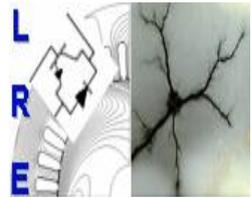




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



# Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :  
**ABERKANE Mohammed Nadjib**

## Intitulé

**Décomposition des signaux du courant de fuite par l'approche  
Recurrent plot pour l'estimation de la sévérité de pollution**

Directeur(s) du mémoire :

R.Ibtiouen	Professeur	ENP
S. Mekhtoub	Professeur	ENP
O.Touhami	Professeur	ENP

**ENP 2013**

## *Remerciements*

*Je remercie le bon Dieu miséricordieux et clément, qui me protège et qui m'a guidé dans la bonne voie des sciences et de la connaissance.*

### ***A mon promoteur Mr A.Mekhaldi***

*Pour ses précieux conseils durant ce travail et pour ses qualités humaines: modestie, bienveillance et moralité qui resteront pour moi un exemple à suivre dans ma vie professionnelle. Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner ma grande reconnaissance et ma profonde estime.*

### ***A mon co-promoteur Mr B.Moula***

*Vous avez veillé sur la réalisation de ce travail et vous m'avez mené à bon escient. Sans votre aide précieuse, vos suggestions, vos conseils judicieux et vos encouragements incessants, ce travail n'aurait pu être accompli. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de notre sincère reconnaissance et de notre respect.*

*Je remercie aussi le professeur **A.BOUBAKEUR**, Monsieur **M.TEGUAR** et Monsieur **R.Ibtioun** professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs conseils combien utiles, leurs grandes disponibilités et leurs qualités humaines.*

*Je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.*

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<b>Chapitre I: Etude théorique de la technique Recurrent plot et son complément Cross recurrent plot</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique de la technique Recurrent plot.....	4
I.3 La naissance de la méthode Recurrent plot.....	5
I.4 Systèmes dynamiques.....	7
I.5 La méthode recurrent plot.....	9
I.6 Normes des structures de récurrences.....	12
I.7 Les structures dans les diagrammes de récurrences.....	14
I.7.1 Paramètres des structures de récurrences.....	16
I.8 Analyse quantitative du diagramme de récurrences [RQA].....	18
I.8.1 Les mesures de la RQA.....	19
I. 9. La technique Recurrent Plot appliquée directement au signal du courant de fuite.....	20
I.10 La technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite.....	21
I.11 Récurrence plot croisée [cross recurrence plot].....	22
I.12 La ligne de synchronisation dans le CRP.....	23
I.13 Conclusion.....	24
<b>Chapitre II. La méthode Cross recurrent plot appliquée au signal du courant de fuite et de la tension appliquée</b>	
II.1 Introduction.....	28
II.2 Modèle du courant de fuite et de la tension appliquée.....	29
II.3 Caractéristique courant-tension différent régimes de la décharge.....	30

II.4 Notions sur les décharges partielles.....	32
II.5 Application de l'approche Cross recurrent plot.....	33
II.5.1 Mesures de CRP.....	35
II.5.2 Application de la méthode CRP directement aux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.....	37
II.5.3 Application de la méthode CRP aux détails des signaux du courant de fuite et de la tension de appliquée.....	36
II.6. CRP appliqué aux détails D1 des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée pour chaque classe de pollution.....	38
II.6.1 Classe de pollution 1.....	40
II.6.2 Classe de pollution 2.....	42
II.6.3 Classe de pollution 3.....	44
II.6.4 Discussion des resultats.....	46
II.7 Influence de la conductivité de la solution polluante.....	48
II.8 Conclusion.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	52

Références bibliographiques

Annexe

## **Introduction générale :**

Le contournement des isolateurs en haute tension est toujours un des problèmes les plus importants pour la transmission électrique de puissance [1]. Afin d'éviter les problèmes qui en découlent, plusieurs mesures ont été adoptées comme le revêtement hydrophobe de la surface de l'isolateur et le nettoyage régulier. Les résultats de ces derniers ne sont pas très satisfaisants. Car ils sont tributaires des résultats de détection de l'état de surface de l'isolateur considéré. C'est pour cela qu'il est urgent de développer des systèmes fiables d'évaluation de l'état de surface de ces derniers [2].

Les expériences ainsi que les études en laboratoire montrent que l'évolution du courant de fuite est étroitement liée au processus de développement du contournement final [1,2]. En plus, le courant de fuite est facile à surveiller continuellement en pratique [4]. Ainsi la mesure et l'analyse du signal du courant de fuite ont attiré l'attention de beaucoup de chercheurs comme T. Suda et al [3].

Dans le domaine de la haute tension existe des équipements (HT et THT) qui sont présents dans les réseaux aériens de transport d'énergie électrique ou ils sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent un pourcentage relativement faible dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes [4]. Par définition, leur rôle est d'assurer à la fois le support mécanique des parties portées à la haute tension et l'isolation électrique de ces dernières, avec les parties mises à la terre ou énergisées [5].

Les isolateurs présentent une vulnérabilité quasi insurmontable. Leur surface est soumise à la pollution, ce qui dégrade sensiblement leurs performances diélectriques. L'influence de cette couche de pollution dépend de sa composition et de son volume, eux-mêmes dépendants de l'environnement et du climat (désertique, arctique, tropical, côtier ou atmosphère à fort degré de pollution industrielle). Généralement une contamination continue (contamination saline, glace, pollution hivernale, poussière humidifiée...) donnera naissance à des arcs électriques partiels à des niveaux de tension plus faibles que pour un isolateur « propre ». Ces arcs se développeront rapidement, jusqu'à la rupture diélectrique de l'isolation [6].

L'étude du phénomène du contournement reste toujours complexe malgré toutes les recherches [4] établies pour comprendre le développement des décharges électriques sur la surface polluée qui peuvent être considérées comme un signe précurseur, juste avant le contournement total de l'isolateur. Aussi, il devient nécessaire de développer des méthodes de diagnostic [4] pour étudier la sévérité de pollution des isolateurs en vue de minimiser les risques de dégradation des matériels d'exploitation et prévoir des entretiens imminents. Le but des diagnostics est d'obtenir généralement des informations importantes au sujet de l'état des systèmes techniques [5]. Dans le cas des isolateurs cela signifie que les diagnostics servent pour savoir si et quand l'entretien (lavage) ou le remplacement de l'isolateur devrait être fait.

Notre travail présente une étude de la sévérité de pollution des isolateurs en fonction de la classe de pollution, de la conductivité de la solution polluante, pour comprendre l'impact de celles-ci sur les performances électriques de l'isolateur,. Ainsi, on propose d'étudier les caractéristique non linéaires du courant de fuite en analysant ses composants de haute fréquence par la techniques Recurrent Plot, et l'analyse quantitative qui lui est associée RQA pour prévoir le contournement et pour surveiller l'état pollué des isolateurs, ainsi traitant les deux signaux du courant de fuite et de la tension de contournement par la méthode Cross recurrent plot et son analyse CRQA qui lui est associée[8].

Le premier chapitre expose d'une manière succincte la théorie du recurrent pot et les systèmes dynamiques, puis l'analyse qualitative par la technique « RP » et son analyse quantitative « RQA ». Ensuite, les résultats du traitement de signal du courant de fuite par la technique recurrent plot, cette dernière est exploitée pour déterminer un critère de diagnostic d'apparition des décharges électriques menant au contournement, ainsi nous introduisant la théorie du cross recurrent plot et l'analyse de la ligne de synchronisation.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons dans un premier temps, la caractéristique de décharge du courant de fuite et de la tension appliquée, puis l'analyse quantitative du Cross recurrent plot CRQA, Nous procédons ensuite d'appliquer la méthode Cross recurrent plot directement sur les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, puis nous l'appliquons sur leurs détails. Et enfin, nous étudions l'influence de la class de pollution sur l'approche Cross recurrent plot.

# *Chapitre I*

*Etude théorique de la  
technique Recurrent plot  
et son complément Cross  
recurrent plot*

## **II. 1. Introduction :**

La méthode Recurrent plot concerne l'aspect qualitatif de la théorie du chaos. En se basant sur l'étude de la récurrence d'états d'un système dynamique, cette méthode permet une reconstruction sans pertes des données, et donne un aperçu immédiat de l'état du processus étudié. Par ailleurs, l'analyse quantitative de récurrence (RQA), permet de quantifier le comportement d'un système dynamique dans un espace de phase bien défini, en décrivant ces récurrences à l'aide de différentes mesures plus ou moins complexes. En réduisant le signal sur un certain nombre de points, il perd un nombre plus ou moins important d'informations.

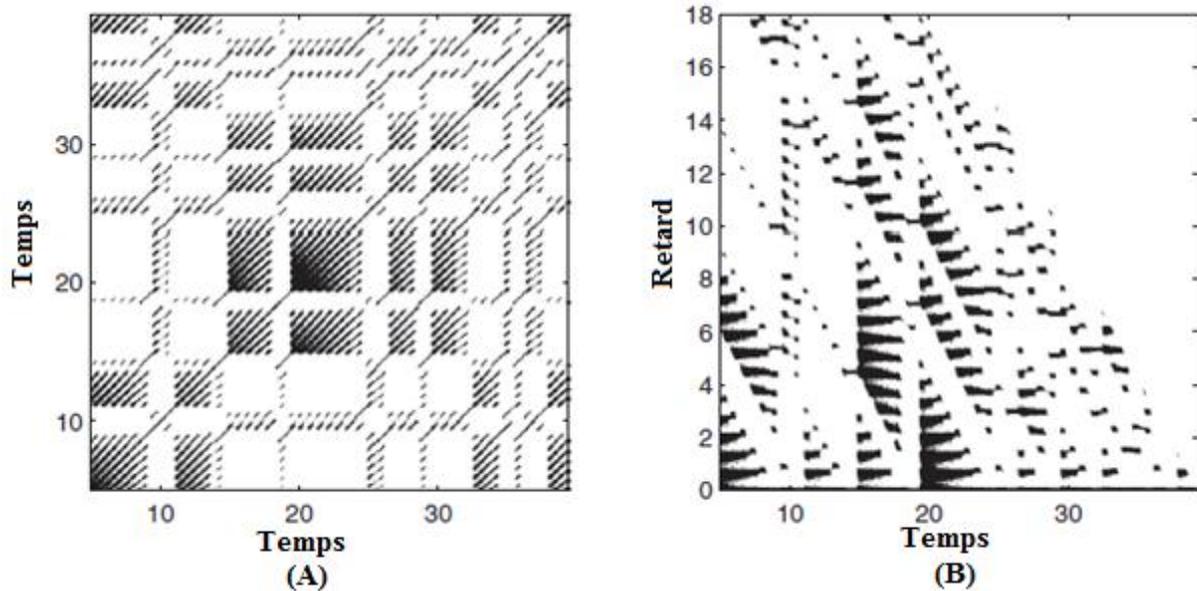
Afin de prévoir le contournement et pour surveiller l'état pollué des isolateurs, on propose d'étudier les caractéristique non linéaires du signal du courant de fuite en analysant ses composants de haute fréquence par la technique Recurrent Plot, et l'analyse quantitative qui lui est associée RQA. Ainsi, nous introduisons la théorie de la méthode Cross recurrent plot qui est une généralisation de la méthode recurrent plot.

## **II. 2. Historique de la technique Recurrent Plot :**

La technique est connue sous le nom de recurrent plot depuis 20 ans. Cependant, des récurrences ont été étudiées et utilisées bien avant. Le calendrier du Maya est un exemple où nous pouvons trouver le principe de récurrence comme idée fondamentale. Ainsi, nous rencontrons des récurrences dans différents aspects de la nature et de la vie sociale.

Avec la naissance des mathématiques modernes au 19ème siècle les récurrences ont été découvertes pour être une propriété fondamentale des systèmes dynamiques non linéaires. Poincaré a formulé sa thèse dont le travail consiste à traiter les systèmes à trois corps restreints, qui a gagné un prix commandité par Oscar II de la Suède et de la Norvège. Poincaré a constaté qu'en négligeant une certaine trajectoire exceptionnelle, dont l'occurrence est infiniment improbable, il peut montrer, que le système se reproduit infiniment et plus étroitement à son état initial [9].

Dans les années suivantes, plusieurs travaux mathématiques importants traitants les récurrences ont été effectués. Cependant, il fallait attendre ce dernier demi-siècle pour que les récurrences soient largement étudiées sur des simulations numériques et de vraies mesures. L'introduction des ordinateurs puissants a permis la faisabilité des études numériques qui étaient assez couteuses; à titre d'exemple, prenant le système de Lorenz, qui était l'un des premiers modèles numériques montrant les modèles de récurrence et leur comportement chaotique [10]. Des récurrences ont été analysées par les premières cartes de retour [11], les RPs de séparation de temps de l'espace [11], et les statistiques de retour du temps de récurrence [12]. La croissance persistante de la puissance d'ordinateur a permis plus d'investigations, comme la comparaison de toutes les combinaisons possibles des paires d'une série de données. Ceci peut être fait en utilisant la matrice de similitude. L'idée consiste qu'une distance métrique puisse être tracée de nouveau par le théorème de Pythagore [13].



**Fig I.1 (A) Recurrence plot; (B) Close returns plot, de l'exposant du système de Lorenz ; la ligne diagonal représentée dans (A) correspond à la ligne horizontale représentée dans (B). Les paramètres de RP étaient:  $m = 5$ ,  $\tau = 5$ ,  $\varepsilon = 7.6$ .**

Dans le domaine de la théorie du chaos, les récurrences ont trouvé leur chemin quelques années après comme Recurrent Plot [13-14] (Fig I.1.A). Maintenant le but était de comparer tous les états possibles représentés par une trajectoire haut-dimensionnelle de l'espace de phase. Au cas où la trajectoire passerait par une région dans l'espace de phase où elle a passé avant, nous la considérons comme récurrence. Une récurrence signifie que l'état récurrent est de façon ou d'autre semblable à un ancien état. Cette définition de similitude ou de ressemblance offre la marge de sécurité pour adopter la méthode aux besoins de la recherche.

Ainsi, la technique Recurrent plot n'était pas vraiment nouvelle. L'intention d'Eckmann et al était d'avoir une autre représentation de la dynamique des systèmes. Cependant, ils ont immédiatement noté que d'avantages informations importantes, comme le déterminisme, la divergence et le comportement dérivant, peuvent donner plus d'interprétations aux structures de récurrences. Ils ont également déclaré que la longueur des lignes diagonales des structures de la RP est liée à l'exposant positif de Lyapunov.

## II. 3. La naissance de la méthode recurrent plot :

Par l'utilisation de la matrice de similitude (matrice de ressemblance) comme outil de visualisation des récurrences des systèmes dynamiques dans l'espace de phase, Eckmann et al n'ont pas compté établir une nouvelle direction dans l'analyse de données non-linéaire. Néanmoins, l'année 1987 est considérée comme la naissance des récurrents plots et de leurs quantifications comme outil moderne d'analyse de données non-linéaire. Temps court plus tard, les différents auteurs ont indépendamment présenté un autre genre de représentation des récurrences [15]. Ils n'ont pas opté à comparer tous les points possibles du temps, mais seulement un temps donné dans le passé et le futur (fig I.1.B). Ici un autre nom est apparu: les

retours fermés plot [close returns plot]. Une telle représentation peut être plus intuitive, en particulier pour les débutants, parce que les lignes des structures de récurrences seront parallèles à l'axe des abscisses, aussi la recurrent plot croisée [Cross Recurrent Plot] où on croise deux systèmes d'espace de phase de nature différente et on s'attend à analyser les points du premier système dynamique qui se ferment sur d'autres points du deuxième système dynamique. Cette dernière méthode indique alors les trajectoires de l'espace de phase du premier système dynamique qui visite rudement le même secteur dans l'espace de phase de la trajectoire du deuxième système dynamique.

## **II. 4. Systèmes dynamiques.**

Un système dynamique est un système physique qui évolue soit dans le temps soit par rapport à une autre variable suivant un espace de phase de dimension  $N$ . La trajectoire d'un objet en mouvement dans le temps décrit donc un système dynamique, à titre d'exemple l'évolution d'individus d'une population quelconque dans le temps, ou encore les valeurs d'une fonction (par exemple:  $y = 2x$ ) par rapport à la valeur de  $x$ . [16]

On peut citer trois sortes de systèmes dynamiques: les systèmes aléatoires (aussi appelés systèmes stochastiques), les systèmes déterministes et les systèmes chaotiques.

- A. Les systèmes aléatoires évoluent comme leur nom l'indique au hasard dans tout l'espace sans qu'aucune équation ne les régit, sans qu'aucune prévision exacte ne soit possible dans le temps.
- B. Les systèmes déterministes sont des systèmes régis par des lois mathématiques bien connues. On peut donc prévoir exactement leur évolution dans le temps.
- C. Les systèmes chaotiques, quant à eux, ont un comportement infiniment complexe. La trajectoire qu'ils décrivent se rapproche d'une figure géométrique de structure également infiniment complexe sur laquelle ils semblent errer au hasard, mais sans jamais la quitter, ni repasser deux fois par le même point. Les attracteurs qui caractérisent ces systèmes semblent inclure à la fois des lois déterministes et des lois aléatoires, ce qui rend impossible toute prévision à long terme.

On définira l'espace des phases d'un système dynamique par l'état de son évolution décrite par des lois physiques; à un instant donné l'état du système est caractérisé par un point dans un repère qui lui-même décrit un espace appelé «l'espace des phases de dimension  $N$ ». Quand le temps s'écoule, la variable qui décrit l'état d'évolution du système change de valeur, et le point figurant à l'état du système décrit en général une courbe dans cet espace.

## **II. 5. La méthode recurrent plot:**

La méthode recurrent plot est un outil de visualisation des systèmes dynamiques dans un espace de phase bien définie ; cette méthode a été introduite la première fois par Eckman et al suite au théorème d'encastrement de Takens [17].

En pratique, il n'est pas possible de mesurer toutes les composantes d'un vecteur  $x$  décrit dans un espace de phases de dimensions  $N$ . Ainsi, en 1981, Ruelle et Takens [18]

prouvent qu'il est possible de reconstruire l'attracteur d'une série temporelle. Dès lors, l'espace de phase est reconstruit en un « espace d'immersion » (ou espace de plongement) de dimensions  $m$  inférieur à  $N$  en utilisant les « vecteurs d'immersion » décrit par l'algorithme comme suit :

$$X(t_i) = [x(t_i), x(t_i - 1\tau), x(t_i - 2\tau) \dots x(t_i - (m-1)\tau)] \quad [I.1]$$

Les paramètres décrits ci-dessus caractérisent l'espace d'immersion, ou  $m$  représente la dimension d'immersion,  $\tau$  est le délai temporel, et  $x(t_i)$  est la valeur de la série temporelle à l'instant  $t_i$ .

Ce théorème permet donc de nous renseigner sur le comportement d'un système non linéaire, en l'étudiant sur un espace d'immersion reconstruit à partir d'une seule série temporelle, pourvu que les paramètres et de cette dernière soit connus [19].

Pour l'estimation de ces deux paramètres, différentes méthodes sont adoptées [19-20]. En ce qui concerne la dimension  $m$ , nous citons:

- False Nearest Neighbours ;
- Bad Prediction Method ;
- Fractal and Correlation Dimensions.

Pour le calcul de  $\tau$ , nous pouvons utiliser les méthodes suivantes :

- Autocorrelation and Power Spectrum Functions ;
- Average Mutual Information (AMI) Function ;
- Degree of Separation Function ;
- Les exposants de Lyapunov.

Ces méthodes sont des méthodes analytiques. Cependant, il existe des méthodes empiriques, nous citons : « les réseaux de neurones » et les algorithmes génétiques. Tout de même, il existe une nouvelle méthode reconnue pour son efficacité, elle permet de déterminer à la fois ces deux paramètres, elle est appelée la « C-C Method ».

Recurrence plot est définie par l'équation suivante :

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N \quad [I.2]$$

Où  $N$  est le nombre de points  $x_i$  mesurés,  $\varepsilon$  est le seuil,  $\Theta$  est la fonction échelon.

Le RP correspondant est construit comme suit : chaque point de l'espace de phase  $\{x_i\}_{i=1}^N$  est testé s'il est proche ou non d'un autre point. Ainsi, si la distance entre ces deux points est inférieure à un seuil  $\varepsilon$  prédéfini, les points sont dits récurrents et sont associés à un

point noir. Dans le cas contraire, ils sont non récurrents et sont associés à un point blanc. Cela se traduit par une matrice  $N*N$ .

Pour  $\varepsilon$  fixe (pour les états voisins de  $\varepsilon$ ), on introduit la notion suivante :

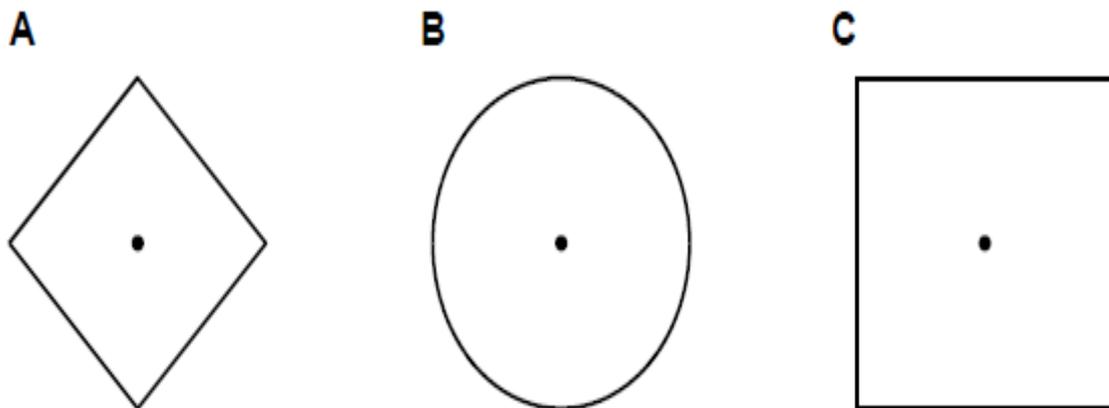
$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \Leftrightarrow R_{i,j} = 1 \quad [I.3]$$

Puisque  $CR_{i,j}=1$  par définition, le diagramme de récurrence se caractérise par une ligne noire diagonale, appelé « la ligne d'identité » (Line Of Identity, [LOI]), qui fait un angle de  $\pi/4$ .

Le paramètre  $\varepsilon$  est crucial lors d'un diagramme de récurrence. Ainsi, une attention spéciale doit lui être accordée. Si la valeur  $\varepsilon$  est trop grande, la plupart des points seront voisins à d'autres points, ce qui produira un diagramme condensé, et donc des points non pertinents. D'autre part, si la valeur de  $\varepsilon$  choisie est trop petite, on peut perdre la plupart des points récurrents, et donc aucune information utile ne sera tirée. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode standard pour choisir la valeur de  $\varepsilon$ . La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à  $0.25\sigma$ ,  $\sigma$  représente la déviation standard du signal étudié STD [std].

## II. 6. Normes des structures de récurrences :

Afin de calculer les récurrences plots, la norme doit être choisie. Les normes les plus connues dans les structures de récurrences sont: L1-norm (minimum norm), L2-norm (Euclidean norm) et  $L_\infty$ -norm (maximum ou norme suprême). Les voisinages de ces normes ont différents modèles représentés par la figure I.12. Considérant un seuil  $\varepsilon$  fixe,  $L_\infty$ -norme possède plus de points récurrents, L1-norm a quelque points récurrents et L2-norm une quantité intermédiaire de points récurrents [21].



**Fig I.2 Les trois normes générales de voisinages des structures de récurrences  
(A) L1-norm; (B) L2-norm; (C)  $L_\infty$ -norm.**

A partir de la base de donnée b.Moula, on a tiré un signal du courant de fuite d'une pollution non-uniforme de conductivité 3.5mS/cm, et on a appliqué la méthode recurrent plot

directement sur ce signal en changeant les trois normes cités ci-dessus et comparants les structures de récurrences obtenues.

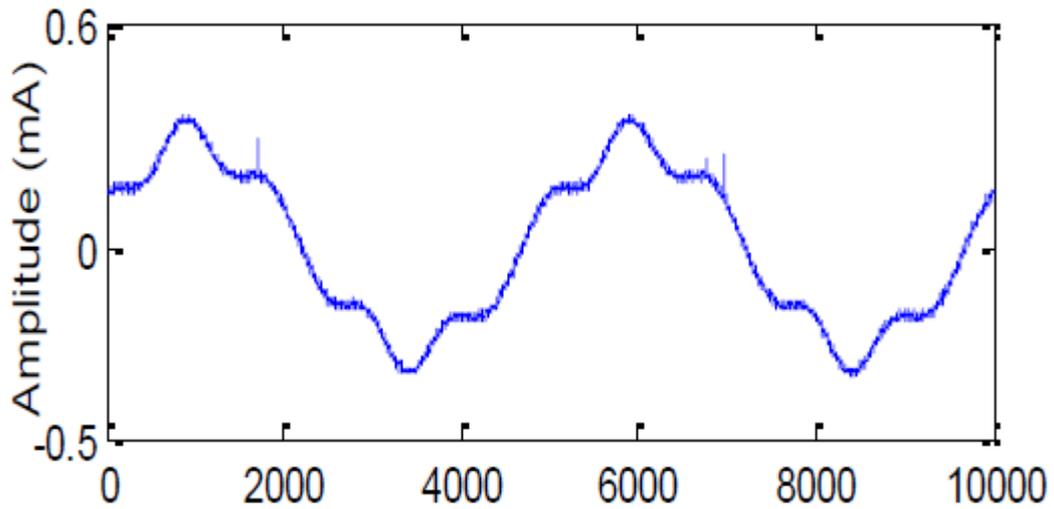
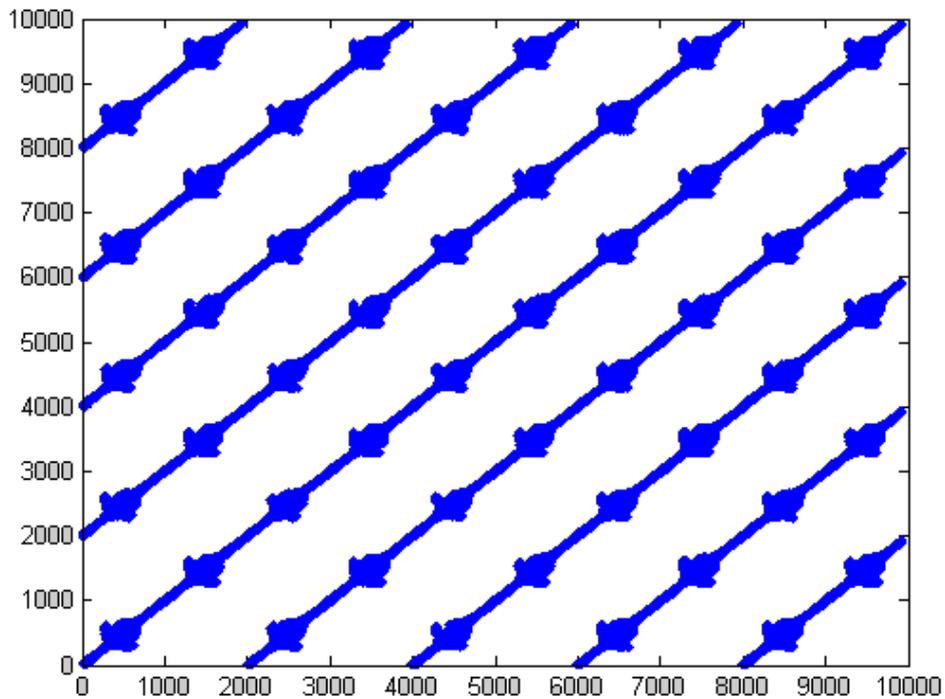
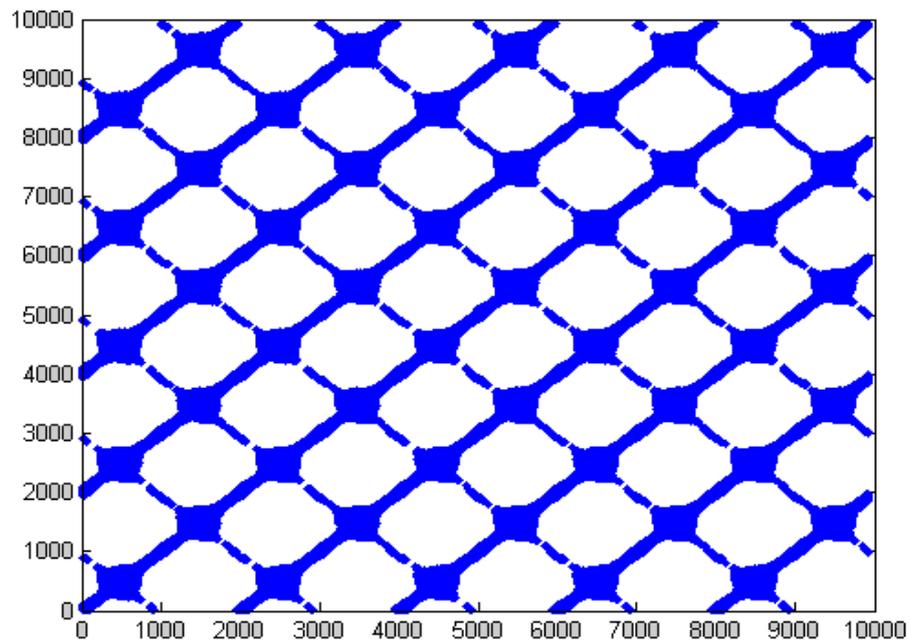


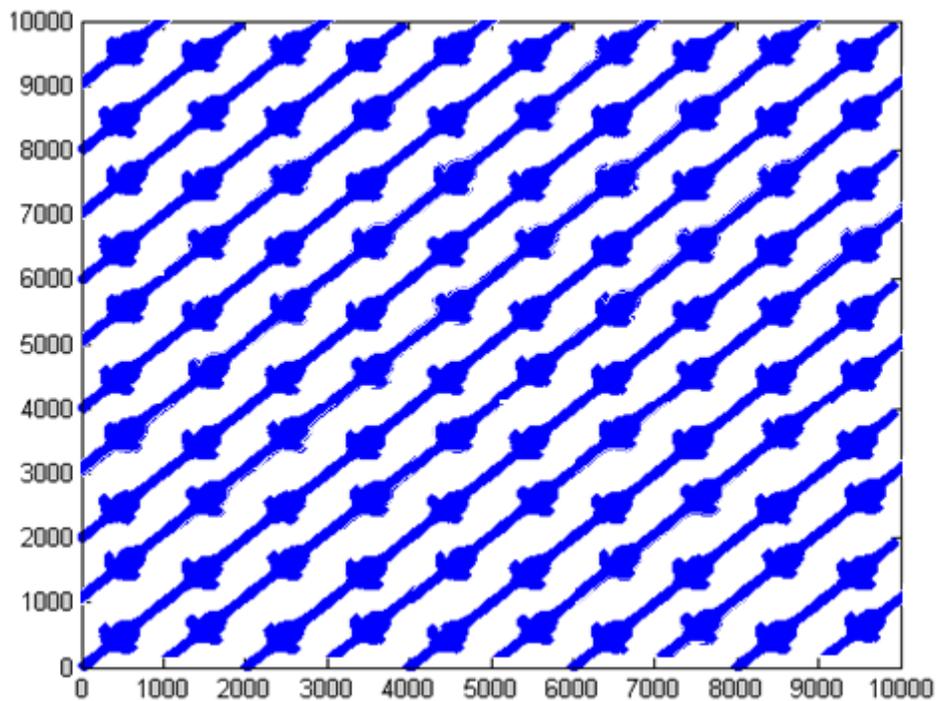
Fig II.3 Echantillon d'un signal du courant de fuite



(A) RP d'un signal du courant de fuite L1-norm (minimum norm)



(B) RP d'un signal du courant de fuite L2-norm (euclidean norm).



(C) RP d'un signal du courant de fuite  $L_{\infty}$ -norm (maximum norm).

Fig I.4 Recurrent Plot d'un signal du courant de fuite selon les trois normes

(A) L1-norm ; (B) L2-norm ; (C)  $L_{\infty}$ -norm, paramètres du courant de fuite

La figure I.3 représente l'échantillon du signal du courant de fuite décrit avant, et la figure I.4 représente les structures de récurrences selon les trois normes. D'après les trois structures de récurrences, dans la structure (A) L1-norm qui correspond à minimum norm on observe des lignes diagonales parallèles à la LOI (ligne d'identité) avec faible présence des points récurrents, et dans la structure (B) L2-norm qui correspond à euclidean norm on observe toujours plus de lignes diagonales parallèles à la LOI, et avec plus de points récurrents en comparants avec la structure précédente, ainsi quelques segments orthogonaux aux lignes diagonales. La structure (C)  $L^\infty$ -norm qui correspond au maximum norme possède un maximum de points récurrents formants plus de lignes diagonales.

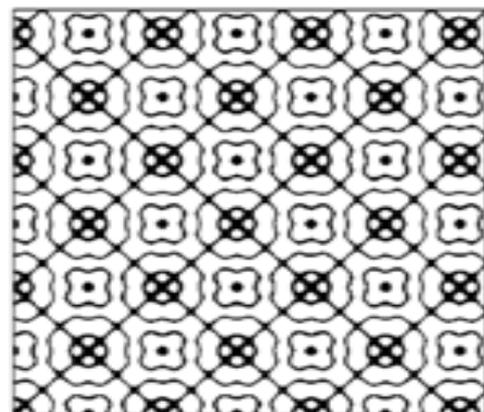
## II. 7. Les structures dans les diagrammes de récurrence

Les structures de récurrences ont des caractéristiques de grandes et de faibles échelles, les premiers modèles des structures topologiques sous forme de texture ont été décrites par Eckman et al (1987). Il existe 4 types de diagrammes de récurrences (figure I.5), et cela dépendamment de leurs structures :

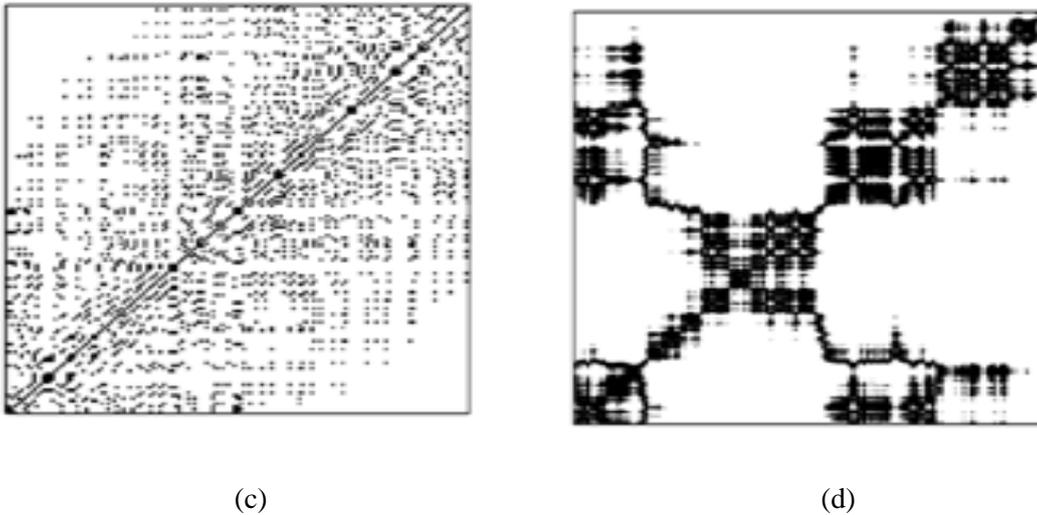
- **diagramme homogène:** processus typique pour les systèmes stationnaires et autonomes dans lesquels, les temps de repos ou souvent appelés les délais temporelles  $\tau$  sont courts. A titre d'illustration nous citons le RP de la série chronologique.
- **diagramme périodique et quasi-périodique :** les systèmes périodiques ont la diagonale orientée comme montrée dans la figure I.5.b, pour un système périodique plutôt clair avec deux fréquences et un rapport de fréquence de quatre, (les lignes diagonales principales sont divisées en quatre lignes courtes croissantes; les rapports de fréquences irrationnels causent des structures récurrentes périodiques plus complexes).
- **diagramme dévié :** la dérive est provoquée par des systèmes qui ont des paramètres lentement variables, tel que changements (adiabatiques) lents éclairant les coins hauts gauches et bas droits des structures de récurrences.
- **diagramme interrompu :** les changements abrupts causent des surfaces blanches sur le diagramme [22].



(a)



(b)



**Fig I.5 Caractéristiques topologiques des diagrammes de récurrence**

**(a) Homogène, (b) périodique, (c) dévié et (d) interrompu.**

**II.7.1 Paramètres des structures de récurrences :**

La technique RP consiste donc en points isolés, points joints dans des segments de lignes et espaces blancs. Les points denses et les segments blancs reflètent dans notre cas la caractéristique non linéaire du signal du courant de fuite. Un « point récurrent » signifie que la distance entre deux vecteurs voisins dans l'espace de phase est inférieure ou égale à la valeur seuil  $\epsilon$ . La diagonale principale existe dans toutes les structures, ce qui correspond au fait que la distance entre le vecteur et la diagonale elle-même est nulle. Le point à la plus haute densité indique que la distance entre les vecteurs reconstruits dans l'espace de phase change légèrement. Il indique que les vecteurs incrustés sont très similaires aux vecteurs voisins dans  $m$ -dimensions d'espace de phase [23].

Les points à faible densité représentent un dispersément évident dans le processus. Alors que les espaces blancs indiquent un changement rapide d'amplitude. Nous résumons les significations à propos de la topologie des structures du diagramme de récurrence dans le tableau suivant :

<b>Exemples</b>	<b>Signification</b>
<b>(1) Homogénéité</b>	<b>Le processus est stationnaire.</b>
<b>(2) Eclaircissement des coins haut gauche et bas droit</b>	<b>Données non stationnaires ; le processus contient un mouvement ou un décalage.</b>
<b>(3) Disruptions (bandes blanches)</b>	<b>Données non stationnaires ; certains état sont rares ; présence de transitions.</b>

<b>(4) Modèle périodique/ quasi-périodique</b>	<b>Processus cyclique ; la période correspond à la distance entre les lignes ; différentes distances entre les lignes diagonales révèlent un processus quasi-périodique.</b>
<b>(5) Points isolés</b>	<b>Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.</b>
<b>(6) Points denses</b>	<b>La densité des points indique l'intensité du processus étudié. Si les points gagnent en densité, l'activité du processus étudié s'intensifie.</b>
<b>(7) Lignes diagonales (parallèles à la LOI)</b>	<b>L'évolution est similaire à d'autres périodes; le processus peut être déterministe. Si ces lignes diagonales sont présentes à côté des points isolés, le processus peut être chaotique.</b>
<b>(8) Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)</b>	<b>L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion insuffisante.</b>
<b>(9) Lignes verticales et horizontales</b>	<b>Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquent des états laminaires.</b>
<b>(10) Lignes longues arquées</b>	<b>L'évolution est similaire à d'autres périodes mais à une vitesse différente ; la dynamique du système peut être variable.</b>

**Fig I.6 Tableau récapitulatif des paramètres des structures de récurrences.**

## **II. 8. Analyse quantitative du diagramme de récurrence (RQA) :**

Dans le but d'aller au-delà de l'analyse visuelle des diagrammes de récurrence, et sachant la difficulté relativement importante à les interpréter, différentes mesures quantifiant les structures précédemment décrites par les diagrammes ont été proposées. J.P. Zbilut et C.L. Jr. Webber [24] ont développé un outil puissant qui quantifie et analyse la structure des RPs, appelé « analyse quantitative de récurrence » (Recurrence Quantification Analysis, (RQA)). Cet outil définit la mesure de complexité en utilisant la densité des points récurrents et les structures des lignes diagonales et verticales dans le diagramme de récurrence. Il permet de déceler les transitions entre les états périodiques, laminaires et chaotiques lors d'un processus donné.

Quelques études basées sur ces mesures de RQA montrent que ces mesures sont aptes à trouver des points de bifurcation, plus spécialement les transitions chaos-ordre. La RQA impose un seuil  $\epsilon$ , ainsi le diagramme de récurrence est symétrique.

### II.8.1 Les mesures de la RQA :

On peut distinguer deux types de mesure RQA, les mesures basées sur les lignes diagonales, ainsi que celles basées sur les lignes verticales (similaires aux lignes horizontales vu la symétrie). [25]

Ainsi, nous introduisons l'histogramme  $P(\varepsilon, l)$ , représentant le nombre total de lignes diagonales de longueur  $l$  dans un RP avec un seuil  $\varepsilon$  fixé :

$$P(\varepsilon, l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1}(\varepsilon))(1 - R_{i+1,j+1}(\varepsilon)) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}(\varepsilon) \quad [I.4]$$

Par analogie, le nombre de lignes verticales est calculé en remplaçant  $l$  par  $v$ , où  $v$  représente la longueur de la ligne verticale. Dans les prochaines équations, on omettra de citer le symbole  $\varepsilon$  des mesures de RQA, pour une raison de simplicité ( $p(l)=p(\varepsilon, l)$ ).

Les principales mesures RQA sont les suivantes :

- **Taux de récurrence (RR)** : Le RR compte le nombre de points noirs dans le RP. Il correspond à la probabilité qu'un état se répète et peut être utilisé pour détecter les changements dans la dynamique du système. Il est défini comme suit :

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\varepsilon). \quad [I.5]$$

- **Déterminisme (DET)** : Il renseigne sur la prédictibilité du processus étudié et représente le rapport entre le nombre de points récurrents formant les diagonales (au moins de longueur  $l_{min}$ ) et le nombre totale de tous les points récurrents. Les signaux non corrélés, ou faiblement corrélés, apparaissent sous formes de courtes diagonales sur les RP. Les signaux déterministes impliquent des diagonales plus longues, ainsi que des points récurrents isolés. :

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N lP(l)}{\sum_{l=1}^N lP(l)}. \quad [I.6]$$

- **Laminarité (LAM)** : Par analogie, le **LAM** représente la quantité de points récurrents obtenus à partir des lignes verticales, il est donné par l'expression suivante :

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N vP(v)}{\sum_{l=1}^N lP(l)} \quad [I.7]$$

Où  $p(v)$  est le nombre de lignes verticales de longueurs  $v$  ayant au moins une longueur de  $v_{min}$ .

- **Longueur maximale des lignes diagonales ( $L_{max}$ )** : définit la moyenne temporelle pendant laquelle deux segments de trajectoire sont proches l'une de l'autre, et peut être interprétée comme la moyenne temporelle de prédiction.

$$L = \frac{\sum_{l=lmin}^N lP(l)}{\sum_{l=1}^N P(l)} \quad [I.8]$$

Au lieu de cette moyenne, la RQA utilise la « longueur maximale » des lignes diagonales, ou son inverse, la « divergence », définie comme suit :

$$L_{max} = \max(\{l_i ; i = 1 \dots N1\}) \quad [I.9]$$

$$DIV = \frac{1}{L_{max}} \quad [I.10]$$

Pour des systèmes déterministes, de longues diagonales sont produites, alors que pour des données aléatoires ou fortement fluctuantes, de courtes lignes diagonales sont produites.

- **Entropie (ENTR)** : L'entropie fait référence à l'entropie de Shannon de la distribution des lignes diagonales du RP : elle reflète la complexité de la structure du RP par rapport aux lignes diagonales. Pour des signaux faiblement corrélés, la valeur **ENTR** est faible, indiquant ainsi une faible complexité.

$$ENTR = -\sum_{l=lmin}^N p(l) \cdot \ln p(l) \quad [I.11]$$

Où  $p(l)$  représente la probabilité que la ligne diagonale ait exactement la longueur  $l$ , et peut être estimée à partir de la distribution de fréquence  $P(l)$ , avec :

$$P(l) = \frac{P(l)}{\sum_{l=lmin}^N P(l)} \quad [I.12]$$

- **Trapping Time (TT)** : Il représente la valeur moyenne temporelle qu'un système se répète sur un seul et même état. Il est défini par l'expression suivante :

$$TT = \frac{n \sum_{v=vmin}^N vP(v)}{\sum_{v=vmin}^N P(v)} \quad [I.13]$$

Où  $P(v)$  est le nombre de lignes diagonales de longueur  $v$ . **TT** estime la moyenne temporelle où le système demeure dans un même état.

- **Recurrence Time Entropy (RTE)** : Le RTE sert à déterminer la périodicité ou la répétitivité d'un signal. Il peut être appliqué aux systèmes dynamiques, ainsi qu'aux processus stochastiques. Il se calcule via l'expression suivante :

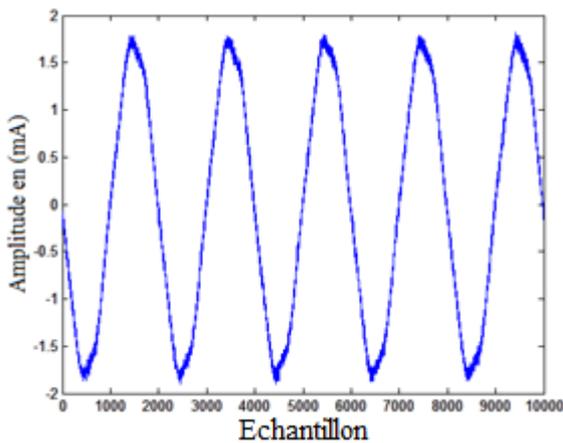
$$RTE = -(\ln T_{max})^{-1} \sum_{t=1}^{Tmax} p(t) \cdot \ln p(t) \quad [I.14]$$

Où  $T_{max}$  est la plus grande période du signal. Le RTE est très utilisé pour détecter les changements subtils dans les dynamiques des signaux stochastiques.

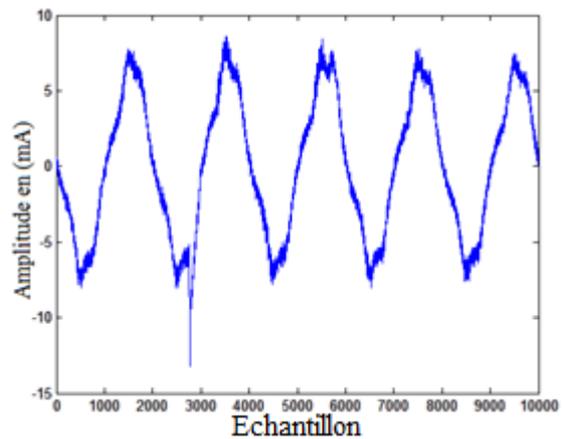
Les indicateurs précédemment cités informent sur les différents états d'un processus étudié, et sont en réalité fortement inter-corrélés. Les mesures basées sur les lignes verticales sont capables de trouver les transitions chaos-chaos. Ces indicateurs permettent alors, d'étudier l'intermittence, même pour les séries de données courtes et non stationnaires. De plus, les transitions chaos-ordre peuvent être identifiées pour des systèmes dynamiques périodiques dont les mesures sont nulles.

**II. 9. La technique Recurrent Plot appliquée directement au signal du courant de fuite :**

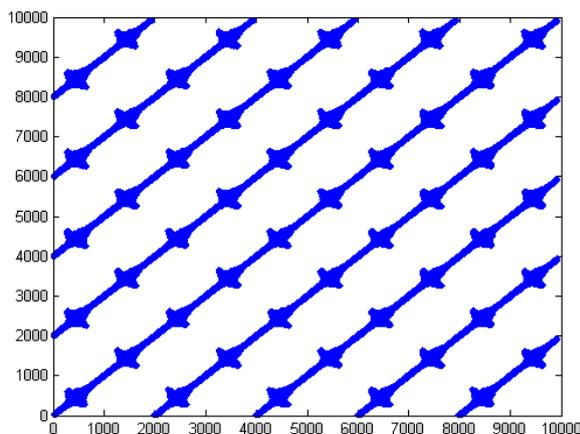
La figure II.7 montre un exemple de la technique RP appliquée directement à un signal du courant de fuite typique lors du processus de contournement. Les figures I.7.a et I.7.b montrent les signaux des courants de fuites correspondant respectivement à un contournement lointain et proche.



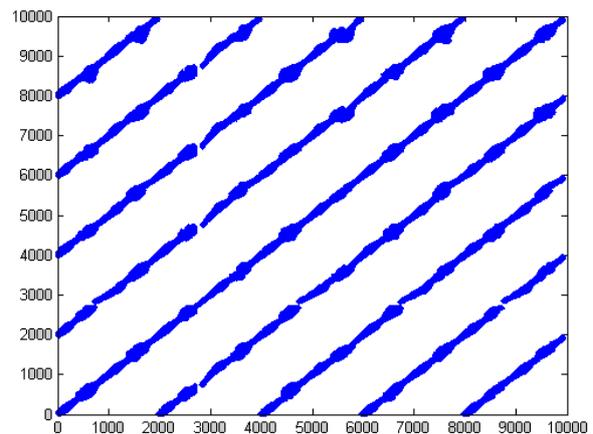
(a) Signal du courant de fuite contournement lointain



(b) Signal du courant de fuite contournement proche



(c) RP du Signal du courant de fuite pour un contournement lointain



(d) RP du Signal du courant de fuite pour un contournement proche

**Fig I.7 Exemple de la technique Recurrent Plot appliquée sur un signal de courant de fuite.**

Pour un contournement lointain correspondant à la figure I.7.c (tension appliquée 5 kVeff), on remarque la présence des lignes parallèles à la diagonale principale (LOI), ce qui indique qu'on est en présence d'un phénomène périodique. Ces lignes sont d'une grande longueur, signifiant ainsi un phénomène déterministe. De plus, on observe de courtes lignes parallèles entre elles et orthogonales à la LOI, ce qui indique une évolution du courant de fuite similaire à d'autres périodes.

Pour un niveau de tension proche de celui du contournement, on remarque que les lignes parallèles à la LOI deviennent plus structurées, en plus on observe l'absence des points à haute densité et l'absence des courtes lignes orthogonales à la LOI, laissant place uniquement aux lignes parallèles à cette dernière. Une telle structure signifie que le processus étudié est déterministe, les deux structures de récurrences sont périodiques qui reflètent bien l'allure du courant de fuite qui n'est pas sinusoïdale mais il est périodique [alterné].

De nouvelles instructions appliquées dans la Toolbox du MatLab sont introduites par Marwan et al pour faciliter la lecture des structures de récurrences, en s'inspirant du traitement d'image deux dimensions. Dans notre cas on a généré un signal de forme sinusoïdale sur deux cents points.

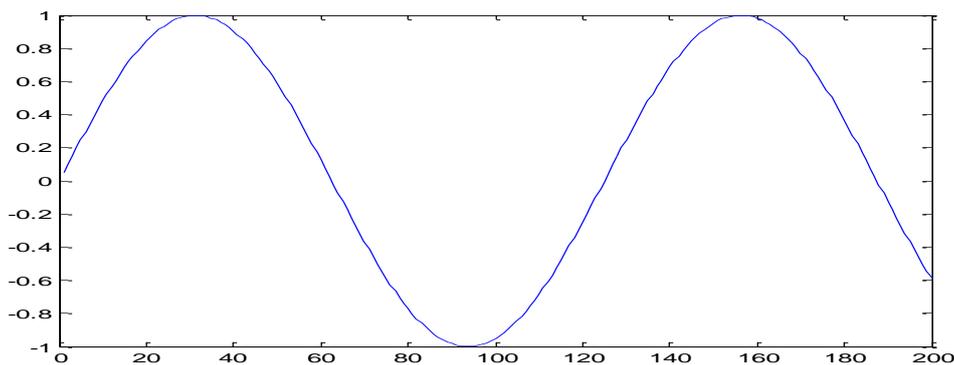


Fig II.8 Exemple d'une sinusoïde  $x(t)$

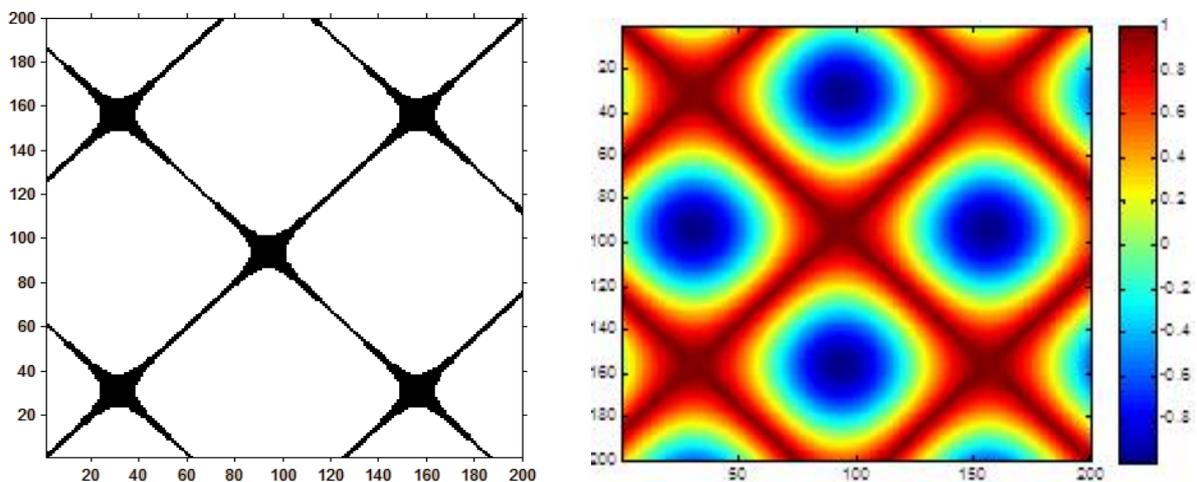


Fig II.9 Les deux structures de récurrences du signal  $x(t)$ .

De la figure I.9 gauche, on remarque des lignes diagonales parallèle à la LOI ce qui indique que l'évolution est similaire à d'autres périodes; le processus est déterministe puisque ses lignes sont trop longues. En plus, on observe la présence des lignes diagonales orthogonale à la LOI qui indique que l'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse; avec une dimension d'immersion insuffisante  $m=1$ , cela explique la périodicité du signal  $x(t)$  choisit.

De la figure I.9 droite, on remarque la ressemblance des deux structures de récurrences seulement avec l'instruction au MatLab `imagesc(1-dist(x)); colorbar; axis square`, on a associé à la structure Recurrent Plot du signal  $x(t)$  une barre colorée qui nous indique la densité unitaire des points récurrents.

Les bandes bleu-foncé dans la figure I.9 droite, peuvent indiquer le fond des expériences, alors que les autres bandes de couleur peuvent indiquer l'occurrence du processus. L'alternance des bandes de couleur reflète le comportement dynamique du processus étudié.

Les lignes diagonales parallèles et orthogonales à la LOI sont représentées par des segments de densité maximale avec une couleur rouge intense, la barre échelon du côté droit nous renseigne sur les bandes bleus intenses entre les sections des diagonales, ces bandes se ressemblent aux bandes blanches représentées à la figure I.9 gauche.

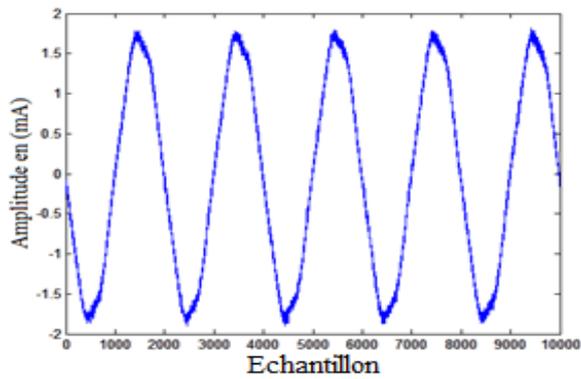
Ces conclusions trouvées ne reflètent pas du tout la réalité du processus de contournement. C'est pourquoi, durant notre étude, on appliquera le diagramme de récurrence aux composantes fréquentielles du signal du courant de fuite.

## **II. 11. La technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite.**

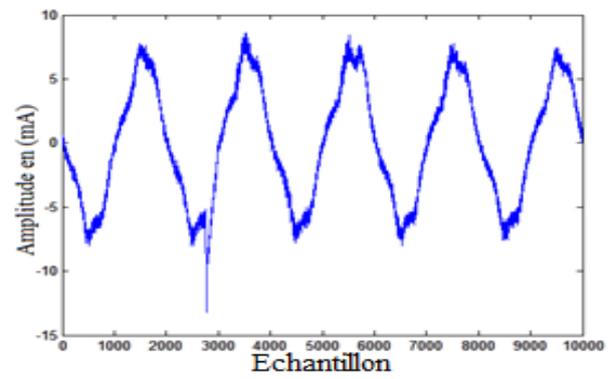
Dans notre travail, on utilise l'ondelette mère de *Daubechies 4*. Nous allons appliquer la transformation en ondelette discrète [DWT] pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'identifier les transitions de décharges pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [26].

D'après les études menées [26], la composante fréquentielle correspondant au détail de plus haute fréquence (25-50 kHz) est la meilleure pour la description de l'activité des décharges sur la surface de l'isolateur, ainsi que pour l'étude du phénomène de contournement car sa structure de récurrence est composée de bandes blanches, indiquant une forte intermittence des décharges, et de points denses. Leur représentation justifie la présence de décharges intermittentes et irrégulières précédant le contournement. Ces décharges vont en s'affaiblissant, laissant place à un seul arc de décharge. Ce dernier, avec une très légère augmentation de la tension, donnera suite à un arc de contournement imminent.

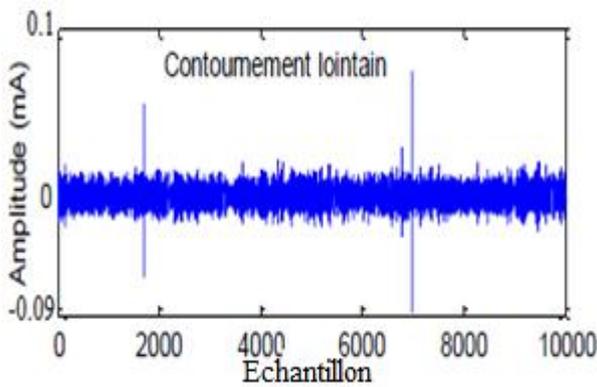
De cela, Les structures de récurrences du signal du courant de fuite pour un contournement proche et un contournement lointain à partir de la base de données b.Moula sont représentées sur la figure I.10, et plus précisément du détail D1 (25-50 kHz).



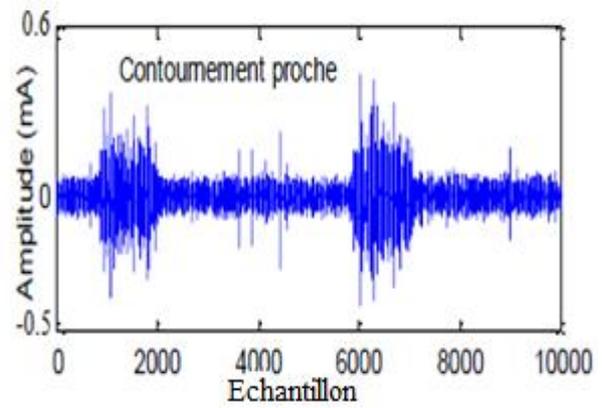
(a) Signal du courant de fuite  
(contournement lointain)



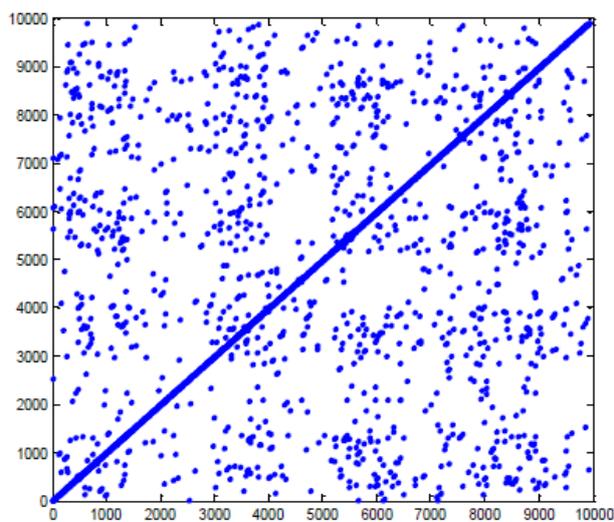
(b) Signal du courant de fuite  
(contournement proche)



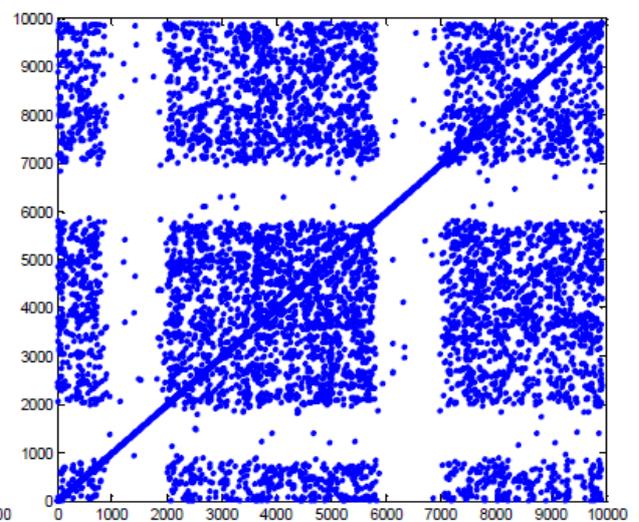
(c) Détail D1 du signal de courant de fuite  
(Contournement lointain)



(d) Détail D1 du signal de courant de fuite  
(Contournement proche)



(e) RP du détail D1 (Contournement lointain)



(f) RP du détail D1 (Contournement proche)

**Fig I.10 RP du détail du signal de courant de fuite.**

Pour un faible niveau de tension appliquée 5kVeff, le RP correspondant au détail D1 (figure I.10.e) est composé de points de faible densité dispersés tout au long du diagramme. Aucune forme particulière n'est visible. Une telle distribution des points démontre parfaitement l'état des décharges sur la surface de l'isolateur. Ainsi, pour un contournement loin, il n'existe que de faibles décharges partielles, ce qui est en accord avec l'observation visuelle.

Pour un niveau de tension proche de celui du contournement, le RP correspondant au détail D1 (figure I.10.f) est composé de deux éléments : les bandes blanches, et les points de forte densité. La présence de bandes blanches indique que le processus étudié est de nature non stationnaire et qu'il présente des états de transition (tableau de la figure I.6). Par contre, les points de forte densité, parfois isolés, indiquent une activité intense sur la surface de l'isolateur.

En pratique, on remarque qu'à l'approche du contournement, une intensification des décharges sur la surface des isolateurs, représentée par les points à forte densité. On observe aussi une intermittence de ces décharges sur la surface de l'isolateur, ceci est décrit sur la figure I.11.b par les bandes blanches. La présence de ses bandes blanches a un rôle primordial pour déceler l'état de transition menant au contournement.

On constate que les résultats obtenus par l'application de la technique des RPs aux composants fréquentiels sont parfaitement en accord avec l'observation expérimentale du phénomène de contournement.

- **Choix des paramètres  $m$ ,  $\tau$  et  $\varepsilon$ :**

D'après les études menées, les valeurs de la dimension d'immersion  $m$  et du retard  $\tau$  n'ont pratiquement pas d'effet sur la structure topologique du RP [27]. Néanmoins, elles sont choisies, via la «**C-C method**», égales à 5 et 20 respectivement [28].

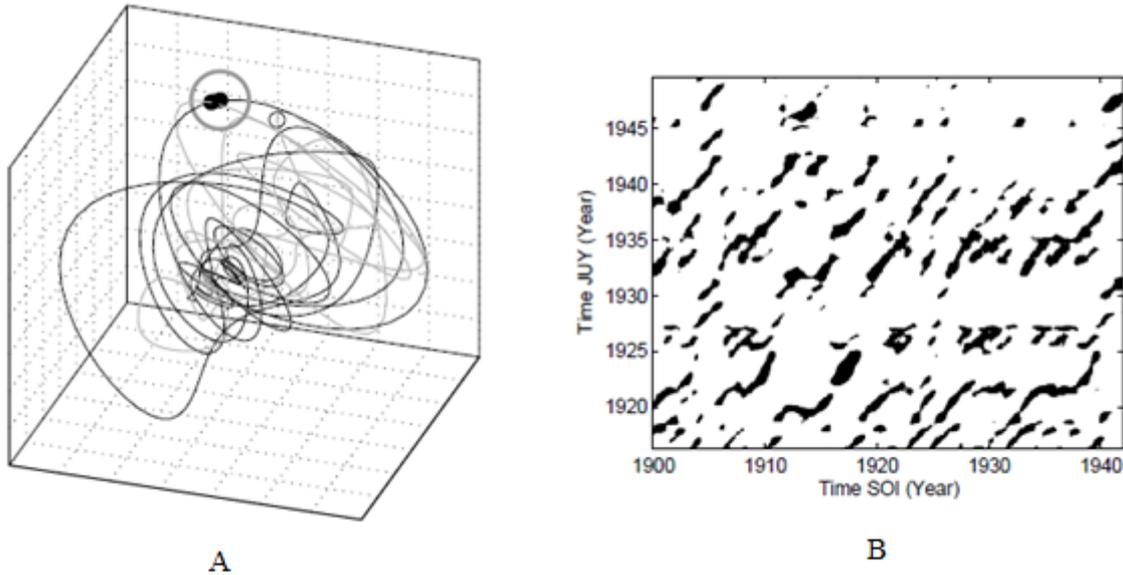
La valeur de  $\varepsilon$  est critique. Si elle est trop grande elle produira des points incohérents et non pertinents. Par contre, si elle est trop petite, l'information utile sera perdue. Cependant, il n'existe pas de méthode standard pour déterminer la valeur optimale de  $\varepsilon$ . Dans notre cas on la choisit égale à  $0,25\sigma$ , où  $\sigma$  est la standard déviation du signal étudié [29].

## II. 12) Récurrence plot croisée [cross recurrence plot] :

Recurrent plot croisée [cross recurrent plot] est un graphique qui montre les séries de temps d'un état dans un système dynamique qui coïncide avec un deuxième système dynamique. Autrement dit, le CRP indique les trajectoires de l'espace de phase du premier système dynamique qui visite rudement le même secteur dans l'espace de phase du deuxième système dynamique. Notant que La longueur des données des deux systèmes peut être différente, menant à une matrice qui n'est pas carrée [CRP].

Commençant par le concept des Recurrents Plots, les chercheurs météorologues ont considéré un espace de phase avec une seule trajectoire  $x_i$  de longueur  $N_x$ , après cela ils ont

ajouté une deuxième trajectoire  $y_i$  de longueur  $N_y$  dans le même espace de phase représentée sur la figure I.11. Un test est fait entre tous les points de la première trajectoire et tous les points de la deuxième trajectoire qui a mené à la construction de la récurrence plot croisée (CRP) [30].



**Fig I.11 (A) Les trajectoires des séries de temps : SOI (southern oscillation index) et JuJy (Argentine) avec un délai de temps  $\tau=7$  mois, (B) son Cross recurrent plot.**

$$CR_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|x_i - y_j\|), \quad x_i, y_i, \in \mathfrak{R}^m. \quad [I.15]$$

$$i=1 \dots N_x, j=1 \dots N_y$$

La définition de la méthode CRP ressemble parfaitement à la définition de la méthode Récurrent plot, si un état de la première trajectoire  $j$  se ferme sur un état de la deuxième trajectoire  $i$  un point noir devrait être assigné à la matrice CR avec location  $(i, j)$ . L'occurrence des voisinages dans les deux trajectoires n'est pas des états récurrents, d'où la matrice [I.15] ne représente pas réellement les récurrences mais les conjonctures des états des deux systèmes.

En conséquent, cette représentation ne représente pas «recurrent plot» néanmoins nous l'appelons cross recurrent plot afin de poursuivre le chemin de généralisation des Recurrents Plots, et parce que l'occurrence du terme « cross recurrence quantification» dans la littérature représente le concept parallèle de la généralisation du concept de la RQA traduite par (Zbilut et al, 1998). Donc les deux vecteurs  $x$  et  $y$  n'ont pas besoin d'avoir la même longueur, d'où la matrice CR n'est pas nécessairement carrée. L'extension des Recurrents Plots est utilisée premièrement par Zbilut et al (1998) pour cross recurrence quantification, et indépendamment de leur travail, le concept du cross recurrence plots des surfaces est traduit par Marwan Norbert (1999) [31].

Il est nécessaire d'adapter les deux trajectoires aux mêmes rangs de valeurs. En utilisant une normalisation à l'aide d'une application qui fixe les quantités des voisinages (FAN : fixed amount of nearest neighbours).

Les valeurs de  $CR_{i,i}(i=1\dots N)$  correspondant à la lignes diagonale principale dans le RP sont pas nécessairement égales à 1 dans la structure du Cross recurrent plot, car la diagonale principale noire disparaît usuellement. La ligne d'identité LOI est remplacée par la ligne de synchronisation LOS et peut finalement ne pas avoir un angle de  $\pi/4$ . Les lignes qui sont beaucoup ou moins diagonalement orientées sont les plus intéressées par les études de ces structures. La représentation des segments des deux trajectoires sont parallèles la plupart des temps, les longueurs de ses lignes sont manifestement reliées à certaines similarité entre les des deux systèmes [32].

Ajoutant que la dilatation ou la compression du temps d'un des deux trajectoires peut causer la distorsion de la ligne diagonale principale.

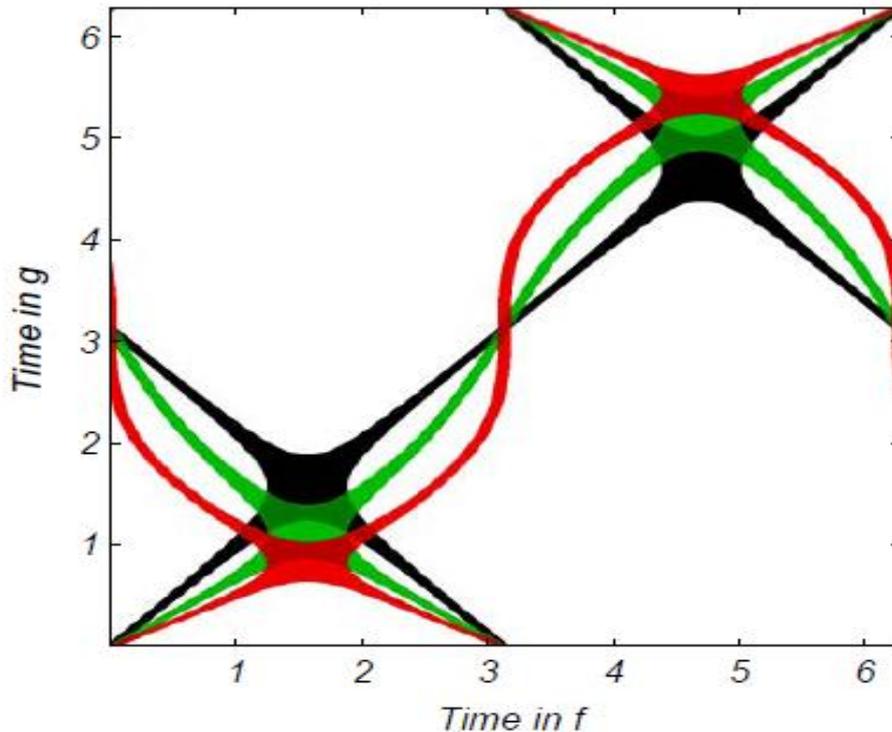
## II. 13. La ligne de synchronisation dans le CRP :

Considérant le RP conventionnel étudié avant et traduit par l'équation [I.15], celui-ci trouve toujours la diagonale principale dans la structure de récurrence car les états  $(i, i)$  sont identiques, donc on peut considérer que le Recurrent Plot est un cas spécial du Cross Recurrent Plot, d'où l'équation [I.16], qui n'a pas usuellement la diagonale principale puisque les états  $(i, i)$  sont pas identiques [33].

$$R_{i,j} = \Theta (\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \quad i, j=1\dots N \quad [I.15]$$

$$CR_{i,j} = \Theta (\varepsilon - \|x_i - y_j\|), \quad i=1\dots N \text{ et } j=1\dots M \quad [I.16]$$

Les Cross recurrent plots correspondantes à deux séries chronologiques ne contiendront pas une diagonale principale, mais si les séries de données sont semblables, c.à.d. avec un rééchelonnement des données, davantage ou peu de lignes continues dans le CRP puissent se produire comme une diagonale principale tordue, cette ligne contient l'information sur le rééchelonnement mené, nous donnons un exemple illustrative montré dans le schéma de la figure I.12, un Cross recurrent plot d'une fonction sinus avec elle-même (c'est le recurrent plot conventionnel) contient une diagonale principale (CRP noir dans la figure II.12), par conséquent, les CRPs dans la fig I.12 sont calculés avec intégration de la dimension une; encore d'autres lignes diagonales se produisent du haut gauche et bas droite comme montré dans la figure I.12 ou un changement dans le domaine temporel mène à une déformation de la ligne de synchronisation. Ces lignes caractérisent la similitude des trajectoires des espaces de phase dans la direction positive et négative de temps.



**Fig I.12 Cross recurrent plot des deux fonction  $f(t)=\sin(\Theta t)$  et  $g(t)=\sin(\Theta t+a.\sin(\alpha t))$ ,**

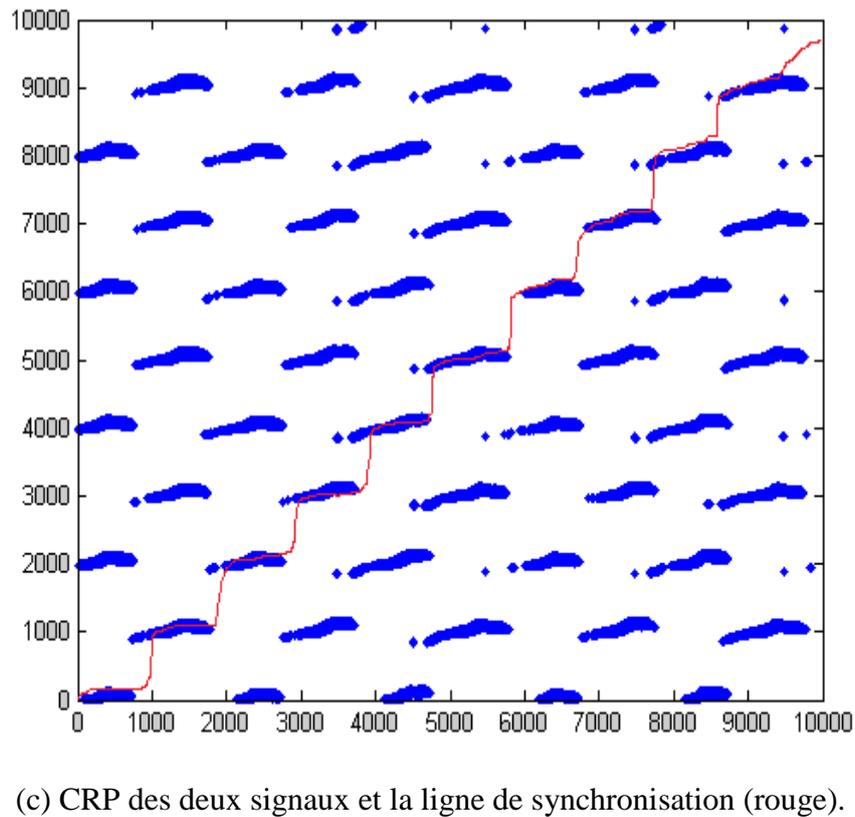
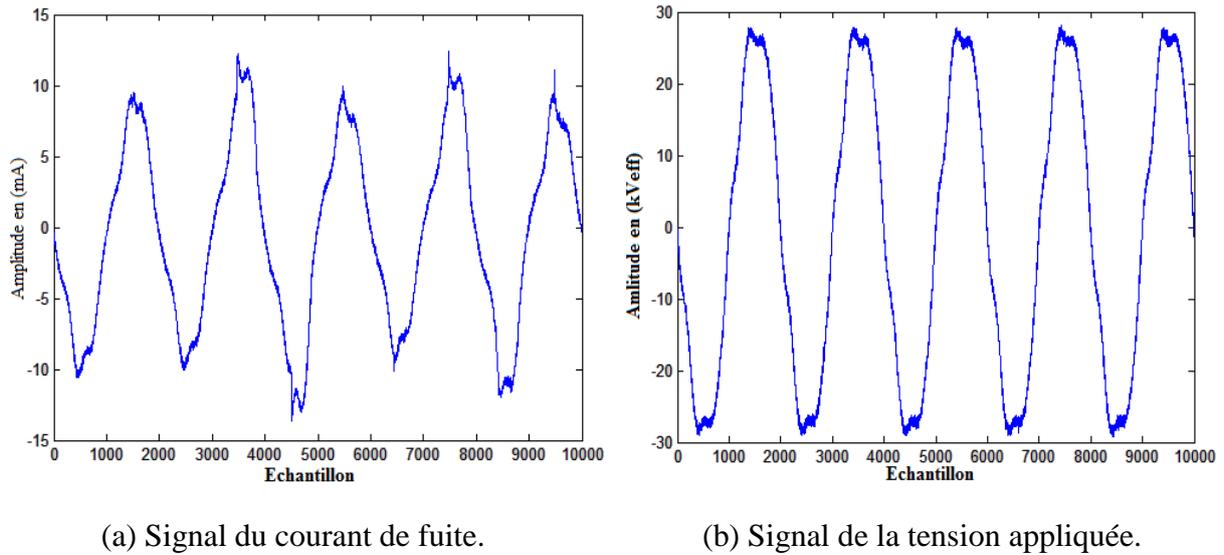
**Ligne de synchronisation pour  $a=0$  CRP noir,  $a=0.5$  CRP vert,  $a=1$  CRP rouge.**

Un rééchantillonnage est mené dans l'axe de temps de la deuxième fonction sinus  $g(t)$  de la façon suivante :

$$\sin(\Theta t) \longrightarrow \sin(\Theta t + a.\sin(\alpha t))$$

Pour la deuxième fonction sinus  $g(t)$ , on fait un rééchantillonnage avec différents paramètres  $\Theta$ ,  $a$  comme conséquence une déformation de la diagonale principale (CRP vert et rouge dans la figure I.12), la ligne tordue contient l'information sur le rééchantillonnage dans laquelle nous aurons besoin afin de resynchroniser les deux séries chronologiques, donc, nous appelons cette diagonale tordue la ligne de synchronisation (LOS).

Appliquant le Cross recurrent plot sur un signal du courant de fuite et un signal de ca tension appliquée, après cela on estime la ligne de synchronisation LOS.



**Fig I.13 CRP du signal du courant de fuite et de la tension appliquée et leur ligne de synchronisation.**

Les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée sont représentés sur la figure I.13 (a) et (b) respectivement, ils sont extraits de la base de données b.Moula (annexe A). La figure I.13 (c) représente leur structure de Cross recurrent plot, on observe des petits segments horizontaux parallèles entre eux ce qui indique qu'on est en présence d'un phénomène périodiques. Les segments horizontaux sont la composition des points récurrents de faibles densités indiquant la faible intensité du processus, ainsi une corrélation faible entre les deux

signaux. Aussi on observe l'absence de la ligne d'identité LOI, car elle est remplacée par la ligne de synchronisation LOS indiquée en rouge dans la figure I.13 (c). On remarque que la ligne de synchronisation LOS met un angle différenciant de  $\pi/4$ , ce qui confirme notre étude du croisement des séries de temps.

## **II. 14. Conclusion :**

La nécessité de surveiller l'état de surface des isolateurs en service est d'une importance capitale. Les techniques actuelles les plus performantes pour évaluer le degré de sévérité de la pollution des isolateurs sont fondées pratiquement sur les méthodes de traitement du signal. Dans ce chapitre on a basé notre étude sur la théorie du recurrent plot et son complément Cross recurrent plot.

On a étudié la caractéristique non linéaire du courant de fuite en appliquant la méthode recurrent plot directement sur le signal du courant de fuite, ceci ne nous a pas donné une bonne visualisation qui reflète vraiment l'observation expérimentale. Nous avons extrait les composantes fréquentielles du courant de fuite et on a appliqué la méthode recurrent plot sur le détail D1, cette application fournit une bonne visualisation des structures qui sont très cohérentes avec l'observation expérimentale.

Le Recurrent plot s'avère être une excellente méthode visuelle pour la détection des décharges. C'est pourquoi, nous nous intéressons au croisement des deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée en employant la méthode Cross recurrent plot. Cette dernière est tout de même une généralisation de la méthode recurrent plot.

# *Chapitre II*

*La méthode Cross  
recurrent plot appliquée  
au signal du courant de  
fuite et de la tension  
appliquée*

### III. 1. Introduction :

Dans cette partie nous étudions le comportement dynamique des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée et nous indiquons la similarité entre les deux espaces de phases qui leurs correspondent, afin d'identifier les décharges partielles qui pourraient mener au contournement.

Dans une partie de ce chapitre, on présente un modèle du courant de fuite et de la tension appliquée, montrant l'évolution de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, et la variation de la tension de contournement.

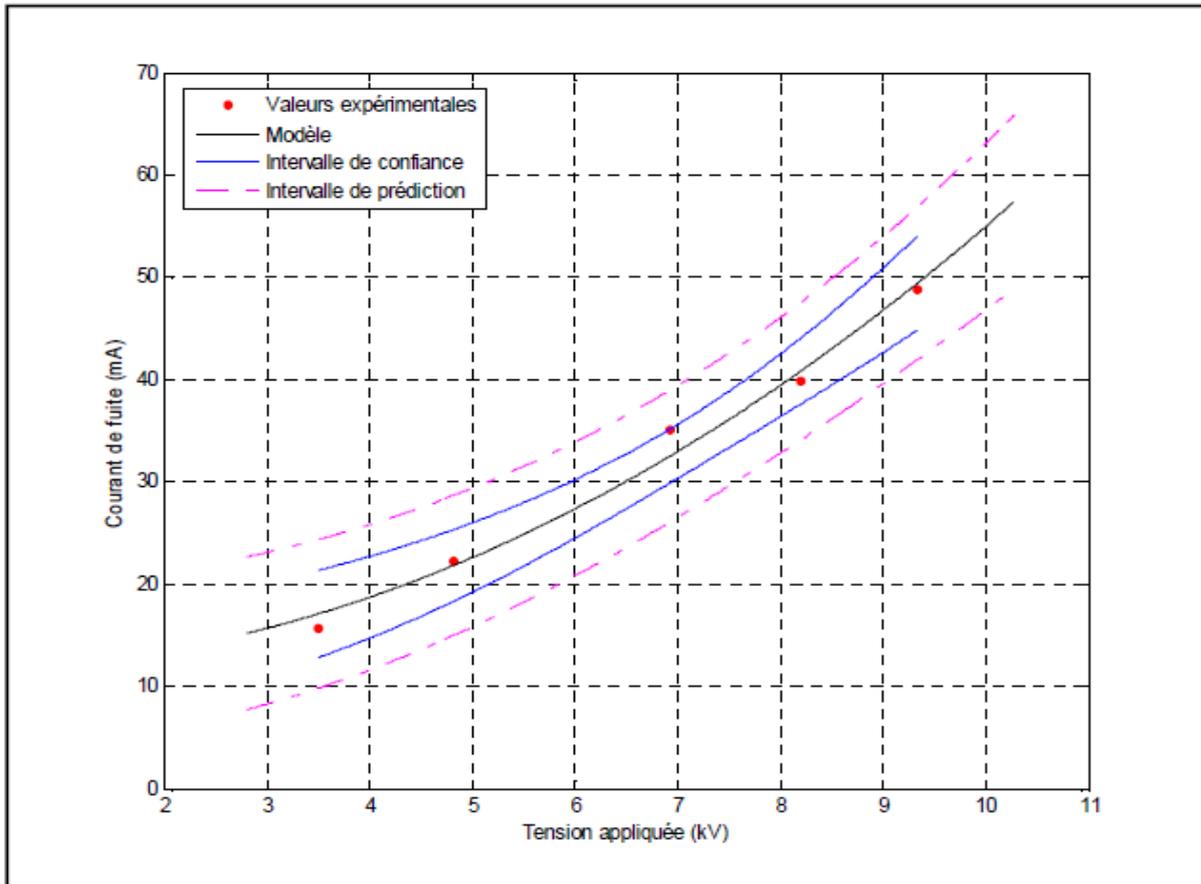
Les décharges partielles pourraient substantiellement réduire la vie de l'isolation, c'est pourquoi beaucoup d'efforts ont été consacrés pour étudier ce phénomène. La détection et l'identification des décharges partielles pour leurs classifications sont devenues des outils importants pour l'évaluation de l'état de surface des isolateurs.

Pour cela nous nous intéressons à appliquer la méthode recurrent plot croisée [Cross recurrent plot] sur les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. Le CRP est obtenu pour but de montrer que la structure topologique des composantes à haute fréquence des deux signaux du courant de fuite ainsi, de la tension appliquée est préminente afin d'identifier les propriétés non linéaires du processus de décharge. Basé sur l'analyse des composantes de haute fréquence, les indicateurs quantitatifs du cross recurrent plot sont obtenus pour refléter le mécanisme fondamental du phénomène du contournement.

### III. 2. Modèle du courant de fuite et de la tension appliquée : [34]

Un essai est fait sur une chaîne d'isolateurs indiqué dans la figure II.1 qui présente le modèle de la variation de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour un isolateur du côté conducteur d'une chaîne de 220 kV. Les essais sont effectués pour cinq niveaux de tension entre 3.5 kV et 9.3 kV. L'ajustement de ce type de données par la régression linéaire nécessite un changement de variable, c'est-à-dire que nous effectuons la régression de la variable dépendante qui est le courant de fuite, en fonction du carré de la variable indépendante qui est la tension appliquée.

Le tableau de la figure III.2 montre les résultats statistiques du modèle. La faible valeur de la probabilité  $P(F_a > F_{calculée}) = 0.0007 \ll \alpha = 0.05$  montre que le modèle de régression est significatif, cela est confirmé par le coefficient de détermination très proche de 100%, et qui vaut 98.57%. Le coefficient  $R_2(\text{prédiction}) = 96.56\%$  montre que le modèle peut être utilisé pour prédire des valeurs du courant de fuite pour des niveaux de tension autres que les valeurs expérimentales.



**Fig II.1 Courant de fuite en fonction de la tension appliquée**

L'équation de la régression :  $I = 11.8172 + 0.4318 V^2$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
$B_0$	11.8172	1.6471	6.5753	17.0590	0.0056
$B_1$	0.4318	0.0300	0.3363	0.5273	0.0007

$S = 1.8447$     $R^2 = 98.57\%$     $R^2(\text{prédiction}) = 96.56\%$     $PRESS = 24.560$

Analyse de la variance

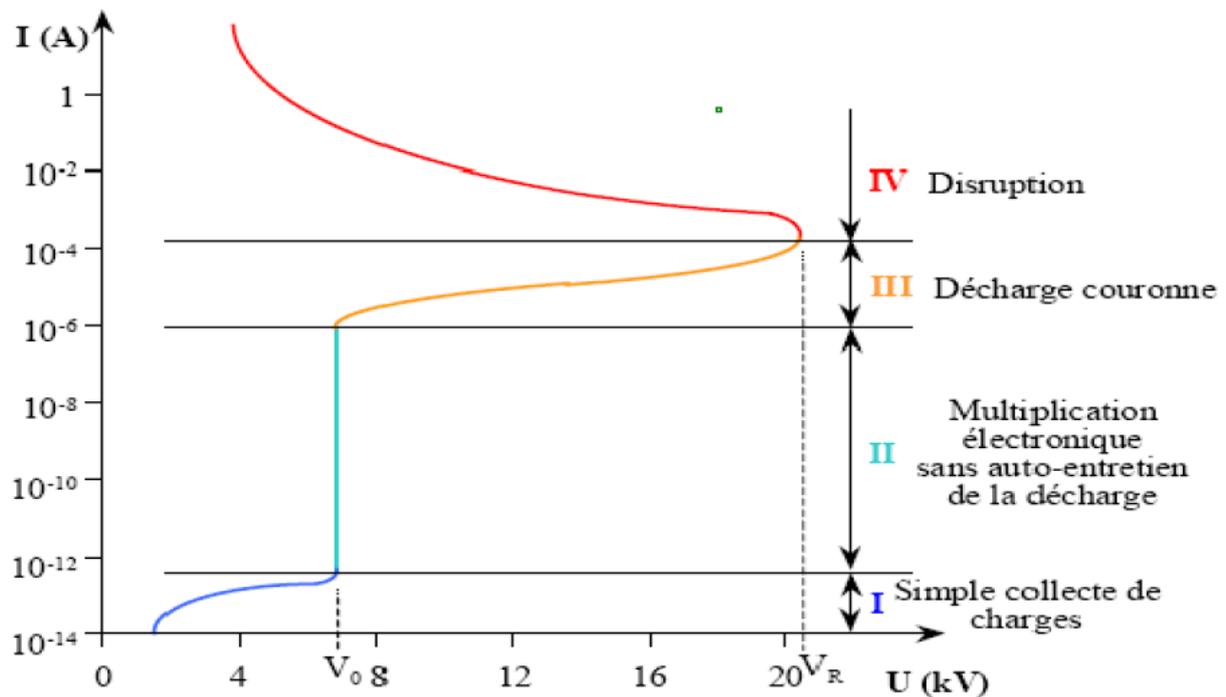
Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	705.2033	705.2033	207.2360	0.0007
Résidus	3	10.2086	3.4028		
Totale	4	715.412000			

**Fig II.2 Résultats statistiques du modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée**

Une modélisation de La relation existante entre le courant de fuite et la tension appliquée a indiqué que la résistance de la couche de pollution humide diminue en fonction de la tension appliquée. Cette diminution est due à l'échauffement de l'électrolyte par la circulation du courant, qui a pour effet d'accroître la conductivité, et l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, diminue sa résistance, ce qui implique la diminution de la tension de contournement.

### III. 3. Caractéristique courant-tension différent régimes de la décharge [34]

La figure suivante décrit le comportement du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, la courbe permet de distinguer quatre régimes régissant de la décharge couronne.



**Fig II.3** Caractéristique courant-tension d'une charge couronne dans l'air à pression atmosphérique.

- **Le premier régime :** consiste à la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu, ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) dans le gaz présents dans l'espace inter-électrodes.
- **Le second régime :** qui se produit à partir d'une tension seuil «  $V_0$  », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- **Le troisième régime :** l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessite de phénomènes d'ionisation extérieur. La décharge est auto-entretenu. C'est le

régime de la décharge couronne. Ou apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant.

- **Le quatrième régime :** au-delà d'une tension appliquée « $V_R$ », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit  $E/N$  est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisations deviennent majoritaires par apport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

### III. 4. Notions sur les décharges partielles

Les décharges partielles (DP) sont des micro-claquages se produisant dans des inclusions gazeuses piégées dans l'isolant solide. Elles sont la cause principale du vieillissement et de la destruction des isolations solides à moyen et long terme. Ces inclusions existant dans les diélectriques solides, liquides ou mixtes (solide imprégné) sont l'une des plus probables sources de décharges partielles (DP) dans un système d'isolation [34]. La mesure de ces décharges partielles est considérée comme un outil très important pour perfectionner la fiabilité des systèmes d'isolation à haute tension. L'interprétation et l'analyse des grandeurs mesurées constituent la clé pour estimer le risque de défaillance de cette isolation.

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses  $E_g$  que dans l'isolant  $E_i$ , ou  $E_g$  représente la rigidité diélectrique de la vacuole de gaze, et  $E_i$  représente la rigidité de l'isolant solide.

### III. 5. Application de l'approche Cross recurrent plot :

#### III.5.1 Mesures de CRP :

Afin de quantifier la similarité entre deux processus, quelques mesures quantitatives doivent être définies, puisque nous utilisons l'occurrence de plus ou moins des lignes diagonales discontinues. Les mesures de CRQA devraient être convenables pour ce but après quelques modifications. Particulièrement, elles étaient modifiées par (Marwan and Kurths, 2002).

Considérons la diagonale  $CR_{ij}(j-i=k=const.)$  laquelle est parallèle à la ligne diagonale principale et possède un temps distance  $k=\Delta t$  de la ligne diagonale principale.

Les points récurrents dans cette diagonale principale, correspondants avec des tests entre les trajectoires des délais temporels  $t$ . On définit la distance  $k$  à partir de la ligne diagonale principale, en utilisant cette approche il est possible d'évaluer la similarité dans les dépendances dynamiques sur le délai temporel.

La fréquence de distribution des longueurs de ligne diagonale  $P_k^E(l) = \{l_i; i = 1 \dots N1\}$  ou ( $N1$  est le nombre absolu des lignes diagonales) pour chaque diagonale parallèle de la diagonale principale  $CR_{ij}(j-i=k=const.)$ .

Pour  $k=0$  cette ligne est la LOI, pour  $k>0$  les diagonales sont au dessus de la LOI et pour  $k<0$  les diagonales sont au-dessous de la LOI, qui représente les délais temporels positifs et négatifs respectivement.

Le phénomène stochastique pèse lourdement des fluctuations des processus qui cause aucune ou juste des courtes diagonales, alors que le phénomène déterministe cause de longues lignes diagonales, si deux processus déterministes ont la même évolution temporelle, c.à.d. des parties des trajectoires se rencontrent dans les même régions d'espaces de phases, la majorité de longues diagonales augmente et la majorité des petite diagonales diminuent.

Alors on définit les principales mesures de Cross recurrent plot comme suit:

- **Taux de récurrence (RR)** : le RR révèle la probabilité d'occurrence des états similaires des deux systèmes en donnant le délai temporel  $t$ , une plus grande valeur de RR résulte les points récurrents de hautes densités, c'est le cas où les trajectoires des systèmes visitent les mêmes régions d'espaces de phases.

$$RR(t) = \frac{1}{N-t} \sum_{l=1}^{N-t} lP_t(l) \quad [\text{II.1}]$$

- **Déterminisme (DET)** : Il renseigne sur la prédictibilité du processus étudié et représente le rapport entre le nombre de points récurrents formant les diagonales (au moins de longueur  $l_{min}$ ) et le nombre totale de tous les points récurrents. Les signaux non corrélés, ou faiblement corrélés, apparaissent sous formes de courtes diagonales sur les CRPs. Les signaux déterministes impliquent des diagonales plus longues, ainsi que des points récurrents isolées.

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N-t} lP_t(l)}{\sum_{l=1}^{N-t} lP_t(l)} \quad [\text{II.2}]$$

- **Longueur moyenne des lignes diagonales  $L(t)$**  : rapporte la durée de similarité des deux systèmes dynamiques. La probabilité de coïncidence des deux systèmes augmente la longueur des diagonales.

$$L(t) = \frac{\sum_{l=l_{min}}^{N-t} lP_t(l)}{\sum_{l=1}^{N-t} P_t(l)} \quad [\text{II.3}]$$

- **Entropie (ENTR)** : L'entropie fait référence à l'entropie de Shannon de la distribution des lignes diagonales du CRP : elle reflète la complexité de la structure du RP par rapport aux lignes diagonales. Pour des signaux faiblement corrélés, la valeur **ENTR** est faible, indiquant ainsi une faible complexité.

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^{N-t} P_t(l). \ln P_t(l) \quad [\text{II.4}]$$

- **Trapping Time (TT)** : Il représente la valeur moyenne temporelle que les systèmes se répètent sur un seul et même état. Il est défini par l'expression suivante :

$$TT = \frac{n \sum_{v=vmin}^{N-t} v P_t(v)}{\sum_{v=vmin}^{N-t} P_t(v)} \quad [II.5]$$

Où  $P(v)$  est le nombre de lignes verticales de longueur  $v$ .  $TT$  estime la moyenne temporelle où les systèmes demeurent dans un même état.

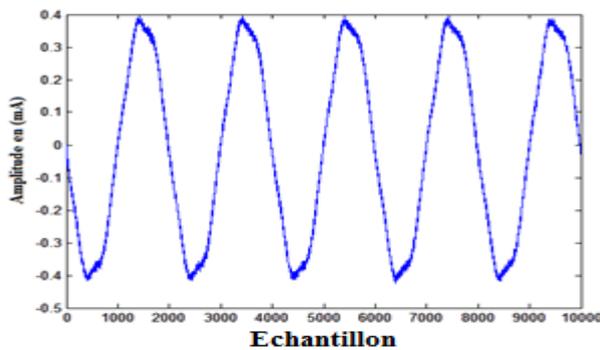
- **Recurrence Time Entropy (RTE)** : Le RTE sert à déterminer la périodicité ou la répétitivité des signaux. Il peut être appliqué aux systèmes dynamiques, ainsi qu'aux processus stochastiques. Il se calcule via l'expression suivante :

$$RTE = -(\ln T_{max})^{-1} \sum_{t=1}^{T_{max}} P_t(t) \cdot \ln P_t(t) \quad [II.6]$$

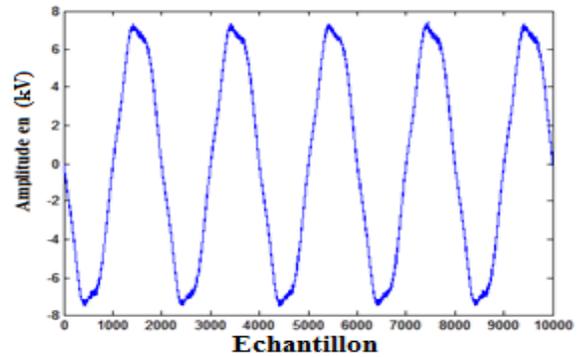
Où  $T_{max}$  est la plus grande période du signal. Le RTE est très utilisé pour détecter les changements subtils dans les dynamiques des signaux stochastiques.

### III.5.2. Application de la méthode CRP directement aux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée :

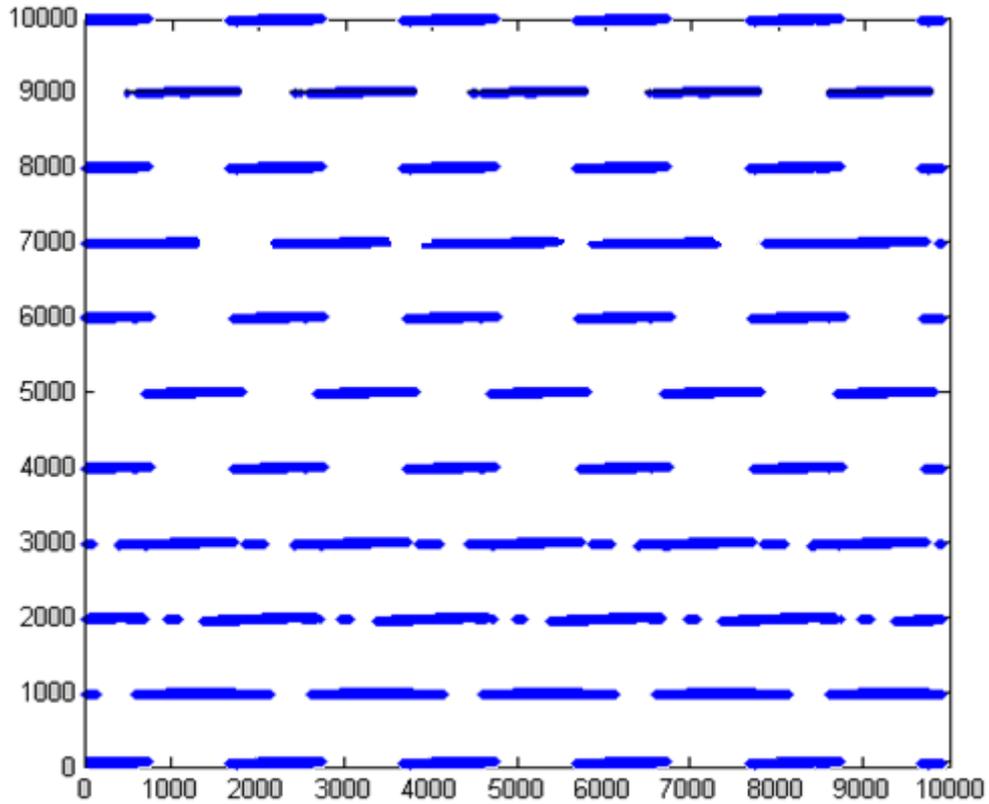
A partir de la base de données B.Moula on a tiré deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée pour un contournement lointain et un contournement proche. La figure II.4 montre un exemple de la technique CRP appliquée directement aux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée typiques lors du processus de contournement. Les figures II.4.a.b et II.4.d.e montrent les signaux originaux correspondant respectivement à un contournement lointain et proche.



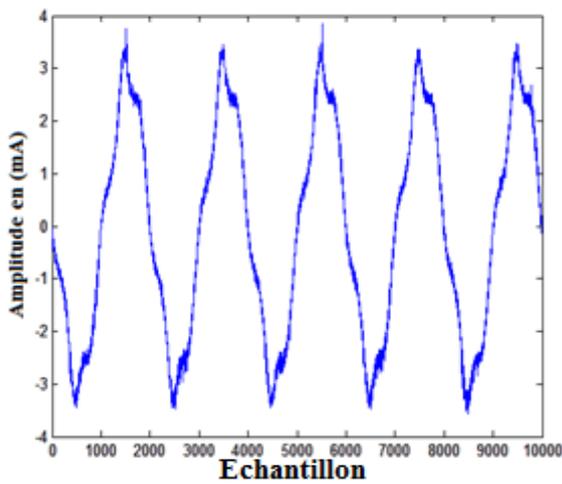
(a) Signal du courant de fuite (contournement lointain)



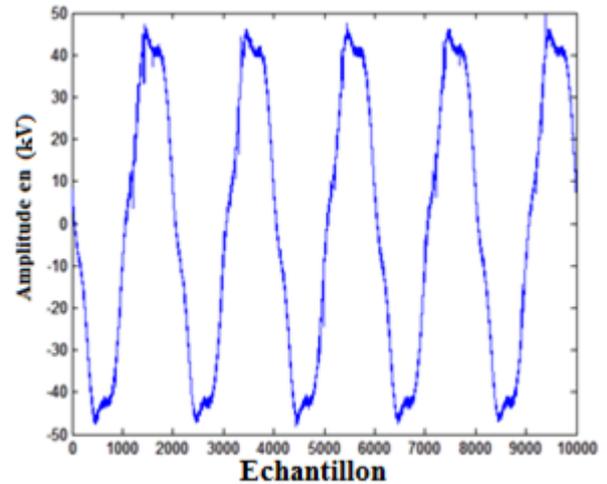
(b) signal de la tension appliquée correspondant au même signal du courant de fuite (contournement lointain)



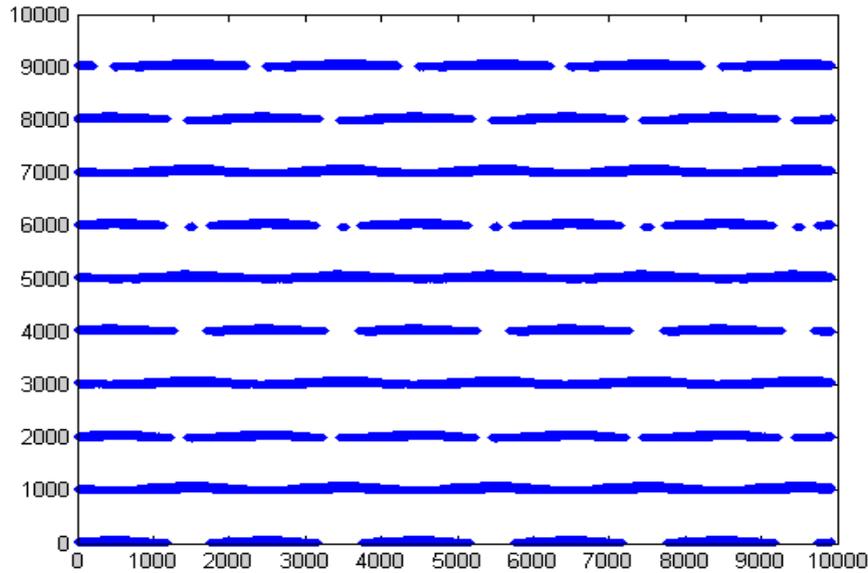
(c) Cross recurrent plot des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée (contournement lointain)



(d) Signal du courant de fuite (contournement proche)



(e) signal de la tension appliquée correspondant au même signal du courant de fuite (contournement proche)



(f) Cross recurrent plot des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée (contournement proche)

**Fig II.4 Technique Cross recurrent Plot appliquée directement sur un signal de courant de fuite et un signal de la tension appliquée qui le correspond.**

Comme expliqué avant dans la littérature du Cross recurrent plot, la ligne d'identité LOI est remplacée par la ligne de synchronisation LOS et peut finalement ne pas avoir un angle de  $\pi/4$ . Les lignes qui sont beaucoup ou moins diagonalement orientées sont les plus intéressées par les études des structures, et la représentation des segments des deux trajectoires qui sont parallèles la plupart des temps, les longueurs de ses lignes sont manifestement reliées à certaines similarités entre les des deux systèmes [35].

De cela pour la figure II.4.c qui représente la structure Cross recurrent plot des signaux du courant de fuite et de sa tension appliquée pour un contournement lointain (faible tension appliquée 5 kVeff), nous observons des petits segments horizontaux parallèles entre eux ce qui indique qu'on est en présence d'un phénomène périodiques. Les segments horizontaux sont la composition des points récurrents de faibles densités indiquant la faible intensité du processus, aussi une corrélation faible entre les deux signaux.

Pour un niveau de tension proche de celui du contournement figure II.4.f, nous remarquons que les petits segments représentés avant dans la figure II.5.c deviennent plus longues et plus structurées et toujours parallèles entre eux, ce qui explique que l'activité du processus s'est intensifié (forte tension appliquée). Une telle structure signifie que les deux systèmes dynamiques représentant le courant de fuite ainsi que la tension appliquée sont fortement corrélés

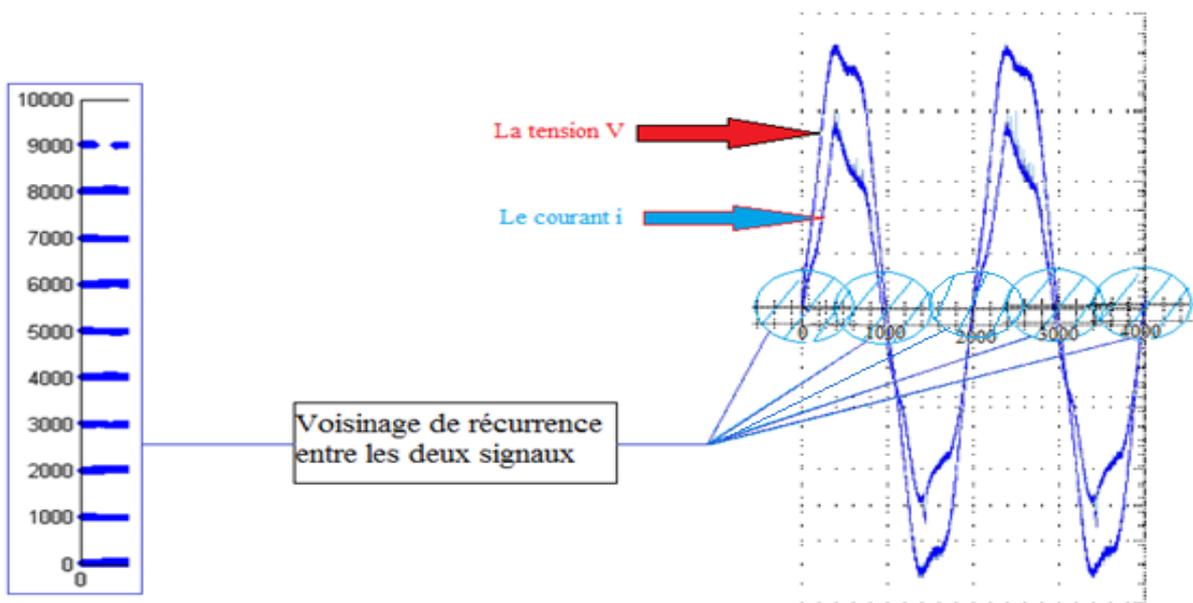
**Constatation :**

- Ces conclusions ne reflètent pas du tout la réalité du processus de contournement. C'est pourquoi, durant notre étude, nous appliquerons le Cross recurrent plot aux

composantes fréquentielles (D1) du signal du courant de fuite, ainsi que de la tension appliquée.

- Les signaux du courant de fuite ainsi que de la tension appliquée traités dans ce travail à partir de la base de donnée B.Moula sont tous périodiques et en phases, comme déjà était représentés dans les figures II.4.a.b et II.4.d.e. Les signaux sont enregistrés sur 10000 points qui correspond à 5 périodes, et l'amplitude des deux signaux est différente, le premier système dynamique du signal du courant de fuite visite le deuxième système dynamique représentant la tension appliquée pour chaque voisinage de la demie période, notant que la période égale à 2000 points, donc les voisinages de rencontres sont les multiples de 1000 points, de cela les points récurrents dans toutes les structures qui viennent auront tous une distribution horizontale.
- Il n'existe pas de lignes diagonales dans toutes les structures étudiées, la diagonale principale noire disparaît usuellement. La ligne d'identité LOI est remplacé par la ligne de synchronisation LOS et peut finalement ne pas avoir un angle de  $\pi/4$  [36].

Nous pouvons expliquer le phénomène de distribution horizontale des points récurrent et des lignes horizontales par un simple graphique qui montre, que les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée sont périodiques et en phases et de période sur 2000 points, et ils possèdent différentes amplitudes. Les points où les deux systèmes se rencontrent sont les voisinages de chaque demie période. On note aussi qu'en utilisant le Toolbox du Cross recurrent plot à MatLab traduit par Marwan (en 2003) nous avons fait le croisement du signal du courant de fuite à la tension appliquée, exemple `(crp_big(i,v,5,20,.25*std(v),...))`, nous avons eu une distribution horizontale, nous pouvions avoir une distribution verticale en changeant juste l'ordre de l'instruction, exemple `(crp_big(v,i,5,20,.25*std(v),...))`. La figure si dessous éclaircit le phénomène de distribution horizontale.

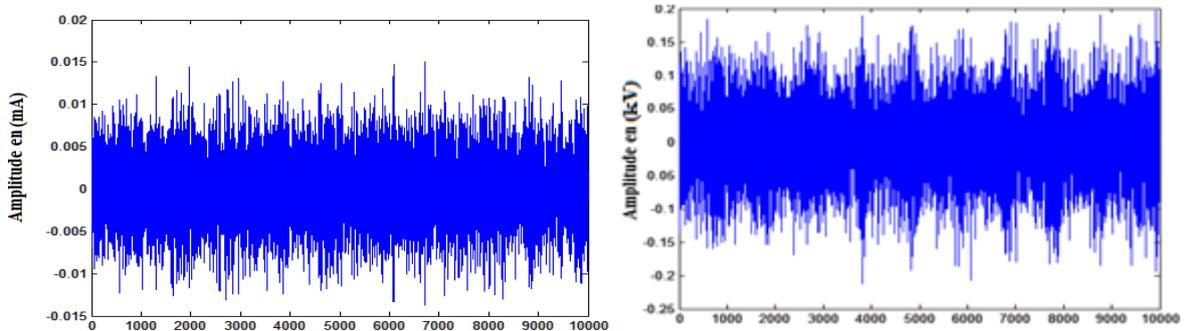


**Fig II.5 Schéma illustratif des voisinages d'interférences producteurs des récurrences entre les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée**

### III.5.3. Application de la méthode CRP aux détails des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée :

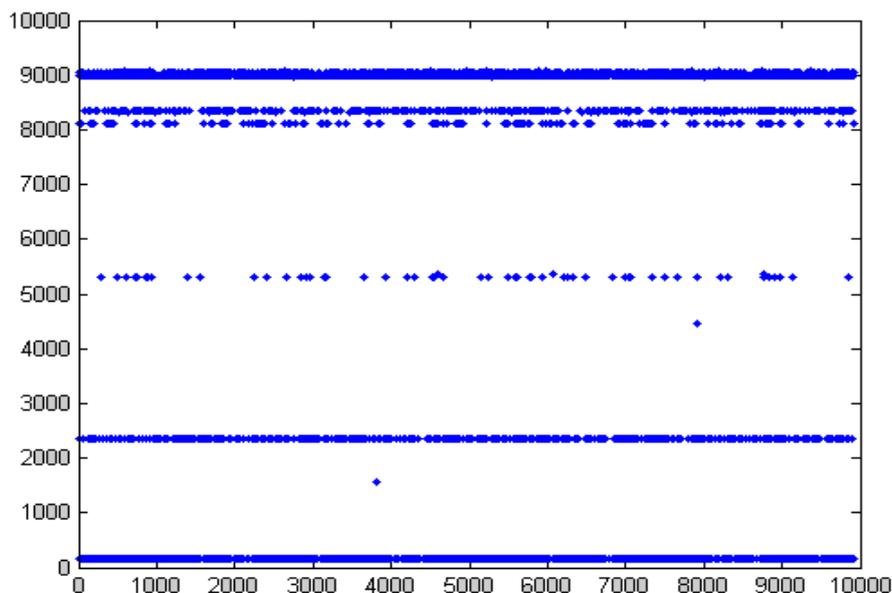
Dans notre travail, on utilise l'ondelette de *Daubechies 4*, nous allons appliquer la transformée en ondelette discrète [DWT] pour décomposer le signal du courant de fuite et le signal de la tension appliquée afin d'identifier les transitions de décharges pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [37].

Les structures des récurrences croisées du signal de courant de fuite et de sa tension appliquée pour un contournement proche et un contournement lointain sont représentées par la figure III.6, et plus précisément des détails D1. Les signaux sont extraits à partir de la base de données B.Moula pour une pollution non uniforme avec une solution de Kaolin 100g/l et de conductivité de 6mS/cm.

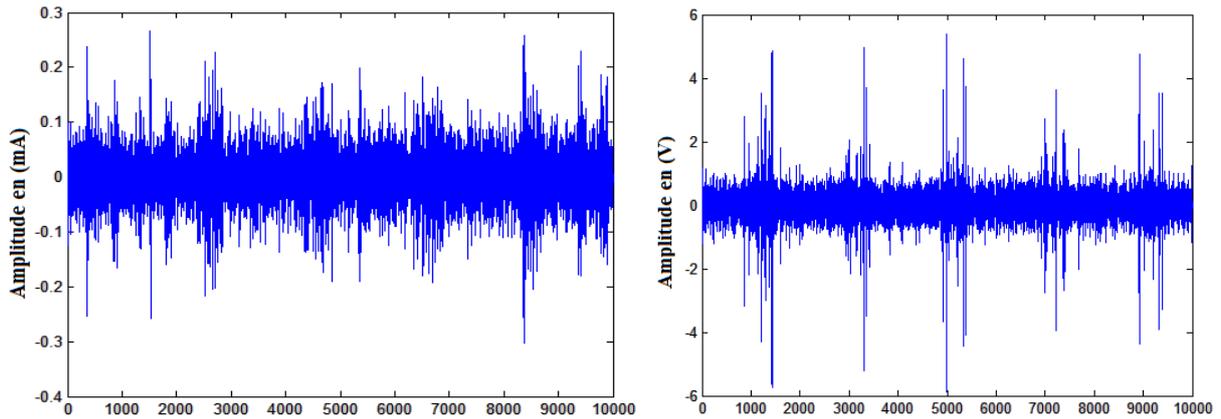


(a) détail D1 du Signal du courant de fuite  
(contournement lointain)

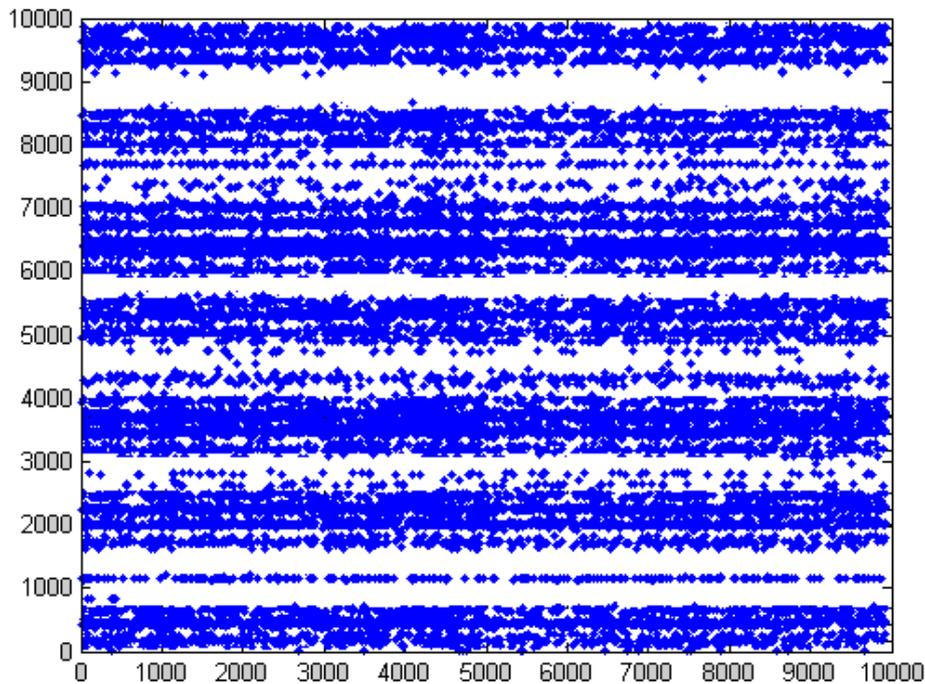
(b) détail D1 du signal de la tension appliquée  
correspondante  
au même signal du courant de fuite  
(contournement lointain)



(c) Cross recurrent plot des détails des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée  
(contournement lointain)



(d) détail D1 du Signal du courant de fuite (contournement lointain)      (e) détail D1 du signal de la tension appliquée correspondante au même signal du courant de fuite (contournement proche)



(f) Cross recurrent plot des détails des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée (contournement proche)

**Fig II.6 Exemple de la technique Cross recurrent Plot appliquée aux détails D1 du signal de courant de fuite et de la tension appliquée qui lui correspond.**

La structure Cross recurrent plot correspondante aux détails D1 des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée représentée par la figure II.6.c pour un contournement lointain (faible tension appliquée 5kVeff), est composée de quelques points récurrents de faibles densités formants peu de lignes horizontales trop minces, les lignes horizontales sont dues à la rencontre des deux détails correspondant aux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, en tout aucune forme particulière n'est visible. Une telle distribution des

points démontre parfaitement l'absence des décharges sur la surface de l'isolateur. Ainsi, pour un contournement lointain il n'existe que de faibles décharges partielles, ce qui est en accord avec l'observation expérimentale.

Pour un niveau de tension proche de celui du contournement, La structure Cross recurrent plot correspondante aux détails D1 des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée représentée par la figure II.6.f est composée de deux éléments: les bandes blanches horizontales et parfois non uniformes, et les points de forte densité formants des lignes horizontales de grandes épaisseurs. La présence de bandes blanches indique que le processus étudié est de nature non stationnaire et qu'il présente des états de transition (Tableau fig I.6 chapitre 1). Par contre, les points de forte densité, parfois isolés, indiquent une activité intense des décharges sur la surface de l'isolateur. Les lignes horizontales de grandes épaisseurs constituées par des points récurrents de fortes densités indiquent bien la similitude entre les deux détails.

En pratique, à l'approche du contournement, on remarque une intensification des décharges, représentée par les points à forte densité. On observe aussi une intermittence de ces décharges sur la surface de l'isolateur, ceci est décrit sur la figure I.6.f par les bandes blanches. Le rôle de ces dernières s'avère donc capital pour déceler l'état de transition menant vers le contournement.

On constate que les résultats obtenus par l'application de la technique Cross recurrent plot aux décompositions fréquentielles sont parfaitement en accord avec l'observation expérimentale de l'évolution du phénomène de contournement.

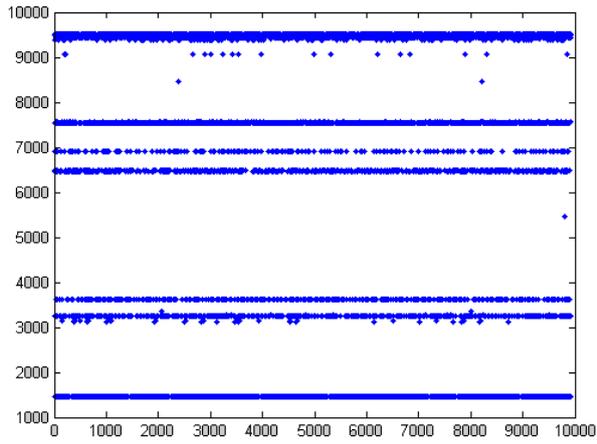
### **III. 6. CRP appliqué aux détails D1 des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée pour chaque classe de pollution.**

D'après ce qui a été montré précédemment, la décomposition fréquentielle du signal de courant de fuite et de la tension appliquée s'avère être nécessaire avant d'utiliser la techniques CRP.

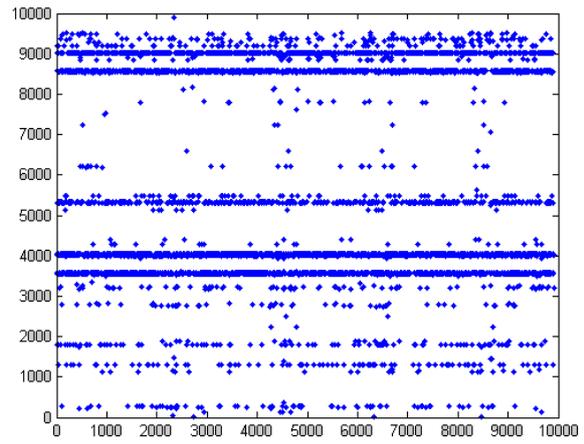
Dans le présent paragraphe, on extrait la plus haute composante fréquentielle D1 du signal du courant de fuite et de la tension appliquée, par la technique DWT à l'aide de l'ondelette *Daubechies 4*, pour les trois classes de pollution. Cette étape est illustrée par les figures II.7 à II.9. Enfin, on appliquera la technique CRP aux détails D1 du signal du courant de fuite et de sa tension appliquée pour les trois classes de pollution, comme montré sur les trois figures II.7.8.9. Dans cette partie, les résultats sont obtenus en exploitant l'ensemble de signaux de la base de données b.Moula.

#### **III.6.1 Classe de pollution 1 :**

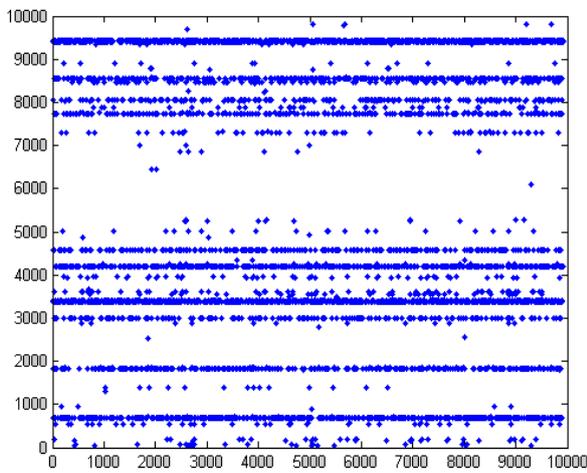
Pour cette classe de pollution, on s'intéressera à un signal de la tension appliquée, ainsi que son correspondant du courant de fuite sous une pollution non uniforme et une conductivité de 3,5 mS/cm.



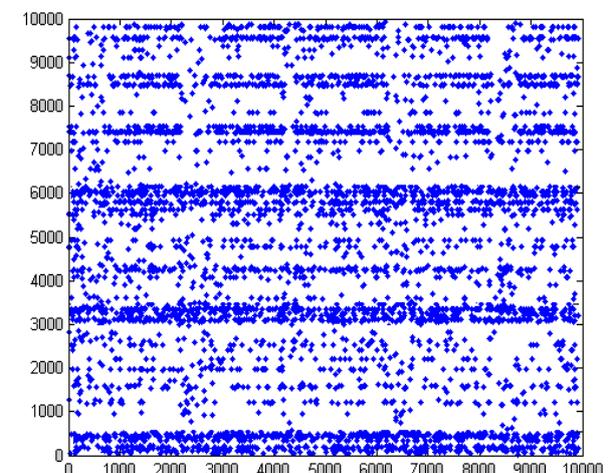
(a)



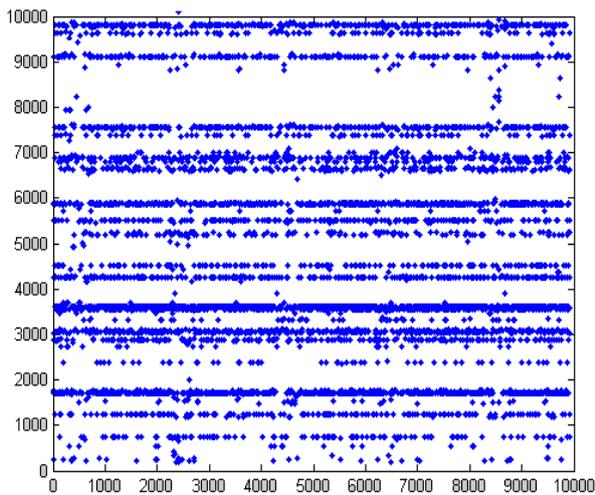
(b)



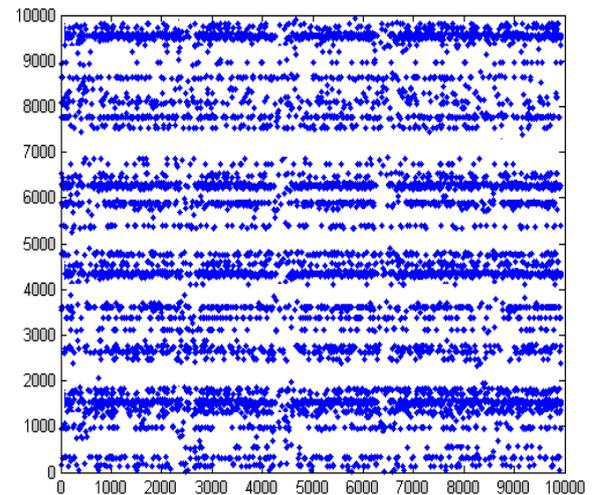
(c)



(d)



(e)



(f)

**Fig II.7 CRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal du courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (d) 30keff**

La figure II.7 montre les différentes structures CRP des composantes hautes fréquences du courant de fuite, ainsi que de la tension appliquée, le détail D1 (25-50 kHz), pour une pollution de classe 1.

D'après la figure II 7.a, pour une faible tension de 5  $kV_{eff}$  appliquée à l'isolateur, on remarque la présence de quelques points récurrents de faibles densités formant quatre lignes horizontales trop minces. Il en est de même pour la figure II 7.b représentant le CRP pour une tension appliquée de 10  $kV_{eff}$ , avec la présence dans cette dernière de quelques points épars. Ainsi, une telle structure indique la présence de rares décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières sont d'une intensité faible. L'analyse visuelle lors des essais permet de vérifier et de confirmer cela, car on remarque que pour de faibles tensions appliquées, des décharges apparaissent dans les zones propres, mais restent toujours faibles et localisées. Les décharges sont faibles dues à la faible similitude entre le courant de fuite et la tension appliquée (tension appliquée est faibles pour les deux cas de structures). Par conséquent, on soulignera l'absence d'arc durant ces niveaux de tensions.

Pour une tension supérieure appliquée de 15  $kV_{eff}$ , la figure II.7.c se compose de points denses formant plus de lignes horizontales. Leur présence est plus consistante comparativement aux deux figures précédentes. Leur intensité est elle aussi plus importante. Une telle transition indique une forte corrélation des deux systèmes dynamiques représentant les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, ceci explique l'activité des décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières deviennent donc plus denses et plus importantes, ce qui est en conformité avec notre analyse visuelle. Mais elles restent toujours faibles pour pouvoir créer des arcs électriques.

Par contre, la figure II.7.d représentant le CRP pour une tension appliquée de 20  $kV_{eff}$  se différencie un peu des figures précédentes. On remarque d'une part, des points bien plus denses, plus structurés, mais aussi une apparition de petites bandes blanches bien structurées et distribuée tout au long de la ligne horizontale. L'augmentation de la densité des points qui mène à l'augmentation d'épaisseur des lignes horizontales, indique une activité des décharges bien plus importante comparée à la figure précédente. Alors que l'apparition des bandes blanches indique l'approche d'un état menant vers une transition certaine. Les décharges se font donc de plus en plus intermittentes. Notre analyse visuelle nous permet de confirmer cela. Ainsi, pour ce niveau de tension, on remarque une saturation complète des bandes propres. La présence des décharges partielles y est très importante. De cet état, on peut prévoir une future apparition d'arcs électriques.

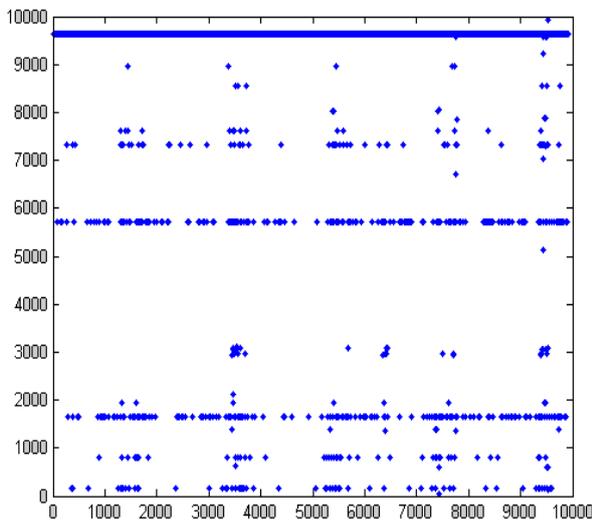
Ainsi, pour une tension appliquée de 25  $kV_{eff}$ , la figure II.7.e garde relativement la même structure que la figure qui la précède, mais avec une diminution de densité des points qui la composent. Une telle transition peut sembler contradictoire, pourtant, elle explique parfaitement la réalité des décharges à la surface de l'isolateur. En effet, une diminution de densité des points indique une diminution de la corrélation entre les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée qui entraîne une diminution de l'activité des décharges. Cela indique l'apparition d'arcs électriques. Ces conclusions sont en total accord avec l'observation visuelle. Ainsi, on remarque la formation de petits arcs électriques aptes à court-

circuiter les zones propres d'une part, mais aussi ils commencent à se propager dans les zones polluées, Cela prédit la diminution de l'effet capacitif du courant de fuite, et l'augmentation de son effet résistif.

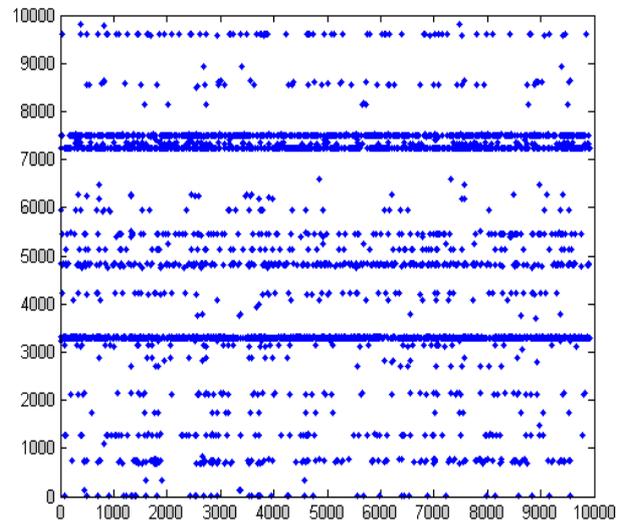
Enfin, pour une tension appliquée de 30 kV<sub>eff</sub>, la figure II.7.f se démarque par une structure unique: une forte présence des bandes blanches trop minces, ainsi qu'une augmentation évidente de l'intensité des points qui composent des lignes horizontales bien structurées comparativement à la figure qui la précède. Une telle structure indique à la fois une intensification des décharges au niveau de l'isolateur, et la présence d'un état fort intermittent qui approche. La combinaison de ces deux éléments prédit l'apparition imminente d'un arc de contournement. Visuellement, on remarque la propagation des arcs électriques sur les zones polluées, ces derniers court-circuitent totalement les zones propres, et tendent se connecter entre eux. Si cela se réalise, on observera l'arc de contournement liant directement la borne HT à la borne terre, indiquant dès lors un comportement quasi-résistif du courant de fuite.

### III.6.2 Classe de pollution 2 :

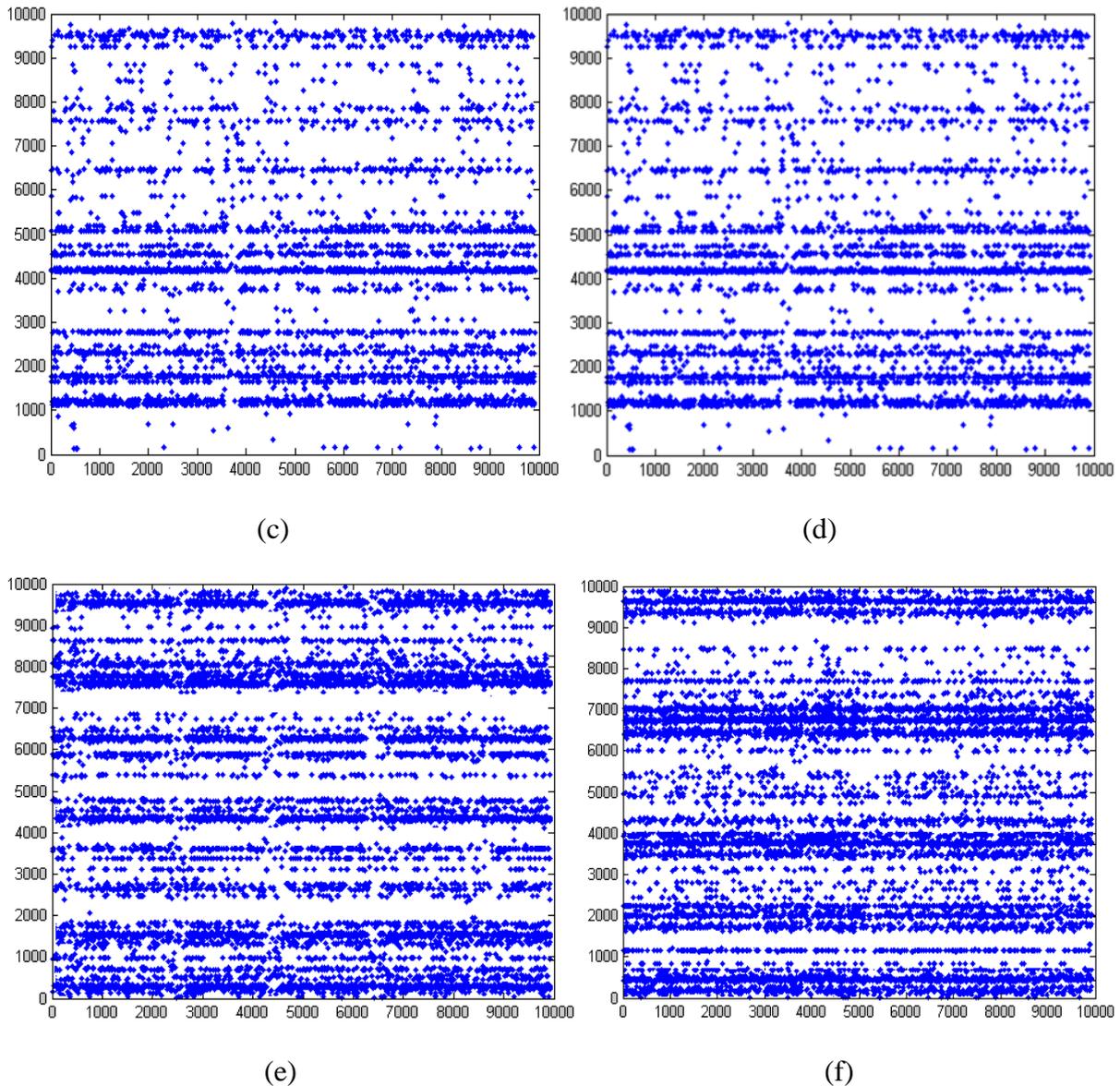
Pour cette classe de pollution, on s'intéressera à un signal de la tension appliquée, ainsi que son correspondant du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 6mS/cm.



(a)



(b)



**Fig II.8 CRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal du courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff**

La figure II.8 montre les différentes structures du Cross recurrent plot des composantes hautes fréquences du détail D1 (25 à 50 kHz) pour une pollution de classe 2 en fonction de la tension appliquée.

Pour les niveaux de tensions 5 et 10 kVeff, on remarque une similarité des structures CRP, on observe la présence de quelques points récurrents de faibles densités formants de très minces lignes horizontales, avec la présence dans cette dernière de quelques points épars, Ainsi, une telle structure indique la présence de rares décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières sont d'une intensité faible. L'analyse visuelle lors des essais permet de vérifier et de confirmer cela, car on remarque que pour de faibles tensions appliquées, des décharges apparaissent dans les zones propres, mais restent toujours faibles et localisées. Les décharges

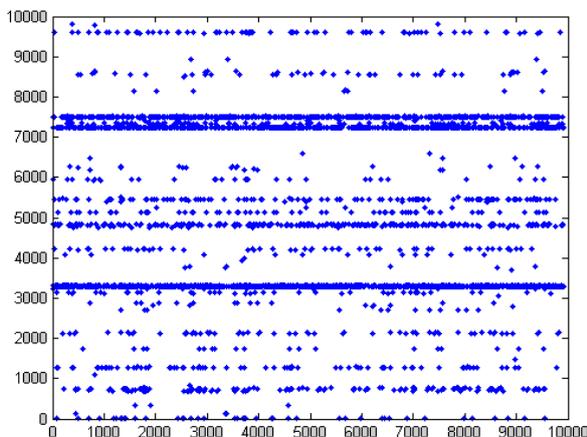
sont faibles dues à la faible similitude entre le courant de fuite et la tension appliquée (la tension appliquée est faibles pour les deux cas de structures). Par conséquent, on soulignera l'absence d'arc durant ces niveaux de tensions.

En ce qui concerne les figure II.8.c et II.8.d représentant les structures CRP pour les tensions appliquées de 15 kV $_{eff}$  et 20 kV $_{eff}$  respectivement, on observe une similarité des structures avec une augmentation du nombre de points récurrents dans la dernière structure est à signaler, indiquant une légère intensification des décharges au niveau de l'isolateur. L'analyse visuelle lors des essais permet de vérifier cela, car on remarque que pour de faibles tensions appliquées, les décharges apparaissent dans les zones propres, mais restent faibles. Par conséquent, on soulignera l'absence d'arcs pour ces niveaux de tension. Cela indique le fort effet capacitif du courant de fuite, alors que l'effet résistif est quasi-inexistant.

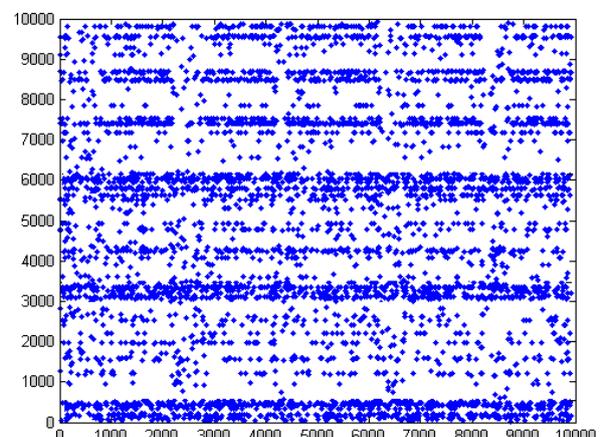
Par contre, pour une tension appliquée de 25 kV $_{eff}$ , la figure II.8.e se différencie un peu des figures précédentes. On remarque deux phénomènes, l'apparition des points bien plus denses, mais aussi une apparition de petites bandes blanches horizontales. L'augmentation de la densité des points indiquent une activité des décharges plus importantes comparées à la figure précédente. Alors que l'apparition de petites bandes blanches horizontales dues à la faible similitude entre les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, aussi ses bandes blanches indiquent l'approche d'un état menant vers une transition certaine. Les décharges se font donc plus intenses, et quelques peu instables.

Dès lors, pour la figure II.8.f représentant le Cross recurrent plot pour une tension appliquée de 30 kV $_{eff}$ , garde relativement la même structure que la figure qui la précède, mais avec un éclaircissement et élargissement des bandes blanches horizontales. Ainsi, on remarque la formation de petits arcs électriques et leurs propagations dans les zones polluées. Cela prédit la diminution de l'effet capacitif du courant de fuite, et l'augmentation de son effet résistif. Une si forte présence des bandes blanches prédit l'apparition imminente d'un arc de contournement.

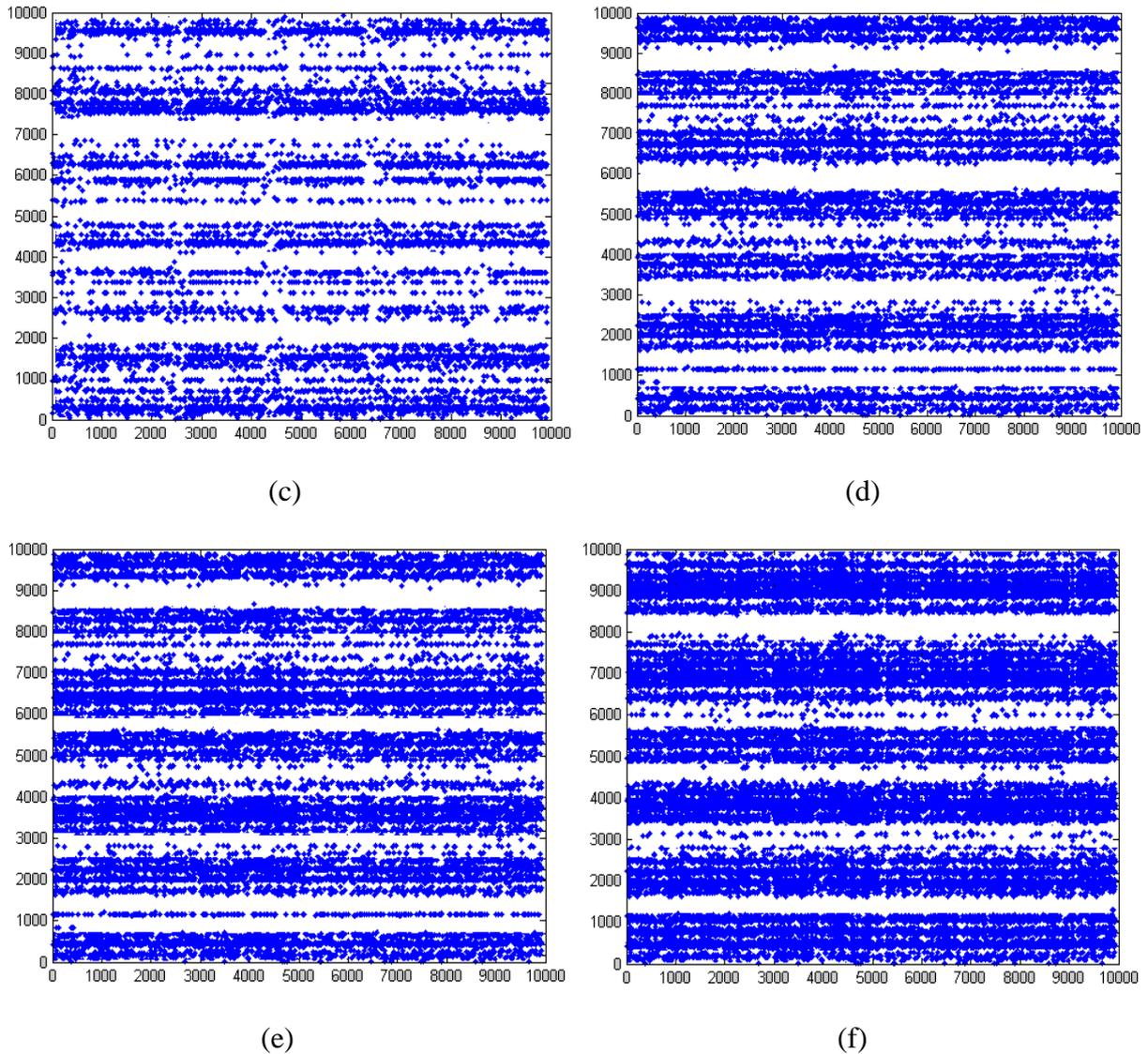
### III.6.3 Classe de pollution 3 :



(a)



(b)



**Fig II.9 CRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal du courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff**

La figure II.9 montre les différentes structures Cross Recurrent Plot des composantes hautes fréquences du détail D1 (25 à 50 kHz) pour une pollution de classe 3.

D'après la figure II.9.a, pour une faible tension de 5 kVeff appliquée au bord de l'isolateur, on remarque la présence de quelques points récurrent formant assez de lignes horizontales, indiquant une faible activité des décharges à la surface de l'isolateur. Alors que pour la figure II.9.b représentant le CRP pour une tension appliquée de 10 kVeff, on remarque non seulement une augmentation du nombre de points récurrents composant des lignes horizontales peu minces, mais aussi un début de formation des bandes blanches. Ce dernier élément est original, c'est la première fois qu'on remarque une apparition des lignes aussi bien structurées et aussi denses avec l'apparition prématurée des bandes blanches pour une si

faible tension appliquée. Ce fait est dû par la forte pollution étudiée. Ainsi, une telle structure indique la forte corrélation des deux systèmes dynamiques du courant de fuite et de la tension appliquée, et le début de présence d'un état non stationnaire; les transitions sont donc proches. En pratique, on visualise quelques décharges à la surface de l'isolateur, elles sont plus prononcées que dans les cas des classes de pollution précédentes.

Pour la figure III.9.c représentant le CRP d'une tension supérieure appliquée (15  $kV_{eff}$ ), cette figure se compose de points denses formant des lignes horizontales mal structurées et de bandes blanches horizontales clairement établies. L'intensité des points est là aussi plus importante, et les bandes blanches sont plus imposantes. Une telle transition indique une forte similitude des deux systèmes dynamiques, ainsi une augmentation de l'activité des décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières deviennent donc plus denses et plus importantes, ce qui est en conformité avec l'analyse visuelle.

Par contre, pour un niveau de tension appliquée de 20  $kV_{eff}$ , la figure II.9.d représente une continuité de la figure qui la précède. On remarque d'une part, des points bien plus denses formant des lignes horizontales grosses et denses, et plus concentrés, avec des bandes blanches demeurant inchangées et bien claires. L'augmentation de la densité des points indique une perturbation sévère entre les deux systèmes dynamiques représentant les deux détails du courant de fuite et de la tension appliquée, et une activité des décharges très intense, alors que les bandes blanches indiquent l'approche d'un état transitoire et instable. Les décharges se font donc de plus en plus intermittentes. Ainsi, pour ce niveau de tension, on remarque une saturation complète des décharges sur les bandes propres. La présence des décharges partielles y est très importante. De cet état, on peut prévoir une future apparition d'arcs électriques.

Pour les figures II.9.e et II.9.f on remarque une ressemblance avec la figure qui les précède avec une intensification du processus, tel que les points récurrents se saturent et forment des bandes de points récurrents trop grosses indiquant une activité des décharges très intense, avec l'apparition de bandes blanches trop minces, indiquant la présence d'un état intermittent qui vient juste de dérouler, ainsi pour ce niveau de tension on remarque une saturation des décharges partielles et l'apparition d'arc électriques.

On peut tirer une remarque très importante pour cette classe de pollution:

La classe de pollution 3 se différencie de celles des deux premières classes de pollution, avec la diminution de l'intensité des points récurrents lors de l'analyse des structures Cross Recurrent Plot. Ce point est très important, car il nous permet d'affirmer qu'à ce niveau de pollution, le phénomène du contournement se produit sans formation d'arcs électriques reliant les différentes décharges partielles. On notera aussi une intensité de points inédite, elle est la plus importante pour une pollution de classe 3. Ces conclusions sont en accord avec l'observation visuelle. Ainsi, on remarque dès l'augmentation de la tension un accroissement de l'activité des décharges à la surface de l'isolateur. Cet accroissement est suivi directement de l'arc de contournement, sans formation préalable d'arcs électriques de faibles intensités reliant les décharges électriques.

### III.6.4 Discussion des résultats

L'étude de la structure topologique du Cross recurrent plot en fonction de la classe de pollution nous a permis de tirer les conclusions suivantes.

En ce qui concerne les pollutions de classe 1 et 2, on remarque un CRP composé principalement de points récurrents de faibles densités formant quelques lignes horizontales trop minces pour les faibles et moyennes tensions, avec une apparition des bandes blanches de distribution horizontales à partir de 20 kV<sub>eff</sub>. On notera une nette diminution de l'intensité des points durant la pollution de classe 1 (voir figure II.7), indiquant la forte formation d'arcs électriques reliant les décharges partielles.

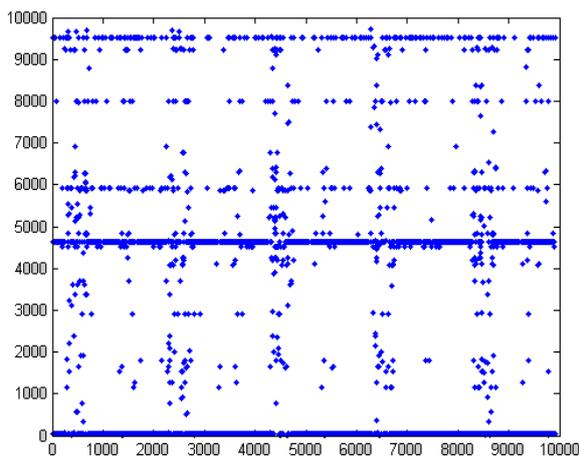
Aussi les points récurrents ont une distribution horizontale du fait, que les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée sont périodiques et en phases, c'est pourquoi en prédefinisant le seuil  $\varepsilon$ , la norme  $\|x_i - y_j\|$  qui représente la distance entre deux points différents des deux systèmes dynamiques sera inférieur à  $\varepsilon$  que dans le voisinage de la demie période (les points correspondants à 1000,2000,3000,...10000), et il se peut qu'il y'aurai une similitude entre les deux systèmes représentant les détails D1 (courant de fuite et tension appliquée) car la perturbation sera plus forte quand le niveau de tension augmente.

Par contre, pour la pollution de classe 3, on notera une rapide apparition des bandes blanches horizontales dès 15 kV<sub>eff</sub>, et une grande intensité de points composant des lignes horizontales d'épaisseur moyenne comparé aux classes de pollution inférieures. Pour cette même classe de forte pollution, on notera que le phénomène de contournement s'établit sans formation préalable d'arcs électriques locaux. Un tel résultat n'aurait pas été conclu sans l'étude comparative des structures CRP correspondant aux différentes classes de pollution.

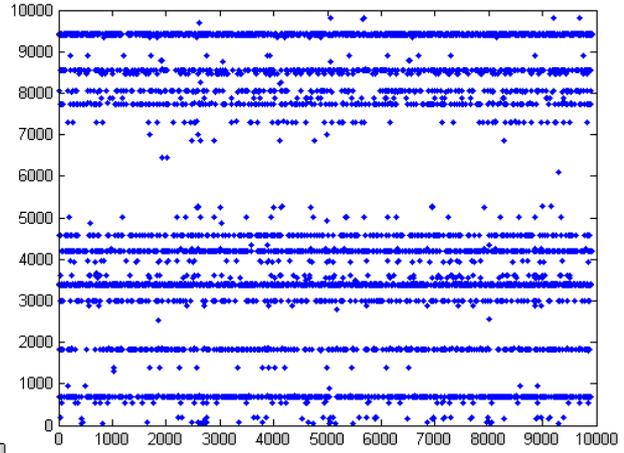
### III. 7. Influence de la conductivité de la solution polluante :

Pour étudier l'influence de la conductivité de la solution, on applique donc la technique Cross recurrent plot sur les signaux du courant de fuite ainsi que de la tension appliquée, seulement la valeur efficace de la tension appliquée sera constante et égale à 20 kV<sub>eff</sub>, qui est une tension proche du contournement et en varie l'intensité du courant de fuite tout en variant la conductivité de la couche polluante de 1,2 mS/cm à 20 mS/cm. La base de données utilisée est B.Moula.

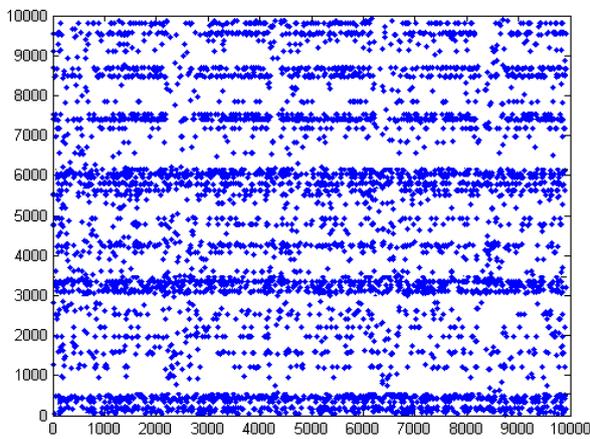
La figure II.10 montre les détails de la tension appliquée à 20kV<sub>eff</sub> et les détails des courants de fuites correspondants, ainsi les différentes structures du Cross recurrent plot des composantes hautes fréquences du détail D1 (25 à 50 kHz) en fonction de la conductivité de la solution polluante, pour une tension appliquée de 25 kV<sub>eff</sub>.



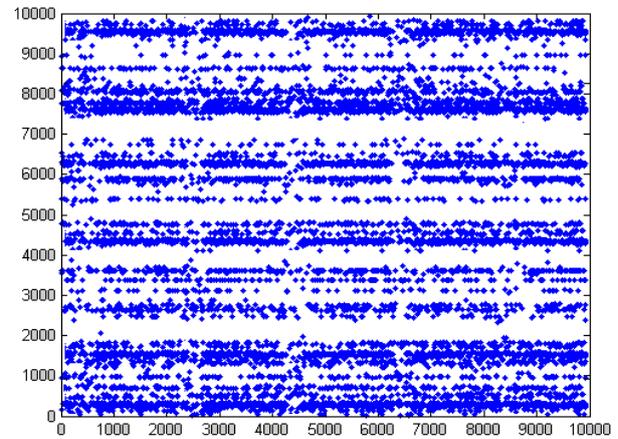
(a) Cross recurrent plot des détails 1.2mS/cm



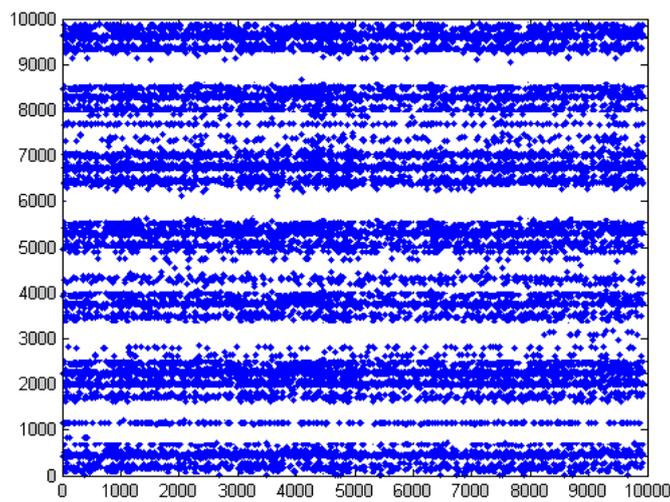
(b) Cross récurrent plot des détails 3.5mS/cm



(c) Cross recurrent plot des détails 6mS/cm



(d) Cross récurrent plot des détails 10mS/cm



(e) Cross récurrent plot des détails 20mS/cm

**Figure II.10. CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la conductivité de la solution polluante pour une tension appliquée de 25 kV<sub>eff</sub> : (a) 1,2mS/cm, (b) 3,5mS/cm, (c) 6mS/cm, (d) 10mS/cm, (e) 20mS/cm.**

D'après la figure II.10, qui représente les détails des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite, ainsi que leur Cross recurrent plot pour chaque conductivité de la pollution, on constate que toutes les structures de la récurrent plot croisée ne possèdent pas de lignes diagonales principales LOI tel que cette dernière est remplacé par la ligne de synchronisation LOS, ainsi on remarque que la distribution des points récurrents est horizontales dans toutes les structures, et ça est déjà expliqué que les deux signaux sont en phases.

Pour la figure II.10.a, pour une faible conductivité de 1,2mS/cm, on remarque la présence de quelques points récurrents distribués horizontalement. Avec une faible intensité, Il en est de même pour la figure II.10.b représentant le Cross recurrent plot pour une conductivité de 3,5mS/cm, mais dans ce dernier cas, on notera une intensification des points récurrents qui mène à la formation de quelques lignes horizontales peu minces, avec une légère formation des bandes blanches du côté bas et haut indiquant la présence d'état intermittent. Ainsi, une telle structure indique la présence de rares décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières sont d'une intensité faible ce qui explique que ses deux dernières conductivités 1.2mS/cm et 3.5mS/cm caractérisent une pollution non sévère tel la pollution de classe 1.

Pour une pollution moyenne de 6mS/cm, la figure II.10.c se compose de points denses formants de grosses lignes horizontales. Leur présence est plus consistante comparativement aux figures précédentes. Leur intensité est elle aussi plus importante ; expliquant l'intensification du processus. Une telle transition indique la forte corrélation des deux systèmes dynamiques, ainsi elle indique une augmentation de l'activité des décharges à la surface de l'isolateur. Ces dernières deviennent donc plus denses et plus importantes, ce résultat est tout à fait en accord avec l'observation expérimentale indiquant la classe de pollution 2.

Par contre, pour une pollution assez forte de 10mS/cm, la figure II.10.d est composée de points denses, plus concentrés, et plus structurés sous formes de bandes horizontales, avec l'apparition de quelques bandes blanches bien présentes dans la structures. L'augmentation de la densité des points indique une activité des décharges bien plus importante comparée à la figure précédente. Ainsi, pour ce type de conductivité qui est assez sévère, et pour ce niveau de tension qui est proche du contournement on remarque l'approche de saturation des décharges sur les bandes propres. La présence des décharges partielles y est très importante, ce qui est en accord avec l'observation expérimentale.

Dès lors, pour une forte pollution de 20mS/cm, la figure II.10.e garde relativement la même structure que la figure qui la précède, mais avec un léger élargissement des bandes horizontales des points récurrents due à l'intensification de l'activité des décharges, et l'apparition de bandes blanches trop minces. Une telle structure indique la présence d'un état fort intermittent qui approche, ce qui prédit l'apparition imminente d'un arc de contournement, ce type de conductivité caractérise la classe de pollution la plus sévère c'est bien la class3.

### **III. 8. Conclusion :**

Le courant de fuite et la tension appliquée ainsi que leurs caractéristiques non linéaires ont été étudiées pour examiner la performance des isolateurs pollués dans des environnements hostiles. Les composantes fréquentielles durant le processus de contournement sont extraites, et leur Cross recurrent plot correspondant s'avère être une excellente méthode visuelle pour la détection des décharges.

La représentation des structures résultant de l'application Cross recurrent plot directement sur les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée sont inefficaces pour le diagnostic de la sévérité de pollution des isolateurs, ceci nous a conduits à faire l'extraction des composantes fréquentielles des deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. Le Cross recurrent plot appliqué aux détails D1 du courant de fuite et de la tension appliquée nous a permis d'avoir des résultats très cohérents avec l'évolution des décharges électriques.

Cross recurrent plot appliqué sur les trois classes de pollution, s'avère être un outil très efficace pour estimer la sévérité de pollution déposée sur les surfaces planes. Pour la classe 1 correspondant à la faible pollution, la structure CRP ne comporte que peu de points récurrents. Toutefois, pour la classe 2 représentant la moyenne pollution, la structure CRP présente assez de points récurrents indiquant des décharges plus intenses, et quelques peu instables, avec la diminution de l'effet capacitif du courant de fuite et l'augmentation de son effet résistif ; et pour la dernière classe de pollution correspondante à la classe 3 sa structure Cross recurrent plot s'avère trop bien visible avec la présence de bandes blanches bien claires, la présence des bandes blanches indique la forte intensité des décharges sur la surface d'isolateur.

## **Conclusion générale :**

Le présent travail nous a permis d'appliquer de nouvelles méthodes de traitement de signal à l'étude de la pollution des isolateurs HT, de manière à diagnostiquer l'état de surface de l'isolateur tout en se référant à la norme CEI 60-1.

Au premier lieu nous avons appliqué la technique Recurrent Plot « RP » à l'étude de la pollution des isolateurs HT. Cette technique, étant inefficace quand elle est appliquée directement au signal du courant de fuite, nous permet de caractériser l'état des décharges à la surface de l'isolateur et de prédire l'apparition du contournement si elle est appliquée aux composantes hautes fréquences du signal du courant de fuite. Cette technique représente l'aspect qualitatif et est issue de la théorie du chaos. Cette dernière est aussi dotée d'un aspect quantitatif, communément appelé « l'analyse quantitative de récurrence » qui, en calculant des paramètres statistiques, permet de déceler les transitions du comportement du courant de fuite.

En second lieu, nous avons introduit la théorie de la recurrent plot généralisée, en étudions le croisement des systèmes dynamiques de différentes natures. En vue d'approfondir notre étude sur le diagnostic de la pollution ses isolateurs, nous avons traité les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée qui sont les deux facteurs principales causants les décharges qui mènent au contournement. L'application de la méthode Cross recurrent plot directement sur les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée ne nous a pas donné des résultats efficaces, en contrepartie en appliquant le Cross recurrent plot sur les composantes hautes fréquences des deux signaux s'avère très efficace pour caractériser l'état des décharges sur la surface des isolateurs et prédire l'approche du contournement.

Après cela le Cross recurrent plot est appliqué aux différentes classes de pollution, pour les faibles pollutions ne comporte que très peu de points. Avec l'absence de la ligne d'identité LOI et son remplacement avec la ligne de synchronisation, le Cross recurrent plot pour les pollutions moyennes indiquent des décharges plus intenses, et quelques peu instables, avec la diminution de l'effet capacitif du courant de fuite, et l'augmentation de son effet résistif; et pour la dernière classe de pollution son Cross recurrent plot s'avère trop bien visible avec la présence de bandes blanches bien claire, et qui indique la forte intensité des décharges sur la surface d'isolateur.

La combinaison entre le signal du courant de fuite et la tension appliquée s'avère très utile avec l'application de l'approche Cross recurrent plot, et ses diagrammes constituent un bon outil visuel pour diagnostiquer la performance des isolateurs pollués.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin de d'études apporte davantage investigation dans le domaine de l'étude de la pollution des isolateurs. La technique CRP, étant une généralisation de la méthode recurrent plot qui est basées sur la théorie du chaos, elle permet non seulement de prédire le phénomène de contournement des isolateurs suite à une simple observation du diagramme du Cross récurrence plot, mais aussi de décrire quantitativement et qualitativement l'activité des décharges sur la surface de l'isolateur.

## Références bibliographiques

- [1] F. Meghnefi, "Etude temporelle et fréquentielle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace en vue de développement d'un système de surveillance et de prédiction en temps réel du contournement électrique", thèse comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, Août 2007. Présentée à l'université du Québec à Chicoutimi.
- [2] N. Mhaguen, "Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis", Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Janvier 2011. Présentée à l'université du Québec à Chicoutimi.
- [3] M. Duchesne, "Etude expérimentale et numérique du courant de fuite sur une couche de glace en présence d'un arc électrique", Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, décembre 2010. Présentée à l'université du Québec à Chicoutimi.
- [4] M. Tegar, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2003. [5] Woodson H. H. & McElroy A. J., "Insulators with Contaminated Surfaces Part II: Modeling of Discharge mechanisms," IEEE Trans, Vol. PAS-89, No. 8, pp. 1858-1867, 1970.
- [6] Z. SAHLI, " Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur les Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués sous Tension Continue ", Thèse de Magistère, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bédjaïa, 2005.
- [7] M, REBAÏ, F, HANNACHI, " Modélisation Mathématique en Alternatif et en Continu des Isolateurs Pollués ", PFE, Institut d'électrotechnique, Centre Universitaire de Médéa, 1995.
- [8] Chettih Saliha " Etude par Simulation de l'Influence des Arborescences d'Eau Ouvertes sur les Contraintes Electrique et Electromécanique dans la Couche Isolante des Câbles de Haute Tension ", Thèse de Magister, Laghouat 2001.
- [9] Richardson, D. C. and R. Dale (2005): 'Looking to Understand: The Coupling Between Speakers' and Listeners' Eye Movements and its Relationship to Discourse Comprehension'. Cognitive Science, vol. 29, no. 29, pp. 1045–1060.
- [10] A. Giuliani, R. Benigni, P. Sirabella, J.P. Zbilut, A. Colosimo, Biophys. J. 78, 136 (2000).
- [11] T. Takada, H. Miyake and Y. Tanaka, "Pulse acoustic technology for measurement of charge distribution in dielectric materials for spacecraft", IEEE Trans. Plasma Science. Vol.34, pp.2176-2184, 2006.

- [12] H. M. Banford, R. A. Fouracre, A. Faucitano, A. Buttafava and F. Artinotti, "The influence of chemical structure on the dielectric behavior of polypropylene", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 3, pp. 594-598, 1996.
- [13] V. K. Agarwal, H. M. Banford, B. S. Bernstein, E. L. Brancato, R. A. Fouracre, G. C. Montanari, J. L. Parpal, J. N. Seguin, D. M. Ryder and J. Tanaka, "The mysteries of multifactor ageing" \_IEEE Elect. Insul. Mag., Vol. 11, No. 3, pp. 37-43, 1995.
- [14] K. Anandakumaran, W. Seidl and P. V.Castaldo, "Condition assessment of cable insulation systems in operating nuclear power plants", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 376-384, 1999.
- [15] I. Kuriyama, N. Hayakawa and Y. Nakase, "Radiation resistance of cable insulating materials for nuclear power generating stations", IEEE Trans. Electr. Insul. Vol. 13, pp. 164-171, 1978.
- [16] B. X. Du, "Wavelet analysis of scintillation discharge current on dc tracking resistance of gamma-ray irradiation polyethylene and polycarbonate", Radioisotopes, Vol. 50, pp. 1-11, 2001.
- [17] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, San Francisco, USA, Freeman, 1982.
- [18] H. S. Kim, R. Eykholt and J.D. Salas, "Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows", Physica D, Vol.127, pp. 48-60, 1999.
- [19] IEC Publ.60112, "Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials", 4<sup>th</sup> edition, 2003.
- [20] J.-E Eckmann, S.O. Kamphorst, Ruelle, D. Europhys. Lett. 4 (1987) 973-977.
- [21] C.L. Webber Jr., J.E Zbilut, J. Appl. Phys. 76 (1994) 965-973.
- [22] M.C. Casdagli, Physica D 108 (1997) 12--44.
- [23] E Faure, H. Korn, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 94 (1997) 6506-6511.
- [24] H. Korn, D.S. Faber, J. Neurophysiol. 63 (1990) 198-222.
- [25] Philippe Faure, Henri Korn \* Biologie Cellulaire et Mol~culaire du Neurone (INSERM, U261), Institut Pasteur, received in revised form 22 April 1998; accepted 11 May 1998  
Communicated by A.M. Albano
- [26] S.M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson and H. Hillborg, "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 1065-1080, 2007.

- [27] B. Marungsri, H. Shinokubo, R. Matsuoka and S. Kumagai, "Effect of Specimen Configuration on Deterioration of Silicone Rubber for Polymer Insulators in Salt Fog Ageing Test", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 13, pp. 129–138, 2006.
- [28] A.H. El-Hag, S.H. Jayaram and E.A. Cherney, "Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-fog", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 10, No. 1, pp. 128–136, 2003.
- [29] M.A.R.M. Fernando and S.M. Gubanski, "Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 6, pp. 688–694, 1999.
- [30] S. Kumagai and N. Yoshimura, "Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric Insulating Surfaces", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 681–690, 2004.
- [31] IEC 60507, "Artificial Pollution Test on High Voltage Insulators to be used on AC Systems", 1991.
- [32] J.P. Zbilut and J.C.L. Webber, "Embeddings and Delays as Derived from Quantification of Recurrence Plots", Phys. Letters A, Vol. 171, pp. 199-203, 1992.
- [34] B.X. Du and D.S. Dong, "Recurrence Plot Analysis of Discharge Current in Tracking Test of Gamma-ray Irradiated Polymer", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 974–981, 2008.
- [35] S. Kumagai and N. Yoshimura, "Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric Insulating Surfaces", IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 681–690, 2004.
- [36] T. Suda, "Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulator", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 481-487, 2005.
- [37] IEC 60507, "Artificial Pollution Test on High Voltage Insulators to be used on AC Systems", 1991.
- [38] A. Mekhaldi, M.Teguar et B.Moula au cours du 8<sup>ème</sup> conférence Nationale sur la haute tension, pp.33.37.2011 sous le titre « Comparaison des performances d'un isolateur haute tension soumis aux conditions de pollution artificielle ».

# Annexe

---

## I. Bases des signaux utilisés

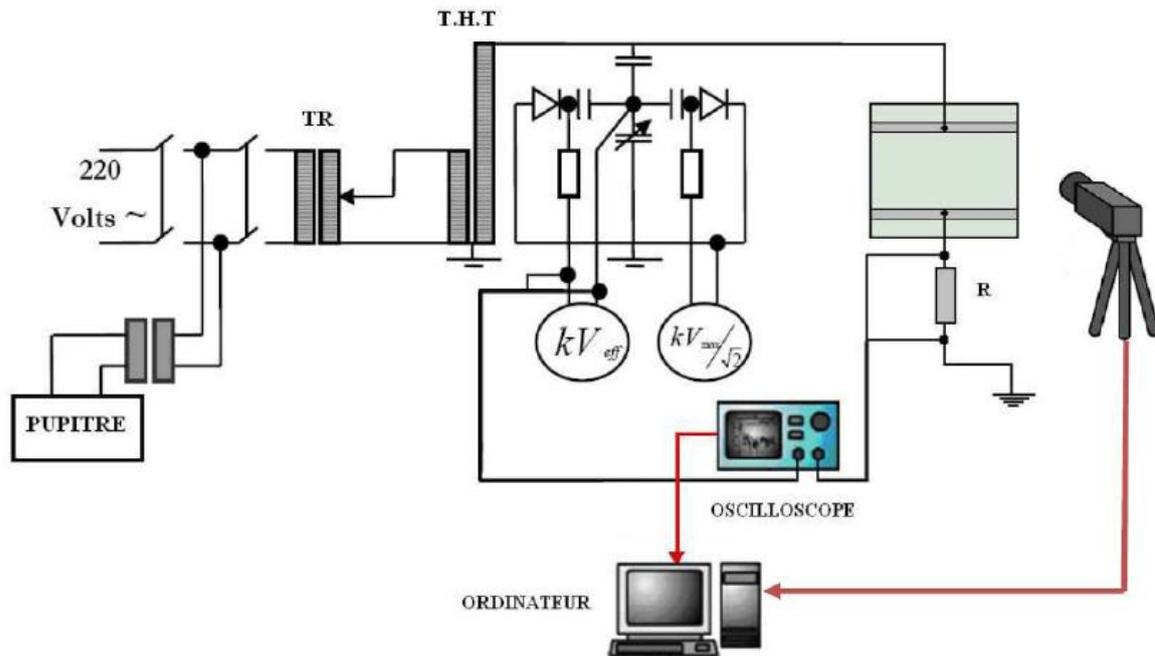
---

Pour la vérification des méthodes développées dans ce travail, une base des données contient des signaux issus des essais effectués au niveau du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sur deux modèles plans d'isolateurs. Définissons cette base.

Base de données B.Moula

- Cette base était élaborée par B. Moula et A. Mekhaldi et M.Teguar au cours du 8<sup>ème</sup> conférence Nationale sur la haute tension, pp.33.37.2011 sous le titre « Comparaison des performances d'un isolateur haute tension soumis aux conditions de pollution artificielle ».
- Le modèle utilisé est un modèle plan simulant l'isolateur réel PVS 120B.
- La pollution est non-uniforme.
- Cette base est constituée de deux ensembles. Le premier ensemble représentant les signaux du courant de fuite et le deuxième ensemble représentant les signaux de la tension appliquée. Chaque signal des deux ensembles est sur 10000 points correspondant à différentes bandes fréquentielles pour une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz.
- Pour la mesure du courant de fuite, une résistance de  $R = 1 \text{ k}\Omega$  a été utilisée.

Le montage utilisé pour récupérer les différents signaux de la base de données b.Moula est le même. Il est donné par la figure A.



**Fig A. Dispositif expérimental**

Notant que ce montage est pour la mesure des signaux de la tension appliquée et du celui du courant de fuite. Pour la mesure de la charge électrique, il suffit de remplacer la résistance R du montage par une capacité C.

---

## Les classes de pollution

---

Afin d'étudier de la sévérité de la pollution, on adopte la norme CEI 60-1 qui exprime la pollution en fonction de la salinité équivalente.

- **Classe 1.** Pollution faible d'origine naturelle (sauf marine). Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitation, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium de concentration 2.5g/l.
- **Classe 2.** Pollution moyenne d'origine naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé, la concentration de la salinité équivalente maximale retenue est de 10g/l.
- **Classe 3.** Pollution forte d'origine marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et sont situées près de la mer. Elles sont exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important, la concentration de la salinité équivalente maximale est de 80g/l.

Concentration en Kaolin [g/l]	Conductivité volumique [mS/cm]	Concentration de sel utilisé [g/l]	Classe
<b>40</b>	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3
<b>100</b>	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3
<b>200</b>	1,2 et 3,5	Entre 0.7 et 2.5	1
	6	Entre 3 et 10	2
	10 et 20	Inférieure à 60	3

**Tableau B. La norme CEI 85-1 en fonction de la conductivité volumique de la couche polluante et de la concentration de sel utilisé.**

## ملخص

في هذه الدراسة، يتم تنفيذ تشخيص سطح العوازل الملوثة، واستغلال قاعدة بيانات جمعت في مخبر التوتر العالي بالمدرسة المتعددة التقنيات. نركز اولاً على تطبيق تقنية RP مباشرة على تيار التسريب ثم على الترددات العالية. نقدم نظرية Cross recurrent plot ثم نشرع في تطبيقها مشاركة على اشارتي تيار التسريب والتوتر المطبق ثم على الترددات العالية لكليهما.

**الكلمات المفتاحية :** شدة التلوث, تيار التسريب, CRQA, Cross recurrent plot.

## Résumé

Dans le présent travail, le diagnostic de l'état de surface des isolateurs pollués est effectué, en exploitant des bases de données établies au niveau du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique. En premier lieu, nous nous intéressons à appliquer la technique RP directement sur le signal du courant de fuite, puis sur sa composante haute fréquence. En second lieu, nous introduisons la théorie du Cross recurrent plot. Nous procédons ensuite à l'application de la méthode Cross recurrent plot sur les deux signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, puis sur leurs détails.

**Mots-clefs :** diagnostic, sévérité de pollution, diagramme de récurrence, analyse quantitative de récurrence, Recurrent plot, Cross recurrent plot, analyse quantitative de récurrence croisée.

## Abstract

In this work, the diagnostic of the surface quality of the insulators pollute is carried out, by exploiting data bases established on the level of high voltage laboratory of ENP. Initially, we are interested to apply technique RP directly to the leakage current signal, then to its high frequency components. Secondly, we introduce the theory of the Cross-country race recurrent stud. We carry out the application of the Cross recurrent plot method on the leakage current and the applied voltage signals, then to their details.

**Keywords:** diagnosis, severity of pollution, diagram of recurrence, analyze quantitative recurrence, Recurrent stud, Cross recurrent stud, analyzes quantitative cross recurrence.