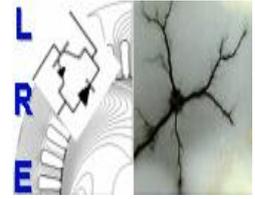




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

**GOZIM Bilal**

**Intitulé**

### **Etudes et application de la technique RP (Recurrent Plot) sur les signaux du courant de fuite et de la charge électrique**

**Directeurs du mémoire :**

A.MEKHALDI	Professeur	ENP
B.MOULA	M.A.B	UMMTO

**Président :**

M.O. Mahmoudi	Professeur	ENP
---------------	------------	-----

**Examineurs :**

H. Sahraoui	Docteur	ENP
T. Zebbadji	Docteur	ENP

**ENP 2013**

# Remerciements

*Nous remercions le bon Dieu miséricordieux et clément, qui nous protège et qui nous a guidés dans la bonne voie des sciences et de la connaissance.*

*Nous tenons à exprimé nos profonds respects et hommages à notre promoteur Mr. A.Mekhaldi pour ses précieux conseils et son dévouement irréprochable.*

*Un profond merci va à notre co-promoteur Mr. B.Moula qui nous a guidé au long de ce travail, pour sa patience et sa bonne humeur à toute épreuve.*

*Nous tenons également à remercier tous les enseignants ayant contribué à notre formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.*

*Enfin, nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre modeste travail.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À Celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance*

*À ma chère Mère.*

*À mon père, pour son amour et son soutien moral depuis mon enfance, Père merci.*

*À tout les membres de ma famille ; mes sœurs, mes frères.*

*Et à tous qui m'ont connu et aidé de près et de loin dans la réalisation de ce travail.*

*Bilal*

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Notion théorique sur la RP et ses applications

Introduction	
II.1. Le diagramme de récurrence (RP) .....	5
II.1.1. Définition .....	5
II.1.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence .....	6
II.1.3. Choix du seuil $\varepsilon$ .....	9
II.2. Cross récurrence plot (CRP) .....	10
II.3. Joint récurrence plot (JRP) .....	13
Conclusion	

## Chapitre II : Application de la RP, CRP et JRP sur les signaux du courant de fuite et de la charge électrique

Introduction	
III.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite.....	16
III.1.1. Cas d'une pollution de classe 1 .....	16
III.1.2. Cas d'une pollution de classe 2 .....	19
III.1.3. Cas d'une pollution de classe 3 .....	21
III.2. CRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique .....	23
III.2.1. Cas d'une pollution de classe 1 .....	23
III.2.2. Cas d'une pollution de classe 2 .....	26
III.2.3. Cas d'une pollution de classe 3 .....	28

III.3. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique .....	30
III.3.1. Cas d'une pollution de classe 1 .....	30
III.3.2. Cas d'une pollution de classe 2 .....	32
III.3.3. Cas d'une pollution de classe 3 .....	35

Conclusion

Conclusion générale .....	39
---------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

**Introduction**

**Générale**

L'un des problèmes majeurs présents dans les réseaux de haute et très haute tension et les pertes de l'énergie électrique, les pertes qui nous intéressent sont celles qui apparaissent au niveau des isolateurs, cela n'est pas due à leur dimensionnement mais plutôt au degré de pollution de leur surface qui détériore selon la gravité de la pollution la rigidité diélectrique de ces derniers [1], ce qui induit des courants de fuites plus ou moins sévère et dans le pire des cas un contournement, donc un court circuit, ce qui a de grave conséquence sur le comportement du réseau et cause des dégâts irréversible sur les équipements.

Donc, il est primordiale de connaitre à chaque instant le degré de la sévérité de pollution de ces isolateurs, afin de prévenir et d'éviter au maximum les phénomènes de décharges qui entraine le contournement. Ce dernier qui est considéré fatal pour les équipements électrique tel que les transformateurs, disjoncteur et autres, et très néfaste lorsqu'il se manifeste au niveau des lignes aériennes du réseau [2]. Donc on se doit de garder un état propre des isolateurs, soit en les nettoyants ou en les remplaçants.

Pour cela, plusieurs méthodes de diagnostic de l'état de surface existent telle que la transformée de Fourier discrète, transformée en ondelettes discrète (DWT) et continue (CWT) [3]. Toutes ces méthodes portant sur l'analyse des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée, ainsi que la technique RP (récurrent plot) que nous avons utilisé dans ce projet de fin d'étude.

Toutefois nous avons essayé d'utiliser quelques applications de la RP comme la JRP et la CRP afin d'arriver à un diagnostic plus précis de la sévérité de pollution sur la surface d'un modèle plan [4].

Notre étude porte sur l'influence de la tension appliquée et de la conductivité de la couche de pollution sur les signaux de courant de fuite, de tension appliquée et de la charge électrique pour les trois classes de pollution.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la théorie de cette technique et ces dérivées CRP et JRP. Le deuxième chapitre représente la majeure partie de notre travail qui consiste en l'application de la RP et ces dérivées, la CRP et la JRP aux premiers détails des signaux du

courant de fuite et de la charge électrique, pour différents niveaux de tensions, différentes classe de pollution et différentes conductivité afin de parvenir à la meilleur méthode qui donnent les résultats les plus précis et les plus utilisables en pratique.

Une conclusion prend place en fin, pour clôturée notre projet de fin d'étude, elle reprend tout les résultats et conclusion auxquelles nous sommes arrivés, au long de notre étude.

# **Chapitre I :**

## **Notions théoriques sur la RP et ses applications**

## Introduction

La RP (Recurrent Plot) ou diagramme de récurrence descend de la théorie du chaos en ce qui concerne son aspect qualitatif. Cette méthode étudie la récurrence des états dans un système dynamique. Elle nous donne des résultats exploitables pour ce qui est de l'étude de la sévérité de la pollution sur une surface plane, et cela par l'analyse des signaux électrique tels que le courant de fuite et de la tension appliquée. Nous avons étudié deux applications de cette méthode. La CRP ou diagramme de récurrence croisé et la JRP ou diagramme de récurrence jointe. Ces deux méthodes se basant sur la RP, sont présentées en tant qu'étude comparatives dérivant de la théorie du chaos, donc c'est par cette théorie qu'on commencera notre chapitre.

### I.1. Le diagramme de récurrence (RP)

#### I.1.1. Définition

Les caractéristiques fondamentales de la récurrence ont été introduites la première fois par Henry Poincaré en 1980 [1]. Et c'est seulement dans ce dernier siècle que la théorie des systèmes dynamiques a connu un progrès remarquable, et cela spécialement dans les dernières décennies grâce au développement d'ordinateurs rapides et efficaces, grâce à quoi a été découvert de nouvelles structures mathématiques dans ce domaine. Il a été reconnu que dans un large contexte, les récurrences font partie d'une des trois larges classes des invariants asymptotiques.

Vu que nous étudions la récurrence des systèmes dynamiques, nous devons définir l'outil qui mesure la récurrence d'une trajectoire  $\vec{x}_i \in R^d$  dans une phase spatiale: La RP visualise efficacement les récurrences et peut formellement être exprimée par la matrice [2] :

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

Où  $N$  est le nombre de points mesurés  $\vec{x}_i$ ,  $\varepsilon$  est la distance seuil,  $\theta(\cdot)$  est une fonction booléenne (c'est-à-dire  $\theta(x) = 0$ , si  $x < 0$ , et  $\theta(x) = 1$  sinon), et  $\|\cdot\|$  est une norme.

Pour  $\varepsilon$ -états récurrents, c'est-à-dire pour les états qui sont dans un voisinage  $\varepsilon$ , la notion suivante a été introduite :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \iff R_{i,j} \equiv 1, \quad (\text{I.2})$$

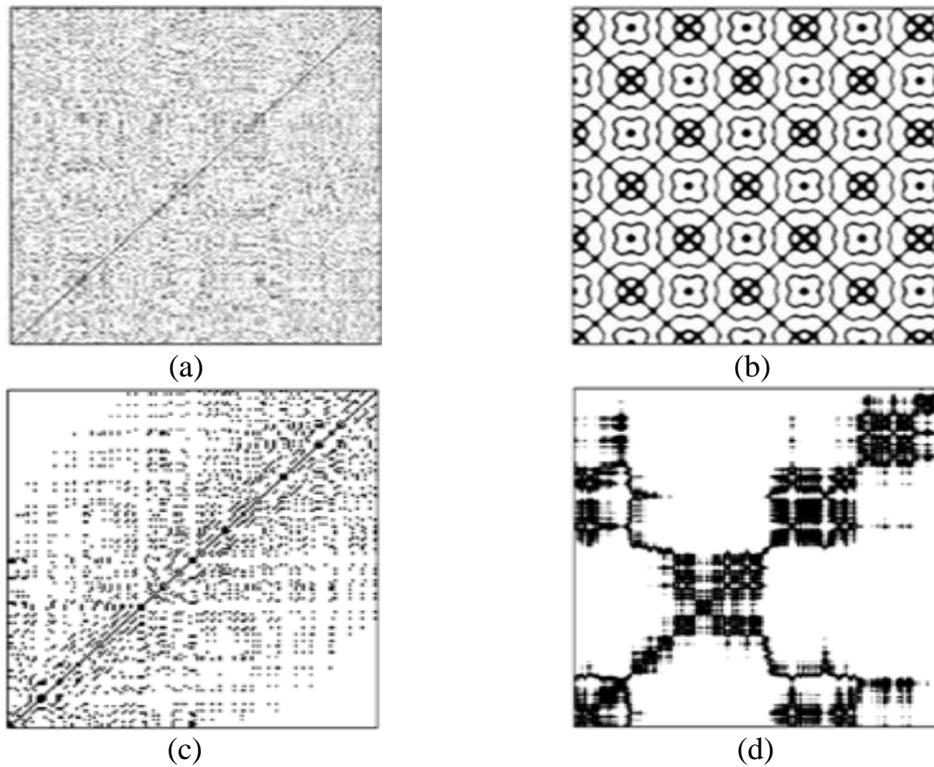
La RP est obtenue par le tracé de la matrice récurrence (figure I.2), et en utilisant différentes couleurs pour ces entrées binaires, par exemple, tracé de point noir au coordonnées  $(i, j)$ , si  $R_{i,j} \equiv 1$ , et des points blanc, si  $R_{i,j} \equiv 0$ . Les deux axes de la RP sont des axes temporels exposés par convention vers la droite et vers le haut. Car  $R_{i,i} \equiv 1 \mid_{i=1}^N$  par définition, la RP a toujours une ligne principale noir diagonale, ligne identité (LOI). En outre la RP est symétrique par définition par rapport à la diagonale car  $R_{i,j} = R_{j,i}$ .

### I.1.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence

Le but initial de la RP était de visualiser la trajectoire dans l'espace de phase, qui est particulièrement avantageux dans le cas des systèmes dimensionnels élevés.

Il existe 4 types de diagramme de récurrence (figure I.4), et cela dépendamment de leurs structures :

- diagramme homogène : la RP homogène est typique pour les systèmes stationnaires dans lesquels les temps de relaxation sont courts en comparaison au temps enjambés par la RP (Figure I.1.a).
- diagramme périodique et quasi-périodique: les systèmes périodiques et quasi-périodiques ont la RP avec des structures récurrentes orientées, périodiques ou quasi-périodiques de diagonale (lignes, structures diagonales de damier) (Figure I.1.b).
- diagramme dévié : est provoquée par des systèmes avec des paramètres lentement variables, c.-à-d. systèmes non stationnaires (Figure I.1.c).
- diagramme interrompu : Les changements brusques de la dynamique causent les secteurs blancs ou les bandes dans le RP (Figure I.1.d) [3, 4].



**Figure 1.1.** *Caractéristiques topologiques des diagrammes de récurrence*  
 (a) *Homogène, (b) périodique, (c) dévié et (d) interrompu.*

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 du seuil  $\varepsilon$ . 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 [5].

Les points à faible densité représentent un dispersement 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 :

Exemple	Signification
(1) <b>Homogénéité</b>	Le processus est stationnaire.
(2) <b>Éclaircissement des coins haut gauche et bas droit</b>	Données non stationnaires; le processus contient un mouvement ou un décalage.
(3) <b>Disruptions (bandes blanches)</b>	Données non stationnaires ; certains état sont rares; présence de transitions.
(4) <b>Modèle périodique/ quasi-périodique</b>	Processus cyclique ; la période correspond à la distance entre les lignes ; différentes distances entre les lignes diagonales révèlent un processus quasi-périodique.
(5) <b>Points isolés</b>	Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.
(6) <b>Points denses</b>	La densité des points indique l'intensité du processus étudié. Si les points gagnent en densité, l'activité du processus étudié s'intensifie.
(7) <b>Lignes diagonales (parallèles à la LOI)</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.
(8) <b>Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)</b>	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion $m$ insuffisante.
(9) <b>Lignes verticales et horizontales</b>	Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquent des états laminaires.

<p><b>(10) Lignes longues arquées</b></p>	<p>L'évolution est similaire à d'autres périodes mais à une vitesse différente ; la dynamique du système peut être variable.</p>
---	--

*Tableau I.1. Exemple typique de diagramme de récurrence et leurs significations.*

### I.1.3. Choix du seuil $\epsilon$

Le seuil  $\epsilon$  est un paramètre crucial de la RP. Par conséquent, une attention particulière est exigée pour ce qui est de son choix. Si le  $\epsilon$  choisi est trop petit, il peut n'y avoir presque aucun point de récurrence ce qui rendra notre étude de la structure de récurrence du système futile car aucun paramètre fondamental n'apparaîtra. D'autre part, si le  $\epsilon$  choisi est trop grand, presque chaque point sera voisin à chaque autre point, ce qui mènera à beaucoup d'objets façonnés et une RP totalement erronée. Ainsi, un  $\epsilon$  trop grand inclut également des points dans le voisinage qui sont en réalité les points consécutifs simples sur la trajectoire. Cet effet s'appelle mouvement tangentiel et cause des structures diagonales plus épaisses et plus longues dans la RP pendant qu'elles ne le sont pas réellement. Par conséquent, nous devons trouver un compromis en ce qui concerne la valeur du seuil  $\epsilon$ .

D'ailleurs, l'influence du bruit peut nécessiter le choix d'un plus grand seuil, parce qu'un bruit tordrait n'importe quelle structure existante dans la RP. Avec un seuil plus élevé, cette structure peut donc être préservée. Plusieurs principes ont été préconisés dans la littérature pour le choix du seuil  $\epsilon$ , par exemple, il a été suggéré de prendre la valeur de quelque pour cent du diamètre maximum de l'espace de phase comme seuil [6]. En outre, il ne devrait pas dépasser 10% du diamètre moyen ou maximum de l'espace de phase [7].

Une autre possibilité est de choisir le seuil  $\epsilon$  selon la densité de point de récurrence du RP en cherchant une région de graduation dans la densité de point de récurrence. Cependant, ceci peut ne pas convenir aux données non stationnaires. Pour ce cas, on lui a proposé de choisir  $\epsilon$  tels que la densité de point de répétition est approximativement de 1% [8].

Un autre critère pour le choix du seuil  $\varepsilon$  tient compte qu'une mesure d'un processus est une composition du vrai signal et un certain bruit d'observation avec l'écart type  $\sigma$  [9]. La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à  $0.25\sigma$ ,  $\sigma$  représentant la déviation standard du signal étudié.

## I.2. Cross récurrence plot (CRP)

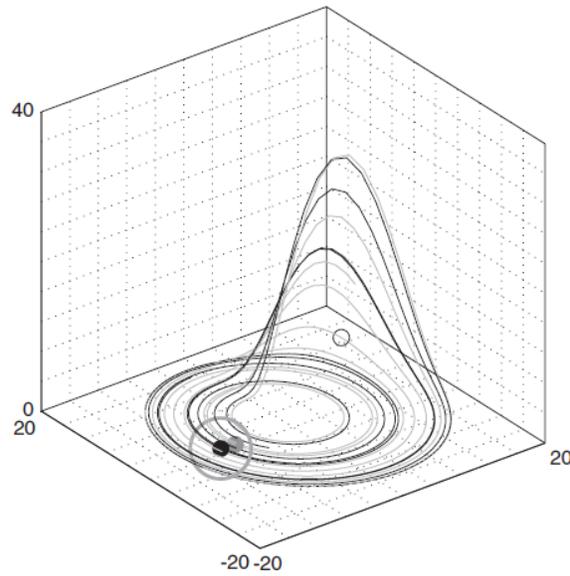
C'est une extension à deux variables de la RP qui a été introduite afin d'analyser la dépendance entre deux systèmes différents en comparant leur état. Elle peut aussi être considérée comme une généralisation de la fonction linéaire de corrélation croisée [10,11]. On suppose avoir deux systèmes dynamiques chacun représenté par des trajectoires  $X_i$  et  $Y_i$  dans une phase spatiale  $d$ -dimensionnel (figure I.2).

Analogiquement à la RP, la matrice cross récurrence (figure I.3) (récurrence croisée) est définie par :

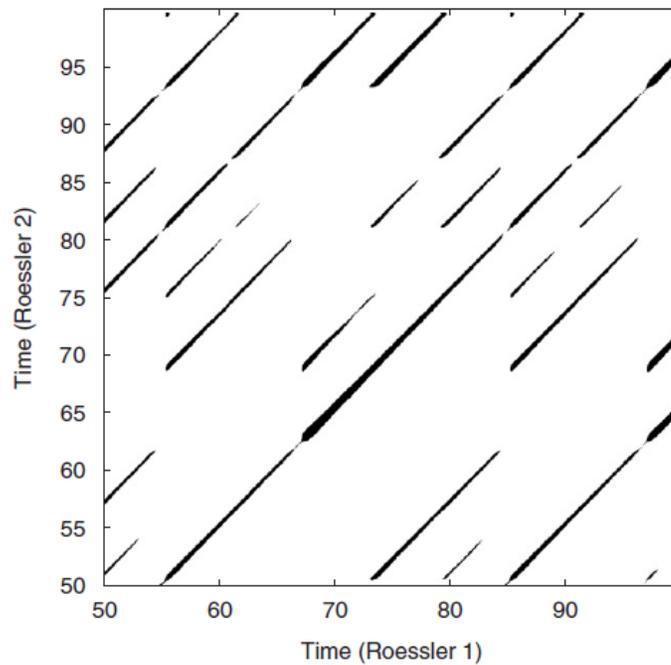
$$CR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{y}_j\|), \quad i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M, \quad (I.3)$$

Où les longueurs des trajectoires de  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  ne doivent pas forcément être identiques, et par conséquent la matrice CR n'est pas nécessairement carrée. Ceci dit les deux systèmes sont représentés sur la même phase spatiale, car la CRP recherche pour ces temps où un état pour le premier système récurse à un autre dans le deuxième système.

Pour l'utilisation des données expérimentales il est souvent nécessaire de reconstruire les trajectoires dans la phase spatiale. Si les paramètres d'immersions sont estimés pour les deux séries de temps mais ne sont pas égaux le plus grand doit être choisi. Cependant, les données en considération doivent être pour le même procédé et doivent actuellement représenter la même chose observable. Par conséquent, l'espace de phase reconstruit doit être le même. L'exception est le modèle d'ordre récurrence plot croisée, ou ne l'ont compare pas les valeurs des états mais l'ordre local de classement des deux systèmes [12]. Alors les systèmes peuvent être représentés pour différent observables (ou séries de temps de très différentes amplitudes).



**Figure I.2.** Phase spatiale des trajectoires de deux systèmes Rössler couplé.



**Figure I.3.** CRP correspondants aux trajectoires des deux systèmes Rössler couplé.

Cette extension à deux variables de la RP a été aussi introduite pour la quantification récurrente croisée CRQA [10,13]. Les composantes de  $\vec{x}_i$  et  $\vec{y}_i$  sont souvent normalisées avant le calcul de la matrice récurrente croisée. D'autres possibilités sont l'utilisation d'une quantité fixée de voisinages (éventail, FAN) pour chaque  $\vec{x}_i$  ou l'utilisation du modèle d'ordre [12]. De cette

manière, les composantes  $\vec{x}_i$  et  $\vec{y}_i$  n'ont plus besoin d'être normalisées. Le dernier choix du voisinage est plus avantageux pour les trajectoires à changement lent.

Depuis que les valeurs de la diagonale principale  $CR_{i,i} \Big|_{i=1}^N$  ne sont pas nécessairement les mêmes, il n'y a habituellement plus de diagonale principale noires (figure I.3). Mis à part, tout ce qui concerne les structures de la RP qui tiennent aussi pour la CRP. Les lignes diagonales sont ici aussi d'un intérêt majeur. Il représente les segments pour les deux trajectoires, qui sont parallèles pour un certain temps. La fréquence et la longueur de ces lignes sont évidemment liées à une certaine similarité entre les dynamiques des deux systèmes, qui ne peuvent pas être détecté par une fonction de corrélation croisée commune [11].

Un important avantage de la CRP est la révélation de différence locale de l'évolution dynamique des segments à trajectoires proches, représenté par des lignes arquées. Une dilatation ou compression temporelle d'une des trajectoires cause une distorsion des lignes diagonales. En assumant deux trajectoires identiques, La CRP coïncide avec la RP d'une trajectoire et contient la diagonale principale noire ou ligne identité (LOI). Si les valeurs de la deuxième trajectoire sont légèrement modifiées, la LOI devient légèrement abrupte et sera appelée ligne de synchronisation (LOS). Cela dit, si on ne modifie pas les amplitudes mais à l'instar on dilate ou comprime légèrement la deuxième trajectoire, la LOS sera toujours continue mais ne sera plus une ligne droite de pente un (angle de  $45^\circ$ ) [14].

Comme déjà vue la pente locale des lignes dans une RP comme dans une CRP correspond à la transformation des axes temporels des deux trajectoires considérées [14]. Un décalage de temps entre les trajectoires cause une dislocation de la LOS. Par conséquent, la LOS peut se trouver assez loin de la diagonale principale de la CRP. Comme on va le voir dans l'exemple suivant, la LOS permet de trouver une fonction de ré-graduation non-paramétrique entre différentes séries de temps.

### I.3. Joint récurrence plot (JRP)

Comme on la précédemment vue l'extension à deux variables de la RP sur la CRP permet l'étude des relations entre deux différent systèmes par l'examen de l'occurrence des états semblables. Cependant, la CRP ne peut pas être utilisée pour l'analyse de deux séries de temps physiquement différentes, parce que la différence entre deux vecteurs avec des unités physiques différentes ou encore des dimensions d'espace de phase différentes n'a pas de sens.

Une autre possibilité pour comparer différents systèmes consiste à considéré les répétitions de leurs trajectoires dans leur phase spatiale et voir les instants ou ces répétitions sont simultanées c'est-à-dire une RP commune occurrente. Par cette approche, la phase spatiale individuelle des deux systèmes reste préservée. Formellement, cela correspond à une extension de la phase spatiale à  $R^{d_x + d_y}$ , ou  $d_x$  et  $d_y$  sont les dimensions des phases spatiales des systèmes, qui sont généralement différents (c'est-à-dire ca correspond au produit direct des phases spatiale individuelles) [4].

Vu que deux différents seuils pour les deux systèmes  $\varepsilon^{\vec{x}}$  et  $\varepsilon^{\vec{y}}$  se présentent alors les critères de choix du seuil peuvent être appliqués séparément suivant les mesures naturelles des deux systèmes. Par conséquent, l'introduction de la matrice de récurrence jointe pour les deux systèmes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  devient intuitive :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}) = \theta(\varepsilon^{\vec{x}} - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|)\theta(\varepsilon^{\vec{y}} - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (I.4)$$

Ou plus généralement pour N systèmes est en utilisant l'équation (I.10), la matrice à multi variable de récurrence jointe peut être introduite par :

$$JR_{i,j}^{\vec{x}(1,\dots,n)}(\varepsilon^{\vec{x}_1}, \dots, \varepsilon^{\vec{x}_n}) = \prod R_{i,j}^{\vec{x}(k)}(\varepsilon^{\vec{x}(k)}), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (I.5)$$

Dans cette approche, une récurrence va prendre place si un point  $\vec{x}_j$  dans la première trajectoire revient au voisinage d'un ancien point  $\vec{x}_i$ , simultanément un point  $\vec{y}_j$  de la seconde trajectoire revient au voisinage de l'ancien point  $\vec{y}_i$ . Cela signifie, que la probabilité jointe que les deux récurrences (ou  $n$  récurrences, dans le cas multidimensionnelle) se produit simultanément dans leurs phases spatiales respectives est étudiée.

La représentation graphique de la matrice  $JR_{i,j}$  est appelée **JRP**. La définition de la RP est une définition d'un cas spéciale de la JRP pour un seul système seulement.

De cette façon, si les systèmes sont physiquement différents (par exemple ils peuvent avoir des phases spatiales différentes  $d_1, \dots, d_n$  ou peuvent être reconstruite d'après différents observables physiques), la récurrence jointe est encore bien définie, en contraste de la récurrence croisée.

Par ailleurs, la JRP est invariante sous la permutation des coordonnées dans l'un ou chacun des deux systèmes considérés.

D'ailleurs, une version retardée de la matrice de récurrence jointe peut être introduite :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}, \tau) = JR_{i,j}^{\vec{x}}(\varepsilon^{\vec{x}})JR_{i+\tau,j+\tau}^{\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{y}}), \quad i, j = 1, \dots, N - \tau, \quad (I.6)$$

Ce qui est le plus utilisé pour l'analyse des systèmes retardés en interaction (exemple pour la synchronisation de retard) [15,16], ou encore pour les systèmes à rétroaction.

La JRP peut encore être calculée en utilisant une quantité fixée des voisinages les plus proches. Ensuite, chaque RP qui contribue à la JRP finale est calculée en utilisant le même nombre pour les voisinages les plus proches.

## Conclusion

On est arrivé d'après cette théorie, que la RP et ses applications peuvent être utilisées de manière à donner de bons résultats concernant le diagnostic des décharges électrique et du phénomène de contournement.

Nous allons essayer d'utiliser des dérivées de cette méthode tel que la CRP et la JRP afin d'arriver à diagnostiquer de façon précise le degré de pollution donc sa classe, en étudiant les différents phénomènes qui sont en relation directe avec elle, tel que les décharges superficielle et les décharges partielles.

# **Chapitre II :**

**Application de la RP, CRP et  
JRP sur les signaux du courant  
de fuite et de la charge  
électrique**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la majeure partie de notre travail, qui est le diagnostic de l'état de pollution d'une surface plane d'un isolateur. Cela par l'étude de la RP, JRP et de la CRP appliquées aux signaux du courant de fuite et de la charge électrique pour les différentes classes de pollution et différents niveaux de tensions appliquées. Cette étude a pour but d'obtenir une corrélation directe entre les résultats obtenus et l'état de surface du modèle plan de l'isolateur. Pour cela, nous avons décomposé notre travail en deux parties :

La première, concerne la RP du signal du courant de fuite pour les trois classes de pollution à différents niveaux de tensions appliquées. Vu que notre travail est basé essentiellement sur le courant de fuite, la JRP sera utilisée comme une étude comparative de deux RP.

La deuxième partie porte sur la CRP et la JRP des signaux du courant de fuite et de la charge électrique. C'est la que nous avons menés une petite comparaison entre ces deux méthodes pour voir laquelle des deux donne les résultats les mieux adaptés à notre diagnostic.

On notera que désormais, dans ce chapitre, la technique RP ainsi que la CRP et la JRP seront exclusivement appliquées au détail haute fréquence D1 résultant de la décomposition préalable à l'aide de la DWT du signal de courant de fuite en utilisant l'ondelette de *Daubechies 4*.

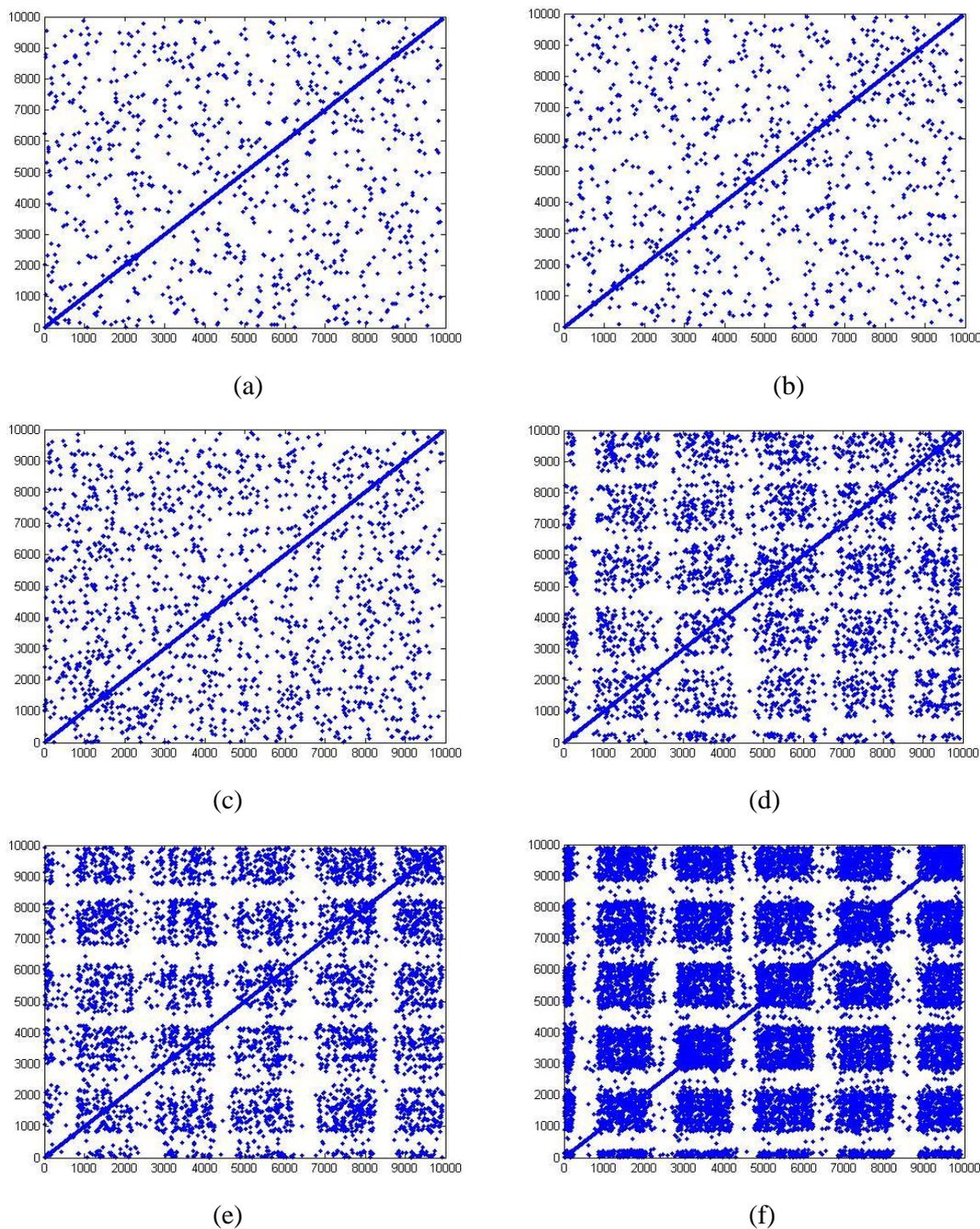
Pour notre étude des différentes RP en fonction des classes de pollutions, nous avons utilisé la base de données **G1Mod1** pour la technique RP et les bases de données **G1Mod1** et **G2Mod1** (annexe A) pour la CRP et la JRP.

### III.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite

On applique la technique RP sur le détail D1 du courant de fuite pour les trois classes de pollution à différents niveaux de tensions appliquées.

#### III.1.1. Cas d'une pollution de classe 1

Pour cette classe de pollution, on s'intéressera à un signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 3,5mS/cm.



**Figure III.1.** RP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff.

D'après les figures III.1 et suivant l'analyse visuelle, nous avons interprété de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la RP du détail D1 du courant de fuite.

La figure III.1.a de tension appliquée de  $5kV_{eff}$ , est caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure schématise le nombre très petits voir rares des décharges de surface apparaissant lors des essais. Toutefois ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, la probabilité pour que l'arc électrique se produise reste infime ce qui nous amène à élever les niveaux de tension afin de pouvoir remarquer les paramètres décrivant cet arc dans la RP.

Dans la figure III.1.b, où la tension appliquée est de  $10kV_{eff}$ , de structure très semblable à celle de la figure 1.a, avec une légère augmentation du nombre de points vue l'élévation de la tension appliquée. Toutefois, cela reste insuffisant pour l'apparition de l'arc ou le contournement.

Dans la figure III.1.c, où la tension appliquée est de  $15kV_{eff}$ , la structure reste assez éparpillée même si le nombre de points a significativement augmenté et qu'ils sont devenus plus denses. Ce qui nous incite d'autant plus à relier directement ce phénomène aux décharges superficielles, car elles aussi se sont intensifiées pour ce niveau de tension, mais tout de même sans pouvoir donner naissance à l'arc électrique.

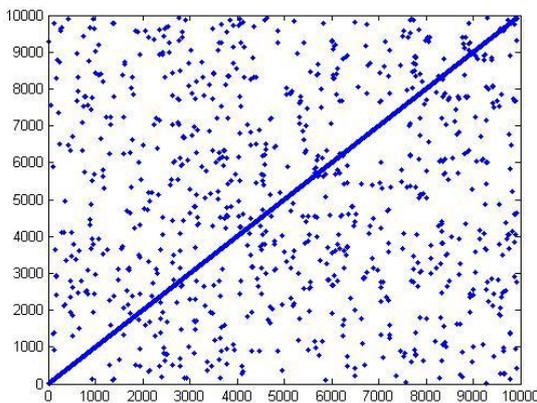
Dans la figure III.1.d, où la tension appliquée est de  $20kV_{eff}$ , nous donne une nouvelle structure bien différente des deux premières, plus ordonnée. Les points sont plus denses dans des espaces de formes rectangulaires, bien que très grossières. Cela dit, on remarque l'apparition de bandes blanches toute aussi grossières mais tout de mêmes visibles, celles-ci caractérisent l'arrivée d'un état de transition certain. Cette structure explique très bien ce qui est entrain de se passer physiquement, des décharges superficielles plus intenses (points plus denses), ces décharges sont de plus en plus intermittentes et la surface est devenue saturée ce qui laisse prévoir une apparition imminente de l'arc électrique.

Dans la figure III.1.e, où la tension appliquée est de  $25kV_{eff}$ , bien que très similaire à la précédente, cette structure est plus affinée moins grossière, tout de même avec une diminution de la densité des points. Physiquement, nous avons l'apparition de petits arcs électriques dans les zones propres remplaçant les décharges superficielles qui diminuent.

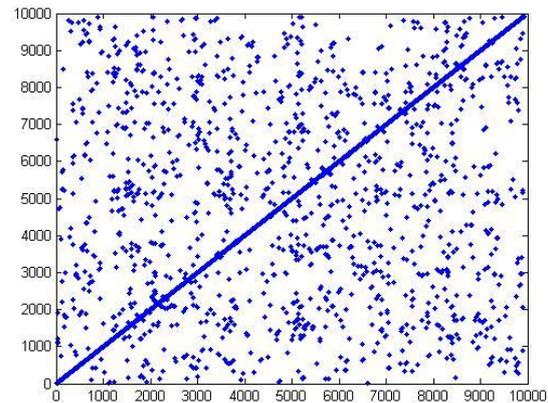
Finalement, la figure III.1.f, avec une tension de  $30kV_{eff}$ , représente une structure encore plus affinée, avec tout de même cette fois une très grande densité de points séparés par des bandes blanches bien dessinées. Cette structure définit ce qui se passe sur l'isolateur par le fait de la présence des décharges de fortes intensités sur sa surface et l'état fort intermittent que soulignent les bandes blanches. Tout cela nous amène à l'imminence du claquage, c'est-à-dire la formation de l'arc électrique de contournement.

### III.1.2. Cas d'une pollution de classe 2

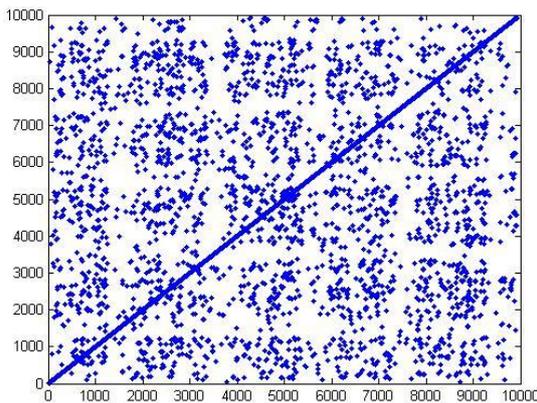
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $6mS/cm$ .



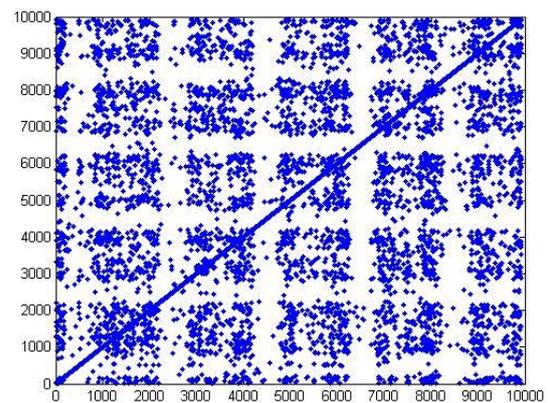
(a)



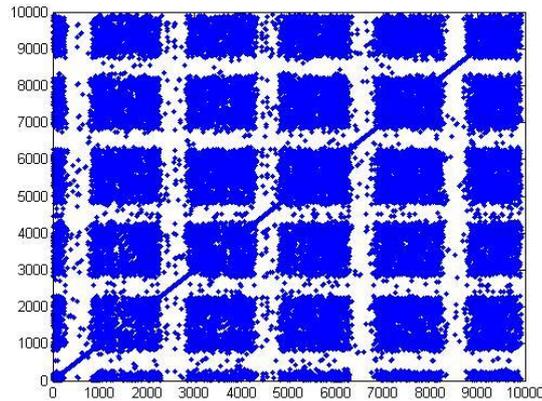
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.2.** RP des composantes hautes fréquences (D1) du signal du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

D'après les figures III.2 et suivant l'analyse visuelle, nous allons continuer d'interpréter de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la RP du détail D1 du courant de fuite, cette fois pour une pollution de classe 2.

Figure III.2.a, tension appliquée de 5kVeff, toujours avec un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure explique le nombre très petits voir rares des décharges superficielles apparaissant lors des essais.

Toutefois, ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, l'arc électrique est très loin de se produire.

Dans la figure III.2.b, où la tension appliquée est de 10kVeff, même si la tension fut élevée la structure diffère de la figure 4.a, par une légère augmentation du nombre de points. Dans ce cas, aussi le contournement n'est pas encore envisageable.

Pour la figure III.2.c, la tension appliquée est de 15kVeff, définie par une structure plus dense que les premières et bien moins éparpillée. Le nombre de points a significativement augmenté et s'est intensifié, ce qui explique directement les décharges superficielles devenues plus intenses et plus intermittentes. La surface est devenue saturée pour ce niveau de tension, avec tout de même la présence de bandes blanches encore très grossières et mal définies.

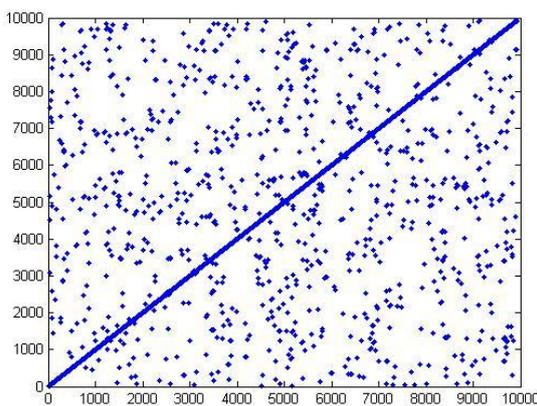
Celles-ci indiquent l'arrivée d'un état de transition, malgré que cela reste insuffisant pour donner naissance à l'arc électrique, qui tout de même n'est plus très loin.

Dans le cas de la figure III.2.d, où la tension appliquée est de  $20kV_{eff}$ , nous avons une structure bien plus affinée que la précédente. Les points se densifient dans des espaces de formes rectangulaires moins grossières, cela dit, on remarque la distinction des bandes blanches un peu grossières mais bien visibles, qui caractérisent l'approche d'un état de transition certain. Cela laisse prévoir l'apparition imminente de l'arc électrique.

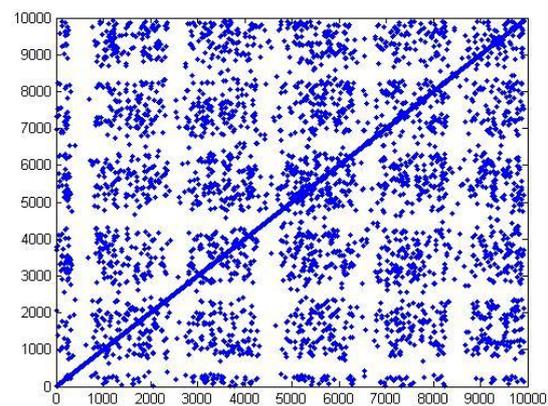
Finalement, dans la figure III.2.e, tension appliquée est de  $25kV_{eff}$ , bien que de même nature que la précédente cette structure est bien plus affinée, ayant une très grande densité de points. Cela est remarquable physiquement par la production de décharges de fortes intensités dans les zones propres. Ainsi, avec l'état fort intermittent que préconisent les bandes blanches, l'imminence du claquage et quasi ressenti, début de formation de l'arc électrique de contournement.

### III.1.3. Cas d'une pollution de classe 3

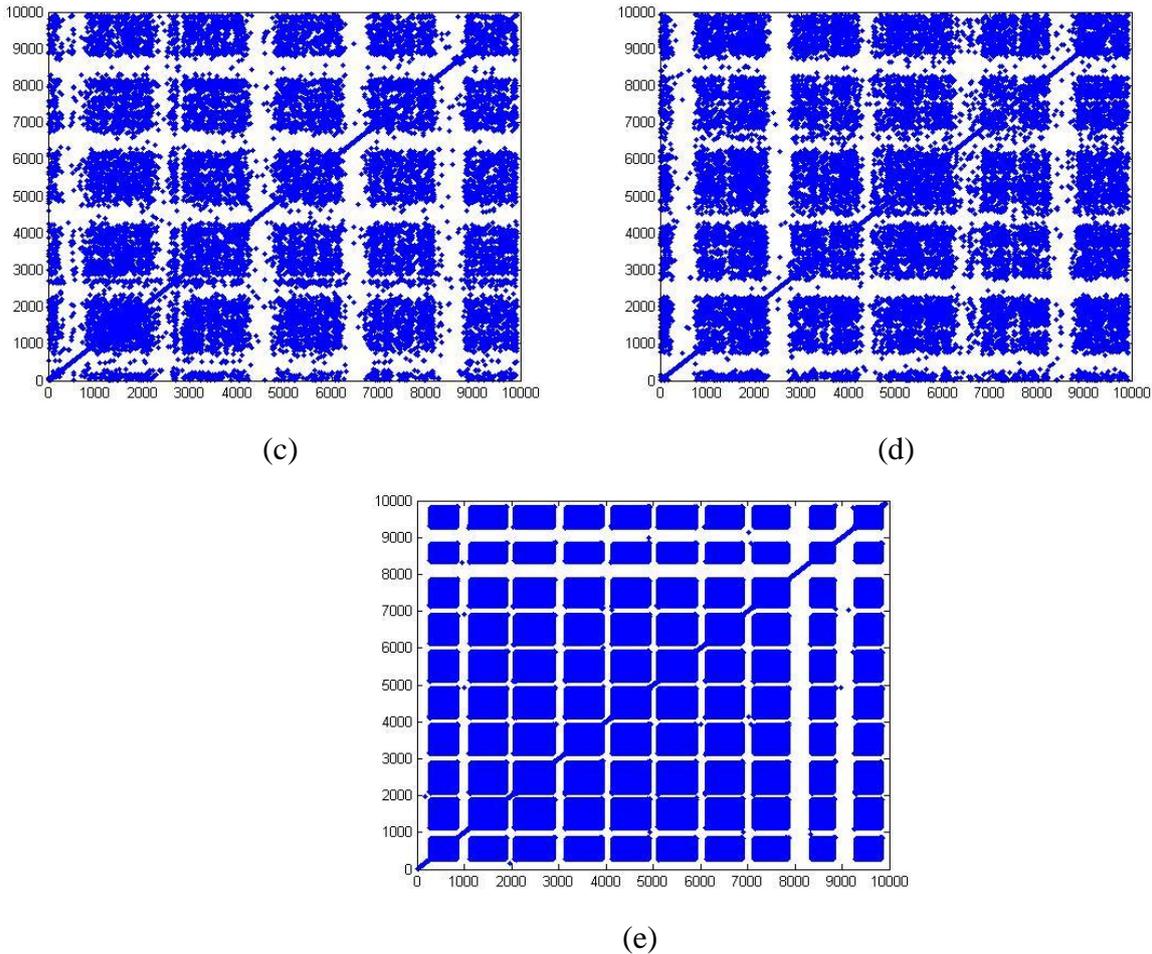
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $20mS/cm$ .



(a)



(b)



**Figure III.3.** RP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Les figures III.3 montrent les différents RP des composantes hautes fréquences du détail D1 (25 à 50 kHz) pour une pollution de classe 3.

D'après la figure III.3.a, pour une faible tension de 5kVeff appliquée aux bornes de l'isolateur, la structure éparpillée et toujours de mise, elle indique la faible activité des décharges à la surface de l'isolateur.

Pour la figure III.3.b, où la tension appliquée est de 10kVeff, l'augmentation du nombre de points et accompagnée d'un changement de structure. Celle-ci est caractérisée par un début de formation des bandes blanches. Une telle structure n'apparaît pas si prématurément pour un tel bas niveau de tension, cela est dû à la sévérité de pollution. Cette structure annonce la présence d'un état non stationnaire. Cela relate ce qui arrive en pratique, des décharges

surfaiques plus prononcées avec un état de contournement proche par rapport à un tel niveau de tension.

Dans la figure III.3.c, pour une tension appliquée de  $15kV_{eff}$ , nous observons une même structure que précédemment, plus dense avec des bandes blanches mieux établies. Cela est dû à l'augmentation des décharges surfaiques, et le contournement et d'autant plus proche vue la distinction des bandes blanches.

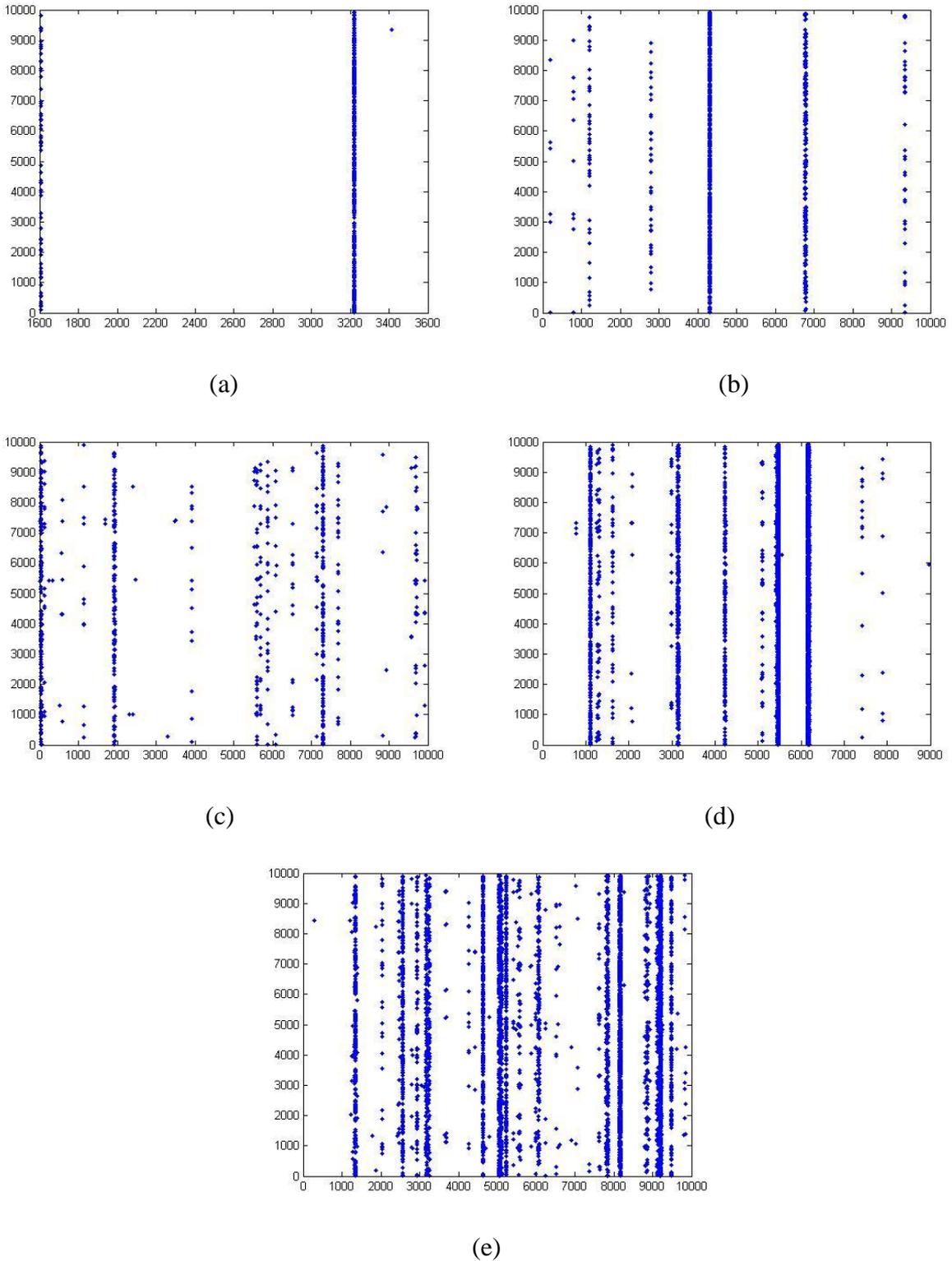
Par contre, la figure III.3.d d'une tension appliquée de  $20kV_{eff}$ , montre une structure encore mieux affinée. On a les mêmes bandes blanches avec un peu plus d'intensité dans les points. Ce qui caractérise les décharges très intenses et de plus en plus intermittentes. La saturation complète des bandes propres est prématurée pour un tel niveau de tension. De cet état, on peut prévoir une future apparition d'arcs électriques.

Pour une tension appliquée supérieure ( $25kV_{eff}$ ), la figure III.3.e représente une structure pouvant être qualifiée de particulière même si elle ressemble à la précédente. Toutefois, sa particularité réside dans le fait qu'elle est parfaite du point de vue de la densité et du contraste créée par les bandes blanches. Ce cas est différent des autres pollutions qui comportent une phase où la densité des décharges surfaiques diminuent de sorte que le phénomène de formation d'arc puisse se produire. Cette phase n'existe pas dans la troisième classe. Vue l'importance de cette classe de pollution, le contournement se fait sans formation d'arc électrique reliant les différentes décharges partielles, ce qui est logique étant donné aussi l'accroissement des décharges surfaiques avec l'augmentation de la tension.

## **III.2. CRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique**

### **III.2.1. Cas d'une pollution de classe 1**

Nous nous intéressons ici à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $3,5mS/cm$ .



**Figure III.4.** CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe1: (a) 10kVeff, (b) 15kVeff, (c) 20kVeff, (d) 25kVeff, (e) 30kVeff.

La figure III.4 représente la CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1. Notre interprétation portera sur la structure

de cette CRP qui compare la récurrence entre les deux signaux celui du courant de fuite et celui de la charge électrique. Toutefois cette structure étant très pauvre, son interprétation ne sera pas assez enrichissante pour notre étude. C'est la cause pour laquelle nous nous sommes pas attardés sur cette méthode.

Toutes les structures de la CRP du signal du courant de fuite et de la charge électrique sont à base de lignes verticales. Celles-ci sont normalement diagonales donc décrivant un comportement périodique, ce redressement est due au fait que le signal du courant de fuite est déphasé par rapport à celui de la charge électrique et à cause de la dimension d'immersion de la CRP qui doit être assez importante pour éviter les informations dues aux déformations non consistantes (tel que les bruits dus aux interférences).

Pour la première figure III.4.a, dont la tension appliquée est de  $10kV_{eff}$ , on a une structure blanche à l'exception de quelques points formant une seule ligne verticale. En réalité, pour ce niveau de tension, on ne remarque rien mis a part la formation de quelques décharges superficielles bien peu intenses pour pouvoir donner naissance à des décharges superficielles.

Dans la figure III.4.b, où la tension appliquée est de  $15kV_{eff}$ , nous avons une structure qui ne change pas beaucoup, juste un petit accroissement du nombre de points et des lignes verticales. On a relié le nombre de décharges superficielles directement au nombre de points, et celui des décharges partielles aux lignes verticales. Plus ces lignes sont denses, plus les décharges sont intenses, c'est ce qui se passe en réalité. Toutefois, le contournement en lui-même reste loin pour ce niveau de tension.

Concernant la figure III.4.c, tension appliquée  $20kV_{eff}$ , la structure a changée. Le nombre de points a considérablement augmentés mais le nombre de ligne reste inchangé. Ce qui est en accord avec ce qui se passe physiquement, car le nombre de décharges partielles présentent sur les bandes propres n'augmente plus. Toutefois, les décharges superficielles augmentent est s'intensifient beaucoup plus. La formation de l'arc n'est plus très loin mais on ne peut pas la déceler dans cette CRP.

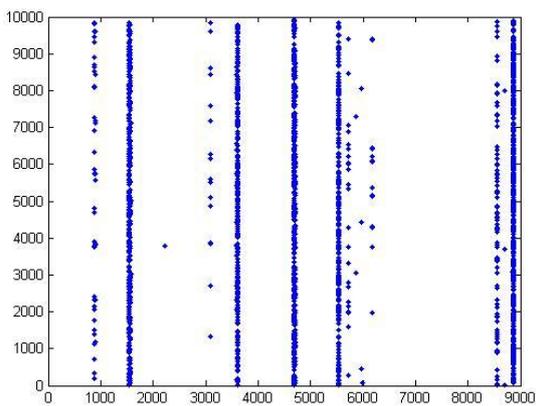
Pour la figure III.4.d, avec une tension de  $25kV_{eff}$ , le changement de structure est plus prononcé et la structure maintenant est presque toute autre, le nombre de points a radicalement augmenté et le nombre de lignes aussi. Cela explique le nombre et l'intensité importante des

décharges superficielles, les décharges partielles augmente et leur intensité croit significativement.

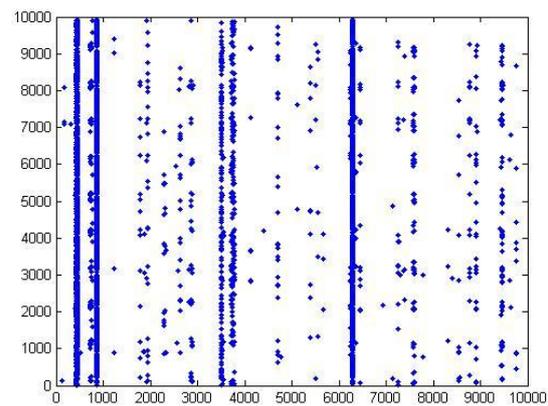
La dernière figure III.4.e, tension 30kV<sub>eff</sub>, a une structure totalement différente. Le nombre de points n'augmente pas, mais celui des lignes verticales lui augmente est devient très grand part rapport aux structures précédentes. Physiquement le nombre des décharges superficielles reste le même, le changement est perceptible au niveau des décharges partielles. Celles-ci augmentent et s'intensifient et commencent à ce reliées afin de formé l'arc électrique et donc produire le contournement de l'isolateur.

### III.2.2. Cas d'une pollution de classe 2

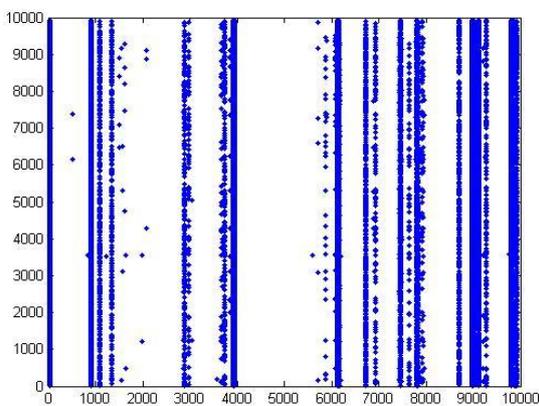
Nous nous intéresserons à un signal du courant de fuite et de la tension sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 6mS/cm.



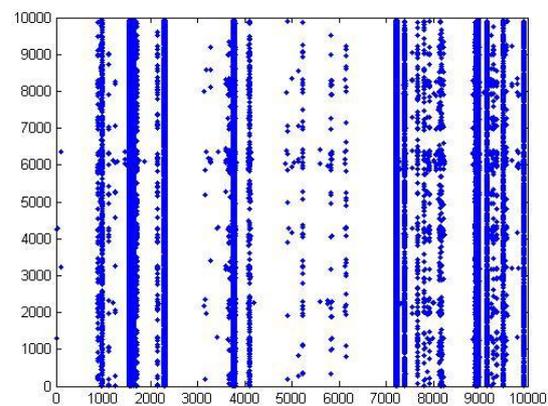
(a)



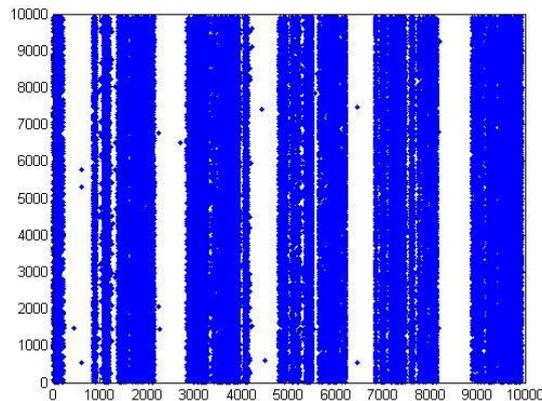
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.5.** CRP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 10kV<sub>eff</sub>, (b) 15kV<sub>eff</sub>, (c) 20kV<sub>eff</sub>, (d) 25kV<sub>eff</sub>, (e) 30kV<sub>eff</sub>.

La figure III.5 présentant la CRP du détail D1 du signal de la charge électrique et du courant de fuite pour différents niveaux de tension appliquée à l'isolateur.

La figure III.5.a où la tension appliquée est de 10kV<sub>eff</sub>, montre une structure qui comporte un très faible nombre de points et de lignes verticales. Ceci reflète les rares et faibles décharges partielles qui apparaissent pour ce faible niveau de tension, ainsi que les quelques décharges superficielles qui les ont induites.

Pour la figure III.5.b dont la tension est égale à 15kV<sub>eff</sub>, un nombre important de points caractérise sa structure, avec un nombre inchangé de lignes. Physiquement, c'est le nombre des décharges superficielles qui augmente sans altérer le nombre des décharges partielles qui reste quasi constant dans les bandes propres présentes sur la surface de l'isolateur.

Dans la figure III.5.c, dont la tension est de 20kV<sub>eff</sub>, la structure est caractérisée par le décroissement du nombre de points qui sont remplacés par des lignes verticales. Pour ce niveau de tension, le nombre de décharges superficielles semble décroître, car ces dernières forment maintenant les décharges partielles qui ont considérablement augmenté en nombre. Le contournement en lui-même n'est plus très loin.

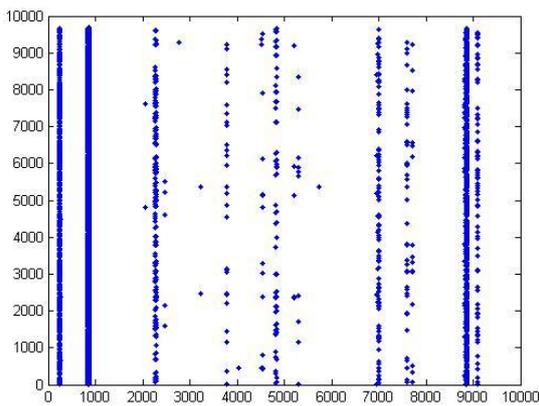
Dans la figure III.5.d, où la tension appliquée est de 25kV<sub>eff</sub>, la structure ne se différencie de la précédente que par l'augmentation du nombre de points, celui des lignes reste le même. Cela est en accord avec la réalité, car les décharges superficielles augmentent en nombre et en

intensité. C'est le début de la liaison des décharges partielles entre elle, formant l'arc électrique qui produit le contournement.

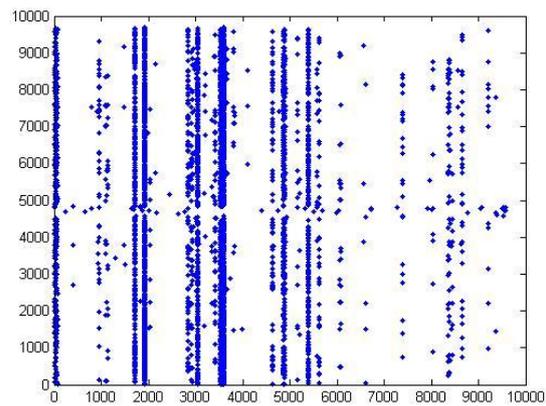
En finale, la figure III.5.e, où la tension est de  $30kV_{eff}$ , montre une structure totalement différente. Un très grand nombre de lignes verticales très denses formant des bandes pleines la caractérise, et les points isolés sont presque inexistant. En réalité les décharges partielles sont de très grandes intensités reliées les unes aux autres, formant l'arc électrique de contournement. On peut dire que cette structure est celle de l'arc de contournement électrique de l'isolateur.

### III.2.3. Cas d'une pollution de classe 3

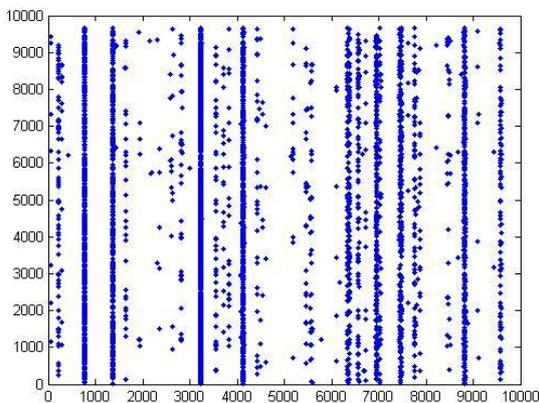
Nous nous intéressons dans ce cas à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $20mS/cm$ .



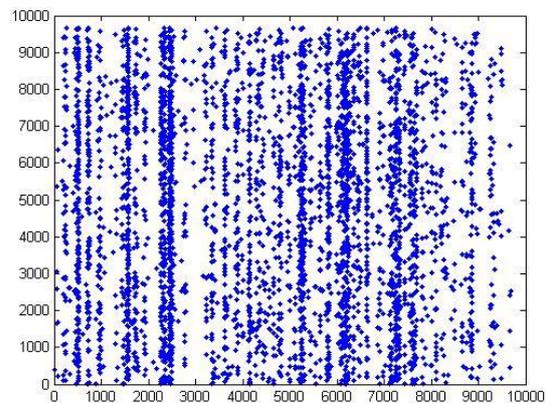
(a)



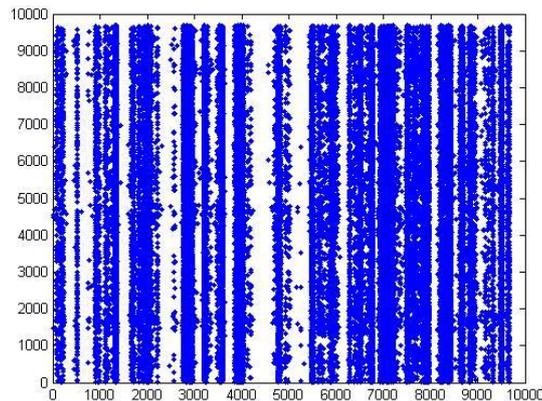
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure III.6.** CRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

La figure III.6 est celle des CRP du signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique pour différents paliers de tension appliquée.

Dans la figure III.6.a, où la tension est égale à 5kVeff, montre une structure avec quelques points et de rares lignes verticales. Cela est en accord avec ce qui se passe physiquement, de rares décharges partielles de très faibles intensités et quelque décharges superficielles leur donnant naissance dans les quelques zones propres. Tout cela reste très loin du contournement et de la formation de l'arc électrique.

Pour la figure III.6.b où la tension est de 10kVeff, l'évolution de la structure est croissante, soit pour le nombre de points ou celui des lignes. Une telle structure traduit l'augmentation simultanée du nombre de décharges superficielles et partielles. La formation de l'arc électrique n'est plus loin.

Dans la figure III.6.c, de tension appliquée égale à 15kVeff, l'évolution est toujours croissante, mais elle est plus importante pour les points que pour les lignes verticales. Physiquement, les décharges superficielles s'intensifient et augmentent en nombre, quant aux décharges partielles, elles sont restreintes sur quelques bandes propres. Elles varient plus en intensité qu'elles n'augmentent en nombre, le contournement est proche.

La figure III.6.d, (tension 20kVeff), a une structure unique caractérisée par un nombre très important de points, mais dépourvue de lignes verticales. Aucune structure ne pourra présenter ce qui se passe réellement mieux que celle-ci, vue qu'il n'y a que des décharges

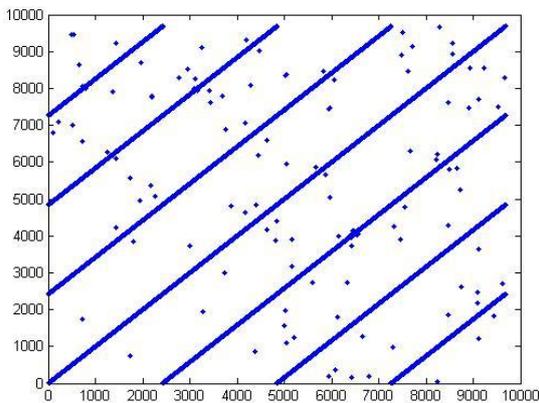
superficielles très intenses et très nombreuses, cela est due au fort niveau de pollution qui laisse plus de place aux décharges superficielles.

Pour finir la figure III.6.e, de niveau de tension à  $25kV_{eff}$ , a une structure définie par des bandes pleines avec quelques points isolés. Ceci signifie la formation de l'arc, qui, pour cette pollution de classe 3 se forme sans formation préalable des décharges partielles. Le contournement se fait directement.

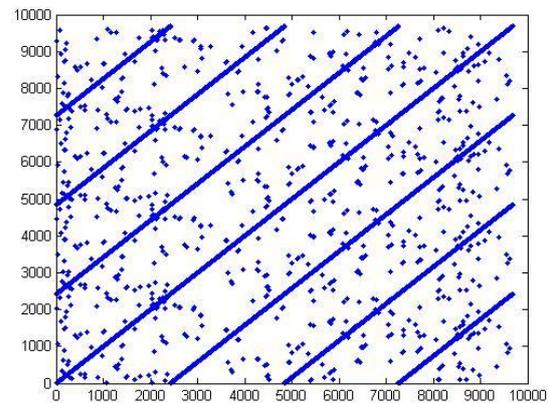
### III.3. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique

#### III.3.1. Cas d'une pollution de classe 1

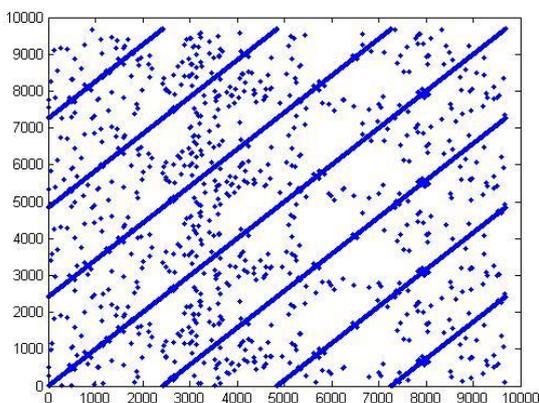
On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $3,5mS/cm$ .



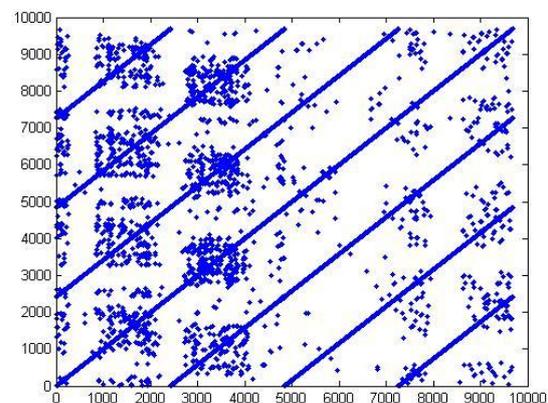
(a)



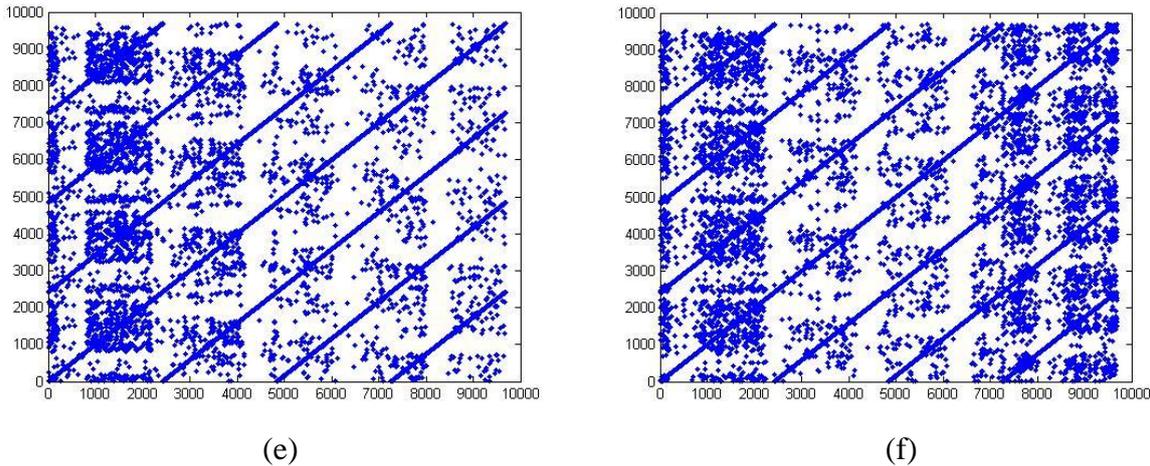
(b)



(c)



(d)



**Figure III.7.** JRP de la composante haute fréquence (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff, (f) 30kVeff.

D'après les figures III.7 et suivant l'analyse visuelle, nous interprétons de la façon la plus plausible les résultats que nous avons eus de la JRP du détail D1 du courant de fuite et de la charge. Toutefois, vue que la nature des deux signaux diffère, la réaction qu'à la classe de pollution sur la charge électrique diffère de celle sur le courant de fuite. Donc on aura une analyse n'étant utilisable que pour la classe 1. Cela dit, vu que pour une pollution de classe 1 le signal de la charge reste presque inchangé, on aura une interprétation identique à celle de la RP du courant de fuite de cette même classe.

Pour toutes les figures III.7, nous avons des lignes diagonales parallèles à la LOI, ce qui nous indique une évolution périodique similaire entre les deux signaux ainsi qu'une relation entre eux liée par la classe de pollution.

La figure III.7.a, où la tension appliquée est de 5kVeff, a une structure caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Une telle structure schématise le nombre très petits voir rares des décharges de surface apparaissant lors des essais.

Toutefois, ces décharges étant faibles et localisées autour des zones propres, la probabilité pour que l'arc électrique se produise reste infime. Cela nous amène à élever les niveaux de tension afin de pouvoir remarquer les paramètres décrivant cet arc dans la JRP.

La Figure III.7.b, où la tension appliquée est de  $10kV_{eff}$ , comporte une structure très semblable à celle de la figure III.7.a, avec une légère augmentation du nombre de points vue l'élévation de la tension appliquée. Mais ceci reste insuffisant pour produire le contournement.

Pour la figure III.7.c de tension appliquée égale à  $15kV_{eff}$ , la structure reste assez éparpillée même si le nombre de points a significativement augmenté et s'est intensifié. Réellement, les décharges superficielles se sont elles aussi intensifiées pour ce niveau de tension, mais tout de même sans pouvoir donner naissance à l'arc électrique.

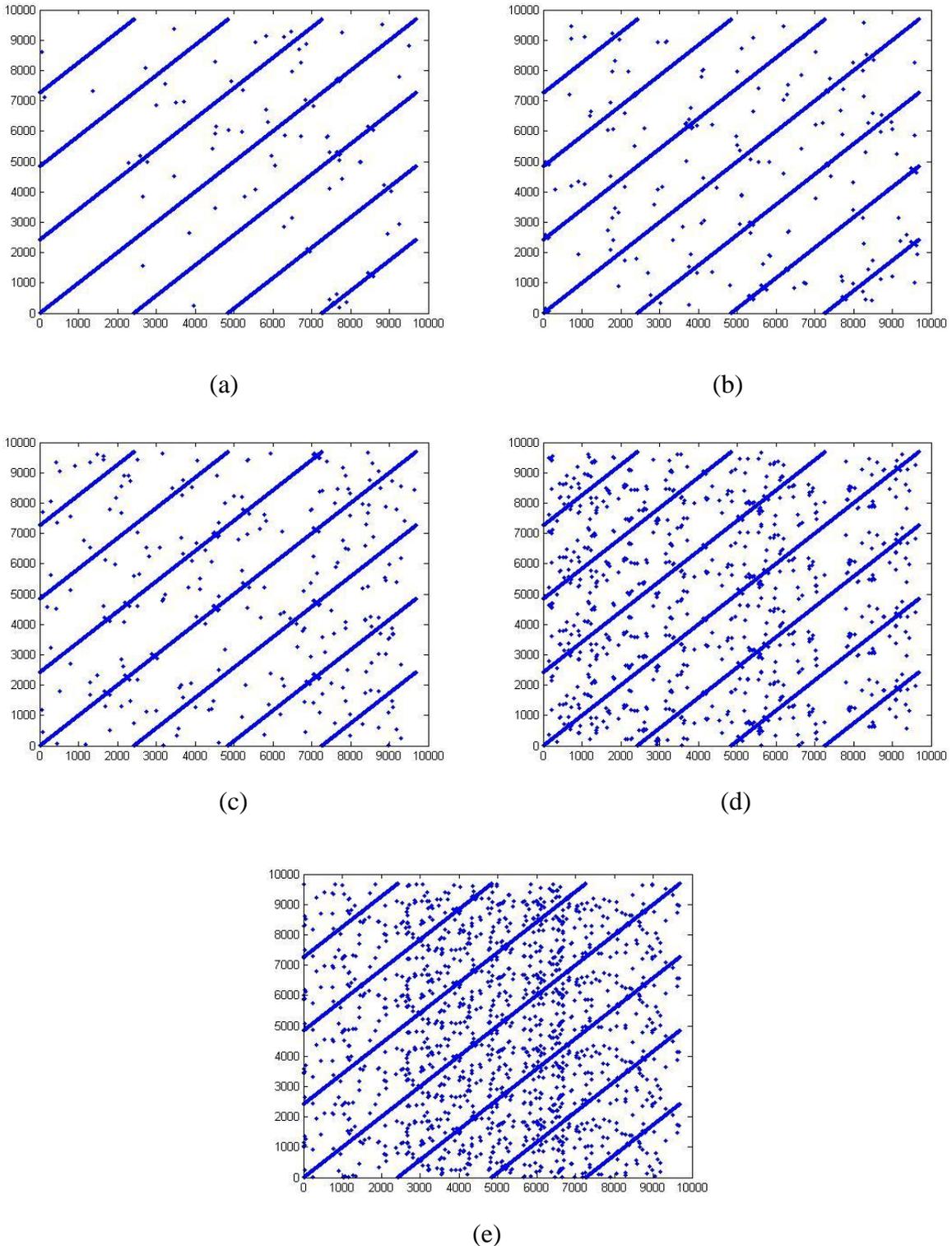
La figure III.7.d, de tension appliquée de  $20kV_{eff}$ , présente une nouvelle structure bien plus ordonnée que les précédentes. Les points sont plus denses, cela dit on remarque l'apparition de bandes blanches grossières. Celles-ci caractérisent l'arrivée d'un état de transition certain. Physiquement, les décharges superficielles sont plus intenses et elles sont de plus en plus intermittentes. La surface c'est saturée ce qui laisse prévoir une apparition imminente de l'arc électrique.

La figure III.7.e, de tension appliquée de  $25kV_{eff}$ , possède une structure moins grossière que la précédente. Le nombre des points augmente, et ces derniers se regroupent dans des structures denses. En réalité de petits arcs électriques apparaissent dans les zones propres. Celles-ci remplacent les décharges superficielles.

Finalement, pour la figure III.7.f, de tension égale à  $30kV_{eff}$ , la structure est plus affinée possédant une très grande densité de point. Ceux-ci sont séparés par des bandes blanches. Cette structure définit ce qui se passe sur la surface du modèle de l'isolateur, des décharges de fortes intensités se produisent. Les bandes blanches soulignent l'imminence du claquage, et la formation de l'arc électrique produisant le contournement.

### **III.3.2. Cas d'une pollution de classe 2**

On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la tension sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $6mS/cm$ .



**Figure III.8.** JRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 10kVeff, (b) 15kVeff, (c) 20kVeff, (d) 25kVeff, (e) 30kVeff.

La figure en III.8 représente la JRP des premiers détails du courant de fuite et de la charge électrique pour une pollution de classe 2. Vu que cette classe représente une pollution moyenne ayant une répercussion visible sur la charge électrique, une interprétation différente est

alors de mise. Les lignes diagonales parallèles à la LOI sont toujours présentes donc nos deux signaux évoluent toujours périodiquement ensemble et pour de petites tensions cette évolution est chaotique.

La figure III.8.a de tension appliquée  $10kV_{eff}$ , est caractérisée par un petit nombre de points tous éparpillés. Une absence de points dans le coin haut gauche et celui bas droit indique la non-stationnarité du système donc un décalage entre les deux signaux. Cette interprétation reflète très bien ce qui se passe physiquement. C'est-à-dire la présence de rares décharges surfaciques non stationnaires.

Pour la figure III.8.b de tension égale à  $15kV_{eff}$ , la structure ne change pas mis à part l'augmentation du nombre de points. Cela reflète le nombre croissant de décharges qui commencent peu à peu à devenir stationnaires, le contournement n'est toujours pas envisageable.

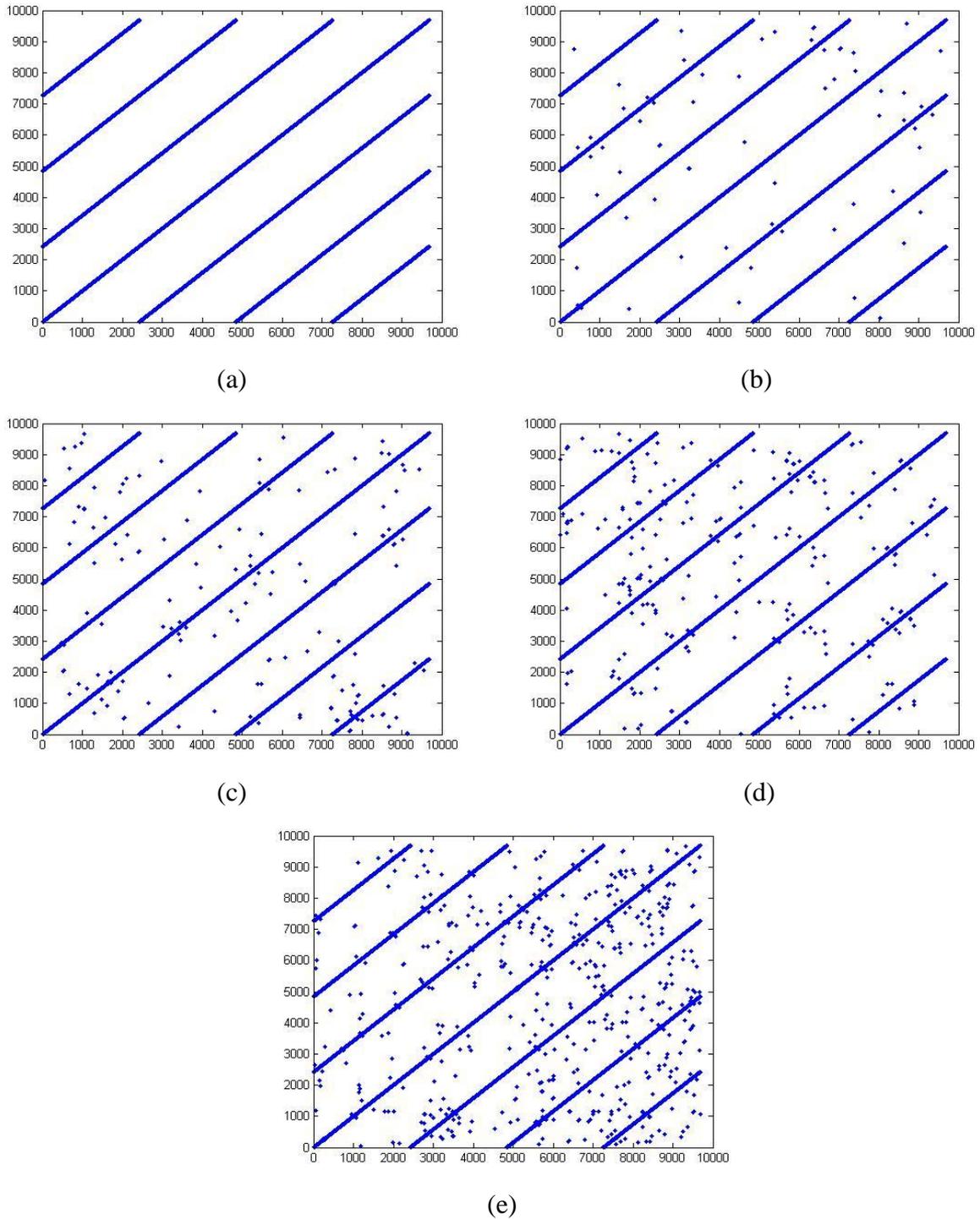
La figure III.8.c de tension appliquée égale à  $20kV_{eff}$ , présente une structure où le nombre de points a significativement augmenté et sont devenus plus denses, ainsi que l'apparition des bandes blanches. Réellement, ceci traduit l'augmentation ainsi que l'intensification des décharges surfaciques. Cependant, l'état de transition commence à se rapprocher, donc l'arc électrique n'est plus très loin.

Concernant la figure III.8.d, de tension égale à  $25kV_{eff}$ , la structure diffère des précédentes. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches qui commencent à mieux se dessiner. On note aussi l'apparition de petites lignes diagonales orthogonales à la LOI qui indique qu'il ya une petite évolution similaire à d'autres périodes mais en temps inverse. Réellement, les décharges superficielles sont plus intenses et la surface est saturée, ce qui prévoit un contournement imminent vu l'état de transition certain.

Finalement, à une tension de  $30kV_{eff}$  (figure III.8.e), la structure est totalement différente. Elle est caractérisée par une grande densité de points en symétrie par rapport aux diagonales. Cela contraste de plus en plus les bandes blanches, qui s'associent physiquement à de fortes décharges partielles sur les zones propres en vue d'un état de transition certain. Ces décharges se relient entre elles formant un arc électrique qui produit le contournement.

## III.3.3. Cas d'une pollution de classe 3

On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge électrique sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 20mS/cm.



**Figure III.9.** JRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Dans les figures III.9, nous représentons de la JRP des premiers détails du courant de fuite et de la charge électrique pour une pollution de classe 3. L'interprétation diffère de celle des autres classes mais pas totalement, comme cité précédemment, la classe de pollution a une répercussion visible sur la charge, tout de même cette influence est quasi la même pour les classes de pollution 2 et 3, pour cela cette interprétation pourra sembler la même. Les lignes diagonales parallèles à la LOI sont toujours présentes, donc nos deux signaux évoluent toujours périodiquement. Cela a lieu selon un schéma chaotique pour de petites tensions et plus ou moins selon un schéma déterministe pour les tensions un peu élevées.

La figure III.9.a, de tension appliquée de  $5kV_{eff}$ , représente une structure unique dépourvue des points mis à part pour les lignes diagonales parallèles à la LOI. Ceci est conforme à l'expérimentation pour ce qui est de la quasi absence de décharges. L'arc n'est pas à être cité vu que même les décharges n'ont presque pas eu lieu.

Pour la tension de  $10kV_{eff}$ , la figure III.9.b a une structure caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Les coins hauts gauches et bas droit sont dépourvus de points, cela montre la non-stationnarité du système ainsi que le décalage entre les deux signaux. Seuls les décharges surfaciques existent mais sont toujours rares et non stationnaires et un contournement n'est pas prêt de se produire avec une si faible tension.

La figure III.9.c, de tension de  $15kV_{eff}$ , a une structure inchangée mis à part l'augmentation du nombre de points éparpillés. Cela est dû au nombre croissant de décharges qui commencent à paraître de plus en plus stationnaires. Au delà de cette tension, le système évolue vers un schéma déterministe.

Concernant la figure III.9.d de tension appliquée  $20kV_{eff}$ , le nombre de points augmente et deviennent plus denses. Nous remarquons l'apparition des premières bandes blanches. Cette structure traduit l'augmentation ainsi que l'intensification des décharges surfaciques, vu le rapprochement de l'état de transition, l'arc électrique commence à se faire ressentir.

Pour la figure III.9.e, la tension est à  $25kV_{eff}$ , une structure qu'on peu caractériser de finale apparait. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches

plus apparentes. Cela revient au fait que les décharges superficielles s'intensifient dans des surfaces maintenant saturées. Le contournement peut se produire à tout moment et l'arc électrique se formera pour n'importe quelle tension supérieure à celle-ci.

## **Conclusion**

D'après ce chapitre, nous sommes arrivés à une conclusion resumée sur ces quelques points :

- La RP du courant de fuite donne de très bons résultats, ce qui nous permet de l'utiliser comme base pour notre étude comparative.
- La JRP est préférable à la CRP pour ce qui est de l'étude comparative entre deux signaux, ce qui nous a incité à la prendre comme méthode principale pour cette étude.

**Conclusion**

**Générale**

Le travail présenté nous a permis l'application de nouvelles techniques comparatives dérivées de la recurrent plot (RP) pour l'analyse des signaux électriques afin de parvenir à une méthode fiable pour la détection des décharges électriques.

Nous avons commencé par approfondir nos connaissances concernant cette méthode qui est considérée comme nouvelle dans le milieu du traitement du signal et qui a montré son efficacité dans plusieurs domaines.

Ce fut cette efficacité qui nous inspira dans notre travail, à appliquer la CRP et la JRP qui sont toutes deux des techniques comparatives dérivées de la RP. Cela sur différents signaux électriques, pour les différentes classes de pollutions. Afin d'arriver à une méthode de surveillance des surfaces planes des isolateurs.

L'analyse RP a servie de base à notre étude. On l'a appliqué sur le signal du courant de fuites tout en étudiant l'influence de la tension appliquée et celle de la conductivité de la solution polluante sur ce dernier.

Ce qui nous a donné des résultats plus que concluant nous permettant d'avancé dans notre travail et de l'élargir. Cela fut par l'intermédiaire de la CRP et de la JRP.

On a comparé ces deux méthodes on les appliquant sur le signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique, une fois pour les trois classes de pollution en variant la tension appliquée et l'autre en variant la conductivité de la solution polluante.

Le choix entre ces deux méthodes fut déterminé en se basant sur le nombre d'informations utilisables récupérées, et il c'est porté sur la JRP.

# **Références Bibliographiques**

- [1] H. Poincaré, "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique", *Acta Mathematica*, 13, pp. 1–271, (1890).
- [2] J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, "Recurrence plots of dynamical systems, *Europhys Lett.* 5, 973–977, (1987).
- [3] J.M. Nichols, S.T. Trickey and M. Seaver, "Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis", *Mech. Syst. Signal Process.* 20 (2), pp. 421–437, (2006).
- [4] Norbert Marwan. "Encounters With Neighbours: Current developments of concepts based on recurrence plots and their applications", Ph.D. Thesis. University of Potsdam, Institute for Physics, Mai 2003.
- [5] N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan and J. Kurths, "Recurrence plot based measures of complexity and its application to heart rate variability data", *Phys. Rev.* 66 (2), pp. 56-63, (2002).
- [6] G.M. Mindlin, R. Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", *Physica D* 58 (1–4), pp.229–242, (1992).
- [7] M. Koebe, G. Mayer-Kress, "Use of recurrence plots in the analysis of time-series data", in: M. Casdagli, S. Eubank (Eds.), *Proceedings of SFI Studies in the Science of Complexity*, vol. 21, Redwood City, Addison-Wesley, Reading, MA, pp. 361–378, (1992).
- [8] J.P. Zbilut, J.M. Zaldívar-Comenges, F. Strozzi, "Recurrence quantification based Liapunov exponents for monitoring divergence in experimental data", *Phys. Lett. A* 297 (3–4), pp.173-181, (2002).
- [9] M. Thiel, M.C. Romano, J. Kurths, R. Meucci, E. Allaria, F.T. Arecchi, "Influence of observational noise on the recurrence quantification analysis", *Physica D* 171 (3), pp.138–152, (2002).
- [10] J.P. Zbilut, A. Giuliani, C.L. Webber Jr., "Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification", *Phys. Lett. A* 246 (1–2), pp.122–128, (1998).
- [11] N. Marwan, J. Kurths, "Nonlinear analysis of bivariate data with cross recurrence plots", *Phys. Lett. A* 302 (5–6), pp.299–307, (2002).
- [12] A. Groth, "Visualization of coupling in time series by order recurrence plots", *Phys. Rev. E* 72 (4), (2005).

- [13] N. Marwan, "Untersuchung der Klimavariabilität in NWArgentinien mit Hilfe der quantitativen Analyse von Recurrence Plots", Master's Thesis, Dresden University of Technology, October 1999.
- [14] N. Marwan, J. Kurths, "Line structures in recurrence plots", *Phys. Lett. A* 336 (4–5), pp. 349-357, (2005).
- [15] G. Rosenblum, A.S. Pikovsky, J. Kurths, "From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators", *Phys. Rev. Lett.* 78 (22), pp. 4193–4196, (1997).
- [16] O.V. Sosnovtseva, A.G. Balanov, T.E.Vadivasova, V.V. Astakhov, E. Mosekilde, "Loss of lag synchronization in coupled chaotic systems", *Phys. Rev. E* 60 (6), (1999).

## Annexe A

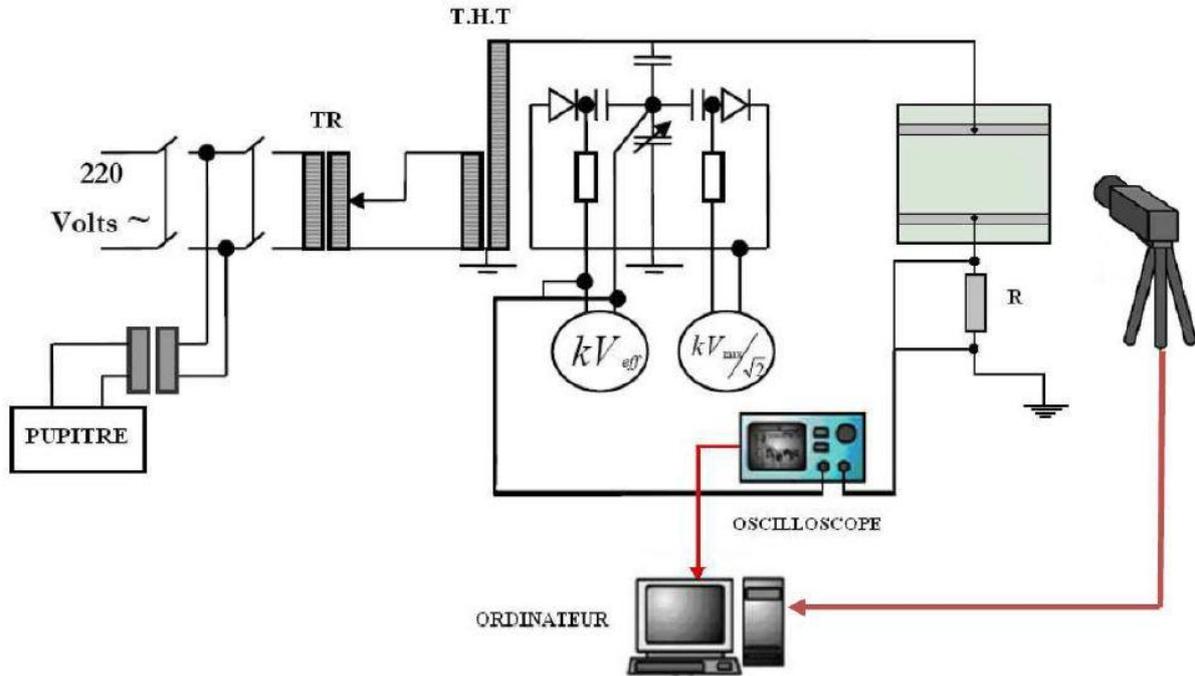
### Base des signaux utilisés

Pour la vérification des méthodes développées dans ce travail, une base des signaux a été utilisée. Celle-ci contient des signaux issus des essais effectués au niveau du laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sur un modèle plan d'isolateur.

#### Mod1

- Cette base était élaborée par B. Moula et A. Mekhaldi, au cours de ses travaux présentés à la CNHT en 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. On appellera le premier ensemble **G1Mod1** représentant les signaux du courant de fuite et **G2Mod1** pour les signaux de la charge électrique. 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  $R=1k\Omega$  a été utilisée, et pour le signal de charge électrique une capacité de  $33 \mu F$ .

Le montage utilisé pour récupérer les différents signaux de la base de données est donné par la figure A.1.



*Figure A.1. 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.

## Annexe B

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

## ملخص:

نعالج في هذا العمل موضوع تشخيص حالة سطح العوازل الملوثة باستعمال تقنية مخطط التراجع (RP). واعتمادا على قاعدة بيانات التجارب التي أجريت على مستوى مخبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية متحدة التقنيات على نماذج سطحية. في الجزء الأول نستعرض الأعمال التي أجريت مؤخرا على مختلف تطبيقات تقنية (RP). في الجزء الثاني منه نقوم بتطبيق تقنية (RP) وتطبيقاتها (CRP, JRP) على عناصر عالية التوتر لإشارات تيار التسرب و شحنة كهربائية.

**الكلمات الرئيسية:** تشخيص، نموذج مسطح، شدة التلوث، تقنية مخطط التراجع، مخطط التراجع المتقاطع، مخطط التراجع الملصق، التحليل الكمي للتراجع، تيار التسرب، الشحنة الكهربائية، التوتر المطبق.

## Résumé

Dans le présent travail, le diagnostique de l'état de surface des isolateurs pollués est effectué par la technique RP et ses dérivées, en exploitant des bases de données établies au niveau du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique. Dans une première partie, nous présentons les notions théoriques de la technique RP et ses diverses CRP et JRP. Dans la seconde partie, nous avons appliqué la technique RP et ses dérivées, CRP et JRP sur les composantes de haute fréquence des signaux du courant de fuite et de la charge électrique.

**Mots-clefs :** diagnostique de l'état de surface, diagramme récurrent, modèle plan, diagramme récurrent croisé, diagramme récurrent joint, courant de fuite, tension appliquée, charge électrique.

## Abstract

In this work, the diagnosis of the surface condition of polluted insulators is carried out by the RP approach and its derivatives, by exploiting databases established in the laboratory of high voltage of l'ENP. In a first part, we present a bibliographical synthesis of former works of various applications of the RP. In the second part, we applied the RP approach and its derived, CRP and JRP to the high frequency components of the LC and the charge signals.

Key words : diagnosis, polluted insulators, recurrent plot, cross recurrent plot, joint recurrent plot, electric charge, leakage current, applied voltage.