

ÉTUDE D'UN DIMERE ÉLECTRONIQUE A CARACTERE DISSIPATIF

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du
diplôme de Professeur de l'Enseignement Secondaire

Deuxième Grade (DI.P.E.S.II)

par :

TEUGUIA JEAN PAUL

Matricule : **13O2398**

Licencié en Physique

Sous la direction de

FOTSA NGAFFO FERNANDE

Charge de cours

Université de Yaoundé 1

Juin 2019

Table des matières

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 REVUE DE LA LITTÉRATURE ET GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES OSCILLANTS	4
1.1 Introduction	4
1.2 Système PT-Symmetry	4
1.3 Généralité sur les systèmes oscillatoires	6
1.3.1 Définitions	6
1.3.2 Présentation du dimère électronique	7
1.3.3 Couplage d'un système électronique	7
1.3.4 Conclusion	11
2 MODÈLES ET MÉTHODES.	12
2.1 Introduction	12
2.2 Modélisation du système électronique à deux couplages : capacitif et inductance mutuelle	12

2.2.1	Équation régissant l'évolution des charges dans les deux cellules.	13
2.2.2	Méthode de résolution	14
2.2.3	Matrice de Jordan et adimensionnement des valeurs propres et gammas seuils	14
2.3	Résolution analytique et numérique	16
2.3.1	Vecteurs propres généralisés et matrice aux valeurs propres de notre sys- tème électronique	17
2.3.2	Forme des solutions du système.	18
2.4	Étude du splitting	18
2.4.1	Fano résonance.	20
2.5	Étude de la dynamique non linéaire.	22
2.5.1	Conclusion.	23
3	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	25
3.1	Introduction	25
3.2	Analyse des gammas seuils	25
3.3	Spectre des valeurs propres	28
3.4	Analyse du splitting	33
3.5	Analyse de la résonance de Fano	34
3.6	Analyse de la dynamique non linéaire	44
3.7	Conclusion	46
4	APPORTS PÉDAGOGIQUES DE L'ÉTUDE D'UN DIMERE ÉLECTRONIQUE A CARACTÈRE DISSIPATIF	49
4.1	Introduction	49
4.2	Apports sur le rôle de l'enseignant et des enseignements	50
4.2.1	Facteurs influençant les acquis des élèves.	50
4.2.2	La qualité de l'enseignement est essentielle pour améliorer les acquis des élèves.	50
4.3	Apports sur l'attitude et l'apprentissage des apprenants.	52

4.4 Conclusion 52

CONCLUSION GÉNÉRALE 53

Bibliographies 54

Table des figures

1.1	Couplage par inductance mutuelle.	8
1.2	Schéma d'une résistance négative : une résistance positive consomme l'énergie électromagnétique(puisqu'il y a effet joule) alors que celle négative apporte l'énergie. C'est l'alimentation de l'AOP qui apporte cette énergie et c'est le phénomène de saturation en tension de sortie qui assure la non linéarité indispensable à la stabilisation de l'oscillateur.	9
1.3	Oscillation du mouvement : en (a),atténuation $\gamma > 0$ (dissipation positive $R > 0$); en (b),amplification $\gamma < 0$ (dissipation négative $R < 0$); en (c),oscillation constante $\gamma = 0, R = 0$	10
2.1	Système électronique à deux couplages	13
2.2	Circuit à couplage capacitif.	19
2.3	Capacité non linéaire : diodes, amplificateur opérationnel, résistor et capacité linéaire.	22
3.1	Comportement des gammas seuils (partie réelle et partie imaginaire) : (a) $\mu = 0.0$; (b) $\mu = 0.2$	27
3.2	Représentation en 3D des gammas seuils en fonction de $(\mu; \kappa) = (-2.0 : 0.005 : 2.0; -2.0 : 0.005 : 2.0)$	28
3.3	Fréquences du système : (a) $\mu = 0.0, \kappa = 0.7$; (b) $\mu = 0.0, \kappa = -0.7$	29
3.4	fréquences du système : (a) $\mu = 0.2, \kappa = 0.7$; (b) $\mu = 0.2, \kappa = -0.7$	29
3.5	Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.1$: en (a), 25%; en (b),75% avec fréquence de Rabi permettant de voir l'oscillation; en (c), 100%.	30

3.6	Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.2$: en (a), 25% ; en (b), 75% ; en (c), 100%.	31
3.7	Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.7$: en (a), 25% ; en (b), 75% ; en (c), 100%.	32
3.8	Scission d'énergie : (a) Fréquence non couplée $C_c = 0$ d'oscillateur, inductances égales et capacités respectives C_0 et $C_0 + \Delta C$; (b) anti-croisement de fréquence dû au couplage $\kappa = 0.3$	33
3.9	Fréquence des oscillateurs couplés avec présence des résistances, les inductances égales et les condensateurs sont respectivement C_0 et $C_0 + \Delta C$	34
3.10	Circuit RLC avec tension excitatrice en cosinus.	35
3.11	Caractérisation d'une résonance	35
3.12	Courbes de Fano $\kappa = 0.2$: en (a), $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = 0.03$; en (b), $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = 0.09$; en (c), pas de Fano pour $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = 0.3$	37
3.13	Pour $\kappa = 0.7$: (a) $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = 0.03$ (b) $\gamma_1 = 0.025$; $\gamma_2 = 0.09$	38
3.14	Pour $\kappa = 0.2$: (a) $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.025$ (b) $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.1$	39
3.15	Courbes de Fano $\kappa = 0.2$: en (a), $\gamma_1 = -0.025$, $\gamma_2 = -0.03$; en (b), $\gamma_1 = -0.025$, $\gamma_2 = -0.09$; en (c), pas de Fano pour $\gamma_1 = -0.025$, $\gamma_2 = -0.3$	40
3.16	Courbes de Fano $\kappa = 0.2$: en (a), $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = -0.03$; en (b), $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = -0.09$; en (c), pas de Fano pour $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = -0.3$	41
3.17	Courbes de Fano : en (a), $\kappa = 0.2$, $\gamma_1 = -0.025$, $\gamma_2 = 0.025$; en (b), $\kappa = 0.2$, $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = -0.025$; en (c), $\kappa = 0.7$, $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = -0.025$	42
3.18	Courbes de Fano : en (a), $\kappa = 0.1$, $\mu = 0.2$, $\gamma = 0.025$; en (b), $\kappa = 0.2$, $\mu = 0.2$, $\gamma = 0.025$; en (c), $\kappa = 0.7$, $\mu = 0.2$, $\gamma = 0.025$	43
3.19	Évolution des charges $q1 \rightarrow$ rouge et $q2 \rightarrow$ vert . $\kappa = 0.4$; $\eta = 0.001$; $\nu = 0.2$	44
3.20	Effet du couplage inductif μ sur la non linéarité : en (a), $\mu = 0.01$; en (b), $\mu = 10^{-5}$; en (c), $\mu = 0.2$	45
3.22	Cas linéaire : $\kappa = 0.1$ et $\mu = 0.2$	46
3.21	Effet du couplage capacitif κ sur la non linéarité : en (a), $\kappa = 0.2$; en (b), $\kappa = 0.9$; en (c), $\kappa = 1.0$	47

Dédicaces

– A mon feu père, Tekouo Bernard.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans la volonté et la grâce de Dieu tout puissant, source de toute chose que je remercie. Par ailleurs c'est le fruit d'un environnement de travail moral et intellectuel assez soutenu. Qu'il me soit permis d'exprimer ma sincère gratitude et ma profonde reconnaissance :

- Au **Docteur FOTSA NGAFFO FERNANDE**, directeur de ce mémoire, qui m'a proposé ce travail et a assuré son suivi jusqu'à ce jour malgré ses multiples charges. Madame, recevez ici l'expression de ma profonde gratitude.
- Aux honorables **membres du jury**, pour leur disponibilité et leur expertise qu'ils ont bien voulu mettre à contribution pour ce travail.
- au Professeur **KENFACK JIOTSA AURELIEN**, pour ses encouragements et sa disponibilité.
- Au **Professeur OWONO OWONO Luc Calvin**, Chef du Département de Physique pour les enseignements soutenus.
- A tous les Enseignants des Départements de Physique, de Chimie et des Sciences de l'Education de l'Ecole Normale Supérieure pour les enseignements qu'ils ont dispensés durant ma formation.
- A tous les aînés du groupe en particulier M.Fenzi Emmanuel, Simo Ibrahim, Tagouegni Senghor, Njike Njike Idriss et Tabeu Stephane pour l'accueil chaleureux et le soutien qu'ils ont eu à mon égard.
- A tous mes camarades de promotion, pour la solidarité et l'esprit de groupe .
- A ma maman Tchuenmogne Emilienne, pour ses encouragements et motivations.
- A tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire, qu'ils sachent que je les porte à jamais dans mon coeur.

Glossaire

Résonance : C'est un phénomène qui se matérialise lorsque l'amplitude de l'oscillateur augmente, atteint une valeur significativement élevée pour une certaine valeur de la fréquence et diminue ensuite avec l'augmentation de la fréquence. Ce phénomène où apparaît une amplitude maximale s'appelle résonance.

Dimère : En électronique, représente un système constitué de deux oscillateurs couplés.

P.T.S. : En français Parité, Temps, Symétrie ; ce dit d'un système qui possède un élément qui lui fourni une amplification ou une dissipation.

Dissipation : Phénomène au cours duquel un système dynamique perd de l'énergie au cours du temps

Amplification : Phénomène où on observe une augmentation d'énergie au cours du temps.

Splitting : En français décroissement, désigne une séparation des fréquence d'un système en présence du couplage.

Non linéarité : Désigne une perturbation apportée à un système.

AOP : Amplificateur Opérationnel

Résumé

Le travail qui nous est proposé porte sur l'étude de deux oscillateurs dissipatifs couplés. Les équations de la dynamique modélisant un tel système autonome ont été établies et résolues à l'aide de la matrice de Jordan. Les conditions pour que les valeurs propres du système soient réelles ont été établies. L'analyse de ces valeurs propres indique l'existence d'une valeur critique en deçà de laquelle les valeurs propres réelles sont supérieures aux valeurs propres complexes. Nous avons ensuite étudié le spectre de bande, le splitting c'est à dire un phénomène d'attraction ou de répulsion des énergies dans un système. Les résultats démontrent que lorsque le système est découplé, les énergies s'attirent et se touchent. Dès qu'un couplage existe entre les deux oscillateurs, les énergies se repoussent lorsque les dissipations γ_1 et γ_2 sont positives et s'attirent lorsque $\gamma_1 > 0$ et $\gamma_2 < 0$. L'impact de ce comportement dans les phénomènes de Fano résonance a été étudié. En particulier lorsque γ_1 et $\gamma_2 > 0$, γ_1 et $\gamma_2 < 0$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, $\gamma_1 = -\gamma_2$. En fin nous avons analysé l'impact de la non linéarité capacitive dans la dynamique du système.

Mots clés : résonance, dimère, splitting, non linéarité, PTS, dissipation, atténuation, fano résonance.

Abstract

The work proposed to us concerns the study of coupled dissipative oscillators. We have established the equations of dynamics modeling such an autonomous system. We have studied the conditions for the eigenvalues of the system to be real. The analysis of these eigenvalues indicates the existence of a critical value below which the real eigenvalues are greater than the complex eigenvalues. We then studied the band spectrum, the splitting, that is to say a phenomenon of attraction or repulsion of energies in a system. The result show that when the system is decoupled, the energies attract and touch each other. As soon as a coupling exists between the two oscillators, the energies repel each other when the dissipations γ_1 and γ_2 are positive and attractive when $\gamma_1 > 0$ and $\gamma_2 < 0$. We have studied the impact of this behavior in fano resonance phenomena particularly when γ_1 et $\gamma_2 > 0$, γ_1 et $\gamma_2 < 0$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$, $\gamma_1 = -\gamma_2$. In the end we studied the impact of capacitive nonlinearity in the dynamics of the system.

Keywords : dimer, Resonance, splitting, nonlinear, dissipation, attenuation, PTS .

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au regard du nombre important de domaines d'applications des oscillateurs, l'industrie et la recherche ont développé la conception et la mise en pratique des oscillateurs. Ainsi, les laboratoires ont mis en place des circuits électroniques constitués de plaques à essai, des résistors, des condensateurs, des bobines... pour la réalisation des oscillateurs. Sans que nous ne nous en rendions compte, les oscillateurs électriques sont omniprésents dans notre vie quotidienne. Le fonctionnement de pratiquement tous les "appareils électroniques" est à la base de telles oscillations : montres, téléphones portables, ordinateurs, chaînes audio et vidéo, appareils photos et caméras vidéo numériques... La compréhension de la naissance d'oscillations électriques est très simple si on aura compris au préalable la charge et la décharge d'un condensateur ainsi que le comportement de la bobine parcourue par un courant variable. Dans un circuit RLC série, l'énergie électrique ne se conserve pas au cours du temps ; elle se dissipe par effet Joule dans la résistance. De la même façon, l'énergie mécanique d'un oscillateur élastique amorti n'est pas conservée ; elle est dissipée par exemple par frottement de type fluide visqueux. Des oscillations électriques ou mécaniques s'amortissent de ce fait. C'est à dire que si l'on veut entretenir les oscillations, il faut un apport constant d'énergie pour compenser les pertes. Traditionnellement, un oscillateur amorti sera soumis à une force extérieure oscillante avec une fréquence ω . Lorsque $\omega \rightarrow \omega_0$ (fréquence propre du système), le système va de nouveau osciller avec une amplitude constante. On parle alors des oscillations forcées. Dans notre travail, nous restaurons les oscillations du système à travers un autre mécanisme. On couple deux oscillateurs et on démontre que lorsque les dissipations sont égales de signe contraire, il existe

une condition pour que les fréquences du système soient réelles. C'est à dire le système va osciller avec des oscillations régulières et constantes dans le temps. En électronique, l'utilisation d'un circuit à amplificateur opérationnel permet de simuler un dipôle à résistance négative obéissant à la loi d'Ohm : $U = -R_N I$.

La présence des pics pointus dans le spectre d'absorption d'un gaz noble , observée par Beutler en 1935 a attiré l'attention d'Ugo Fano. En 1961, Ugo Fano découvre un nouveau type de résonance en étudiant le phénomène d'auto ionisation des atomes d'hélium "les résonances de Fano" [1] . La caractéristique des résonances de type Fano est d'avoir un profil asymétrique ; passage brusque d'un minimum de transition vers un maximum de transition. L'effet Fano ne se limite pas à des systèmes quantiques, mais est un phénomène d'interférence d'onde très général qui a également été rencontré dans le spectre de transmission et de réflexion. Plus récemment, les résonances de Fano ont été identifiées dans les cristaux photoniques [2], des nanoparticules plasmoniques [3, 4], et des méta-matériaux électromagnétiques [5] . Vu l'intérêt porté par cette fano résonance, il est curieux de constater que très peu d'études ont été faites dans les systèmes électriques. Dans le cadre de notre étude, nous allons soumettre notre système à une force extérieure et étudier cette fano résonance dans le cas des dissipations positives, négatives , égales et opposées. C'est à dire γ_1 et $\gamma_2 > 0$, γ_1 et $\gamma_2 < 0$. $\gamma_1 = \gamma_2, \gamma_1 = -\gamma_2$. Il a été notamment démontré que ces résonances Fano permettent d'obtenir un confinement de la lumière efficace [12]. Ces résonances Fano, généralement fines, peuvent être mises à profit pour des applications de piégeage optique, senseurs biologiques, communications et bien d'autre.

La dissymétrie des pics de résonance provient du couplage entre un état discret et un continuum. Ce type de résonance peut être observer dans de nombreux domaines de la physique [6, 9, 13]. En d'autres termes pas de couplage, pas de fano résonance.

Notre travail porte sur l'étude du comportement des fréquences (car c'est au regard de celles-ci qu'on étudiera la stabilité du système), des courbes d'amplitudes et de l'évolution des charges. Il nous incombe donc la tâche à travers cette

étude d'explorer la dynamique des dimères PTS à base d'oscillateurs électroniques dissipatifs. Pour le faire, nous présentons au chapitre 1 une revue approfondie et une étude des généralités sur les systèmes PTS. Dans le chapitre 2, nous ressortons la modélisation de notre système, méthodes utilisées pour appréhender la dynamique de notre dimère électronique. Au chapitre 3, nous présentons les résultats, les interprétations et discussions y relatives. En fin, nous donnons des implications pédagogiques de cette étude à l'égard de nos apprenants.

REVUE DE LA LITTÉRATURE ET GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES OSCILLANTS

1.1 Introduction

Généralement, aussi bien en optique qu'en mécanique, les systèmes PTS se construisent en couplant deux guides d'ondes dont l'un appelé "gain" est le siège d'une amplification et l'autre appelé "loss" est siège d'une atténuation. Dans ce chapitre nous présenterons les systèmes PT-Symmetry et les systèmes électroniques, ensuite la notion de couplage d'un système électronique.

1.2 Système PT-Symmetry

Les travaux réalisés par BENDER (C.M. Bender 1998, S. Boettcher 1998 D.C. Brody 2002)ont permis l'extension des lois et postulats de la mécanique quantique aux Hamiltoniens pseudo hermitiens (Sergey V. Suchov, Boris A. Molamed). Il démontre que ces Hamiltoniens peuvent présenter un spectre réel, lorsqu'ils sont Parity and Time Symmetry (PTS). *Un système est dit PTS lorsqu'il reste invariant après les actions successives des opérateurs Parity (P) et Time (T) qui agissent de façon suivante :*

Pour l'opérateur Parité, nous avons

$$\begin{cases} \hat{p} \longrightarrow -\hat{p} \\ \hat{x} \longrightarrow -\hat{x} \end{cases} \quad (1.1)$$

Tandis que pour celle de l'opérateur temps nous avons :

$$\begin{cases} \hat{p} \longrightarrow -\hat{p} \\ \hat{x} \longrightarrow \hat{x} \\ \hat{i} \longrightarrow -\hat{i} \end{cases} \quad (1.2)$$

Où \hat{p} est l'opérateur quantité de mouvement et \hat{x} est l'opérateur de position relatif à la mécanique quantique. Soit le Hamiltonien ci-dessous défini par :

$$H = \frac{p^2}{2} + v(x) \quad (1.3)$$

Définissons respectivement les actions de \hat{P} et de \hat{T} sur ce Hamiltonien :

$$\hat{P}H = \hat{P} \left(\frac{p^2}{2} + v(x) \right) = \frac{(-p)^2}{2} + v(-x) = \frac{p^2}{2} + v(-x) \quad (1.4)$$

A présent appliquons au résultat ci-dessous l'opérateur \hat{T} , il vient de ce fait que :

$$\hat{T}\hat{P}H = \hat{T} \left(\frac{p^2}{2} + v(x) \right) = \frac{(-p)^2}{2} + v * (-x) = \frac{p^2}{2} + v * (-x) \quad (1.5)$$

Les deux équations ci-dessous montrent que pour qu'il y ait invariance après les actions successives des opérateurs Parité et Temps sur le Hamiltonien, il faudrait que ce Hamiltonien vérifie la relation de commutation ci-contre :

$$[\hat{T}\hat{P} - 1]H = 0 \quad (1.6)$$

La relation ci-dessous impose de ce fait un potentiel complexe dont la partie imaginaire régit l'amplification et la partie réelle l'atténuation.

$$v(x) = v_r(x) + v_i(x) \quad (1.7)$$

Cette observation mathématique a ainsi entraîné de profondes conséquences en physique. A partir de ce moment d'autres chercheurs se sont penchés sur ce sujet à l'instar de Christodoulides et al[2], parlant du fait qu'un indice de réfraction complexe de la forme :

$$n(x) = n_r(x) + n_i(x) \quad (1.8)$$

présenté par certains matériaux, joue le rôle de potentiel optique ; ces chercheurs ont montré en 2010 qu'un système PTS en optique est obtenu en couplant

linéairement deux guides d'onde donc l'un est appelé « **gain** » est le siège d'une amplification et l'autre est appelé « **loss** » est le siège d'une atténuation. Après avoir appelé « **dimer** » les deux guides d'ondes couples avec gain et loss, le professeur KIVSHAR [14] étudie le comportement d'une onde dans une chaîne de guides d'ondes conservatrice couplée ayant en son sein une discontinuité de type « **dimer** ». Ce potentiel satisfait la condition suivante :

$$\begin{cases} n_r(x) = n_r(-x) \\ n_i(x) = -n_i(-x) \end{cases} \quad (1.9)$$

C'est la partie imaginaire de l'indice de réfraction qui correspond au coefficient de gain (dissipation positive du système permettant d'observer une amplification)/perte (diminution d'énergie) avec le temps d'un guide d'ondes. Le signe de cette partie imaginaire là permet donc de dire si le guide est amplificateur ou atténuateur. Un système PTS de type dimère s'obtient en couplant deux guides d'ondes dont les coefficients de gain/perte sont égaux opposés. Ceci étant fait dans le cadre optique, nous allons modéliser un tel système en électronique.

1.3 Généralité sur les systèmes oscillatoires

1.3.1 Définitions

L'utilisation du mot système en technique électronique a pour fonction de favoriser la mise en place de dialogue à propos des problèmes ou de recherche en compréhension des circuits ou d'apprentissages électroniques. L'adjectif « **électronique** » est généralement utilisé pour désigner ce qui se rapporte aux électrons. Ainsi, le courant électrique dans un conducteur métallique résulte d'un mouvement d'ensemble "d'électrons de conduction". Nous présentons donc **un système oscillant** ou **oscillateur** comme un système pouvant évoluer alternativement autour d'une position d'équilibre de manière périodique. Et un **système élec-**

tronique comme un système opérant sur des faibles courants. Par la suite, nous présentons notre système électronique.

1.3.2 Présentation du dimère électronique

Nous présentons un *dimère électronique* comme un ensemble de deux cellules ou mailles, rapprochées par un condensateur, une bobine, une résistance ou tout autre composant électronique. Ainsi en ce qui nous concerne notre dimère électronique, il est constitué de deux mailles disposant chacune une résistance et un condensateur. Ces deux cellules sont reliées par un condensateur et une inductance. Raison pour laquelle nous parlons de couplage.

1.3.3 Couplage d'un système électronique

La nature est faite des phénomènes complexes qui à priori paraissent simples. Une approche raisonnable d'étude de ces problèmes est de les regarder comme étant des associations des dispositifs élémentaires. En physique, cette assertion se traduit par la notion de couplage. On dit ainsi qu'il y a couplage entre deux éléments d'un système, lorsque ceux-ci exercent l'un sur l'autre une certaine action. En électronique et en télécommunication, le couplage désigne le transfert, désiré ou non, de l'énergie d'un milieu (fil métallique ou fibre optique , par exemple)vers un autre milieu. De plus, le *couplage* est également *le transfert de l'énergie électrique d'un segment du circuit vers un autre*. Par exemple, de l'énergie est transférée à partir d'une source d'alimentation vers une autre charge électrique au moyen d'un couplage conducteur, qui peut être une résistance ou un fil conducteur. Un potentiel de courant alternatif peut être transféré d'un segment

du circuit vers un autre ayant un potentiel continu par l'utilisation d'un condensateur. L'énergie électrique qui peut être transférée d'un segment du circuit vers un autre segment ayant une impédance différente par l'utilisation d'un transformateur. Ceci est connu comme l'adaptation d'impédance. Il existe par conséquent plusieurs type de couplage à l'instar du couplage capacitif (lorsque les mailles sont reliées par un condensateur de capacité "C") et celui par inductance mutuelle (lorsque les mailles sont reliées par deux bobines d'inductance "L" et à leur tour rapprochées par un coefficient mutuel que nous appelons "M").

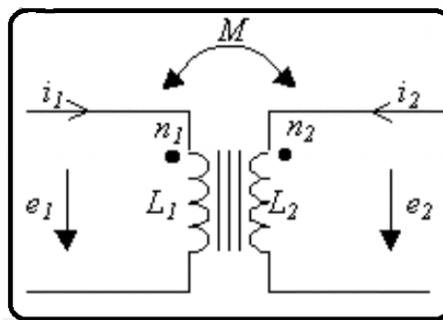


FIGURE 1.1 – Couplage par inductance mutuelle.

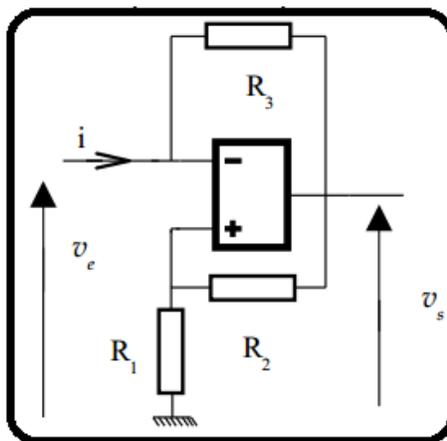


FIGURE 1.2 – Schéma d’une résistance négative : une résistance positive consomme l’énergie électromagnétique (puisque’il y a effet joule) alors que celle négative apporte l’énergie. C’est l’alimentation de l’AOP qui apporte cette énergie et c’est le phénomène de saturation en tension de sortie qui assure la non linéarité indispensable à la stabilisation de l’oscillateur.

Les phénomènes physiques dépendant du temps sont généralement décrits au départ par des équations différentielles. Considérons l’équation régie par un oscillateur RLC en série :

$$\ddot{q} + 2\gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (1.10)$$

$$\ddot{q} - 2\gamma\dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (1.11)$$

Où $\gamma = \frac{R}{2L}$ et $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$. A l’équation 1.10, $\gamma > 0$ et on a une courbe d’atténuation. Pour l’équation 1.11 $\gamma < 0$, on a une courbe d’amplification. Si $\gamma = 0$, on a l’équation $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$; ce qui correspond aux oscillations libres sans amortissement.

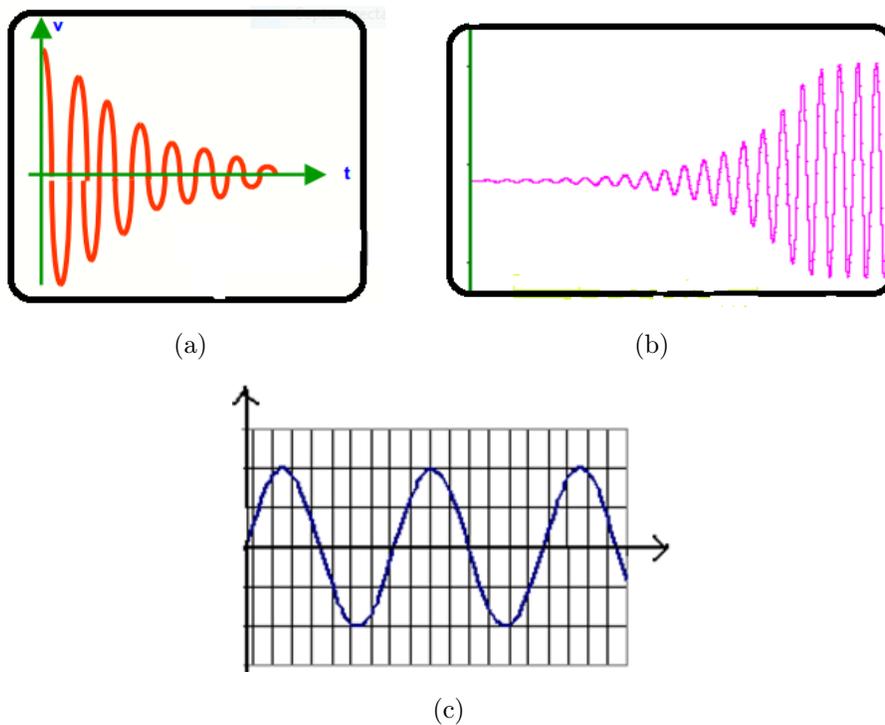


FIGURE 1.3 – Oscillation du mouvement : en (a), atténuation $\gamma > 0$ (dissipation positive $R > 0$); en (b), amplification $\gamma < 0$ (dissipation négative $R < 0$); en (c), oscillation constante $\gamma = 0$, $R = 0$.

1.3.4 Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les systèmes oscillants. Et nous pouvons dire que les éléments du couplage auront un rôle prépondérant sur l'ensemble du système. Ils sont souvent utilisés pour obtenir des spécifications propres à l'ensemble du circuit. L'objet du chapitre suivant porte sur la modélisation du système électronique utilisé et la présentation des méthodes utilisées.

MODÈLES ET MÉTHODES.

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les ressources ainsi que les méthodes utilisées pour solutionner le problème posé. Pour y parvenir, nous présenterons d'abord une modélisation de notre système, les équations y relatives, ensuite le spectre de bande, le splitting, la Fano résonance, la dynamique non linéaire et enfin une conclusion.

2.2 Modélisation du système électronique à deux couplages : capacitif et inductance mutuelle

Nous commençons à priori par rappeler quelques lois du célèbre physicien allemand Gustav Kirchhoff de 1845 :

- **loi des noeuds** : la somme des intensités des courants qui entrent par un noeud est égale à la somme des intensités des courants qui sortent du même noeud ;
- **loi des mailles** : dans une maille quelconque d'un réseau, dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires et à condition que les variations de flux magnétique à travers la maille soient négligeables, la somme algébrique

des différences de potentiel le long de la maille est constamment nulle.

Ainsi le système qui nous est proposé est le suivant :

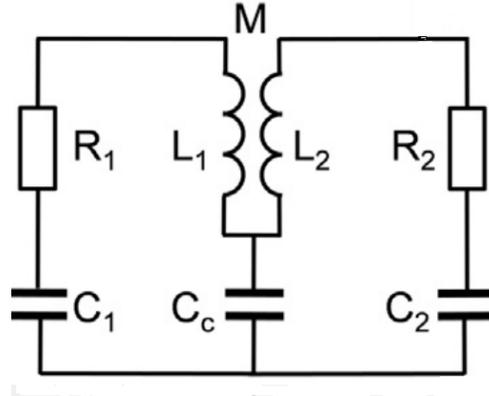


FIGURE 2.1 – Système électronique à deux couplages

De plus, notre système est doté d'une résistance R_2 négative. Cette résistance négative a le même principe de fonctionnement d'une résistance normale. La seule différence est qu'elle donnera, à son utilisation, des résultats négatives.

2.2.1 Équation régissant l'évolution des charges dans les deux cellules.

En considérant la figure 2.1, nous appliquons la loi des mailles dans les deux cellules et nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + 2\gamma_1 \dot{q}_1 + \mu_1 \ddot{q}_2 + \omega_{01}^2 q_1 + \kappa_1 q_2 = 0 \\ \ddot{q}_2 + 2\gamma_2 \dot{q}_2 + \mu_2 \ddot{q}_1 + \omega_{02}^2 q_2 + \kappa_2 q_1 = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

$$\gamma_1 = \frac{R_1}{2L_1}; \mu_1 = \frac{M}{L_1}; \omega_{01}^2 = \frac{1}{L_1} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_c} \right); \kappa_1 = \frac{1}{L_1 C_c} \quad (2.2)$$

$$\gamma_2 = \frac{R_2}{2L_2}; \mu_2 = \frac{M}{L_2}; \omega_{02}^2 = \frac{1}{L_2} \left(\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_c} \right); \kappa_2 = \frac{1}{L_2 C_c} \quad (2.3)$$

Ici, nous appelons $\mu =$ couplage par inductance mutuelle (le coefficient $M = K_1 L_1 L_2$), $\kappa =$ couplage capacitif, $C_c = C_3$

2.2.2 Méthode de résolution

Pour résoudre le système d'équation 2.1 , nous posons $q_1 = a_1 \exp(i\omega t)$ et $q_2 = a_2 \exp(i\omega t)$.

En dérivant ces deux expressions et en remplaçant dans le système d'équation 2.1, on obtient l'équation caractéristique suivante (tout en considérant le discriminant nul car le couple $(a_1, a_2) \neq (0,0)$) :

$$(1 - \mu_1 \mu_2) \omega^4 + i(2\gamma_1 + 2\gamma_2) \omega^3 + (-\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2 + 4\gamma_2 \gamma_1 + \mu_1 \kappa_2 + \mu_2 \kappa_1) \omega^2 + i(-2\gamma_2 \omega_{01}^2 + 2\gamma_1 \omega_{02}^2) \omega + \omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - \kappa_1 \kappa_2 = 0 \quad (2.4)$$

Nous pouvons considérer comme nuls les coefficients en ω^3 et en ω ; ce qui nous permet d'admettre que :

$$\begin{cases} \gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma \\ \omega_{01}^2 = \omega_{02}^2 = \omega_0^2 \\ \kappa_1 = \kappa_2 = \kappa \\ \mu_1 = \mu_2 = \mu \end{cases} \quad (2.5)$$

Ce qui nous donne l'équation caractéristique nouvelle :

$$(1 - \mu^2) \omega^4 + 2(-\omega_0^2 + 2\gamma^2 + \mu\kappa) \omega^2 + \omega_0^4 - \kappa^4 = 0 \quad (2.6)$$

Nous obtenons le nouveau système suivant :

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + 2\gamma \dot{q}_1 + \mu \ddot{q}_2 + \omega_0^2 q_1 + \kappa q_2 = 0 \\ \ddot{q}_2 - 2\gamma \dot{q}_2 + \mu \ddot{q}_1 + \omega_0^2 q_2 + \kappa q_1 = 0 \end{cases} \quad (2.7)$$

Pour résoudre ce système, nous allons effectuer le changement de variable en posant : $\dot{q}_1 = p_1$; $\ddot{q}_1 = \dot{p}_1$; $\dot{q}_2 = p_2$; $\ddot{q}_2 = \dot{p}_2$. Nous allons à présent ressortir la matrice de Jordan au moyen de la résolution.

2.2.3 Matrice de Jordan et adimensionnement des valeurs propres et gammas seuils

La méthode de résolution sus évoquée à section précédente nous permet d'avoir l'équation du premier ordre suivant :

$$\dot{Q} + DQ = 0 \quad (2.8)$$

Avec Q représentant toujours la charge et D la matrice de JORDAN. Elle se compose ainsi qu'il suit :

$$\begin{pmatrix} 0 & a & 0 & 0 \\ b & c & d & e \\ 0 & 0 & 0 & f \\ g & h & i & j \end{pmatrix}$$

Où

$$a = 1, b = \frac{\mu\kappa - \omega_0^2}{1 - \mu^2}, c = -\frac{2\gamma}{1 - \mu^2}, d = \frac{\mu\omega_0^2 - \kappa}{1 - \mu^2}, e = -\frac{2\mu\gamma}{1 - \mu^2} \quad (2.9)$$

$$f = 1, g = \frac{\mu\omega_0^2 - \kappa}{1 - \mu^2}, h = \frac{2\mu\gamma}{1 - \mu^2}, i = \frac{\mu\kappa - \omega_0^2}{1 - \mu^2}, j = \frac{2\gamma}{1 - \mu^2} \quad (2.10)$$

Le calcul du discriminant de l'équation 2.6 nous donne :

$$\Delta = (4\gamma^2 - 2\omega_0^2 + 2\mu\kappa)^2 - 4(1 - \mu^2)(\omega_0^4 - \kappa^2) \quad (2.11)$$

Ainsi nous avons les valeurs propres relatives à l'équation 2.6 :

$$\begin{cases} \omega_{1,2}^2 = \frac{1}{1-\mu^2} \left[(\omega_0^2 - 2\gamma^2 - \mu\kappa) \pm \sqrt{(\omega_0^2 - 2\gamma^2 - \mu\kappa)^2 - (1 - \mu^2)(\omega_0^4 - \kappa^2)} \right] \\ \omega_3 = -\omega_1; \omega_4 = -\omega_2 \end{cases} \quad (2.12)$$

L'**adimensionnement** est la suppression partielle ou totale des unités d'une équation par une substitution appropriée de variables, dans le but de simplifier la représentation paramétrique de problèmes physiques.

En résolvant le discriminant $\Delta = 0$, nous obtenons quatre expressions de gammas seuils adimensionnés et nous en considérons les deux positives :

$$\begin{cases} \tilde{\gamma}_{s1}^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \tilde{\kappa}\mu - \sqrt{(1 - \mu^2)(1 - \tilde{\kappa}^2)} \right) \\ \tilde{\gamma}_{s2}^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \tilde{\kappa}\mu + \sqrt{(1 - \mu^2)(1 - \tilde{\kappa}^2)} \right) \end{cases} \quad (2.13)$$

Avec $\tilde{\gamma} = \frac{\gamma}{\omega_0}$ et $\tilde{\kappa} = \frac{\kappa}{\omega_0^2}$. Cette équation 2.13 nous indique trois domaines : domaine 1, $\gamma < \gamma_{s1}$, ω est réelle ; domaine 2, $\gamma_{s1} < \gamma < \gamma_{s2}$, ω est complexe ; domaine 3, $\gamma > \gamma_{s2}$, ω est imaginaire pur.

2.3 Résolution analytique et numérique

La résolution numérique des équations différentielles est probablement le domaine de l'analyse numérique où les applications sont les plus nombreuses que ce soit en mécanique des fluides, en transfert de chaleur, en analyse de structure ou en électronique comme dans notre cas de situation. On aboutit souvent à la résolution de système d'équations différentielle (2.7). Nous présentons la méthode de Runge-Kutta d'ordre quatre (RK4) permettant de résoudre les problèmes avec conditions initiales. Tout en usant du développement en série d'ordre 4, nous considérons par exemple l'équation différentielle ordinaire du premier ordre suivant :

$$\frac{dy}{dt} = f(x, y) \quad (2.14)$$

le schéma itératif de RK4 est donné par l'équation (2.15)

$$y(x+h) = y(x) + \frac{1}{6} (L_1 + 2(L_2 + L_3) + L_4) \quad (2.15)$$

avec h le pas temporel et les coefficients de cette équation donné par (2.16)

$$\begin{aligned} L_1 &= hf(x, y(x)); \quad L_2 = hf\left(x + \frac{1}{2}h, y(x) + \frac{L_1}{2}\right) \\ L_3 &= hf\left(x + \frac{1}{2}h, y(x) + \frac{L_2}{2}\right); \quad L_4 = hf(x+h, y(x) + L_3) \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.3.1 Vecteurs propres généralisés et matrice aux valeurs propres de notre système électronique

Au moyen de la matrice de Jordan et aux valeurs propres (équation 2.12, nous obtenons la matrice des vecteurs propres généralisés (\vec{V}, ω_i)

$$\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\omega_i}{a} \\ \frac{f\omega_i(\omega_i-c)-abf}{a(df+e\omega_i)} \\ \frac{\omega_i((\omega_i-c)\omega_i-ab)}{a(df+e\omega_i)} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$a = 1, b = \frac{\mu\kappa - \omega_0^2}{1 - \mu^2}, c = -\frac{2\gamma}{1 - \mu^2}, d = \frac{\mu\omega_0^2 - \kappa}{1 - \mu^2}, e = -\frac{2\mu\gamma}{1 - \mu^2}, f = 1, \quad (2.17)$$

$$i = \frac{\mu\kappa - \omega_0^2}{1 - \mu^2}, \omega_i = \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 \quad (2.18)$$

Ainsi, les matrices aux valeurs propres D et aux vecteurs propres V sont donnés respectivement par :

$$\begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_4 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & v_{34} \\ v_{41} & v_{42} & v_{43} & v_{44} \end{pmatrix}$$

Nous posons : $\dot{\Phi} = (\dot{q}_1, \dot{p}_1, \dot{q}_2, \dot{p}_2)$ et $\Phi = (q_1, p_1, q_2, p_2)$. On a relativement à l'équation 2.8 la résolution indiquée suivante :

$$\Phi_k = \sum_{n=1}^N V_{kn} C_n \exp(w_k t)$$

Où C_n représente la matrice des constantes et nous pouvons enfin avoir la forme des solutions.

2.3.2 Forme des solutions du système.

Nous considérons comme conditions initiales $B = (q_0, p_0, q_0, p_0)$. Ce qui nous donne la matrice des constantes $C = V/B$. Nous avons donc les solutions sous la forme suivante :

$$\begin{cases} q_1 = v_{11} \exp(iw_1 t) + v_{12} \exp(iw_2 t) + v_{13} \exp(iw_3 t) + v_{14} \exp(iw_4 t) \\ p_1 = v_{21} \exp(iw_1 t) + v_{22} \exp(iw_2 t) + v_{23} \exp(iw_3 t) + v_{24} \exp(iw_4 t) \\ q_2 = v_{31} \exp(iw_1 t) + v_{32} \exp(iw_2 t) + v_{33} \exp(iw_3 t) + v_{34} \exp(iw_4 t) \\ p_2 = v_{41} \exp(iw_1 t) + v_{42} \exp(iw_2 t) + v_{43} \exp(iw_3 t) + v_{44} \exp(iw_4 t) \end{cases} \quad (2.20)$$

2.4 Étude du splitting

L'objectif ici est d'étudier la répulsion ou l'attraction d'énergie des deux mailles en l'absence ou présence des résistances et du couplage [15]. Nous considérons notre circuit RLC où la mutuelle inductance M est nulle.

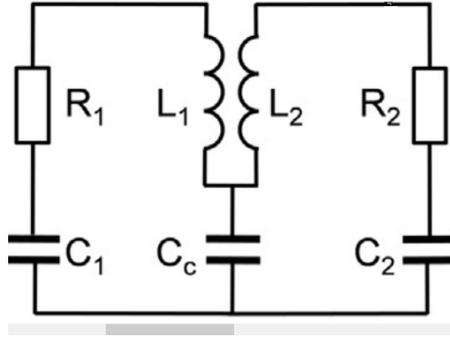


FIGURE 2.2 – Circuit à couplage capacitif.

Dans le premier cas : En absence du couplage et les résistances sont nulles.

$$\omega_{0i}^2 = \frac{1}{L_i C_i}; i = (1, 2) \quad (2.21)$$

Dans le second cas : En présence du couplage et les résistances sont nulles. On obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + (\omega_{01}^2 + \Omega_1^2)q_1 + \Omega_1^2 q_2 = 0 \\ \ddot{q}_2 + (\omega_{02}^2 + \Omega_2^2)q_2 + \Omega_2^2 q_1 = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

En considérant la méthode de résolution (2.2.2), on a l'équation :

$$\omega^4 + (\omega_2^2 - \omega_1^2)\omega^2 + \omega_2^2 \omega_1^2 - (\kappa_1 \kappa_2)^2 = 0 \quad (2.23)$$

On obtient les solutions sous la forme :

$$\omega_{\pm}^2 = \frac{1}{2}(\omega_2^2 + \omega_1^2 \pm) \sqrt{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4\Gamma^2 \omega_1 \omega_2} \quad (2.24)$$

$\Omega_i^2 = \frac{1}{L_i C_c}; \omega_i^2 = \omega_{0i}^2 + \Omega_i^2, \Gamma = \frac{\Omega_1 \Omega_2}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}}; i = (1, 2)$ Et nous posons : $C_1 = C_0 + \Delta C, C_2 = C_0, L_1 = L_2 = L, \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} = \omega_0, \omega_{01} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{\Delta C}{C_0}}, \Omega_i = \omega_0 \sqrt{\kappa}, \kappa = \frac{C_0}{C_c}$ Lorsque $\Delta C = 0$, l'équation (2.24) devient :

$$\omega_{\pm} = \omega_i \sqrt{1 \pm \frac{\Gamma}{\omega_i}} \simeq \omega_i \pm \frac{\Gamma}{2} \quad (2.25)$$

Ainsi, la fréquence du splitting s'écrit :

$$\Gamma = \omega_+ - \omega_- \quad (2.26)$$

L'étude suivante porte sur la Fano résonance.

2.4.1 Fano résonance.

L'objectif de cette partie est d'analyser le deuxième pic de résonance car c'est lui qui matérialise l'effet Fano [10]. Nous considérons à nouveau notre système (figure 2.1) où nous introduisons une tension excitatrice à la première maille de la forme $u(t) = E \cos(\omega t)$ et nous cherchons à étudier le comportement des amplitudes complexes. Dans le cas général, nous avons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + 2\gamma_1 \dot{q}_1 + \mu_1 \ddot{q}_2 + \omega_{01}^2 q_1 + \kappa_1 q_2 = E \exp(i\omega t) \\ \ddot{q}_2 + 2\gamma_2 \dot{q}_2 + \mu_2 \ddot{q}_1 + \omega_{02}^2 q_2 + \kappa_2 q_1 = 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Les coefficients étant les mêmes que précédemment (équation 2.2 et 2.3), lorsque nous résolvons en effectuant le changement $q_i = c_i \exp(i\omega t)$, $i = (1; 2)$, nous obtenons les amplitudes complexes suivants :

$$\begin{cases} c_1(\omega) = \frac{(\omega_2^2 - \omega^2 + i\gamma_2 \omega) E}{(\omega_2^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_2)((\omega_1^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_1) - (\kappa_2 - \mu_2 \omega^2)(\kappa_1 - \mu_1 \omega^2))} \\ c_2(\omega) = -\frac{(\kappa_2 - \mu_2 \omega^2) E}{(\omega_2^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_2)((\omega_1^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_1) - (\kappa_2 - \mu_2 \omega^2)(\kappa_1 - \mu_1 \omega^2))} \end{cases} \quad (2.28)$$

Sans perte de généralité, nous posons $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$. Ce qui fait que $\mu_1 = \mu_2$, $\kappa_1 = \kappa_2$, $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$. L'équation 2.28 peut se présenter sous deux façons :

$$c_1(\omega) = |c_1(\omega)| \exp(i\phi_1(\omega)) \quad (2.29)$$

Ou encore

$$c_1(\omega) = R_1(c_1(\omega)) + I_1(c_1(\omega)) \quad (2.30)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} D = (\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \omega^2\gamma_1\gamma_2 - (\kappa - \mu\omega^2)^2]^2 + [\gamma_1(\omega_0^2 - \omega^2) + \gamma_2(\omega_0^2 - \omega^2)^2\omega^2 \\ R_1(c_1(\omega)) = E(\omega_0^2 - \omega^2)(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \omega^2\gamma_1\gamma_2 - (\kappa - \mu\omega^2)^2] - \\ E\gamma_2\omega^2\gamma_1(\omega_0^2 - \omega^2) + \gamma_2(\omega_0^2 - \omega^2)] \\ I_1(c_1(\omega)) = E\gamma_2\omega(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \omega^2\gamma_1\gamma_2 - (\kappa - \mu\omega^2)^2 - E(\omega_0^2 - \omega^2)] - \\ (\omega_0^2 - \omega^2)\gamma_1 + \gamma_2](\omega_0^2 - \omega^2) \\ |c_1(\omega)| = \frac{1}{D}\sqrt{R_1^2 + I_1^2} \\ \phi_1(c_1(\omega)) = \tan^{-1}\left(\frac{I_1(c_1(\omega))}{R_1(c_1(\omega))}\right) \end{array} \right. \quad (2.31)$$

De la même manière on a :

$$c_2(\omega) = |c_2(\omega)| \exp(i\phi_2(\omega)) \quad (2.32)$$

$$c_2(\omega) = R_2(c_2(\omega)) + I_2(c_2(\omega)) \quad (2.33)$$

$$|c_2(\omega)| = \frac{1}{D}\sqrt{R_2^2 + I_2^2} \quad (2.34)$$

$$\phi_2(c_2(\omega)) = \tan^{-1}\left(\frac{I_2(c_2(\omega))}{R_2(c_2(\omega))}\right) \quad (2.35)$$

Dans le cas particulier PTS $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma$ et les autres coefficients égaux, nous avons le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{q}_1 + 2\gamma\dot{q}_1 + \mu\ddot{q}_2 + \omega_0^2q_1 + \kappa q_2 = E \exp(i\omega t) \\ \ddot{q}_2 - 2\gamma\dot{q}_2 + \mu\ddot{q}_1 + \omega_0^2q_2 + \kappa q_1 = 0 \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Ce qui nous donne comme amplitude complexe :

$$\left\{ \begin{array}{l} c_1(\omega) = \frac{(1-\omega^2-i\gamma\omega)E}{(1-\omega^2)^2+(\omega\gamma)^2-(\kappa-\mu\omega)^2} \\ c_2(\omega) = \frac{(\kappa-\mu\omega^2)E}{(1-\omega^2)^2+(\omega\gamma)^2-(\kappa-\mu\omega)^2} \end{array} \right. \quad (2.37)$$

De même, pour le système d'équation 2.37, nous aurons :

$$\begin{cases} |c_1(\omega)| = \frac{1}{D} \sqrt{R_1^2 + I_1^2} \\ \phi_1(c_1(\omega)) = \tan^{-1}\left(\frac{I_1(c_1(\omega))}{R_1(c_1(\omega))}\right) \end{cases} \quad (2.38)$$

$$\begin{cases} |c_2(\omega)| = \frac{1}{D} \sqrt{R_2^2 + I_2^2} \\ \phi_2(c_2(\omega)) = \tan^{-1}\left(\frac{I_2(c_2(\omega))}{R_2(c_2(\omega))}\right) \end{cases} \quad (2.39)$$

Pour ces différentes amplitudes, nous allons étudier l'effet Fano. Le point suivant concerne la non linéarité.

2.5 Étude de la dynamique non linéaire.

Cette étude nous permettra d'analyser le comportement de notre système dans le cas où il est perturbé. Nous allons considérer la forme de la tension non linéaire $V_C = \frac{q}{C_1} + \eta V_0 \sinh^{-1}\left(-\frac{q}{2R_{12}i_0 C_2}\right)$ [11] qui est un composant, que nous allons substituer simultanément à chaque condensateur C_1 et C_2 .

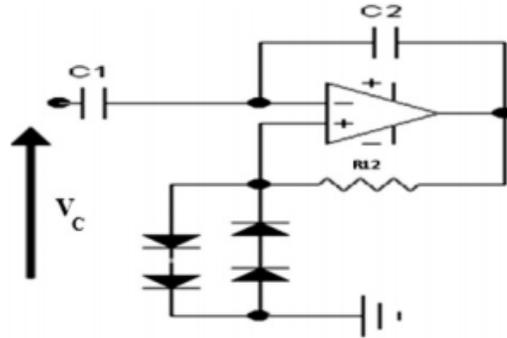


FIGURE 2.3 – Capacité non linéaire : diodes, amplificateur opérationnel, résistor et capacité linéaire.

En effectuant un développement limité à l'ordre 9, supposant que q est grand donc $\frac{1}{q} \rightarrow 0$, en ne retenant que les termes cubiques et quintiques, nous obtenons :

$$V_c \cong a_1 q + a_3 q^3 + a_5 q^5 \quad (2.40)$$

Avec :

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{C} + \frac{\eta V_0}{12R_{12}i_0 C_2} \\ a_3 = -\frac{7\eta V_0}{360(2R_{12}i_0 C_2)^3} \\ a_5 = -\frac{\eta V_0}{360(2R_{12}i_0 C_2)^5} \end{cases} \quad (2.41)$$

En considérant les différentes mailles du circuit (figure 2.1) et en restant toujours dans le cadre PTS, on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + 2\gamma\dot{q}_1 + \mu\ddot{q}_2 + \omega_0^2 q_1 + \kappa q_2 + \eta q_1^3 + \beta q_1^5 = 0 \\ \ddot{q}_2 - 2\gamma\dot{q}_2 + \mu\ddot{q}_1 + \omega_0^2 q_2 + \kappa q_1 + \eta q_2^3 + \beta q_2^5 = 0 \end{cases} \quad (2.42)$$

Où : $\gamma = \frac{R_1}{2L}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{L}(a_1 + \frac{1}{C_c})$, $\kappa = \frac{1}{LC_c}$, $\eta = \frac{a_3}{L}$, $\beta = \frac{a_5}{L}$, $\mu = \frac{M}{L}$.

Pour la résolution numérique, nous effectuons un changement de variable relatif au système 2.7 et nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = z_1 \\ \dot{z}_1 = -2\gamma - \omega_0^2 q_1 - \kappa q_2 - \eta q_1^3 - \beta q_1^5 - \frac{\mu}{1-\mu^2} (2\gamma z_2 - \omega_0^2 q_2 - \kappa q_1 - \eta q_2^3 - \beta q_2^5 + \\ 2\gamma\mu z_1 + \mu\kappa q_2 + \eta\mu q_1^3 + \mu\beta q_1^5) \\ \dot{q}_2 = z_2 \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{1-\mu^2} (2\gamma z_2 - \omega_0^2 q_2 - \kappa q_1 - \eta q_2^3 - \beta q_2^5 + 2\gamma\mu z_1 + \mu\kappa q_2 + \eta\mu q_1^3 + \mu\beta q_1^5) \end{cases} \quad (2.43)$$

2.5.1 Conclusion.

Parvenu au terme de ce chapitre dont l'objectif majeur était de présenter les équations régissant l'évolution des charges dans notre système et la forme des solutions des équations différentielles qui en résulte. Nous avons fait usage de plusieurs logiciels tels que Maple qui est un logiciel développé par l'université de

Waterloo au Canada. Il permet de manipuler les expressions mathématiques de façon symbolique ou numérique. A l'aide de ce logiciel, nous allons calculé les valeurs propres de la matrice de Jordan. De plus Matlab qui est une abréviation de Matrix Laboratory, écrit à l'origine par Clever Moler pour faciliter l'accès au logiciel matriciel. C'est un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données. Il nous permettra d'en faire bon usage. Par la suite, Latex qui est un langage informatique, permet de mettre en page les documents de manière la plus professionnelle qui soit. Tel est le cas de notre travail. De plus, nous avons présenté une modélisation de notre système électronique et les méthodes de simulation numérique permettant de résoudre les équations de ce système. Enfin, la matrice de Jordan, les valeurs propres et les gammas seuils nous permettrons de faire une excellente simulation. La non linéarité nous permet d'envisager d'autres comportements du système et de les analyser mais nous ne pouvons à priori prédire le comportement du système. Le chapitre suivant porte sur les résultats obtenus.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 Introduction

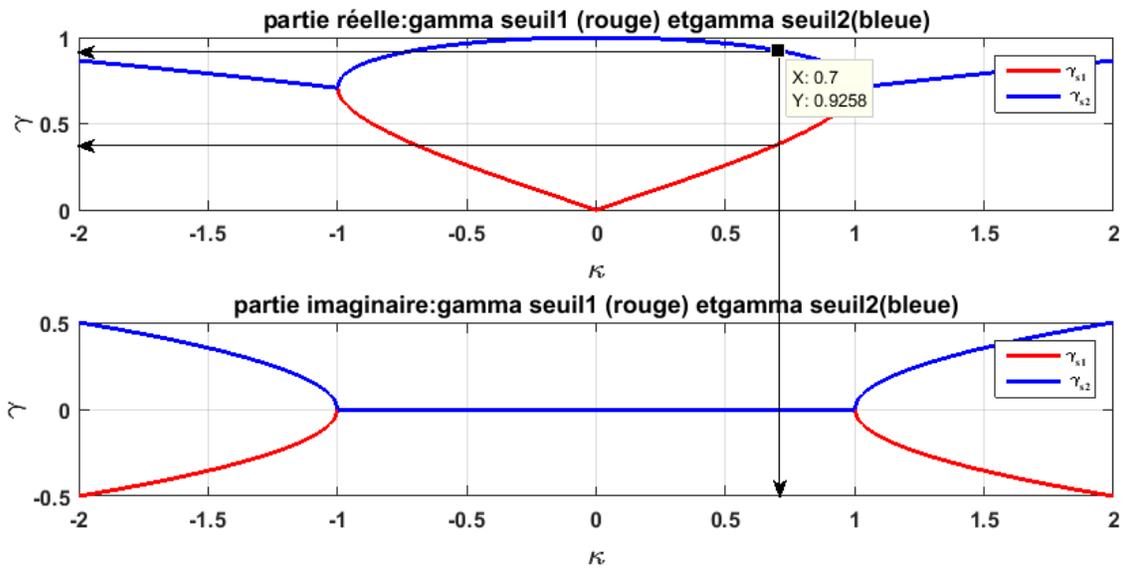
Dans ce chapitre, nous présenterons et analyserons les principaux résultats de notre travail dans l'optique de montrer que notre système, PTS d'oscillateurs électriques, doublement couplé peut se mouvoir par des oscillations périodiques et même harmoniques lorsque les conditions dites PTS relatives à ses paramètres sont réalisées. Pour le faire, nous étudierons d'abord les gammas seuils, valeurs propres et la dynamique du système, ensuite le splitting et la fano résonance et en fin la dynamique non linéaire de notre système.

3.2 Analyse des gammas seuils

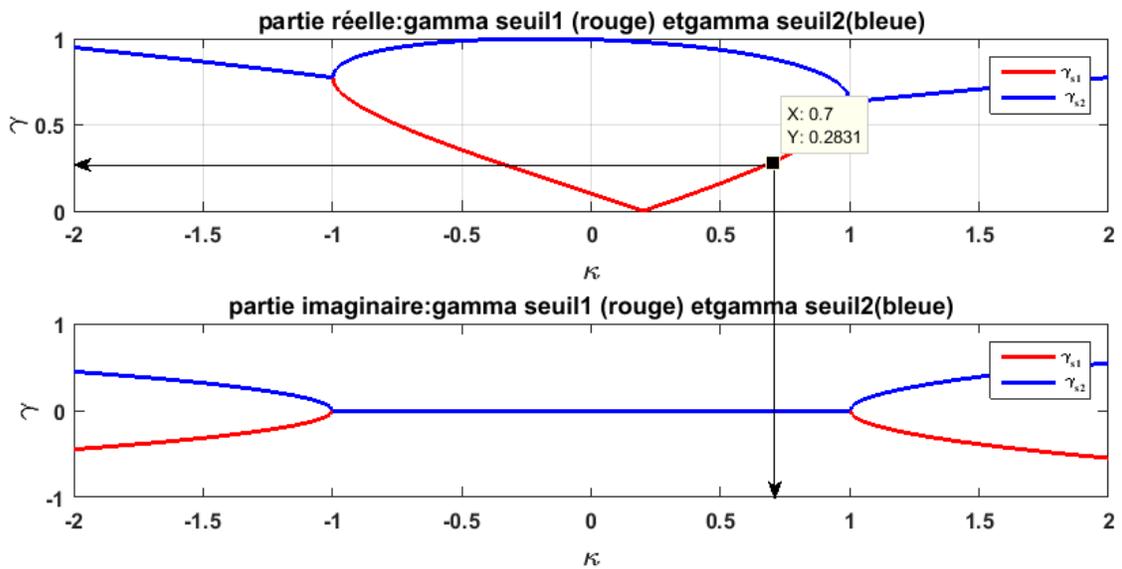
L'équation 2.13 nous permet d'obtenir les courbes de seuils. Ces courbes représentent le domaine de variation des couplages pour lequel un seuil réel existe. Sur la figure 3.1, le couplage capacitif κ est pris en compte. Cette équation 2.13 nous indique trois domaines : domaine 1, $\gamma < \gamma_{s1}$, ω est réelle ; domaine 2, $\gamma_{s1} < \gamma < \gamma_{s2}$, ω est complexe ; domaine 3, $\gamma > \gamma_{s2}$, ω est imaginaire pur. Nous prenons

$\kappa = 0.7$ et nous obtenons :

$$\begin{cases} \gamma_{s1}^2 = \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - 0.7^2}), \gamma_{s1} = \pm 0.378058 \\ \gamma_{s2}^2 = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 - 0.7^2}), \gamma_{s2} = \pm 0.92578 \end{cases} \quad (3.1)$$



(a)



(b)

FIGURE 3.1 – Comportement des gammas seuils (partie réelle et partie imaginaire) : (a) $\mu = 0.0$; (b) $\mu = 0.2$.

Ces courbes limitent les régions de stabilité et d’instabilité du système. Lorsque le couplage d’inductance mutuelle $\mu = 0$, le système est symétrique ; en dessous de la bande rouge on retrouve les oscillations de $[-1; 1]$, la partie imaginaire étant nulle. En dessous de cette bande rouge, le système devient complexe donc pas d’oscillations. De plus, lorsque μ augmente par exemple $\mu = 0.2$, on assiste à une antisymétrie du système.

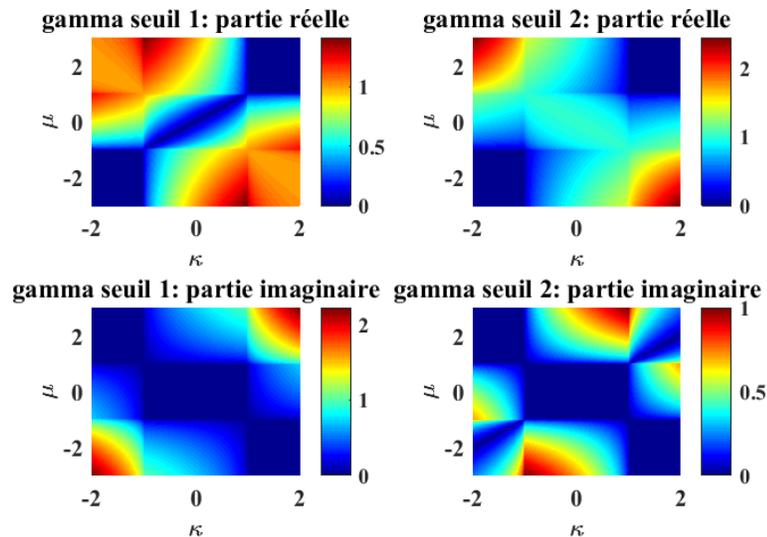


FIGURE 3.2 – Représentation en $3D$ des gammas seuils en fonction de $(\mu; \kappa) = (-2.0 : 0.005 : 2.0; -2.0 : 0.005 : 2.0)$

La représentation en $3D$ (figure 3.2) des gammas seuils nous montre bien le comportement inverse des parties réelles et des parties imaginaires. De plus, nous relevons bien un domaine de fonctionnement efficace du système et nous pouvons prédire expérimentalement $(\mu; \kappa) \in]-1; 1[$. Ce qui nous sera utile pour les études suivantes.

3.3 Spectre des valeurs propres

Le tracé de l'équation 2.12 nous donne les fréquences propres du système.

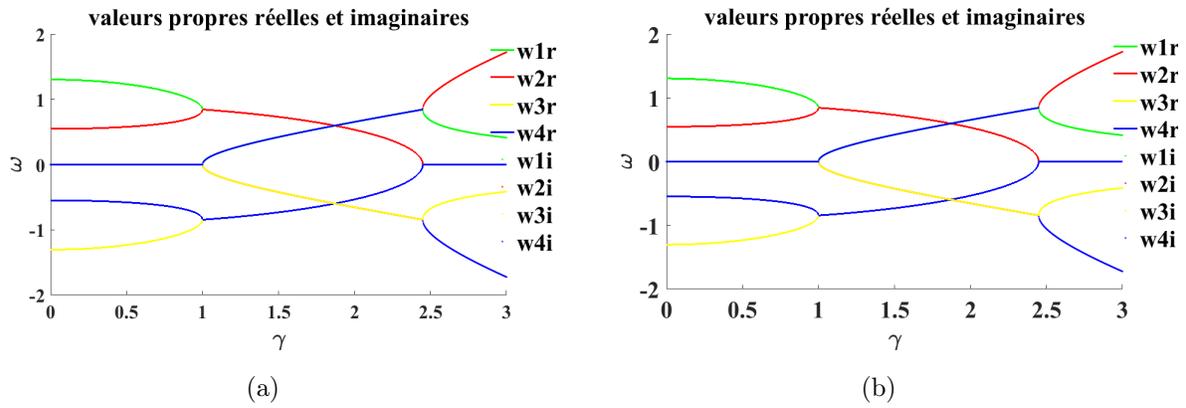


FIGURE 3.3 – Fréquences du système : (a) $\mu = 0.0, \kappa = 0.7$; (b) $\mu = 0.0, \kappa = -0.7$.

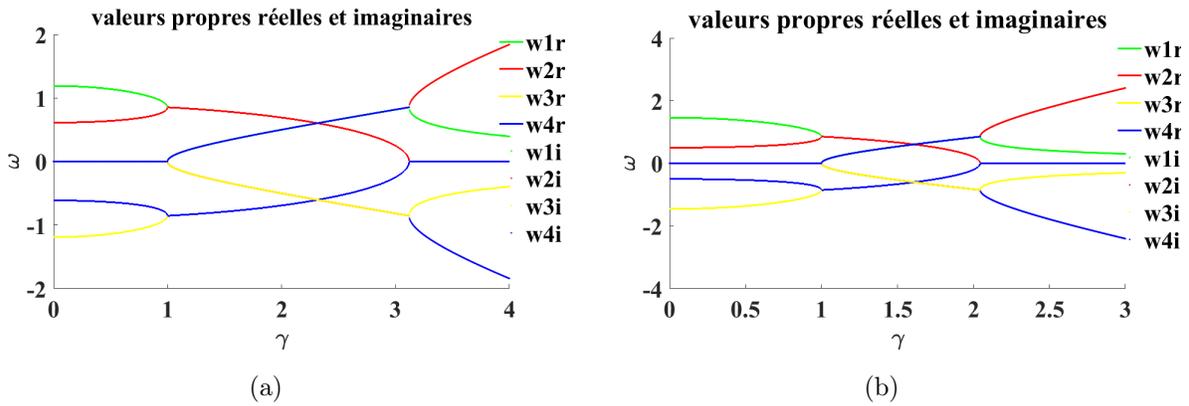
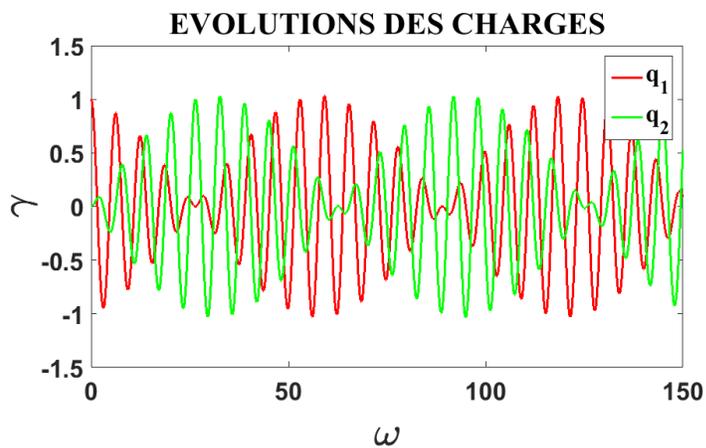
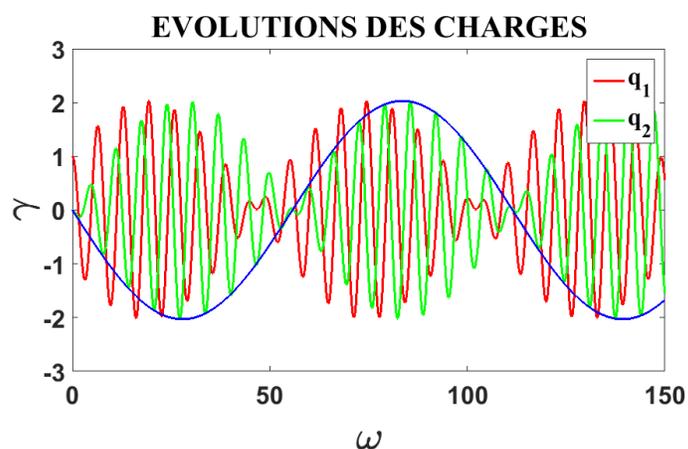


FIGURE 3.4 – fréquences du système : (a) $\mu = 0.2, \kappa = 0.7$; (b) $\mu = 0.2, \kappa = -0.7$.

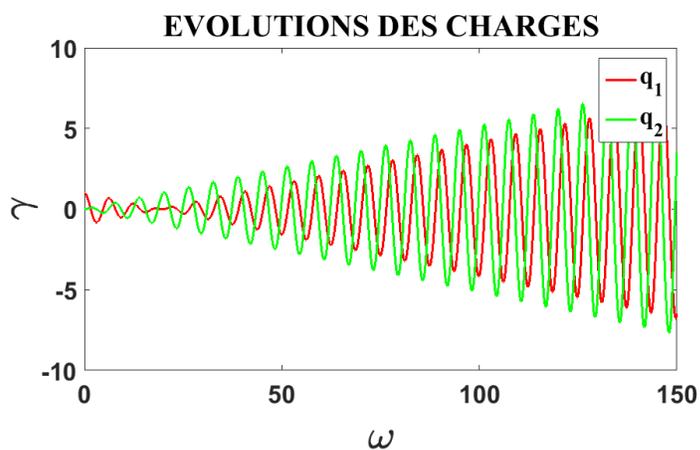
Nous avons ici l'ensemble des valeurs propres réelles et imaginaires. Nous pouvons constater que dans les intervalles $[0; 1]$ et $[3.2; 4]$, on a un domaine d'oscillations et dans l'intervalle $[1; 3.2]$ domaine complexe, le système ne sera pas stable. Le système d'équation 2.20 nous permet d'obtenir les courbes suivantes :



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.5 – Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.1$: en (a), 25% ; en (b), 75% avec fréquence de Rabi permettant de voir l'oscillation ; en (c), 100%.

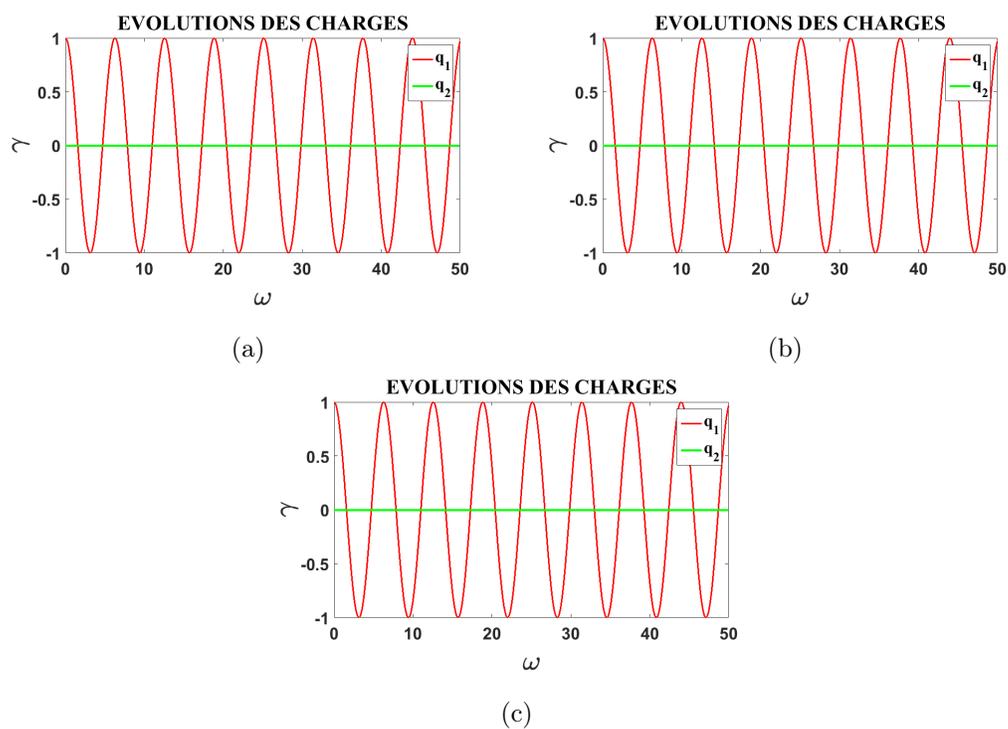


FIGURE 3.6 – Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.2$: en (a), 25% ; en (b), 75% ; en (c), 100%.

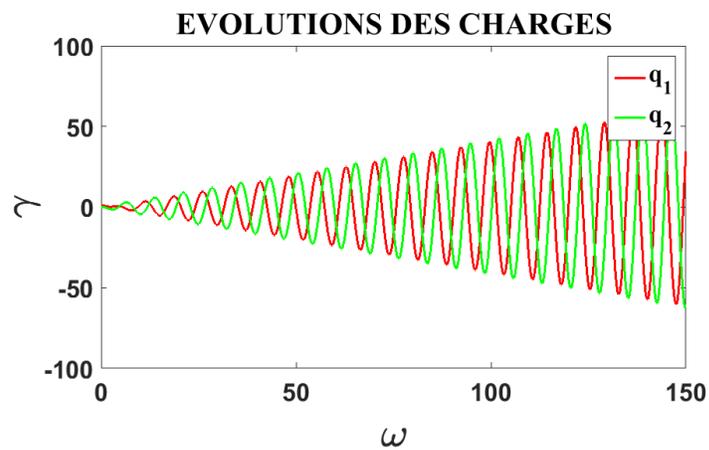
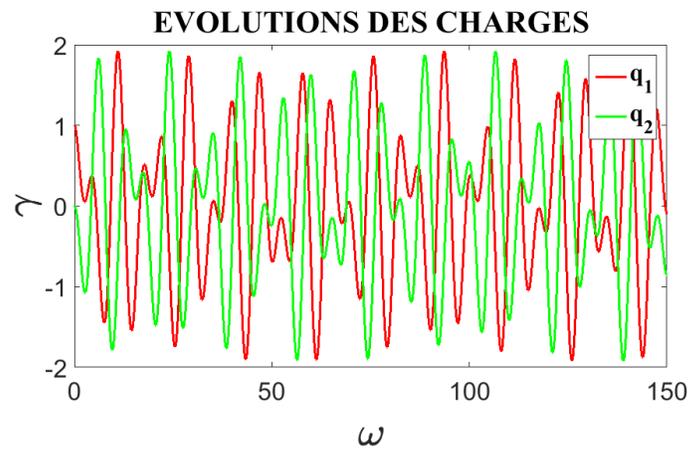
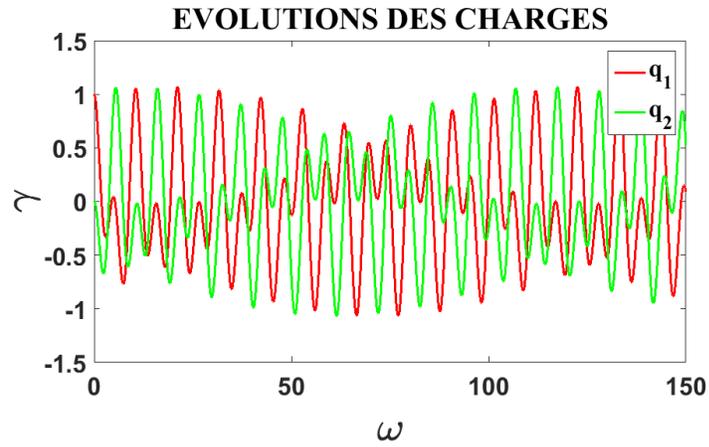


FIGURE 3.7 – Représentation numérique $\mu = 0.2$ et $\kappa = 0.7$: en (a), 25% ; en (b), 75% ; en (c), 100%.

Ces courbes nous présentent la dynamique de notre système (figure 3.5), l'évolution des charges. Le constat fait est que lorsque $\mu = \kappa$, on a pas une synchronisation d'oscillation dans les deux mailles (figure 3.6). Et nous pouvons dire que l'énergie n'a pas été dissipée ou transférée dans la deuxième cellule. Par ailleurs, gamma seuil augment, l'amplitude et la période augmentent aussi. Mais à une certaine valeur $\gamma = 100\% \gamma_{seuil}$, le système devient instable.

3.4 Analyse du splitting

Les courbes suivantes sont obtenues au moyen des équations 2.21 et 2.24.

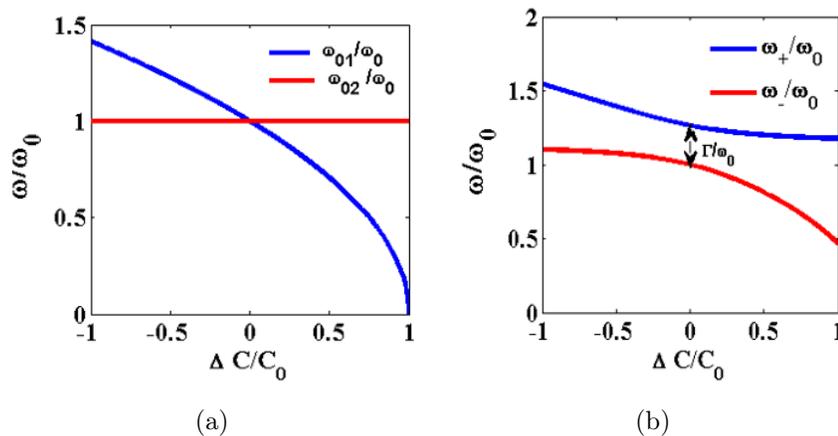


FIGURE 3.8 – Scission d'énergie : (a) Fréquence non couplée $C_c = 0$ d'oscillateur, inductances égales et capacités respectives C_0 et $C_0 + \Delta C$; (b) anti-croisement de fréquence dû au couplage $\kappa = 0.3$.

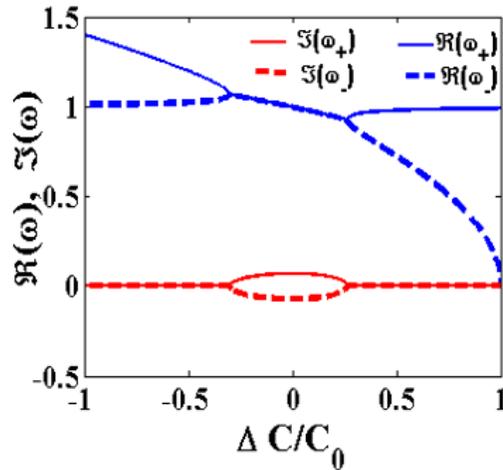


FIGURE 3.9 – Fréquence des oscillateurs couplés avec présence des résistances, les inductances égales et les condensateurs sont respectivement C_0 et $C_0 + \Delta C$

Nous pouvons dire ici que lorsque les deux cellules ne sont pas couplées, il y a possibilité d'interaction en énergie (figure *a*). Lorsqu'il y a couplage (figure *b*), les fréquences se disloquent. A partir de ces fréquences, nous pouvons prédire l'évolution du système. Cette partie trouve son application dans plusieurs domaines comme dans les lasers .

3.5 Analyse de la résonance de Fano

Pour comprendre la Fano résonance, nous allons considérer le circuit suivant en absence de couplage :

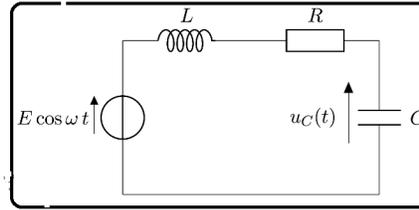


FIGURE 3.10 – Circuit RLC avec tension excitatrice en cosinus.

Après avoir eu l'équation d'évolution au niveau du condensateur [10], nous obtenons l'amplitude complexe suivante :

$$c(\omega) = \frac{E}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega} \quad (3.2)$$

La courbe suivante nous présente la norme et la phase de cette amplitude pour un oscillateur harmonique non couplé. De plus, elle montre bien le phénomène de résonance au niveau de la valeur adimensionnée $\omega_0 = 1$.

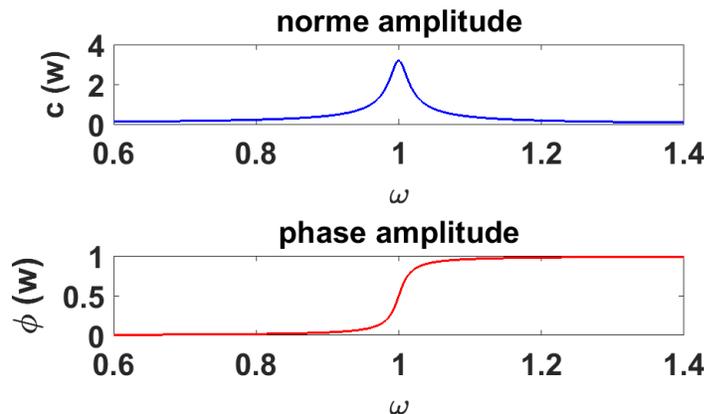
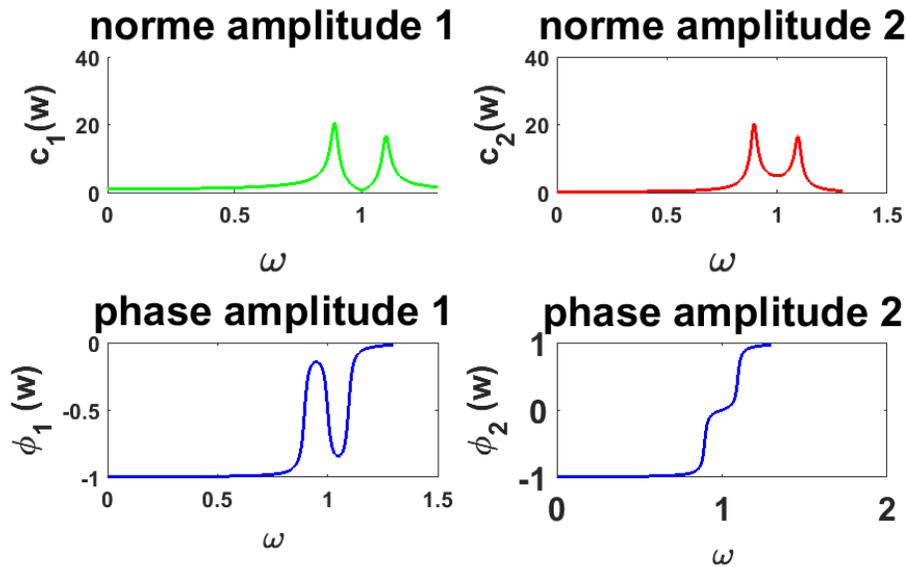


FIGURE 3.11 – Caractérisation d'une résonance

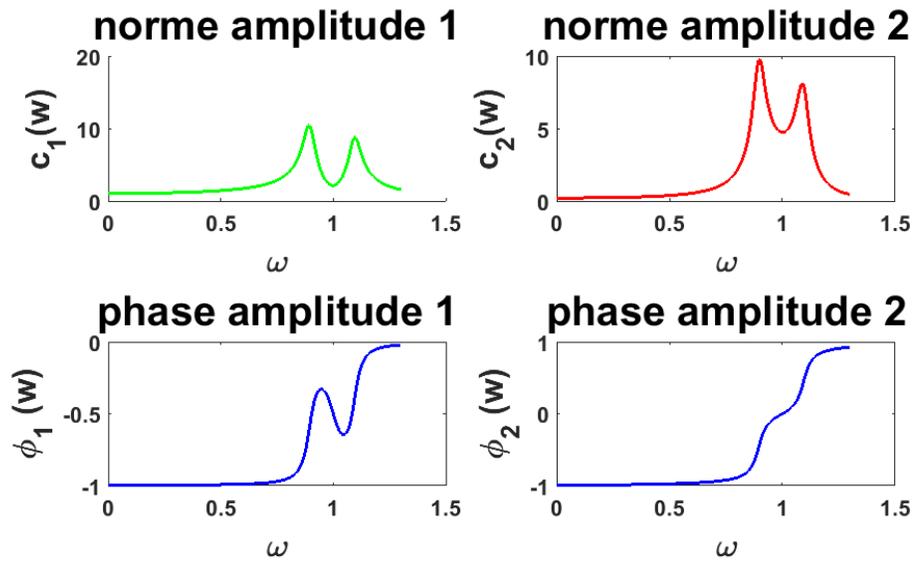
Lorsque que notre système n'est pas PTS c'est à dire dans un cas général, conformément à la même tension excitatrice considérée, l'équation 2.26 nous donne comme configuration : 1^{er} cas : couplage unique c'est à dire que $\mu = 0$

Dans le cas PTS, l'équation 2.37 nous donne comme figure :

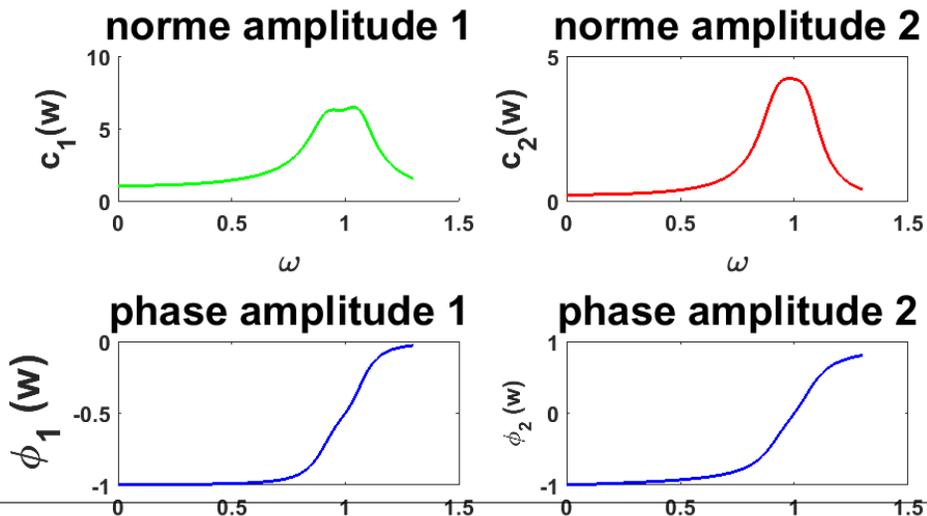
2^e cas : couplage κ et μ

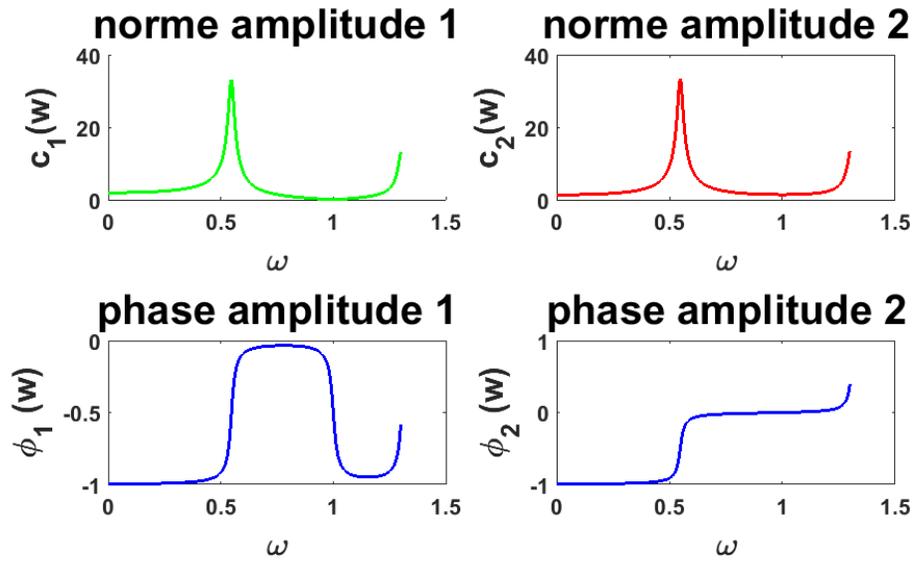


(a)

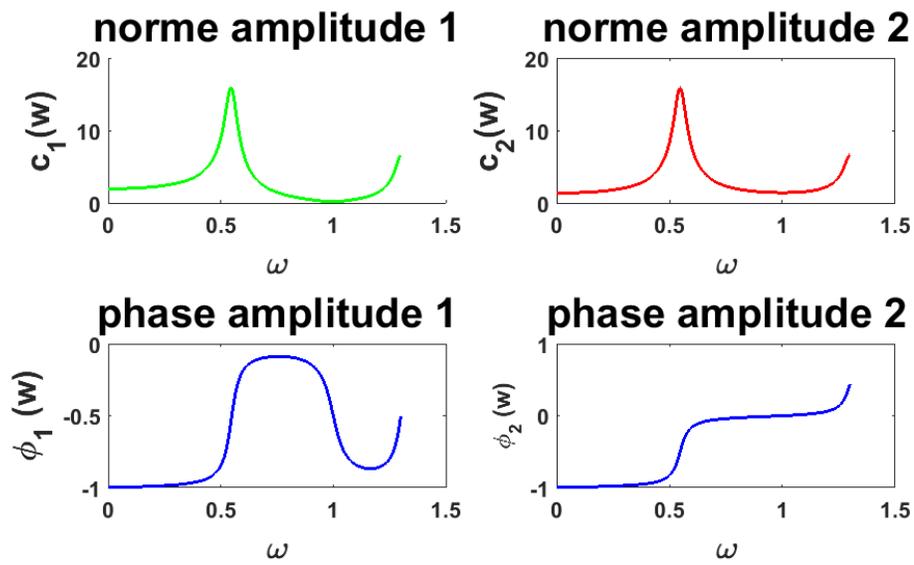


(b)



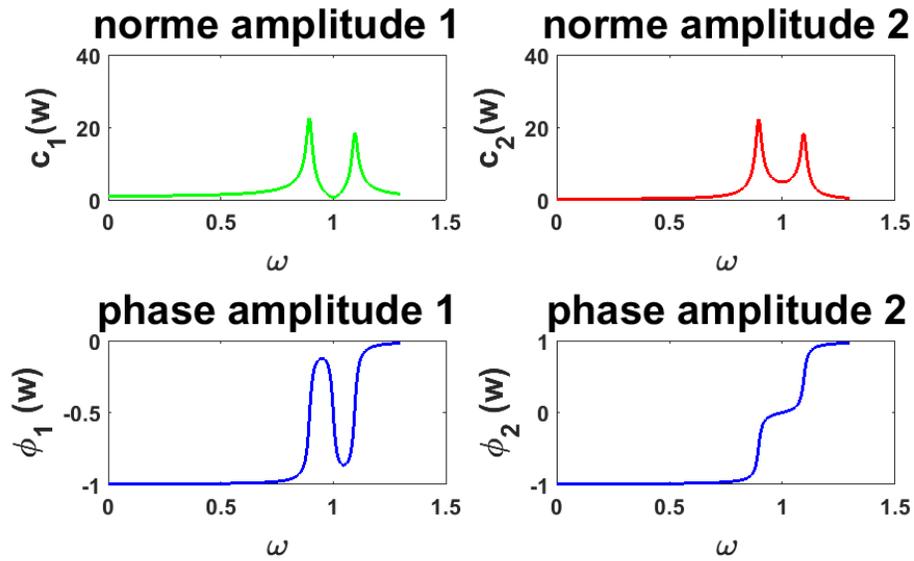


(a)

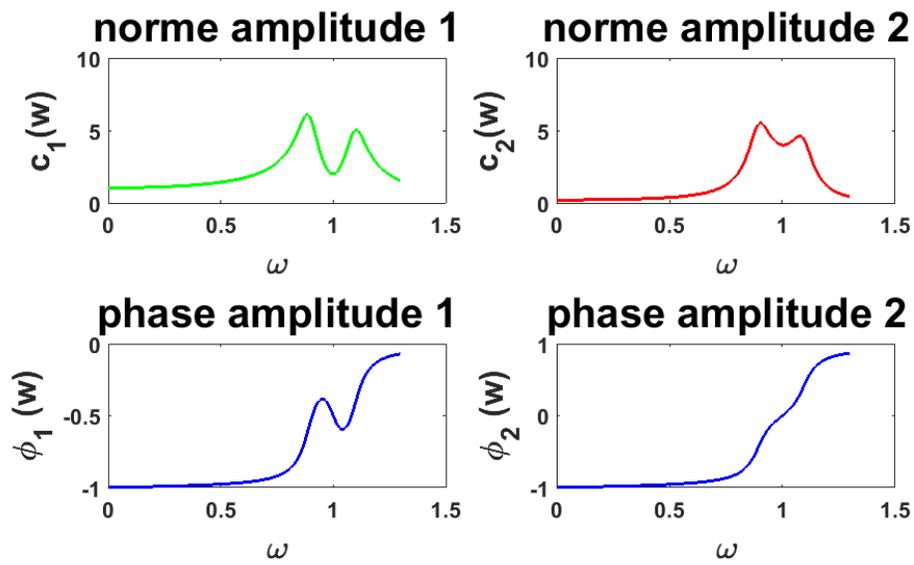


(b)

FIGURE 3.13 – Pour $\kappa = 0.7$: (a) $\gamma_1 = 0.025$, $\gamma_2 = 0.03$ (b) $\gamma_1 = 0.025$; $\gamma_2 = 0.09$

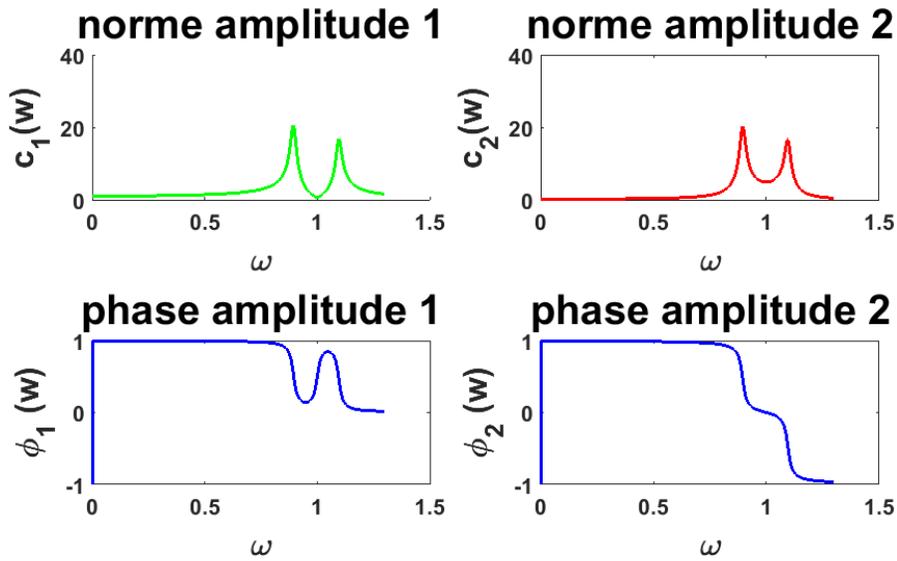


(a)

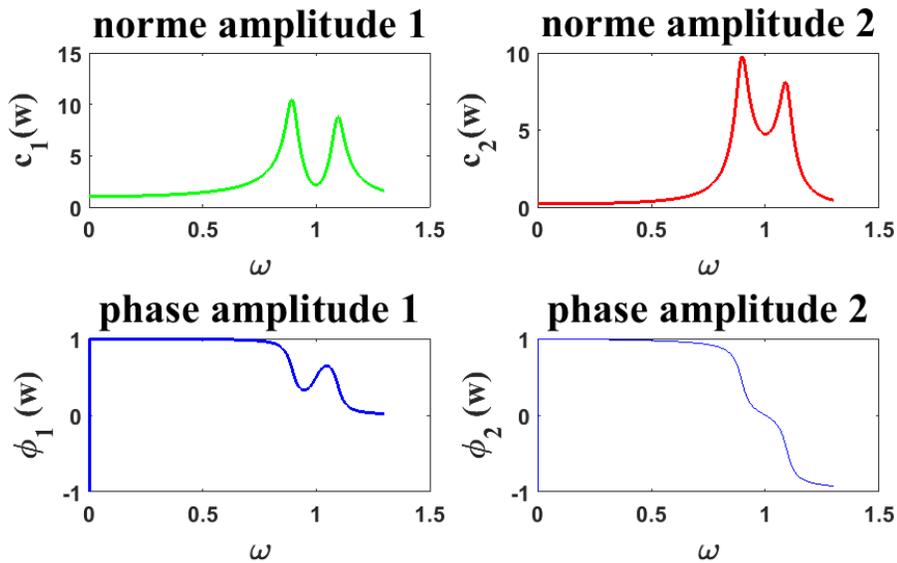


(b)

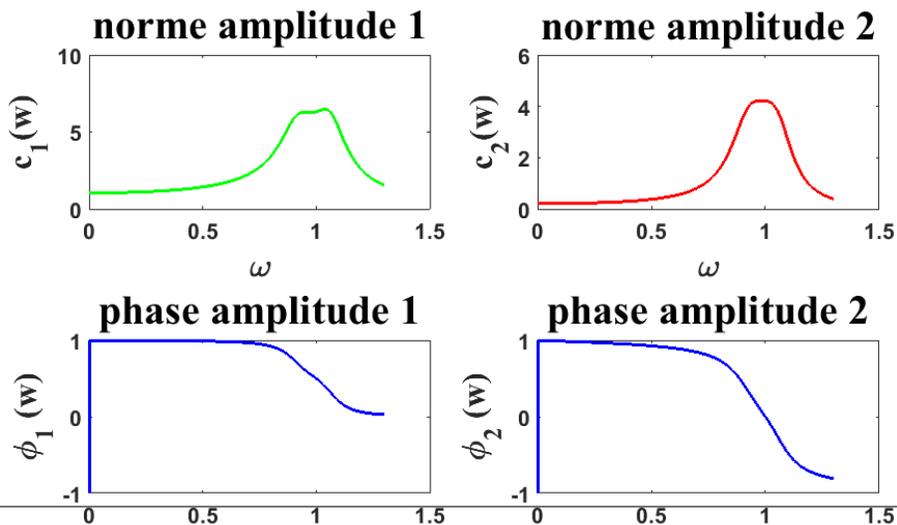
FIGURE 3.14 – Pour $\kappa = 0.2$: (a) $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.025$ (b) $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.1$

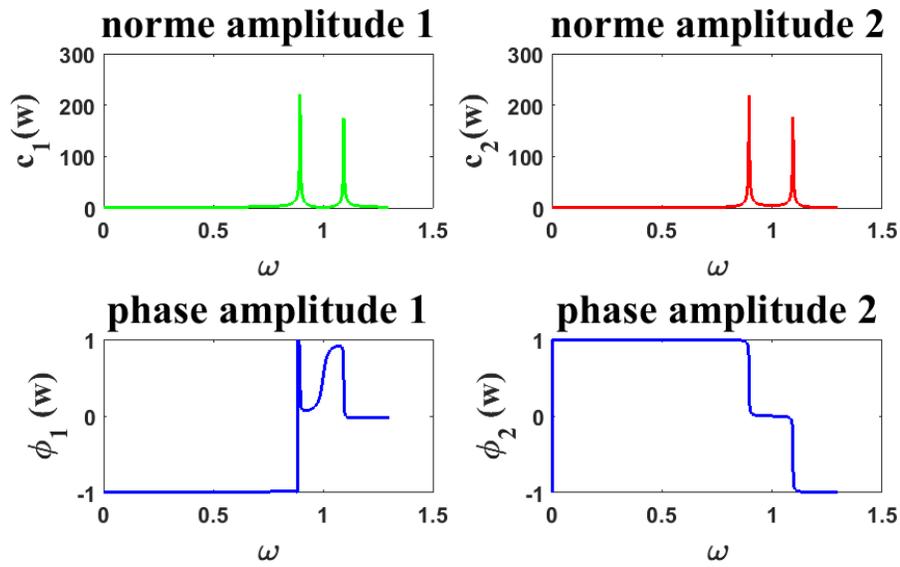


(a)

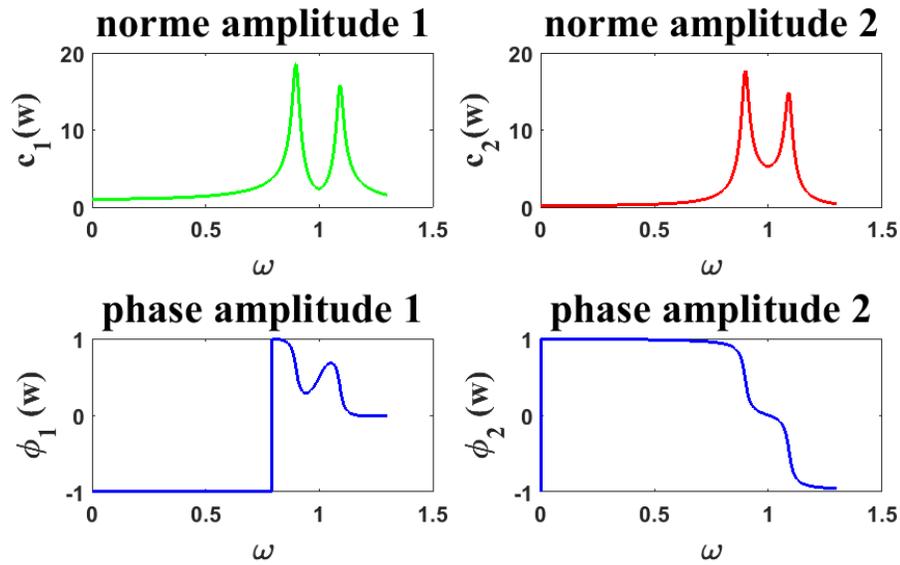


(b)

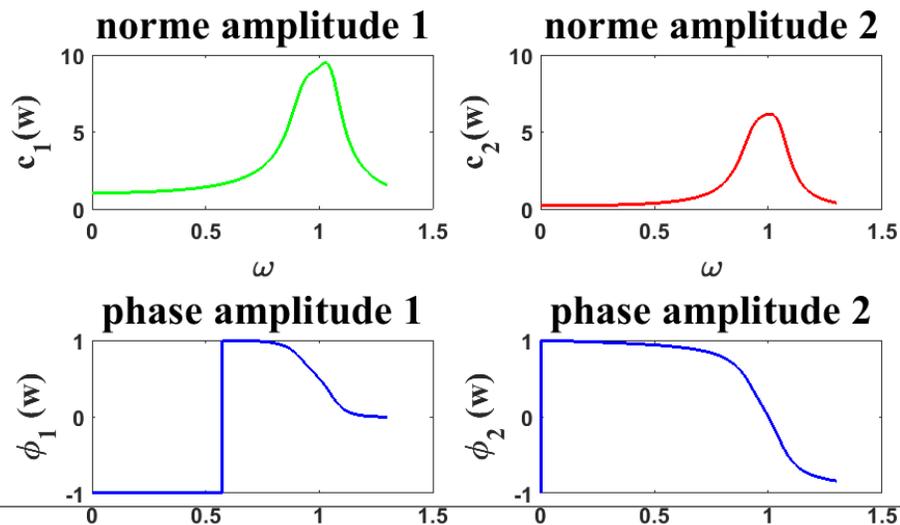


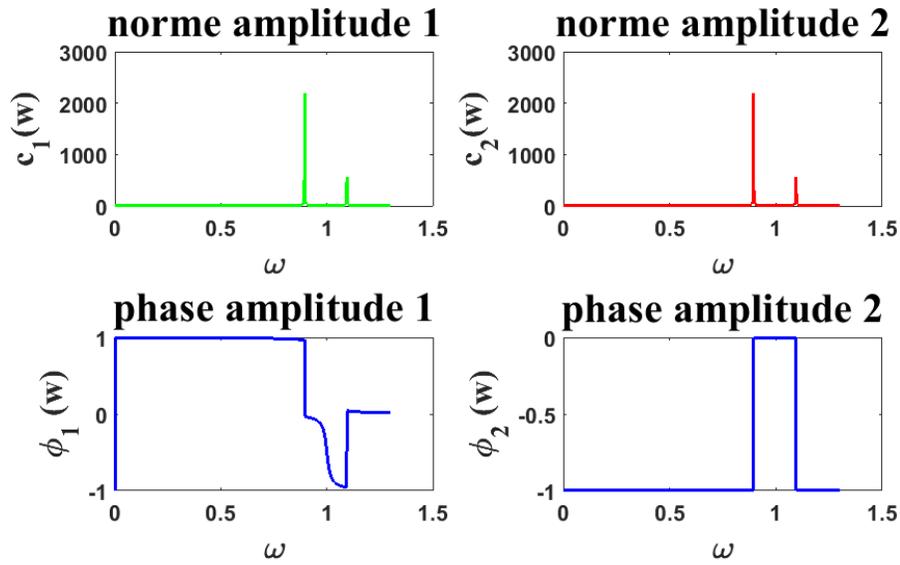


(a)

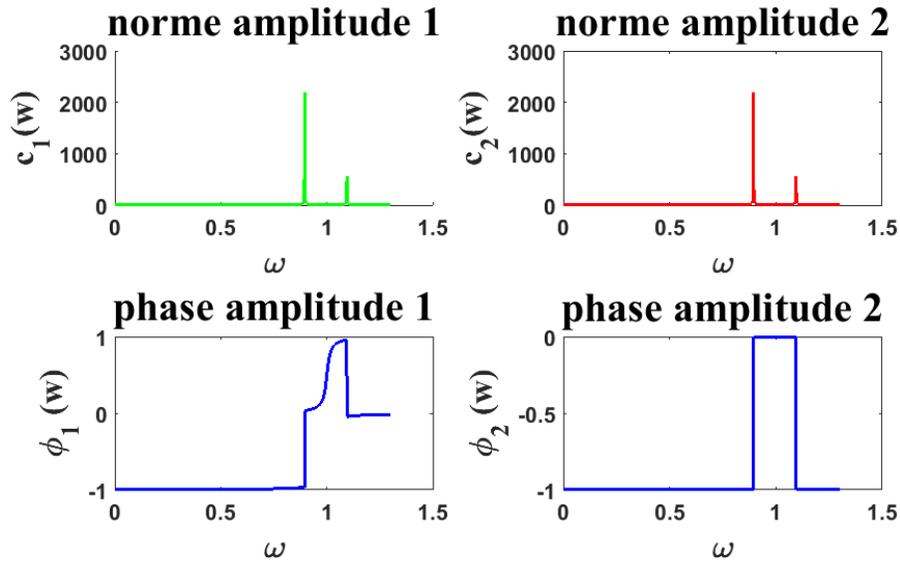


(b)

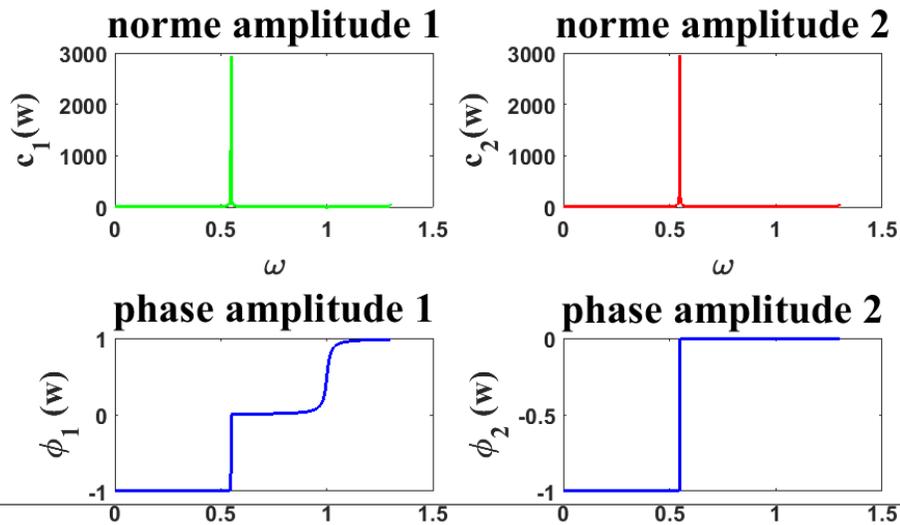


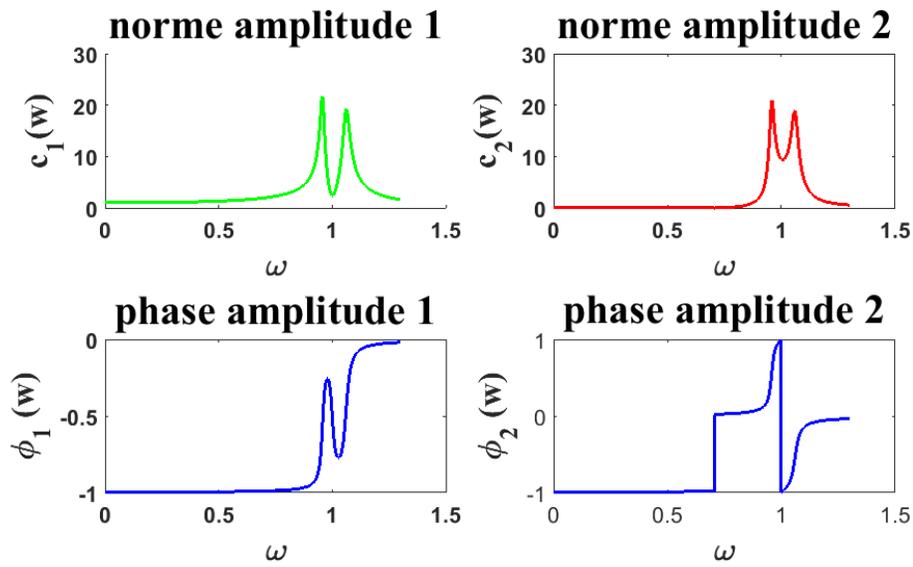


(a)

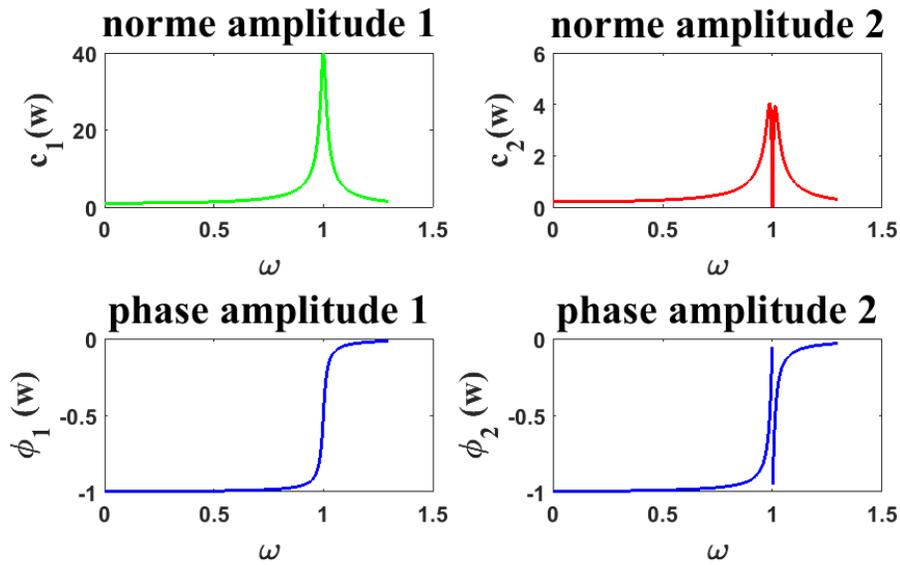


(b)

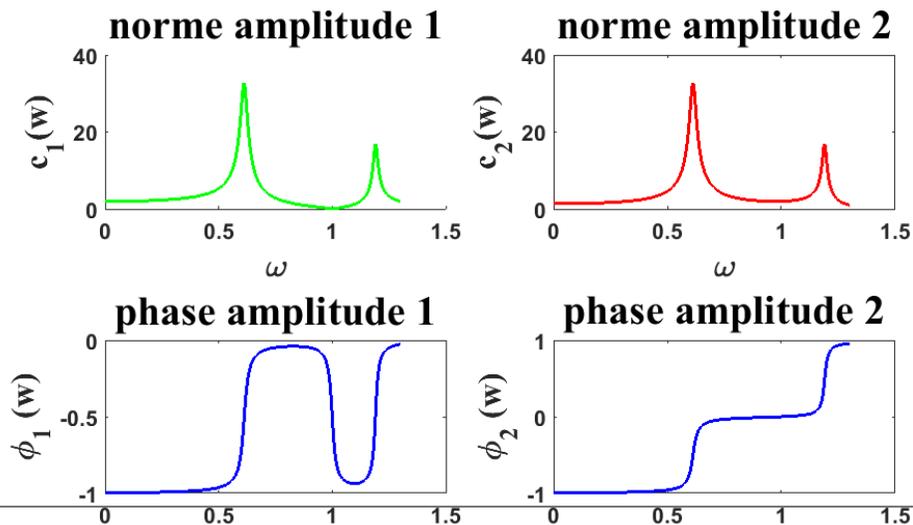




(a)



(b)



L'analyse faite est que nous observons bien la Fano dans le cas général comme dans le cas PTS et c'est le deuxième pic qui traduit cette Fano résonance. Nous constatons que où nous nous attendions à avoir la résonance on constate que l'amplitude est nulle. La largeur observée entre les pics est dû au déphasage qui existe entre le condensateur et la bobine. Concernant les cas critiques $\kappa = \pm 1$, nous n'avons pas de Fano résonance. Nous pouvons enfin conseiller à un utilisateur ou à un fabricant afin d'avoir une bonne Fano résonance d'utiliser les couplages tels que $\kappa = [-0.9; 0.9]$ et $\mu = [-0.8; 0.8]$ et dans ce cas, il faudrait que les valeurs des dissipations γ_1 et γ_2 soient faibles.

3.6 Analyse de la dynamique non linéaire

Considérons le terme cubique, nous obtenons la figure :

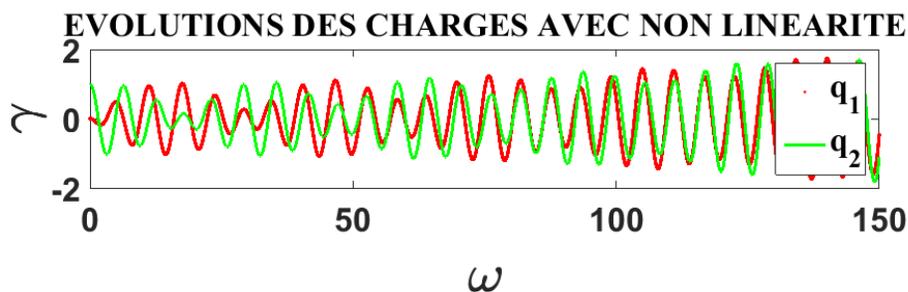
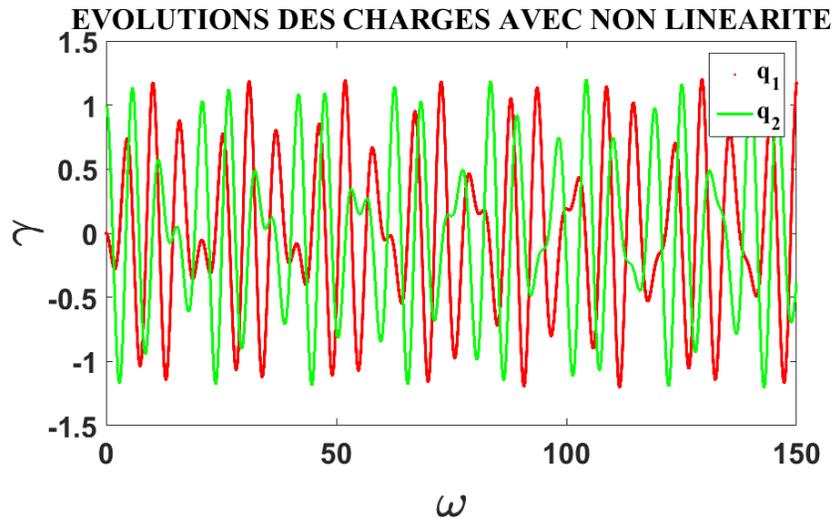
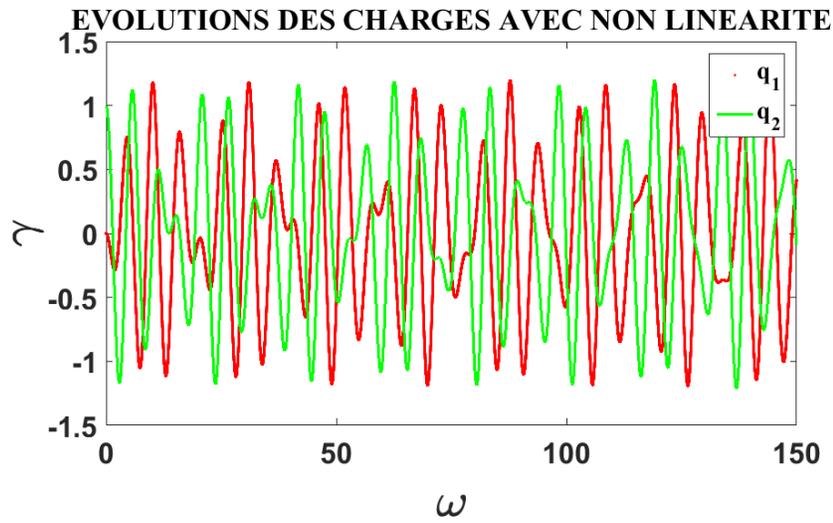


FIGURE 3.19 – Évolution des charges $q_1 \rightarrow$ rouge et $q_2 \rightarrow$ vert . $\kappa = 0.4$; $\eta = 0.001$; $\nu = 0.2$.

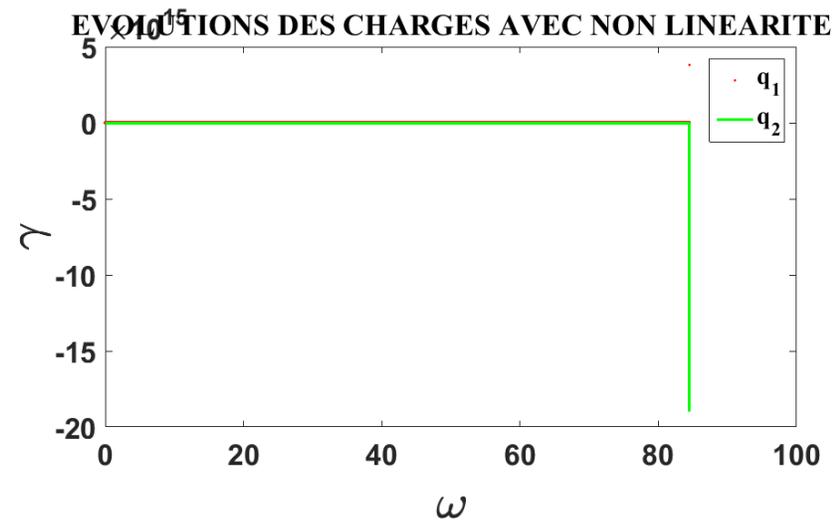
Ensuite, nous considérons les termes cubiques et quintiques nous fixons $\kappa = 0.4$; $\eta = 0.001$; $\beta = 0.2$



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.20 – Effet du couplage inductif μ sur la non linéarité : en (a), $\mu = 0.01$; en (b),

Analysons l'effet du couplage capacitif. Nous fixons $\eta = 0.001$; $\beta = 0.01$; $\mu = 0.01$ on a : Nous constatons que nous avons des oscillations similaires au cas linéaire.

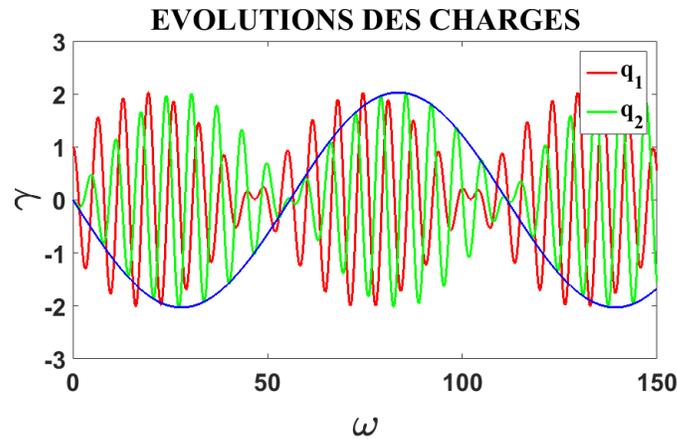
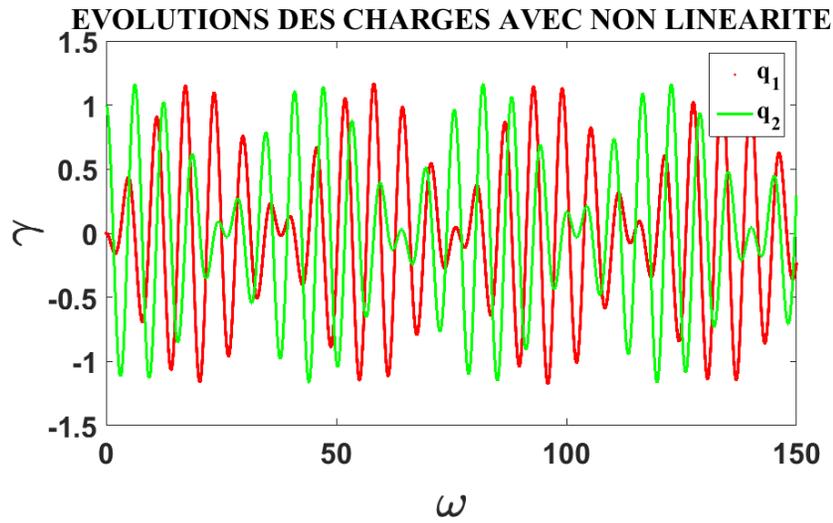


FIGURE 3.22 – Cas linéaire : $\kappa = 0.1$ et $\mu = 0.2$

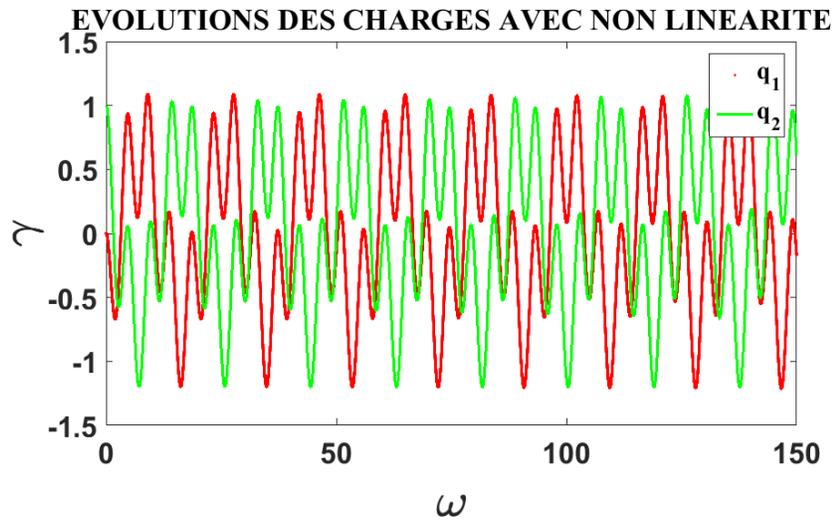
Ceci montre bien le fonctionnement de notre système dans le cas non linéaire comme dans le cas linéaire. La fréquence de Rabi caractérise bien les oscillations. Nous pouvons conseiller à un constructeur voulant introduire la non linéarité dans son système de choisir la valeur du couplage inductif en dessous de 0.2 et celle du couplage capacitif en dessous de 1 et les valeurs des coefficients non linéaire doivent être en dessous de 1. Car au plus de ces valeurs il n'a pas d'oscillations (figures 3.20 et 3.21 (c)). Ces figures traduisent bien un autre type de phénomène que nous pourrons étudier ultérieurement.

3.7 Conclusion

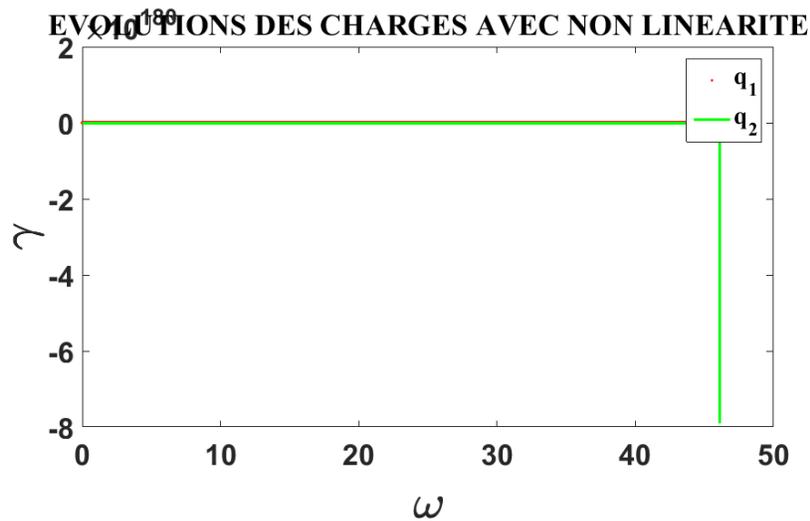
Parvenu au terme de ce chapitre où il était question pour nous de visualiser et de discuter sur les résultats relatifs à notre investigation, notamment l'étude des valeurs propres, les dynamiques du système, le splitting et la fano résonance.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.21 – Effet du couplage capacitif κ sur la non linéarité : en (a), $\kappa = 0.2$; en (b),

Il en résulte que les résultats obtenus sont d'une très grande importance car par similitude, l'exploitation de ces résultats génère des oscillations électriques qui ont multiples applications telles que le phénomène de résonance en télécommunication, la génération des signaux électriques exploitable en imagerie médicale, en chimie et dans les structures périodiques métallo-diélectriques [12]. Nous avons à priori ressorti la zone de fonctionnement de notre système et l'étude de la non linéarité a été d'une importance car elle nous a permis d'analyser le comportement de notre système dans le cas de perturbation.

APPORTS PÉDAGOGIQUES DE L'ÉTUDE D'UN DIMERE
ÉLECTRONIQUE A CARACTÈRE DISSIPATIF

4.1 Introduction

L'apport pédagogique d'un travail scientifique est l'ensemble des techniques dégagées par celui-ci dans le but de favoriser la compréhension voir même la résolution des problèmes liés à l'apprentissage de la discipline cadre dudit mémoire. Dans les chapitres précédents, nous avons étudié le comportement de plusieurs phénomènes de notre système notamment le splitting, la Fano résonance, la dynamique linéaire et non linéaire. La dynamique des systèmes étant une notion abordée à partir du second cycle des enseignements généraux en classe de terminale, l'enseignant devra donc trouver des méthodes et moyens pour que ladite notion soit bien assimilée par les apprenants. La tâche qui lui incombe est considérée comme étant de plus en plus étendue et couvre notamment le développement individuel des enfants et des jeunes gens, la gestion des processus d'apprentissage en classe, la transformation de l'ensemble de l'établissement scolaire en une "communauté d'apprenants", ainsi que les liens avec les collectivités locales et le monde extérieur.

4.2 Apports sur le rôle de l'enseignant et des enseignants

L'enseignant de nos jours participe à sa manière à une reconstruction d'une société plus consciente et dynamique et ceci passe par la prise de conscience de l'environnement immédiat dans lequel nous nous trouvons. L'enseignant se trouvant dans ce maillage a donc certaines responsabilités et devoirs. Il n'est plus question pour ce dernier de construire des notions essentiellement focalisées sur la théorie comme jadis mais à mener l'apprenant dans une approche non plus objective mais basées sur le savoir-faire. Pour y parvenir l'enseignant doit centrer son cours sur des activités rattachées à la vie pratique de tous les jours qu'il prendra lui-même le soin de bien élaborer. Ce mémoire peut servir de background à l'enseignant de physique sur la notion de systèmes oscillants.

4.2.1 Facteurs influençant les acquis des élèves.

De multiples facteurs influent sur les acquis des élèves parmi lesquels : les compétences, les attentes, la motivation et le comportement des élèves eux-mêmes, les ressources, les attitudes et le soutien des familles etc...

4.2.2 La qualité de l'enseignement est essentielle pour améliorer les acquis des élèves.

On s'accorde en général à dire que la qualité de l'enseignant est l'unique principale variable scolaire qui influe sur les résultats des élèves. Les diverses études s'accordent sur l'idée que la qualité des enseignants comprend de nombreux aspects importants dont ne rendent pas compte des indicateurs couramment uti-

lisés tels que les diplômes, l'expérience et l'évaluation des compétences théoriques. Parmi les caractéristiques des enseignants qu'il est le plus difficile de mesurer mais qui peuvent être cruciales pour les acquis des élèves figurent l'aptitude à transmettre des idées de façon claire et convaincante, à créer un environnement pédagogique efficace pour les différents types d'élèves, à favoriser l'instauration de liens enrichissants entre l'enseignant et les apprenants, à faire preuve d'enthousiasme et d'imagination et à travailler efficacement avec les collègues et les parents. Voici quelques exemples de domaines auxquels s'applique cette responsabilité élargie des enseignants :

- Au niveau de l'élève : mettre en route et gérer les processus d'apprentissage, répondre efficacement aux besoins des apprenants individuellement, intégrer l'évaluation formative et sommative
- Au niveau de la classe : enseigner à des classes pluriculturelles, élaborer de nouvelles aptitudes de manière transversale dans tout le programme de cours, intégrer les élèves présentant des besoins éducatifs spécifiques
- Au niveau de l'établissement scolaire : travailler et planifier en équipes, évaluation et programmes de développement organisationnel scolaire, utilisation des TIC dans l'enseignement et l'administration. Nous allons proposer une ébauche de fiche d'activité qu'un enseignant devra mener pour le déroulement de sa leçon.

4.3 Apports sur l'attitude et l'apprentissage des apprenants.

En général dans notre contexte beaucoup n'ont pas de culture scientifique et leur comportement en société n'est pas très différent d'un profane quand il s'agit de régler un problème concret qui fait parfois appel aux notions acquises en classe car ne sachant pas faire un parallélisme entre la théorie apprise et les problèmes concrets. Un cours bien élaboré (soutenu par une fiche pédagogique soigneusement conçue et orientée expérimentation) par exemple sur la dynamique des systèmes peut influencer l'apprenant et lui permettre de mieux comprendre et de se servir de ces notions pour résoudre une situation problème dans la vie courante, il peut aussi influencer sur l'orientation du choix de l'apprenant dans la mesure où ce dernier devient conscient des réalités et enjeux de ladite notion et perçoit des lors différemment les choses.

4.4 Conclusion

Parvenu au terme de ce chapitre où il était question des implications pédagogiques de notre thématique à savoir l'étude d'un dimère électronique à caractère dissipatif. Il en ressort que notre étude a bien démontré la compréhension des notions abordées au secondaire notamment en électricité et sur les systèmes oscillants. De plus, il en ressort que l'enseignant a de lourdes responsabilités quant à la façon de dispenser ces notions qui influenceraient le choix et l'orientation de l'apprenant dans le monde universitaire et professionnel.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Somme toute, notre étude était centrée sur la dynamique des dimères PTS à base d'oscillateurs électroniques dissipatifs. A l'aide d'une bonne revue de littérature, nous avons pu expliquer les notions de système oscillant, couplage, atténuation, amplification et PTS. Nous avons élaboré au chapitre 2 les conditions nécessaires pour que notre système soit PTS. Dans ce travail, il ressort que la dynamique de notre système a nécessité une étude approfondie des gammes seuils et des valeurs propres. Nous avons pu ressortir les zones d'oscillation ce qui traduit le fonctionnement de notre système. L'étude du splitting nous a permis de voir l'attraction ou la répulsion d'énergie des deux oscillateurs. De plus, la Fano résonance a été un aspect majeur dans ce système car pour ces deux oscillateurs doublement couplés, nous avons ressorti le deuxième pic de résonance ce qui traduit bien la Fano résonance. Et nous avons constaté que notre système peut bien fonctionner dans le cas général comme dans le cas PTS. Ce phénomène de Fano est mis en évidence dans diverses expériences de spectroscopie par une asymétrie caractéristique des raies spectrales. En revanche, le système pouvant être perturbé, raison pour laquelle nous avons étudié la non linéarité où nous avons pu relever le fonctionnement du système pour certaines valeurs des couplages. Par ailleurs, l'apport pédagogique d'un travail scientifique est l'ensemble

des techniques dégagées par celui-ci dans le but de favoriser la compréhension voir même la résolution des problèmes liés à l'apprentissage de la discipline cadre dudit mémoire. Les psychopédagogues que nous sommes trouverons des méthodes afin de galvaniser les apprenants notamment en classe de troisième en seconde, qui ont souvent les difficultés d'aborder les exercices en électricité et les systèmes oscillants en terminale scientifique. Ceci dans le but de les rendre autonome. En guise de perspective, nous envisageons dans les travaux à venir, d'étudier d'autres phénomènes qui se produisent dans les zones non permises et de concevoir des programmes d'activités d'apprentissages des systèmes oscillants.

Bibliographie

[1]-**Ugo Fano**, Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts. Phys. Rev. , 124 :1866-1878, Dec 1961.

[2]-**S.Collin, G. Vincent, R. Haidar, N. Bardou, S. Rommeluère, and J. L. Pelouard**, Nearly perfect fano transmission resonances through nanoslits drilled in a metallic membrane. Phys. Rev. Lett.; 104 :027401, Jan 2010.

[3]-**F. Hao, Y. Sonnefraud, P. V. Dorpe, Stefan A. Maier, Naomi J. Halas ,and P. Norlander**, Symmetry breaking in plasmonic nanocavities :subradiant ISPR sensing and a tunalble fano resonance. Nano letters, 8(11) :3983-2008.

[4]-**N. A. Mirin, K. Bao, and P. Norlander**, Fano resonance in plasmonic nanoparticule aggregated. The journal of physical chemistry, A, 113(16) :4028-4034, 2009.

[5]-**V. A. Fredotov, M. Rose, S. L. Prosvirnin, N.Papsimakis**, Sharp trapped-mode resonances in planar meta-materials with a broken structural symmetry. Pyhs. Rev. Lett. ,99 :147401, Oct 2007

[6]-**A. Ueda and M. Eto**, Resonant tunneling and quantum dots with electron-phonon interaction. Phys. Rev. B, 73 :23353, Jun 2006.

- [7]-**A. E. Miroshinichenko, S. Flash and Y. S. Kivshar**, Fano resonances in nonoscale structures. *Rev. Mod. Phys.*,82 :2257-2298, Aug 2010.
- [8]-**M. V. Rybin, A. B. Khanikaev, M. Inoue, K. B. Samusev**, Fano resonance between mie and bragg scattering in photonic crystals. *Phys. Rev.* 103 :023901, Jul 2009.
- [9]-**W. Zhou, D. Zhao, Y. C. Shai, H. Yang**, Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics progress in quantum electronics, 38 :1-74Jan 2017,.
- [10]-**Yong S. Joe , Arkady M. Satanin and Chang Sub Kim**, Classical analogy of Fano resonances,USA, 2006.
- [11]-**L. T. Abobda, Paul Wofo** Subharmonic and bursting oscillations of ferromagnetic mass fised on a spring and subjeted to an AC electromagnet, University of Yaoundé 1, 2011.
- [12]-**Zcghdoud**, Etude des résonances Fano dans les structures périodiques métallo-diélectrique. , Université Mouloud Mammeride Tizi-Ouzou, 2014-2015.
- [13]-**Edouard N. Tsoy**, coupling oscillators with parity time symmetry, physical-technical institue of the Uzbek academy of science, 2006
- [14]-**Ato Ndongo Fabrice**, Oscillateurs de Duffing et symetrie parité-temps, 2018.
- [15]-**Lukas Novotny** Strong coupling, energy splitting, level croissings : A classicalperspective, institute of optics , university of Rochester, New-York, 2010.

CURRICULUM VITAE

NOMS ET PRÉNOMS : TEUGUIA JEAN PAUL

DATE ET LIEU DE NAISSANCE : 01-12-1992 à YAOUNDÉ

SEXE : MASCULIN

NATIONALITÉ : CAMEROUNAISE

Tel : (+237) 695607407

E-mail : jeanpaulteuguia@yahoo.fr

SITUATION SCOLAIRE

- > **2018-2019** : Niveau V Ecole Normale Supérieure de Yaoundé.
- > **2017-2018** : Niveau IV Ecole Normale Supérieure de Yaoundé.
- > **2017-2018** : MASTER I en Mécanique Appliquée et d'hydraulique à l'Université de Yaoundé I.
- > **2016-2017** : LICENCE III en à l'Université de Yaoundé I.
- > **2015-2016** : LICENCE II à l'Université de Yaoundé I.
- > **2013-2015** : LICENCE I à l'Université de Yaoundé I.
- > **2011-2012** : TERMINALE C au Lycée Bilingue d'Etoug-ébé.

LANGUES PARLÉES ET ÉCRITES :

- > Français
- > Anglais

DIVERS

- > Lecture
- > Sport
- > Chant
- > Voyage et visite des sites touristiques