}$ (mW) | $P_{off}$ ( $\mu$ W) | Autonomie batterie (année) | Autonomie solaire (année) | Autonomie vibration (année) |
|-----------|---------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| CC1100    | 25,88         | 29,04                | 5,5                        | 7                         | 183,83                      |
| TR1000    | 20,55         | 29,70                | 5,8                        | 7,3                       | Théoriquement infinie       |

**Tableau IV. 7 : Comparaison de l'autonomie pour les deux transmetteurs ( $f_{\mu c} = 4$  MHz)**

Cette comparaison est réalisée à la fréquence de 4 MHz. Nous souhaitons maintenant vérifier l'impact de ce paramètre sur le choix du transmetteur et sur l'autonomie du microsystème.

#### 4.2.4.2. Recherche des paramètres les plus adaptés

A partir de l'étude de la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur sur l'autonomie, nous constatons qu'il existe un optimum et ce avec les deux transmetteurs considérés. Comme le montrent la Figure IV. 12 et le Tableau IV. 8, il se situe pour une fréquence de fonctionnement du microcontrôleur de 4 MHz. D'après les résultats, le transmetteur TR1000 induit également une plus grande autonomie que le CC1100. Par conséquent, nous choisissons ce transmetteur et la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur est fixée à 4MHz.

| Transmetteur | Fréquence du microcontrôleur | $P_{on}$ (mW) | $P_{off}$ ( $\mu$ W) | Autonomie batterie (année) | Autonomie solaire (année) | Autonomie vibration (année) |
|--------------|------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| CC1100       | 31 kHz                       | 0,570         | 29,19                | 5.29                       | 6,68                      | 171.5                       |
|              | 4 MHz                        | 25,88         | 29,04                | 5.55                       | 7,04                      | 188,83                      |
|              | 8 MHz                        | 37,55         | 29,04                | 5.34                       | 6.79                      | 126,72                      |
|              | 48 MHz                       | 101,68        | 29,04                | 3,97                       | 5                         | 20,67                       |
| TR1000       | 31 kHz                       | 0,474         | 29,87                | 5,5                        | 6,96                      | infinie                     |
|              | 4 MHz                        | 20,55         | 29,70                | 5,8                        | 7,33                      | infinie                     |
|              | 8 MHz                        | 30,79         | 29,70                | 5,56                       | 7,03                      | infinie                     |
|              | 48 MHz                       | 92,94         | 29,70                | 4,09                       | 5,17                      | 22,62                       |

**Tableau IV. 8 : Évolution de l'autonomie en fonction de la fréquence**

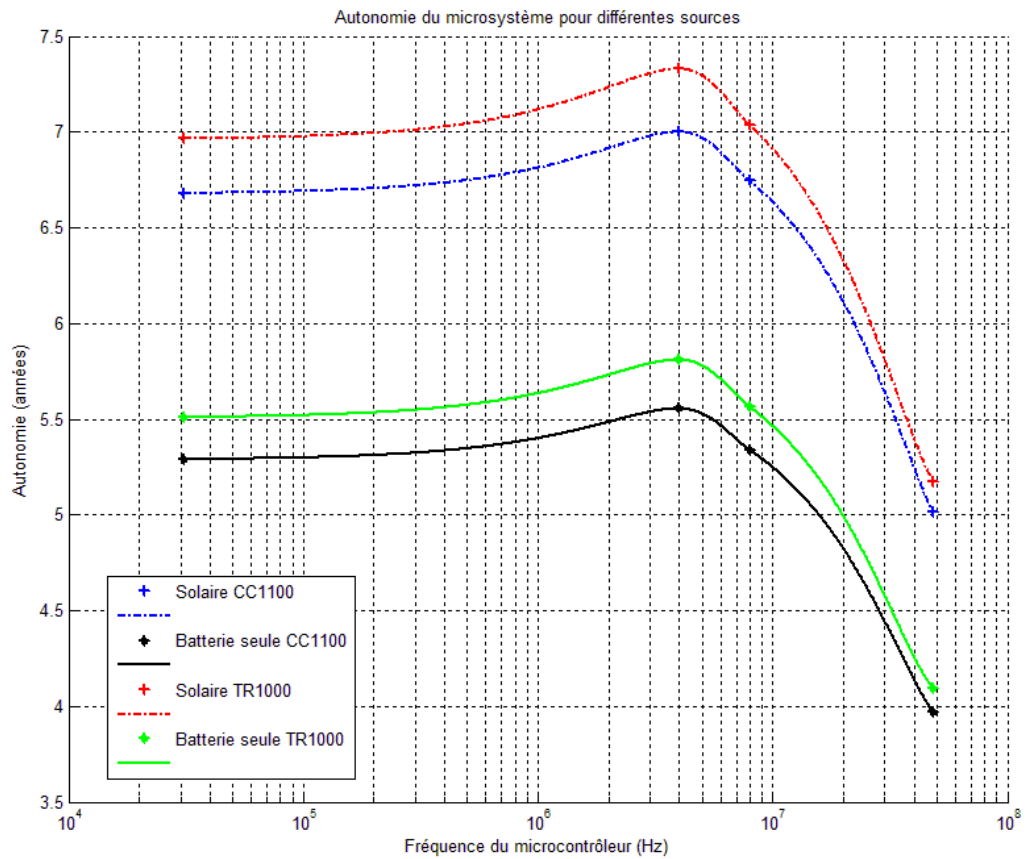


Figure IV. 12 : Évolution de l'autonomie avec la fréquence du microcontrôleur pour les deux transmetteurs

### 4.3. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre outil de simulation dédié à la conception de microsystemes sous contrainte d'autonomie.

Cet outil se base sur une modélisation au niveau système. Chaque élément y est modélisé sous forme de blocs dont les paramètres sont issus du cahier des charges de l'application ou des bases de données existantes.

A partir de cette interface, nous pouvons :

- évaluer la consommation du microsysteme au cours du temps,
- évaluer la quantité d'énergie récupérée dans l'élément de stockage,
- déterminer la part de consommation de chaque élément,
- calculer l'autonomie du microsysteme en fonction de la source étudiée.

Des modèles sont associés à chaque bloc. Ainsi, nous pouvons choisir la meilleure solution et quantifier plus précisément l'autonomie, à partir de l'énergie consommée et de l'énergie récupérée.

De plus, notre outil est utilisé pour optimiser la consommation du microsysteme en comparant la consommation de différents composants et en évaluant l'influence de certains paramètres de fonctionnement.

Plus précisément, il permet de réaliser :

- une optimisation matérielle en choisissant le composant le plus adapté,
- une optimisation logicielle pour adapter au mieux le fonctionnement du microsysteme et optimiser son autonomie.



---

# Chapitre V. Conception détaillée d'un récupérateur piézoélectrique et intégration aux microsystèmes

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 5.1.     | Conception détaillée et intégration.....  | 118 |
| 5.1.1.   | Récapitulatif des résultats précédents pour le cas de validation .....                  | 118 |
| 5.1.2.   | Objectifs.....  | 120 |
| 5.1.3.   | Notre méthode .....   | 120 |
| 5.1.3.1. | Modèles génériques réutilisables.....   | 120 |
| 5.1.3.2. | Interactions entre domaines et acteurs .....  | 121 |
| 5.1.4.   | Application à la conception d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique .....           | 122 |
| 5.1.4.1. | Conversion piézoélectrique .....  | 122 |
| 5.1.4.2. | Configurations usuelles .....   | 123 |
| 5.1.4.3. | Sélection du matériau .....   | 124 |
| 5.1.4.4. | Modèles analytiques : différents niveaux de modélisation .....                          | 125 |
| 5.1.4.5. | Étapes de modélisation et de simulation.....  | 130 |
| 5.2.     | Conception détaillée pour le cas de validation : à partir de composants existants ..... | 131 |
| 5.2.1.   | Matériau.....   | 131 |
| 5.2.2.   | Conditions initiales et conditions aux limites .....                                    | 132 |
| 5.2.3.   | Analyse de la partie mécanique .....  | 133 |
| 5.2.4.   | Analyse de la partie électronique.....  | 135 |
| 5.3.     | Conception détaillée pour le cas de validation : cas d'une conception spécifique.....   | 139 |
| 5.3.1.   | Sélection du matériau .....   | 139 |
| 5.3.2.   | Conditions initiales et conditions aux limites .....                                    | 140 |
| 5.3.3.   | Analyse .....   | 141 |
| 5.3.4.   | Démarche de conception et de modélisation des convertisseurs AC/DC .....                | 144 |
| 5.4.     | Validation de la méthode par une approche expérimentale.....                            | 150 |
| 5.4.1.   | Description du banc de tests .....  | 150 |
| 5.4.2.   | Analyse des résultats expérimentaux .....   | 152 |
| 5.4.2.1. | Vérification des modèles .....  | 152 |
| 5.4.2.2. | Étude statistique .....   | 158 |
| 5.4.2.3. | Tests expérimentaux.....  | 159 |
| 5.4.2.4. | Comparaisons et améliorations.....  | 162 |
| 5.4.3.   | Bilan .....   | 164 |
| 5.5.     | Conclusions.....  | 164 |



## 5.1. CONCEPTION DÉTAILLÉE ET INTÉGRATION

### 5.1.1. Récapitulatif des résultats précédents pour le cas de validation

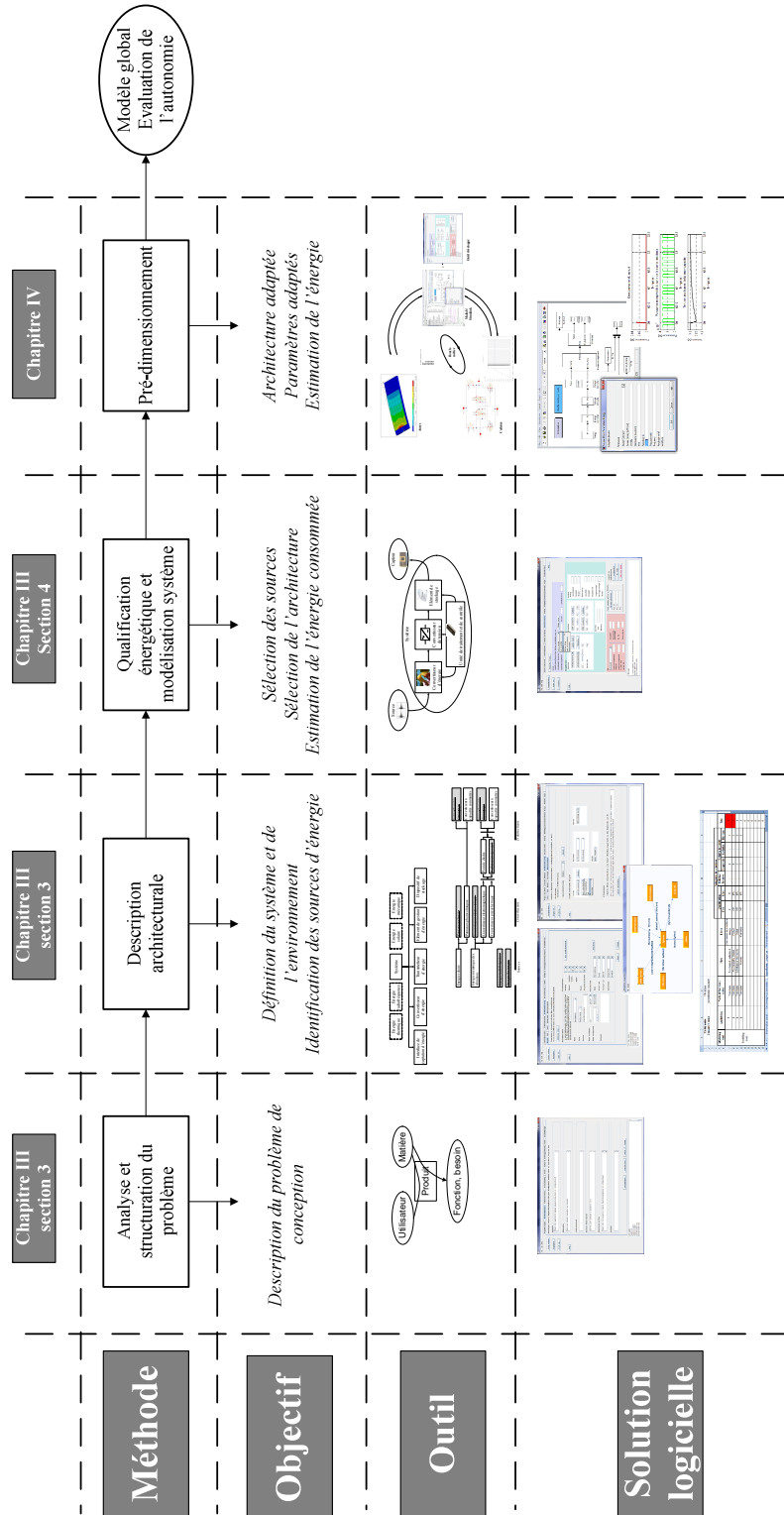


Figure V. 1 : Récapitulatif des résultats de notre méthode pour le cas de validation

Au cours des chapitres précédents nous avons déroulé notre cas d'application en utilisant notre méthodologie de conception. Nous rappelons ici les principaux résultats obtenus, pour les différentes phases (Figure V. 1).

### **1. Analyse et structuration du problème** (Chapitre III)

L'objectif de l'étude est la conception d'un microsystème capable de surveiller une structure mécanique. Pour ce faire, le capteur choisi est un accéléromètre.

### **2. Description architecturale** (Chapitre III)

Nous avons ensuite identifié les entités du système et du super-système et notamment les sources d'énergie ambiantes :

- l'énergie solaire,
- l'énergie mécanique de déformation et des vibrations,
- l'énergie thermique,
- l'énergie des ondes radiofréquence.

Nous pouvons ainsi diminuer le nombre de sources d'énergie candidates pour alimenter le microsystème.

### **3. Qualification énergétique et modélisation système** (Chapitre III)

Nous avons ensuite qualifié ces sources à partir des critères que nous avons défini (distance, intensité, nature et interactions antagonistes) pour obtenir une hiérarchisation. La classification par ordre de préférence est la suivante :

- énergie mécanique des vibrations et de la déformation
- énergie solaire
- énergie radiofréquence
- énergie thermique

Pour le cas de validation, nous avons retenus les deux premières. Ensuite, nous avons déterminé les architectures possibles, à partir de l'outil développé et des bases de données de solutions. A partir de là, nous avons retenu les architectures présentant le moins d'effets antagonistes.

Plus précisément, nous avons étudié la récupération d'énergie solaire avec un convertisseur photovoltaïque et la récupération d'énergie mécanique à partir de systèmes de conversion piézoélectrique ou électromagnétique.

### **4. Pré-dimensionnement** (Chapitre IV)

Dans cette phase, nous avons quantifié l'énergie récupérée et l'autonomie du microsystème considéré. La solution la plus performante s'avère être la récupération d'énergie mécanique avec un convertisseur piézoélectrique. Cependant, l'énergie solaire permet aussi de satisfaire la contrainte d'autonomie de l'application.

Dans la suite de notre étude, nous étudions seulement la récupération d'énergie mécanique, à partir d'un convertisseur piézoélectrique.

### **5.1.2. Objectifs**

Les étapes précédentes amènent à l'architecture la plus adaptée, pour une application donnée, du point de vue énergétique. Pour l'instant, nous avons considéré des modélisations ayant un niveau d'abstraction élevé et associées à des modèles simples et assez qualitatifs. Il faut à présent définir plus précisément les éléments choisis pour le récupérateur d'énergie, à savoir le convertisseur, le ou les transmetteurs, l'unité de gestion et de contrôle et le ou les éléments de stockage. Le but étant d'obtenir les modèles physiques associés à chacun.

Les objectifs principaux sont les suivants :

- disposer d'outils de conception et de prédiction du comportement du microsysteme
- permettre aux acteurs de la conception de communiquer et d'échanger des informations et renforcer les interactions entre les domaines.

### **5.1.3. Notre méthode**

#### **5.1.3.1. Modèles génériques réutilisables**

Dans un souci de réutilisabilité et de rapidité de conception, nous avons établi une base de données de composants existants, avec leurs spécificités et modèles. Le principal but d'un modèle est généralement la validation des caractéristiques d'une certaine partie du système ou de tout l'ensemble, au niveau des fonctionnalités et des performances. C'est la définition de ces caractéristiques et fonctionnalités qui fixe le niveau de détail à implémenter. Ce niveau de détail étant communément appelé niveau d'abstraction par les concepteurs.

L'application directe des lois de la physique est, le plus souvent, peu exploitable. En effet, la mise en œuvre des lois physiques dans un environnement réel est très délicate et conduit à des systèmes d'équations très vite complexes. Cependant, ces équations donnent des éléments de principe. La simplification des équations issues des lois de la physique conduit à des modèles comportementaux, simples mais limités (selon le niveau de détail implémenté) en performances.

Le concepteur choisit donc parmi les solutions proposées, issues de bases de données, en prenant en compte les contraintes de son application telles que l'encombrement, la plage de température, l'effort maximal admissible, etc.

De plus, cette base de données peut également être enrichie par l'ajout de nouveaux composants, au fur et à mesure de son utilisation, pour garantir la transmission des connaissances. Cependant, si aucun composant ne convient, le concepteur devra s'orienter vers une conception spécifique.

Cette étape met donc en évidence la possibilité d'utiliser des composants existants ou la nécessité d'une conception ad-hoc. Dans les deux cas, la définition des modèles permet de simuler le système avec plus de précision et ainsi de mieux appréhender son comportement réel.

### 5.1.3.2. Interactions entre domaines et acteurs

De par l'hétérogénéité des microsystemes, et plus précisément des récupérateurs d'énergie, l'étape de pré-dimensionnement requiert l'utilisation de logiciels spécifiques. En effet, à partir de là, le processus de conception se spécialise, faisant intervenir des experts de différents domaines tels que l'électronique, la mécanique, les matériaux ou encore la thermique. Le principal problème reste la collaboration entre ces divers acteurs, de façon à concevoir un système efficient de tous les points de vue. Il faut donc leur permettre de collaborer plus facilement, tout en restant spécialisés.

Une solution consiste à utiliser des outils de conception multi-physiques permettant de simuler tous types de comportements, tels qu'ANSYS, COMSOL et AMESim. En pratique, ces outils sont souvent très puissants et difficiles à utiliser. De plus, dans la majorité des cas, les concepteurs ont déjà l'habitude de travailler avec des logiciels spécifiques et l'introduction d'un nouvel outil entraîne un temps de formation durant lequel la personne n'est pas productive. Ce qui est préjudiciable du point de vue de l'entreprise.

Partant de ces observations, nous préférons créer des passerelles entre les logiciels existants et souvent reconnus comme des standards, au lieu de les remplacer par un seul. Le but étant d'améliorer la communication et la collaboration entre les différents acteurs.

Nous considérons principalement trois logiciels (Figure V. 2) :

- un logiciel de conception assistée par ordinateur, ANSYS, pour la simulation des comportements mécaniques.
- un logiciel d'interface pour récupérer les données, les transmettre à chacun des autres logiciels et réaliser des simulations au niveau système : Matlab.
- les logiciels de simulation et de conception électronique Protel DXP et Cadence seront utilisés pour la modélisation des circuits de gestion et de conversion de l'énergie et la création de masques, en vue de réaliser des systèmes sur puces.

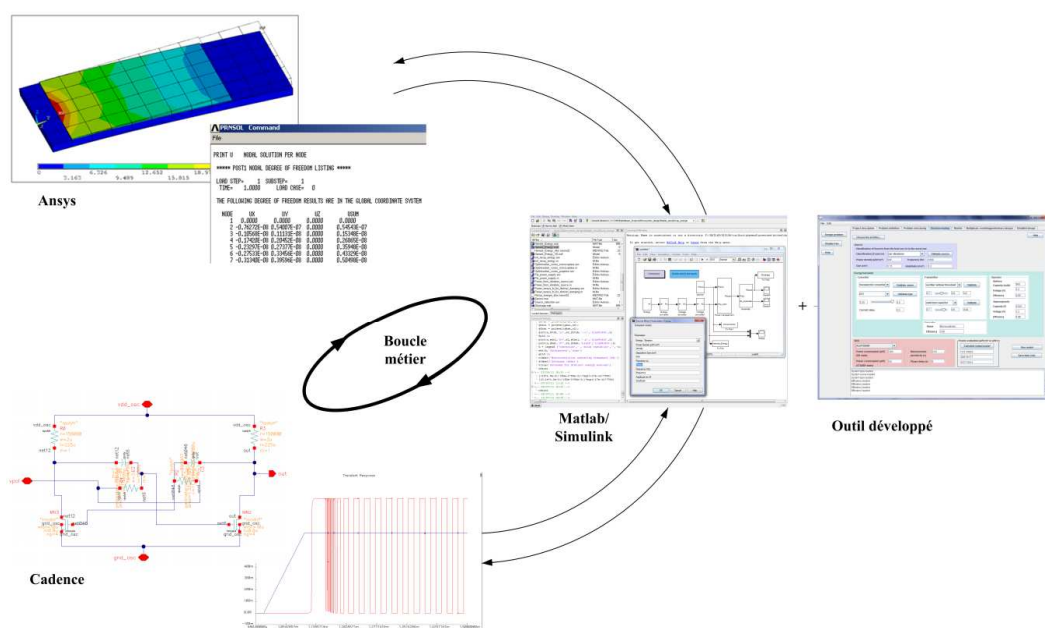


Figure V. 2 : Représentation de la boucle métier

### 5.1.4. Application à la conception d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique

Les étapes précédentes nous ont conduits à un récupérateur d'énergie basé sur le principe de conversion piézoélectrique à base de matériaux PZT (Chapitre IV). Dans un premier temps, nous exposerons quelques notions sur de la piézoélectricité. Nous aborderons ensuite la démarche de conception et de modélisation du récupérateur d'énergie.

#### 5.1.4.1. Conversion piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques ont la propriété de se déformer en présence d'un champ électrique ou inversement de produire une charge électrique quand ils sont déformés. Cet effet s'explique par la séparation spontanée des charges à l'intérieur de la structure cristalline, produisant ainsi un dipôle électrique.

A l'heure actuelle, les céramiques polycristallines sont les matériaux les plus couramment utilisés. Ils sont composés de cristaux orientés de manière aléatoire. Chaque cristal est divisé en petits domaines ayant les mêmes arrangements diélectriques. La polarisation initiale est aléatoire. Durant la fabrication, les matériaux sont soumis à des champs électriques importants (de l'ordre de 2 kV/mm) qui orientent les domaines de polarisation dans la direction du champ électrique externe. Les matériaux sont alors polarisés.

Dans la littérature, il existe de nombreuses conventions pour les systèmes piézoélectriques. Parmi elles, nous distinguons les conventions de Tzou et Schmidt. Dans la convention de Tzou,  $T$  représente la contrainte mécanique,  $S$  la déformation et  $s$  la constante élastique (module d'Young). Schmidt utilise  $\delta$  pour la déformation,  $\sigma$  pour la contrainte et  $Y$  pour la constante élastique. Dans le domaine de la mécanique, la déformation et le module d'Young sont notés  $\varepsilon$  et  $E$ , respectivement, mais comme ces symboles ont d'autres significations dans le contexte des matériaux piézoélectriques, nous utilisons d'autres variables. Les équivalences entre les différentes conventions sont détaillées dans l'annexe A.

Dans la suite de l'exposé, nous utiliserons le standard IEEE. De plus, dans le cas général, chaque variable est représentée par un tenseur. Cette notation est cependant un peu lourde compte tenu du contexte qui est simplifié du point de vue mécanique. Nous considérons donc, dans la suite, que les actions se produisent le long d'un seul axe. Par conséquent, chaque variable ou constante est traitée comme un scalaire et non un tenseur. Les valeurs sont déterminées en fonction des contraintes et spécifications de l'application.

Dans ces conditions, les lois constitutives de la piézoélectricité sont données par (V.1).

$$\begin{cases} S = s^E T + dE \\ D = \varepsilon^T E + dT \end{cases} \quad (V.1)$$

où

$S$  est la déformation

$T$  est la contrainte

$s$  est l'inverse de la constante élastique

$d$  est la constante de charge piézoélectrique

$E$  est le champ électrique

$D$  est le déplacement électrique (densité de charges)

$\epsilon$  est la constante diélectrique du matériau piézoélectrique

Nous pouvons constater qu'en l'absence du terme de couplage piézoélectrique,  $dE$ , la première équation de ce système équivaut à la loi de Hooke. De la même manière, sans le terme  $dT$ , la seconde équation est la loi de Gauss pour l'électricité. Le couplage piézoélectrique permet la conversion d'énergie.

#### 5.1.4.2. Configurations usuelles

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre IV, la méthode nous conduit à l'utilisation d'un convertisseur piézoélectrique pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

Il existe différentes configurations pour les convertisseurs piézoélectriques :

- structure cantilever unimorphe,
- structure cantilever bimorphe,
- structure pile,
- diaphragme.

Nous avons choisi une structure cantilever unimorphe. Ce type de structure supporte des pressions plus importantes et fonctionne à de faibles fréquences. De plus, cette disposition est compatible avec notre application. Nous considérons ainsi une structure constituée d'un film piézoélectrique déposé sur la poutre (Figure V. 3). Nous souhaitons obtenir le potentiel électrique à chaque nœud de la structure. Cette grandeur est couplée à des grandeurs mécaniques telles que le déplacement ou la contrainte.

Avant de modéliser et de simuler le matériau piézoélectrique, nous exposons les critères de sélections et les modèles de ces éléments.

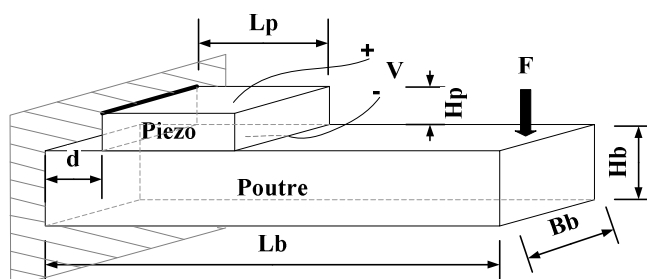


Figure V. 3 : Film piézoélectrique déposé sur la poutre

| Grandeur                              | Symbole | Valeur |
|---------------------------------------|---------|--------|
| Longueur de la poutre                 | $L_b$   | 60 mm  |
| Hauteur de la poutre                  | $H_b$   | 2 mm   |
| Largeur de la poutre                  | $B_b$   | 25 mm  |
| Longueur de l'élément piézoélectrique | $L_p$   | 40 mm  |
| Hauteur de l'élément piézoélectrique  | $H_p$   | 0,3 mm |
| Décalage de l'élément piézoélectrique | $d$     | 5 mm   |

Tableau V. 1 : Paramètres de modélisation

### 5.1.4.3.Sélection du matériau

Il existe différents types de matériaux piézoélectriques caractérisés par :

- le coefficient de déformation piézoélectrique ( $d$ ) reliant la déformation et le champ électrique,
- le coefficient de couplage ( $k$ ) traduisant la capacité du matériau à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, selon l'équation (V.2) :

$$k = \frac{d}{\sqrt{\epsilon \sigma_s E}} = \sqrt{\frac{Y}{\epsilon}} d \quad (V.2)$$

avec

- $k$  coefficient de couplage
- $Y$  module d'Young
- $\epsilon$  constante diélectrique du matériau piézoélectrique
- $d$  coefficient de déformation du matériau piézoélectrique.

A partir de cette équation, nous constatons que les matériaux ayant un coefficient de déformation et un coefficient de conversion importants sont plus performants. Ces coefficients diffèrent en modes 33 et 31 et sont, dans la plupart des cas, supérieurs en mode 33.

De plus, une grande constante diélectrique est préférable pour diminuer l'impédance du générateur piézoélectrique. En effet, les matériaux piézoélectriques ont souvent une grande impédance qui entraîne de fortes tensions et de faibles courants de sortie. Aussi, le module d'Young influence directement la raideur du dispositif.

Enfin, la résistance à la traction est importante. La puissance de sortie générée par un convertisseur piézoélectrique est liée à la déformation développée. Dans certains cas, le matériau supporte une déformation maximale. Un matériau avec une résistance à la traction plus grande est alors préférable.

| Paramètre  | Unités                     | PZT  | PVDF | PZN-PT |
|--|----------------------------|------|------|--------|
| Coefficient de déformation ( $d_{31}$ )          | $10^{-12}$ m/V             | 320  | 20   | 950    |
| Coefficient de déformation ( $d_{33}$ )          | $10^{-12}$ m/V             | 650  | 30   | 2000   |
| Coefficient de couplage ( $k_{31}$ )             | CV/Nm                      | 0,44 | 0,11 | 0,5    |
| Coefficient de couplage ( $k_{33}$ )             | CV/Nm                      | 0,75 | 0,16 | 0,91   |
| Constante diélectrique ( $\epsilon/\epsilon_0$ ) | -                          | 3800 | 12   | 4500   |
| Module d'Young ( $Y$ )                           | $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> | 5    | 0,3  | 0,83   |
| Résistance à la traction                         | $10^7$ N/m <sup>2</sup>    | 2    | 5,2  | 8,3    |

Tableau V. 2 : Comparaisons de matériaux piézoélectriques

Le Tableau V. 2 liste les propriétés des matériaux piézoélectriques les plus utilisés (voir Annexe A). Les coefficients de déformation et de résistance à la traction sont donnés pour les modes 31 et 33.

Comme nous l'avons dit précédemment, le PZT (Lead Zirconat Titanate) est le matériau le plus couramment utilisé du fait de ses bonnes propriétés piézoélectriques. Il s'agit d'un matériau céramique polycristallin ayant de très bons coefficients piézoélectriques.

#### 5.1.4.4. Modèles analytiques : différents niveaux de modélisation

De nombreux modèles existent dans la littérature. Ils dépendent généralement des aspects sur lesquels le concepteur est focalisé, à savoir : la fonction, la structure et la géométrie.

Nous considérons les trois types de modélisations énoncés par H. Boussetta [Boussetta, 2010] dans sa thèse :

- **le modèle fonctionnel** modélisant la fonction réalisée par le système sans prendre en compte sa physique
- **le modèle structurel** qui considère le système et les sous-systèmes qui le composent
- **le modèle physique** qui fournit des informations sur la physique des composants (propriétés des matériaux, dimensions des dispositifs, ...).

Dans les sections suivantes, nous décrivons les différents modèles du convertisseur piézoélectrique.

##### a. Modèle fonctionnel

Le modèle le plus simple et le plus abstrait est utilisé dans [Ottman, Hofmann et al., 2002]. Il représente la partie électromécanique du convertisseur piézoélectrique à l'aide d'un modèle équivalent électrique. Comme illustré par la Figure V. 4, le microgénérateur est modélisé par une source de courant et une capacité  $C_p$  qui représente la capacité piézoélectrique du microgénérateur et une résistance  $R_p$  qui modélise les pertes du microgénérateur. La valeur de la résistance  $R_p$  est de l'ordre de  $10^{12}$  ohm et la capacité  $C_p$  est



déterminée à partir de l'équation suivante :

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{h} \quad (\text{V.3})$$

Dans cette équation,  $A$  représente la surface du convertisseur,  $h$  sa hauteur et  $\epsilon_0$  et  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$  sont respectivement la permittivité du vide et la permittivité relative du matériau piézoélectrique.

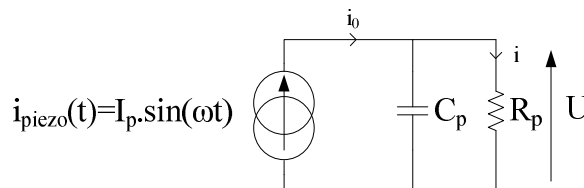


Figure V. 4 : Modèle à faible couplage du transducteur

Dans [Williams, Shearwood et al., 2001], l'auteur a montré que son modèle était assez précis même s'il a négligé les pertes structurelles et visqueuses ainsi que le couplage fort des matériaux utilisés.

L'amplitude de la tension de sortie du microgénérateur est calculée analytiquement selon l'équation (V.4).

$$U = I_p \cdot \frac{R_p}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_p \cdot R_p)^2}} \quad (\text{V.4})$$

Le Tableau V. 3 résume les variables utilisées dans ce modèle.

| Nom                        | Symbole  | Unités   |
|----------------------------|----------|----------|
| Capacité piézoélectrique   | $C_p$    | F        |
| Résistance piézoélectrique | $R_p$    | $\Omega$ |
| Pulsation                  | $\omega$ | $s^{-1}$ |
| Courant piézoélectrique    | $I_p$    | A        |

Tableau V. 3 : Variables intervenant dans le modèle fonctionnel du convertisseur piézoélectrique

b. *Modèle structurel*

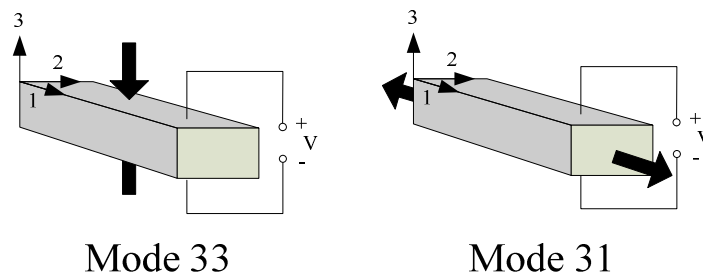


Figure V. 5 : illustration des modes 31 et 33 pour les matériaux piézoélectriques

La Figure V. 5 représente les deux principaux modes d'utilisation des matériaux piézoélectriques. Les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$  sont nommés 1, 2 et 3.

La plupart du temps, les matériaux piézoélectriques sont utilisés en mode 33, ce qui signifie que la tension et la contrainte agissent selon la direction 3. Les matériaux piézoélectriques peuvent aussi fonctionner en mode 31. Dans ce cas, la tension agit suivant la direction 3 (le matériau est polarisé selon la direction 3) et la contrainte et la déformation agissent dans la direction 1. Le fonctionnement en mode 31 implique l'utilisation d'éléments pour lesquels une déformation importante est générée par la flexion, selon la direction 1. Les éléments de type 31 les plus courants sont des bimorphes, comportant deux couches piézoélectriques reliées ensemble. Lors de la flexion, la surface du haut est en tension et celle du bas est en compression ou inversement. Par conséquent, si chaque couche est polarisée de la même manière et que les électrodes sont correctement connectées, les courants produits s'ajoutent (polarisation parallèle). Si les couches sont polarisées en inverse, les tensions s'ajoutent (polarisation série). Dans les deux cas, le potentiel de conversion reste le même. En théorie, la polarisation et le nombre de couches agissent seulement sur le rapport entre la tension et le courant.

Nous considérons une structure cantilever. Cette structure a une raideur plus faible pour une taille donnée. Ensuite, pour une certaine force en entrée, elle génère la plus grande contrainte.

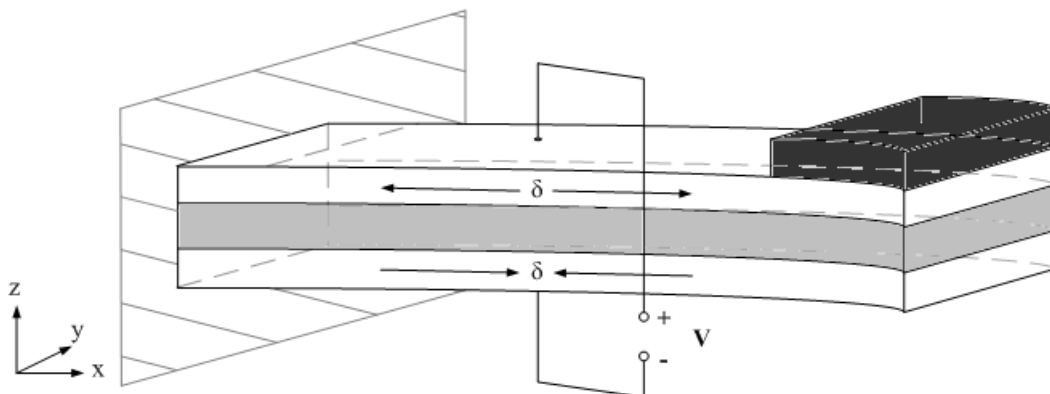
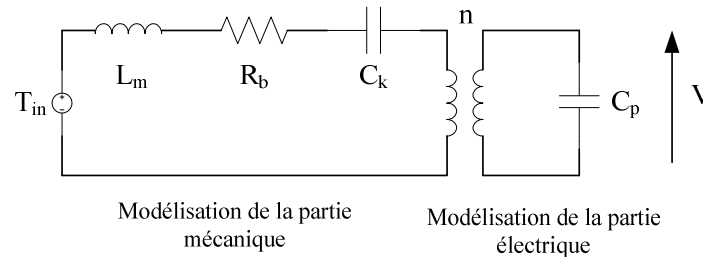


Figure V. 6 : Structure cantilever

A partir de la structure représentée sur la Figure V. 6, il découle un modèle analytique du système d'équations (V.1). Pour représenter l'élément piézoélectrique, nous modélisons les parties mécaniques et électriques. Le couplage s'effectue ensuite à l'aide d'un transformateur dont le coefficient de conversion est noté  $n$ .

La Figure V. 7 représente le modèle équivalent de la structure considérée pour le convertisseur piézoélectrique.



**Figure V. 7 : Représentation équivalente du convertisseur piézoélectrique**

Les notations suivantes sont utilisées pour le modèle :

$T_{in}$  représente la contrainte subie par la poutre piézoélectrique suite à la vibration de la masse,

- $L_m$  représente l'inertie de la poutre,
- $n$  est le rapport de transformation,
- $R_b$  est l'amortissement mécanique
- $C_k$  modélise l'inverse de la capacité de la couche piézoélectrique
- $C_p$  est la capacité équivalente du matériau piézoélectrique

Cette modélisation est basée sur l'analogie mécanique/électrique. Le lien entre le modèle mécanique et le circuit équivalent se fait au travers de la variable  $S$  qui représente la déformation de la poutre. L'équivalent électrique de  $S$  est la charge  $q$ .

En appliquant les lois de Kirchhoff, nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} T_{in} = L_m S'' + R_b S' + \frac{S}{C_k + nV} \\ i = C_p V' \end{cases} \quad (V.5)$$

Le couplage électromagnétique est modélisé par un transformateur qui relie les grandeurs électriques aux contraintes mécaniques. Les paramètres  $L_m$ ,  $R_b$ ,  $n$  et  $C_p$  dépendent de la géométrie de la poutre. D'après [Ottman, Hofmann et al., 2002],  $L_m = k_1 k_2 m$ .

$$\text{avec } k_1 = \frac{b \cdot (2l_b + l_m - l_e)}{2I} \text{ et } k_2 = \frac{l_b^2 \cdot \left(2l_b + \frac{3}{2}l_m\right)}{3b \cdot (2l_b + l_m - l_e)}.$$

- $m$  masse accrochée à l'extrémité de la poutre
- $l_e$  longueur de l'électrode
- $l_b$  longueur de l'élément piézoélectrique
- $I$  moment d'inertie défini par la relation (V.5).

$$I = \frac{w.t_p^3}{6} + 2.w.t_p.b^2 + \frac{\eta_s.w.t_c^2}{12} \quad (V.6)$$

où

- $w$  est la largeur de la poutre
- $b$  est la distance entre le centre de la poutre et le centre des couches piézoélectriques définie par  $b = (t_p+t_c)/2$ .
- $t_p$  est l'épaisseur de chacune des deux couches piézoélectriques de la structure bimorphe.
- $\eta_s$  est le rapport entre le module d'Young de l'élément piézoélectrique  $y_p$  et celui du support noté  $Y_h$ .
- $R_b = k_1 k_2 b_m$ , avec  $b_m$  le coefficient de frottement visqueux.
- $C_k = \frac{1}{C_b}$
- $n$  est le coefficient de couplage électrique ;  $n = -\frac{a.d_{31}.C_p}{2.t_p}$

avec  $a = 1$  si les couches piézoélectriques sont connectées en série

$a = 2$  si les couches piézoélectriques sont connectées en parallèle

$d_{31}$  est le coefficient piézoélectrique mis en œuvre dans la flexion

| Nom                            | Symbole  | Unités |
|--------------------------------|----------|--------|
| Coefficient piézoélectrique    | $d_{31}$ | C/N    |
| Module d'Young piézoélectrique | $y_p$    | Pa     |
| Modulé d'Young poutre          | $y_h$    | Pa     |
| Coefficient de connexion       | $a$      | -      |
| Longueur de la masse           | $l_m$    | m      |
| Hauteur de la masse            | $h_m$    | m      |
| Largeur de la masse            | $w_m$    | m      |
| Longueur de l'électrode        | $l_e$    | m      |
| Longueur de la poutre          | $l_b$    | m      |

|  |       |     |
|--|-------|-----|
| Largeur de la poutre                   | $w$   | m   |
| Épaisseur de la couche piézoélectrique | $t_p$ | m   |
| Épaisseur de la poutre centrale        | $t_c$ | m   |
| Coefficient d'amortissement            | $b_m$ | N/m |

**Tableau V. 4 : Variables présentes dans le modèle structurel du convertisseur piézoélectrique**

### c. *Modèle physique*

Les modèles développés précédemment sont seulement applicables pour évaluer les performances d'un système dans des applications spécifiques où les conditions mécaniques et électriques sont très simplifiées. C'est pourquoi nous considérons l'analyse par éléments finis à l'aide d'Ansys, pour prendre en compte la complexité du modèle physique. Nous pourrions ainsi évaluer la tension générée par le convertisseur piézoélectrique en fonction de la contrainte à laquelle il est soumis.

#### 5.1.4.5. Étapes de modélisation et de simulation

Sous Ansys, cinq étapes sont nécessaires pour réaliser une analyse en éléments finis (Figure V. 8) :

- Définir les paramètres de conception. Ces données sont issues des spécifications de l'application ou de la conception architecturale ( $L_b, H_b, B_b, L_p, H_p, B_p$ ).
- Construire le modèle éléments finis. Les données suivantes doivent être définies : type d'éléments, propriétés des matériaux. Ensuite, le modèle éléments finis est créé. La sélection des éléments dépend de leurs caractéristiques. Ils sont choisis de manière à modéliser au mieux le problème, géométriquement et physiquement. Les matériaux ont des propriétés linéaires ou non-linéaires, isotropes, orthotropes ou anisotropes et sont dépendant ou non de la température. Pour les matériaux piézoélectriques, il faut définir la matrice piézoélectrique  $[e]$ , la matrice de rigidité  $[c]$  et la matrice de permittivité diélectrique  $[\epsilon_p]$ . Pour le support, le module d'Young et le coefficient de Poisson sont nécessaires.
- Construire la solution. Pour cela, il faut appliquer les charges, imposer les conditions initiales et sélectionner le type d'analyse que l'on souhaite faire. Les charges peuvent être structurales (déplacement et forces), thermiques (températures et flux de chaleur), électriques (potentiel et courants électriques) et fluide (vitesse et pression). Les forces sont soit nodales (force concentrée sur un nœud) soit surfaciques (force distribuée sur une surface), soit volumiques.
- Visualiser les résultats (représentation graphique ou valeurs)
- Interpréter les résultats.

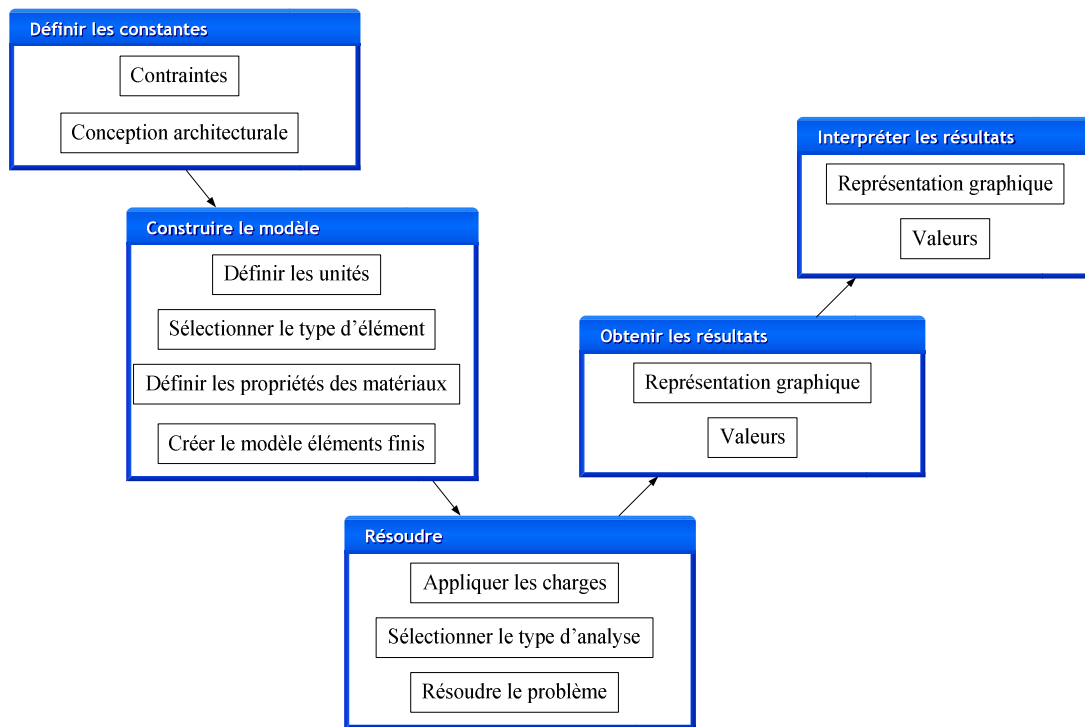


Figure V. 8 : Procédure d'analyse en éléments finis sous Ansys

## 5.2. CONCEPTION DÉTAILLÉE POUR LE CAS DE VALIDATION : À PARTIR DE COMPOSANTS EXISTANTS

### 5.2.1. Matériau

A partir de notre outil, nous avons identifié un élément piézoélectrique commercialisé par la société Noliac. Il s'agit d'une céramique multicouche (CMBP08) composée d'un matériau piézoélectrique standard, le NCE57, adapté pour les générateurs à faible puissance et à faible fréquence de résonance. Ses caractéristiques principales sont listées dans le Tableau V. 5.

Nous avons modélisé ce matériau sous Ansys pour simuler son comportement.

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Longueur (mm)                                      | 50                    |
| Largeur (mm)                                       | 7,8                   |
| Épaisseur (mm)                                     | 1,5                   |
| Tension maximale (V)                               | 200                   |
| Déplacement maximal ( $\mu\text{m}$ )              | 850                   |
| Force maximale (N)                                 | 1,6                   |
| Constante de charge piézoélectrique $d_{31}$ (C/N) | $-170 \cdot 10^{-12}$ |

|  |                      |
|--|----------------------|
| Constante de charge piézoélectrique $d_{33}$ (C/N)         | $425 \cdot 10^{-12}$ |
| Constante de tension piézoélectrique $g_{31}$ (C/N)        | $27 \cdot 10^{-3}$   |
| Constante de tension piézoélectrique $g_{33}$ (C/N)        | $-11 \cdot 10^{-3}$  |
| Coefficient de couplage $k_{33}$                           | 0,7                  |
| Constante diélectrique relative $\epsilon_{33}/\epsilon_0$ | 1800                 |
| Densité (kg/m <sup>3</sup> )                               | 1700                 |
| Compliance élastique $s_{11}$ (m <sup>2</sup> /N)          | $17 \cdot 10^{-12}$  |
| Compliance élastique $s_{33}$ (m <sup>2</sup> /N)          | $23 \cdot 10^{-12}$  |

**Tableau V. 5 : Caractéristiques de l'élément piézoélectrique CMBP08**

### 5.2.2. Conditions initiales et conditions aux limites

Ansys dispose de divers éléments piézoélectriques. Nous avons choisi l'élément SOLID 126 pour modéliser le dispositif piézoélectrique.

La structure est maillée avec des éléments quadratiques. Elle est encastree à une extrémité et libre à son autre extrémité (Figure V. 18). Une force de 15m N est appliquée sur l'extrémité libre et une tension nulle est imposée sur la surface du matériau piézoélectrique en contact avec le substrat. De plus, nous faisons l'hypothèse des petites perturbations (HPP) (petits déplacements et petites déformations) et nous considérons un comportement linéaire pour le matériau. Le Tableau V. 6 résume le modèle que nous avons utilisé.

|                        |                    |  |
|------------------------|--------------------|--|
| Type de comportement   | Vision matérielle  | SOLID126 / Loi de comportement linéaire  |
|                        | Vision géométrique | Petites déformations   |
|                        | Vision temporelle  | Statique   |
| Conditions aux limites | Statiques          | Encastrement à l'une des extrémités de la poutre<br>Potentiel nul sur une des électrodes<br>Force sur l'autre extrémité de la poutre |
| Maillage               |                    | Éléments quadratiques  |
| Résolution             | Processeur         | Pentium (R) Dual-Core CPU E5300 à 2,60GHz  |
|                        | RAM                | 4 Go   |
|                        | Version d'Ansys    | V11  |

**Tableau V. 6 : Modèle utilisé pour la simulation**

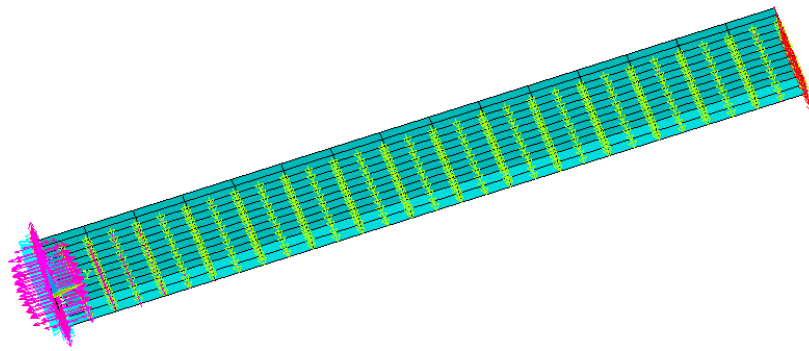


Figure V.9 : Représentation de la structure cantilever

### 5.2.3. Analyse de la partie mécanique

L'analyse en éléments finis permet d'obtenir la tension générée par la structure en fonction du déplacement. La Figure V.11 montre la répartition de tension sur la structure. Cette répartition va influencer le positionnement des électrodes sur la couche piézoélectrique.

Avec la force appliquée, la tension maximale atteint 6 V (Figure V.11), pour un déplacement maximal de 1 mm (Figure V.12). De plus, l'hypothèse de départ (petites perturbations) est vérifiée. En effet, la déformation est inférieure à 1 % (Figure V.10) et les rotations sont inférieures à 4°. Nous restons également en élasticité linéaire puisque la contrainte maximale est inférieure à la limite élastique du matériau.

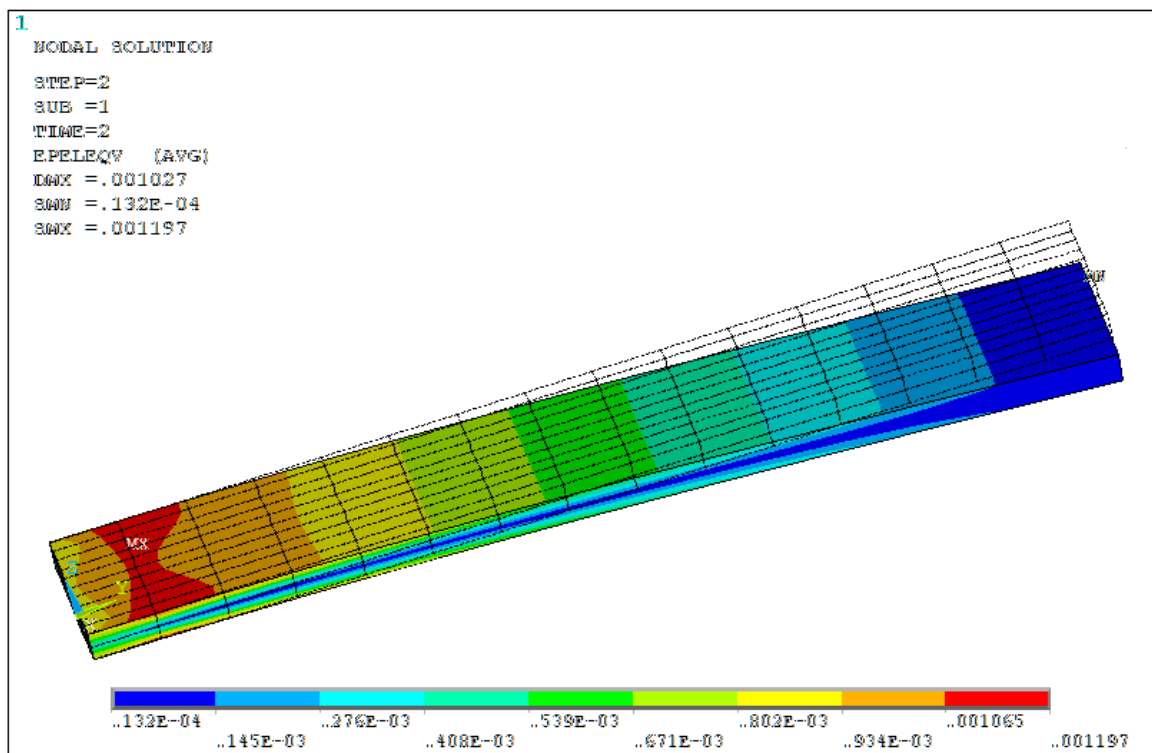


Figure V.10 : Représentation de la déformation (en %)



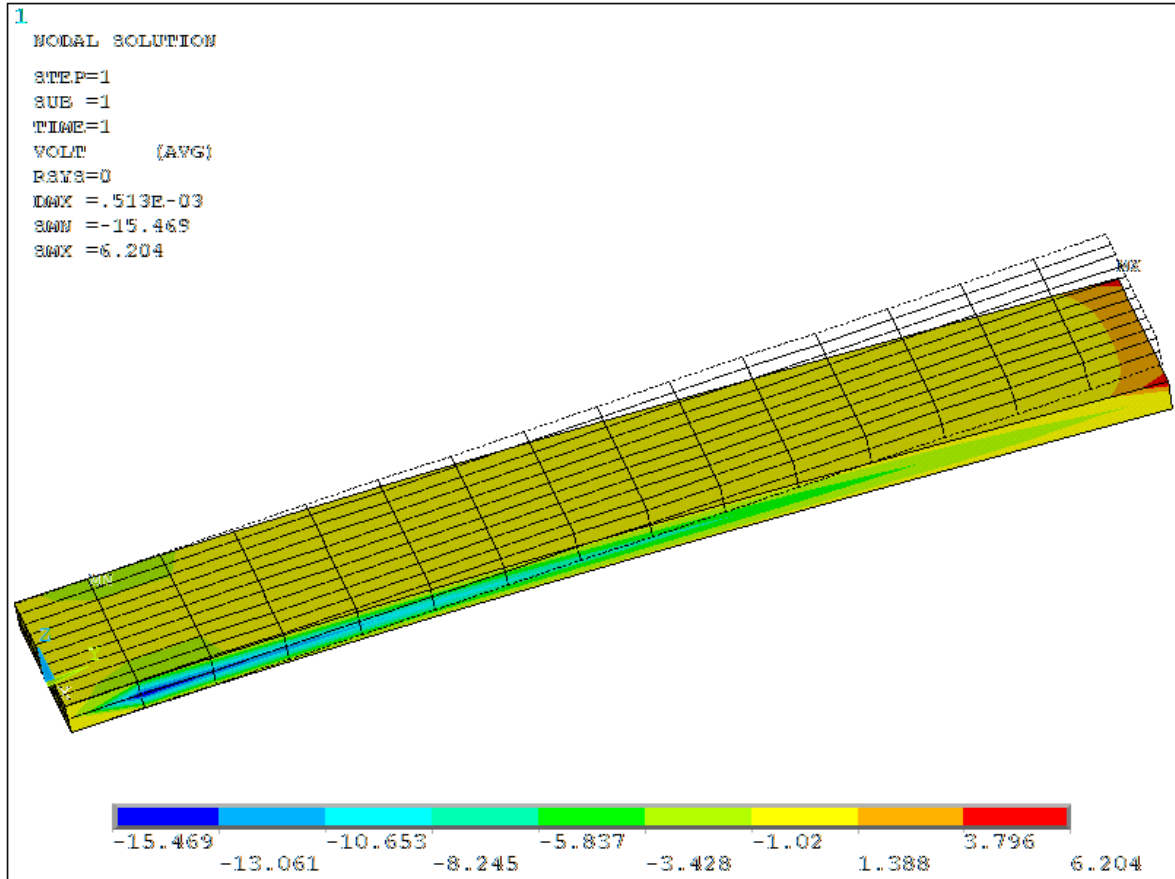


Figure V.11 : Représentation de la tension (en V)

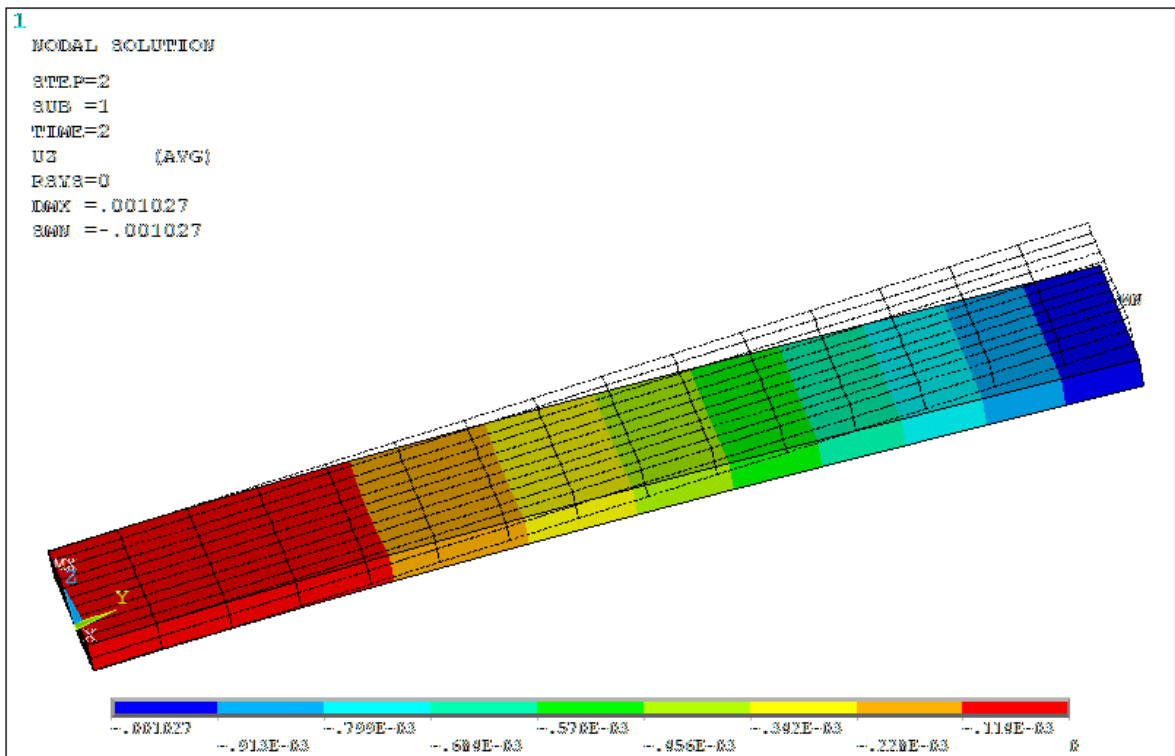


Figure V.12 : Représentation du déplacement (en m)

A partir des données issues de la simulation de l'élément piézoélectrique sous Ansys, nous modélisons le système de conversion électronique.

#### 5.2.4. Analyse de la partie électronique

Dans cette section, nous présentons une étude théorique de l'architecture simplifiée du système de récupération d'énergie. Il comporte l'élément piézoélectrique choisi (CMBP08), un convertisseur AC/DC formé par un pont de diodes Schottky, un condensateur de stockage et une charge (Figure V. 14). Le transistor sert à connecter périodiquement le condensateur à la charge, pour simuler le comportement périodique du système. Pour la simulation, la charge est modélisée par une DEL dont le courant est fixé pour correspondre au courant moyen de consommation de l'accéléromètre. Cette charge simule donc l'application.

Nous avons simulé le montage sous le logiciel Altium DXP. C'est un logiciel de CAO électronique permettant de saisir des schémas, de les simuler et de créer les typons des circuits imprimés associés. Il permet aussi de générer du code VHDL pour des circuits logiques programmables et de réunir en simulation mixte, circuits numériques et analogiques.

Les Figure V. 13 et Figure V. 14 représentent le schéma du circuit et les résultats de simulation. Le premier graphe représente la tension aux bornes de la capacité  $C_{storage}$  (courbe "vstorage"). Les courbes "vcom" et "vload", représentent le séquençage de l'application. La courbe du bas ("vpiezo") représente la tension générée par l'élément piézoélectrique.

A partir des résultats de simulation, nous constatons que la tension aux bornes de la supercapacité varie entre 5,5 V et 5,4 V.

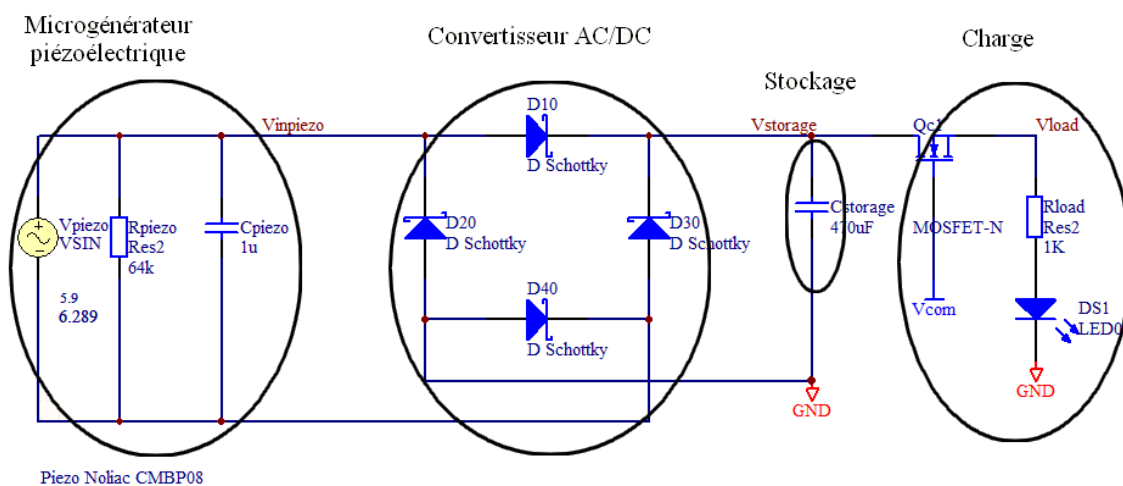


Figure V. 13 : Modélisation du circuit de récupération d'énergie

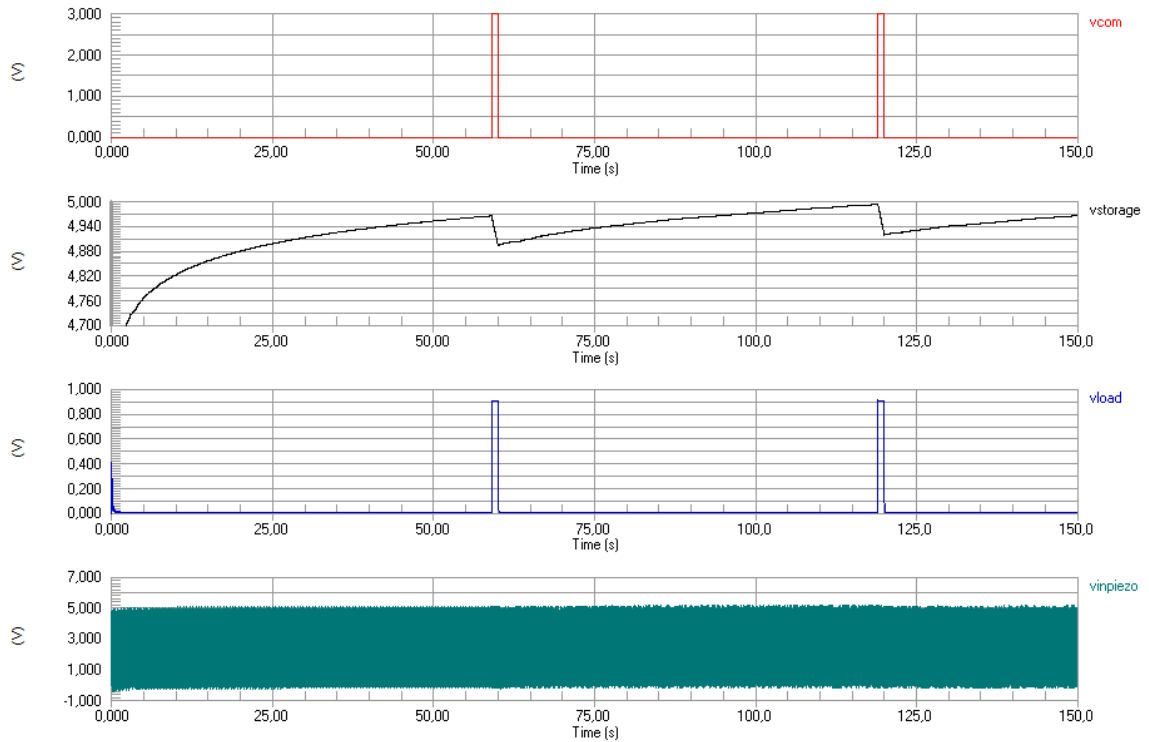


Figure V. 14 : Simulation du circuit de récupération d'énergie (CMBP08)

Pour améliorer la conversion, nous avons ensuite ajouté un régulateur LDO (Low DropOut), caractérisé par une faible différence entre les tensions d'entrée et de sortie. Les régulateurs LDO ont le même fonctionnement que les convertisseurs linéaires. La différence réside dans leur topologie. Au lieu d'avoir une source connectée en suiveur, les régulateurs LDO utilisent une topologie en drain ouvert. Ceci permet d'utiliser le transistor en mode saturé et de limiter ainsi la chute de tension à la tension de saturation du transistor. La Figure V. 15 représente la topologie des régulateurs LDO.

Nous avons simulé le système de récupération d'énergie avec ce régulateur, comme le montrent la Figure V. 16 et la Figure V. 17.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

- Le signal généré par le microgénérateur piézoélectrique est redressé par l'intermédiaire d'un pont de diodes, ce qui entraîne la charge du condensateur " $C_{in\_storage}$ ", en entrée du régulateur.
- Lorsque la tension " $V_{storage}$ ", aux bornes de la capacité " $C_{in\_storage}$ " atteint un seuil minimal de référence, le régulateur se met en fonctionnement et charge la capacité " $C_{out\_storage}$ ", à une tension fixe (égale à 3,3 V, dans notre cas).
- La connexion périodique à la charge est commandée par le signal " $V_{com}$ ", via l'interrupteur "S10".

A partir des résultats de simulation, le temps de charge de la capacité d'entrée " $C_{in\_storage}$ " est égal à 17,9 s. Cette durée correspond au temps qu'il faut au régulateur pour charger la capacité de sortie " $V_{out\_storage}$ ", à 3,3 V.

De plus, dès lors que la charge est connectée, la tension aux bornes de la capacité de sortie s'écroule jusqu'à la tension de seuil de la diode "DS1". En entrée, le signal " $V_{storage}$ " varie entre 4,6 V et 4,8 V.

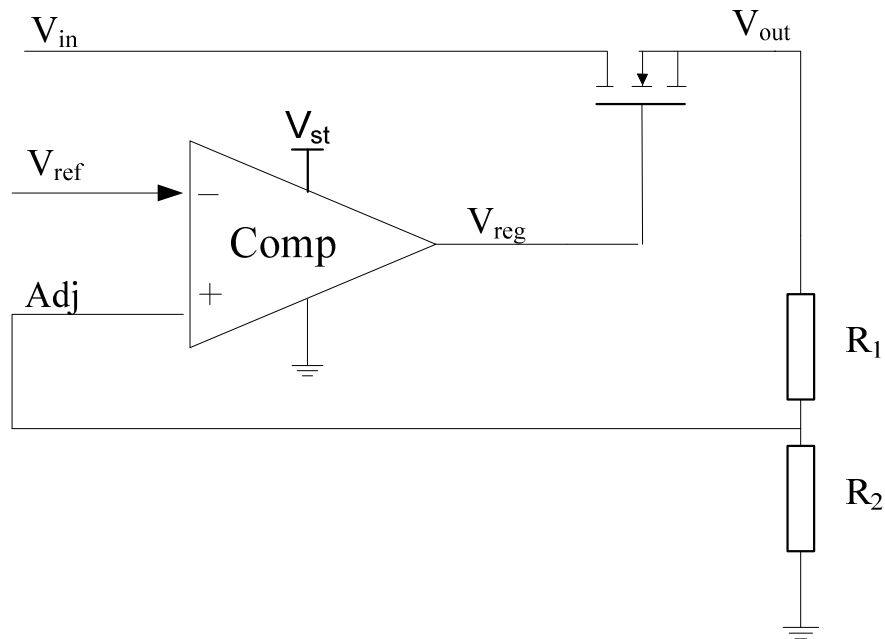


Figure V. 15 : Topologie d'un régulateur LDO

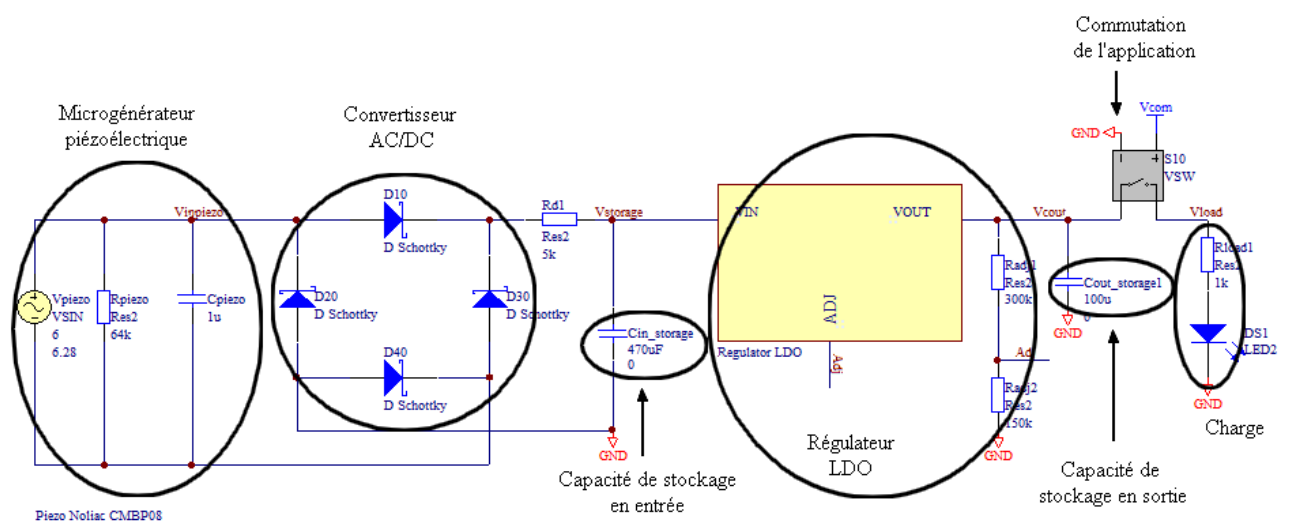
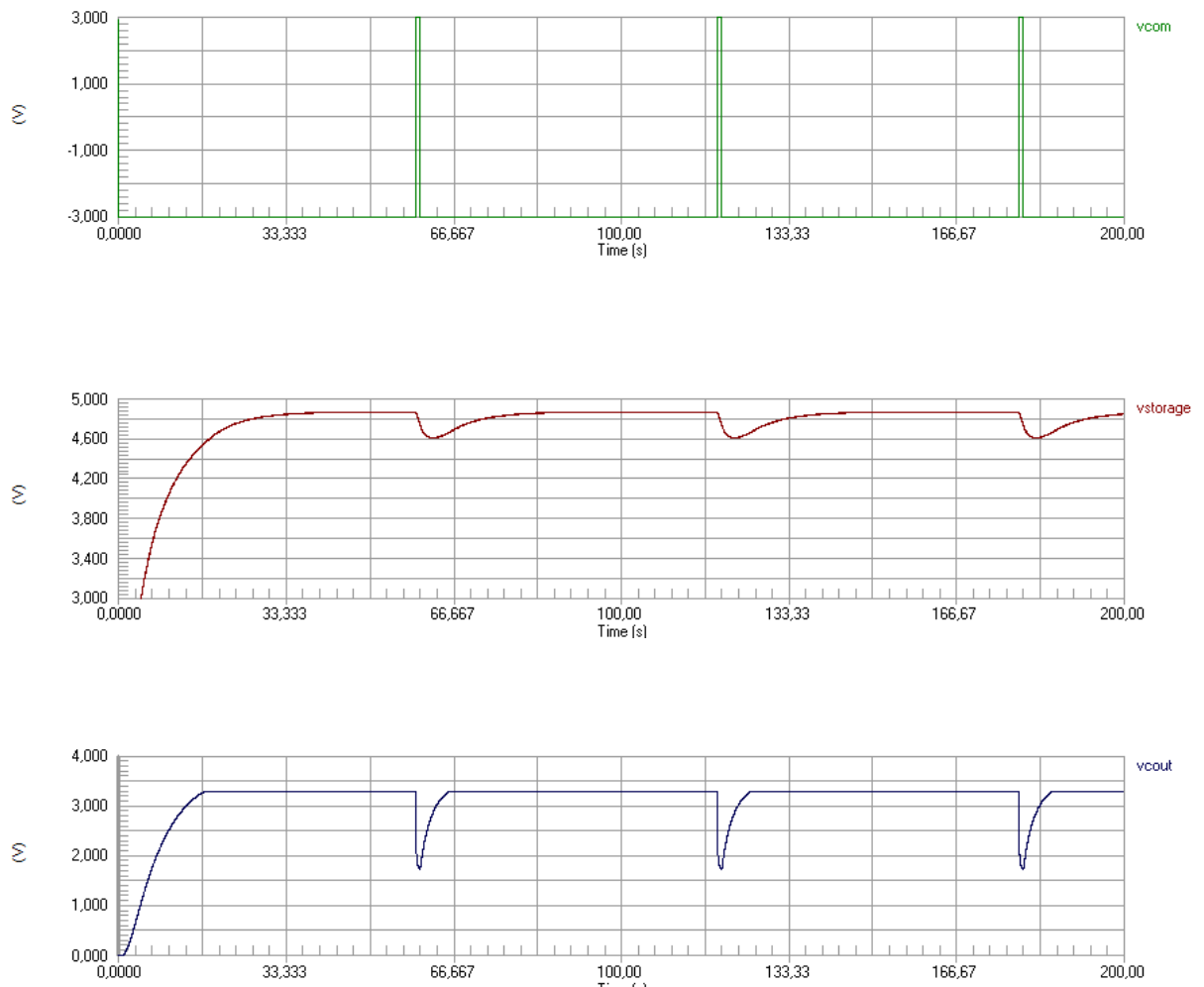


Figure V. 16 : Modélisation du convertisseur intégrant le régulateur LDO



**Figure V. 17 : Simulation du convertisseur intégrant le régulateur LDO**

Dans la suite, ces résultats de simulation seront comparés à ceux obtenus en utilisant un autre élément piézoélectrique.

### 5.3. CONCEPTION DÉTAILLÉE POUR LE CAS DE VALIDATION : CAS D'UNE CONCEPTION SPÉCIFIQUE

Comme nous l'avons mis en évidence lors des chapitres précédents, notre outil permet d'identifier si des composants existants peuvent être utilisés ou s'il faut réaliser une conception spécifique. Ainsi, dans ce chapitre, l'idée est d'identifier la possibilité de concevoir un récupérateur d'énergie piézoélectrique mieux adapté à notre application et basé sur un élément piézoélectrique redécoupable. Ainsi, nous présentons l'étude d'une conception spécifique, dans le cadre d'une application pour laquelle les composants du commerce ne sont pas satisfaisants.

#### 5.3.1. Sélection du matériau

Dans un premier temps, nous souhaitons améliorer la quantité d'énergie produite par le système de conversion d'énergie. Nous considérons toujours un microgénérateur à base d'élément piézoélectrique. La différence réside dans la possibilité de dimensionner ce matériau en fonction du besoin. Nous pouvons alors adapter sa taille et sa position pour maximiser l'énergie récupérée.

Nous avons choisi le matériau piézocéramique PSI 5A S4 ENH, commercialisé par la société Piezo System Inc. Il se présente sous forme de films redimensionnables. Les propriétés principales sont données dans le tableau ci-dessous :

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Compliance piézoélectrique | $s^E = \begin{pmatrix} 0.3333 & -0.0967 & -0.0967 & 0 & 0 & 0 \\ -0.00967 & 0.3333 & -0.0967 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0967 & -0.0967 & 0.3333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.86 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.86 \end{pmatrix} \cdot 10^{-9} m^2 / N$ |
| Constante piézoélectrique  | $d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1.9 \\ 0 & 0 & -1.9 \\ 0 & 0 & 3.9 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot 10^{-10} m/V$   |
| Permittivité relative      | $\epsilon_r = \begin{pmatrix} 1.06 & 0 & 0 \\ 0 & 1.06 & 0 \\ 0 & 0 & 1.06 \end{pmatrix} \cdot 10^{-10} F/m$  |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Permittivité diélectrique | $\epsilon_p = \begin{pmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{pmatrix} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ |
| Module d'Young            | $E = 160 \text{ GPa}$  |
| Coefficient de Poisson    | $\nu = 0.42$   |
| Densité                   | $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$   |

**Tableau V. 7 : Propriétés du matériau piézoélectrique (PSI 5A S4 ENH)**

### 5.3.2. Conditions initiales et conditions aux limites

Ansys dispose de divers éléments piézoélectriques. Nous avons choisi les suivants pour modéliser notre système :

- SOLID 186 pour la poutre,
- SOLID 126 pour le film piézoélectrique.

La structure est maillée avec des éléments quadratiques. Elle est encastree à une extrémité et libre à son autre extrémité (Figure V. 18).

Une force de 15 mN est appliquée sur l'extrémité libre et une tension nulle est imposée sur la surface du matériau piézoélectrique en contact avec le substrat. Nous faisons également l'hypothèse des petites perturbations (Tableau V. 8).

|                        |                    |  |
|------------------------|--------------------|--|
| Type de comportement   | Vision matérielle  | SOLID126 et SOLID 186<br>Loi de comportement linéaire  |
|                        | Vision géométrique | Petites déformations   |
|                        | Vision temporelle  | Statique   |
| Conditions aux limites | Statiques          | Encastrement à l'une des extrémités de la poutre<br>Potentiel nul sur une des électrodes<br>Force sur l'autre extrémité de la poutre |
| Maillage               |                    | Éléments quadratiques  |
| Résolution             | Processeur         | Pentium (R) Dual-Core CPU E5300 à 2,60GHz  |
|                        | RAM                | 4 Go   |
|                        | Version d'Ansys    | V11  |

**Tableau V. 8 : Modèle utilisé pour la simulation**

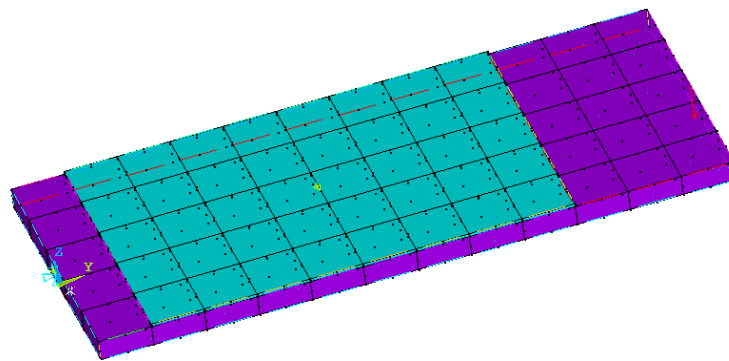


Figure V. 18 : Représentation de la structure cantilever

### 5.3.3. Analyse

L'analyse en éléments finis permet d'obtenir la tension générée par la structure en fonction du déplacement. La Figure V.20 montre la répartition de la tension sur la structure. Cette répartition va influencer le positionnement des électrodes sur la couche piézoélectrique.

Pour une force de 15 mN, la tension maximale atteint 12,8V (Figure V.20), pour un déplacement de 2,7  $\mu\text{m}$  (Figure V.21). Le déplacement maximal est de 24  $\mu\text{m}$ . De plus, l'hypothèse de départ (HPP) est vérifiée car les déformations sont inférieures à 1 % (Figure V.19) et les rotations sont inférieures à 4°. Nous restons également en élasticité linéaire puisque la contrainte maximale est inférieure à la limite élastique du matériau.

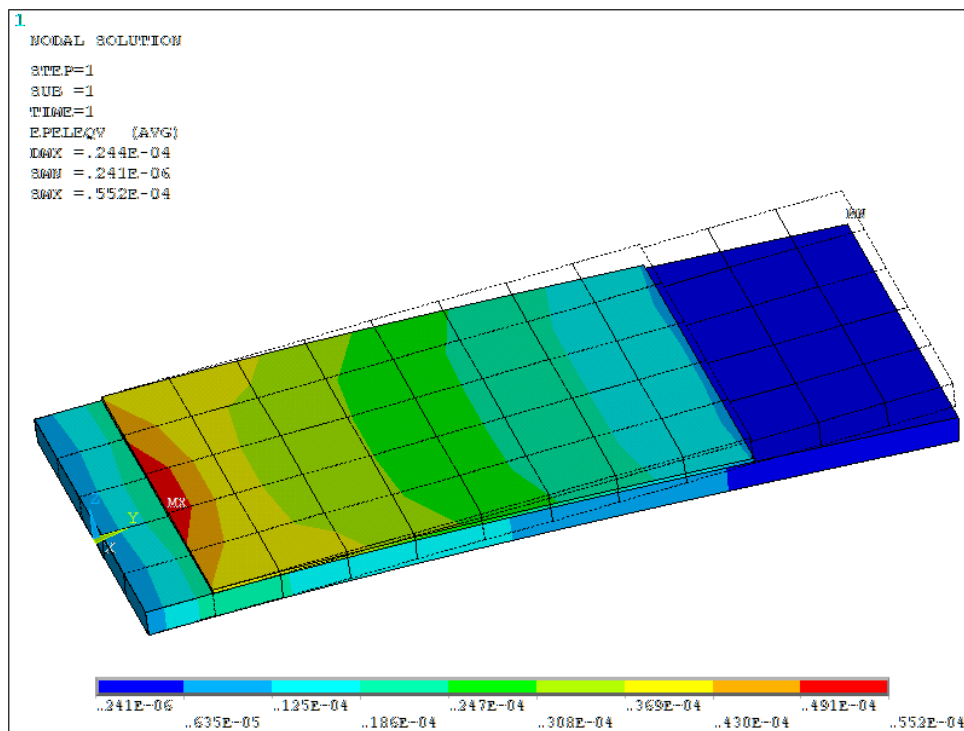


Figure V.19 : Représentation de la déformation (en %)



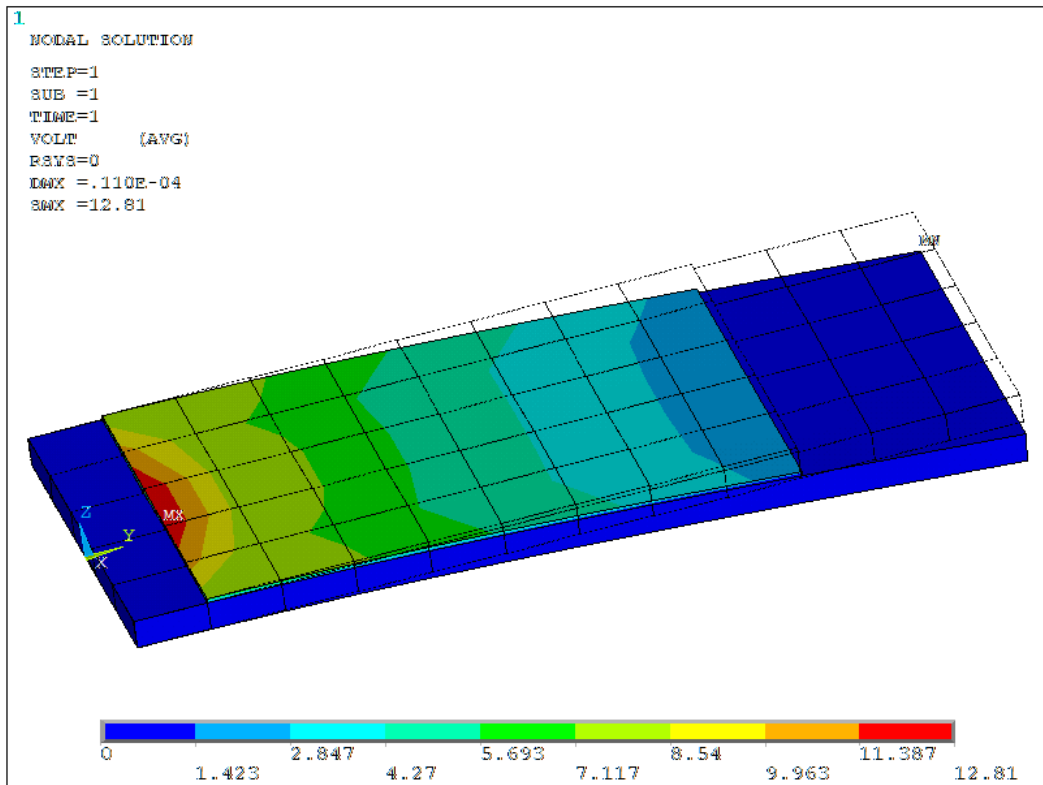


Figure V.20 : Représentation de la tension (en V)

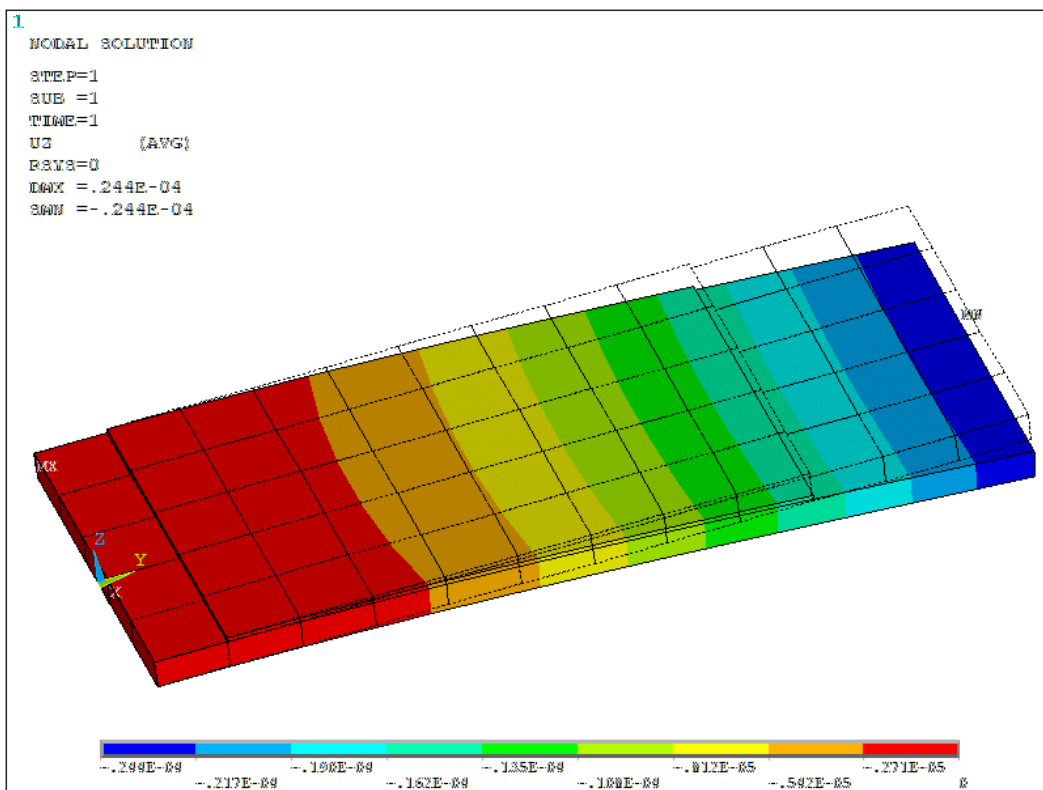


Figure V.21 : Représentation du déplacement (en m)

A partir de là, nous pouvons tester différentes configurations pour augmenter la puissance générée par le convertisseur piézoélectrique. Pour cela, nous regardons l'influence des paramètres suivants :

- la position de l'élément piézoélectrique sur la poutre,
- la longueur de l'élément piézoélectrique,
- le rapport entre les épaisseurs du matériau piézoélectrique et de la poutre.

*a. Position de l'élément piézoélectrique*

La puissance générée par les matériaux piézoélectriques posés sur des structures vibrantes est directement liée à la déformation de ces structures. Comme le montrent la Figure V.19 et la Figure V.20, la puissance générée est maximale pour une déformation maximale.

Dans notre structure, cette déformation est maximale à proximité de l'extrémité fixe de la poutre, comme le montre la Figure V.19. Nous vérifions également sur la Figure V.20 que la tension générée par l'élément piézoélectrique est maximale à cet endroit. Le décalage entre l'extrémité fixe de la poutre et l'élément piézoélectrique est de 5 mm.

*b. Longueur de l'élément piézoélectrique*

Les matériaux piézoélectriques se comportent comme des capacités accumulant des charges. Or, l'accumulation de ces charges est directement liée à la surface d'une capacité. Par conséquent, les dimensions de l'élément piézoélectrique ont une influence sur la puissance qu'ils génèrent en sortie.

Dans notre cas, nous constatons que la tension en sortie du convertisseur piézoélectrique augmente très légèrement lorsque la longueur de l'élément piézoélectrique  $L_p$  diminue. Cette variation est inférieure à 1 % et reste donc négligeable. Nous considérons donc que la longueur n'a pas d'influence notable sur l'énergie générée. Cependant, dans certaines configurations, ce paramètre doit être considéré.

En effet, lorsque le matériau piézoélectrique atteint une certaine longueur, il affecte les caractéristiques du dispositif et change son comportement (section, module d'Young et fréquence propre du dispositif). Ce qui entraîne une diminution de la déformation de la poutre et donc de la quantité d'énergie générée.

*c. Rapport entre les épaisseurs du matériau piézoélectrique et de la poutre*

Nous examinons ici l'influence du rapport des épaisseurs du matériau piézoélectrique et de la poutre, respectivement notées  $H_p$  et  $H_b$ , sur la tension en sortie du convertisseur. Nous trouvons une tension plus grande pour un rapport égal à 0,5, ce qui correspond à une épaisseur de 1 mm pour le matériau piézoélectrique (Tableau V.9). Pour la suite, nous conservons une épaisseur de 0,5 mm, disponible chez le fabricant. Néanmoins, cette étude est intéressante lors de la réalisation de systèmes de récupération d'énergie conçus à partir de dépôts de couches piézoélectriques sur du silicium.

| Épaisseur de l'élément piézoélectrique (mm) | Tension maximale (V) | Déplacement au niveau de l'électrode ( $\mu\text{m}$ ) | Déplacement extrémité libre ( $\mu\text{m}$ ) |
|---|----------------------|--|---|
| 0,3   | 28,46                | 2,7  | 24,4  |
| 0,4   | 39,22                | 2,7  | 24,4  |
| 0,5   | 50,63                | 2,69   | 24,3  |
| 0,7   | 79,30                | 2,69   | 24,2  |
| 0,9   | 110,14               | 2,69   | 24,2  |
| 1   | 160,95               | 2,68   | 24,1  |
| 1,25  | 129,01               | 2,68   | 24,1  |

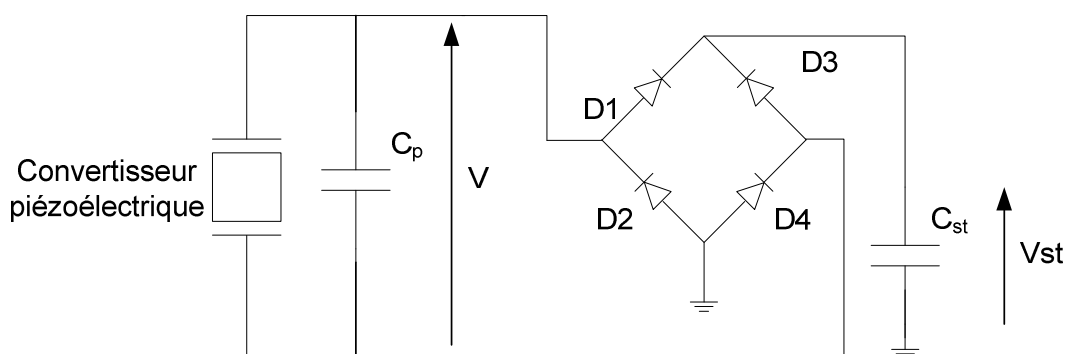
**Tableau V.9 : Évolution de la tension générée par le convertisseur en fonction de l'épaisseur de l'élément piézoélectrique**

Pour la suite de l'étude, nous considérons un élément piézoélectrique à base du matériau PZT-5A-S4-ENH. La longueur, la largeur et l'épaisseur valent respectivement 25 mm, 25 mm et 0,5 mm. Cet élément est fixé sur la poutre décrite dans le chapitre II.

#### 5.3.4. Démarche de conception et de modélisation des convertisseurs AC/DC

A partir des simulations de l'élément piézoélectrique sous Ansys, nous avons obtenu la tension maximale générée pour les dimensions optimales de l'élément piézoélectrique. Nous étudions maintenant le circuit électronique qui va convertir cette tension en une tension exploitable par l'application.

La tension générée par le convertisseur piézoélectrique est redressée à l'aide d'un pont de diodes. Une représentation du circuit est donnée par la Figure V. 22. Cette représentation simplifiée permet de développer le modèle analytique pour obtenir des critères de conception adaptés au problème.



**Figure V. 22 : Représentation du circuit de redressement**

Il existe trois états pour le circuit de la Figure V. 22. Pour simplifier l'analyse, nous supposons que les diodes sont idéales. Cette hypothèse ne modifie pas le fonctionnement de

base du circuit. Le modèle idéal de la diode considère que la tension de seuil est nulle, que la résistance interne est nulle et qu'il n'y a pas de courant de fuite.

- Étape 1 : quand la tension de sortie  $V$  augmente et atteint  $V_{st}$  ( $V = V_{st}$  car  $V_{th} = 0$ ), les diodes  $D_1$  et  $D_4$  sont passantes et les diodes  $D_2$  et  $D_3$  sont bloquées.
- Étape 2 : quand la tension de sortie  $V$  diminue et atteint  $-V_{st}$ , les diodes  $D_1$  et  $D_4$  sont bloquées et les diodes  $D_2$  et  $D_3$  sont passantes.
- Étape 3 : quand  $-V_{st} < V < V_{st}$ , les quatre diodes sont bloquées.

Dans l'étape 3, l'équation de la partie mécanique du convertisseur piézoélectrique est donnée par l'équation suivante :

$$\ddot{S} = \frac{-k_{sp}}{m} S - \frac{b_m b^{**}}{m} \dot{S} + \frac{k_{sp} \cdot d}{m t_c} V + b \ddot{y} \quad (V.7)$$

avec  $k_{sp} = Y \cdot b^* \cdot b^{**}$ , la raideur effective du système

$b^*$  est un coefficient qui relie la déformation au déplacement vertical

$$\left( z = \frac{S}{b^*} \right)$$

$b^{**}$  est une constante géométrique liant la contrainte,  $T$ , à la force exercée à l'extrémité de la poutre  $\left( T = \frac{m(\ddot{y} + \ddot{z})}{b^{**}} \right)$ .

Dans cette étape, le circuit équivalent du convertisseur piézoélectrique est donné par la Figure V. 23.

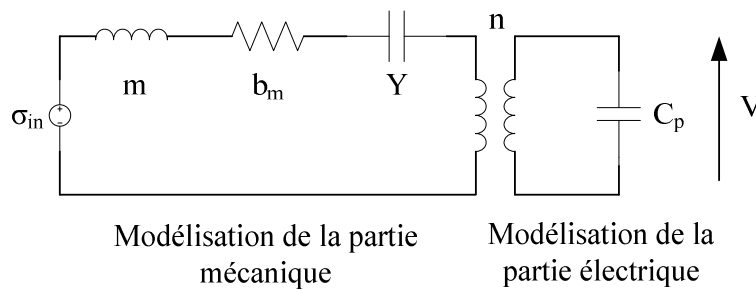


Figure V. 23 : Circuit équivalent d'un convertisseur piézoélectrique

L'équation de la partie électrique est donnée par l'équation (V.8)

$$\dot{V} = \frac{-Y \cdot d \cdot t_c}{\epsilon} \dot{S} \quad (V.8)$$

Dans l'étape 2, les résultats sont identiques (le circuit reste le même, seule la polarité de  $V$  est inversée).

Pour les étapes 1 et 2, la partie électrique est modélisée par l'équation suivante et le circuit équivalent est représenté par la Figure V. 24 :

$$\dot{V} = \frac{-Y.d.t_c}{C + C_{st}} \dot{S} \quad (\text{V.9})$$

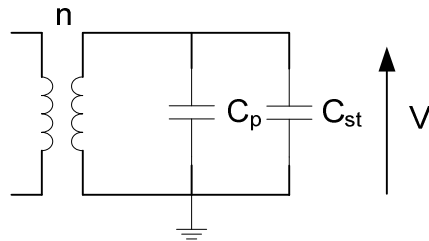


Figure V. 24 : Circuit équivalent de la partie électrique du convertisseur piézoélectrique (étapes 1 et 2)

Le Tableau V.10 résume les équations associées aux différentes étapes de fonctionnement du récupérateur d'énergie.

| Étape         | Modélisation   |
|---------------|--|
| Étapes 1 et 2 | $\begin{cases} \ddot{S} = \frac{-k_{sp}}{m} S - \frac{b_m b^{**}}{m} \dot{S} + \frac{k_{sp} d}{m h_p} V + b \ddot{y} \\ \dot{V} = \frac{-Y.d.t_c}{C + C_{st}} \dot{S} \end{cases}$ |
| Étape 3       | $\begin{cases} \ddot{S} = \frac{-k_{sp}}{m} S - \frac{b_m b^{**}}{m} \dot{S} + \frac{k_{sp} d}{m h_p} V + b \ddot{y} \\ \dot{V} = \frac{-Y.d.t_c}{\epsilon} \dot{S} \end{cases}$   |

Tableau V.10 : Récapitulatif des modèles associés

Nous supposons, pour l'étude, que les vibrations en entrée sont représentées par une sinusoïde avec une fréquence et une amplitude fixes. Nous supposons également que le niveau de la contrainte dans le matériau piézoélectrique est une sinusoïde avec une fréquence et une amplitude fixes. Autrement dit, nous faisons l'hypothèse que la tension dans la capacité de stockage n'affecte pas la contrainte du convertisseur. Cette hypothèse n'est pas totalement vraie si nous analysons l'équation du mouvement (V.7). En effet, la tension aux bornes de la capacité influence l'amortissement et donc l'amplitude de la contrainte. Cependant, comme le changement est faible, l'approximation reste acceptable.

Soit  $V_S$ , la tension qui résulterait de la conversion piézoélectrique sans charge (circuit ouvert). Le circuit est représenté par la Figure V. 23. A partir de l'équation (V.9), nous obtenons  $V_S$  (V.10) :

$$V_S = \frac{-Ydt_c}{n\epsilon} S \quad (\text{V.10})$$

Avec les hypothèses énoncées précédemment, le circuit équivalent de la Figure V. 25 est obtenu, pour l'étape 1 où  $D_1$  et  $D_4$  sont passantes.

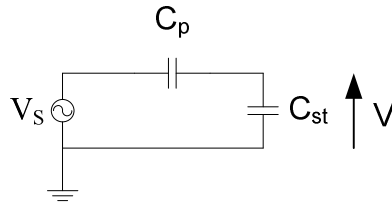


Figure V. 25 : Circuit équivalent pour l'étape 1 ( $D_1$  et  $D_4$  passantes)

La tension  $V_S$  est donnée par  $V_S = V_S \cdot \sin(\omega t)$  et la tension  $V$  est la tension de sortie du convertisseur piézoélectrique.

Durant chaque demi-période de la sinusoïde, une certaine quantité de charge est transférée à la capacité de stockage  $C_{st}$ , ce qui accroît la tension à ces bornes. Cette quantité de charge est donnée par l'équation (V.11).

$$\Delta Q = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} C_p \cdot \frac{d(V_S - V)}{dt} \cdot dt \quad (\text{V.11})$$

$t_1$  représente le temps où  $D_1$  et  $D_4$  deviennent passantes (début de la phase 1).

$t_2$  représente le temps où  $D_1$  et  $D_4$  deviennent bloquées (début de la phase 3).

L'équation (V.11) peut s'écrire de la manière suivante (V.12) :

$$\Delta Q = C_{st} (V(t_2) - V(t_1)) \quad (\text{V.12})$$

L'augmentation de l'énergie par demi-période,  $\Delta E$  est donnée par l'équation (V.13).

La puissance transférée vaut alors  $2f\Delta E$ , où  $f$  représente la fréquence du signal de vibration. Elle est donnée par l'équation (V.14).

$$\Delta E = \frac{1}{2} [Q(t_2) \cdot V(t_2) - Q(t_1) \cdot V(t_1)] = \frac{1}{2} [V(t_2)^2 - V(t_1)^2] \cdot C_{st} \quad (\text{V.13})$$

$$P = \frac{\omega \cdot C_{st}}{2\pi(C_{st} + C_p)} \cdot \left[ C_p^2 \cdot V_S^2 + 2C_{st}C_p V_S V(t_1) - C_p V(t_1)^2 (2C_{st} + C_p) \right] \quad (V.14)$$

Nous étudions maintenant le modèle analytique pour une charge capacitive. Pour cela, l'équation (V.14) a été simplifiée. La tension  $V_2$  est remplacée par  $V_S$  qui dépend de l'amplitude des vibrations en entrée, de la propriété des matériaux et de la géométrie de conception. La seule variable qui change dans l'équation (V.14) est  $V_I$ . Nous constatons que la puissance transmise à la capacité en fonction du temps durant une demi-période dépend de  $V_I$ , la tension de la capacité de stockage en début de cycle.

Le point de fonctionnement maximal est obtenu pour la moitié de la tension maximale  $V_S$ .

$$V_{topt} = \left( \frac{C_{st}}{2C_{st} + C_p} \right) \cdot V_S \quad (V.15)$$

Comme  $C_{st} \gg C_p$ ,

$$V_{topt} \approx \frac{V_S}{2} \quad (V.16)$$

Certaines considérations vont guider la sélection de la capacité de stockage.

Tout d'abord, la capacité doit être assez grande pour fournir le courant à la charge durant la phase active, en assurant une tension minimale nécessaire au fonctionnement du convertisseur DC/DC. Ensuite, il faudra stocker autant d'énergie que possible. Dans ce cas, les supercapacités ayant des valeurs supérieures à  $1 \text{ F/cm}^3$  semblent adéquates.

La contrainte du volume influe aussi sur le choix de la supercapacité. En plus de ces considérations, l'équation (V.14) montre que le niveau de puissance transmise est lié à la valeur de la capacité de stockage. Nous constatons que pour une configuration donnée, la puissance est meilleure quand la capacité de stockage  $C_{st}$  est largement supérieure à la capacité piézoélectrique  $C_p$ . Il est donc souhaitable que cette capacité soit aussi grande que possible, dans la limite de taille du système.

La capacité du générateur piézoélectrique a aussi une influence sur la puissance transférée (V.14). Toutefois, cette capacité ne peut être changée sans modifier les paramètres de conception, ce qui modifie la relation entre la contrainte et  $V_S$  et celle entre l'entrée des vibrations et la contrainte moyenne.

L'équation (V.14) montre qu'en considérant tous les autres paramètres constants, la puissance de sortie est plus grande pour des grandes valeurs de  $C_p$  (si  $C_{st} > C_p$ ).

Le modèle développé pour une charge capacitive donne des bases pour la conception :

- $C_{st}$  doit être la plus grande possible, en respectant la contrainte de taille du système.

- $C_{st}$  ne doit pas être trop grande pour se charger suffisamment.
- Le système doit être conçu de manière à ce que la tension de la capacité  $C_{st}$  durant le fonctionnement ne descende pas en dessous d'une tension égale à la moitié de la tension maximale générée par le convertisseur piézoélectrique, sous peine de diminuer considérablement le transfert de puissance.
- $C_{st}$  doit être assez grande durant un cycle pour ne pas que sa tension diminue sous 25% de la tension maximale  $V_s$ , lors de la phase active (on).
- Idéalement, la charge devrait ajuster son rapport cyclique et adapter l'opération en fonction de la tension aux bornes de  $C_{st}$ .

Pour simuler le nouveau circuit, nous utilisons un pont de diodes constitué de diodes Schottky ayant une tension de seuil de 0,35 V (MB10S de Fairchild Semiconductors). La capacité  $C_p$  vaut 132 pF avec les dimensions retenues pour l'élément piézoélectrique.

Le schéma du circuit est représenté sur la Figure V. 26.

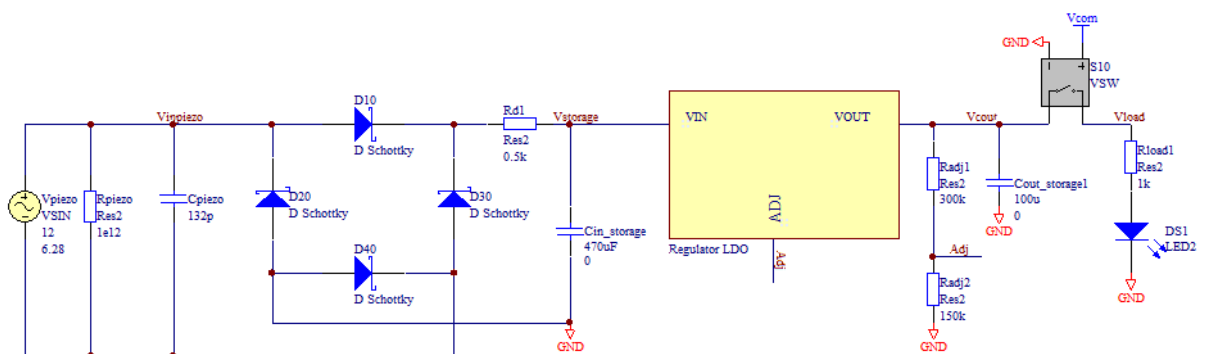


Figure V. 26 : Schéma du circuit réalisé

Les résultats de simulation sont présentés sur la Figure V. 27. La courbe intitulée " $V_{storage}$ " représente la tension aux bornes de la capacité en entrée du régulateur. Elle varie entre 10,8 V et 10,6 V. Cette différence avec la première simulation est due au changement de matériau et de ses caractéristiques intrinsèques (nature et géométrie).

Le temps nécessaire à la capacité d'entrée pour se charger et activer le régulateur est égal à 6,2 s. Par conséquent, la configuration choisie permet d'avoir une périodicité de mesures plus petite que dans le cas étudié précédemment.



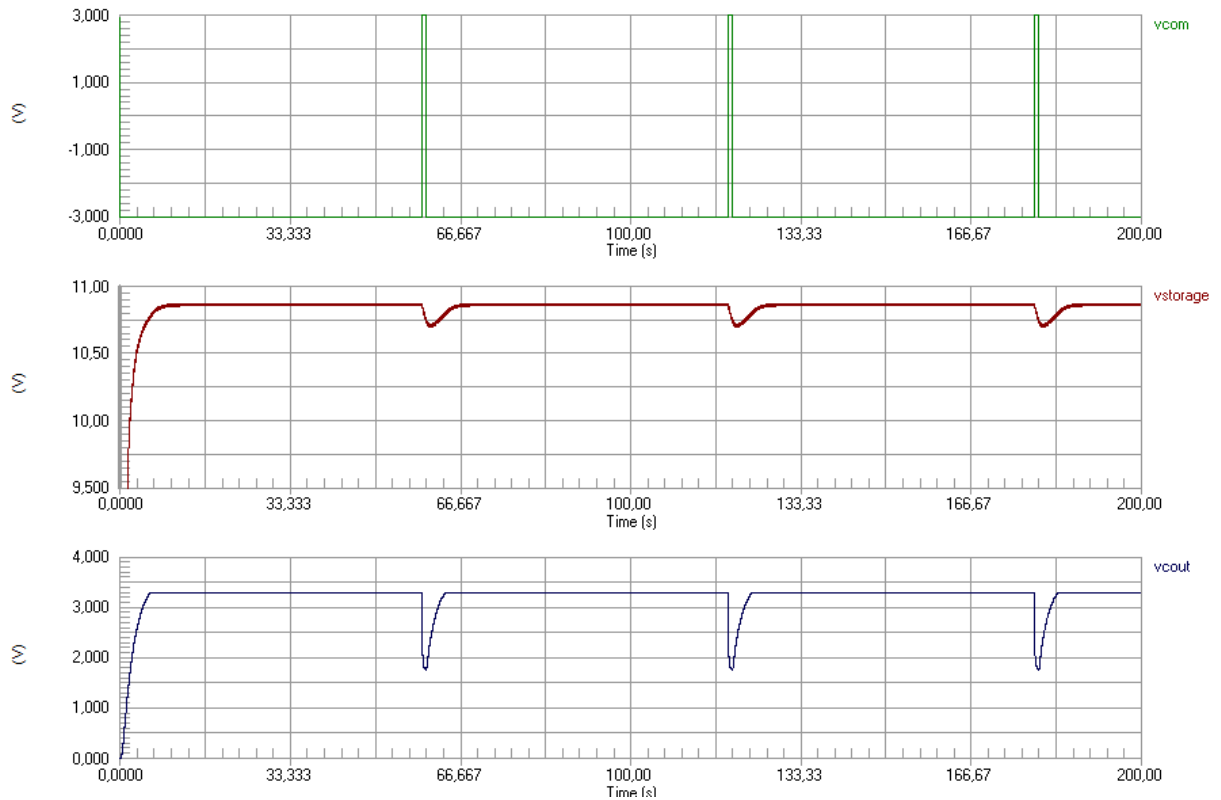


Figure V. 27 : Représentation des signaux générés par le système

## 5.4. VALIDATION DE LA MÉTHODE PAR UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Pour valider nos résultats et montrer que la méthode nous a conduits à une bonne solution, nous avons réalisé un banc de tests, à partir de composants du commerce. Dans cette section, nous présentons ce banc ainsi que les résultats obtenus.

### 5.4.1. Description du banc de tests

Le démonstrateur que nous avons réalisé comporte les éléments suivants (Figure V. 29) :

- Partie mécanique
  - un actionneur piézoélectrique commercialisé par la société Noliac et présenté au début de ce chapitre. Il s'agit d'une céramique multicouche (CMBP09),
  - un moteur à courant continu de la marque Mellor Electric (RS555),
  - une came excentrique en PVC rigide.
- Partie électronique
  - un convertisseur AC/DC : nous avons choisi un convertisseur intégrant un régulateur.
  - une capacité de stockage de 470  $\mu\text{F}$ , en entrée.

Pour cette expérimentation, nous avons choisi le LTC3588, commercialisé par Linear Technology. Ce module réalise le redressement de la tension générée par l'élément piézoélectrique à l'aide d'un pont de diodes à double alternance constitué de diodes à faible tension de seuil (0,4 V). Il régule également la tension à l'aide d'un abaisseur à découpage à hystérésis dont le rendement est voisin de 90 %, pour une charge pouvant aller de 60  $\mu\text{A}$  à 100 mA, à 3,3 V. L'énergie est stockée dans un condensateur externe et l'énergie en excès est dissipée dans un régulateur parallèle interne. Un mode d'arrêt en cas de sous tension (ULVO), à faible courant de repos (450 nA), avec une hystérésis importante, permet à la charge de s'accumuler dans le condensateur de stockage jusqu'à ce que le convertisseur abaisseur puisse transférer une partie de l'énergie emmagasinée sur la sortie. Le LTC3588 régule alors la tension de sortie, en ne consommant que 950 nA de courant de repos tout en chargeant en continu le condensateur de stockage. (Figure V. 28) Quand il est actif, il consomme 150  $\mu\text{A}$ .

L'application est une DEL, commercialisée par OSRAM Opto Semiconductors (référence LS T67K-J1L2-1). Cette application fonctionne de manière cyclique, sur une période de 60 s et reste allumée pendant 1 s. Nous rappelons que la DEL sert à simuler la consommation de l'application initiale (accéléromètre sur poutre), qui vaut 650  $\mu\text{A}$ .

Nous utilisons une came avec double excentricité de 1 mm. Le moteur est alimenté avec une tension de 3 V, qui correspond à une fréquence de 6,28 Hz. Ainsi, l'élément piézoélectrique est sollicité mécaniquement avec une came excentrique commandée par un moteur à courant continu. La déformation de cet élément piézoélectrique va générer une tension proportionnelle qui sera ensuite stockée.

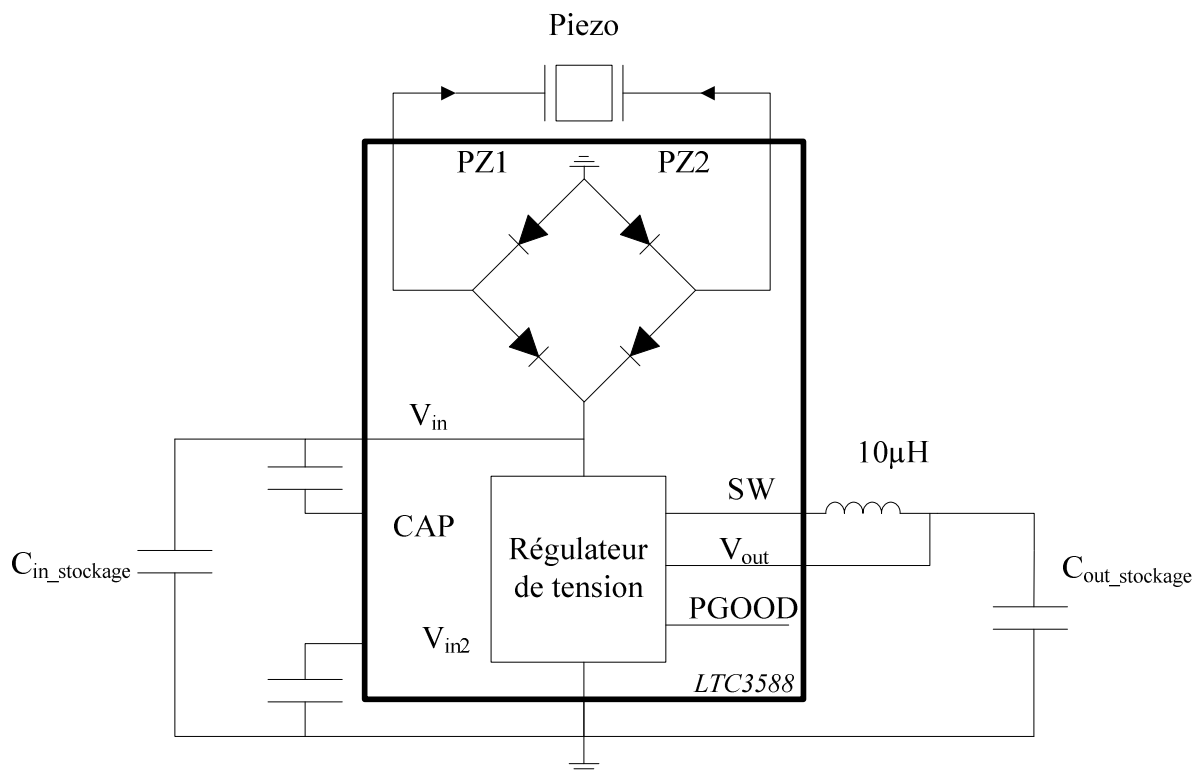


Figure V. 28 : Schéma de conditionnement électronique

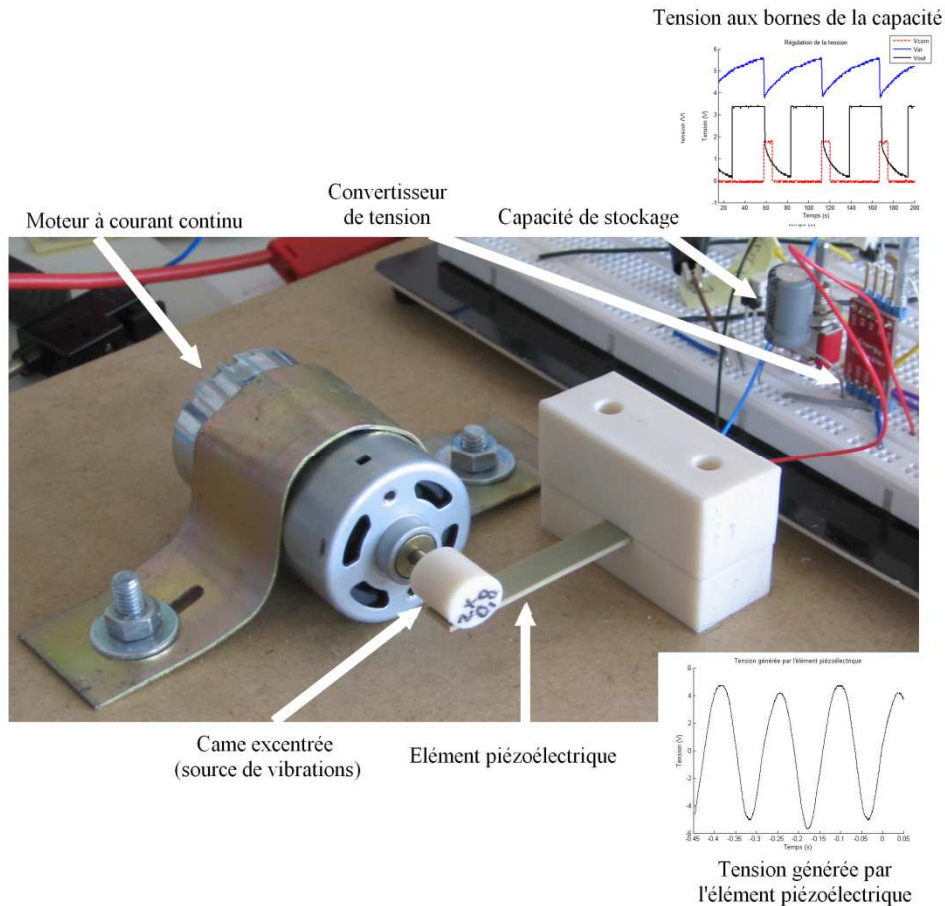


Figure V. 29 : Banc expérimental réalisé à partir de composants du commerce

## 5.4.2. Analyse des résultats expérimentaux

Dans cette section, nous présentons la vérification des modèles utilisés lors de la simulation de l'élément piézoélectrique. Ensuite, nous exposons les résultats des plans d'expérience qui nous ont servi à valider notre expérimentation. Enfin, nous réalisons un bilan énergétique de notre dispositif.

### 5.4.2.1. Vérification des modèles

#### Équation piézoélectrique et circuit équivalent

Le circuit équivalent d'un élément piézoélectrique est donné par la Figure V. 4. Nous en déduisons les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \frac{d^E}{C_p} \cdot \frac{R_p}{R_p + \frac{1}{jC\omega}} \cdot F = Z_{eq} \cdot i_0 \\ i_0 = d^E \cdot \frac{dF}{dt} \\ C_p = \frac{A\varepsilon^T}{h} \end{array} \right. \quad (V.17)$$

A partir de ces équations, nous constatons qu'un matériau piézoélectrique fournit un courant proportionnel à la variation de la force appliquée et une tension à vide proportionnelle à cette force. Nous avons vérifié cela au cours de nos tests, comme l'illustre la Figure V. 30.

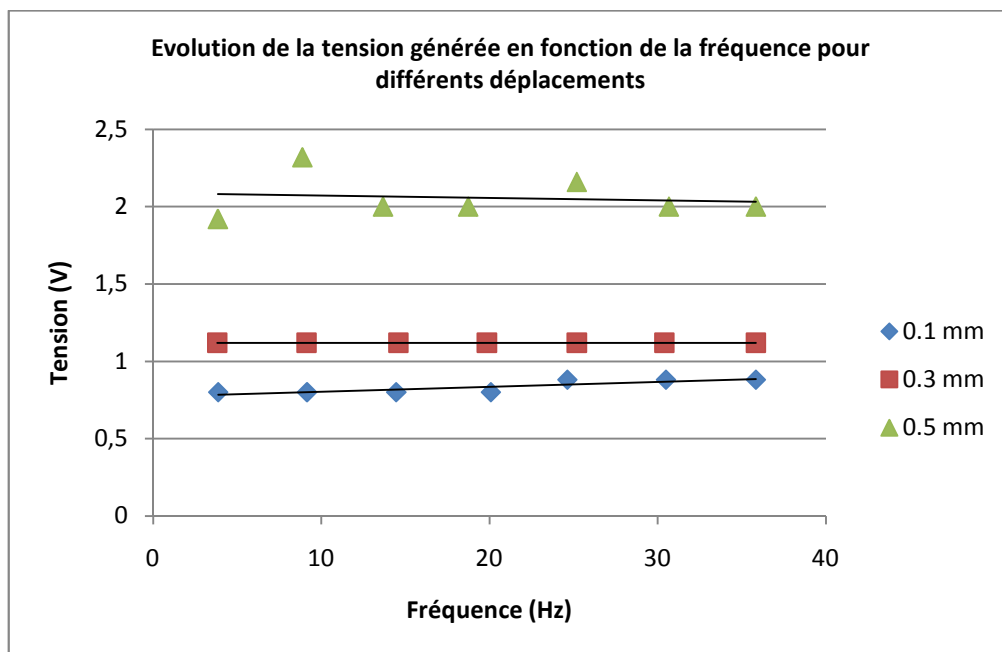


Figure V. 30 : Évolution de la tension en fonction du déplacement

### Vérification du schéma équivalent

Pour vérifier la validité du circuit équivalent du convertisseur piézoélectrique, nous calculons  $R_p$  et  $C_p$ , à partir de données expérimentales.

- Mesure de  $R_p$

Pour mesurer  $R_p$ , nous branchons l'élément piézoélectrique à une source de tension continue et nous l'isolons. Le générateur de courant équivalent se comporte alors comme un circuit ouvert. Nous attendons que la capacité de l'élément piézoélectrique devienne un circuit ouvert. Le circuit est alors donné par la Figure V. 31 :

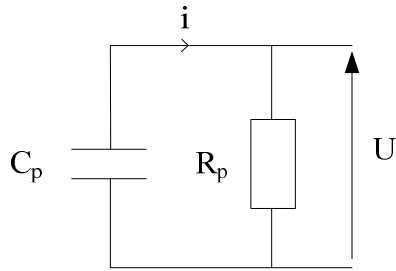


Figure V. 31 : Schéma équivalent de l'élément piézoélectrique (basses fréquences)

Nous mesurons alors le courant et la tension pour calculer  $R_p$ .

$$R_p = \frac{U}{I} = 64k\Omega \quad (\text{V.18})$$

- Mesure de  $C_p$

A partir de la constante de décharge  $\tau = R_p C_p$ , nous déduisons  $C_p$  :  $C_p = 1 \mu\text{F}$ .

Les résultats expérimentaux montrent une décroissance exponentielle de la tension, qui correspond à la réponse d'un premier ordre (Figure V. 32). La constante de temps (décharge à 63 %)  $\tau$  vaut 64 ms. Pour vérifier ce modèle, nous avons tracé la courbe équivalente d'un premier ordre théorique, avec les paramètres  $R_p$  et  $C_p$ , calculés. Le calcul de ces paramètres donne une approximation du système.

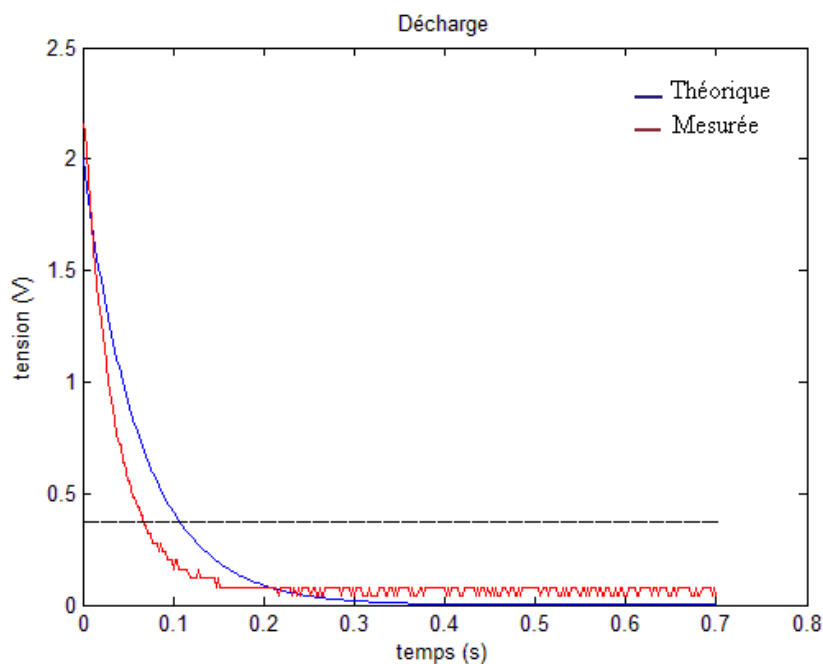


Figure V. 32 : Décharge du condensateur piézoélectrique dans la résistance piézoélectrique

- Circuit accumulateur

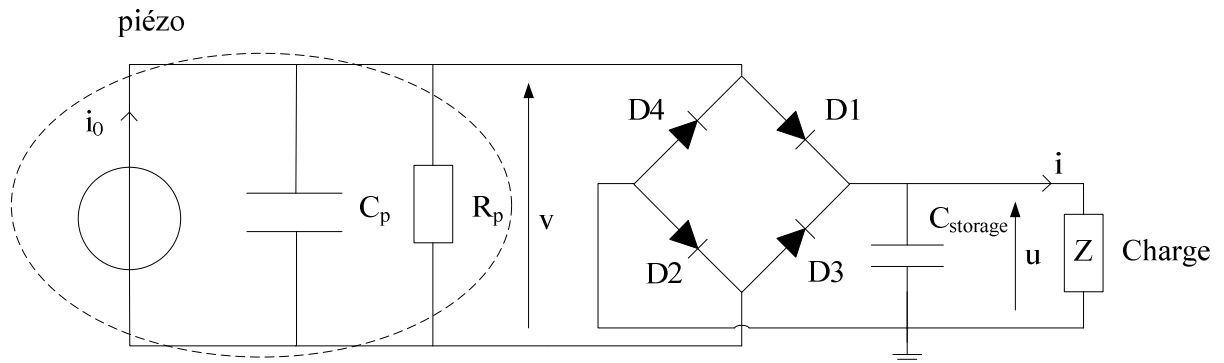


Figure V. 33 : Circuit équivalent du dispositif

La tension aux bornes de la charge C est  $u = |v| - 2v_{th}$ .

A chaque alternance, le circuit équivaut à un élément piézoélectrique en parallèle avec une charge en série avec deux diodes.

$$Z_{eq} = \frac{R_p}{1 + j\omega R_p (C_p + C)} \quad (V.19)$$

Nous aurons alors  $|u| = Z_{eq} \cdot |i_0|$  et  $v = |u| - 2v_{th}$

L'énergie emmagasinée par la capacité vaut :

$$|E| = \frac{1}{2} C |u|^2 \quad (V.20)$$

### Évaluation de l'énergie stockée

Nous considérons l'équation (V.20) pour évaluer l'énergie générée lors de la sollicitation de l'élément piézoélectrique, pour différentes fréquences et amplitudes de déplacement.

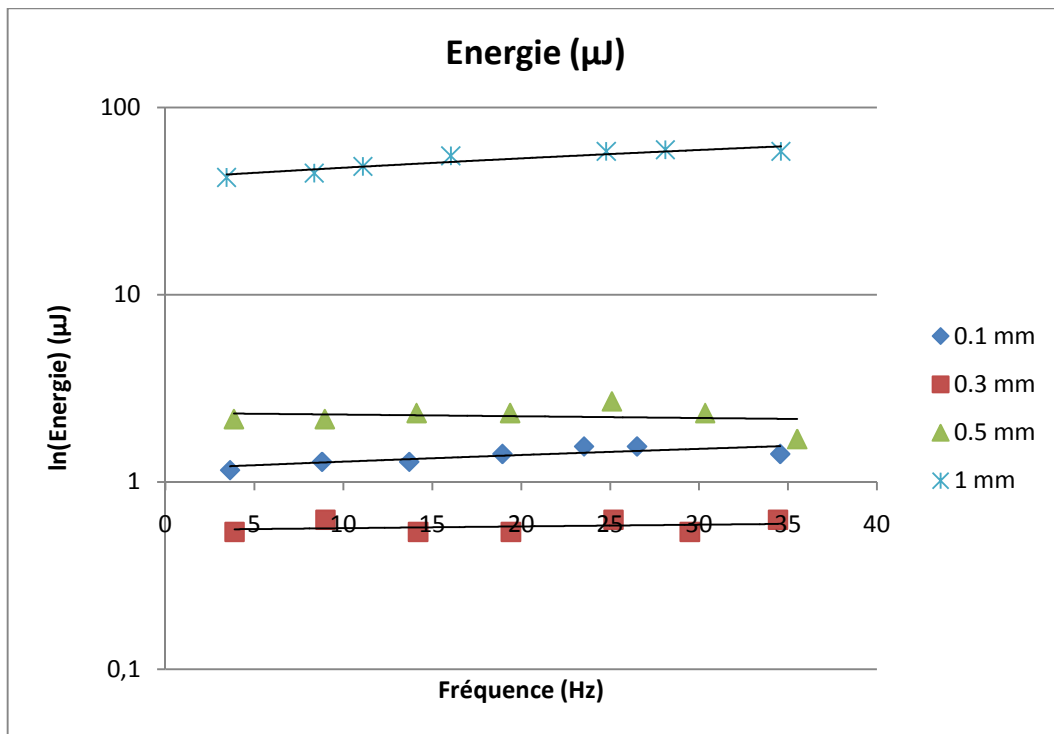


Figure V. 34 : Évolution de l'énergie en fonction du déplacement et de la fréquence de sollicitation

Nous vérifions que la fréquence d'oscillation n'influence pas la quantité d'énergie récupérée pour des valeurs éloignées de la fréquence de résonance de la structure piézoélectrique (130 Hz-180 Hz).

En revanche, nous constatons que pour des fréquences proches de cette valeur, la quantité d'énergie est supérieure (Figure V. 35).

Dans l'intervalle compris entre 120 Hz et 150 Hz, l'énergie est largement supérieure. La sollicitation forcée dans cette gamme de fréquence peut entraîner la destruction du système. C'est pour cette raison que nous n'avons pas testé trop de points dans cette zone. Le second graphe de la Figure V. 35 montre une interpolation de l'énergie générée en fonction de la fréquence de sollicitation.

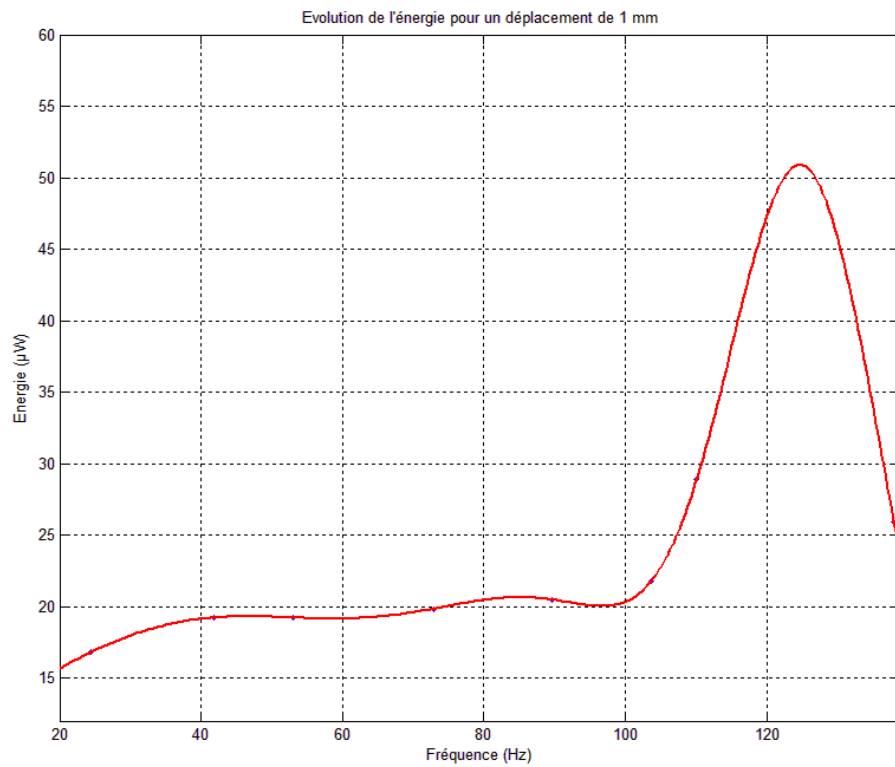
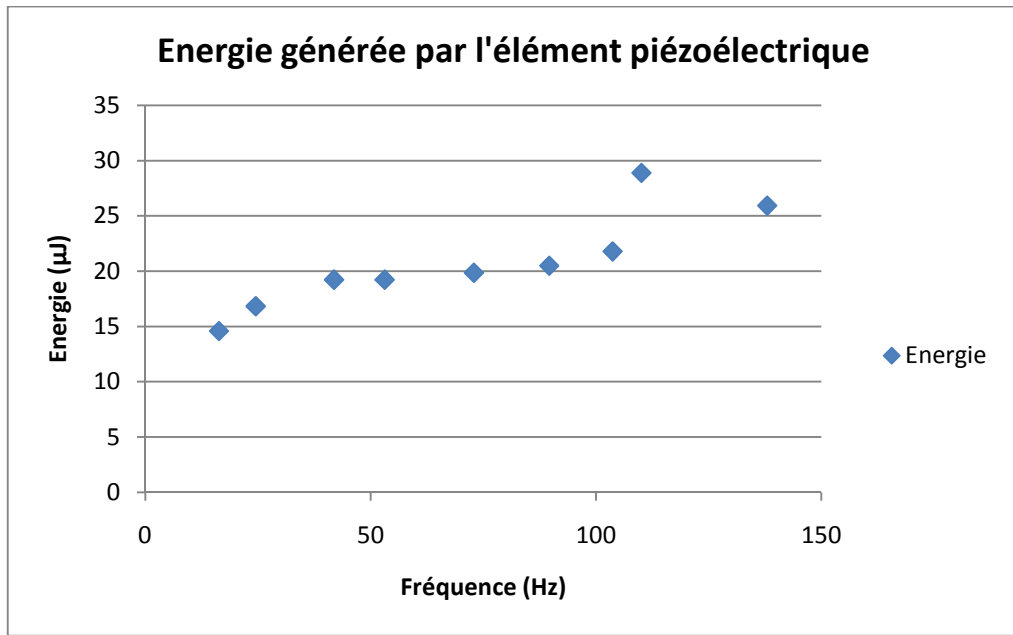


Figure V. 35 : Évolution de l'énergie en fonction du déplacement et de la fréquence de sollicitation



### 5.4.2.2. Étude statistique

Nous présentons l'étude statistique que nous avons faite pour vérifier la validité de notre expérimentation. Cette étude se base sur la mise en œuvre de plans d'expérience pour mettre en avant les paramètres de l'élément piézoélectrique qui ont une influence sur la quantité d'énergie générée.

Nous avons réalisé l'expérimentation pour différentes valeurs du déplacement et de la fréquence. A partir des plans d'expérience, nous observons que le déplacement a une influence sur l'énergie générée par l'élément piézoélectrique.

Nous avons utilisé un plan factoriel à 2 niveaux pour différents déplacements (0,1mm, 0,3mm et 0,5mm) et pour des fréquences éloignées de la fréquence de résonance (de 3 à 35 Hz). Les résultats sont présentés dans le Tableau V. 11.

| Terme                 | Effet | Coefficient |
|-----------------------|-------|-------------|
| Constante             |       | 10,30       |
| Déplacement           | 19,9  | 9,950       |
| Fréquence             | 5,7   | 2,85        |
| Déplacement*fréquence | 5,64  | 2,82        |

**Tableau V. 11 : Effets et coefficients estimés pour l'énergie pour des basses fréquences et différents déplacements (unités codées)**

Le coefficient associé au déplacement (9,95) est plus élevé que le coefficient de la fréquence (2,85) ce qui signifie que le facteur déplacement a beaucoup plus d'influence sur l'expérience que le facteur fréquence. De plus, l'interaction est forte, avec un coefficient égal à 2,82.

Pour connaître l'influence de la fréquence sur l'énergie générée, nous avons également réalisé des tests à des fréquences proches de la résonance (de 16 à 138 Hz), pour un déplacement de 1mm. Dans ce cas, la fréquence a une influence, avec un effet de 5,67 (Tableau V. 12). En revanche, nous ne pouvons pas étudier la corrélation puisque les tests ont été réalisés avec un même déplacement.

Nous n'avons pas fait de tests avec plusieurs déplacements car nous ne pouvons pas aller à des fréquences aussi hautes avec les cames de 0,3 mm, 0,5mm et 0,8 mm. Ces dernières ayant une simple excentricité alors que celle de 1 mm avait trois excentricités.

| Terme                 | Effet | Coefficient |
|-----------------------|-------|-------------|
| Constante             |       | 20,25       |
| Déplacement           | 0     | 0           |
| Fréquence             | 11,34 | 5,67        |
| Déplacement*fréquence | 0     | 0           |

**Tableau V. 12 : Effets et coefficients estimés pour l'énergie pour un déplacement de 1mm et des fréquences proches de la fréquence de résonance (unités codées)**

L'étude du comportement mécanique a montré que le déplacement (et ainsi la déformation) avait une influence sur la quantité d'énergie générée par l'élément piézoélectrique. Cette étude a également mis en avant le fait que la fréquence de sollicitation n'a pas d'influence sur cette énergie, lorsqu'elle est éloignée de la fréquence de résonance du dispositif.

### 5.4.2.3. Tests expérimentaux

Pour la suite de ces tests, nous utilisons une came de 1 mm. Le moteur est alimenté avec une tension de 3 V, qui correspond à une fréquence de 6,28 Hz.

Le signal généré par l'élément piézoélectrique est représenté sur la Figure V. 36. La tension maximale est égale à 5,36 V et la tension minimale vaut -4,96 V, soit une tension crête à crête de 10,32 V (Figure V. 36).

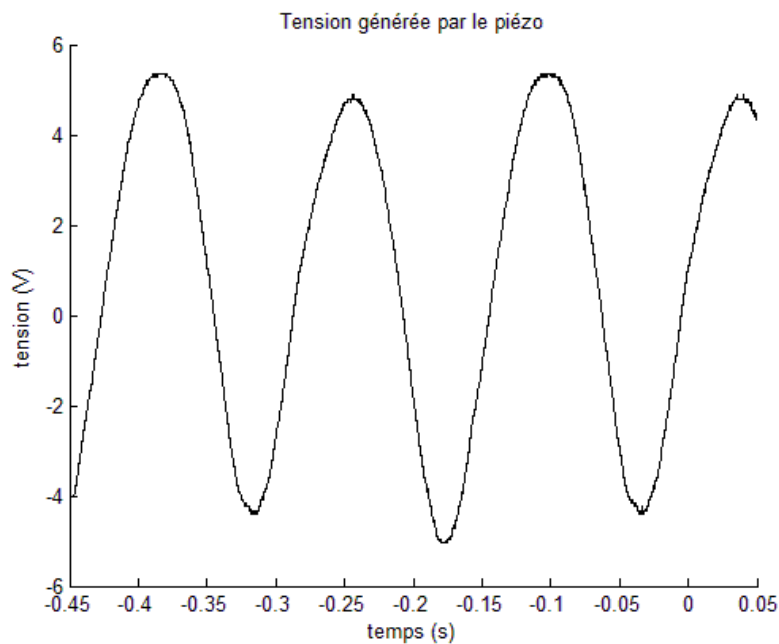


Figure V. 36 : Mesure de la tension générée par l'élément piézoélectrique CMPB08

### Étude de la charge et de la décharge et bilan d'énergie

Nous allons maintenant vérifier le fonctionnement de l'électronique de conversion associée à l'élément piézoélectrique.

La Figure V. 37 montre les différentes tensions relevées au niveau du convertisseur. Elle représente notamment la tension aux bornes de la capacité " $C_{in\_stockage}$ " en sortie du pont de diodes et en entrée du régulateur interne du LTC3588 (signal noté " $V_{in}$ "). La tension " $V_{out}$ " est la tension en sortie du régulateur. Enfin, le signal " $V_{com}$ " est le signal de commutation de l'application.

Sur cette figure, nous constatons que le régulateur fonctionne dès que la tension " $V_{in}$ " atteint 5 V. La sortie du LTC3588 génère alors la tension régulée souhaitée, soit 3,3 V, dans notre cas.

Dans cette configuration, le temps nécessaire pour passer de 3,8 V à 5 V est de 23 s. Avec le régulateur LDO que nous avons simulé précédemment, ce temps n'était que de 17 s.

Ensuite, dès que l'application est mise en route par l'intermédiaire du signal " $V_{com}$ ", la DEL reste allumée pendant 1,3 s, jusqu'à ce que la tension " $V_{out}$ " passe sous le seuil de la diode utilisée. Le signal " $V_{out}$ " représente ensuite la décharge de la capacité de sortie dans le régulateur.

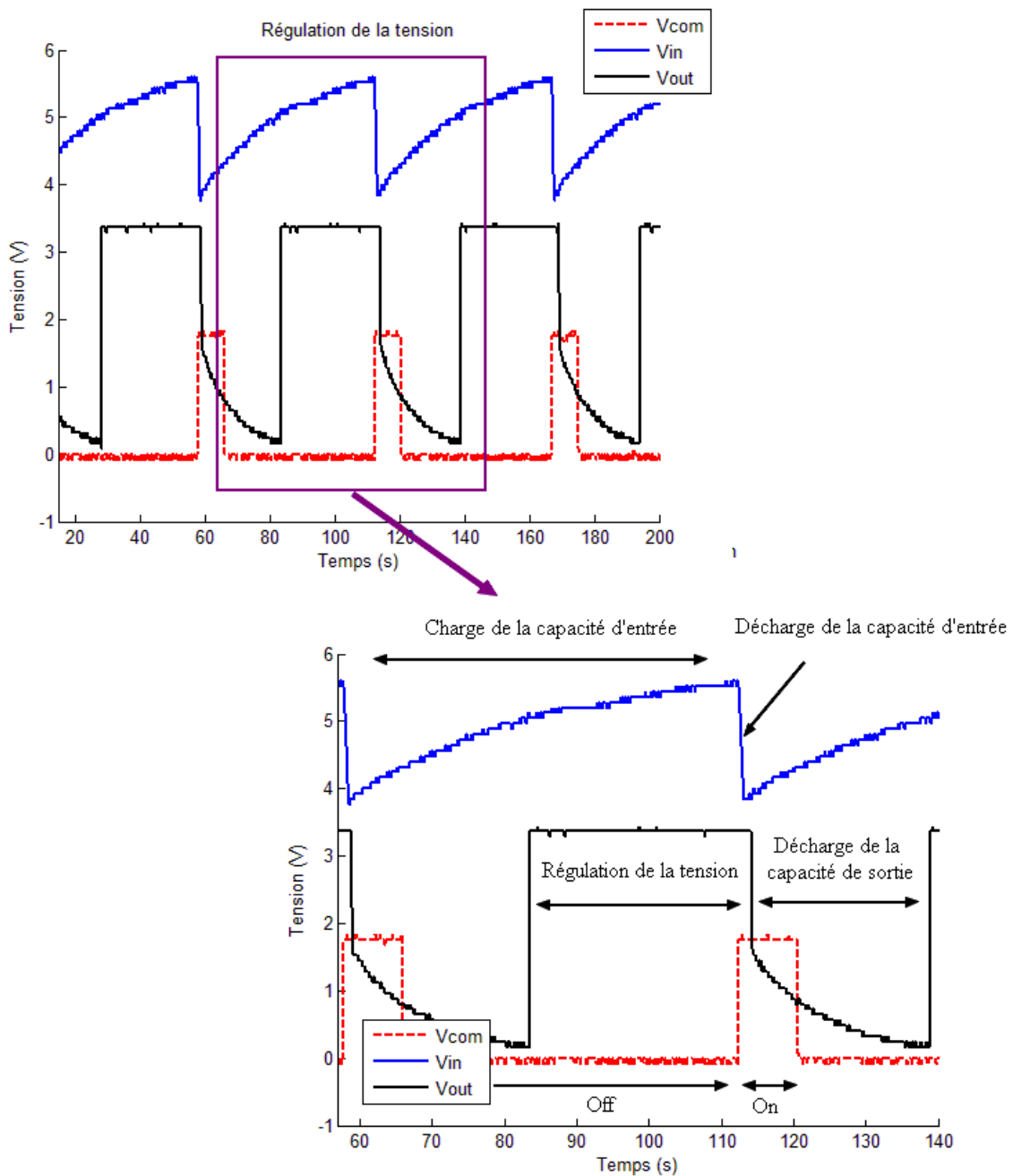


Figure V. 37 : Mesure des signaux en entrée et en sortie du régulateur et de la tension de commande de l'application

Nous avons établi un bilan d'énergie pour le montage réalisé.

L'énergie stockée dans la capacité est égale à 7,49 mJ.

$$E_{st} = \frac{1}{2} C_{st} U^2 = \frac{1}{2} \cdot (470 + 22) \cdot 10^{-6} \cdot 5,52^2 = 7,49 mJ \quad (V.21)$$

La puissance récupérée dans la capacité de stockage en entrée du régulateur (en sortie du pont de diodes) vaut alors 144  $\mu$ W.

$$P_r = \frac{E_{st}}{t_{charge}} = \frac{7,49 \cdot 10^{-3}}{(60 - 8)} = 144 \mu W \quad (V.22)$$

La puissance transférée au régulateur vaut 5,76 mW.

$$P_r = \frac{E_{st}}{t_{led\_on}} = \frac{7,49 \cdot 10^{-3}}{1,3} = 5,76 mW \quad (V.23)$$

La puissance transmise à la DEL est égale à 287,52  $\mu$ W.

$$I = \frac{U_R}{R} = 1 mA \quad (V.24)$$

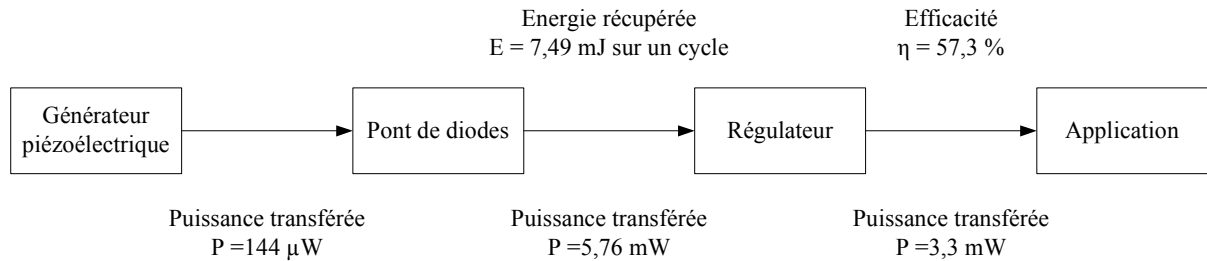
La tension de sortie vaut 3,3 V.

$$P_{lr} = 3,3 mW \quad (V.25)$$

Le rendement est de 57,3 %.

Les résultats expérimentaux montrent que la tension aux bornes de la capacité de stockage, en entrée du LTC3588 varie entre 3,84 V et 5,52 V, contre 4,5 V et 4,8 V avec le régulateur LDO (Figure V. 37). Cette différence s'explique par le fait que le régulateur LDO consomme plus de courant sur le signal d'entrée.

Le flux d'énergie est représenté sur la Figure V. 37. L'énergie stockée dans la capacité entre deux impulsions est égale à 7,49 mJ. La puissance moyenne transférée par le générateur piézoélectrique à la capacité en entrée du régulateur est de 144  $\mu$ W. La capacité se décharge cycliquement à chaque impulsion de la DEL. La puissance transférée depuis la capacité de stockage vers le circuit de conditionnement vaut 5,76W. Enfin, la puissance transmise à l'application est égale à 3,3 mW. Le rendement du convertisseur est donc de 57,3 %.



**Figure V. 38 : Bilan énergétique**

Dans le chapitre II, nous avons vu que la puissance à récupérer pour faire fonctionner le microsystème devait être d'au moins 40  $\mu$ W. Lors de notre expérimentation, nous avons montré que nous pouvions récupérer environ 144  $\mu$ W. Ce montage convient donc pour alimenter notre application.

#### 5.4.2.4. Comparaisons et améliorations

Dans les sections précédentes, nous avons présenté les résultats obtenus à partir d'un composant du commerce, le LTC3588, pour convertir la tension de sortie de l'élément piézoélectrique en une tension adaptée à la charge considérée. Ce composant est un composant générique intégrant des fonctions qui ne sont pas forcément utiles à notre application. Ces fonctionnalités multiples lui confèrent une plus large gamme d'utilisations mais consomment inutilement une partie de l'énergie récupérée.

Nous avons montré que le régulateur que nous avons simulé pour comparer les deux configurations de microgénérateurs piézoélectriques a besoin d'un peu plus de courant que le composant du commerce (régulateur de type buck). Cependant, comme il permet une charge plus rapide des capacités de stockage, il offre la possibilité d'augmenter la fréquence des mesures réalisées par le microsystème.

Nous avons réalisé un circuit intégré comprenant un comparateur, un bandgap mais également un oscillateur pour permettre une configuration de convertisseur buck, en ajoutant des composants externes (Figure V. 39). Lors des tests, ces montages ont montré des consommations trop élevées pour notre application.

Nous avons donc travaillé sur la conception d'un convertisseur spécifique, basé sur des composants sur étagère (COTS). Il se compose d'un pont de diodes Schottky et d'un régulateur LDO utilisant un comparateur fonctionnant sous le seuil des transistors.

Nous avons d'ores et déjà quelques blocs conçus sous Cadence et nous envisageons de les réaliser prochainement sur une puce. A partir des simulations, le comparateur sous le seuil consomme environ 12 nA. Cette faible consommation permet d'envisager son utilisation dans notre circuit de conversion.

Les régulateurs LDO présentent également l'avantage d'avoir une contre-réaction réglable pour améliorer le temps de charge de la capacité de stockage, en sortie et donc une fréquence de fonctionnement plus grande, pour l'application.

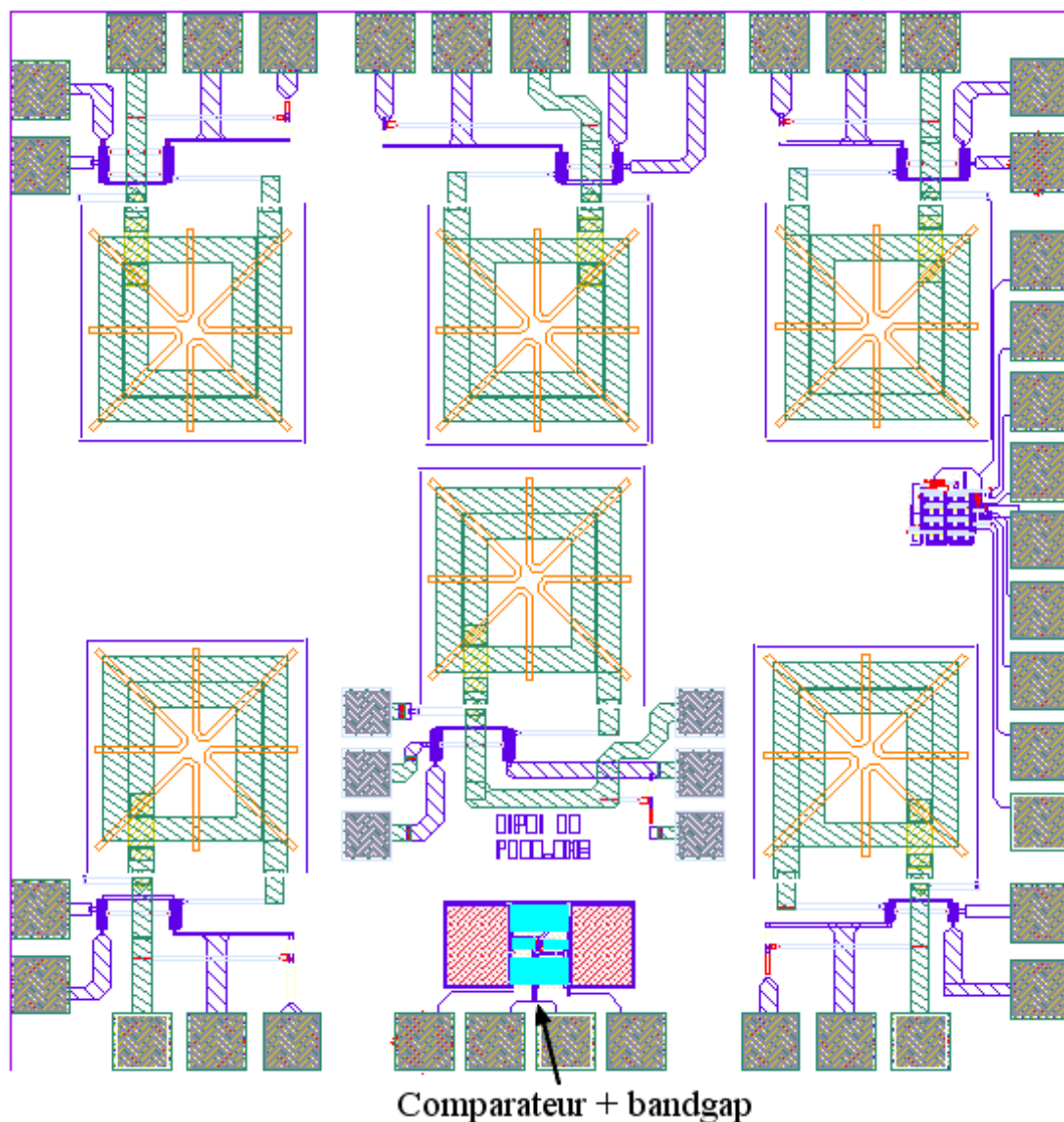


Figure V. 39 : Illustration de la puce réalisée

### 5.4.3. Bilan

La modélisation du convertisseur piézoélectrique sous Ansys permet de simuler le comportement du dispositif. Nous obtenons ainsi la tension générée par le dispositif en fonction de la déformation de la poutre. De plus, certains paramètres comme la taille de l'élément piézoélectrique ou sa position sur la poutre sont optimisés.

A partir des résultats obtenus, nous avons réalisé la simulation du circuit électronique nécessaire au conditionnement du signal. Dans un premier temps, nous avons simulé un convertisseur AC/DC double alternances, puis, nous avons amélioré le système en ajoutant un régulateur LDO.

Au niveau du cas de validation, nous constatons que les résultats obtenus à partir du banc de tests que nous avons réalisé sont cohérents vis-à-vis des résultats de simulation. De plus, l'architecture choisie à travers notre méthodologie permet de satisfaire les contraintes fixées par l'application.

Par ailleurs, nous avons conçu un convertisseur de tension spécifique à l'application dont la consommation est inférieure à celle du composant du commerce préalablement testé, en intégrant un comparateur sous le seuil.

Notons que dans le cadre de la thèse, nous réalisons l'extraction des résultats de simulation manuellement mais l'objectif, à termes, est d'automatiser cette tâche.

## 5.5. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, nous avons présenté la phase de conception détaillée de notre approche, en l'appliquant à la conception d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique.

Cette étape permet de simuler le comportement réel de la structure, en s'appuyant sur des modèles existants, intégrés dans des logiciels spécifiques.

Dans le cas étudié, nous avons utilisé des logiciels précis. Même si ces derniers dépendent fortement de l'application, le principe est toujours le même : il faut favoriser les échanges entre experts en créant des passerelles entre les différents outils considérés.

Nous avons également mis en évidence une autre caractéristique de l'outil que nous avons développé. Il permet d'indiquer au concepteur s'il peut utiliser des composants existants (à partir d'une base de données) ou s'il doit réaliser une conception spécifique.

---

# Conclusions et perspectives

## Bilan

### 1. La conception pluridisciplinaire

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le souci de conception de systèmes complexes et pluridisciplinaires. La conception requiert désormais des compétences dans divers domaines de l'ingénierie, ce qui induit la collaboration de plusieurs experts. En effet, la miniaturisation, la multiplication des fonctionnalités et l'hétérogénéité des systèmes actuels conduisent à la nécessité de mettre en œuvre des outils et des méthodes de conception et de modélisation intégrant des phénomènes multiphysiques.

A l'heure actuelle, chacun dispose de ses propres méthodes de travail et outils de modélisation, en fonction de sa discipline. Il est donc important de proposer des méthodes et des outils permettant aux différents acteurs d'un projet de conception de créer de nouveaux systèmes plus vite et satisfaisant toutes les contraintes fixées par l'application considérée. Pour ce faire, une bonne gestion des Hommes et des connaissances est primordiale.

De plus, comme nous travaillons sur la conception de microsystèmes autonomes, l'autonomie est apparue comme un enjeu de taille. Pour augmenter cette dernière et pallier les limitations des solutions actuelles d'alimentation, nous avons considéré la récupération de l'énergie ambiante présente dans notre environnement.

Nous avons commencé par dresser un état de l'art des processus de conception de produits en nous appuyant sur une interprétation de la démarche globale de conception.

Nous avons mis en évidence l'évolution des différents processus de conception pour intégrer le caractère multiphysique des systèmes. Ce changement implique de gérer efficacement les Hommes et les connaissances.

Nous avons ensuite exposé les approches de conception de microsystèmes qui suivent les processus classiques de conception de produits. En effet, de part leur architecture, les microsystèmes sont des dispositifs hétérogènes nécessitant des connaissances dans des domaines tels que la mécanique, l'électronique, l'énergétique, etc.

Le processus de conception est donc complexe et présente les enjeux suivants :

- intégrer les différentes disciplines mises en jeu,
- favoriser la collaboration entre les différents experts.

Au cours de ce chapitre, nous avons également défini la notion d'autonomie en exposant les différentes formes d'énergie et les techniques de conversion et de stockage existantes.

Pour répondre à ces problématiques, nous avons proposé une méthode d'aide à la conception de microsystèmes autonomes visant à faciliter les choix des concepteurs et à créer des échanges plus forts entre tous les acteurs du processus.



## 2. Une méthode et un outil

La méthode s'articule autour des points suivants :

- 1- **l'analyse et la structuration d'un problème de conception d'un microsysteme autonome** : cette phase conduit l'identification, la description fonctionnelle et environnementale du système et de son environnement.
- 2- **la modélisation des connaissances** : une analyse architecturale conduit à la description des composants et des interactions liées au microsysteme puis à la modélisation des comportements,
- 3- **la qualification énergétique et le couplage physique** : la réutilisation structurée des modèles de connaissances est pilotée pour coupler les modèles physiques et décrire les sources, les puits et les mécanismes énergétiques des environnements,
- 4- **la conduite de la recherche de concepts innovants** : la base de connaissances, les critères de qualification et la description fonctionnelle préalablement construits sont agencés dans une seule méthode de conception virtuelle pour rechercher des concepts de solutions innovants,
- 5- **le pré-dimensionnement** : tout en assurant l'intégration des outils spécialisés de simulation, le pré-dimensionnement de microsystemes autonomes est supportée selon un schéma synthétique.

Cette approche contribue à établir les bases d'un moyen innovant d'aide à la conception de microsystemes.

De plus, nous avons développé un outil pour supporter notre approche. Cet outil, développé en JAVA, est connecté à une base de connaissance afin d'automatiser le processus de recherche de solutions et d'assurer une capitalisation et une gestion des connaissances. Il est également connecté à des logiciels spécifiques de conception intervenant dans le processus de conception.

## 3. Conception préliminaire et qualification énergétique

Dans le chapitre II, nous avons exposé les problématiques liées à la conception de microsystemes autonomes et les solutions que nous proposons.

Les enjeux liés à cette tâche concernent :

- la prise en compte de la pluridisciplinarité des dispositifs,
- la gestion des connaissances avec le développement d'outils,
- une approche d'aide aux choix pour les différentes étapes.

Pour cela, nous avons mis en œuvre une méthode de conception de microsystemes autonomes. Elle est basée sur une approche pluridisciplinaire et intègre un processus d'aide à la décision, afin de choisir la meilleure configuration, parmi un ensemble de solutions possibles.

Lors de ce chapitre, nous avons également présenté notre cas de validation qui consiste en la conception d'un microsysteme capable de surveiller une structure mécanique soumise à des vibrations.

Notre méthode s'articule autour des étapes suivantes :

- analyse et structuration du problème de conception

- description architecturale
- qualification énergétique et modélisation système
- pré-dimensionnement.

Les trois premières étapes de notre méthode s'attachent à la conception préliminaire et à la qualification énergétique du microsystème. Elles ont pour objectif principal de diminuer le nombre de solutions possibles. Pour cela, nous avons adopté une approche fonctionnelle afin d'identifier les sources potentielles d'énergie.

Ces sources sont ensuite classées à partir de critères que nous avons définis. Ils les évaluent en termes de distance, d'intensité, de nature et d'interactions antagonistes. A partir de cette classification, les architectures possibles de récupérateurs d'énergie sont analysées, en s'appuyant sur des données issues de la littérature et regroupées dans des bases de connaissances. Une première estimation de l'énergie permet de ne garder que les solutions les plus satisfaisantes.

En plus de notre outil en Java, qui permet de générer les différentes architectures possibles, nous avons développé une modélisation comportementale du microsystème sous Matlab/Simulink. A partir de cette modélisation, le concepteur peut évaluer l'énergie récupérée et l'autonomie du système étudié. Il peut ainsi tester les solutions mises en évidence lors des étapes précédentes

Cet outil de simulation est décrit dans le chapitre IV. Il supporte l'étape de pré-dimensionnement, en créant des liens entre l'interface Java et des logiciels spécifiques.

De plus, cet outil offre la possibilité d'améliorer la consommation du microsystème, et donc son autonomie, en jouant sur des paramètres logiciels ou matériels.

#### **4. Conception détaillée pour un récupérateur d'énergie piézoélectrique**

En déroulant notre méthode sur le cas de validation choisi, nous avons mis en évidence les deux solutions les plus adaptées :

- la récupération d'énergie mécanique avec un convertisseur piézoélectrique
- la récupération d'énergie solaire avec un panneau photovoltaïque.

Nous avons testé la première solution expérimentalement, en réalisant un banc de tests composé de composants existants, notamment un microgénérateur piézoélectrique et un convertisseur AC/DC. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux obtenus en simulation.

Dans le cas où les composants du commerce ne permettent pas de satisfaire les contraintes de l'application considérée, une conception spécifique est nécessaire. Nous avons illustré ce cas en considérant un autre élément piézoélectrique dont les dimensions peuvent être modifiées. A partir des simulations, nous avons mis en évidence que cette seconde conception permettait de récupérer plus d'énergie que la première, offrant ainsi la possibilité d'augmenter la périodicité des mesures du microsystème.

Enfin, dans un souci de diminution de la consommation, nous avons conçu un système de conversion comportant des comparateurs fonctionnant sous le seuil et des oscillateurs basse tension.

## Perspectives de recherche

Au cours de nos travaux, nous avons mis en œuvre une méthode de conception pluridisciplinaire supportée par un outil, connecté à une base de connaissance. Nous avons également réalisé un prototype de test pour valider nos résultats. Dans le futur, nous souhaiterions donner diverses pistes de prolongement de ces travaux :

- Améliorer de l'interface développée en JAVA pour la rendre plus facile à utiliser et plus ergonomique.
- Automatiser la communication et l'échange de données entre les logiciels spécifiques, en créant des passerelles pour continuer à améliorer les échanges entre experts.
- Continuer à enrichir la base de connaissances.
- Tester notre approche sur d'autres cas d'application pour améliorer le processus.
- Prendre en considération les aspects logiciels liés aux protocoles de communication et leur impact sur l'autonomie du microsysteme.
- Intégrer les outils précédemment développés au sujet de l'évaluation de la consommation globale d'un nœud.
- Améliorer les modèles utilisés dans la représentation au niveau système. Par exemple, en intégrant les aspects de vieillissement et de courant de fuite des éléments de stockage.
- Inclure la possibilité d'hybridation des sources en travaillant plus en détail sur la gestion de l'énergie disponible dans le microsysteme.
- Réaliser les circuits sur puces.

La réalisation de tous ces points permettrait de proposer une méthode et un outil complet utilisable dans le domaine de l'industrie et de la recherche.

---

# Annexes



---

## Annexe A. La piézoélectricité

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| A.1.     | Introduction.....   | 172 |
| A.2.     | Définition de la piézoélectricité.....  | 172 |
| A.2.1.   | Effet piézoélectrique direct.....   | 174 |
| A.2.2.   | Effet piézoélectrique inverse.....  | 175 |
| A.3.     | Les différents matériaux piézoélectriques.....                                | 175 |
| A.3.1.   | Les cristaux.....   | 175 |
| A.3.2.   | Les céramiques.....   | 175 |
| A.3.3.   | Les polymères.....  | 176 |
| A.3.4.   | Les composites.....   | 176 |
| A.3.5.   | Observations générales.....   | 176 |
| A.4.     | Standards de la piézoélectricité.....   | 177 |
| A.5.     | Equations de la piézoélectricité.....   | 178 |
| A.6.     | Modélisation de la piézoélectricité.....                                      | 180 |
| A.6.1.   | Définition des constantes électriques.....                                    | 180 |
| A.6.2.   | Définition des constantes mécaniques.....                                     | 181 |
| A.6.3.   | Définition des constantes piézoélectriques.....                               | 182 |
| A.6.4.   | Conditions aux limites.....   | 183 |
| A.6.5.   | Couplage électromagnétique.....   | 184 |
| A.6.6.   | Facteur de qualité.....   | 185 |
| A.7.     | Types de conversion piézoélectrique.....                                      | 186 |
| A.7.1.   | Conversion directe.....   | 186 |
| A.7.2.   | Conversion indirecte.....   | 187 |
| A.8.     | Caractéristiques des convertisseurs piézoélectriques.....                     | 188 |
| A.8.1.   | Généralités.....  | 188 |
| A.8.1.1. | Capacité équivalente du matériau piézoélectrique.....                         | 188 |
| A.8.1.2. | Fréquence de résonance.....   | 189 |
| A.8.1.3. | Tension en circuit ouvert.....  | 189 |
| A.8.1.4. | Puissance en sortie d'une structure résonante.....                            | 190 |
| A.8.1.5. | Estimation de l'amortissement électrique.....                                 | 190 |
| A.8.1.6. | Estimation de l'amortissement mécanique.....                                  | 191 |
| A.8.1.7. | Facteur de qualité.....   | 191 |
| A.8.2.   | Influence de la différence de fréquence.....                                  | 192 |
| A.8.3.   | Influence des coefficients d'amortissement sur la puissance.....              | 193 |
| A.8.4.   | Influence de $\zeta_e$ et $\zeta_m$ sur la puissance, lorsque $f = f_n$ ..... | 194 |

## A.1. INTRODUCTION

L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par les frères Curie, sur les quartzs. En 1917, Langevin se sert de cristaux de quartz pour créer des ondes de pression.

Ensuite, dans les années 40, la découverte des sels piézoélectriques, tels que le BaTiO<sub>3</sub>, permet d'augmenter le couplage électromécanique. C'est dans les années 1950-1960 que de nouvelles céramiques donnent un second souffle à la piézoélectricité. Les oxydes ternaires de plomb (PZT) entraînent un saut technologique considérable. Ces matériaux possèdent un fort coefficient de couplage électromécanique, ce qui entraîne une grande efficacité d'actionnement et une grande linéarité des propriétés.

Dans un premier temps, ces matériaux ont été utilisés sous forme de céramiques massives. Ils permettaient d'effectuer des micro-déplacements ou des micro-positionnements. Aujourd'hui, ces céramiques sont intégrées sous forme de films de plus en plus minces. Ceci facilite leur intégration dans des dispositifs de tailles réduites. D'autres céramiques dérivées du PZT (PZNT, PMN-PT, PLZT...) ont des propriétés supérieures à ce dernier mais ne sont pas disponibles industriellement.

Les matériaux piézoélectriques sont adaptés à la problématique de récupération d'énergie. En effet, leur densité de puissance est élevée. De plus, ce sont des matériaux compacts et solides qui ne nécessitent pas d'entretien. Ces matériaux peuvent être utilisés pour créer des dispositifs alimentant des systèmes électroniques ayant une consommation de quelques  $\mu\text{W}$  à quelques centaines de mW.

## A.2. DÉFINITION DE LA PIÉZOÉLECTRICITÉ

Le mot piézoélectricité est la contraction des mots grecs « piezen » (pression) et « elektron » (électrique). La piézoélectricité traduit la capacité de certains matériaux de pouvoir transformer une énergie mécanique en énergie électrique et inversement.

Nous pouvons distinguer les effets piézoélectriques direct et inverse.

L'effet direct est le phénomène d'apparition de charges électriques quand un matériau est soumis à une contrainte mécanique. Cet effet est décrit par une relation linéaire entre le vecteur de polarisation  $P$  et le vecteur contrainte  $\sigma$ .

$$P_i = d_{ijk} \cdot \sigma_{jk}, \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (\text{A. 1})$$

L'effet inverse correspond à l'apparition d'une déformation mécanique du matériau lorsqu'il est soumis à un champ électrique.

La piézoélectricité est une propriété de certains cristaux. Un cristal est composé de particules chargées. La piézoélectricité naît du décalage des barycentres des charges positives et négatives de la maille cristalline, provoqué par la déformation mécanique de cette maille. La piézoélectricité est donc fortement liée à la symétrie de cette maille. Notons qu'une maille ayant un centre de symétrie (centro-symétrique) ne peut donner lieu à un cristal piézoélectrique (Figure A. 1) [Galopin, 2008].

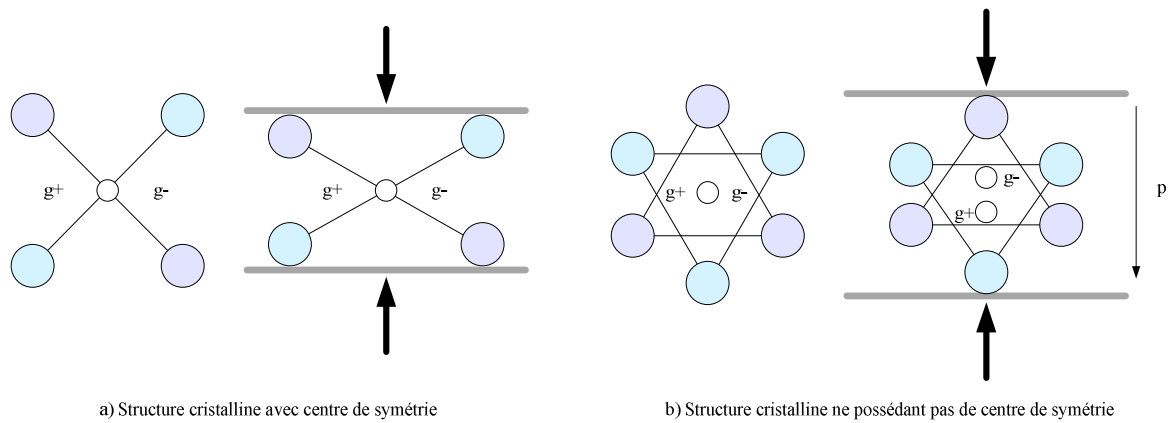


Figure A. 1 : Sollicitations mécaniques des structures cristallines

En fonction de leur degré de symétrie, les cristaux sont habituellement classés en sept catégories :

- triclinique,
- monoclinique,
- orthorhombique,
- tétragonal,
- trigonal,
- hexagonal,
- cubique.

Ces sept catégories sont ensuite divisées en 32 classes, suivant certaines particularités de symétrie. Sur les 32 classes cristallines, 21 ne sont pas centro-symétriques, 20 sont piézoélectriques et 10 ont une polarisation électrique en l'absence de champ électrique appliqué (matériaux pyroélectriques dont les moments dipolaires sont sensibles à la température) (Figure A. 2).

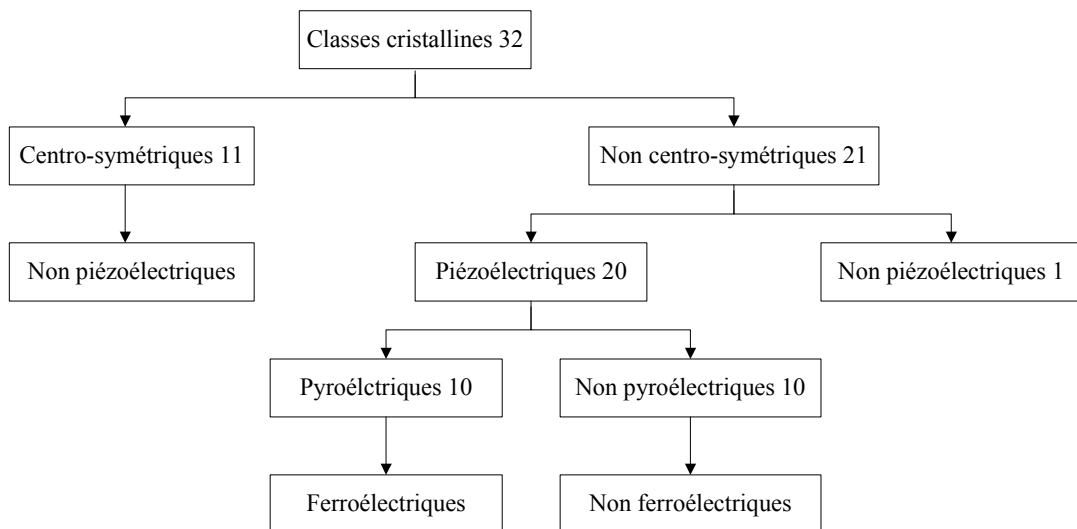


Figure A. 2 : Organigramme des 32 classes cristallines



Certains cristaux sont intrinsèquement piézoélectriques, comme le quartz, par exemple. D'autres, comme les cristaux ferroélectriques, présentent des propriétés piézoélectriques s'ils sont préalablement polarisés.

L'origine microscopique de la piézoélectricité est illustrée par la Figure A. 3. Pour des raisons de simplicité, nous considérons un modèle du réseau cristallin unidimensionnel.

Sur cette figure, les liaisons entre les ions représentent la résultante des forces électrostatiques de Coulomb et des forces de répulsions quantiques. La structure cristalline sur la Figure A. 3.a présente des liaisons dépendant de la distance inter-ionique.

Lorsque l'on applique un champ électrique  $E$  (Figure A. 3.a), les cations se déplacent dans la direction du champ électrique et les anions dans la direction opposée. Comme il existe une différence de raideur entre les liaisons inter-ioniques, les liaisons souples se contractent ou se dilatent plus vite que les liaisons dures. Ceci entraîne une déformation  $\varepsilon$  proportionnelle au champ électrique. Ce phénomène est appelé l'effet piézoélectrique inverse et est exprimé par :  $\varepsilon = d.E$ , où  $d$  est appelé la constante piézoélectrique.

Dans le cas (b), les taux d'extension et de contraction étant identiques, la distance entre les deux cations reste stable, sans aucune déformation globale.

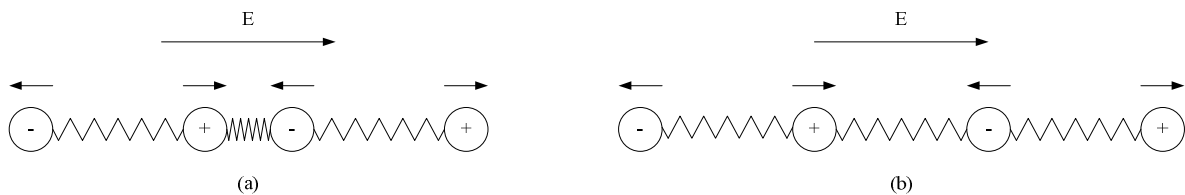


Figure A. 3 : Modèle simplifié d'une structure cristalline unidimensionnelle

### A.2.1. Effet piézoélectrique direct

Lorsque certains cristaux sont soumis à des tensions mécaniques, la déformation résultante peut entraîner un déplacement du centre de gravité des charges positives par rapport à celui des charges négatives : il apparaît alors une polarisation  $P$  à l'intérieur du cristal. Un tel phénomène ne peut se produire que si le réseau cristallin ne possède pas de centre de symétrie (Figure A. 4).

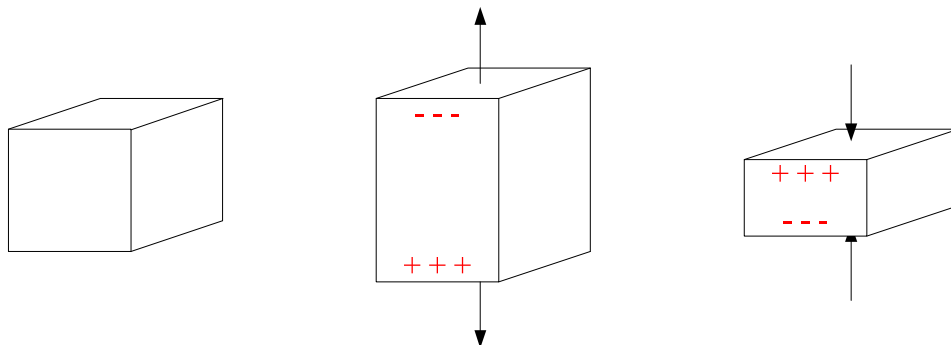


Figure A. 4 : Illustration de l'effet piézoélectrique direct

### A.2.2. Effet piézoélectrique inverse

L'application d'une tension électrique aux bornes d'un matériau piézoélectrique entraîne une déformation (Figure A. 5). La quantité de mouvement dépend de la polarité de la tension appliquée et de la direction du vecteur de polarisation. Lorsque la tension est alternative, le changement de la géométrie est cyclique.

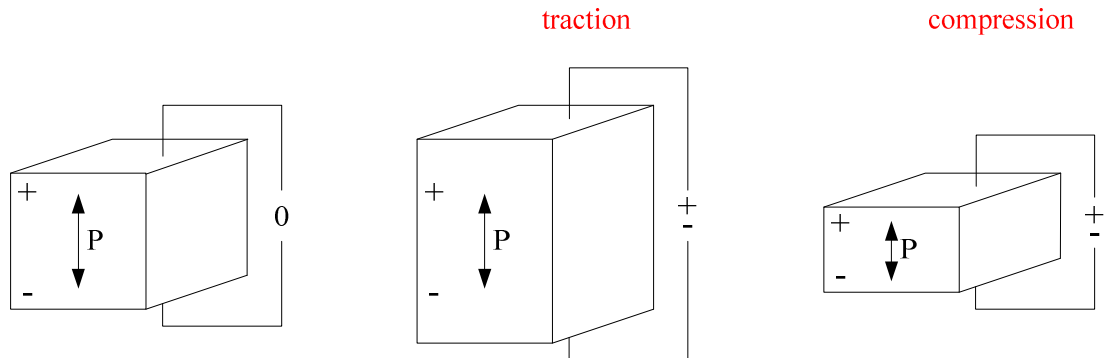


Figure A. 5 : Illustration de l'effet piézoélectrique inverse

## A.3. LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES

Nous allons considérer les quatre classes principales de matériaux piézo-électriques : les cristaux qui possèdent une piézo-électricité naturelle, les céramiques, les polymères et les composites qui doivent être polarisés.

Dans la suite,  $k_t$  représente le coefficient de couplage électro-acoustique. Ce paramètre, compris entre 0 et 1, caractérise l'aptitude du matériau à convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Il doit être le plus élevé possible.

### A.3.1. Les cristaux

Le cristal piézoélectrique le plus connu est le quartz. Son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage très faible. D'autres cristaux, tels que le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) ou le tantalate de lithium ( $\text{LiTaO}_3$ ) affichent des valeurs de  $k_t$  plus élevées. Ces cristaux ont un coût élevé et sont fragiles. C'est pour cela qu'ils ne sont que peu utilisés dans les produits actuels. Ils sont cependant utilisés en laboratoire.

### A.3.2. Les céramiques

Les céramiques piézoélectriques sont utilisées dans la fabrication des composites. Elles présentent des valeurs de  $k_t$  élevées mais leur impédance acoustique est bien plus grande que celle des tissus biologiques. Ces matériaux ont un coût relativement faible, ils sont usinables, faciles à transformer et offrent un éventail très large de performances.

Il existe une gamme variée de matériaux ayant des propriétés diélectriques et mécaniques différentes :

- les titanates de baryum sont les ancêtres des céramiques actuelles,
- la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) compte cinq à six compositions différentes et est la plus utilisée,
- les titanates de plomb concurrencent les PZT,
- les métaniobates de plomb sont utilisés pour l'imagerie haute résolution.

Notons que les céramiques sont des polycristaux fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition, afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques.

### **A.3.3. Les polymères**

Certains polymères tels que le PVDF (PolyVynilDiFluorure) et des copolymères tels que le PVDF-TrFE peuvent acquérir des propriétés piézo-électriques. Ils se caractérisent par une faible impédance acoustique. Cependant, leurs coefficients de couplage sont bien plus faibles que ceux des céramiques. L'amélioration des procédés de fabrication, et plus particulièrement ceux des copolymères, a abouti à des valeurs de  $k_t$  de l'ordre de la moitié de ceux obtenus avec des céramiques.

Les transducteurs à base de copolymères ont aujourd'hui des performances qui s'approchent de celles des capteurs à céramiques. Ils sont essentiellement utilisés dans les dispositifs haute fréquence à cause d'avantages technologiques. Quelques barrettes expérimentales fonctionnant au dessus de 7MHz ont été réalisées. Nous les trouvons notamment dans des transducteurs pour l'échographie ophtalmologique, cutanée ou intra vasculaire. Ils se prêtent bien à une miniaturisation des sondes.

### **A.3.4. Les composites**

Les composites, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 80 et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézo-électriques, depuis l'apparition des PZT dans les années 60. Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n'avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et une valeur de  $k_t$  élevée.

En effet, les céramiques souffrent d'une impédance acoustique, trop élevée et les polymères d'une valeur de  $k_t$  trop faible. L'idée est donc née d'utiliser à la fois une céramique à  $k_t$  élevée, associée à un matériau passif de faible impédance acoustique de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un  $k_t$  comparable avec celui d'une céramique.

### **A.3.5. Observations générales**

En général, tout matériau piézoélectrique est caractérisé par :

- une forte anisotropie,

- une rigidité mécanique élevée impliquant un bon comportement dynamique,
- la possibilité d'application en cryogénique car le principe de fonctionnement se base sur un champ électrique interatomique, non affecté par la température,
- un mauvais fonctionnement statique parce qu'il y a toujours des courants de fuite : le matériau piézoélectrique se comporte comme une capacité chargée, mais il se décharge inévitablement, soit au travers du matériau même, soit par l'électronique associée.

L'effet piézo-électrique est complètement réversible : l'effet inverse est utilisé par les actionneurs, tandis que l'effet direct est utilisé par les capteurs ; en ce qui concerne l'instrumentation, la piézoélectricité est utilisée dans [Bryant, 2007] :

- les capteurs de force et de pression,
- les accéléromètres,
- les jauges de contrainte,
- l'électronique en tant qu'oscillateurs ayant une fréquence de résonance bien définie,
- générateurs et récepteurs d'ultrasons, ondes de choc, impulsions,
- nanomoteurs, nanopositionneurs, systèmes optiques actifs.

#### A.4. STANDARDS DE LA PIÉZOÉLECTRICITÉ

Dans la littérature, il existe de nombreuses conventions pour les systèmes piézoélectriques. Parmi elles, nous distinguons les conventions de Tzou [Tzou, 1993] et Schmidt [Schmidt, 1986] (Tableau A. 1).

Dans la convention de Tzou,  $T$  représente la contrainte mécanique,  $S$  la déformation et  $s$  la constante élastique (module d'Young).

Schmidt utilise  $\delta$  pour la déformation,  $\sigma$  pour la contrainte et  $Y$  pour la constante élastique.

Dans le domaine de la mécanique, la déformation et le module d'Young sont notés  $\varepsilon$  et  $E$ , respectivement, mais comme ces symboles ont d'autres significations dans le contexte des matériaux piézoélectriques, nous utilisons d'autres variables. Il existe également le standard IEEE.

Le Tableau A. 1 résume les correspondances entre les différentes notations.

| Grandeur   | Convention Tzou | Convention Schmidt | Standard IEEE   | Convention mécanique | Signification                                       | Unités            |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------|----------------------|---|-------------------|
| Électrique | $[\varepsilon]$ | $[\varepsilon]$    | $[\varepsilon]$ |                      | Permittivité diélectrique                           | F/m               |
|            | $[\beta]$       | $[\beta]$          | $[\beta]$       | $[\beta]$            | Imperméabilité électrique                           | m/F               |
|            | $\{D\}$         | $\{D\}$            | $\{D\}$         | $\{D\}$              | Déplacement électrique (densité de flux électrique) | C/m <sup>2</sup>  |
|            | $\{E\}$         | $\{E\}$            | $\{E\}$         |                      | Champ électrique                                    | N/C               |
| Mécanique  | $[s]$           | $[1/Y]$            | $[s]$           | $[1/E]$              | Compliance ou                                       | m <sup>2</sup> /N |

|                 |         |              |         |                   |  |                   |
|-----------------|---------|--------------|---------|-------------------|--|-------------------|
|                 |         |              |         |                   | souplesse                                      |                   |
|                 | $[c]$   | $[Y]$        | $[c]$   | $[E]$             | Raideur ou rigidité élastique (module d'Young) | N/m <sup>2</sup>  |
|                 | $\{S\}$ | $\{\sigma\}$ | $\{S\}$ | $\{\sigma\}$      | Contrainte                                     | N/m <sup>2</sup>  |
|                 | $\{T\}$ | $\{\delta\}$ | $\{T\}$ | $\{\varepsilon\}$ | Déformation                                    | -                 |
| Piézoélectrique | $[d]$   | $[d]$        | $[d]$   | $[d]$             | Constante de charge                            | C/N ou m.V        |
|                 | $[e]$   | $[e]$        | $[e]$   | $[e]$             | Constante piézoélectrique                      | C/m <sup>2</sup>  |
|                 | $[g]$   | $[g]$        | $[g]$   | $[g]$             | Constante de tension                           | m <sup>2</sup> /C |
|                 | $[h]$   | $[h]$        | $[h]$   | $[h]$             | Constante piézoélectrique                      | V/m ou N/C        |

Tableau A. 1 : Constante de la piézoélectricité

### A.5. ÉQUATIONS DE LA PIÉZOÉLECTRICITÉ

Comme nous l'avons vu précédemment, le phénomène piézoélectrique est une conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Il existe quatre couples d'équations d'état décrivant le couplage piézoélectrique. Ces équations, regroupées dans le Tableau A. 2, relient les variables électriques (champ électrique  $E$  en V/m et déplacement électrique  $D$  en C/m<sup>2</sup>) aux variables mécaniques (déformation  $\varepsilon$  sans unité et contrainte  $\sigma$  en N/m<sup>2</sup>). Les grandeurs électriques sont des tenseurs 1\*3 et les grandeurs mécaniques sont des tenseurs 1\*6.

| Équation d'état   | Variables d'état | Forme     |
|---|------------------|-----------|
| $\begin{cases} \{\varepsilon\} = [s^E] \{\sigma\} + [d]^t \{E\} \\ \{D\} = [\varepsilon_p^\sigma] \{E\} + [d] \{\sigma\} \end{cases}$           | $\sigma, E$      | Intensive |
| $\begin{cases} \{\sigma\} = [c^D] \{\varepsilon\} - [h]^t \{D\} \\ \{E\} = [\beta^\varepsilon] \{D\} - [h] \{\varepsilon\} \end{cases}$         | $\varepsilon, D$ | Extensive |
| $\begin{cases} \{\varepsilon\} = [s^D] \{\sigma\} + [g]^t \{D\} \\ \{E\} = [\beta^\sigma] \{D\} - [g] \{\sigma\} \end{cases}$                   | $\sigma, D$      | Mixte     |
| $\begin{cases} \{\sigma\} = [c^E] \{\varepsilon\} - [e]^t \{E\} \\ \{D\} = [\varepsilon_p^\varepsilon] \{E\} + [e] \{\varepsilon\} \end{cases}$ | $\varepsilon, E$ | Mixte     |

Tableau A. 2 : Équations de la piézoélectricité

$s^E$  :  $s$  à  $E$  nul ou constant

$[X]^t$  : transposée de  $[X]$

$d_{ij}$  représente le déplacement électrique selon l'axe  $i$ , causé par l'application d'une contrainte selon l'axe  $i$  ou la déformation générée selon l'axe  $i$ , due à un champ électrique appliqué selon l'axe  $j$ .

Les matériaux piézoélectriques sont toujours anisotropes. Les phénomènes dépendent donc des orientations spatiales et les constantes sont des tenseurs écrits sous forme matricielle, comme le montre le Tableau A. 3.

| Grandeur        | Symbole      | Signification                                       | Unités            | Forme   | Taille |
|-----------------|--------------|---|-------------------|---------|--------|
| Électrique      | $[\epsilon]$ | Permittivité diélectrique                           | F/m               | Matrice | 3*3    |
|                 | $[\beta]$    | Imperméabilité électrique                           | m/F               | Matrice | 3*3    |
|                 | $\{D\}$      | Déplacement électrique (densité de flux électrique) | C/m <sup>2</sup>  | Vecteur | 3*1    |
|                 | $\{E\}$      | Champ électrique                                    | N/C               | Vecteur | 3*1    |
| Mécanique       | $[s]$        | Compliance ou souplesse                             | m <sup>2</sup> /N | Matrice | 6*6    |
|                 | $[c]$        | Raideur ou rigidité élastique                       | N/m <sup>2</sup>  | Matrice | 6*6    |
|                 | $\{T\}$      | Contrainte  | N/m <sup>2</sup>  | Vecteur | 6*1    |
|                 | $\{S\}$      | Déformation   | -                 | Vecteur | 6*1    |
| Piézoélectrique | $[d]$        | Constante de charge                                 | C/N ou m.V        | Matrice | 3*6    |
|                 | $[e]$        | Constante piézoélectrique                           | C/m <sup>2</sup>  | Matrice | 3*6    |
|                 | $[g]$        | Constante de tension                                | m <sup>2</sup> /C | Matrice | 3*6    |
|                 | $[h]$        | Constante piézoélectrique                           | V/m ou N/C        | Matrice | 3*6    |

Tableau A. 3 : Paramètres de modélisation des matériaux piézoélectriques

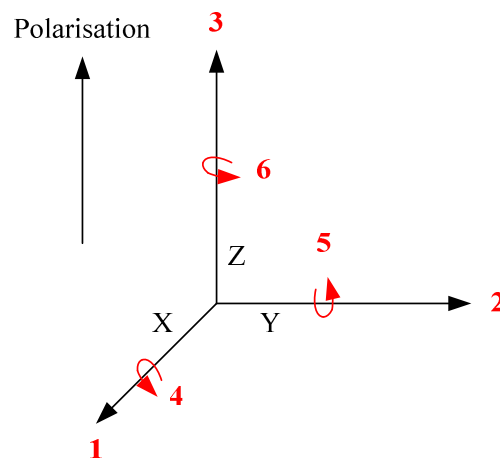


Figure A. 6 : Direction des forces affectant un matériau piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux anisotropes. Par conséquent, les constantes physiques sont spécifiques :

- à la direction dans laquelle la force mécanique ou électrique est appliquée,
- aux directions perpendiculaires à celle de la force appliquée.

Les constantes ont donc des indices qui renseignent sur les axes de la contrainte et de la déformation. En général, l'axe de polarisation coïncide avec l'axe Z (Figure A. 6), dans un repère orthogonal d'axes X, Y et Z. Les directions X, Y et Z sont représentées par les numéros 1, 2 et 3. Le cisaillement autour de ces axes est noté 4, 5 et 6.

## A.6. MODÉLISATION DE LA PIÉZOÉLECTRICITÉ

### A.6.1. Définition des constantes électriques

Lorsqu'un champ électrique est appliqué sur un matériau particulier, trois types de réponses sont possibles, en fonction de ses propriétés électriques.

Tout d'abord, un courant électrique peut circuler librement dans le matériau, grâce à la présence de particules chargées, libres de se déplacer. L'application d'un champ électrique favorise le déplacement de ces particules. Ces matériaux sont dits conducteurs.

Ensuite, un courant peut circuler, à conditions que les électrons présents dans le matériau reçoivent assez d'énergie pour dépasser l'énergie de liaison. Il s'agit de matériaux semi-conducteurs.

Enfin, lorsqu'aucun courant ne circule (absence de particules chargées libres) les matériaux sont diélectriques ou isolants. Ces matériaux peuvent être polarisés en leur appliquant un champ électrique externe.

Lorsque le diélectrique est l'air, les vecteurs d'intensité du champ électrique  $E$  et du déplacement électrique  $D$  sont reliés par l'expression suivante :

$$D_i = \varepsilon_0 \cdot E_i \quad (\text{A. 2})$$

avec  $\varepsilon_0$  la permittivité de l'air.

Par contre, quand le diélectrique est différent de l'air, la permittivité change. Il faut aussi tenir compte de l'effet d'un champ de polarisation induit  $P$  dans le diélectrique qui s'oppose au champ  $D$ . Ce champ  $P$  est dû à la présence de dipôles électriques permanents ou induits dans le milieu diélectrique. Les vecteurs d'intensité du champ électrique  $E$  et du déplacement électrique  $D$  sont reliés par l'expression :

$$D_i = \varepsilon_0 \cdot E_i + P_i \quad (\text{A. 3})$$

où  $P$  représente le vecteur de polarisation et  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide. Au niveau microscopique, la permittivité d'un matériau est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le matériau. La permittivité d'un matériau est une grandeur

tensorielle (la réponse du matériau peut dépendre de l'orientation des axes cristallographiques du matériau), qui se réduit à un scalaire dans les milieux isotropes.

Le vecteur du champ électrique  $E$  se dérive du potentiel électrique  $\varphi$  par :

$$E_i = -\varphi_j \quad (\text{A. 4})$$

Enfin, le vecteur de déplacement électrique  $D$  satisfait le théorème de Gauss dans un matériau isolant :

$$D_{ij} = 0 \quad (\text{A. 5})$$

La permittivité diélectrique  $\varepsilon_p$ , pour un matériau piézoélectrique, est le déplacement diélectrique par unité de champ électrique  $E$ .  $\varepsilon_p^\sigma$  représente la permittivité à contrainte constante et  $\varepsilon_p^\varepsilon$  représente la permittivité à déformation constante. Le premier indice indique la direction du déplacement diélectrique. Le second donne la direction du champ électrique. La permittivité relative est donnée par le produit de la permittivité  $\varepsilon_p$  avec la permittivité du vide  $\varepsilon_0$ .

Par exemple,

- $\varepsilon_{11}^\sigma$  est la permittivité pour le déplacement diélectrique et le champ électrique dans la direction 1, à contrainte constante
- $\varepsilon_{33}^\varepsilon$  est la permittivité due au déplacement diélectrique et au champ électrique dans la direction 3, à déformation constante.

### A.6.2. Définition des constantes mécaniques

Le tenseur des contraintes  $[T]$  définit complètement l'état de tension en un point ( $T_{ij}$  étant la composante en direction  $j$  de la tension exercée au point  $P$  sur une surface  $dS$  dont la normale est orientée suivant la direction  $i$ ).

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 6})$$

Le tenseur des déformations  $[S]$  définit l'état de déformation en un point ( $S_{ii}$  est l'allongement spécifique d'un segment orienté suivant la direction spécifiée ;  $S_{ij}$  est le glissement, c'est-à-dire la variation angulaire entre deux directions initialement orthogonales).

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{A. 7})$$



La souplesse  $s$  représente la déformation créée par unité de contrainte appliquée dans les directions 11 et 33. Cette grandeur se calcule en prenant l'inverse du module d'Young  $Y$  ( $s^D$  est la souplesse à déplacement électrique constant et  $s^E$  est la souplesse à champ électrique constant. Le premier indice indique la direction de la déformation tandis que le second décrit la direction de la contrainte appliquée).

Par exemple,

- $s_{11}^E$  est la souplesse pour une contrainte appliquée dans la direction 1 et une déformation induite dans la même direction, à champ électrique constant (court circuit).
- $s_{33}^D$  est la souplesse pour une contrainte appliquée dans la direction 3 et une déformation induite dans la même direction, à déplacement électrique constant (circuit ouvert).

Nous supposons ici que le comportement des matériaux piézoélectriques est linéaire.

Si nous faisons l'hypothèse des petits déplacements, le tenseur des déformations  $\varepsilon$  est défini par :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{A. 8})$$

avec  $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ .

Le vecteur de traction  $t$  est relié au tenseur de contraintes  $\sigma$  par la relation suivante :

$$t_j = n_i \cdot T_{ij} \quad (\text{A. 9})$$

où  $n_i$  désigne le vecteur normal à la surface considérée.

Les équations d'équilibre dynamique sont données par l'expression suivante :

$$T_{ij,i} = \rho \cdot \ddot{u}_j \quad (\text{A. 10})$$

### A.6.3. Définition des constantes piézoélectriques

La constante de charge  $d$  traduit la proportionnalité entre la contrainte et l'induction, à champ électrique nul ou constant. Il s'agit du taux de déformation par unité de champ électrique appliqué.

Par exemple,  $d_{ij}$  représente :

- la polarisation induite dans la direction  $j$  par unité de contrainte appliquée dans la direction  $i$ ,

ou

- la déformation générée dans la direction  $i$  par unité de champ électrique appliqué dans la direction  $j$ .

Les modes de déformation fondamentaux, pour un matériau piézoélectrique, sont les suivants :

- mode longitudinal (33),
- mode transversal (31),
- mode de cisaillement (15).

La constante piézoélectrique  $e$  traduit la proportionnalité entre la déformation et le déplacement électrique, à champ électrique constant ou nul.

La constante de tension  $g$  traduit la proportionnalité entre la contrainte mécanique et le champ électrique, à déplacement électrique nul ou constant. Elle quantifie le rapport entre la tension électrique générée et l'effort appliqué.

Par exemple,  $g_{ij}$  représente :

- le champ électrique induit dans la direction  $i$ , par unité de contrainte appliquée dans la direction  $j$ ,

ou

- la déformation induite dans la direction  $j$ , par unité de déplacement électrique appliqué dans la direction  $i$ .

La constante piézoélectrique  $h$  traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique, à déplacement électrique nul ou constant. Les relations entre ces variables sont exprimées ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} [d] = [\varepsilon_p^\sigma] \cdot [g] = [e] \cdot [s^E] \\ [e] = [\varepsilon_p^\varepsilon] \cdot [h] = [d] \cdot [c^E] \\ [g] = [\beta^\sigma] \cdot [d] = [h] \cdot [s^D] \\ [d] = [\varepsilon^\varepsilon] \cdot [e] = [g] \cdot [c^D] \end{array} \right. \quad (\text{A. 11})$$

L'ordre des tenseurs et leurs nombres impliquent un grand nombre de constantes pour décrire le phénomène piézoélectrique. Mais ces matrices peuvent être simplifiées grâce aux symétries du milieu cristallin.

#### A.6.4. Conditions aux limites

Sur l'interface séparant deux matériaux 1 et 2, les conditions de continuité s'expriment de la manière suivante :

$$n_i \cdot T_{ij}^1 = n_i \cdot T_{ij}^2 \quad (\text{A. 12})$$

$$u_j^1 = u_j^2 \quad (\text{A. 13})$$

$$n_i \cdot D_i^1 = n_i \cdot D_i^2 \quad (\text{A. 14})$$

$$\varphi^1 = \varphi^2 \quad (\text{A. 15})$$

Lorsqu'une structure piézoélectrique est connectée à un amplificateur de charges, les deux électrodes sont alors court-circuitées. Pour un potentiel électrique de référence nul, on a  $\varphi = 0$  sur chaque électrode.

Pour un transducteur piézoélectrique connecté à un circuit électrique d'admittance  $Y$ , la relation entre la différence de potentiel ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) et le courant  $I$  circulant entre les deux électrodes est donnée par :

$$I = \int_A n_i \cdot \dot{D}_i ds = \pm Y \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (\text{A. 16})$$

Dans le cas particulier où les électrodes sont connectées à un voltmètre, d'admittance nulle, le courant  $I$  circulant entre les électrodes est alors nul.

#### A.6.5. Couplage électromagnétique

Pour déterminer la conversion électromécanique dans un matériau piézoélectrique, il faut considérer les différentes valeurs des coefficients mécaniques, électriques et piézoélectriques. Ce couplage électromécanique est surtout utilisé pour des résonateurs piézoélectriques. Dans ce cas, il est défini pour une géométrie de résonateur et un mode de vibration particuliers. Le coefficient de couplage électromécanique  $k$  permet de quantifier l'efficacité de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique (et inversement) :

$$k = \sqrt{\frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie fournie}}} \quad (\text{A. 17})$$

Cette équation s'écrit également de la façon suivante [Ikeda, 1990] :

$$k = \sqrt{\frac{U_I}{U_E U_D}} \quad (\text{A. 18})$$

où  $U_E$  désigne l'énergie électrique,  $U_D$  est l'énergie de déformation et  $U_I$  est l'énergie d'interaction.

L'énergie totale contenue dans le résonateur est donnée par la formule suivante :

$$U_{total} = U_M + 2.U_I + U_E \quad (A. 19)$$

Le coefficient de couplage électromécanique  $k$  peut s'exprimer à partir des coefficients mécaniques, électriques et piézoélectriques du matériau pour un résonateur et un mode vibration donnés. Si nous considérons le cas simple d'un barreau vibrant selon le premier mode d'extension-compression, l'expression du coefficient électromécanique est :

$$k = \frac{d}{\sqrt{\epsilon \sigma_s E}} = \sqrt{\frac{Y}{\epsilon}} d \quad (A. 20)$$

avec  $Y$ , le module d'Young du matériau.

#### A.6.6. Facteur de qualité

Le facteur de qualité d'un résonateur, ou coefficient de surtension mécanique, traduit les pertes mécaniques d'un résonateur au cours d'une période de vibration [Parent, 2008].

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{énergie stockée dans le résonateur}}{\text{énergie dissipée pendant une période de vibration}} \quad (A. 21)$$

La dissipation d'énergie se produit à divers endroits :

- à l'intérieur du résonateur : amortissement visqueux du matériau, phénomènes thermoélastiques...
- à la surface du résonateur : présence des électrodes, rugosité (défaut d'usinage)...
- à l'extérieur du résonateur : amortissement gazeux, influence de la fixation...

Ainsi :

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{énergie stockée}}{\Sigma \text{énergies dissipées}} \quad (A. 22)$$

Donc

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Sigma \text{énergies dissipées}}{\text{énergie stockée}} \quad (A. 23)$$

Nous pouvons l'écrire de la manière suivante

$$\frac{1}{Q} = \sum_i \frac{1}{Q_i} \quad (A. 24)$$

avec  $Q_i$  le coefficient de qualité affecté à chaque cause  $i$  de dissipation.

## A.7. TYPES DE CONVERSION PIÉZOÉLECTRIQUE

### A.7.1. Conversion directe

La conversion est directe lorsqu'une contrainte mécanique est directement appliquée sur un matériau piézoélectrique (Figure A. 7). Ce type de conversion est utilisé dans les dispositifs tels que les briquets ou les allume-gaz. La conversion mécano-électrique est directe. Il n'y a pas de stockage intermédiaire d'énergie sous forme mécanique (ce stockage pourrait se faire avec une masse en mouvement ou une structure vibrante par exemple).

Le taux de conversion mécanique se définit alors comme le rapport de l'énergie électrique récupérée sur l'énergie mécanique fournie. Il convient de noter que cette grandeur ne correspond pas exactement au rendement car l'élément piézoélectrique ne restitue de l'énergie que lorsque la contrainte est supprimée.

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

Dans leurs travaux, Xu et al [Xu, Akiyama et al., 1998] et Keawboonchuay et Engel [Keawboonchuay et Engel, 2003] considèrent 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 la Figure A. 7 (b) (c).

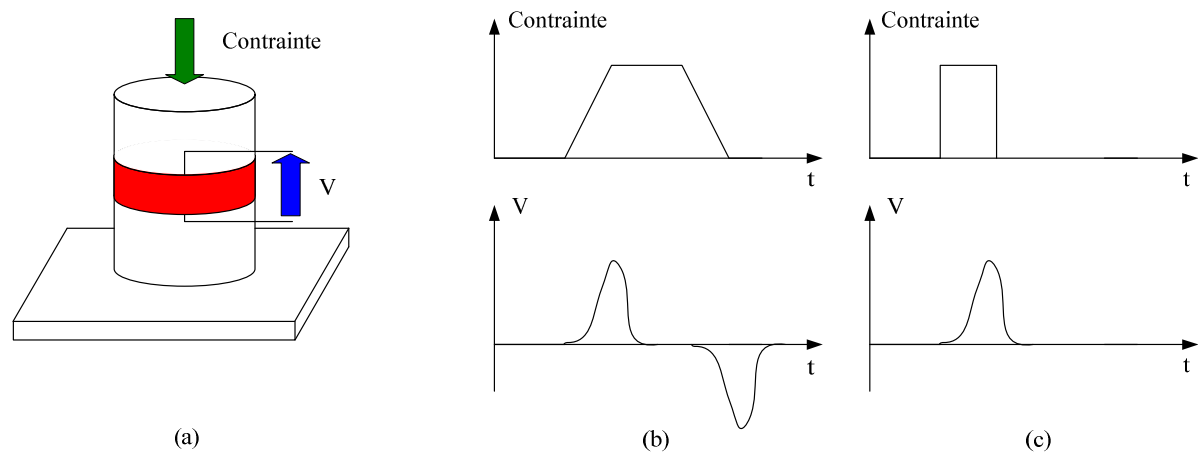


Figure A. 7 : Conversion directe : (a) principe, (b) sollicitation quasi-statique, (c) sollicitation dynamique

Alors que les travaux de Xu et al. [Xu, Akiyama et al., 1998] indiquent que le taux de conversion électromécanique sous sollicitation quasi-statique est meilleur que dans le cas dynamique, les travaux de Keawboonchuay et Engel [Keawboonchuay et Engel, 2003] affirment le contraire. Selon Adrien Badel [Badel, 2008] ce rendement ne peut pas dépasser le

carré du coefficient de couplage du matériau piézoélectrique utilisé. Ce taux de conversion varie en fonction du matériau utilisé. Le Tableau A. 4 regroupe les ordres de grandeur des rendements pour différents types de matériaux.

| Matériau                           | Taux de conversion maximum |
|------------------------------------|----------------------------|
| Polyfluorures de vinylidène (PVDF) | 1 - 5 %                    |
| Céramiques de PZT                  | 35 - 50 %                  |
| Monocristaux                       | 70 - 90 %                  |

**Tableau A. 4 : Taux de conversion maximal pour différents types de matériaux piézoélectriques en conversion directe**

La puissance récupérée par les dispositifs fonctionnant à conversion directe est très faible car la mise en contrainte des matériaux piézoélectriques est difficile à réaliser. Le dispositif présente des pertes mécaniques importantes qui limitent le rendement des microgénérateurs à conversion directe.

La chaussure piézoélectrique du MIT illustre ce phénomène. La puissance récupérée est d'environ 8 mW alors que l'énergie disponible est de 67 W. Ceci est dû à la difficulté de contraindre les matériaux piézoélectriques à partir du mouvement du pied. En effet, les matériaux piézoélectriques fonctionnent sous forte contrainte et faible déformation et le mouvement du pied génère plutôt de fortes déformations et une faible contrainte.

### **A.7.2. Conversion indirecte**

Compte tenu du faible rendement en conversion directe, les matériaux piézoélectriques sont plutôt utilisés en conversion indirecte. Dans ce cas, l'élément piézoélectrique n'est pas excité directement. Il est collé sur une structure vibrante. La Figure A. 8 illustre le principe de la conversion indirecte. Il s'agit d'une poutre encastree-libre sur laquelle sont fixés des éléments piézoélectriques. Le dispositif est excité par une force extérieure. Plusieurs cycles de compression-décompression sont réalisés pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. L'énergie convertie est dissipée dans une résistance de charge. Le rendement est défini comme le rapport entre l'énergie dissipée dans la charge et l'énergie fournie à la poutre.

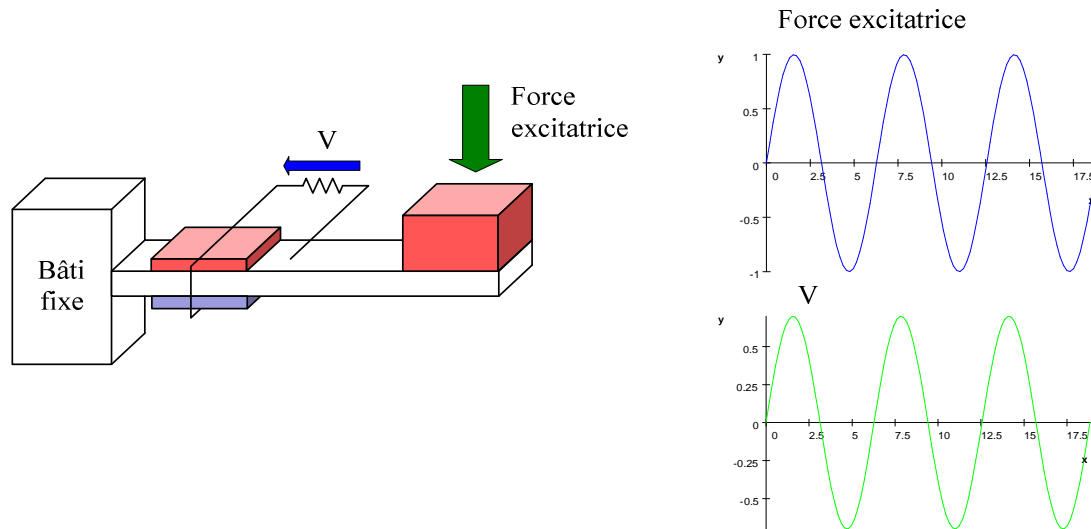


Figure A. 8 : Illustration de la conversion indirecte (a) principe, (b) sollicitation sinusoïdale

Paradiso et Feldmeier [Paradiso et Feldmeier, 2001] ont développé un bouton poussoir fonctionnant sur ce principe. Une pression sur le bouton poussoir entraîne une excitation du matériau piézoélectrique selon son mode de résonance. Cet élément piézoélectrique est connecté à une capacité, par l'intermédiaire d'un pont de diodes. Ainsi, l'énergie issue des vibrations de l'élément piézoélectrique est récupérée et stockée. L'énergie électrique récupérée lors d'une action sur le bouton est d'environ 2mJ, ce qui est suffisant pour transmettre un code de 12 bits à l'aide d'un émetteur radiofréquence.

## A.8. CARACTÉRISTIQUES DES CONVERTISSEURS PIÉZOÉLECTRIQUES

### A.8.1. Généralités

#### A.8.1.1. Capacité équivalente du matériau piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques peuvent être modélisés par une capacité équivalente (Figure A. 9).

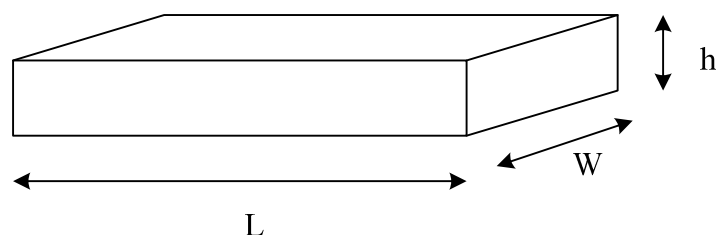


Figure A. 9 : Représentation géométrique de l'élément piézoélectrique

$$C = \frac{\varepsilon A}{h} \quad (\text{A. 25})$$

$C$  capacité équivalente du matériau piézoélectrique [F]

$\varepsilon$  permittivité diélectrique  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

$\varepsilon_r$  permittivité relative du matériau (=12 pour PVDF)

$\varepsilon_0$  permittivité du vide ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m)

### A.8.1.2. Fréquence de résonance

Dans cette configuration, ils sont caractérisés par une fréquence de résonance, calculée à partir de l'équation suivante :

$$f_n = \frac{0.16 \cdot h}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho}} \quad (\text{A. 26})$$

$Y$  module d'Young

$\rho$  masse volumique du matériau piézoélectrique

### A.8.1.3. Tension en circuit ouvert

Pour caractériser ces matériaux, nous pouvons réaliser des tests en circuit ouvert. Ces tests permettent de définir la tension à vide du matériau, en fonction de ces caractéristiques intrinsèques, de sa géométrie et de la force appliquée ou du déplacement généré.

#### A partir de la force

$$V_{oc} = \frac{3L}{2Wh} \cdot g_{31} \cdot F \quad (\text{A. 27})$$

$F$  force [N]

$g_{31}$  constante piézoélectrique [Vm/N]

#### A partir du déplacement

$$V_{oc} = \frac{3h^2}{8L^2} \cdot Y \cdot g_{31} \cdot \Delta z \quad (\text{A. 28})$$

$\Delta z$  déplacement suivant l'axe z [m]



#### A.8.1.4. Puissance en sortie d'une structure résonante

Les structures piézoélectriques sont souvent modélisées par des structures résonantes. Dans ce cas, la puissance générée est donnée par l'équation suivante :

$$P_{out} = \frac{m\xi_e\omega_n\omega^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 Y^2}{\left(2\xi_T\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2} \quad (\text{A. 29})$$

$\xi_T$  amortissement ( $\xi_T = \xi_e + \xi_m$ )

$\xi_e$  facteur d'amortissement électrique

$\xi_m$  facteur d'amortissement mécanique

$\omega_n$  pulsation de résonance du système de conversion

$\omega$  pulsation de la source de vibration

$Y$  déplacement en entrée [m/s]

$A = \omega^2 Y$

La puissance est maximale si  $\omega = \omega_n$

$$P_{max} = \frac{m\xi_e A^2}{4\omega\xi_T^2} \quad (\text{A. 30})$$

#### A.8.1.5. Estimation de l'amortissement électrique

En fonction des données dont dispose le concepteur, il peut être intéressant de calculer le coefficient d'amortissement électrique, comme suit :

$$\xi_e = \frac{\omega k^2}{\sqrt{2\omega^2 + \frac{1}{(RC)^2}}} \quad (\text{A. 31})$$

$$k = \sqrt{\frac{Y}{\varepsilon}} d \quad (\text{A. 32})$$

$R$  charge [ohm]

$C$  capacité piézoélectrique

$d$  constante piézoélectrique

$\varepsilon$  permittivité diélectrique

La résistance de charge qui va maximiser la puissance est alors donnée par :

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega C} \frac{2\xi}{\sqrt{4\xi^2 + k^2}} \quad (\text{A. 33})$$

#### A.8.1.6. Estimation de l'amortissement mécanique

De la même manière, le coefficient d'amortissement mécanique peut se calculer. Pour évaluer l'amortissement mécanique, il faut appliquer une impulsion au système et mesurer la sortie. Plus précisément, il faut mesurer l'amplitude à 2 points différents séparés de  $n$  périodes.

$$\xi_m = \frac{1}{2\pi n} \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad (\text{A. 34})$$

$x_{1,2}$  amplitudes aux points 1 et 2

$n$  nombre de périodes

#### A.8.1.7. Facteur de qualité

Le facteur de qualité des matériaux est utilisé pour caractériser leur capacité à transformer une énergie mécanique en énergie électrique, et inversement.

$$\xi_m = \frac{1}{2\pi n} \ln\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \quad (\text{A. 35})$$

$x_{1,2}$  amplitudes aux points 1 et 2

$n$  nombre de périodes

### A.8.2. Influence de la différence de fréquence

La Figure A. 10 représente l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence naturelle du système de conversion. Nous constatons que même une légère différence entre la fréquence du signal de vibration et la fréquence naturelle du système de conversion entraîne une chute considérable de la puissance générée en sortie.

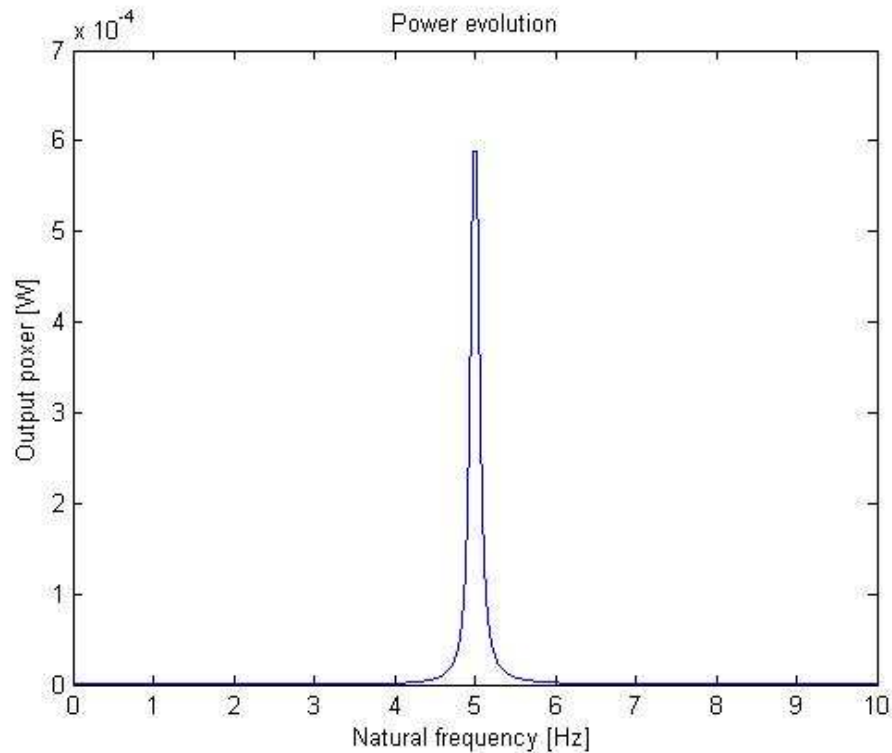


Figure A. 10 : Évolution de la puissance de sortie pour  $\zeta_e = \zeta_m = 5.46e-3$

Nous avons également étudié l'influence des coefficients d'amortissement  $\zeta_e$  et  $\zeta_m$  sur la puissance de sortie. La figure ci-après montre que les structures faiblement amorties génèrent une puissance plus grande. Cependant, cette puissance diminue également plus vite lorsque les deux fréquences ne sont pas égales. Par conséquent, comme la fréquence de vibration de la source n'est pas toujours la même, il est préférable de prendre des structures avec un coefficient d'amortissement assez élevé (0,01 à 0,02 pour des dispositifs courants).

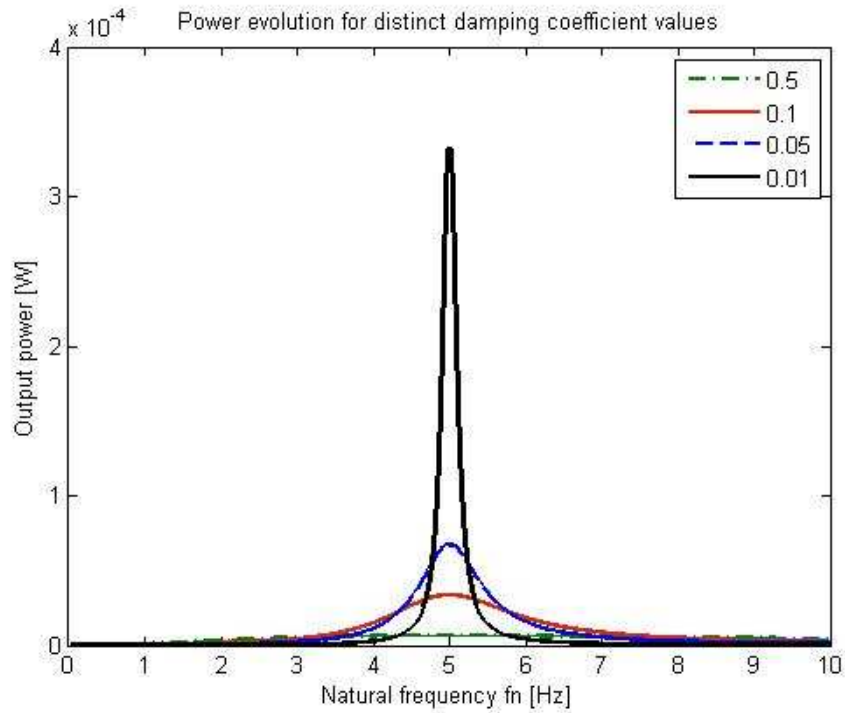


Figure A. 11 : Évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour différentes valeurs d'amortissement

### A.8.3. Influence des coefficients d'amortissement sur la puissance

Sur la Figure A. 12, nous constatons que la puissance est maximale quand  $\zeta_e = \zeta_m$ . De plus, la puissance de sortie diminue fortement lorsque  $\zeta_e < \zeta_m$ . En revanche, elle diminue peu quand  $\zeta_e > \zeta_m$ . Par conséquent, un système fortement amorti sera un peu moins performant qu'un système faiblement amorti du moment que  $\zeta_e > \zeta_m$ . Cependant, il sera ainsi moins affecté par les différences de fréquences.

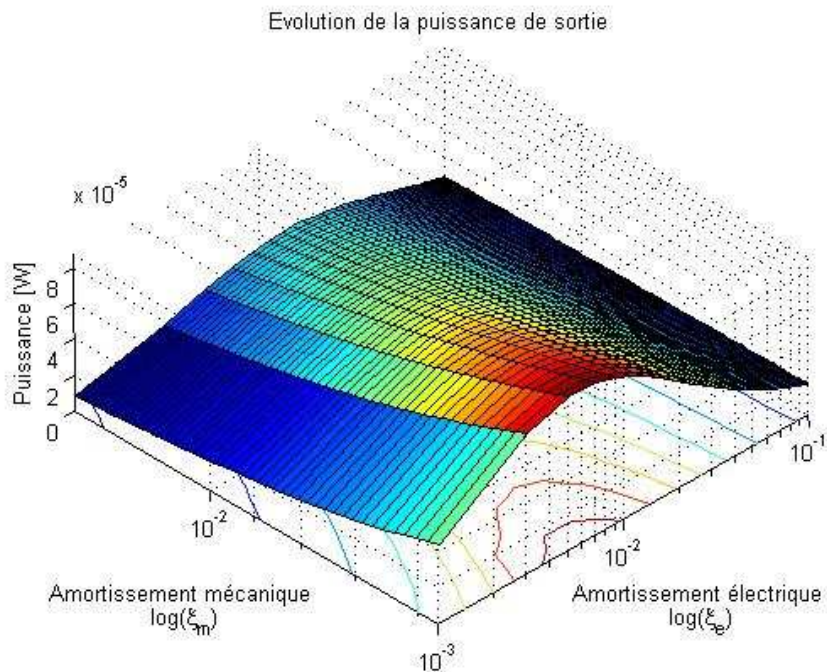


Figure A. 12 : Évolution de la puissance lorsque  $f = f_n$

#### A.8.4. Influence de $\zeta_e$ et $\zeta_m$ sur la puissance, lorsque $f = f_n$

La puissance en sortie est optimale lorsque  $\zeta_m$  est le plus petit possible et  $\zeta_m = \zeta_e$ . Comme de manière générale,  $\zeta_e$  dépend des paramètres du circuit, il est possible d'adapter  $\zeta_e$  à  $\zeta_m$ , si  $\zeta_m$  est connu (Figure A. 13).

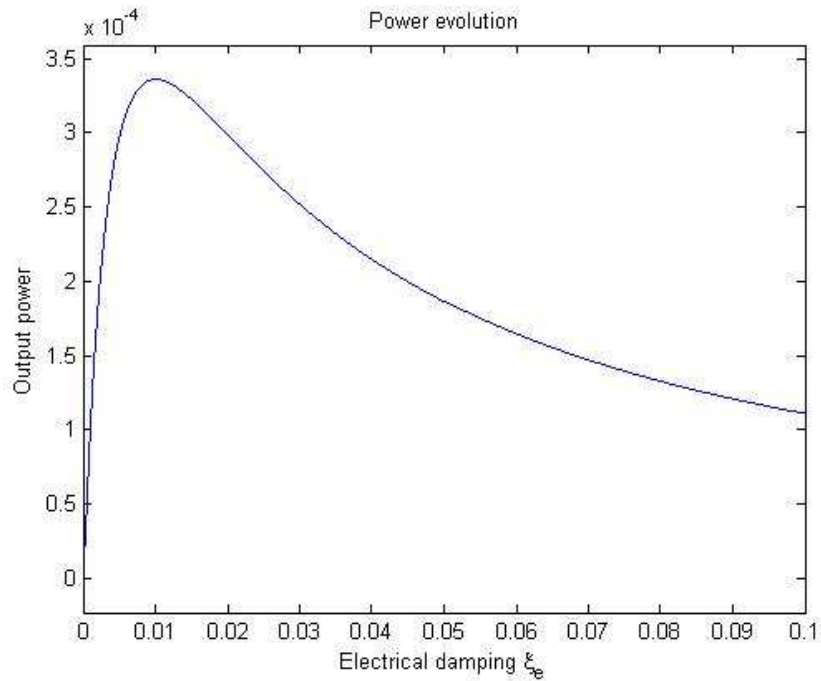


Figure A. 13 : Évolution de la puissance en fonction de  $\zeta_e$ , pour  $\zeta_m = 0.01$  et  $f_n = f$

---

## **Annexe B. Outil développé**

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| B.1.     | Présentation générale .....  | 196 |
| B.2.     | Présentation de la base de données .....                                 | 196 |
| B.2.1.   | Analyse et structuration du problème .....                               | 197 |
| B.2.2.   | Description architecturale .....   | 197 |
| B.2.3.   | Qualification énergétique .....  | 198 |
| B.2.4.   | Pré-dimensionnement .....  | 199 |
| B.3.     | Description de l'outil .....   | 200 |
| B.3.1.   | Description du projet .....  | 200 |
| B.3.2.   | Définition du problème .....   | 202 |
| B.3.3.   | Structuration du problème .....  | 204 |
| B.3.3.1. | Définition et caractérisation des sources .....                          | 205 |
| B.3.3.2. | Définition et caractérisation des puits .....                            | 207 |
| B.3.3.3. | Définition et caractérisation des autres entités .....                   | 208 |
| B.3.3.4. | Définition et caractérisation des interactions .....                     | 210 |
| B.3.3.5. | Evaluation des différentes architectures du récupérateur d'énergie ..... | 211 |
| B.3.3.6. | Aide à la décision .....   | 216 |
| B.3.4.   | Définition des modèles .....   | 222 |
| B.3.4.1. | Identification et formalisation des variables .....                      | 222 |
| B.3.4.2. | Définition des relations .....   | 223 |
| B.3.4.3. | Caractérisation des relations .....                                      | 224 |
| B.3.4.4. | Définitions des domaines de validité .....                               | 226 |
| B.3.5.   | Modélisation multiphysique, pré-dimensionnement .....                    | 227 |

## **B.1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE**

Pour supporter notre approche, nous avons développé un outil d'aide à la conception de microsystemes, en langage JAVA. Cet outil est connecté à une base de données MySQL. Le développement de l'interface a été réalisé à partir de l'environnement NetBeans.

NetBeans est un projet open source fondé par Sun Microsystems en Juin 2000. L'EDI NetBeans est un environnement de développement, un outil pour les programmeurs pour écrire, compiler, déboguer et déployer des programmes. Il est écrit en Java mais peut supporter n'importe quel langage de programmation. Il y a également un grand nombre de modules pour étendre l'environnement NetBeans.

Dans ce manuscrit, nous avons fait référence à cet outil. L'objectif de cette annexe est de présenter les principales fonctionnalités de l'outil et de détailler l'architecture de l'interface, à travers des captures d'écran.

Cette interface reprend les différentes étapes de la méthode de conception de microsystemes que nous avons mise en œuvre. Ainsi, nous trouvons les onglets suivants :

1. description du projet
2. définition du problème
3. structuration du problème
4. aide à la décision
5. modèles
6. modélisation multiphysique (conception préliminaire)
7. conception détaillée.

Il convient de noter que le dernier onglet n'est pas encore implémenté. Il a seulement été créé en prévision de l'évolution de l'outil.

Ces différents onglets font écho aux étapes de notre approche de conception :

- analyse et structuration du problème (onglets 1 et 2)
- description architecturale (onglet 3)
- qualification énergétique (onglets 3 et 4)
- pré-dimensionnement (onglets 4 à 6).

De plus, l'outil possède des liens avec différents logiciels de traitement de texte pour l'enregistrement des données et la génération de rapports. Il est aussi en liaison avec Matlab, pour la modélisation globale du microsysteme.

## **B.2. PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES**

L'outil est connecté à une base de données servant de base de connaissances, dans le cadre de nos travaux. Elle a été créée à partir de MySQL Workbench.

La base de données ainsi réalisée contient 24 tables. Ces dernières sont présentées ci-dessous, par rapport à leur implication dans le processus de conception. Pour ne pas surcharger les figures, les relations entre les tables ne sont pas affichées.

### B.2.1. Analyse et structuration du problème

Les tables intitulées "project\_description" et "problem\_definition" (Figure B. 1) permettent de stocker les informations relatives à la définition du projet et du problème de conception posé.

Plus précisément, la table "project\_description" renferme les informations telles que le nom du projet, les acteurs, les dates. La seconde table détaille le problème en déterminant le besoin, la situation de vie considérée et le lieu d'implantation.

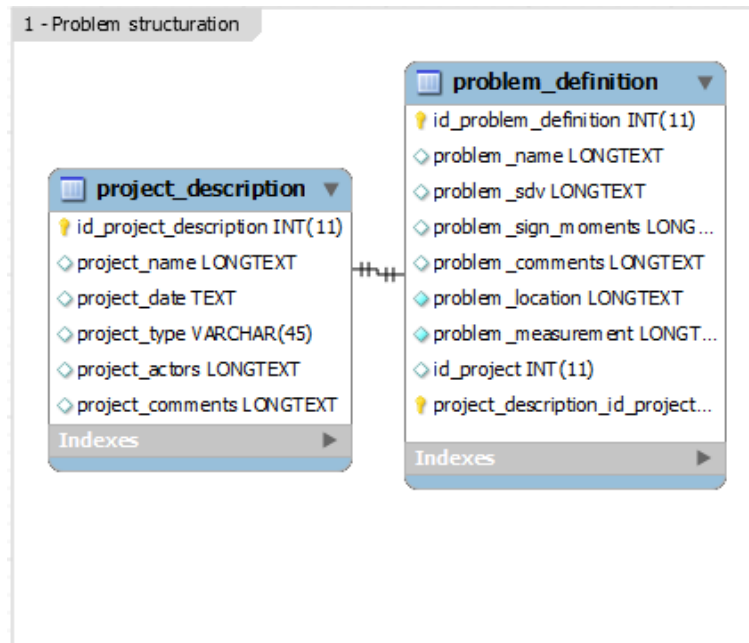


Figure B. 1 : Tables liées à la phase d'analyse et de structuration du problème

### B.2.2. Description architecturale

La phase de description architecturale décrit les entités constituant le système. Ainsi, nous avons les tables suivantes (Figure B. 2):

- "entity" : définition de toutes les entités du problème,
- "source" : identification des sources d'énergie présentes dans l'environnement du système,
- "sink" : identification des puits utilisés,
- "system" : liste de tous les convertisseurs d'énergie existants. Cette table est également enrichie au fur et à mesure de l'utilisation de l'outil,
- "energy-class" : liste des classes d'énergie définies, à savoir l'énergie rayonnante, mécanique et thermique,
- "enegy\_source" : regroupe les sources d'énergie déjà définies,
- "transmitterac" : liste les convertisseurs de tension AC/DC,
- "transmitterdc" : liste les convertisseurs de tension DC/DC.



2 - Architectural description

| entity   | source  | energy_class  | energy_source  | transmitterac   | transmitterdc   |
|--|---|---|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>id_entity INT(11)</li> <li>entity_name VARCHAR(45)</li> <li>entity_nature VARCHAR(500)</li> <li>entity_class VARCHAR(500)</li> <li>entity_function LONGTEXT</li> <li>entity_power_mean_value FLOAT</li> <li>entity_power_min_value FLOAT</li> <li>entity_power_max_value FLOAT</li> <li>entity_power_density_relation LONGTEXT</li> <li>entity_power_unit VARCHAR(45)</li> <li>entity_qualif_location FLOAT</li> <li>entity_qualif_magnitude FLOAT</li> <li>entity_qualif_variation FLOAT</li> <li>entity_qualif_intensity FLOAT</li> <li>entity_qualif_nature FLOAT</li> <li>entity_qualif_AI FLOAT</li> <li>entity_iflow_name VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_name VARCHAR(45)</li> <li>entity_iflow_class1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_iflow_class2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_ivar1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_ivar2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_class1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_class2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_var1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_var2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_type VARCHAR(45)</li> <li>entity techno VARCHAR(45)</li> <li>entity_consumption FLOAT</li> <li>entity_current FLOAT</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_energy_source INT(11)</li> <li>source_name VARCHAR(45)</li> <li>source_class LONGTEXT</li> <li>source_function LONGTEXT</li> <li>source_power_density_value TEXT</li> <li>source_power_density_model TEXT</li> <li>source_flow LONGTEXT</li> <li>comments LONGTEXT</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_energy_class INT(11)</li> <li>class_name VARCHAR(45)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_energy_source INT(11)</li> <li>source_name VARCHAR(45)</li> <li>source_class ENUM(...)</li> <li>source_function LONGTEXT</li> <li>source_power_density_value TEXT</li> <li>source_power_density_model TEXT</li> <li>comments LONGTEXT</li> <li>system_id_system INT(11)</li> <li>system_system_input_flow VARCHAR(45)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_transmitter INT(11)</li> <li>transmitter_nature VARCHAR(45)</li> <li>transmitter_type VARCHAR(45)</li> <li>transmitter_eff_min FLOAT</li> <li>transmitter_eff_max FLOAT</li> <li>transmitter_eff_value FLOAT</li> <li>Transmitter_eff_relation LONGTE...</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_transmitter INT(11)</li> <li>transmitter_nature VARCHAR(45)</li> <li>transmitter_type VARCHAR(45)</li> <li>transmitter_eff_min FLOAT</li> <li>transmitter_eff_max FLOAT</li> <li>transmitter_eff_value FLOAT</li> <li>Transmitter_eff_relation LONGTE...</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>entity_qualif_location FLOAT</li> <li>entity_qualif_magnitude FLOAT</li> <li>entity_qualif_variation FLOAT</li> <li>entity_qualif_intensity FLOAT</li> <li>entity_qualif_nature FLOAT</li> <li>entity_qualif_AI FLOAT</li> <li>entity_iflow_name VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_name VARCHAR(45)</li> <li>entity_iflow_class1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_iflow_class2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_ivar1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_ivar2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_class1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_class2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_var1 VARCHAR(45)</li> <li>entity_oflow_var2 VARCHAR(45)</li> <li>entity_type VARCHAR(45)</li> <li>entity techno VARCHAR(45)</li> <li>entity_consumption FLOAT</li> <li>entity_current FLOAT</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_sink INT(11)</li> <li>sink_name VARCHAR(45)</li> <li>sink_type TEXT</li> <li>sink_technology TEXT</li> <li>magnitude TEXT</li> <li>typical_current FLOAT</li> <li>typical_voltage FLOAT</li> <li>typical_power FLOAT</li> <li>specifications LONGTEXT</li> </ul>  |   |  |   |   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_system INT(11)</li> <li>system_name VARCHAR(45)</li> <li>system_class ENUM(...)</li> <li>system_function LONGTEXT</li> <li>system_type VARCHAR(45)</li> <li>system_input_flow VARCHAR(45)</li> <li>system_output_flow VARCHAR(45)</li> <li>system_efficiency_min_value FLOAT</li> <li>system_efficiency_max_value FLOAT</li> <li>system_efficiency_equation LONGTE...</li> <li>comments LONGTEXT</li> </ul> |   |  |   |   |

Figure B. 2 : Tables liées à la phase de description architecturale

### B.2.3. Qualification énergétique

Durant la phase de qualification énergétique, les entités sont qualifiées et classées, de façon à choisir la structure répondant le mieux au besoin. Les tables guidant les choix de conception sont les suivantes (Figure B. 3) :

- "interaction" : caractérisation du type d'interaction entre les entités (contact, à distance, physique, cognitive, ...),
- "flow" : caractérisation des flux mis en jeu dans le système,
- "flow\_class1" : liste de la classe primaire des flux,
- "flow\_class2" : liste de la classe secondaire des flux,
- "flow\_var1" : liste des variables associées aux flux,

- "flow\_var2" : liste des variables associées aux flux,
- "criteria" : définition des critères de qualification.

3- Energy qualification

| Table Name         | Fields  |
|--------------------|---|
| <b>interaction</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_interaction INT(11)</li> <li>interaction_name VARCHAR(100)</li> <li>interaction_type VARCHAR(45)</li> <li>interaction_nature VARCHAR(45)</li> <li>interaction_charact VARCHAR(45)</li> <li>interaction_flow_class1 VARCHAR(45)</li> <li>interaction_flow_class2 VARCHAR(45)</li> <li>interaction_flow_var1 VARCHAR(45)</li> <li>interaction_flow_var2 VARCHAR(45)</li> <li>interaction_coord_entity_x1 FLOAT</li> <li>interaction_coord_entity_x2 FLOAT</li> <li>interaction_coord_entity_x3 FLOAT</li> <li>interaction_coord_entity_y1 FLOAT</li> <li>interaction_coord_entity_y2 FLOAT</li> <li>interaction_coord_entity_y3 FLOAT</li> <li>interaction_model1 LONGTEXT</li> <li>interaction_model2 LONGTEXT</li> <li>interaction_model3 LONGTEXT</li> <li>entity1_name VARCHAR(150)</li> <li>entity2_name VARCHAR(150)</li> <li>id_project INT(11)</li> </ul> |
| <b>flow</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_flow INT(11)</li> <li>flow_name VARCHAR(45)</li> <li>flow_primary_class ENUM(...)</li> <li>flow_secondary_class ENUM(...)</li> <li>first_dual_variable ENUM(...)</li> <li>second_dual_variable ENUM(...)</li> <li>flow_qualification FLOAT</li> <li>comments LONGTEXT</li> </ul>  |
| <b>flow_class1</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_flow_class1 INT(11)</li> <li>flow_class1_name ENUM(...)</li> <li>flow_class_symbol VARCHAR(45)</li> <li>flow_class_unit VARCHAR(45)</li> </ul>  |
| <b>flow_class2</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_flow_class2 INT(11)</li> <li>flow_class2_name ENUM(...)</li> <li>flow_class2_symbol VARCHAR(45)</li> <li>flow_class2_unit VARCHAR(45)</li> </ul>  |
| <b>flow_var2</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_flow_var2 INT(11)</li> <li>flow_var2_name ENUM(...)</li> <li>flow_var2_symbol VARCHAR(45)</li> <li>flow_var2_unit VARCHAR(45)</li> </ul>  |
| <b>flow_var1</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_flow_var1 INT(11)</li> <li>flow_var1_name ENUM(...)</li> <li>flow_var1_symbol VARCHAR(45)</li> <li>flow_var1_units VARCHAR(45)</li> </ul>   |
| <b>criteria</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>id_criteria INT(11)</li> <li>location FLOAT</li> <li>magnitude FLOAT</li> <li>variation FLOAT</li> <li>rhythm FLOAT</li> <li>nature FLOAT</li> <li>flow_qualification FLOAT</li> </ul>   |

Figure B. 3 : Tables liées à la phase de qualification énergétique

#### B.2.4. Pré-dimensionnement

Les tables utilisées pour la définition des modèles et des variables associées sont listées ci-après (Figure B. 4) :

- "variable\_model" : définition des variables utilisées,
- "variables\_type" : nature des variables (morphologique, critère, physique ou technique),

- "variables\_data\_type" : type de variable (symbolique, entière ou réelle),
- "constraint\_type" : type de relation (extensive, intensive, logique ou conditionnelle),
- "constraint\_nature" : nature de l'interaction (comportement, expérience, morphologie ou objectif),
- "domain" : définition du domaine de valeurs de chaque variable,
- "units" : liste des unités principales,
- "selected\_variable" : liste des variables associées au système,
- "units\_prefix" : préfixes pour les unités.

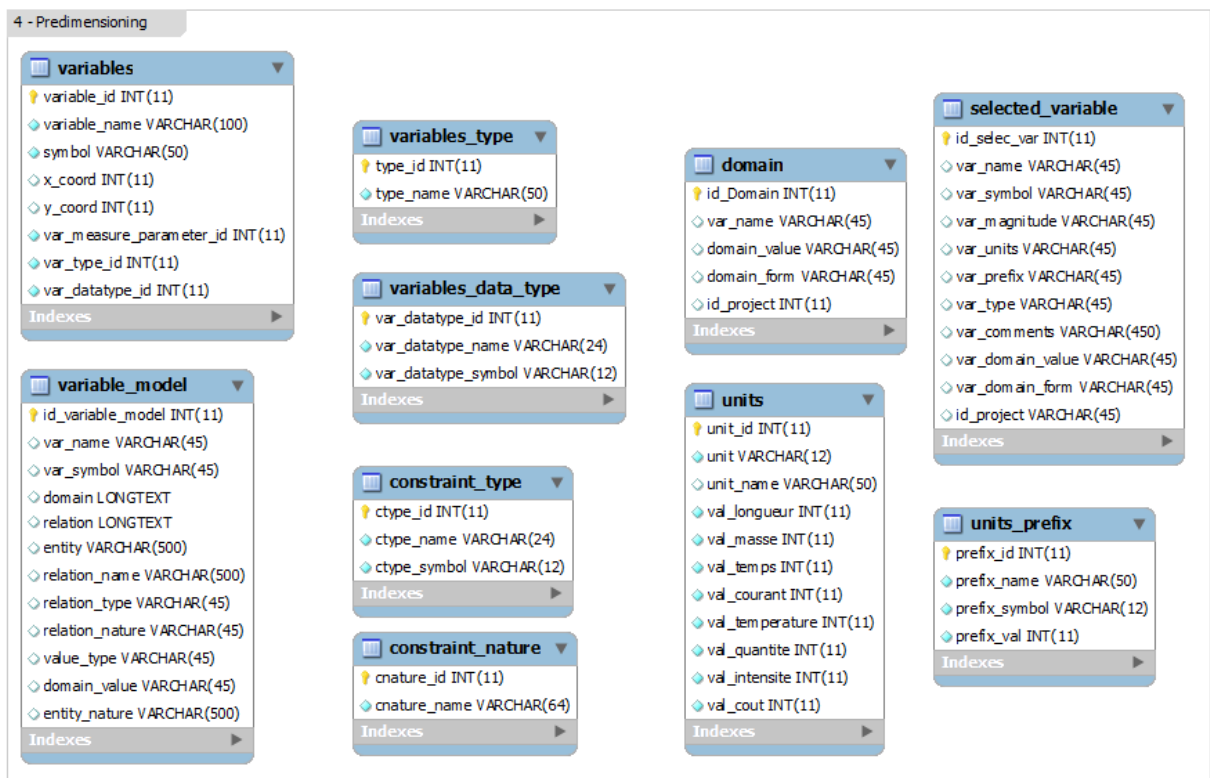


Figure B. 4 : Tables liées à la phase de pré-dimensionnement

### B.3. DESCRIPTION DE L'OUTIL

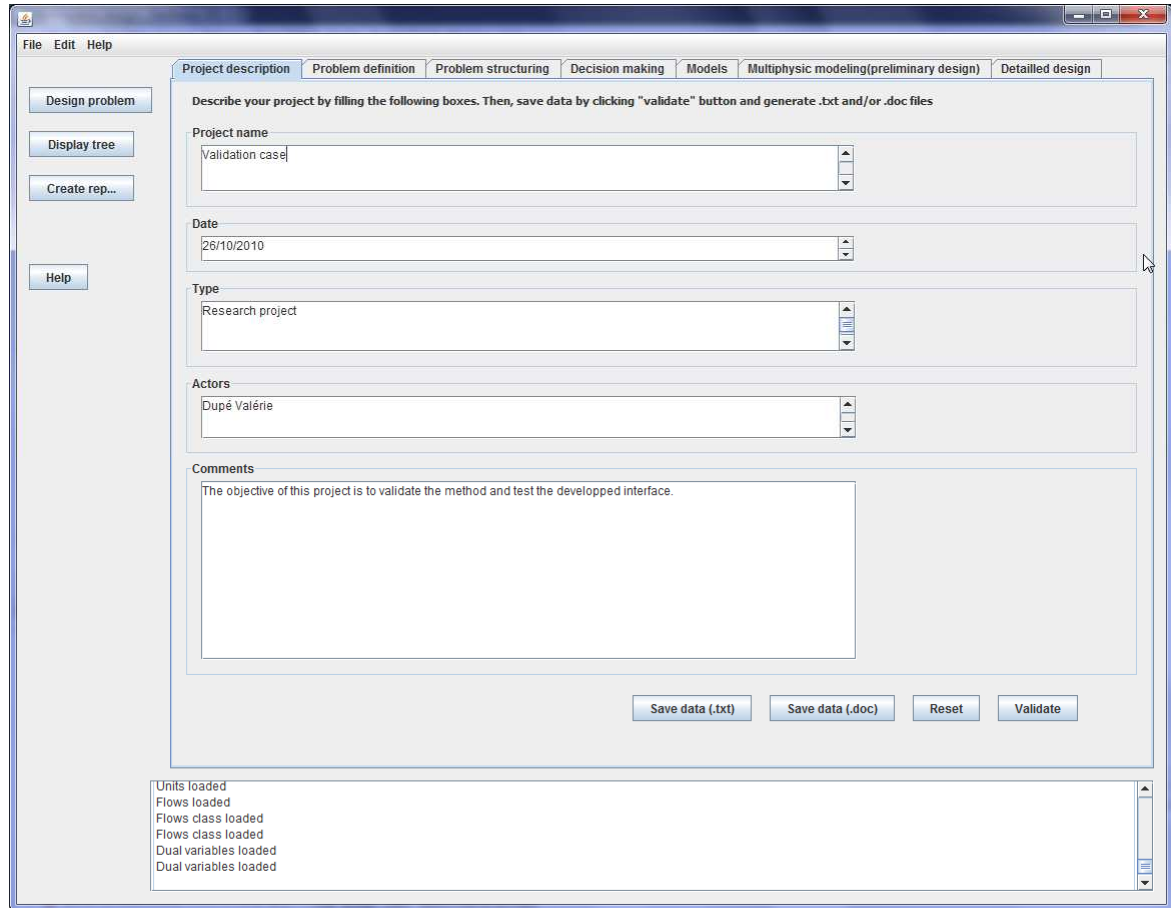
#### B.3.1. Description du projet

La première étape consiste à définir le projet. Pour cela, l'utilisateur doit fournir les informations suivantes (Figure B. 5) :

- nom du projet,
- date de création du projet,
- type de projet,

- acteurs participant au projet,
- commentaires éventuels.

Ces informations sont enregistrées dans base de données "microsystem\_design", dans la table nommée "project\_description". Un identifiant de projet est également créé. Il sera utilisé par la suite pour lier les informations au projet.



**Figure B. 5 : Présentation de l'onglet "description du projet" de l'interface développée**

De plus, le concepteur peut générer un rapport au format word et/ou texte par l'intermédiaire des boutons "Save data (.doc)" et "Save data (.txt)", après avoir validé les données (Figure B. 6).

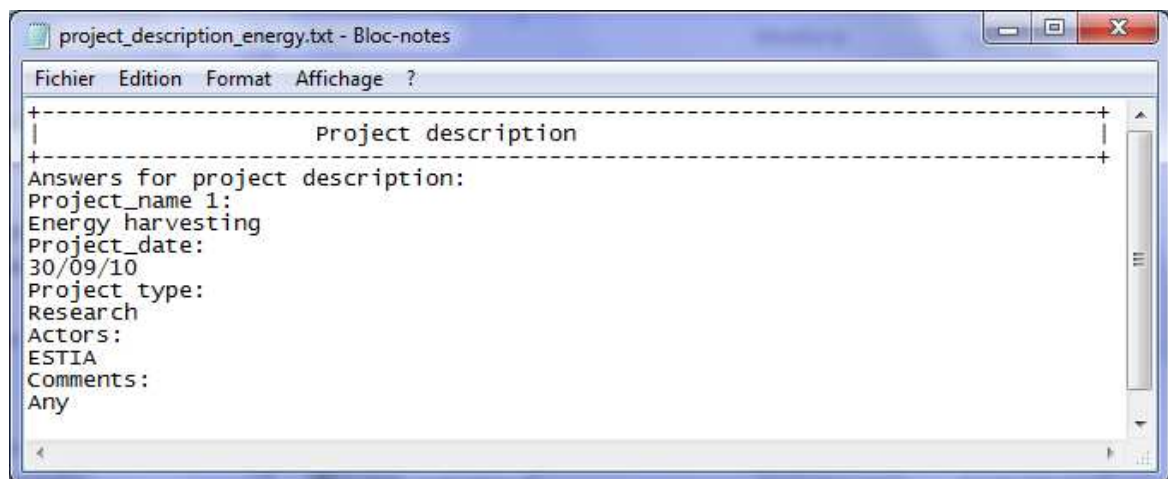
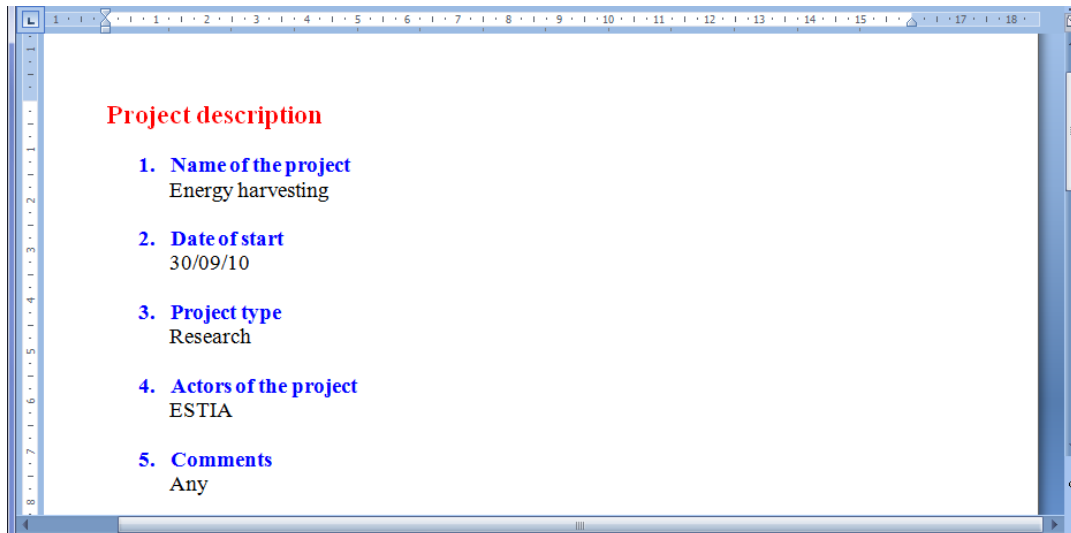


Figure B. 6 : Rapports générés pour la description du projet

### B.3.2. Définition du problème

La deuxième étape consiste à définir le problème considéré par le biais des informations suivantes (Figure B. 7) :

- définition de l'application visée,
- situation de vie considérée,
- moment significatif considéré (facultatif),
- emplacement du microsysteme,
- objectifs du microsysteme,
- commentaires.

Ces informations sont enregistrées dans base de données "microsystem\_design", dans la table nommée "problem\_definition".

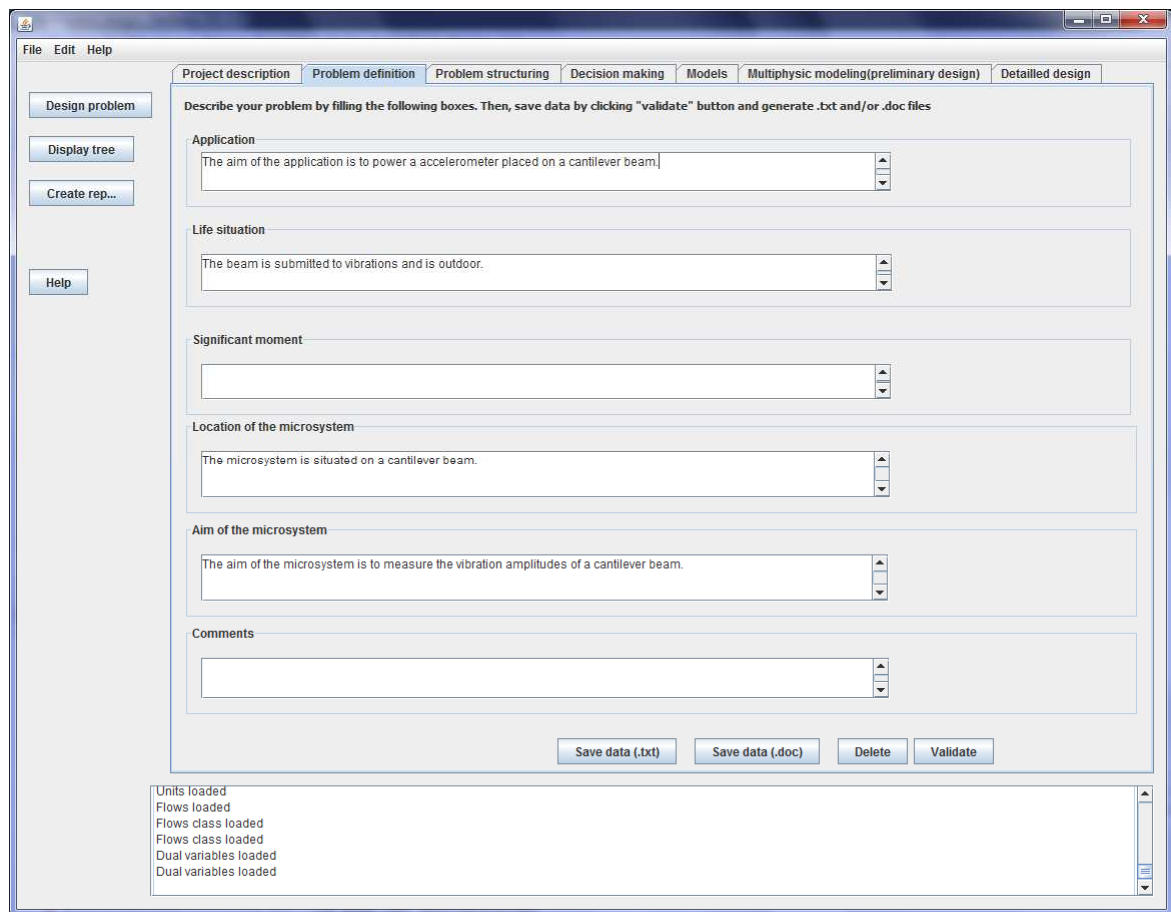
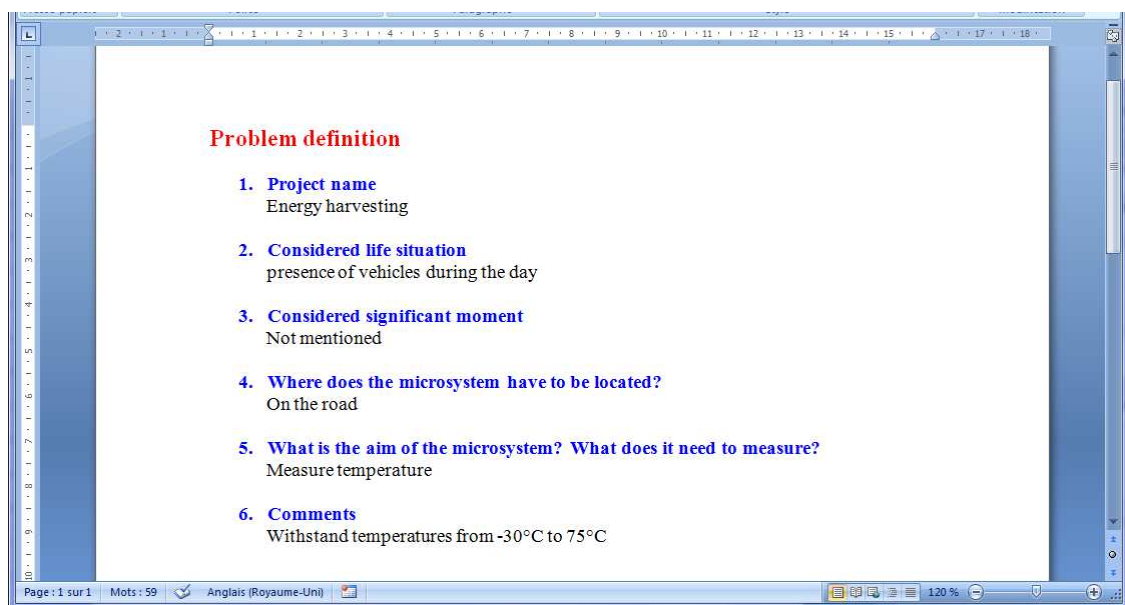


Figure B. 7 : Présentation de l'onglet "définition du problème" de l'interface développée

Là encore, le concepteur peut générer un rapport au format word et/ou texte par l'intermédiaire des boutons "Save data (.doc)" et "Save data (.txt)", après avoir validé les données (Figure B. 8).



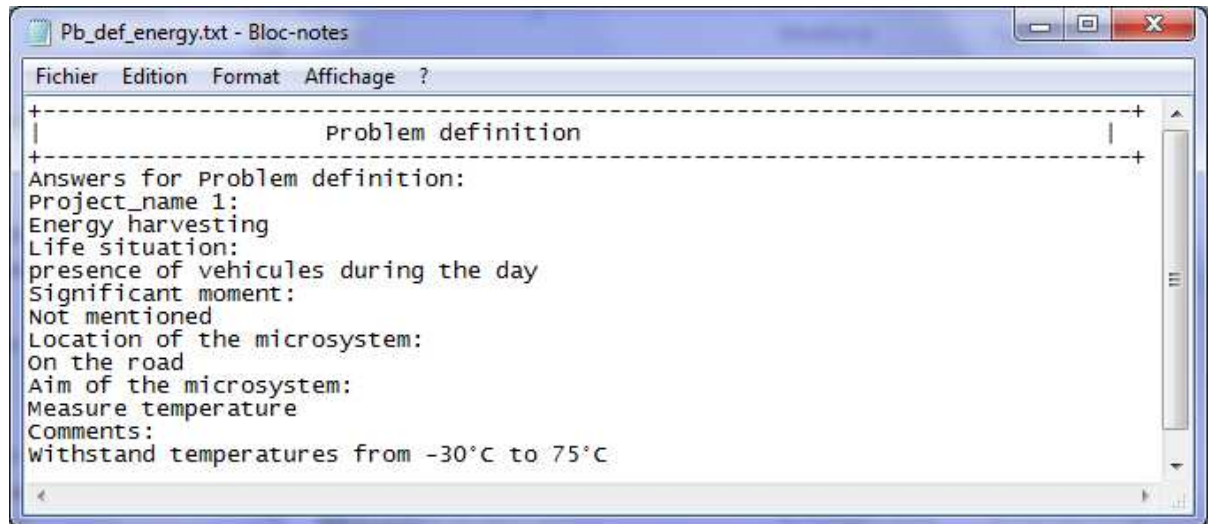


Figure B. 8 : Rapports générés pour la définition du problème

### B.3.3. Structuration du problème

La seconde étape de notre approche consiste à définir et caractériser toutes les entités liées au problème. Pour cela, nous considérons le Système (le récupérateur d'énergie) et le Super-Système (environnement).

De plus, nous distinguons, dans le Super-système, trois grands types d'entités (Figure B. 9) :

- les sources qui seront considérées pour les flux qu'elles génèrent,
- les puits qui vont absorber un flux,
- les autres entités qui interagissent avec le Système et/ou le Super-Système.

Lors de cette étape, le concepteur définit et caractérise les différentes entités liées au problème, à l'aide de l'interface développée.

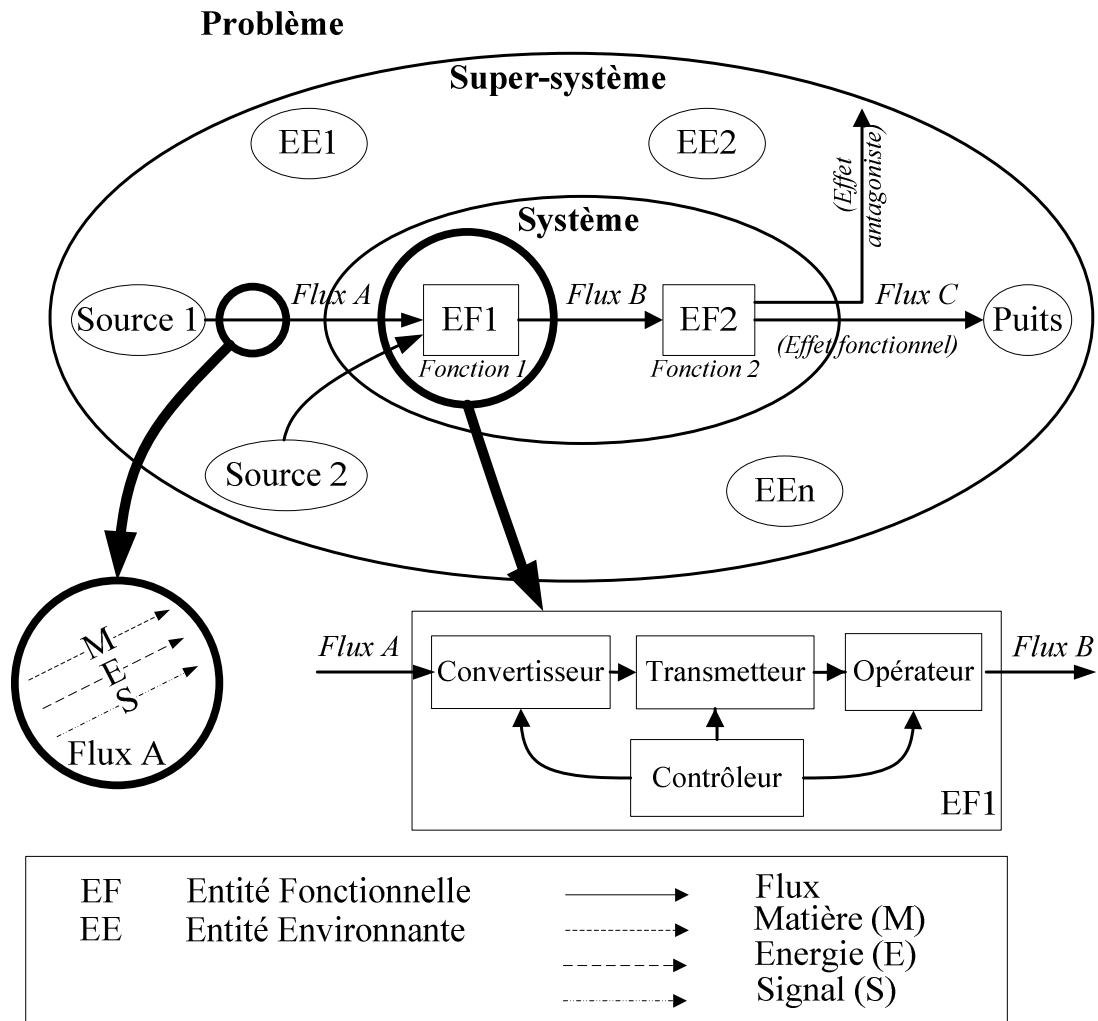


Figure B. 9 : Représentation globale du Système et du Super-système

### B.3.3.1. Définition et caractérisation des sources

Cet onglet comprend trois grandes étapes : la description de la source, la qualification de la Source et la description des flux mis en jeu (Figure B. 10). Pour définir une nouvelle Source, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton "Define new source".

La première étape consiste à définir la Source au travers des éléments suivants :

- nom de la source (lien à la table "energy\_source" pour obtenir la liste des sources existantes),
- classe de la source (énergie rayonnante, mécanique, thermique) (lien à la table "energy\_class"),
- fonction de la Source
- densité d'énergie de la Source (estimation et relation),
- commentaires.

Ensuite, la Source est qualifiée à l'aide des critères suivants

- lieu,



- intensité (valeur, variation et rythme),
- nature,
- interactions antagonistes.

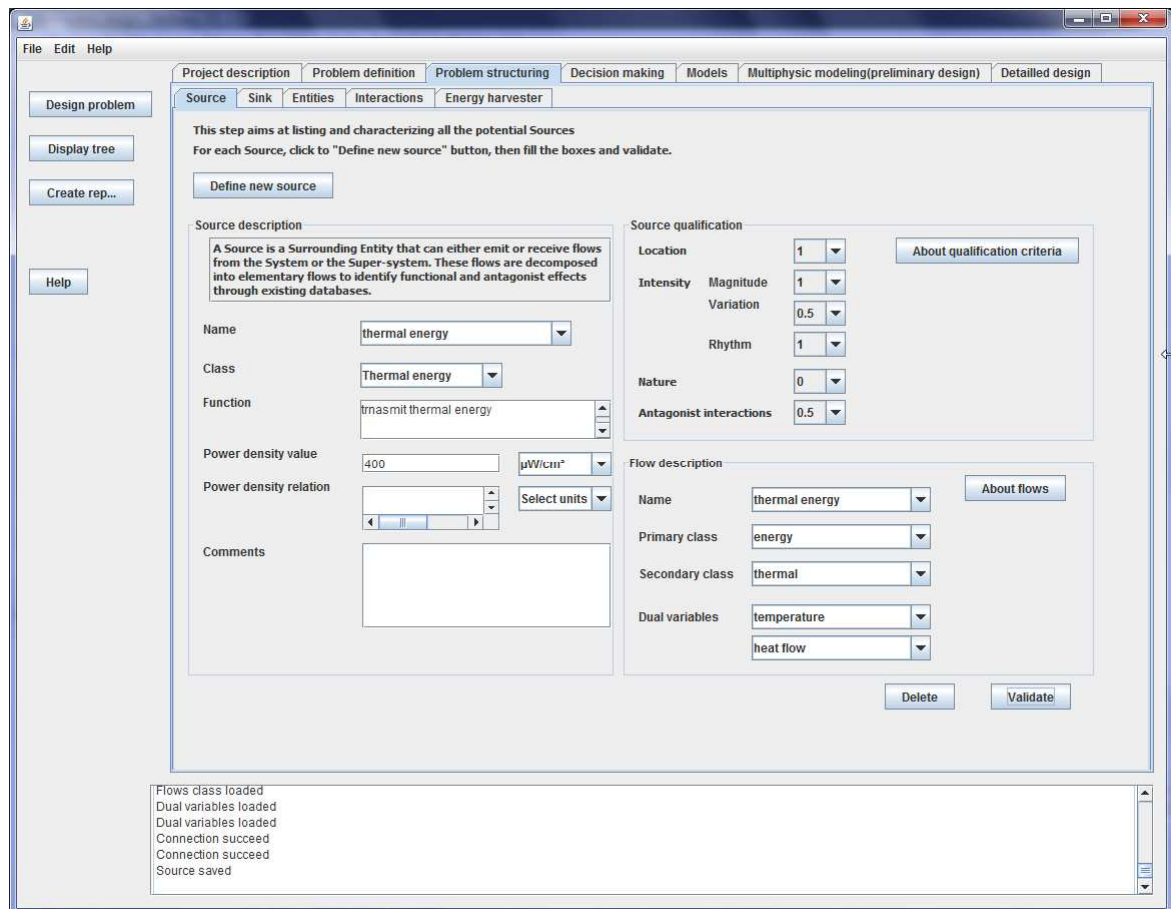
Ces critères sont utilisés pour classer les Sources en utilisant une fonction d'agrégation. Pour le moment, le choix des différentes fonctions d'agrégation n'est pas implémenté, il s'agit d'une évolution future de l'interface.

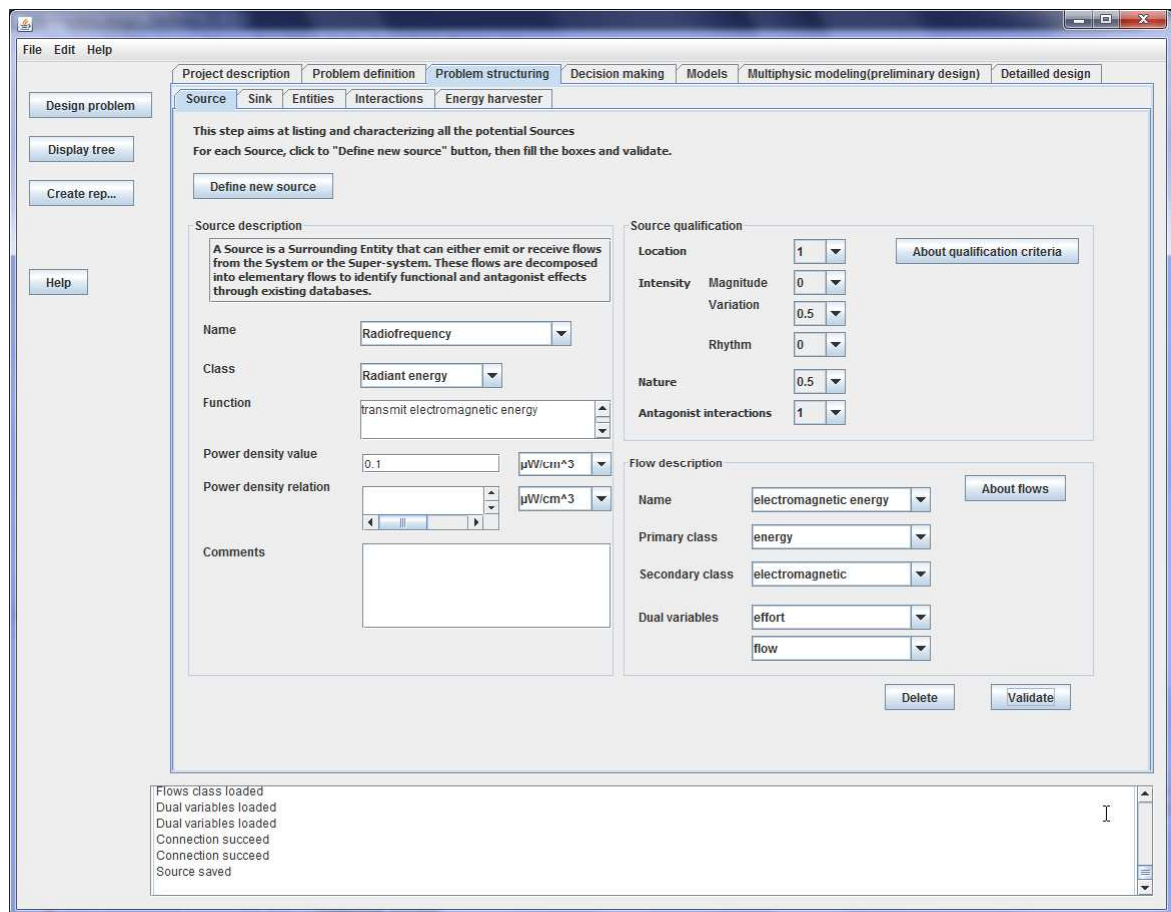
Enfin, le ou les flux présents doivent être décrits en indiquant :

- le nom (lien avec la table "flow"),
- la classe primaire (lien avec la table "flow\_class\_1"),
- la classe secondaire (lien avec la table "flow\_class\_2"),
- les variables duales (lien avec les classes "flow\_var\_1" et "flow\_var\_2").

Cette description est basée sur la classification proposée dans [Hirtz, Stone et al., 2002].

Les données sont enregistrées dans les tables "entity" et "energy\_source" par l'intermédiaire du bouton "Validate". Le bouton "reset" permet de réinitialiser les champs et d'effacer la dernière ligne des deux tables citées ci-dessus.





**Figure B. 10 : Définition des sources (exemple pour la source d'énergie thermique et la radiofréquence)**

### B.3.3.2. Définition et caractérisation des puits

Dans le cadre de la conception de microsystemes autonomes, le Puits est constitué par un capteur et/ou un actionneur. Les principales caractéristiques sont (Figure B. 11) :

- le nom (lien avec la table "sink"),
- le type (lien avec "sink"),
- la technologie (lien avec la table "sink"),
- la puissance requise,
- le courant,
- la tension d'alimentation,
- les spécifications liées au puits, comme la plage de température, par exemple,
- la fonction de l'entité.

Les données sont enregistrées dans les tables "entity" et "sink".

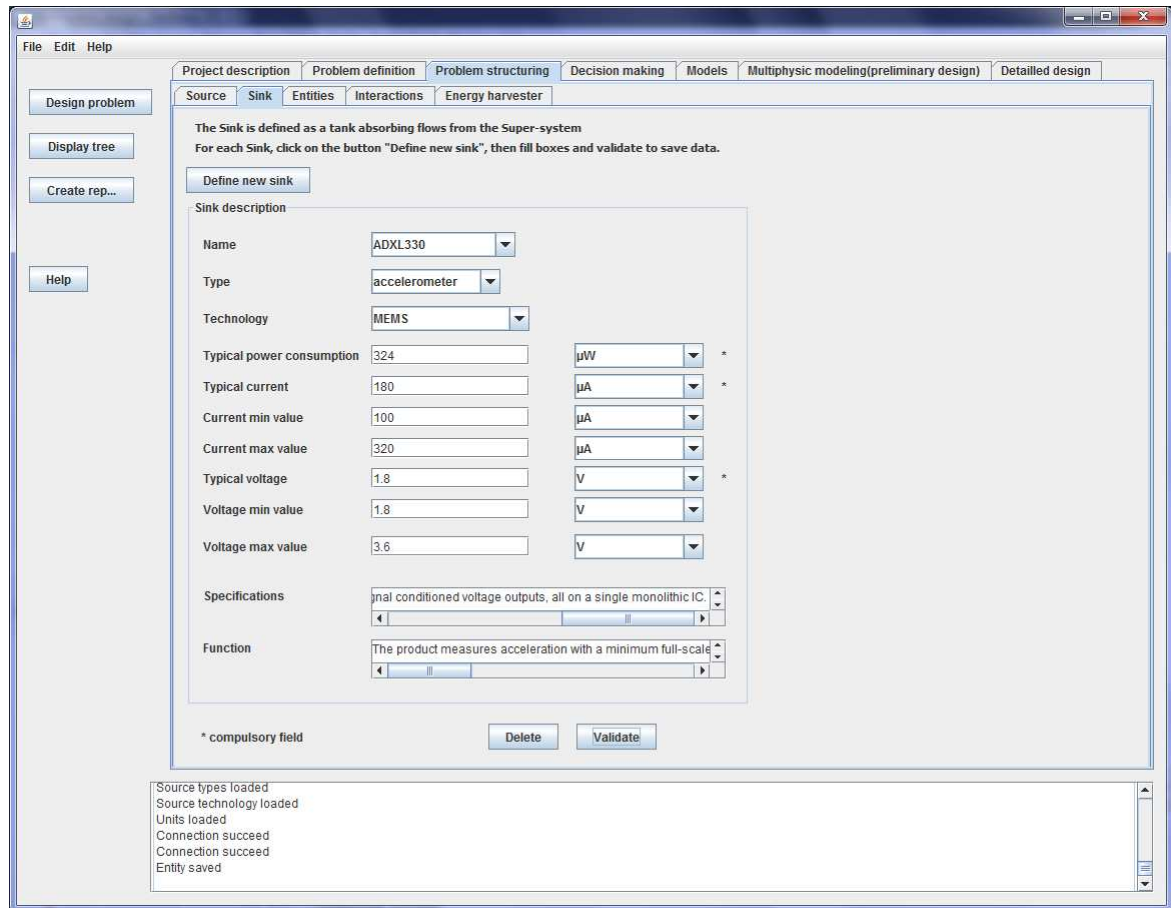


Figure B. 11 : Définition des puits

### B.3.3.3. Définition et caractérisation des autres entités

Cet onglet récapitule les Sources et les Puits associés au projet qui ont été définis préalablement. Ensuite, d'autres entités peuvent être créées. Pour cela, le concepteur doit remplir les champs suivants (Figure B. 12) :

- nom,
- classe,
- fonction,
- type.

Les données sont enregistrées dans la table "entity". Ensuite, le graphe des entités est obtenu, en cliquant sur le bouton "Display graph of entities"(Figure B. 13).

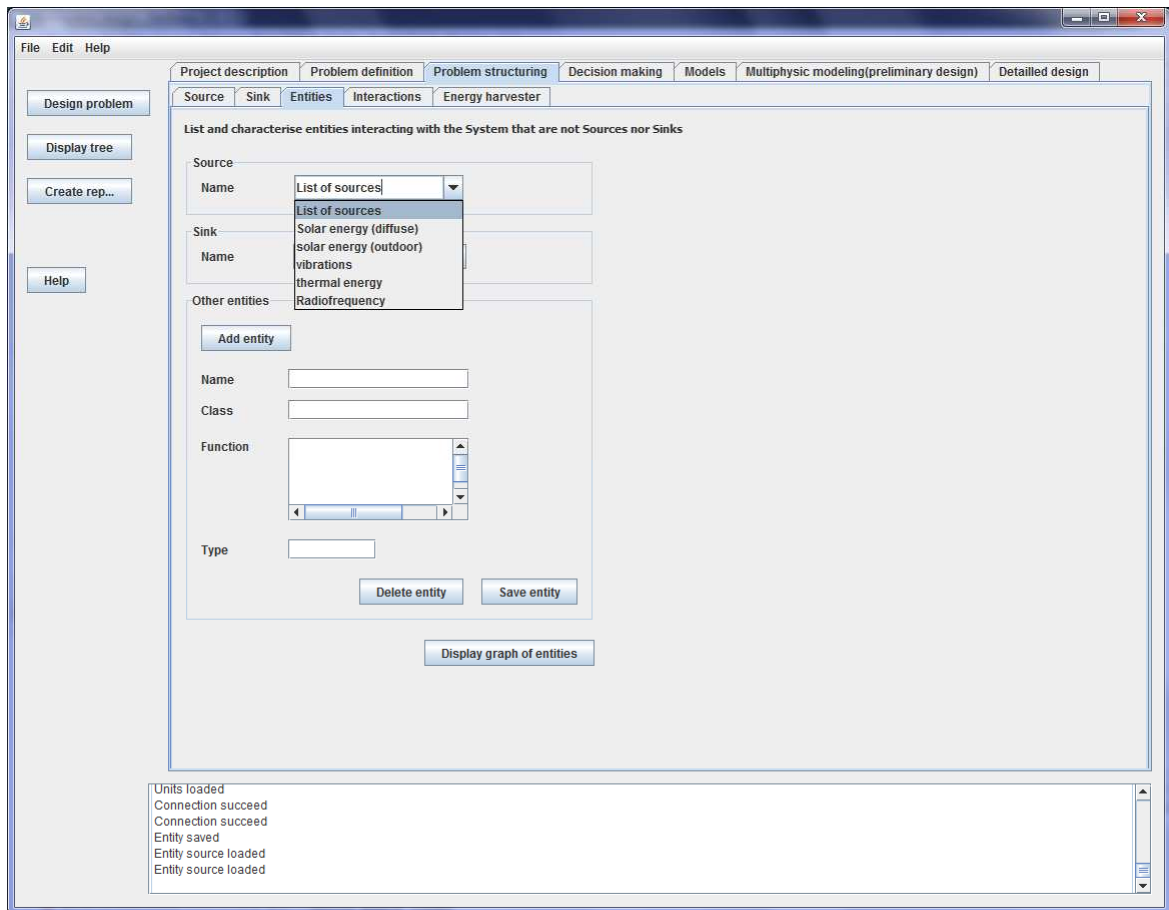


Figure B. 12 : Définition des autres entités

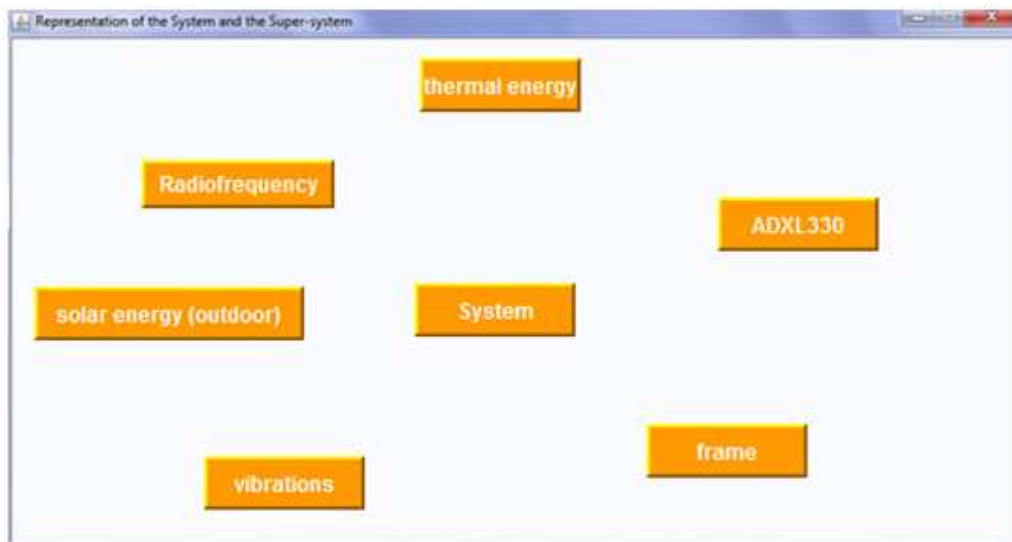


Figure B. 13 : Représentation graphique des différentes entités

### B.3.3.4. Définition et caractérisation des interactions

Après avoir défini et caractérisé toutes les entités, il faut définir les interactions.

A partir de l'outil développé, le concepteur peut ajouter les interactions entre les entités du projet.

Après avoir choisi les deux entités à partir des deux listes déroulantes ("Select entity 1" and "Select entity 2"), les interactions doivent être caractérisées (Figure B. 14) en faisant attention au sens : l'interaction va de l'entité 1 vers l'entité 2.

Description de l'interaction :

- nom de l'interaction,
- type (physique, sensorielle ou cognitive) [Fischer, 2008],
- caractéristique (avec ou sans contact).

Caractérisation des flux (comme pour la définition des entités) :

- nom du flux,
- classe primaire,
- classe secondaire,
- variables duales.

Pour générer le graphe des interactions, les coordonnées des entités considérées sont demandées, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une fenêtre, via le bouton "Pick...".

Figure B. 14 : Définition des interactions

Les interactions sont enregistrées dans la table "interaction". Au fur et à mesure de leur déclaration, le graphe entités-relations est construit (Figure B. 15).

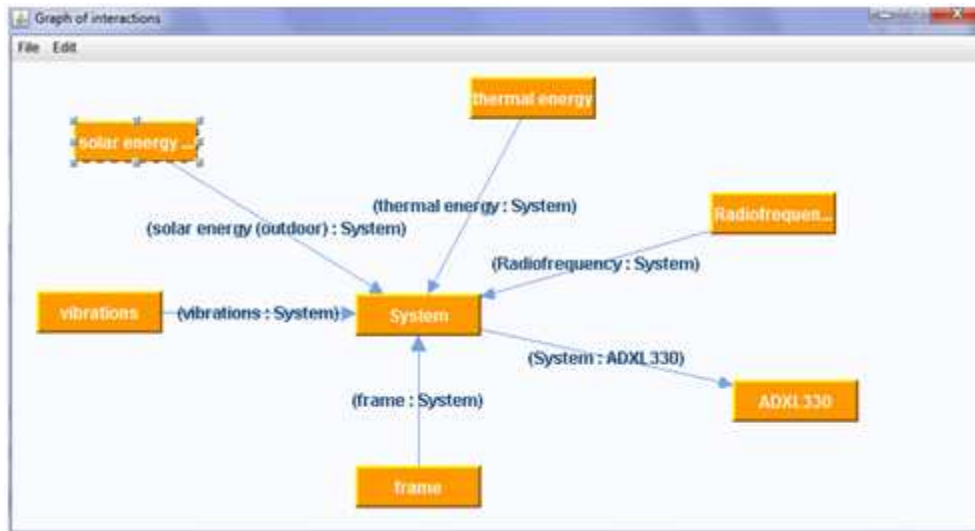


Figure B. 15 : Graphe entités-interactions

### B.3.3.5. Évaluation des différentes architectures du récupérateur d'énergie

Cette phase se divise en trois grands points :

- la classification des Sources,
- les architectures possibles du récupérateur d'énergie,
- l'évaluation des ces architectures.

#### 1. Classification des Sources

A partir de la qualification des Sources réalisée dans l'étape de structuration du problème, une classification est obtenue, en utilisant des fonctions d'agrégation [Harrington, 1965] [Derringer et Suich, 1980 ; Kim et Lin, 2000] [5] . Les Sources sont ainsi classées par ordre de préférence (de la plus adaptée à l'application à la moins appropriée) (Figure B. 16).

A partir de cette classification, le concepteur sélectionne la ou les Sources qu'il souhaite étudier afin d'évaluer les différentes architectures envisageables pour le récupérateur d'énergie.

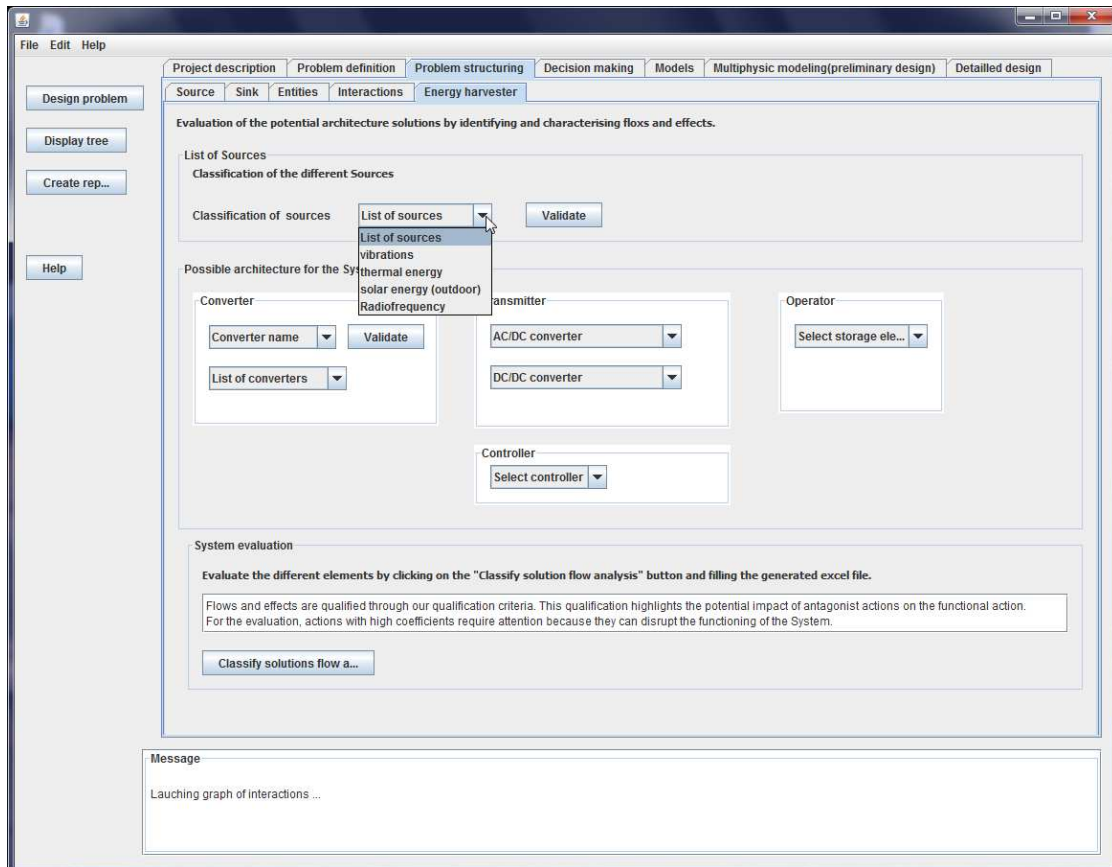


Figure B. 16 : Récupérateur d'énergie : classification des Sources

## 2. Architectures possibles

En fonction de la Source sélectionnée, différentes possibilités existent pour concevoir le récupérateur d'énergie. Notons que les données sont issues de la littérature et peuvent être enrichies par des résultats expérimentaux ou la conception de systèmes spécifiques.

Le récupérateur d'énergie est divisé en blocs fonctionnels [Sallaou, Pailhès et al., 2005] [Sallaou, Pailhès et al., 2009] [J. Pailhes, 2007]. Nous distinguons ainsi quatre éléments principaux (Figure B. 17) :

- des convertisseurs : ils transforment le flux d'entrée en d'autres types de flux, ce qui induit un changement des variables duales associées aux flux.
- des transmetteurs : ils permettent la transmission de flux sans changement de nature.
- des opérateurs : il s'agit de convertisseurs ou de transmetteurs.
- des contrôleurs qui assurent la transmission du flux fonctionnel.

Avec l'interface, l'utilisateur sélectionne un convertisseur, parmi ceux proposés. Cette étape se divise en deux, la première consiste à sélectionner une technologie et la seconde repose sur le type de convertisseur (Figure B. 17).

Par exemple, trois technologies principales existent pour convertir l'énergie mécanique des vibrations en énergie électrique : l'électrostatique, l'électromagnétisme et la piézoélectricité. Ensuite, pour les convertisseurs piézoélectriques, différents matériaux sont utilisés comme le PVDF (Polyfluorure de vinylidène) ou le PZT (Titano-Zirconate de Plomb).

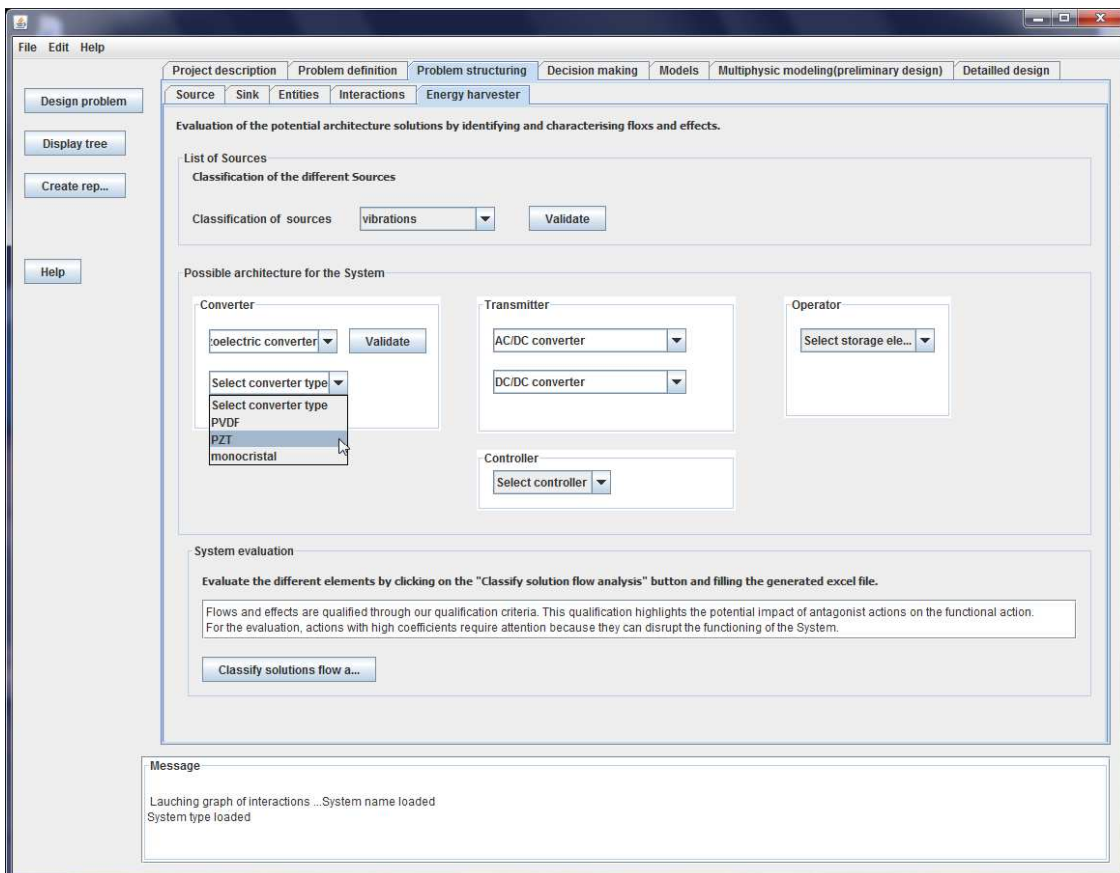
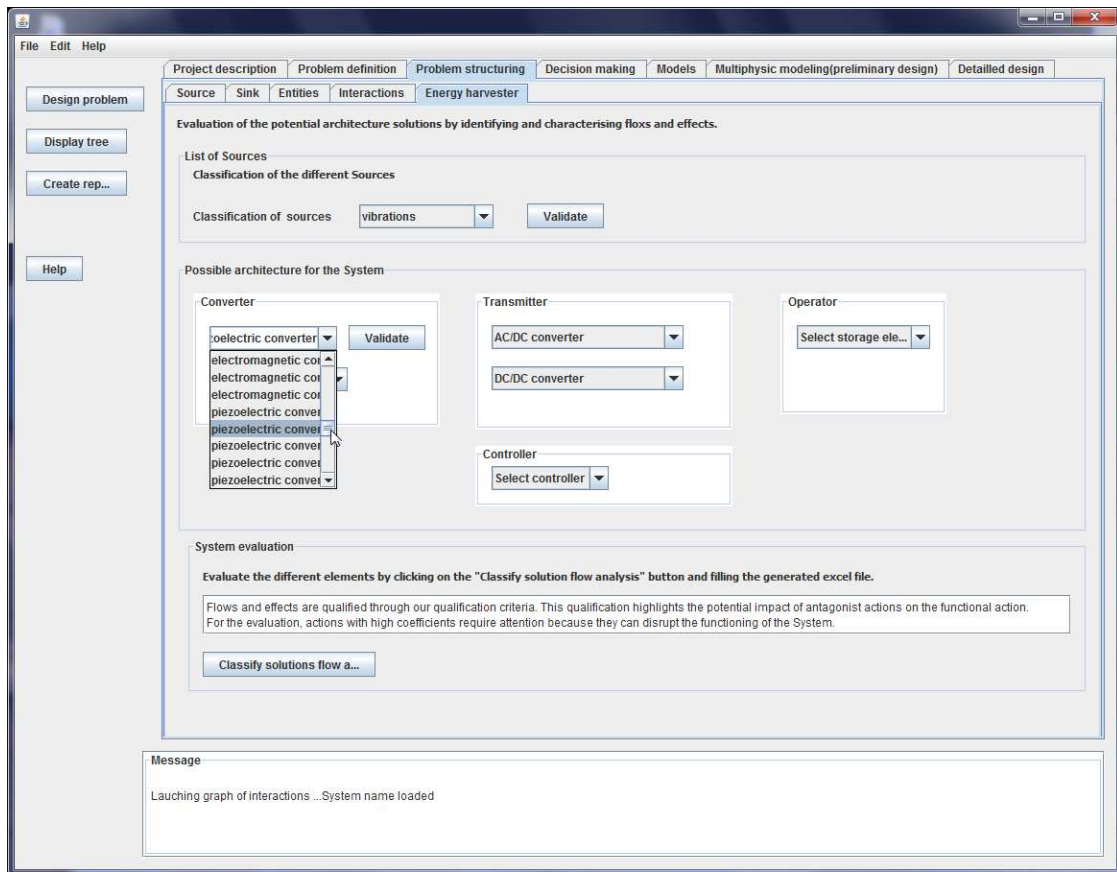


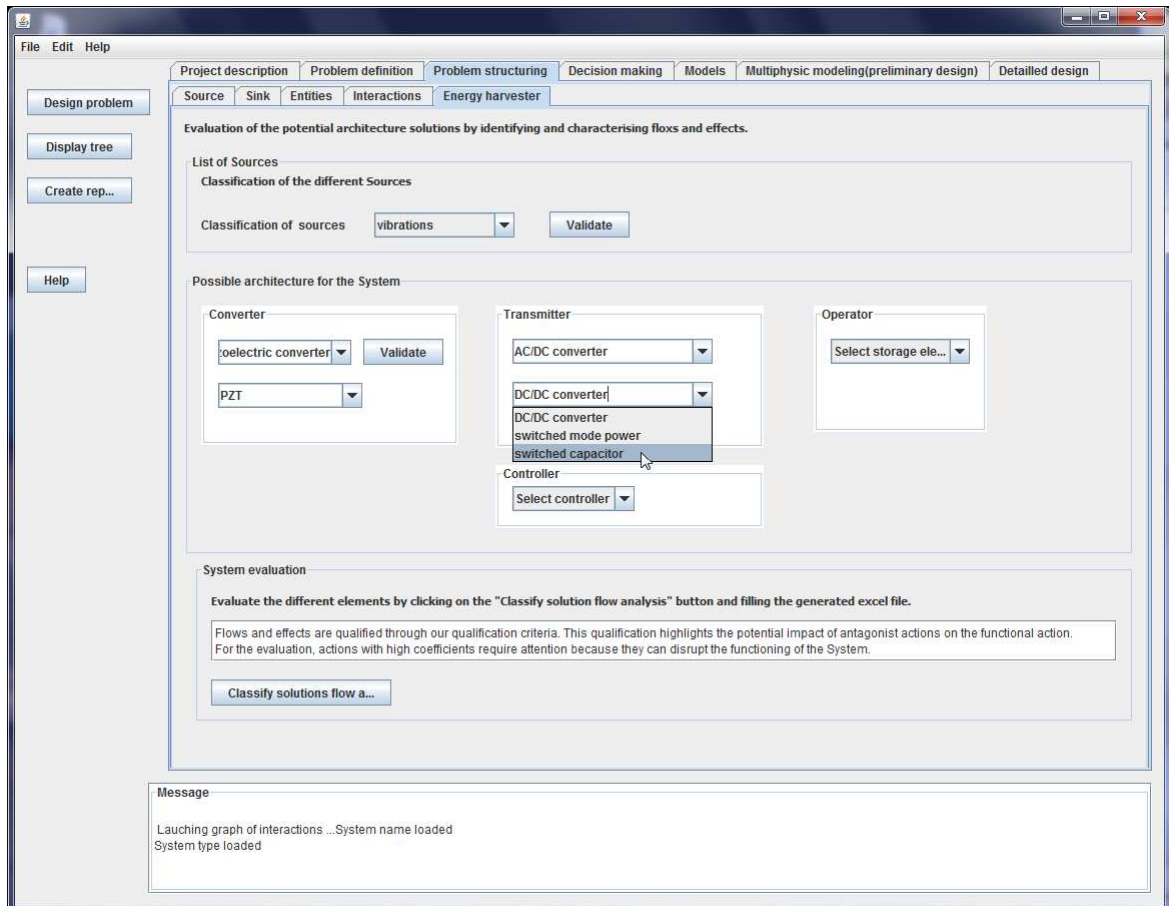
Figure B. 17 : Récupérateur d'énergie : choix du convertisseur



Après validation du convertisseur, le transmetteur est choisi. Dans le cas d'un récupérateur d'énergie, il peut y en avoir deux :

- un redresseur (ou convertisseur AC/DC) pour transformer le signal alternatif en signal continu
- un convertisseur DC/DC pour adapter le signal au reste du circuit (Figure B. 18).

Là encore, les solutions proposées sont issues de la littérature.



**Figure B. 18 : Récupérateur d'énergie : choix des transmetteurs**

Le choix de l'opérateur dépend ensuite de l'application. Dans la majorité des cas, il associe une batterie rechargeable et une supercapacité qui seront sélectionnées en fonction des spécifications définies dans le cahier des charges (durée de vie, tension, courant, température, etc.) (Figure B. 19).

Enfin, le contrôleur est choisi (Figure B. 19). Il s'agit le plus souvent d'un microcontrôleur. Par ailleurs, l'aspect logiciel est pris en compte au niveau de la modélisation système qui permet d'optimiser certains paramètres du microsystème (protocole de communication, fonctionnement séquentiel, ...).

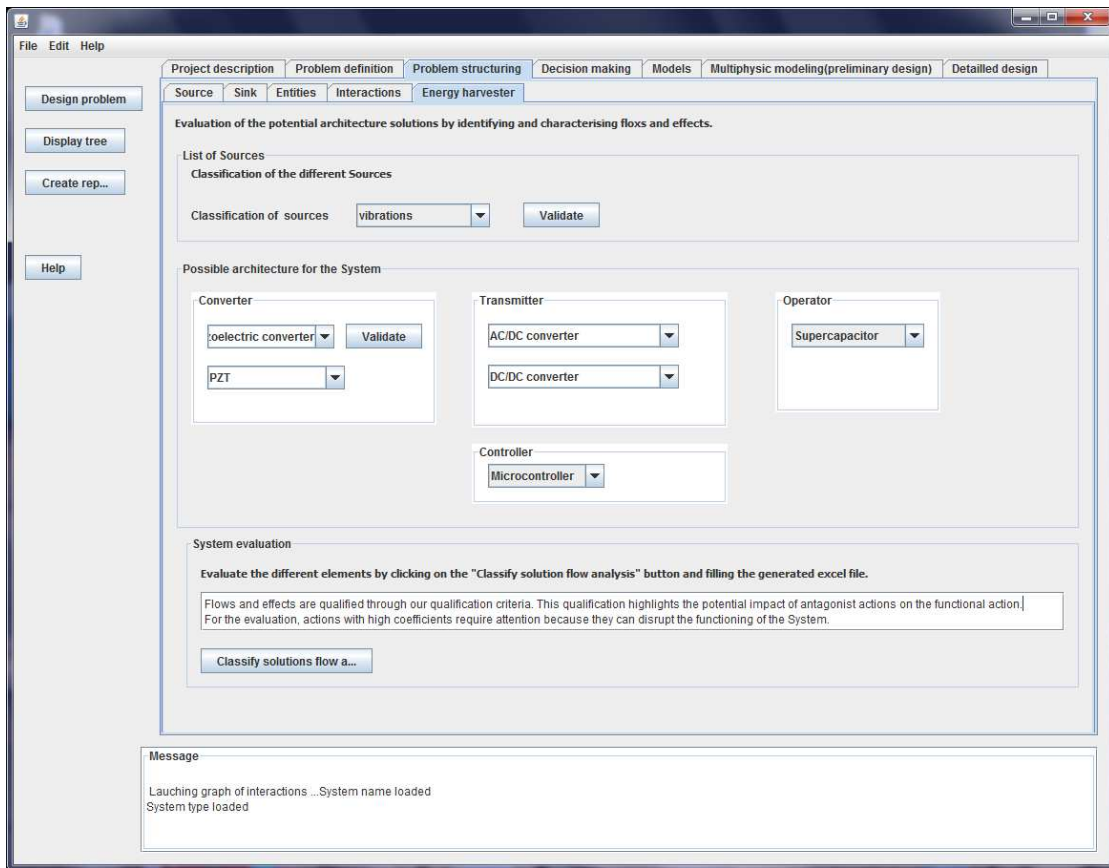


Figure B. 19 : Récupérateur d'énergie : choix de l'opérateur

### 3. Évaluation des architectures

En cliquant sur le bouton "Classify solutions flow analysis", un tableur Excel permet de caractériser les différentes entités de sorte à mettre en évidence les flux antagonistes à l'action fonctionnelle qui pourraient endommager le Système (Figure B. 20).

Les critères utilisés sont les mêmes que pour les Sources. Par agrégation, nous obtenons ainsi un coefficient associé à chaque action. Les coefficients élevés doivent être pris en considération pour le choix et la conception du Système.

Pour le moment, la gestion n'est pas automatique. Le concepteur peut prendre en compte cette évaluation pour éliminer certaines architectures.

| Modelling level   | Availability | Verb of functional action | Flow                     | Effect                            | Antagonist interactions |     |                   |                    |           | Total  |   |
|-------------------|--------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----|-------------------|--------------------|-----------|--------|---|
|                   |              |                           |                          |                                   | Qualification           |     | Relative location | Relative intensity |           |        |   |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   | Magnitude          | Variation | Rhythm |   |
| Modelling level 1 | 1            | Transform                 | Mechanical to electrical | Conversion into electrical energy | U                       | U   | 1                 | 1                  | 1         | 1      | 5 |
|                   | 1            | Transform                 | Mechanical to thermal    | Friction                          | INU                     | INU | 1                 | 1                  | 1         | 1      | 5 |
|                   | 1            | Transform                 | Mechanical to acoustic   | Noise                             | INU                     | INU | 1                 | 0                  | 1         | 0      | 3 |
|                   | 1            | Transform                 | Material                 | Corrosion                         | INU                     | INU | 1                 | 0                  | 1         | 0      | 3 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |
|                   |              |                           |                          |                                   |                         |     |                   |                    |           |        | 0 |

Figure B. 20 : Récupérateur d'énergie : caractérisation des différentes entités

### B.3.3.6. Aide à la décision

Dans l'onglet "Decision making", nous retrouvons la décomposition en Source, Système et Puits. L'objectif est d'évaluer l'énergie récupérée pour chaque architecture testée, à l'aide d'un modèle au niveau système du récupérateur d'énergie. Cette estimation repose sur des modèles simples pour les différentes entités [Dupé, Terrasson et al., 2010].

L'opérateur combine une batterie rechargeable et une supercapacité. Pour assurer le fonctionnement du circuit de gestion d'énergie, cette dernière ne doit pas être totalement déchargée. Un seuil minimal de tension est ainsi fixé.

La partie gestion d'énergie se base ainsi sur différents scénarii, en fonction de la quantité d'énergie disponible et de l'énergie consommée par le Puits.

#### 1. Classification des sources d'énergie

Nous retrouvons la classification des Sources d'énergie en fonction des critères de qualification énoncés précédemment (Figure B. 21).

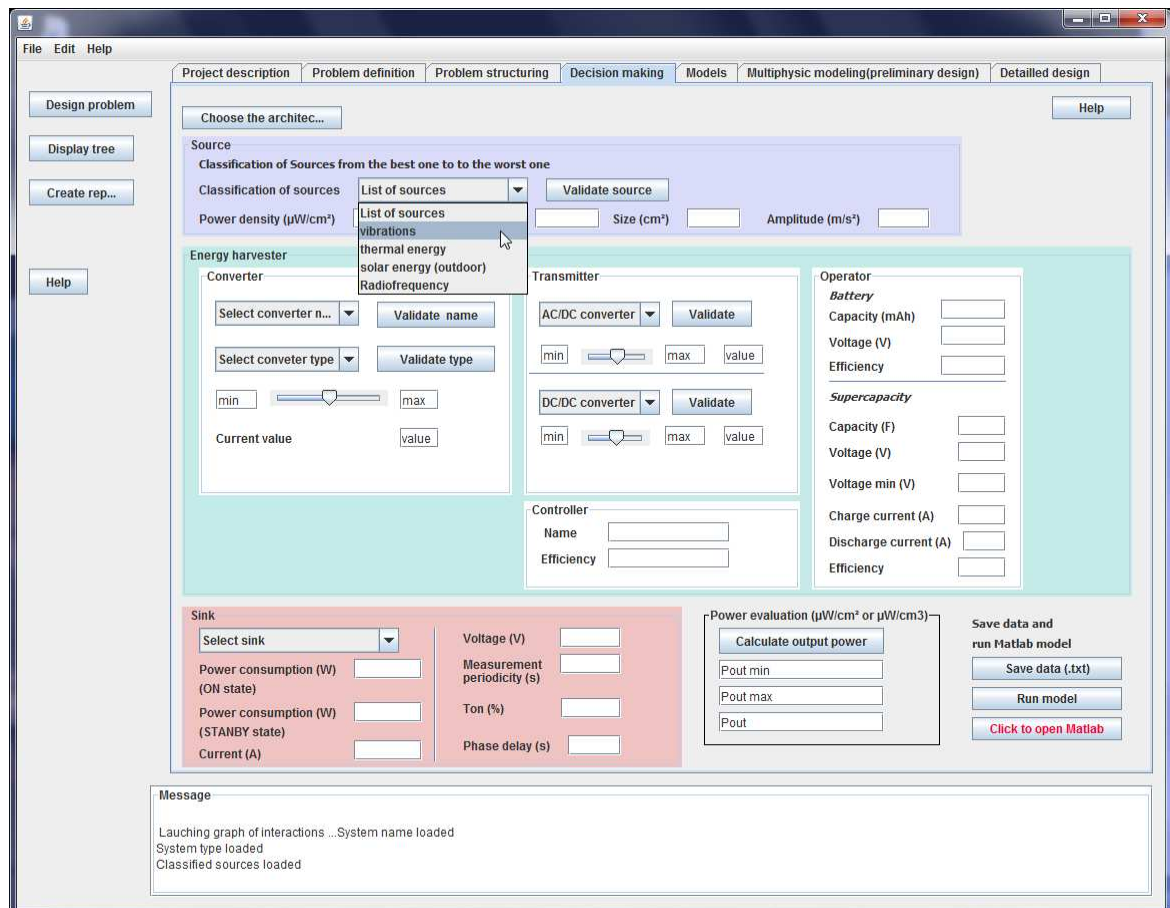


Figure B. 21 : Aide à la décision : classification des Sources

## 2. Récupérateur d'énergie

### Convertisseur

L'outil utilise des données issues de la littérature sur les différentes technologies existantes pour convertir l'énergie présente dans l'environnement en énergie électrique.

En fonction de la source d'énergie choisie, les convertisseurs possibles s'affichent (Figure B. 22). Le concepteur peut ainsi évaluer rapidement l'énergie récupérée avec différentes architectures. En effet, chaque élément est associé à des rendements minimal et maximal pour évaluer l'énergie de sortie, en fonction de celle en entrée.

Après avoir rempli tous les champs, les données sont sauvegardées dans un fichier texte. Elles sont ensuite utilisées pour alimenter le modèle réalisé sous Matlab-Simulink (Figure B. 23), lancé à partir de l'interface.

The screenshot shows a software interface for configuring energy conversion parameters. The interface is organized into several sections:

- Source:** Includes a dropdown for 'Classification of sources' (set to 'vibrations'), a 'Validate source' button, and input fields for 'Power density ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )' (800), 'Frequency (Hz)' (5), 'Size ( $\text{cm}^2$ )' (15), and 'Amplitude (m/s<sup>2</sup>)' (1).
- Energy harvester:**
  - Converter:** Features dropdowns for 'romagnetic converter' and 'electromagnetic', 'Validate name' and 'Validate type' buttons, and sliders for 'Current value' (0.06 to 0.2).
  - Transmitter:** Includes a dropdown for 'rectifier without threshold', 'Validate' buttons, and sliders for efficiency (0.7 to 0.9).
  - Controller:** Has input fields for 'Name' (PIC18F46J50) and 'Efficiency' (0.9).
- Operator:**
  - Battery:** Includes fields for 'Capacity (mAh)' (980), 'Voltage (V)' (3.3), and 'Efficiency' (0.99).
  - Supercapacity:** Includes fields for 'Capacity (F)' ( $10\text{e-}3$ ), 'Voltage (V)' (3.3), 'Voltage min (V)' (2.5), 'Charge current (A)' ( $10\text{e-}3$ ), 'Discharge current (A)' ( $10\text{e-}3$ ), and 'Efficiency' (0.9).
- Sink:** Includes a dropdown for 'ADXL330', 'Power consumption (W) (ON state)' ( $4\text{e-}3$ ), 'Power consumption (W) (STANBY state)' ( $10\text{e-}6$ ), 'Current (A)' ( $320\text{e-}3$ ), 'Voltage (V)' (3.3), 'Measurement periodicity (s)' ( $50\text{e-}3$ ), 'Ton (%)' (5), and 'Phase delay (s)' (0).
- Power evaluation ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  or  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ):** Features a 'Calculate output power' button and three output fields showing values: 282.9103, 1558.8936, and 1558.8936.
- Save data and run Matlab model:** Includes buttons for 'Save data (.txt)', 'Run model', and 'Click to open Matlab'.

At the bottom, a status bar shows: 'Classified sources loaded', 'System name loaded', 'System type loaded', 'Efficiency loaded', 'Efficiency loaded', and 'Efficiency loaded'.

Figure B. 22 : Aide à la décision : paramètres pour la conversion électromagnétique

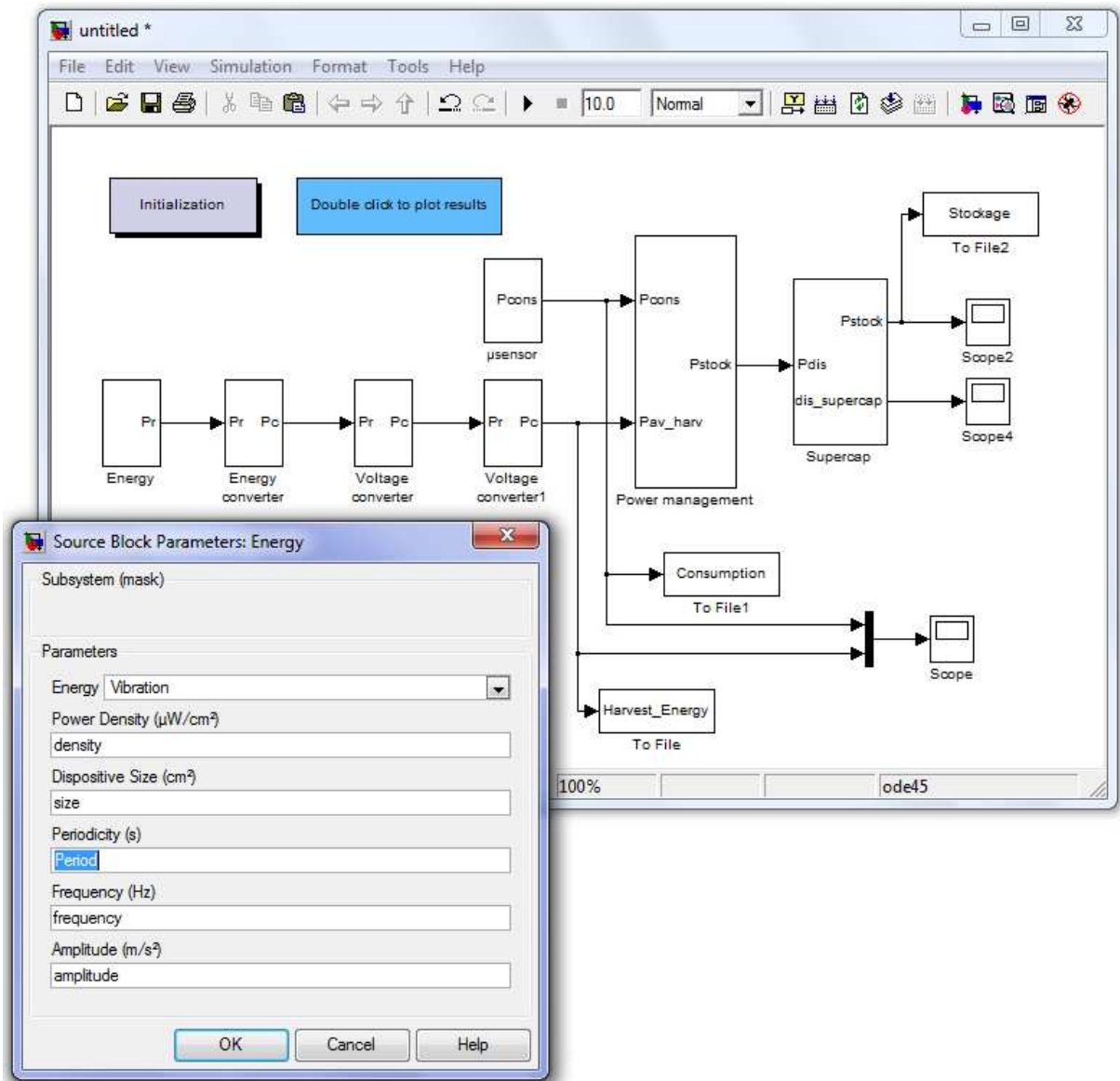


Figure B. 23 : Modèle au niveau système du récupérateur d'énergie

Le modèle réalisé sous Matlab-Simulink conduit à la génération de graphes représentant :

- le profil de consommation du microsystème,
- l'énergie présente dans l'environnement,
- la tension aux bornes de la supercapacité,
- la répartition de la provenance de l'énergie (environnement, supercapacité ou batterie),
- l'estimation de la durée de vie du système.

Notons que pour des raisons de lisibilité, le niveau de charge de la batterie n'est pas représenté sur le graphe. A partir de ces courbes, le concepteur peut voir à quel moment l'énergie ambiante est récupérée et si elle permet de charger suffisamment la supercapacité.

Pour illustrer cela, nous considérons un système de récupération d'énergie mécanique utilisant la technologie de conversion piézoélectrique. Nous étudions également un système de récupération d'énergie solaire.

## Énergie mécanique et convertisseur piézoélectrique : PZT

L'architecture et les paramètres des différentes entités sont donnés sur la Figure B. 24.

The screenshot shows a software interface for configuring a piezoelectric energy harvesting system. The interface is divided into several sections:

- Source:** Classification of Sources from the best one to the worst one. Classification of sources: vibrations. Power density ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ): 800. Frequency (Hz): 5. Size ( $\text{cm}^2$ ): 15. Amplitude ( $\text{m/s}^2$ ): 1.
- Energy harvester:**
  - Converter:** piezoelectric converter. PZT. Current value: 0.5.
  - Transmitter:** rectifier without threshold. switched capacitor.
  - Controller:** Name: PIC18F46J50. Efficiency: 0.99.
- Operator:**
  - Battery:** Capacity (mAh): 980. Voltage (V): 3.3. Efficiency: 0.99.
  - Supercapacity:** Capacity (F):  $10\text{e-}3$ . Voltage (V): 3.3. Voltage min (V): 2.5. Charge current (A):  $10\text{e-}3$ . Discharge current (A):  $10\text{e-}3$ . Efficiency: 0.99.
- Sink:** ADXL330. Power consumption (W) (ON state):  $324\text{e-}6$ . Power consumption (W) (STANBY state):  $10\text{e-}6$ . Current (A):  $320\text{e-}6$ . Voltage (V): 3.3. Measurement periodicity (s):  $30\text{e-}3$ . Ton (%): 20. Phase delay (s): 0.
- Power evaluation ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  or  $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ):** Calculate output power. Results: 133.12503, 314.3769, 248.39656.
- Save data and run Matlab model:** Save data (.txt), Run model, Click to open Matlab.

Figure B. 24 : Paramètres pour la conversion piézoélectrique (PZT)

Nous constatons, sur la Figure B. 25, que la quantité d'énergie récupérée (en vert) par le récupérateur d'énergie est presque suffisante pour alimenter le capteur en continu, grâce à la périodicité de la source. Sur une période de la source (317 s), la batterie est utilisée pendant 15 s, soit 4% du temps. La durée de vie du dispositif sera alors théoriquement infinie. En pratique, elle sera limitée par le vieillissement de la supercapacité et des composants du microsystème.

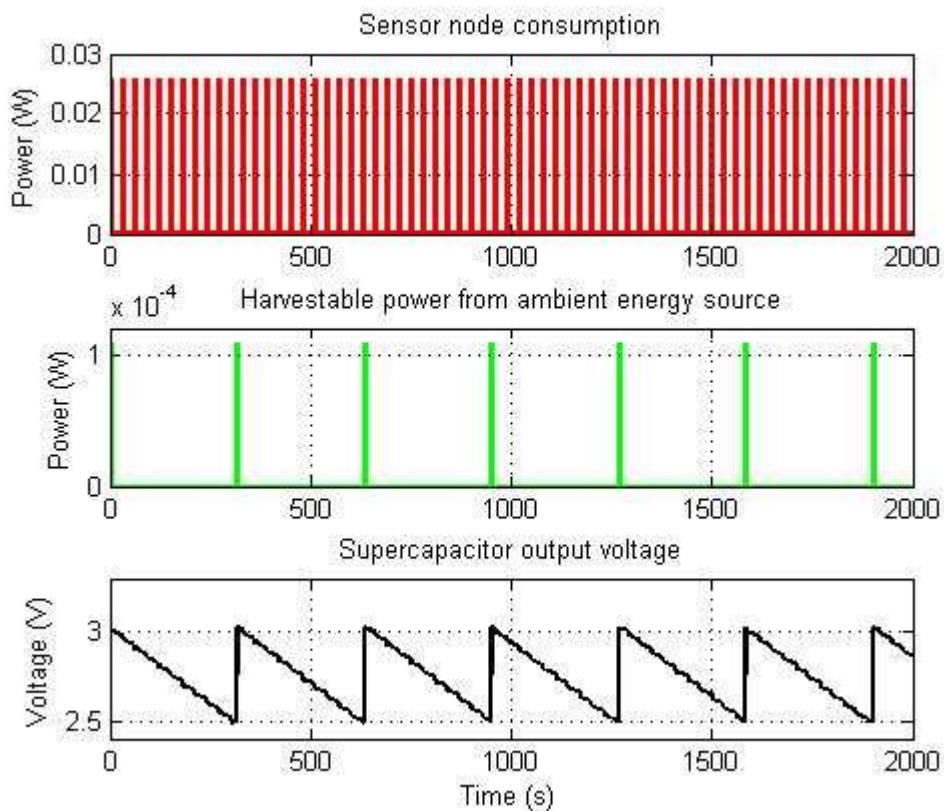


Figure B. 25 : Profil énergétique pour la conversion piézoélectrique (PZT)

### Énergie solaire et panneau photovoltaïque silicium monocristallin

L'architecture et les paramètres des différentes entités sont donnés sur la Figure B. 26.

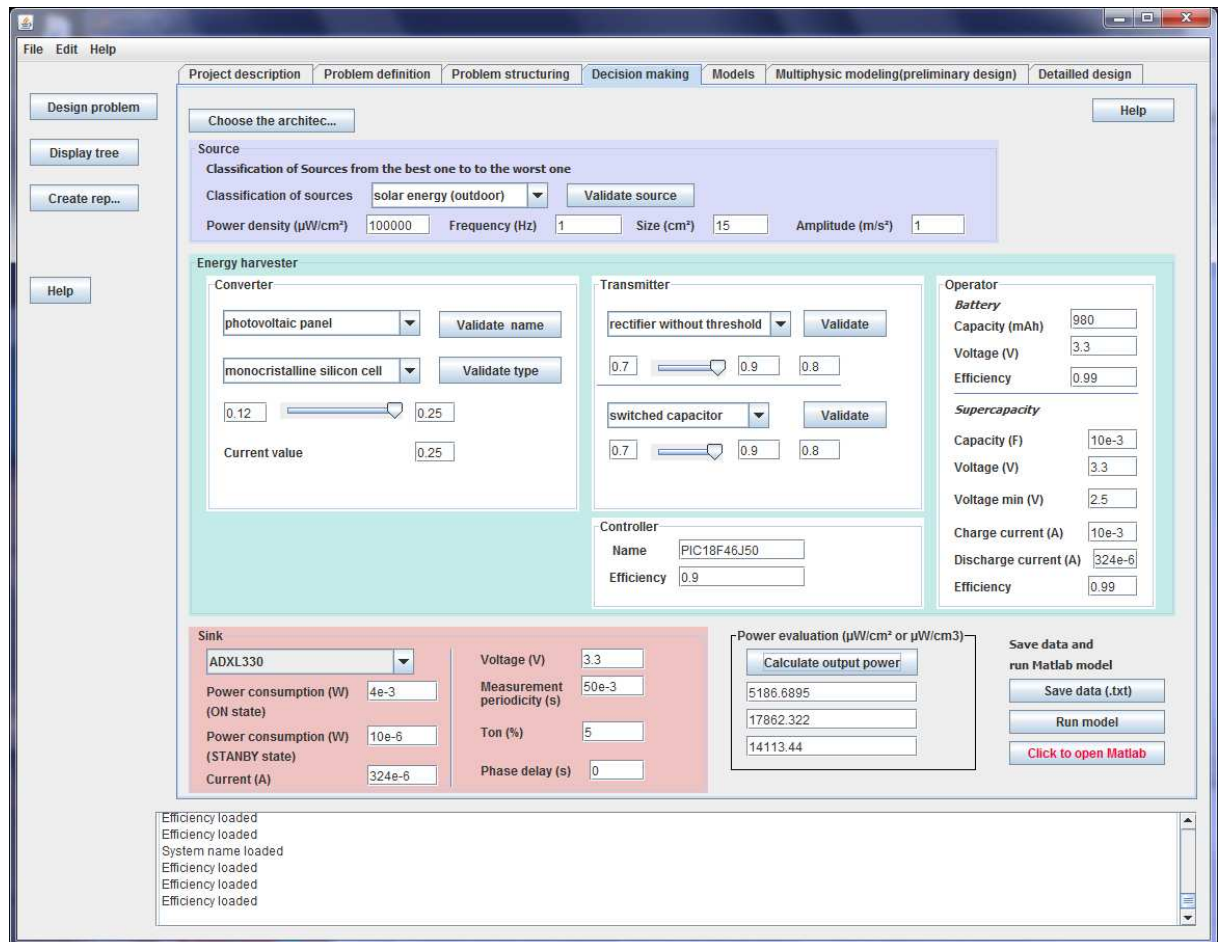


Figure B. 26 : Paramètres pour le convertisseur photovoltaïque composé de silicium monocristallin

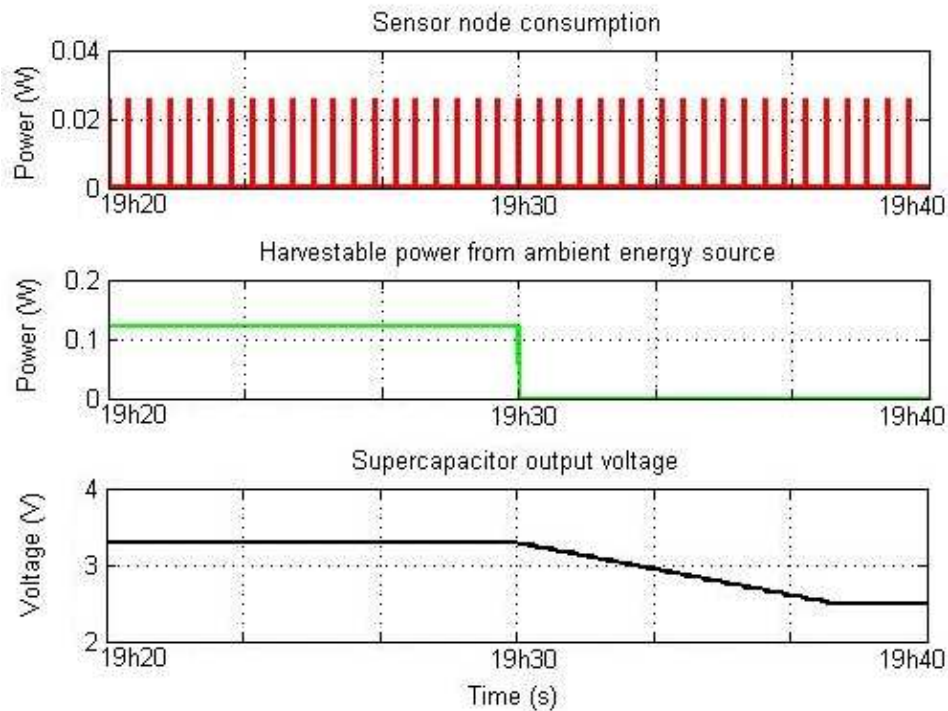


Figure B. 27 : Profil énergétique pour le convertisseur photovoltaïque monocristallin



Pour la récupération d'énergie solaire, la quantité d'énergie récupérée est toujours suffisante pour alimenter le capteur durant la journée. En revanche, l'absence de rayonnement solaire la nuit pose problème et impose l'utilisation d'une batterie (Figure B. 27). L'autonomie de la batterie atteint 15 ans avec la récupération d'énergie solaire.

A partir de ces simulations, le concepteur choisit la ou les solutions qu'il souhaite garder et passe à l'étape de prédimensionnement.

### B.3.4. Définition des modèles

#### B.3.4.1. Identification et formalisation des variables

L'identification des variables s'appuie sur les outils standards de la conception préliminaire [Mejía Gutiérrez et Pailhès, 2007].

Le concepteur déclare toutes les variables intervenant dans les modèles, en précisant les éléments suivants (Figure B. 28) :

- le nom de la variable,
- son symbole,
- la grandeur,
- l'unité,
- le préfixe éventuel pour l'unité,
- le type (nous distinguons 4 types de variables : morphologique, critère, physique, technique) (Tableau B. 1).

| Analyse         | Type         | Description                          | Outils  | Variables identifiées                                      |
|-----------------|--------------|--------------------------------------|---|--|
| Morphologique   | Morphologie  | Interactions physiques et cohérences | Organigramme technique  | Variables morphologiques et environnementales              |
| Qualité         | Objectif     | Objectifs de conception              | Cahier des charges<br>Contradictions techniques et physiques              | Critères   |
| Comportementale | Comportement | Comportement physique                | Blocs fonctionnels et substance-champ<br>Taxonomies physique et technique | Variables physiques, comportementales et environnementales |
| Technique       | Expérience   | Connaissances-métiers                | Analyse du cycle de vie<br>Taxonomies physique et technique               | Variables techniques                                       |

Tableau B. 1 : Identification des variables

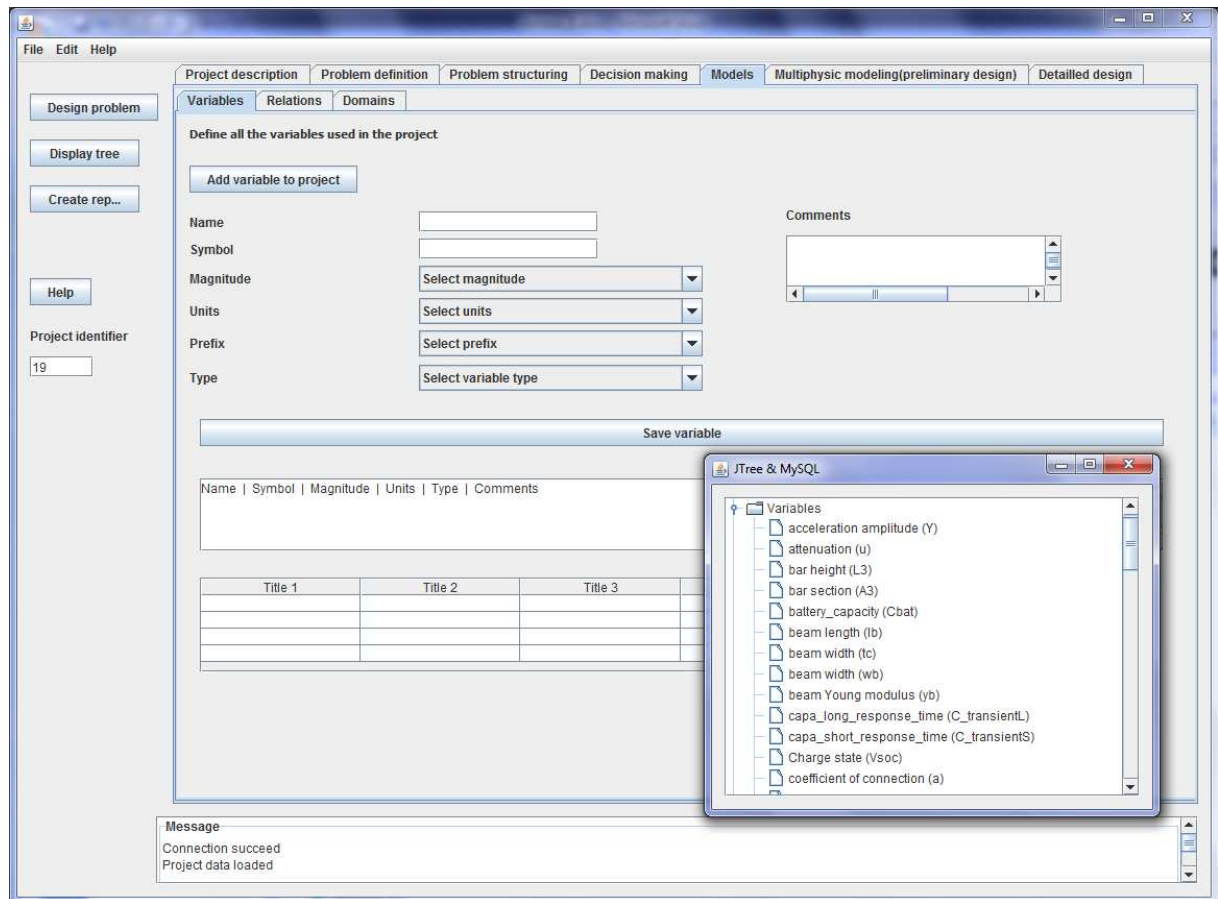


Figure B. 28 : Onglet modèle : définition des variables

### B.3.4.2. Définition des relations

Pour chaque entité, les relations entre les variables doivent être définies, soit à partir de données existantes, soit par ajout de nouvelles (Figure B. 29).

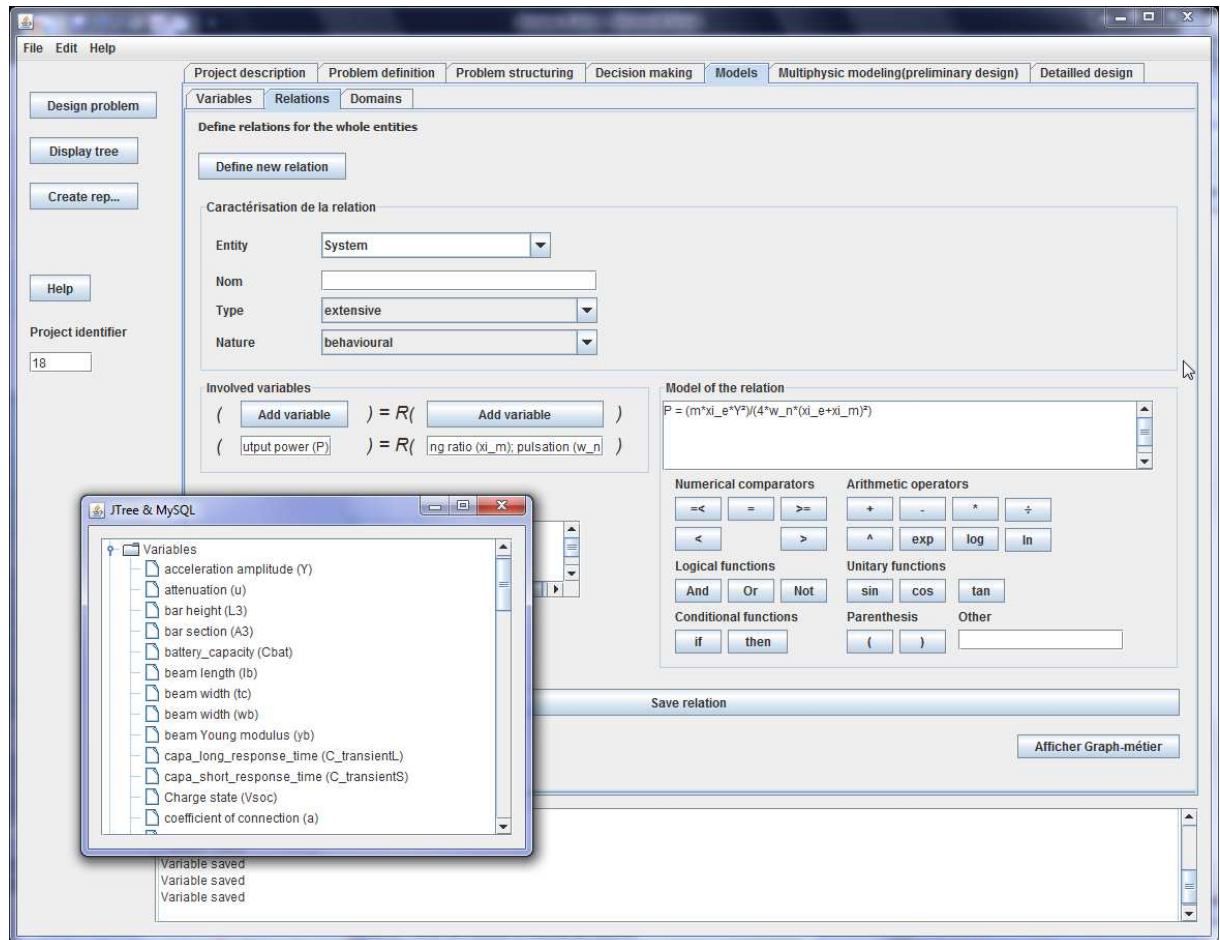


Figure B. 29 : Définition des relations

### B.3.4.3. Caractérisation des relations

D'après [Mejía Gutiérrez et Pailhès, 2007], quatre types de variables peuvent être considérées : morphologique, objectif, physique et technique. La nature des relations dépend de la nature des variables intégrées (Tableau B. 2).

| Nature de la variable | Analyse  | Nature de la relation                           |
|-----------------------|--|---|
| Morphologique         | Interactions physiques et cohérences géométriques    | Relations géométriques et contraintes physiques |
| Objectif              | Objectifs de conception                              | Fonction objectif                               |
| Comportement          | Comportement, interactions et performances physiques | Équations de comportement                       |
| Technique             | Connaissances métier                                 | Règles métier et relations heuristiques         |

Tableau B. 2 : Nature des relations en fonction des variables

### **Relation morphologique**

La morphologie s'intéresse aux unités de forme et plus particulièrement à la forme des composants et aux interactions topologique et géométrique entre ces composants. Les acteurs travaillent sur la position et l'orientation (situation d'un composant dans l'espace par rapport aux autres objets), les formes et les rapports spatiaux des blocs organiques.

### **Relation objectif**

Les objectifs de conception sont évalués dans des « fonctions objectifs ». À partir de l'analyse des contraintes, les concepteurs définissent le vecteur  $O$  des objectifs de conception (vecteur d'évaluation de conception).

Les éléments de ce vecteur donnent les critères de qualité. Il faut choisir, parmi les variables du produit, celles qui doivent intégrer l'ensemble  $O$  des objectifs de conception.

### **Relation comportementale**

La conception d'un produit est extrêmement dépendante des lois de la Physique. Le produit vit et s'impose dans des situations de vie où son comportement, et celui de son environnement sont régis par la mécanique, l'énergétique, la thermodynamique, etc. Des modèles de ces connaissances sont aujourd'hui disponibles dans la littérature. Ils peuvent prendre différentes formes telles que : formules logiques, expressions mathématiques, listes ou tableau d'affectation, etc.

### **Relation technique**

Les relations techniques sont issues de l'expérience, des savoir-faire ou de choix habituels des concepteurs. Elles ne sont pas nécessairement justifiées et démontrées mais sont pourtant fondamentales dans le processus de conception. Elles prennent rarement des formes équationnelles mais se représentent plus souvent sous forme de tables ou de règles.

Le concepteur définit une relation en cliquant sur le bouton "Define new relation". Il sélectionne l'entité et caractérise la relation au travers des champs suivants : nom, type (conditionnelle, intensive, extensive ou logique) et nature (comportement, expérience, morphologique ou objectif). Ensuite, il faut sélectionner une variable présente dans l'arbre et écrire la relation (Figure B. 30).

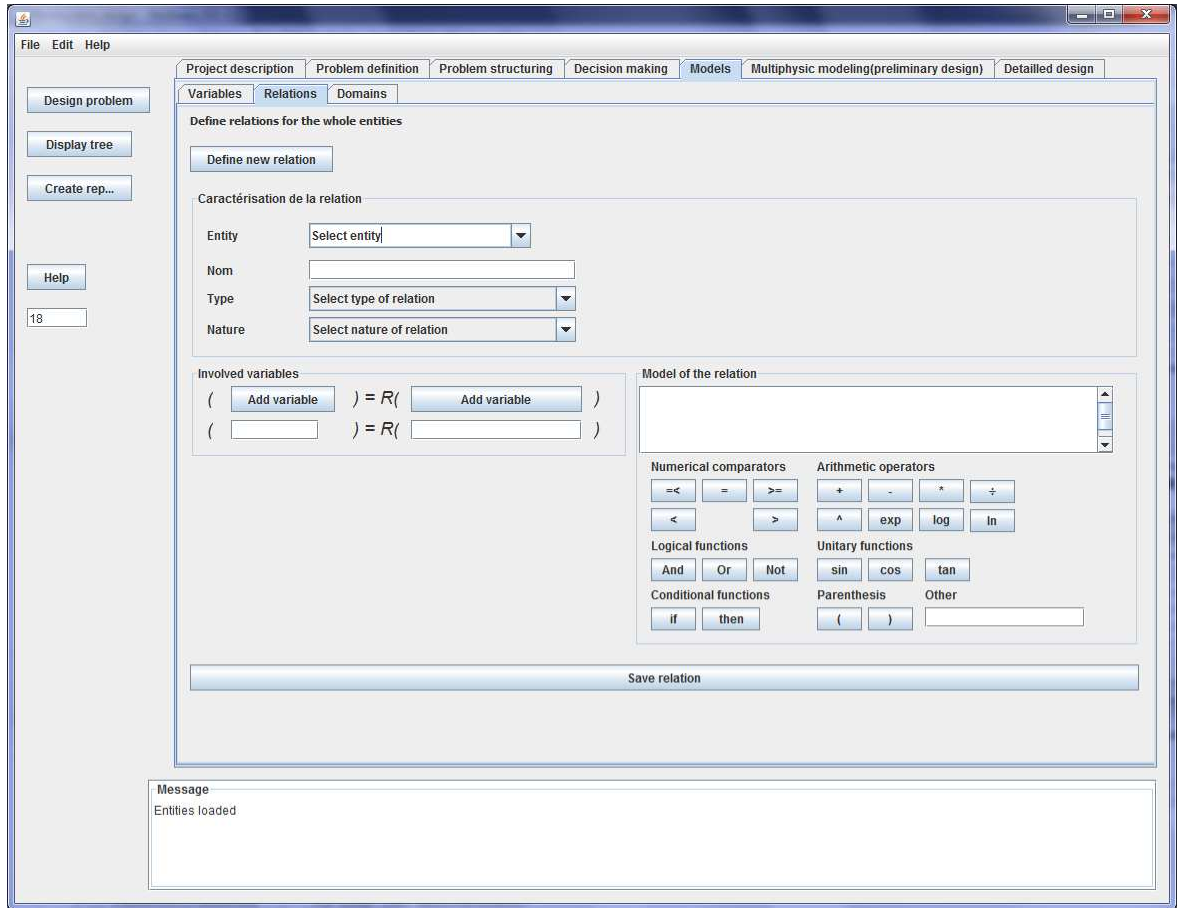
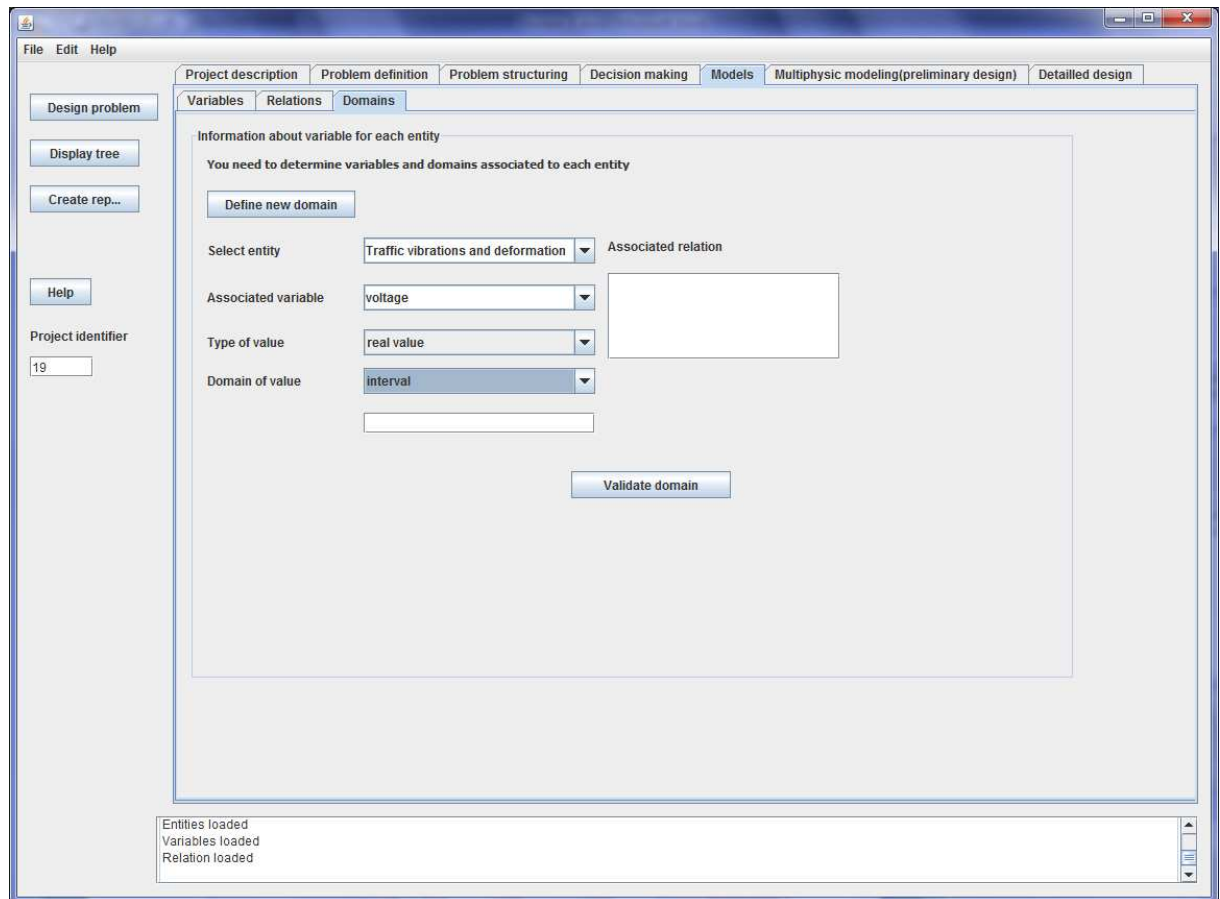


Figure B. 30 : Onglet modèle : définition des relations

Pour la définition des relations, le niveau de modélisation considéré et le type de modèle (Cadence, Ansys,...) sont pris en compte. Les données sont enregistrées dans la table "entity".

#### B.3.4.4. Définitions des domaines de validité

Pour chaque entité, il faut définir le domaine de validité des relations qui lui sont associées. Le concepteur définit une nouvelle relation en cliquant sur le bouton " Define new domain". Ensuite, il sélectionne l'entité et pour chaque variable qui lui est associée et il choisit le domaine de valeur (Figure B. 31).



### B.3.5. Modélisation multiphysique, pré-dimensionnement

L'architecture choisie apparaît à ce stade. Un rapport contenant l'architecture du récupérateur d'énergie est également généré (Figure B. 32 et Figure B. 33).

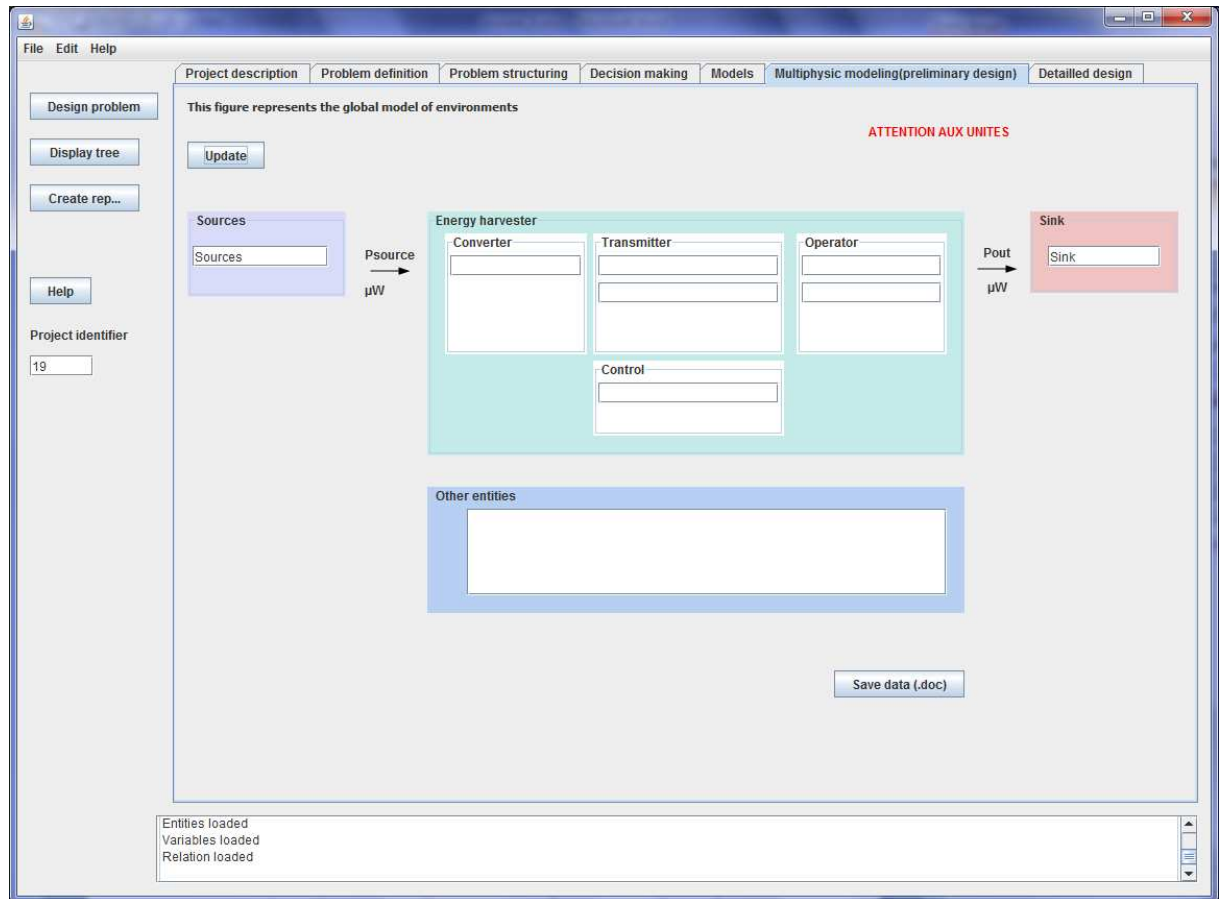


Figure B. 32 : Onglet conception préliminaire

**Preliminary design**

1. Description of the source  
vibrations
2. Description of the sink  
ADXL330
3. Energy harvester decomposition

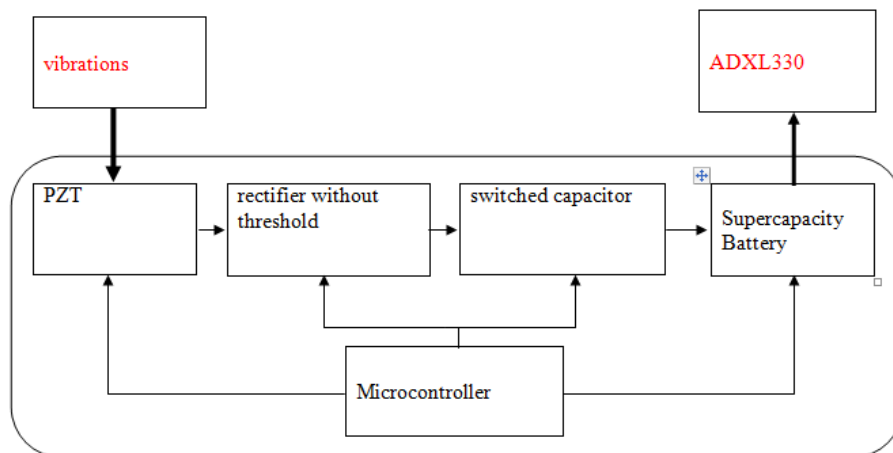


Figure B. 33 : Exemple de rapport généré pour l'architecture globale du récupérateur d'énergie

Des simulations sont réalisées sous des logiciels spécifiques comme Ansys, pour la modélisation mécanique et les calculs par éléments finis, ou Cadence, pour la simulation électronique. De cette manière, certains paramètres peuvent être optimisés. Les données issues de la simulation de certains outils alimentent d'autres outils.

Par exemple, pour la récupération d'énergie mécanique basée sur la conversion piézoélectrique, la modélisation sous Ansys (Figure B. 34) fournit la tension générée en fonction de la sollicitation mécanique du système (Figure B. 35). Cette tension est ensuite utilisée pour simuler la partie électronique du récupérateur d'énergie (Figure B. 37).

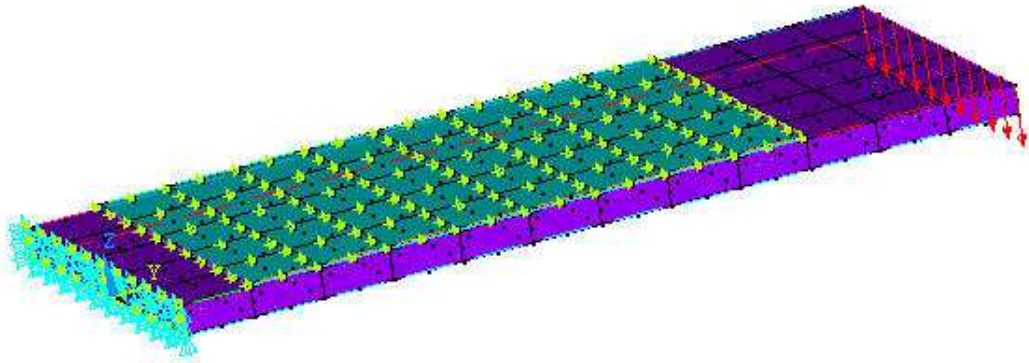


Figure B. 34 : Représentation des contraintes appliquées

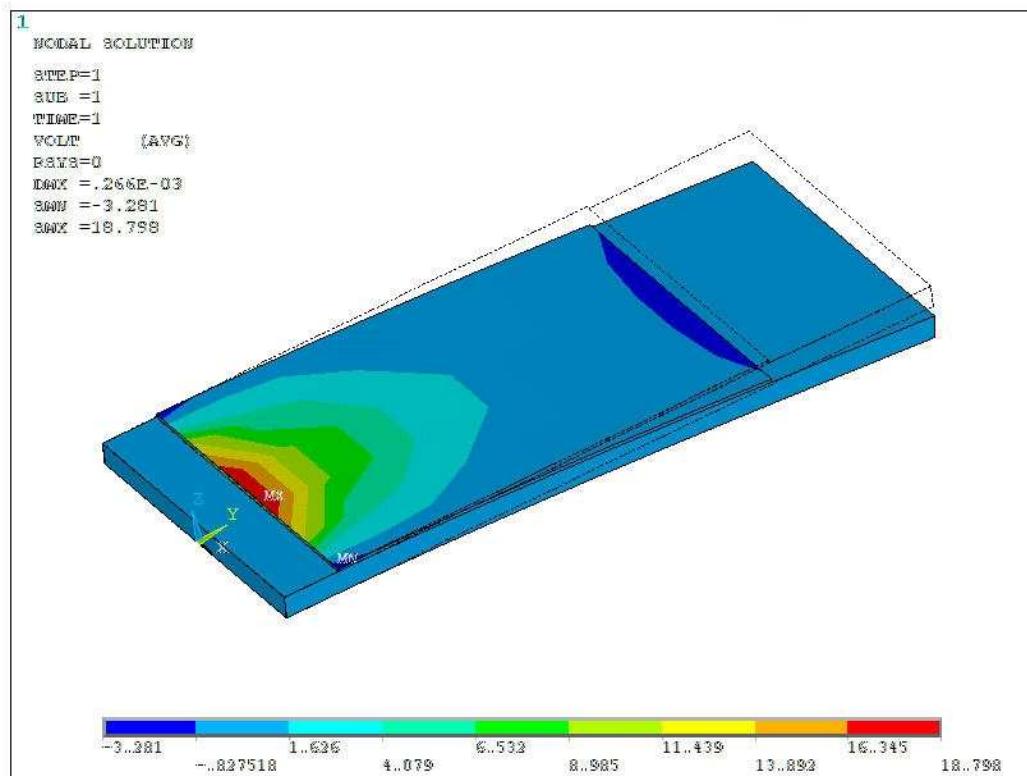


Figure B. 35 : Représentation de la tension lors de l'étude statique



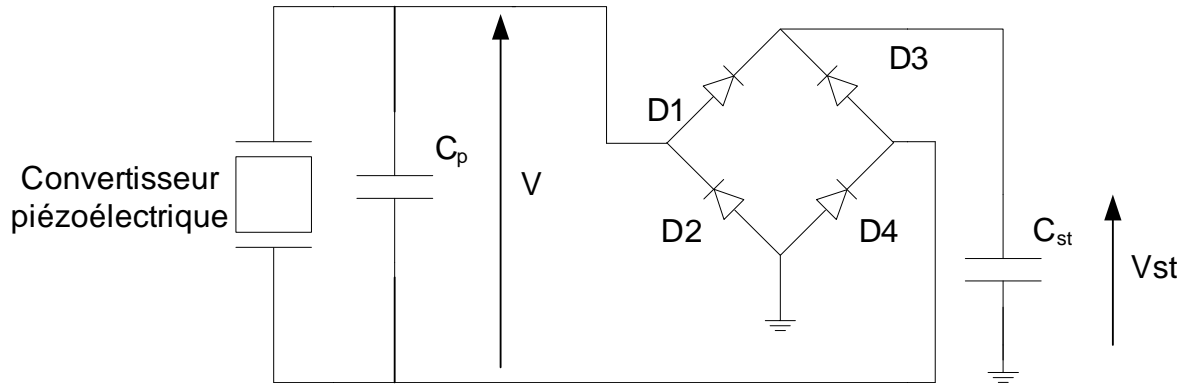


Figure B. 36 : Représentation du schéma électronique de conversion

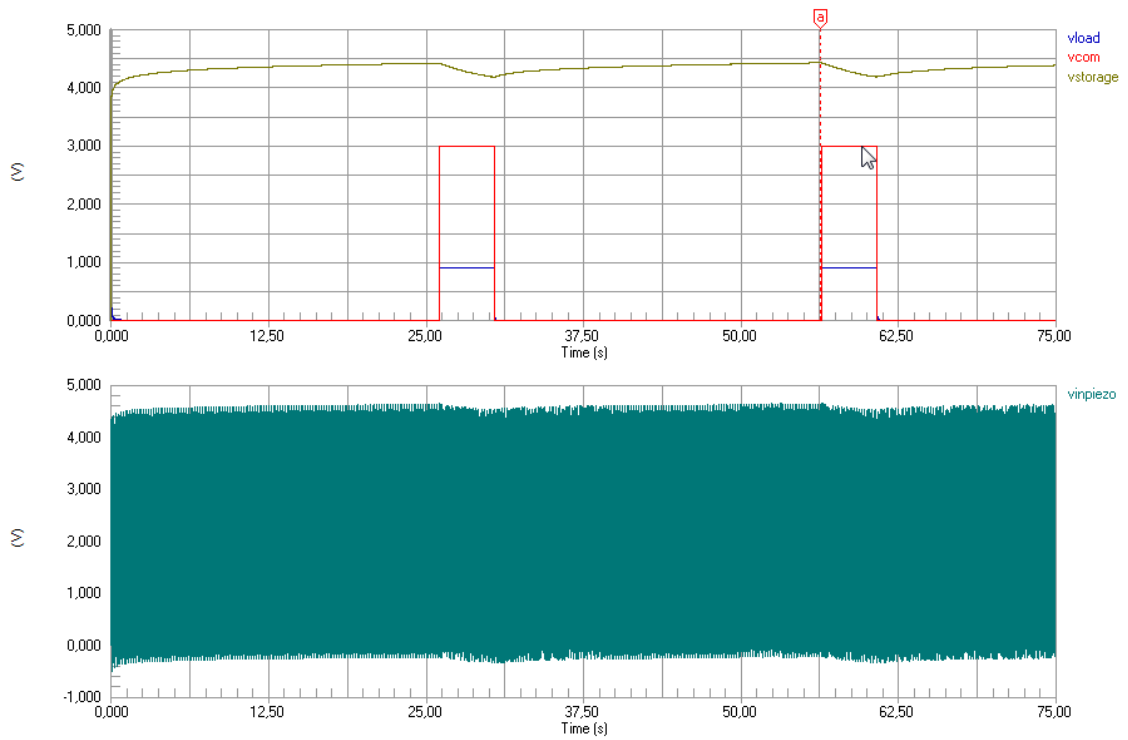
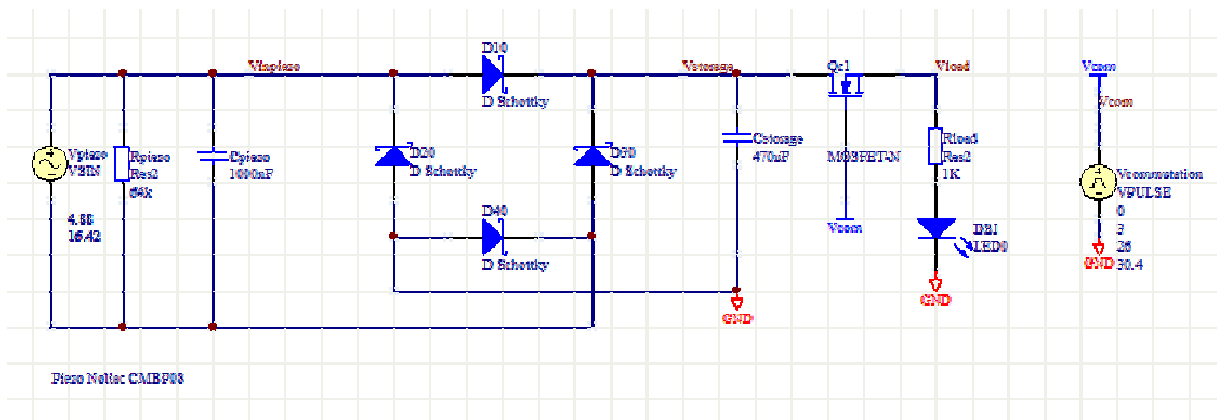


Figure B. 37 : Représentation du circuit et simulation

---



---

# Bibliographie

## A

- AFNOR (1991). NF X50-150/151, Value analysis, Functional analysis.
- Akyildiz, I., W. Su, Y. Sankarasubramian et E. Cayircil (2002). "A Survey on Sensor Networks." IEEE Communications Magazine: 102-114.
- Altschuller, G. (1984). And suddenly the inventor appeared, Technical Innovation Center, Inc. Worcester, MA.
- Ammar, Y. (2006). Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystèmes autonomes. Micro et nano électronique. Grenoble, Université Joseph-Fourier. **Doctorat**.
- Anton, S. R. et H. A. Sodano (2007). "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)." Smart Materials and Structures **16**(3).
- Arriurua, O. (2008). Contribution à l'intégration de centrales inertielles : outils d'aide à la conception et à l'optimisation. Electronique. Bordeaux, Université de Bordeaux 1. **Doctorat**.

## B

- Badel, A. (2008). Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire. LGEF - Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité ; LOCIE - Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement Jacob-Bellecombette, Université de Savoie. **Doctorat**.
- Beeby, S. P., M. J. Tudor et N. M. White (2006). "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications." Measurement Science and Technology.
- Bennett, D. M., R. Selfridge, P. Humble et J. N. Harb (2001). Hybrid power systems for autonomous MEMS. Bellingham, WA, INTERNATIONAL, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Boubekri, M., A. Chaker et I. Zeghib (2007). Contribution numérique à l'étude du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine. CIEPC (Conférence Internationale sur l'Energétique et la Pollution de Constantine). Constantine, Algérie.
- Boulet, C. et J. Ballieu (1995). L'analyse de la valeur, AFNOR 1995.
- Boussetta, H. (2010). Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce. TIMA. Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble (INPG). **Doctorat**.

- Brett, A., M. D. Warneke, B. S. Scott, L. Z. Leibowitz, L. Colby, J. A. C. Bellew, M. K. Joseph, E. Bernhard et K. S. J. P. Boser (2002). An Autonomous 16 mm<sup>3</sup> Solar-Powered Node for Distributed Wireless Sensor Networks. IEEE Sensors, Orlando, FL, USA.
- Briand, R., X. Fischer, O. Arriuria et G. Terrasson (2010). "Multidisciplinary design process based on virtual prototyping for microsystem design." Interactive Design, Int. J. on Phys. and Virtual Prototyp.
- Bryant, R. G. (2007). Overview of NASA Langley's piezoelectric ceramic packaging technology and applications. 10th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition: JISSE-10. Tokyo
- Burman, R. (1992). "Designing for minimum lead times." Automotive Engineering **17**(2): 61-65.

## C

- Canty, E. (1987) "Simultaneous Engineering: Expanding scope of quality responsibility." Digital Equipment Corporation White Paper.
- Cavaillès, J. (1995). Méthodes de management de programme.
- Cavaillès, R. (1991). Méthodes de management de programmes, Teknea.
- Chang, H., E. Charbon, U. Choudhury, A. Demir, E. Felt, E. Liu, E. Malavasi, A. Sangiovanni-Vincentelli et I. Vassiliou (1997). A Top-Down, Constraint-Driven Design Methodology for Analog Integrated Circuits, Kluwer Academic Publishers.
- Charney, C. (1991). Time to Market: Reducing Product Lead Time.
- Choley, J. Y. Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes.
- Chou, E. et B. Sheu (2002). "Nanometer mixed-signal system-on-a-chip design." IEEE Circuits and Devices Magazine **18**(4): 7-17.
- Clark, K. B. et T. Fujimoto (1991). Product development performance. Strategy, Organization and Management in the World Auto Industry, Harvard Business Press (February 1, 1991)
- Clausing, D. (1997). "Concurrent Engineering." Materials Park, OH: ASM International: 57-65.
- Constant, D. (1996). Contribution à la spécification d'un modèle fonctionnel de produits pour la conception intégrée de systèmes mécaniques. Grenoble I, Université Joseph Fourier.  
**Thèse de doctorat.**
- Cordero, N., R. Ginige, B. Corbett et K. Kennedy (2002). Thermal modelling of TPV systems. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002. IThERM 2002. The Eighth Intersociety Conference on.

Coulombe, J. et M. Sawan (2007). "A Highly Flexible System for Microstimulation of the Visual Cortex: Design and Implementation." IEEE Transaction on Biomedical Circuits & Systems **1**(4): 258-269.

Culler, D., D. Estrin et M. Srivastava (2004). "Overview of Sensor Networks." IEEE Computer Communications **37**(8): 41-49.

## D

Decreuse, C. et D. Feschotte (1998) "Ingénierie simultanée." Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle **2**, 1-14.

Derringer, G. et R. Suich (1980). "Simultaneous Optimization of Several Response Variables." Journal of Quality **12**(4).

Despesse, G. (2005). Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micro-systèmes communicants. Grenoble, INPG. **Doctorat**: 193.

Dimatteo, R. S., P. Greiff, S. L. Finberg, K. A. Young-Waithe, H. K. H. Choy, M. M. Masaki et C. G. Fonstad (2003). Micron-gap ThermoPhotoVoltaics (MTPV). Thermophotovoltaic generation of electricity, Fifth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity, AIP Conference Proceedings.

Doré, R., J. Pailhès, X. Fischer et J. P. Nadeau (2005). Integration of user's requirements in preliminary design: application to parabolic ski in a basic turn International conference on product lifecycle management. Lyon.

Doré, R., J. Pailhès, X. Fischer et J. P. Nadeau (2007). "Identification of Sensory Variables towards the integration of User Requirements into Preliminary Design " International Journal of Industrial Ergonomics **37**(1): 1-11.

Dupé, V. et R. Briand (2010). "Interactive method for autonomous microsystem design." International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) **4**(1): 35 - 50.

Dupé, V., G. Terrasson et R. Briand (2010). System level decision method dedicated to multisource autonomous microsensors. Workshop on energy harvesting and storage to power autonomous microsystems. Noisy Le Grand (ESIEE).

## E

Eppinger, S. D., V. Krishnan et D. E. Whitney (1997). "A Model-Based Framework to Overlap Product Development Activities." Management Science **43**(4).

## F

F. Mattern, K. R. (2004). "The Design Space of Wireless Sensor Networks." IEEE Wireless Communications **11**(6): 54-61.

- Fan, L.-S., Y.-C. Tai et R. S. Muller (1988). IC-processed electrostatic micro-motors, Electron Devices Meeting. Electron Devices Meeting, IEDM '88. San Francisco, CA, USA, USA Technical Digest., International 666-669.
- Federspiel, C. et J. Chen (2003). "Air-Powered Sensor." Controls and Information Technology.
- Feynman, R. (2008). "The Challenger Disaster, and Software Engineering." from <http://duartes.org/gustavo/blog/post/Richard-Feynman-Challenger-Disaster-Software-Engineering>
- Feynman, R. P. (1992). "There's Plenty of Room at the Bottom." Journal of Microelectromechanical Systems. **1**(1): 60-66.
- Fischer, X. (2000). Stratégie de conduite du calcul pour l'aide à la décision en conception intégrée ; application aux appareils à pression, ENSAM. **Thèse de doctorat**.
- Fischer, X. (2006). "The Interaction: a New Way of Designing." Research Interactive Design **2**: 1-15.
- Fischer, X. (2008). Conception interactive. **HDR**.
- Fleming, Q. W. et J. M. Koppelman (1996). "Integrated project development teams." International Journal of Project Management **14**(3): 163-168.
- Flipsen, S. F. J. (2005). Alternative Power Sources for Portables & Wearables, Delft University of Technology, Personal Energy Systems program.
- Friedman, D., H. Heinrich et D. W. Duan (1997). A low-power CMOS integrated circuit for field-powered radio frequency identification tags. Solid-State Circuits Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 43rd ISSCC., 1997 IEEE International.

## G

- Galopin, N. (2008). Modélisation et caractérisation de matériaux actifs pour la conception de dispositifs magnéto-électriques. LGEP - Laboratoire de génie électrique de Paris. Paris, Université Paris Sus. **Thèse de doctorat**.
- Garcia-Sanchez, A.-J., F. Garcia-Sanchez, F. Losilla, P. Kulakowski, J. Garcia-Haro, A. Rodríguez, J.-V. López-Bao et F. Palomares (2010). "Wireless Sensor Network Deployment for Monitoring Wildlife Passages." Sensors 2010 **10**: 7236-7262.
- Gilbert, J. et F. Balouchi (2008). "Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks." International Journal of Automation and Computing **5**(4): 334-347.
- Grudin, J. (1994). "Computer-supported cooperative work: Its history and participation." IEEE Computer **27**(5): 19-26.
- Guidat, C., V. Boly et C. Noel-Arnould (1993). L'analyse de la valeur : outil de base pour une nouvelle démarche d'amélioration de produits intégrant technique, marketing, ergonomie, design, sécurité et normalisation. Congrès international Valeur & Design. Paris.

## H

- Hagerty, J. A., F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane et Z. B. Popovic (2004). "Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays." IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques **52**: 1014-1024.
- Haidar, J. G. et J. I. Ghajel (2001). Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators. ICT 2001. Beijing , China 413-418.
- Hamon, J.-C. (2005). Méthodes et outils de la conception amont pour les systèmes et les micro-systèmes, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS).
- Harrington, E. C. (1965). "The desirability function." Industrial Quality Control **21**: 494-498.
- Härtl, A., J. Franz et R. Vogt Application of an electronic accelerometer for a single point sensing airbag electronic control unit Sensors Expo Proc. Chicago, IL, USA 204.
- Harvey, C. M. et R. J. Koubez (1998). "Toward a model of distributed engineering collaboration." Computers Industrial Engineering **35**(1-2): 173-176.
- Hirtz, J., R. B. Stone, S. Szykman, D. A. McAdams et K. L. Wood (2002). "A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts." Research in Engineering Design - Theory, Applications, and Concurrent Engineering **13**(2): 65-82.
- Hitachi (2003). "Hitachi unveils smallest RFID Chip." RFID Journal.

## I

- Ikeda, T., Ed. (1990). Fundamentals of piezoelectricity. New York, Oxford University Press.

## J

- Jansen, P. (1990). Aide à la conception : Une approche basée sur la satisfaction de contraintes", Université de Montpellier. **Thèse de doctorat**.
- Jung, S., C. Lauterbach, M. Strasser et W. Weber (2003). Enabling technologies for disappearing electronics in smart textiles. Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers.

## K

- Kansal, A. et M. B. Srivastava (2003). "An environmental energy harvesting framework for sensor networks." International symposium on Low power electronics and design: 481-486.
- Kasten, F. (1997). "The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness." Solar Energy **60**: 17-24.



Keawboonchuay, C. et T. G. Engel (2003). "Electrical power generation characteristics of piezoelectric generator under quasi-static and dynamic stress conditions." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on **50**: 1377-1382.

Kim, K.-J. et D. Lin (2000). "Simultaneous optimization of mechanical properties of steel by maximizing desirability functions." Appl Stat **49**(3): 311-326.

Kribus, A. (2002). "A high-efficiency triple cycle for solar power generation." Solar Energy **72**(1): 1-11.

## L

Lawrence, E. E., G. J. Snyder et R. Coll. (2002). "A study of heat sink performance in air and soil for use in a thermoelectric energy harvesting device." Thermoelectrics( 25-29 Aug. 2002): 446-449.

Leake, D. B. (1993). Focusing Construction and Selection of Abductive Hypotheses. Proceedings of the 13th international joint conference on Artificial intelligence.

Lissandre, M. (1990). Maîtriser SADT. Paris, Armand Collin.

Liu, F., A. Phipps, S. Horowitz, K. Ngo, L. Cattafesta, T. Nishida et M. Sheplak (2008). "Acoustic energy harvesting using an electromechanical Helmholtz resonator " Journal of the Acoustical Society of America **123**(4): 8.

## M

Mainwaring, A. (2002). Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications.

Marzencki, M. (2007). Conception de microgénérateurs intégrés pour systèmes sur puce autonomes. Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal. Grenoble, Université Joseph-Fourier **Doctorat**.

Matthews, P. C., L. T. M. Blessing et K. M. Wallace (2002). "The introduction of a design heuristics extraction method." Advanced Engineering Informatics **16**.

Mayer, R. J. (1995). "Information Integration for Concurrent Engineering IDEF4 Object-Oriented Design Method Report." from <http://www.idef.com/>.

Mazria, E. (2001). Le guide de l'énergie solaire passive. Habitat-Ressources.

Mejía-Gutiérrez, R. (2008). Modélisation distribuée des connaissances en conception interactive. Bidart, École Centrale de Nantes. **Thèse de doctorat**.

Mejía Gutiérrez, R., X. Fischer et F. Bennis (2008). "Virtual knowledge modelling for distributed teams: Towards an interactive design approach." **5**(2): 166-189.

Mejía Gutiérrez, R. et J. Pailhès (2007). L'analyse des phénomènes physiques, éléments essentiels vers la résolution de problèmes industriels. Grenoble, 27-31 août 2007.

- Mikami, S., T. Matsuno, M. Miyama, H. Kawaguchi, M. Yoshimoto et H. Ono (2006). "An Energy-Harvesting Wireless-Interface SoC for Short-Range Data Communication." Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan **126**(5): 565-570.
- Miles, B. L. et t. K. G. Swif (1992). "Working together." Manufacturing Breakthrough **4**: 69-73.
- Mitcheson, P. D., T. C. Green, E. M. Yeatman et A. S. Holmes "Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators." Microelectromechanical Systems **13**(3): 429-440.
- Molina, A., J. Aca et P. Wright (2005). "Global collaborative engineering environment for integrated product development." International Journal of Computer Integrated Manufacturing **18**(8): 635-651.

## N

- Nadeau J. P., P. J., Scaravetti D., (2006). "Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique." International Journal Of Design and Innovation Research **3**: 87-106.
- Nadeau, J. P., J. Pailhes, R. Doré et D. Scaravetti (2005). Analyser, qualifier et innover en conception par les lois d'évolution TRIZ. 6<sup>ème</sup> Congrès International de Génie Industriel. Besançon.
- Nadeau, J. P., J. Pailhes et D. Scaravetti (2006). "Des outils de l'analyse fonctionnelle vers la créativité technique." International Journal Of Design and Innovation Research **3**: 87-106.
- Nasreddine, N. (2010). Méthodologies de conception des microsystèmes hétérogènes embarqués appliqués aux réseaux de capteurs. Groupe N2IS LAAS-CNRS Toulouse. Toulouse. **Thèse de doctorat**.
- Nelson, A. C. et L. Monplaisir (1999). "An integrated CSCW architecture for integrated product/process design and development." Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **15**(2): 145-153.

## O

- Oosterman, B. (2001). Improving Product Development Projects by Matching Product Architecture and Organization, Groningen University. **Ph.D Thesis**.
- Ottman, G. K., H. F. Hofmann et A. C. Lesieutre (2002). "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply." Power Electronics, IEEE Transactions on **17**: 669-676.
- Otto, K. N. et K. L. Wood (2001). Product Design, Techniques in reverse engineering and new product development, Prentice Hall; 1 edition (December 8, 2000)

## P

- Pahl, G. et W. Beitz (1984). Engineering Design: A Systematic Approach Springer.
- Pailhes, J., M. Sallaou et J. P. Nadeau (2007). Knowledge base formulation for aided design tool. Trends and Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering II. S. Tichkiewitch, Tollenaere, M., Ray, Springer Verlag: 231-243.
- Paradiso, J. A. et M. Feldmeier (2001). A Compact, Wireless, Self-Powered Pushbutton Controller. Proceedings of the 3rd international conference on Ubiquitous Computing. Atlanta, Georgia, USA, Springer-Verlag: 299-304.
- Parent, A. (2008). Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants. DMPH - Département de Mesures Physiques. Paris, Université Paris Sud. **Thèse de doctorat**.
- Perillo, M. et W. Heinzelman (2005). Wireless Sensor Network Protocols. Fundamental Algorithms and Protocol for Wireless and Mobile Networks. CRC Hall.
- Poulin, G., E. Sarraute et F. Costa (2004). "Generation of electrical energy for portable devices Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system." Sensors and Actuators **116**(3): 461-471.
- Prasad, B. (1996). Concurrent engineering fundamentals.
- Priest, J. (1988). Engineering Design for Producibility and Reliability, Marcel Dekker.
- Pugh, S. (1991). Total Design, Addison Wesley.

## R

- Rabaey, J. M., M. J. Ammer, J. L. Da Silva et e. al. (2000). "Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking." IEEE Computer **33** (7): 42-48.
- Raible, C. et H. Michel (1998). Bursting with power. Berlin, ALLEMAGNE, Siemens.
- Raju, M. (2010) "Ultra low power meets energy harvesting." Energy harvesting.
- Ranky, P. G. (1994). "Concurrent engineering and enterprise modeling." Assembly Automation **14**(3): 14-21.
- Rausand, M. et A. Hoyland (2004). System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications.
- Riboulet, V., P. Marin et J. C. Leon (2002). Towards a new set of tools for a collaborative design environment. 7th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design: 128-133.
- Roundy, H. J. (2003). Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion. Berkeley, CA, The University of California.

Roundy, S., D. Steingart, L. Frechette, P. Wright et J. Rabaey (2004). "Power Sources for Wireless Sensor Networks." EWSN 2004 : European workshop on wireless sensor networks No1, Berlin , Allemagne **2920**(1-17).

Roundy, S. et P. K. Wright (2004). "A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics." Smart Materials and Structures **13**: 1131-1142.

Roundy, S., P. K. Wright et J. Rabaey (2003). "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes." Computer Communications **26**(11): 1131-1144

## S

SAE, A. (2004). AS9100, Aerospace Quality Management Systems Requirements, ISO Standards, Society of Automotive Engineers International.

Sallaou, M. (2008). Taxonomie des connaissances et exploitation en conception préliminaire : application à un système éolien. ENSAM/TREFLE. Bordeaux, ED 432 Ecole doctorale Sciences et Physiques de l'Ingénieur. **Doctorat**.

Sallaou, M., J. Pailhès et J. P. Nadeau (2005). Formulation d'une base de connaissances pour l'aide en conception. Casablanca, Morocco.

Sallaou, M., J. Pailhès, J. P. Nadeau et G. M. Fadel (2009). "Taxonomy of preliminary design knowledge from an energy based standpoint."

Salo, T., K. U. Kirstein, J. Sedivy, J. Grunenfelder, T. Vancura, G. Zund et H. Baltes (2004). Continuous blood pressure monitoring utilizing a CMOS tactile sensor 26th Ann. Int. Conf. of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society, IEMBS '04. **1**: 23226-23229.

Sapuan, S. M., M. R. Osman et Y. Nukman (2006). "State of the art of the concurrent engineering technique in the automotive industry." Journal of Engineering Design, **17**(2): 143-157.

Savransky, S. D. (2000). Engineering of creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving.

Savransky, S. D. (2000). Engineering of creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving. CRC Press, Boca Raton.

Scaravetti, D., J. P. Nadeau et P. Sébastien (2003). Structuring functions and constraints formulation for enhanced embodiment design. International CIRP Design Seminar. Grenoble, France,.

Scaravetti, D., J. Pailhès, J.-P. Nadeau et P. Sébastien (2005). "Aided decision-making for an embodiment design problem." Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering: 159-172.

Schmidt, V. H. (1986). Theoretical Electrical Power Output per Unit Volume of PVF2 and Mechanical-to-Electrical Conversion Efficiency as Functions of Frequency.

Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics.

Schmitt, P., J. M. Nicot, F. Presseccq, X. Lafontan, C. Oudea, D. Estève, J. Y. Fourniols et H. Camon (2007). Space microsystems and reliability : the contribution of behavioral modelling. CANEUS'04 (Conference on Micro-Nano-Technologies for Aerospace Applications). Monterey (USA): 95-100.

Schwiebert, L., S. K. S. Gupta, et al. (2001). Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. 7th annual international conference on Mobile computing and networking, ACM New York, USA.

Seah, W. et Y. K. Tan, Eds. (2010). Sustainable Wireless Sensor Networks, InTech.

Senturia, S. D. (2001). Microsystem design. Boston, Kluwer Academic Publishers.

Serna Vázquez, L. (2007). Modélisation de Préférences et Exploration Virtuelle en Conception Interactive. Bidart, Ecole centrale de Nantes. **Doctorat**.

Shen, W. (2003). "Editorial of the special issue on knowledge sharing in collaborative design environments." Computers in Industry **52**(1): 1-3.

Shenck, N. S. et J. A. Paradiso (2001). "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics." IEEE Micro **21**(3): 30-42.

Simjee, F. et P. H. Chou Everlast: Long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node. ISLPED.

Smith, A. A. (1998). Radio Frequency Principles and Applications : The Generation, Propagation, and Reception of Signals and Noise, Wiley-IEEE Press.

Starner, T. (1996). "Human-powered wearable computing." IBM Systems Journal archive **35**(3-4).

Starner, T. E. (2003). "Powerful change part 1 : batteries and possible alternatives for the mobile market." IEEE Pervasive computing **2**(4): 86-88.

Stone, R. B., K. L. Wood et R. H. Crawford (2000). "A heuristic method for identifying modules for product architectures." Design Studies **21**: 5-31.

Stordeur, M. et I. Stark (1997). Low Power Thermoelectric Generator – self-sufficient energy supply for micro systems. 16th International Conference on Thermoelectrics: 575-577.

Strasser, M., R. Aigner, M. Franosch et G. Wachutka (2002). "Miniaturizes thermoelectric generators based on Poly-Si and Poly-Si-Ge surface micromachining " Sensors and actuators, A: Physical **97-98**(1-2): 535-542.

Suh, N. P. (1990). The principles of design. O. U. Press. New York.

Sven Krueger et R. Grace New Challenges For Microsystems-Technology In Automotive Applications. mstnews.

## T

- Tabeling, P. (2003). Introduction à la microfluidique.
- Tassinari, R. (1995). L'analyse fonctionnelle, AFNOR 95.
- Teorey, T. J., D. Yang et J. P. Fry (1986). "A logical design methodology for relational databases using the extended entityrelationship model." New York : ACM Comput. Surv.: 197-222.
- Terrasson, G. (2008). Contribution à la conception d'émetteur récepteur pour microcapteurs autonomes. Electronique, Université de Bordeaux 1. **Doctorat**.
- Terrasson, G., R. Briand et S. Basrour (2009). "A Design Technique for Power Constrained CMOS Low-Noise Amplifier Dedicated to Wireless Sensor Networks." J. Of Low Power Electron. (JOLPE).
- Terrasson, G., R. Briand, S. Basrour, V. Dupé et O. Arrijuia (2009). Energy Model for the Design of Ultra-Low Power Nodes for Wireless Sensor Networks Euroensors, Lausanne, .
- Thomas, J. P., M. A. Qidwai et J. C. Kellogg (2006). "Energy scavenging for small-scale unmanned systems." Journal of Power Sources **159**(2): 1494-1509.
- Tichkiewitch, S., E. Chapa et P. Belloy (1995). Un modèle produit multi-vues pour la conception intégrée. Productivity in world without borders conference. Montréal.
- Tzou, H. S. (1993). Piezoelectric Shells, Distributed Sensing and Control of Continua. Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers.

## U

- Ullman, D. G. (1997). The Mechanical Design Process, McGraw-Hill, New York.
- Ulrich, K. et D. Eppinger (2000). Product design and development, McGraw-Hill/Irwin.

## V

- Vasilash, G. S. (1990). "Simultaneous engineering, management's view competitive tool, Simultaneous Engineering." Integrating Manufacturing and Design: 50-55.
- Vernat, Y., J. P. Nadeau et P. Sébastien (2009). "Formalization and qualification of models adapted to preliminary design." Int. J. Interact. Des. Manuf.

## W

- Werner-Allen, G. (2005). Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network. 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'05).

- Whalen, S., M. Thompson, D. Bahr, C. Richards et R. Richards (2003). "Design, fabrication and testing of the P3 micro heat engine." Sensors and Actuators A: Physical **104**(3): 290-298.
- Whitney, D. E. (1992). Peugeot's manufacturing technology challenge EC assumptions. Cambridge MIT Press.
- Wiesenfeld, B. (2005). L'énergie en 2050: Nouveaux défis et faux espoirs.
- Williams, C. B., C. Shearwood, M. A. Harradine, P. H. Mellor, T. S. Birch et R. B. Yates (2001). "Development of an electromagnetic micro-generator." Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings **148**(6): 337-342.
- Williams, C. B. et R. B. Yates (1998). "Analysis of a micro-electric generator for microsystems." Sensors and Actuators A: Physical and Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators Eurosensors IX **52**(1-3): 8-11.
- Winner, R. I., J. P. Pennell, H. E. Bertrand et M. G. Slusarczyk (1988). The role of concurrent engineering in weapon systems acquisition. . IDA-Report R-338, Institute for Defense Analyses.

## X

- Xu, C. N., M. Akiyama, K. Nonaka et T. Watanabe (1998). "Electrical power generation characteristics of PZT piezoelectric ceramics." IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control **45**: 1065-1070.

## Y

- Yan, H. S. (1992). "A methodology for creative mechanism design." Mechanism and machine theory **27**: 235-242.
- Yeatman, E. M. (2004). Advances In Power Sources For Wireless Sensor Nodes 1st International Workshop on Body Sensor Networks.
- Yeh, R. T. (1992). "Notes on concurrent engineering." IEEE Transation on Knowledge Data Engineering **4**(5): 407-414.
- Younker, D. L. (2003). Value Engineering: Analysis and Methodology, CRC Press.

## Z

- Zénati, A. (2006). Modélisation et simulation de microsystemes multi domaines à signaux mixtes : vers le prototype virtuel d'un microsysteme autonome. TIMA - Techniques of Informatics and Microelectronics for integrated systems Architecture. Grenoble, CNRS : UMR5159, Université Joseph Fourier Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG. **Doctorat**.
- Zhang, Y., L. Cheng et C. Naito (2005). A Study of Wireless MEMS Accelerometers for Civil Infrastructure Monitoring. IEEE International Workshop on Measurement Systems Homeland Security, Contraband Detection and Personal Safety.

---

# Publications personnelles

## Revue internationale

**Valérie Dupé et Renaud Briand** (2010). "Interactive method for autonomous microsystem " International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 4(1): 35 - 50.

## Conférences internationales avec comité de lecture et actes

**Valérie Dupé, Guillaume Terrasson et Renaud Briand** (2011). Simulation tool for microsensor design driven by autonomy constraints. IEEE Low Voltage Low Power Conference FTFC. Marrakech, Morocco 50-53.

**Valérie Dupé, Renaud Briand, Xavier Fischer et Patrick Sébastien** (2011). Decision support system to design autonomous microsystems. IMProVe 2011. Venise, Italie.

**Valérie Dupé, Renaud Briand, Xavier Fischer et Guillaume Terrasson** (2010). System level modelling of autonomous microsystem. IDMME Virtual Concept 2010. Bordeaux, © Springer-Verlag 3.

**Guillaume Terrasson, Renaud Briand, Skandar Basrour et Valérie Dupé** (2009). A Top-Down Approach for the Design of Low-Power Microsensor Nodes for Wireless Sensor Network. Forum On Design Language (FDL) 2009. Sophia Antipolis, France: 6.

**Guillaume Terrasson, Renaud Briand, Skandar Basrour, Valérie Dupé et Olivier Arriju** (2009). Energy Model for the Design of Ultra-Low Power Nodes for Wireless Sensor Networks Euroensors, Lausanne, .

**Valérie Dupé, Renaud Briand et Xavier Fischer** (2009). Component based modeling for structuring measurement: preliminary modeling applied to automotive braking behavior. Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS). Hong Kong, China, IEEE Explore: 226-231.



## Conférences nationales avec comité de lecture et actes

**Valérie Dupé, Guillaume Terrasson, Renaud Briand et Ivan Estevez** (2011). Energy consumption optimization for autonomous microsensor design. Colloque GDR SOC-SIP 2011. Lyon.

**Valérie Dupé, Guillaume Terrasson et Renaud Briand** (2010). System level decision method dedicated to multisource autonomous microsensors. Workshop on energy harvesting and storage to power autonomous microsystems. Noisy Le Grand (ESIEE).

**Valérie Dupé, Renaud Briand et Xavier Fischer** (2009). Conception d'un convertisseur faible tension adapté à la problématique de récupération d'énergie ambiante. Troisième colloque du GDR SOC-SIP du CNRS. Paris - Orsay.

**Valérie Dupé, Renaud Briand et Xavier Fischer** (2009). Conception d'un convertisseur faible tension adapté à la problématique de récupération d'énergie ambiante. JNRDM - 12ème édition Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique. Lyon

**Valérie Dupé, Renaud Briand et Xavier Fischer** (2009). Méthodologie pour le choix et le développement de microsystemes autonomes dédiés à l'analyse des interactions mécano-sensorielles dans le freinage automobile. 11ème colloque national AIP PRIMECA Produits, procédés et systèmes : les dernières innovations. La Plagne.

## Conférences nationales sans comité de lecture

**Valérie Dupé, Guillaume, Ivan Estevez, Terrasson et Renaud Briand** (2011). Validation d'un outil d'aide à la conception de microsystemes autonomes. Journées électroniques 2011 : Technologies émergentes et Green SoC-SiP. Montpellier.







# CONCEPTION MULTIDISCIPLINAIRE DE MICROSYSTÈMES AUTONOMES

## Résumé

Toute action naturelle crée de l'énergie perdue qui pourrait être exploitée pour alimenter nos appareils électriques et mobiles. Nos environnements physiques disposent d'un nombre élevé de micro-sources d'énergies ; certes chacune est de faible puissance, mais leur multiplicité pourrait s'avérer significative, notamment dans le cadre du fonctionnement de microsyntèmes.

C'est le principe précédent qui a conduit nos travaux sur la problématique de la conception de **microsyntèmes autonomes**. Ainsi, pour être innovante, l'ingénierie de microsyntèmes doit à la fois s'appuyer sur la culture de l'électronique, de la mécanique mais aussi de l'énergétique. Le processus de conception est fortement pluridisciplinaire et son efficacité réside dans la capacité à mettre en œuvre des méthodologies et des outils :

- de **conception collaborative**,
- de capitalisation des **connaissances techniques**,
- d'ingénierie **multi-physique**,
- d'ingénierie **intégrée**.

Sur le base de ces fondamentaux, nous avons développé un outil d'aide à la conception. La méthodologie sous-jacente permet :

- 1- **l'analyse et la structuration d'un problème de conception d'un microsyntème autonome** : cette phase conduit l'identification, la description fonctionnelle et environnementale du syntème et de son environnement.
- 2- **la modélisation des connaissances** : une analyse architecturale conduit à la description des composants et des interactions liées au microsyntème (directement ou indirectement) puis à la modélisation des comportements,
- 3- **la qualification énergétique et le couplage physique** : la réutilisation structurée des modèles de connaissances est pilotée pour coupler les modèles physiques et décrire les sources, les puits et les mécanismes énergétiques des environnements,
- 4- **la conduite de la recherche de concepts innovants** : la base de connaissances, les critères de qualification et la description fonctionnelle préalablement construits sont agencés dans une seule méthode de conception virtuelle pour rechercher des concepts de solutions innovants,
- 5- **le pré-dimensionnement** : tout en assurant l'intégration des outils spécialisés de simulation (méthode des éléments finis et simulation fonctionnelle), le pré-dimensionnement de microsyntèmes autonomes est supportée selon un schéma synthétique, assurant un raisonnement abductif (ou bottom-up).

La conjonction des raisonnements physiques, l'intégration des méthodes et des cultures métiers, l'exploration virtuelle des espaces de solutions et la modélisation constituent les bases d'un nouveau moyen d'aide à la conception de microsyntèmes autonomes. Cette approche a été déployée pour la conception d'un capteur piézoélectrique autonome.

**Mots-clés** : conception pluridisciplinaire et collaborative, conception intégrée, modélisation de syntème, récupération d'énergie, microsources d'énergie, modèle de connaissance, couplage multi-physique, microsyntème autonome.

# MULTIDISCIPLINARY DESIGN OF AUTONOMOUS MICROSYSTEMS

## Summary

Any natural action creates lost energy which could be exploited to supply our electrical and mobile appliance. Our physical environments have a high number of micro-energy sources. Admittedly, each one provides low power but their multiplicity could be significant, in particular within the framework of the microsystem operation.

The previous observation guided our works towards the problematic of **autonomous microsystem design**. Thus, to be innovative, microsystems engineering must lean on electronic, mechanical and energy domains. The design process is highly multidisciplinary and its efficiency depends on the ability to implement methods and tools:

- of **collaborative design**
- of capitalization of **technical knowledge**
- of **multiphysic engineering**
- of **integrated design**.

Based on these fundamentals, we developed a design support tool. The underlying methodology enables:

- 6- **the design problem analysis and structuring of an autonomous microsystem**: this phase leads to the identification and functional and environmental description of the system and its environment
- 7- **the knowledge modelling**: an architectural analysis gives the description of components and interactions related to the microsystem (directly or indirectly). Then, it leads to a behaviour modelling.
- 8- **the energy qualification and physical coupling**: the structured reuse of knowledge models is guided to couple physical models and describe the sources, sinks and the energy mechanism of the environment.
- 9- **the control of innovative concept search**: the knowledge base, qualification criteria and functional description, previously constructed, are combined in an unique virtual design approach dedicated to search innovative concepts as a solution
- 10- **the predimensioning**: this phase ensures the integration of specific simulation tools (finite elements method and functional simulation). The predimensioning of autonomous microsystems is supported by a synthetic scheme based on an abductive reasoning (bottom-up).

The combination of physical reasoning, the integration of methods and engineering domains, the virtual exploration of solution spaces and the modelling represent a new way to support autonomous microsystem design. This approach was applied to the design of an autonomous piezoelectric sensor.

**Keywords**: multi-domain and collaborative design, integrated design, system modelling, energy harvesting, micro-energy sources, knowledge model, multiphysic coupling, autonomous microsystem.