

Étude expérimentale de nouveaux phénomènes chaotiques étranges dans une classe optimale d'oscillateurs L-C à résistance négative

Ahmadou BELLO OUSMANOU*, Félix PAUNÉ, Léandre NNEME NNEME et Jean MBIHI

Laboratoire de Recherche en Génie Informatique et Automatique, UFD Sciences de l'Ingénieur Université de Douala BP 1872, Douala, Cameroun

* Correspondance, courriel : ousmanoubello2003@yahoo.fr

Résumé

De nombreux travaux de recherche sur l'étude des systèmes électroniques chaotiques, sont plus focalisés sur la recherche du grand niveau d'étrangéité chaotique, au détriment de la complexité structurelle des circuits de mise en œuvre. Cependant, il a été théoriquement prouvé récemment par simulation virtuelle, qu'une classe simple de système dynamique de 2^e ordre bien paramétré, peut mettre en jeu des phénomènes dynamiques très étranges. Suite à ces constats, la contribution de cet article scientifique, est de présenter une étude expérimentale de prototypes d'une classe d'oscillateurs à résistance négative, mettant en jeu un grand niveau d'étrangéité chaotique. Les topologies chaotiques issues des essais expérimentaux, qui sont présentées et commentées dans cet article, sont tout à fait similaires à celles produits sous les mêmes conditions paramétriques et opératoires, par simulation virtuelle dans Multisim. La comparaison des résultats expérimentaux et virtuels, confirme la faisabilité effective de réalisation d'oscillateurs chaotiques très étranges, avec nombre minimum de 04 composants qui sont : 01 seul amplificateur opérationnel, 03 éléments passifs R, L et C.

Mots-clés : *résistance / conductance négative, systèmes dynamiques, phénomènes chaotiques, attracteurs chaotiques étranges, étrangéité topologique, simulation virtuelle, Prototype.*

Abstract

Experimental study of Novel chaotic strange phenomena in a class of negative resistance / conductance L-C oscillators

Numerous research works on study of electronic chaotic systems, are more focused on the research of high level chaotic strangeness of chaotic profile, at the expense of the structural simplicity of implementing circuits. However, it has been theoretically proven by virtual simulation, that a simple class of 2nd order dynamic system with good parameterization policy, can involve very strange chaotic phenomena. Following these facts, the contribution of this scientific paper, is to present an experimental study of a class of negative resistance oscillators, involving high level chaotic strangeness. Chaotic topologies resulting from experimental tests, which are presented and commented in this paper, are quite similar to those produced under the same operating and parameterization conditions, by virtual simulation using Multisim. The comparison of experimental and virtual simulation results, confirm the effective feasibility of the realization of high level strangeness chaotic oscillator, with minimum number of 04 components which are : a single operational amplifier, and 03 passive elements connected in series (R, L and C).

Keywords : *Negative resistance / conductance, dynamical systems, chaotic phenomena, strange chaotic attractors, topological strangeness, virtual simulation, Prototype.*

1. Introduction

Les phénomènes chaotiques ont été découverts à la fin du 20^e siècle, lors de l'analyse de certains prototypes de systèmes dynamiques non linéaires [1, 2]. Puis, l'intérêt de cette découverte en sciences fondamentales et appliquées, a suscité au cours du temps, de nombreux publiés sur le développement de la théorie des systèmes non linéaires chaotiques, reconnus par leurs sensibilités intrinsèques aux conditions initiales voisines et aux petites variations de certains paramètres caractéristiques qui se traduisant par des comportements dynamiques étranges [3, 4]. De nos jours, les extensions et applications de la théorie des systèmes chaotiques, occupent une place de choix parmi les domaines de recherche d'actualité scientifiques et de pleine émergence [5, 6]. Cependant, dans la majorité des travaux de recherche publiés sur les systèmes électroniques chaotiques, les circuits chaotiques initiés en vue de produire grand niveau d'étrangéité chaotique, sont décrits par de modèles dynamiques d'ordre minimum égal à trois [7, 8]. Face à ce constat, la faisabilité théorique de création des phénomènes chaotiques de haut niveau d'étrangéité a été mise en évidence dans [3], par simulation virtuelle d'une classe d'oscillateurs L-C à résistance négative. Contrairement aux topologies complexes de circuits chaotiques publiés, le schéma de principe des prototypes de ladite classe d'oscillateurs chaotiques, représenté à la **Figure 1**, ne requiert que quatre composants électroniques (voir **Figure 1**), à savoir un amplificateur opérationnel, et trois composants passifs symbolisés par R, L et C.

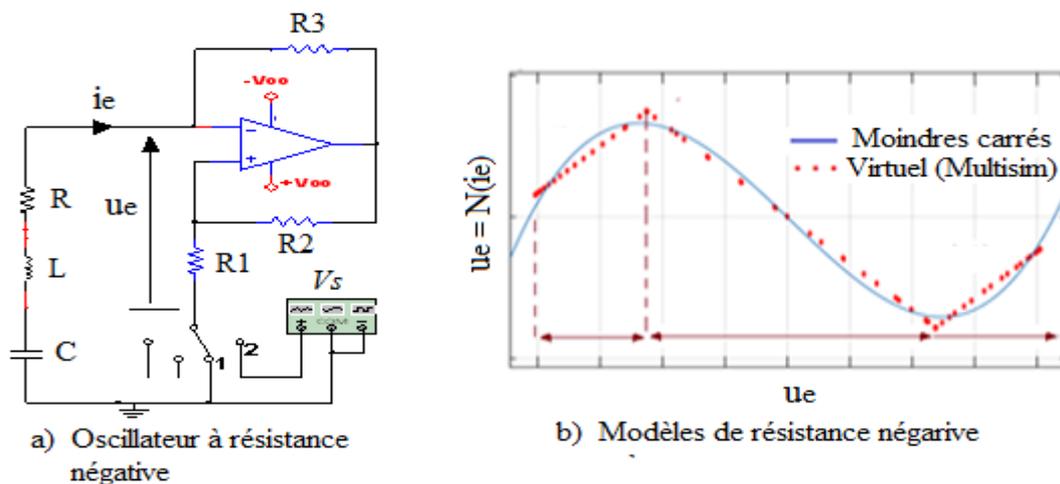


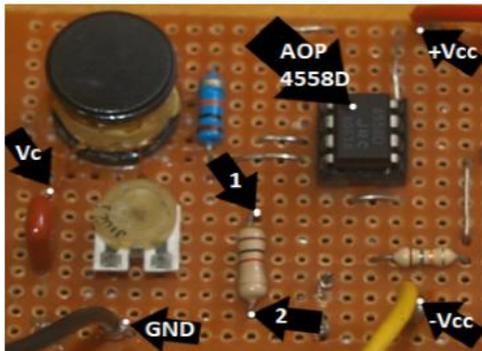
Figure 1 : Classe d'oscillateurs à résistance négative

Dans [3], un modèle optimal $ue = N(ie)$ de résistance négative, a été développé à l'aide d'un processus d'optimisation paramétrage au sens des moindres carrés, dans un espace topologique à profils cubiques. Suite aux nombreux cas de profils chaotiques obtenus par simulation virtuelle dans Multisim et présentés dans [1], cet article porte sur une étude expérimentale, permettant de valider en pratique lesdits phénomènes chaotiques étranges qui ont été théoriquement mis en évidence en théorie [3]. La section 2 de l'article porte sur la méthodologie et outils d'étude expérimentale de ces oscillateurs chaotiques simples. Puis les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et comparés dans la section 3, à ceux produits dans les mêmes conditions opératoires, par simulation virtuelle dans Multisim. Enfin, la conclusion de l'article fait l'objet de la section 4.

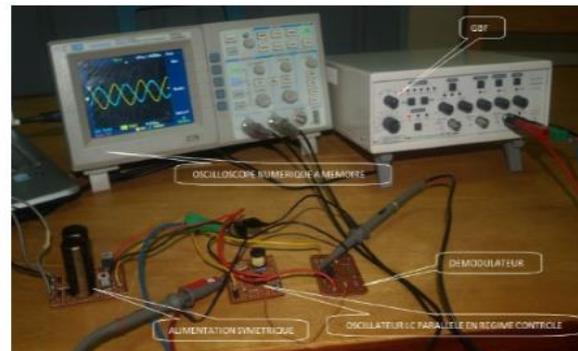
2. Méthodologie

2-1. Matériel et banc d'essais utilisé

Le banc d'essai monté et présenté dans la **Figure 2**, est équipé : a) d'un oscilloscope numérique RIGOL DS1 102E (2 Canaux, 100 Mhz, 1 Gec/s) ; b) d'un oscilloscope tactile MICSIG TO1104 (4 x 100 MHz) ; c) d'une sonde différentielle Micsig DP20003 (100 MHz x 200 x 2000) ; d) d'un générateur de fonction LW-1642 (5 Mhz) ; e) d'une alimentation de laboratoire symétrique LW DC TPR3005-2D ; f) une plaque à essais de montage des composants (AOP 4558D, résistances R, R1, R2 et R3, inductance L, condensateur C, et câbles de liaison.



(a) Oscillateur à résistance négative sur plaque a essaie



(b) banc d'essai du laboratoire

Figure 2 : Schéma de montage ORN sur plaque a essaie, et équipement de laboratoire

Le schéma de montage de la **Figure 1** est déployé sur plaque a essaie **Figure 2 (a)** avec les mêmes contraintes que prévu dans la section 2 et les mêmes configurations que dans la sous-section 2.2 **Tableau 1**. Les points test Vc, 1 et 2 sont prévues pour le raccordement des instruments de mesure, GND, +Vcc et - Vcc pour alimentation de la carte. La **Figure 2 (b)** représente le montage global de la carte ORN, l'alimentation et les appareils de mesures.

2-2. Mode opératoire

Le montage expérimental global est constitué de :

- Un oscilloscope numérique RIGOL DS1 102E (2 canaux, 100 Mhz, 1 Giga E/s) ;
- Un oscillateur numérique Micsig Technology Limited TO1104 Oscilloscope tablette 4 x 100 MHz ;
- Une sonde différentielle Micsig DP20003 Sonde différentielle 100 MHz x 200 x 2000 ;
- Une alimentation DC stabilisée LW TRP3005-2D ;
- Un générateur de signaux LW-1642 de 5 Mhz ;
- Une source de tension continu de ± 9 V ;
- Un commutateur de mode de fonctionnement (autonome, contrôlé)

Le **Tableau 1** présente la configuration utilisée pour obtenir les comportements chaotiques du **Figures 4** colonne (B) sur les prototypes, l'oscilloscope étant en mode X-Y. Cette même configuration nous également permis de produire les résultats du **Figures 4** colonne (C) dans la simulation [3, 9] nous avons utilisé trois potentiomètres pour varier les valeurs de R1, R2, R3 pour chaque topologie remarquable obtenue, on fait un prélèvement de ces résistances avec un ohmmètre et on la consigne dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Configurations utilisé pour obtenir le comportement chaotique

ABCj, DEFj	Vs (V)	fs (Hz)	R1 (kΩ)	R2 (kΩ)	R3 (kΩ)	R4 (Ω)	L (mH)	C (nF)
ABC1	10	1000	0.02	0.03	0.01	10	10	47
ABC2	10	10000	0.20	0.02	4.45	10	10	100
ABC3	8	11000	0.12	0.01	4.48	10	10	100
ABC4	0	-	0.25	5.30	3.48	10	10	47
ABC5	0	-	0.02	0.01	4.45	10	10	100
ABC6	8	11000	1.08	0.90	3.6	10	10	100
ABC7	12	11000	1.2	2.51	0.17	10	10	100

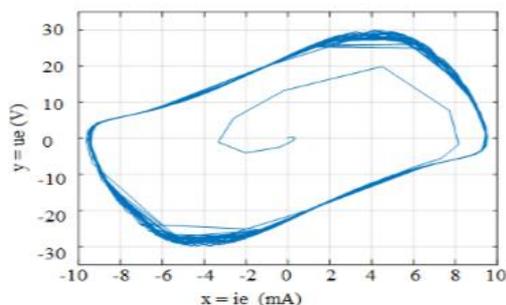
Vs et fs sont les paramètres du signal de contrôle généré par le GBF (générateur basse fréquence) nous pouvons également relever ici que c'est cinq (05) des sept (07) cas de notre **Figures 4** qui sont contrôlés c'est-à-dire le commutateur en position 2 donc B1 = C1, B2 = C2, C3 = D3, C6 = D6, C7 = D7 les deux autres cas C4 = D4 et C5 = D5 illustrent à leur tour le fonctionnement en régime autonome commutateur en position 1.

3. Résultats et discussion

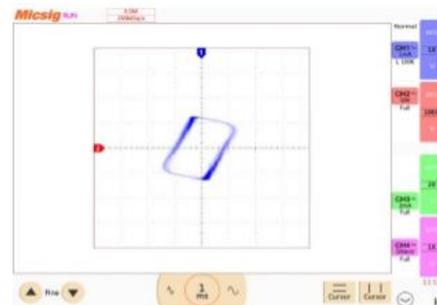
Cette section fournit les moyens de percevoir et de reconnaître un comportement périodique ou chaotique, qualitativement et quantitativement **Figures 3** et **Figures 4**. Nous avons montré que les systèmes dynamiques chaotiques évoluent à long terme vers des attracteurs étranges ou simples parmi lesquels le point fixe, le cycle limite et le tore correspondent **Figures 4** colonne (B) et (C) respectivement à l'état final d'un système stationnaire, périodique et quasi-périodique. Nous avons montré également que les systèmes dynamiques non-linéaires pouvaient adopter des comportements dynamiques complexes, sensibles aux conditions initiales et à la valeur des paramètres. Nous allons présenter les résultats en deux temps, dans un premier temps les résultats obtenus pour oscillateurs sinusoidaux non chaotiques par la suite les résultats obtenus pour oscillateurs chaotiques autonomes et contrôlés, les résultats de la première phase sont obtenus pour un paramétrage spécifique ou les résistances R1, R2 et R3 sont égaux.

3-1. Oscillateurs sinusoidaux (non chaotiques)

La configuration ci-après au tour de l'amplificateur opérationnelle 4558 D dans la **Figures 2 (a)** {R1 = R2 = R3 = 1.71 kΩ} dans (2) [3], {a*1 = 4.043e+07, a*2 ≈ 0, a*3 = -1710, a*4 ≈ 0} dans (7) [3], {R4 = 10 Ω, L = 100 mH, C = 22 nF} dans la **Figures 2 (a)**, {A = 27100, B = 4.4756e+04, ω2 = 4.549e+08}, tant en simulation que sur le prototype la deuxième constatation pertinente repose sur un attracteur étrange de base obtenu associé à (12) [3, 5].



(a) Attracteur de base en simulation



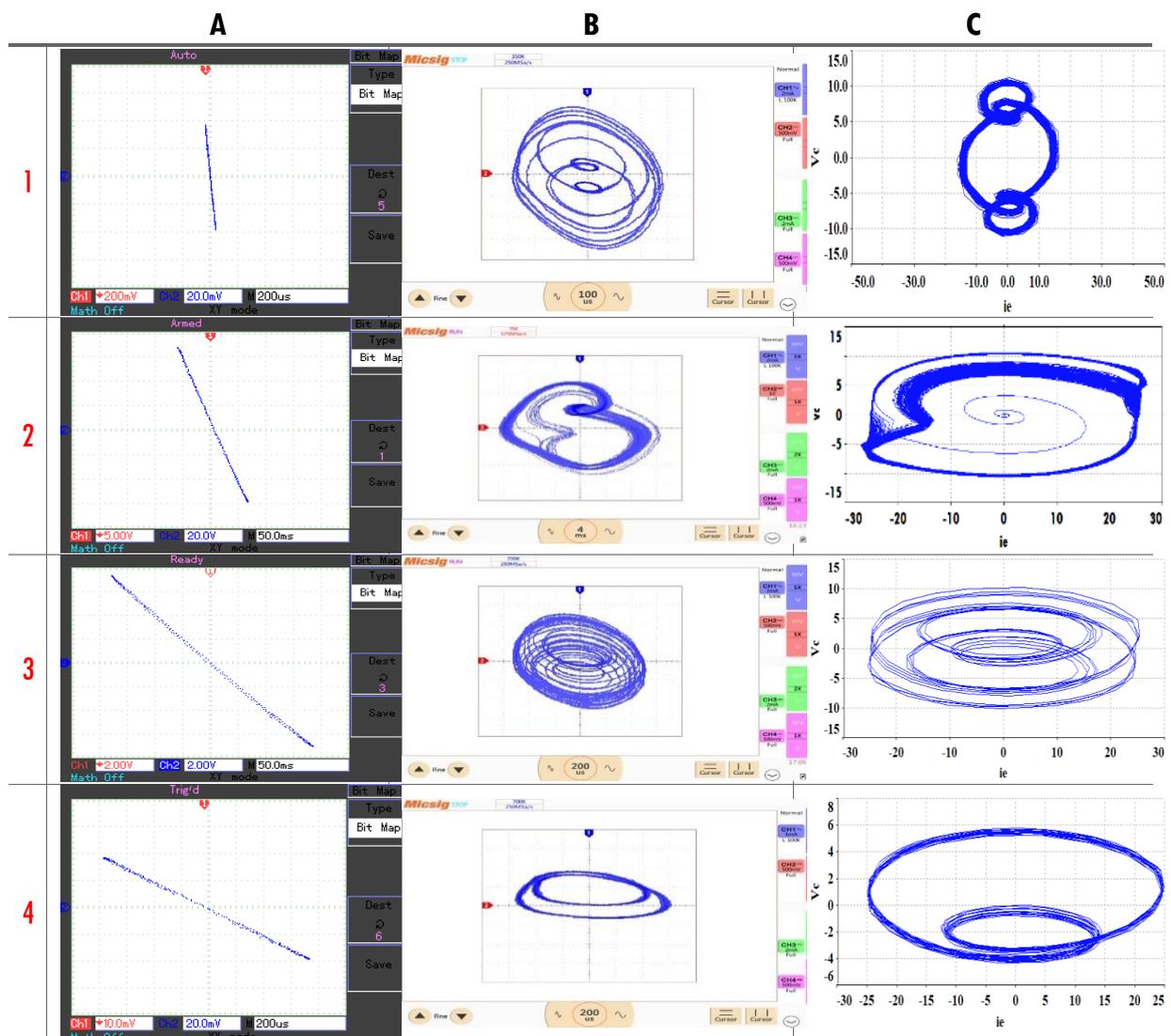
(b) Attracteur de base sur prototype

Figures 3 : Attracteur de base obtenue dans le plan x-y

Cet attracteur étrange de base est affiché dans le plan x-y, comme le montre la **Figures 3 (a) et (b)**. En raison des deux résultats pertinents, la faisabilité d'un comportement chaotique au sein de la classe d'origine de ORN linéaire par morceaux est tout à fait établie. Nous avons étayé nos arguments de modélisation par des simulations sur MULTISIM et MATLAB, pour présenter la faisabilité chaotique d'un oscillateur à résistances négatives en superposant les courbes de simulations aux courbes de la résolution du modèle mathématique sur la **Figure 3 (a)** [3, 10]. Dans cet article nous allons une fois de plus confronter ces résultats aux résultats obtenus sur un prototype réaliser par nous-même.

3-2. Oscillateurs chaotiques autonomes et contrôlés

Nous avons posé les bases afin de comprendre les différents scénarios pouvant amener un système dynamique non-linéaire ne présentant pas de comportement chaotique vers une dynamique chaotique, par l'influence d'un ou de plusieurs paramètres [3, 11, 10] de contrôle du système **Tableau 1**.



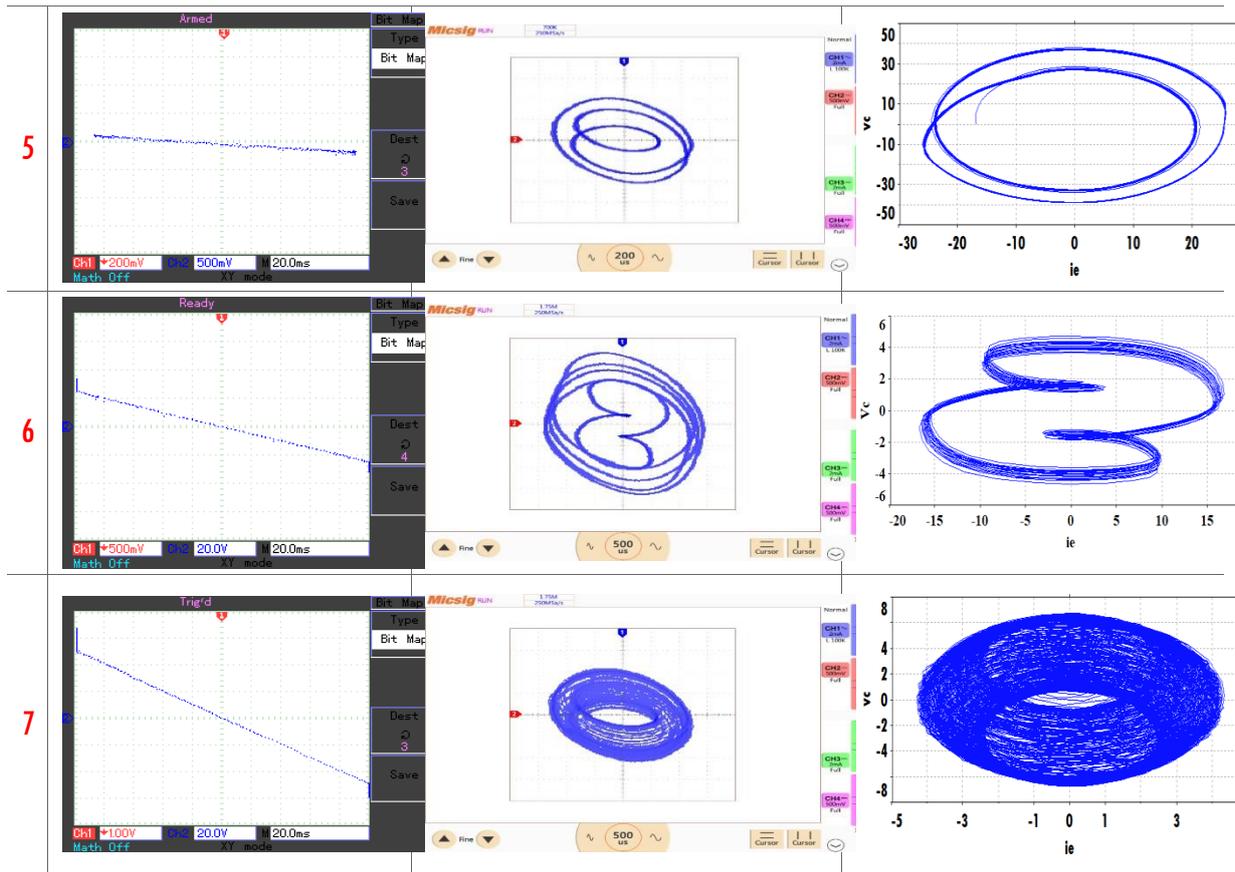


Figure 4 : Quelques phénomènes chaotiques produit par les prototypes et la simulation des NRO / NCO

3-3. Interprétation des résultats et discussions

Cette sous-section décrit le comportement à court et à long terme des systèmes dynamiques. En fait, des études approfondies ont révélé que les phénomènes chaotiques étaient caractéristiques des systèmes non linéaires [3, 8]. Ce qui est apparu comme une surprise pour la plupart des scientifiques et que même des systèmes décrits par des équations simples peuvent avoir des solutions chaotiques [3, 12, 13]. Cependant, tout n'est pas chaotique. Un autre fait curieux est que le même système peut se comporter de façon prévisible ou chaotique, en fonction de petits changements d'un paramètre des équations qui le décrivent. À chaque instant, l'état du système est défini sans ambiguïté par un point dans l'espace de phases. La cinétique du système est décrite par une trajectoire, une courbe dans cet espace. Lorsque le système évolue vers un état final d'équilibre, représenté par un point particulier de l'espace de phases, la trajectoire s'enroule autour de ce point. Le point d'équilibre étant le même pour toutes les trajectoires issues de points de départ pas trop éloignés, ce point constitue un attracteur. Il peut cependant y avoir plusieurs attracteurs, et l'ensemble des points de départ aboutissant à chaque attracteur constitue un bassin d'attraction. Les trajectoires peuvent d'autre part s'enrouler autour d'autre chose qu'un point, par exemple une courbe ou une surface fermée (cercle ou ellipse dans les cas les plus simples, ou un tore ou hyper tore s'il y a plus de deux variables) comme le **Figures 4** colonne (B) et (C). On a alors un attracteur cyclique, ce qui signifie que, quel que soit le point de départ situé dans le bassin d'attraction, la trajectoire finit par rejoindre une figure fermée dit cycle limite, correspondant à l'existence d'une solution oscillante **Figure 3**. Cette figure est parcourue indéfiniment lorsqu'elle est atteinte. Les coordonnées sont alors périodiques. Enfin, on peut observer des attracteurs chaotiques ou étranges. En effet, le chaos se caractérise aussi en étudiant les propriétés géométriques de l'attracteur étrange lui-même. La plupart du temps, il s'agit d'un objet fractal possédant une dimension non

entière appelée dimension fractale, c'est-à-dire un objet composé de sous figures structurées qui s'emboîtent. Les frontières entre ses différentes parties constituent des « lignes fractales » ou des catastrophes. Le franchissement d'une des lignes fait basculer la dynamique du système d'un état d'équilibre local à un autre. L'attracteur chaotique peut être visualisé comme un seul fil tordu dans un nombre infini de boucles entrelacées. Il présente des caractéristiques frappantes telles que, par exemple, l'auto similitude, c'est-à-dire la propriété d'exposer la même structure, dans un sens statistique [2, 3]. On se servira de cette propriété pour étudier la sensibilité des trajectoires aux conditions initiales dans un système présentant un tel attracteur. Le spectre de puissance de la transformée de Fourier d'un signal constitue un moyen commode et largement utilisé pour caractériser un régime dynamique. Un spectre de raies est la signature d'un régime soit périodique (une seule fréquence fondamentale) soit quasi périodique (plusieurs fréquences fondamentales non commensurables et certaines de leurs combinaisons linéaires). L'existence du chaos, quant à elle est associée à la présence dans le spectre d'un massif, appelé parfois bande large, auquel se superposent éventuellement certaines raies. On est alors conduit à se demander s'il ne serait pas judicieux de quantifier cette observation qualitative, le spectre de Fourier fournissant l'élément de base d'une mesure du chaos.

4. Conclusion

Cet article nous a permis de présenter la méthodologie et les résultats d'expérimentation d'une classe optimale d'oscillateurs chaotiques à résistance négative. La découverte d'une grande variété de nouveaux phénomènes chaotiques, repose dans ce cas sur une meilleure stratégie de paramétrage de la résistance négative. Bien que la simplicité structurelle de cette classe d'oscillateurs soit optimale, et que la grande variété de topologies chaotiques offertes soit expérimentalement prouvée, des études analytiques et numériques plus poussées restent à mener pour une estimation des grandeurs caractéristiques décisionnelles telles que : la densité de puissance spectrale, le diagramme de bifurcation, l'exponentiel de Lyapunov, etc. Voilà autant de propriétés des ORN/OCN encore mal connues et à explorer pour valider l'hypothèse des prototypes d'oscillateurs chaotiques optimaux, qui se distinguent de ceux existants par un ordre dynamique et coût de mise en œuvre minimaux, tout en offrant un niveau optimal d'étrangeité chaotique.

Références

- [1] - C. POINT, "Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste", Paris : Gauthiers-Villard, (1892)
- [2] - B. VAN DER POL, "A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations", (1920)
- [3] - O. BELLO, J. MBIHI et N. L. NNEME, "Novel Chaotic Strange Phenomena in Piecewise Linear Negative Resistance / Conductance L-C Oscillators Feasibility Study and Virtual simulation", WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, (2018) 1 - 9
- [4] - J. C. SPROTT et S. J. LINZ, "Algebraically simple chaotic flows", *International Journal of Chaos Theory and Applications*, (2000) 1 - 20
- [5] - O. E. RÖSSLER, "Continuous chaos, Four prototype equations", *Annales N. Y. Academic Science*, (1976) 376 - 392
- [6] - P. J. R. MBOUPDA, Ç. SERDAR, T. K. SIFEU, A. TIEDEU et M. KOM, "Passive-active integrators chaotic oscillator with anti-parallel diodes : analysis and its chaos-based encryption application to protect electrocardiogram signals ", Springer, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, pp. doi.org/10.1007/s10470-019-01557-0, (2019)
- [7] - X. LUO, C. WANG et Z. WAN, "Grid multi-wing butterfly chaotic attractors generated from a new 3-D quadratic autonomous system", *Nonlinear Anal. Model. Control*, Vol. 9 (2) (2014) 272 - 285

- [8] - N. INABA, T. SAITO et S. MORI, "Chaotic phenomena in a circuit with negative resistance and an ideal switch of diodes", Vol. 70 (8) August (1987) 744 - 754
- [9] - J. KENGNE, Z. T. NJITACKE et H. B. FOTSIN, "Dynamical analysis of a simple autonomous jerk system with multiple attractors, Nonlinear Dynamics", *An International Journal of Nonlinear Dynamics and Chaos in Engineering Systems*, Vol. 83, (2016) 751 - 765
- [10] - A. ARNEODO, P. COULLE et C. TRESSER, "Possible new strange attractors with spiral structure", *Commun. Math. Phys.*, Vol. 79, (1981) 573 - 579
- [11] - T. L. VINCENT et J. YU, "Control of a chaotic system", *J. of Dynamics and Control*, Vol. 1, (1991) 35 - 52
- [12] - B. C. BAO, H. BAO, N. WANG, M. CHEN et Q. XU, "Hidden extreme multistability in memristive hyperchaotic system", *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 94, (2017) 102 - 111
- [13] - J. KENGNE, "Coexistence of chaos with hyperchaos, period-3 doubling bifurcation, and transient chaos in the hyperchaotic oscillator with gyrators", *International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering*, (2015) 1 - 17