

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêtée ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Avetissian Tigran**

Thèse dirigée par **Formosa Fabien**  
et codirigée par **Badel Adrien**

préparée au sein du **Laboratoire SYMME : SYstèmes et Matériaux pour  
la MÉcatronique**  
dans l'**École Doctorale SISEO : Sciences et Ingénierie des Systèmes,  
de l'Environnement et des Organisations**

**"Titre"**

**"Sous-titre"**

Thèse soutenue publiquement le **"Date de soutenance"**,  
devant le jury composé de :

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Examinateur

**Mme. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Rapporteur

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Rapporteur

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Directeur de thèse

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Co-Directeur de thèse

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Co-Encadrant de thèse

**M. "Nom, Prénom"**

"titre et affiliation", Invité





---

...

---



## Remerciements

MERCI



# Table des matières

Remerciements . . . . .	i
Table des matières . . . . .	iii
<b>I Introduction générale sur la récupération d'énergie</b>	<b>1</b>
I.1 Pourquoi faire de la récupération d'énergie . . . . .	2
I.1.1 Capteurs autonomes (IOT) . . . . .	2
I.1.2 Longévité des batteries . . . . .	2
I.2 Les gisements énergétiques existants . . . . .	2
I.3 Verrous technologiques pour l'exploitation des sources d'énergies . . . . .	2
I.4 Les grandes familles de récupérateurs d'énergie . . . . .	2
I.4.1 Figures . . . . .	2
I.4.2 Tableaux . . . . .	3
<b>II Cas particulier de la récupération d'énergie sur le corps humain</b>	<b>5</b>
II.1 La récupération d'énergie sur le corps entier . . . . .	6
II.1.1 Énergie thermique . . . . .	6
II.1.2 Énergie chimique A VOIR . . . . .	6
II.1.3 Énergie mécanique - cinétique . . . . .	6
II.2 La récupération d'énergie autour de l'environnement de la tête . . . . .	6
II.2.1 Énergie thermique . . . . .	6
II.2.2 Énergie mécanique - cinétique . . . . .	6
II.3 La récupération d'énergie dans le conduit auditif . . . . .	6
II.4 Présentation des travaux . . . . .	6
<b>III Modélisation et simulation du système de récupération d'énergie intra-auriculaire</b>	<b>7</b>
III.1 Exploiter au mieux l'énergie de déformation locale du canal auditif . . . . .	8
III.1.1 Maximiser l'énergie extractible . . . . .	8
III.1.1.a Emmagasinage l'énergie de façon optimale . . . . .	8
III.1.1.b Limiter les contraintes d'encombrement . . . . .	8
III.1.2 Amplifier la fréquence de l'énergie source . . . . .	8
III.1.3 Pertinence de la chaîne de conversion d'énergie envisagée . . . . .	8
III.1.4 Solution proposée pour maximiser l'énergie récupérée . . . . .	8
III.2 Cyclage du mouvement de la masse dynamique du bistable : valves hydrauliques	8
III.2.1 La dynamique nécessaire au fonctionnement cyclé du récupérateur . . . . .	8
III.2.2 Solutions existantes pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement	8
III.2.2.a Solutions nécessitant une alimentation électrique . . . . .	8
III.2.2.b Solutions ne nécessitant pas d'alimentation électrique . . . . .	8
III.2.3 Solution proposée pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement	9

III.3	Modélisation du convertisseur électromécanique . . . . .	9
III.3.1	L'oscillateur monostable . . . . .	9
III.3.2	L'oscillateur bistable . . . . .	9
III.3.3	L'oscillateur bistable implémentant le générateur piézoélectrique . . . . .	9
III.3.3.a	Définition des grandeurs dimensionnantes et du rendement du convertisseur . . . . .	9
III.4	Modélisation du circuit hydraulique couplé au convertisseur électromécanique . .	9
III.5	Simulation et dimensionnement préliminaire du système de récupération . . . . .	9
III.5.1	Couplage entre le circuit hydraulique et l'oscillateur bistable . . . . .	9
III.5.2	Phase d'actionnement . . . . .	9
III.5.3	Phase de conversion d'énergie . . . . .	9
III.5.4	Critères de dimensionnement préliminaire . . . . .	9
III.5.5	Simulation et résultats . . . . .	9
<b>IV</b>	<b>Conception et fabrication du convertisseur électromécanique : oscillateur bistable + transducteur piézoélectrique</b>	<b>10</b>
IV.1	Cahier des charges . . . . .	11
IV.1.1	Architecture générale . . . . .	11
IV.1.2	Choix technologique pour les articulation du bistable . . . . .	11
IV.1.3	Critères de conception du bistable . . . . .	11
IV.2	Dimensionnement et conception de l'oscillateur bistable . . . . .	11
IV.2.1	Étude de flambement . . . . .	11
IV.2.2	Dimensionnement des articulations du bistable . . . . .	11
IV.2.2.a	Rigidité en rotation . . . . .	11
IV.2.2.b	Rigidité longitudinale . . . . .	11
IV.2.2.c	Résistance structurelle . . . . .	11
IV.3	Fabrication et caractérisations expérimentales . . . . .	11
IV.3.1	Fabrication de la structure à lames monobloc . . . . .	11
IV.3.2	Intégration du transducteur piézoélectrique à la structure monobloc . . . .	11
IV.3.3	Caractérisation du convertisseur électromécanique bistable résultant . . . .	11
IV.3.3.a	Analyse d'impédance . . . . .	11
IV.3.3.b	Comportement dynamique . . . . .	11
IV.4	Corrélation modèle - essais et recalage . . . . .	11
IV.4.1	Comparaison données théoriques et expérimentales . . . . .	11
IV.4.2	Simulations après recalage . . . . .	11
IV.4.3	Conclusion . . . . .	11
<b>V</b>	<b>Conception et fabrication des valves hydrauliques : tubes flexibles flambés</b>	<b>12</b>
V.1	Cahier des charges . . . . .	13
V.1.1	Modèle d'approximation du tube flambé . . . . .	13
V.1.2	Diamètre hydraulique de fermeture . . . . .	13
V.2	Conception . . . . .	13
V.2.1	Comportement mécanique post-flambement des tubes flexibles . . . . .	13
V.2.1.a	Comportement cinématique . . . . .	13
V.2.1.b	Comportement statique . . . . .	13
V.2.2	Intégration à l'oscillateur bistable . . . . .	13
V.2.2.a	Intégration cinématique . . . . .	13
V.2.2.b	Intégration statique . . . . .	13
V.2.3	Validation numérique des tubes valve conçus . . . . .	13
V.2.3.a	Implémentation dans le modèle système . . . . .	13
V.2.3.b	Simulation du modèle système comprenant les valves . . . . .	13



V.3	Caractérisations expérimentales . . . . .	13
V.4	Implémentation dans le modèle système global . . . . .	13
V.5	Corrélation modèle - essais et recalage . . . . .	13
<b>VI</b>	<b>Caractérisation expérimentale du prototype de récupération d'énergie intra-auriculaire complet</b>	<b>14</b>
VI.1	Modèle système global . . . . .	15
VI.2	Banc de test . . . . .	15
VI.3	Résultats . . . . .	15
VI.3.1	Actionnement unilatéral du bistable – 1 fermeture de mâchoire . . . . .	15
VI.3.1.a	Résultats du comportement dynamique global . . . . .	15
VI.3.1.b	Estimation de l'énergie récupérée sur un cycle de mastication . . . . .	15
VI.3.2	Actionnement bilatéral du bistable – 2 fermetures de mâchoire consécutives . . . . .	15
VI.4	Corrélation modèle - essais et recalage . . . . .	15
<b>VII</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>16</b>
VII.1	Analyse critique du système . . . . .	16
VII.2	Applications potentielles . . . . .	16
VII.3	Conclusion . . . . .	16
	<b>Bibliographie</b>	<b>I</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>III</b>
	<b>Liste des tableaux</b>	<b>V</b>
<b>A</b>	<b>Annexe 1</b>	<b>VII</b>
A.1	Introduction . . . . .	VIII
A.2	Conclusion . . . . .	VIII



# Introduction générale sur la récupération d'énergie

## Sommaire

<b>I.1</b>	<b>Pourquoi faire de la récupération d'énergie</b>	<b>2</b>
I.1.1	Capteurs autonomes (IOT)	2
I.1.2	Longévité des batteries	2
<b>I.2</b>	<b>Les gisements énergétiques existants</b>	<b>2</b>
<b>I.3</b>	<b>Verrous technologiques pour l'exploitation des sources d'énergies</b>	<b>2</b>
<b>I.4</b>	<b>Les grandes familles de récupérateurs d'énergie</b>	<b>2</b>
I.4.1	Figures	2
I.4.2	Tableaux	3

## **I.1 Pourquoi faire de la récupération d'énergie**

### **I.1.1 Capteurs autonomes (IOT)**

### **I.1.2 Longévité des batteries**

*I*ntroduction générale [Bob2000] [Agashe2008]

## **I.2 Les gisements énergétiques existants**

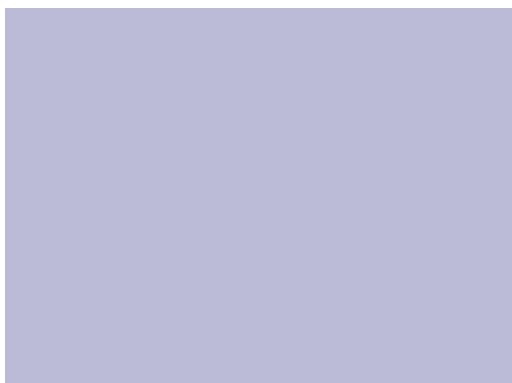
## **I.3 Verrous technologiques pour l'exploitation des sources d'énergies**

## **I.4 Les grandes familles de récupérateurs d'énergie**

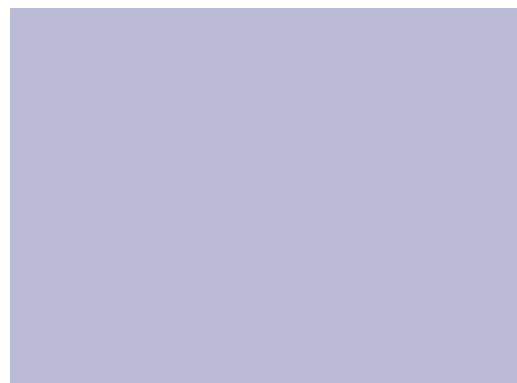
### **I.4.1 Figures**



*Figure I.1 – Figure simple*



*(a) double (a)*



*(b) double (b)*

*Figure I.2 – Figure double*

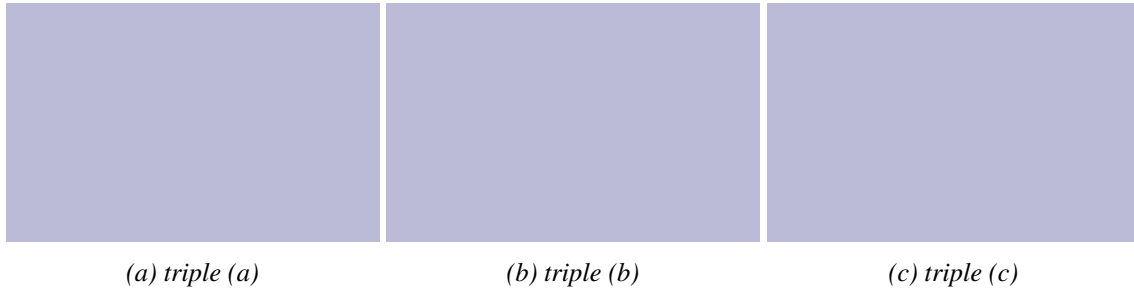


Figure I.3 – Figure triple

## I.4.2 Tableaux

N°	A	B	C	D
1	x	x	0	0
2	0	x	0	0
3	x	0	x	0
4	x	x	0	x

Tableau I.1 – Tableau



# Cas particulier de la récupération d'énergie sur le corps humain

## Sommaire

<b>II.1</b>	<b>La récupération d'énergie sur le corps entier</b>	<b>6</b>
II.1.1	Énergie thermique	6
II.1.2	Énergie chimique A VOIR	6
II.1.3	Énergie mécanique - cinétique	6
<b>II.2</b>	<b>La récupération d'énergie autour de l'environnement de la tête</b>	<b>6</b>
II.2.1	Énergie thermique	6
II.2.2	Énergie mécanique - cinétique	6
<b>II.3</b>	<b>La récupération d'énergie dans le conduit auditif</b>	<b>6</b>
<b>II.4</b>	<b>Présentation des travaux</b>	<b>6</b>

## **II.1 La récupération d'énergie sur le corps entier**

### **II.1.1 Énergie thermique**

### **II.1.2 Énergie chimique A VOIR**

### **II.1.3 Énergie mécanique - cinétique**

## **II.2 La récupération d'énergie autour de l'environnement de la tête**

### **II.2.1 Énergie thermique**

### **II.2.2 Énergie mécanique - cinétique**

## **II.3 La récupération d'énergie dans le conduit auditif**

## **II.4 Présentation des travaux**



# Modélisation et simulation du système de récupération d'énergie intra-auriculaire

## Sommaire

<b>III.1 Exploiter au mieux l'énergie de déformation locale du canal auditif . . . . .</b>	<b>8</b>
III.1.1 Maximiser l'énergie extractible . . . . .	8
III.1.1.a Emmagasinier l'énergie de façon optimale . . . . .	8
III.1.1.b Limiter les contraintes d'encombrement . . . . .	8
III.1.2 Amplifier la fréquence de l'énergie source . . . . .	8
III.1.3 Pertinence de la chaîne de conversion d'énergie envisagée . . . . .	8
III.1.4 Solution proposée pour maximiser l'énergie récupérée . . . . .	8
<b>III.2 Cyclage du mouvement de la masse dynamique du bistable : valves hydrauliques . . . . .</b>	<b>8</b>
III.2.1 La dynamique nécessaire au fonctionnement cyclé du récupérateur . . . . .	8
III.2.2 Solutions existantes pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement . . . . .	8
III.2.2.a Solutions nécessitant une alimentation électrique . . . . .	8
III.2.2.b Solutions ne nécessitant pas d'alimentation électrique . . . . .	8
III.2.3 Solution proposée pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement . . . . .	9
<b>III.3 Modélisation du convertisseur électromécanique . . . . .</b>	<b>9</b>
III.3.1 L'oscillateur monostable . . . . .	9
III.3.2 L'oscillateur bistable . . . . .	9
III.3.3 L'oscillateur bistable implémentant le générateur piézoélectrique . . . . .	9
III.3.3.a Définition des grandeurs dimensionnantes et du rendement du convertisseur . . . . .	9
<b>III.4 Modélisation du circuit hydraulique couplé au convertisseur électromécanique . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>III.5 Simulation et dimensionnement préliminaire du système de récupération . . . . .</b>	<b>9</b>
III.5.1 Couplage entre le circuit hydraulique et l'oscillateur bistable . . . . .	9
III.5.2 Phase d'actionnement . . . . .	9
III.5.3 Phase de conversion d'énergie . . . . .	9
III.5.4 Critères de dimensionnement préliminaire . . . . .	9
III.5.5 Simulation et résultats . . . . .	9

## **III.1 Exploiter au mieux l'énergie de déformation locale du canal auditif**

### **III.1.1 Maximiser l'énergie extractible**

#### **III.1.1.a Emmagasiner l'énergie de façon optimale**

Stockage dans ressort linéaire vs dans bistable (article Fabien)

#### **III.1.1.b Limiter les contraintes d'encombrement**

Choix technologiques plus variés.

Facilité d'exploitation de l'énergie hydraulique.

### **III.1.2 Amplifier la fréquence de l'énergie source**

Actionner un oscillateur.

Avantage du bistable pour l'actionnement statique d'un puits de potentiel vers l'autre.

Le monostable s'actionne forcément avec du frottement supplémentaire (biblio)

### **III.1.3 Pertinence de la chaîne de conversion d'énergie envisagée**

Efficacité théorique de la chaîne de conversion (sans modèle = biblio).

Faibles pertes dans la transmission hydraulique QS.

Fort  $k^2$  du PZT vs le PFDV.

Profit du facteur de qualité vs un récupérateur statique.

### **III.1.4 Solution proposée pour maximiser l'énergie récupérée**

Présentation schématique du système de conversion envisagé.

Fonctionnement et rôle de chaque organe.

Mise en évidence du couplage entre tous les organes.

## **III.2 Cyclage du mouvement de la masse dynamique du bistable : valves hydrauliques**

### **III.2.1 La dynamique nécessaire au fonctionnement cyclé du récupérateur**

Introduction du caractère cyclique recherché dans le fonctionnement du système.

### **III.2.2 Solutions existantes pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement**

#### **III.2.2.a Solutions nécessitant une alimentation électrique**

Présentation des solutions existantes pour la redirection de fluide (Liste non exhaustive en biblio). Appuyer la nécessité d'alimenter en électricité.

#### **III.2.2.b Solutions ne nécessitant pas d'alimentation électrique**

On privilégie une solution qui nécessite pas d'être alimentée en élec (Liste non exhaustive en biblio).

### **III.2.3 Solution proposée pour la gestion directionnelle de fluide en mouvement**

On propose une solution qui répond à nos besoins spécifiques.

## **III.3 Modélisation du convertisseur électromécanique**

### **III.3.1 L'oscillateur monostable**

### **III.3.2 L'oscillateur bistable**

### **III.3.3 L'oscillateur bistable implémentant le générateur piézoélectrique**

Identifier la dimension technologique fixée : l'APA = Technologie certifiée CEDRAT.

Schématisation cinématique du système bistable + APA

PFD sur masse et mise en évidence du Duffing.

#### **III.3.3.a Définition des grandeurs dimensionnantes et du rendement du convertisseur**

## **III.4 Modélisation du circuit hydraulique couplé au convertisseur électromécanique**

Schématisation hydraulique du système de ballastes + amplificateur hydraulique + switch( $\Delta P = C_f * q_{ear}$ ) + pistons.

## **III.5 Simulation et dimensionnement préliminaire du système de récupération**

### **III.5.1 Couplage entre le circuit hydraulique et l'oscillateur bistable**

### **III.5.2 Phase d'actionnement**

### **III.5.3 Phase de conversion d'énergie**

### **III.5.4 Critères de dimensionnement préliminaire**

### **III.5.5 Simulation et résultats**

# Chapitre IV

## Conception et fabrication du convertisseur électromécanique : oscillateur bistable + transducteur piézoélectrique

### Sommaire

<b>IV.1 Cahier des charges</b>	<b>11</b>
IV.1.1 Architecture générale	11
IV.1.2 Choix technologique pour les articulation du bistable	11
IV.1.3 Critères de conception du bistable	11
<b>IV.2 Dimensionnement et conception de l'oscillateur bistable</b>	<b>11</b>
IV.2.1 Étude de flambement	11
IV.2.2 Dimensionnement des articulations du bistable	11
IV.2.2.a Rigidité en rotation	11
IV.2.2.b Rigidité longitudinale	11
IV.2.2.c Résistance structurelle	11
<b>IV.3 Fabrication et caractérisations expérimentales</b>	<b>11</b>
IV.3.1 Fabrication de la structure à lames monobloc	11
IV.3.2 Intégration du transducteur piézoélectrique à la structure monobloc	11
IV.3.3 Caractérisation du convertisseur électromécanique bistable résultant	11
IV.3.3.a Analyse d'impédance	11
IV.3.3.b Comportement dynamique	11
<b>IV.4 Corrélation modèle - essais et recalage</b>	<b>11</b>
IV.4.1 Comparaison données théoriques et expérimentales	11
IV.4.2 Simulations après recalage	11
IV.4.3 Conclusion	11

## **IV.1 Cahier des charges**

### **IV.1.1 Architecture générale**

### **IV.1.2 Choix technologique pour les articulation du bistable**

### **IV.1.3 Critères de conception du bistable**

## **IV.2 Dimensionnement et conception de l'oscillateur bistable**

### **IV.2.1 Étude de flambement**

### **IV.2.2 Dimensionnement des articulations du bistable**

#### **IV.2.2.a Rigidité en rotation**

Modèle éléments finis

Modèle analytique

#### **IV.2.2.b Rigidité longitudinale**

Rigidité du générateur piézoélectrique prépondérante

#### **IV.2.2.c Résistance structurelle**

Adaptation des lames parallèles à la méthode de fabrication

Contraintes dans les lames pliées

## **IV.3 Fabrication et caractérisations expérimentales**

### **IV.3.1 Fabrication de la structure à lames monobloc**

### **IV.3.2 Intégration du transducteur piézoélectrique à la structure monobloc**

### **IV.3.3 Caractérisation du convertisseur électromécanique bistable résultant**

#### **IV.3.3.a Analyse d'impédance**

#### **IV.3.3.b Comportement dynamique**

## **IV.4 Corrélation modèle - essais et recalage**

### **IV.4.1 Comparaison données théoriques et expérimentales**

### **IV.4.2 Simulations après recalage**

### **IV.4.3 Conclusion**

# Conception et fabrication des valves hydrauliques : tubes flexibles flambés

## Sommaire

<b>V.1</b>	<b>Cahier des charges . . . . .</b>	<b>13</b>
V.1.1	Modèle d'approximation du tube flambé . . . . .	13
V.1.2	Diamètre hydraulique de fermeture . . . . .	13
<b>V.2</b>	<b>Conception . . . . .</b>	<b>13</b>
V.2.1	Comportement mécanique post-flambement des tubes flexibles . . . . .	13
V.2.1.a	Comportement cinématique . . . . .	13
V.2.1.b	Comportement statique . . . . .	13
V.2.2	Intégration à l'oscillateur bistable . . . . .	13
V.2.2.a	Intégration cinématique . . . . .	13
V.2.2.b	Intégration statique . . . . .	13
V.2.3	Validation numérique des tubes valve conçus . . . . .	13
V.2.3.a	Implémentation dans le modèle système . . . . .	13
V.2.3.b	Simulation du modèle système comprenant les valves . . . . .	13
<b>V.3</b>	<b>Caractérisations expérimentales . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>V.4</b>	<b>Implémentation dans le modèle système global . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>V.5</b>	<b>Corrélation modèle - essais et recalage . . . . .</b>	<b>13</b>

## **V.1 Cahier des charges**

### **V.1.1 Modèle d'approximation du tube flambé**

Diamètre hydraulique en fonction de  $C_f$

### **V.1.2 Diamètre hydraulique de fermeture**

Diamètre hydraulique en fonction de la position du bistable

## **V.2 Conception**

### **V.2.1 Comportement mécanique post-flambement des tubes flexibles**

#### **V.2.1.a Comportement cinématique**

L'angle de fermeture de fermeture

#### **V.2.1.b Comportement statique**

Énergie de pliage et moment de rappel en rotation

### **V.2.2 Intégration à l'oscillateur bistable**

#### **V.2.2.a Intégration cinématique**

#### **V.2.2.b Intégration statique**

### **V.2.3 Validation numérique des tubes valve conçus**

#### **V.2.3.a Implémentation dans le modèle système**

#### **V.2.3.b Simulation du modèle système comprenant les valves**

## **V.3 Caractérisations expérimentales**

## **V.4 Implémentation dans le modèle système global**

## **V.5 Corrélation modèle - essais et recalage**

# Chapitre VI

## Caractérisation expérimentale du prototype de récupération d'énergie intra-auriculaire complet

### Sommaire

<b>VI.1</b>	<b>Modèle système global</b>	<b>15</b>
<b>VI.2</b>	<b>Banc de test</b>	<b>15</b>
<b>VI.3</b>	<b>Résultats</b>	<b>15</b>
VI.3.1	Actionnement unilatéral du bistable – 1 fermeture de mâchoire	15
VI.3.1.a	Résultats du comportement dynamique global	15
VI.3.1.b	Estimation de l'énergie récupérée sur un cycle de mastication	15
VI.3.2	Actionnement bilatéral du bistable – 2 fermetures de mâchoire consécutives	15
<b>VI.4</b>	<b>Corrélation modèle - essais et recalage</b>	<b>15</b>



## **VI.1 Modèle système global**

## **VI.2 Banc de test**

## **VI.3 Résultats**

### **VI.3.1 Actionnement unilatéral du bistable – 1 fermeture de mâchoire**

#### **VI.3.1.a Résultats du comportement dynamique global**

#### **VI.3.1.b Estimation de l'énergie récupérée sur un cycle de mastication**

### **VI.3.2 Actionnement bilatéral du bistable – 2 fermetures de mâchoire consécutives**

## **VI.4 Corrélation modèle - essais et recalage**

# Chapitre **VII**

## Conclusion et perspectives

**VII.1 Analyse critique du système**

**VII.2 Applications potentielles**

**VII.3 Conclusion**



# Bibliographie

- [Agashe2008] Janhavi S. Agashe et David P. Arnold. *Erratum : A study of scaling and geometry effects on the forces between cuboidal and cylindrical magnets using analytical force solutions (Journal of Physics D : Applied Physics (2008) 41 (105001))*. Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 42, no. 9, 2008.
- [Bob2000] B. Bob. *Bob and Bobby*. J. Bob, vol. 2000, no. Bob 2000, page 2000, 2000.



# Table des figures

I.1	Figure simple . . . . .	2
I.2	Figure double . . . . .	2
I.3	Figure triple . . . . .	3



# Liste des tableaux

I.1	Tableau . . . . .	3
-----	-------------------	---





Annexe **A**

## Annexe 1

## **A.1 Introduction**

## **A.2 Conclusion**



**"Titre"**

**"Sous-titre"**

---

**Résumé**

**Mots-clés :**

---

**Abstract**

**Keywords :**

