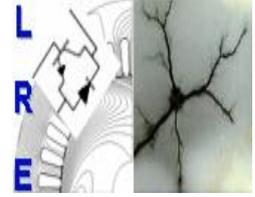




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



# Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

**AZZAG Mohamed**

Intitulé

## **Détection des décharges électriques sur des surfaces planes polluées en utilisant la technique RP (Recurrent Plot)**

Directeur(s) du mémoire :

Pr.A.MEKHALDI  
Mr.B.MOULA

**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 remercions Mr. R.Ibtiouen pour le grand honneur qu'il nous exprime par la présidence de notre jury et de nous avoir consacré son précieux temps.*

*Nous remercions aussi les membres du jury d'avoir acceptés de juger notre travail et de leur intérêts.*

# *Dédicaces*

*Ce travail est dédié a la mémoire des mes chères grands parents qui ont donnés un sens a mon existence.*

*Je dédie ce travail à toute ma famille qui a sue me soutenir et m'encourager tout au long de ma vie.*

*Que dieux vous garde.*

*Ce travail est aussi dédié à tous mes amis qui ont toujours été présent pour moi et auprès desquels je me suis toujours sentie chez moi.*

*Mohamed*

## ملخص:

في هذا العمل نعالج موضوع تشخيص حالة سطح العوازل الملوثة, باستعمال تقنية مخطط التراجع (RP), و اعتمادا على قاعدة بيانات التجارب التي أجريت على مستوى مخبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية متعددة التقنيات, على نماذج سطحية, في الجزء الأول نستعرض نظرية تقنية (RP). في الجزء الثاني منه, نقوم بتطبيق تقنية (RP), و تطبيقاتها (JRP) على عناصر عالية التوتر لإشارات تيار التسرب و شحنة الكهربائية. ثم نقوم بتطبيق تقنية (JRP) على مختلف الإشارات (تيار التسرب, شحنة الكهربائية, التوتر المطبق). أخيرا نستعمل تقنية (RQA) على إشارتي تيار التسرب و الشحنة الكهربائية.

**الكلمات الرئيسية:** تشخيص, نموذج مسطح, شدة التلوث, تقنية مخطط التراجع, مخطط التراجع الملتصق, 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 est ca dérivée, en exploitant des bases de données établies au niveau du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique sur des modèles plans. Dans une première partie, nous présentons la théorie de la RP. Dans la seconde partie, nous avons appliqué la technique RP et la JRP sur les composantes de haute fréquence des signaux du courant de fuite et de la charge électrique. Puis, nous avons appliqué la JRP aux différentes combinaisons de signaux de courant de fuite, de tension appliquée et de la charge électrique, afin de choisir la combinaison donnant les meilleurs résultats. Enfin, la technique RQA est appliquée au signal du courant de fuite et de celui de la charge électrique.

**Mots-clefs :** diagnostique, état de surface, diagramme récurrent, modèle plan, diagramme récurrent joint, analyse quantitative récurrente, 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 technic and its derivatives, by exploiting databases established in the laboratory of high voltage of the polytechnic national school on plane models. In a first part, we present the theory of the RP. In the second part, we applied the RP and the JRP technics to the high frequency components of the signals of the leakage current and the electric charge. Then, we applied the JRP to the various combinations of signals of leakage current, tension applied and the electric charge, in order to choose the combination giving the best results. Lastly, technique RQA is applied to the signal of the leakage current and that of the electric charge.

Key words : diagnosis, polluted insulators, recurrent plot, joint recurrent plot, recurrence quantification analyses, electric charge, leakage current, tension applied.

# Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Notion théorique sur la RP et ses applications</b>	
Introduction	
I.1. Le diagramme de récurrence (RP) .....	5
I.1.1. Définition .....	5
I.1.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence .....	7
I.1.3. Choix du seuil $\varepsilon$ .....	10
I.1.4. Influence de l'immersion sur les structures de la RP .....	11
I.2. Joint récurrence plot (JRP) .....	14
I.3. La technique RP appliquée au détail du signal du courant de fuite.....	15
Conclusion	
<b>Chapitre II : Application de la RP, CRP et JRP sur les signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique</b>	
Introduction	
III.1. Les applications de la RP sur le signal de courant de fuite et ses CRP et JRP avec le signal de la charge électrique .....	23
III.1.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite .....	24
III.1.2. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique .....	31
III.2. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée .....	38
III.3. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de la charge électrique et de la tension appliquée .....	41
III.3.1. Cas d'une pollution de classe 1 .....	41
III.3.2. Cas d'une pollution de classe 2 .....	42
III.3.3. Cas d'une pollution de classe 3 .....	43
Conclusion	
Conclusion générale .....	46
Références bibliographiques	

**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 diagnostique 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 master.

Toutefois nous avons essayé d'utiliser une application de la RP, la JRP, afin d'arriver à un diagnostique 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 du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique pour les trois classes de pollution.

Le premier chapitre porte sur l'origine et la théorie de cette technique et sa dérivée, qui sont issues de la théorie du chaos. Nous exposons aussi la décomposition du signal par la technique de l'ondelette discrète afin d'arriver à l'obtention de la composante qui donne le résultat le plus en phase avec la théorie et la pratique.

Le deuxième chapitre représente l'application de la RP et sa dérivée, la JRP aux premiers détails des signaux du courant de fuite, de la tension et de la charge électrique, pour différents niveaux de tensions et pour différentes classes de pollution afin de parvenir à la meilleure combinaison des signaux et de la méthodes qui donnent les résultats les plus précis et les plus utilisables en pratique.

Une conclusion prend place en fin, pour clôturer notre master, 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**

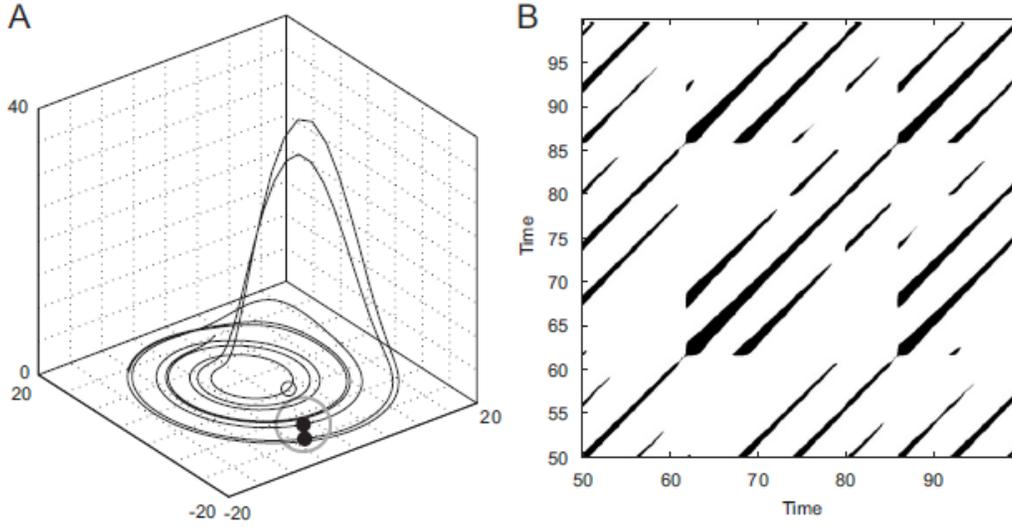
## **Introduction**

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 électriques tels que le courant de fuite et de la tension appliquée. Nous avons étudié une application de cette méthode. La JRP ou diagramme de récurrence jointe. Cette méthode se basant sur la RP, est présentée en tant qu'étude comparative 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 1890 [5]. 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 grandes classes des invariants asymptotiques. L'un des différents types de récurrences et celui qui nous intéresse le plus est celui de Poincaré. Celui-ci est basé sur le théorème de récurrence de Poincaré.



**Figure I.1.** (A) Segments de la trajectoire d'espace de phase du système Rössler, avec  $a = 0.15$ ,  $b = 0.20$ ,  $c = 10$ , en utilisant ces trois composantes et (B) la RP correspondante.

Soit  $T$  une transformation de mesure-préservation d'un espace de probabilité  $(X, \mu)$  et  $A \subset X$  un ensemble mesurable, alors pour n'importe quel nombre naturel  $N \in \mathbf{N}$ .

$$\mu(\{x \in A | \{T^n(x)\}_{n \geq N} \subset X \setminus A\}) = 0.$$

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 [6] :

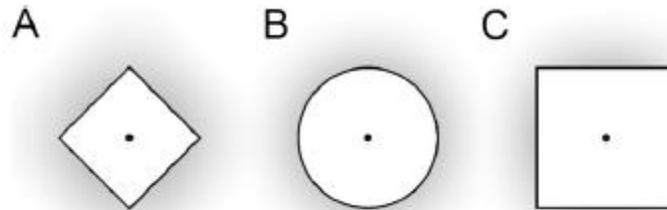
$$R_{i,j}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (I.1)$$

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 :

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

La RP est obtenue par le tracé de la matrice récurrence (figure I.1), 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  $R_{i,j} = R_{j,i}$ .



**Figure I.2.** Trois normes utilisées pour les voisinages pour un même rayon autour du point noir montré pour les phases spatiales bidimensionnelles (A) norme  $L_1$ , (B) norme  $L_2$  et (C) norme  $L_\infty$ .

Afin de calculer une RP, une norme appropriée doit être choisie. Les normes les plus utilisées sont  $L_1$ -norme,  $L_2$ -norme (norme Euclidienne) et la  $L_\infty$ -norme (norme Maximum). On note que les formes des voisinages sont différentes selon la norme (Figure I.2). Considérons un  $\varepsilon$  fixe, la norme  $L_\infty$  trouve plus de points, la norme  $L_1$  moins de points et la norme  $L_2$  une quantité intermédiaire de points. La norme  $L_\infty$  est la plus appliquée à cause de sa vitesse de calcul élevée et permet aussi une étude de certains dispositifs analytiques dans la RP.

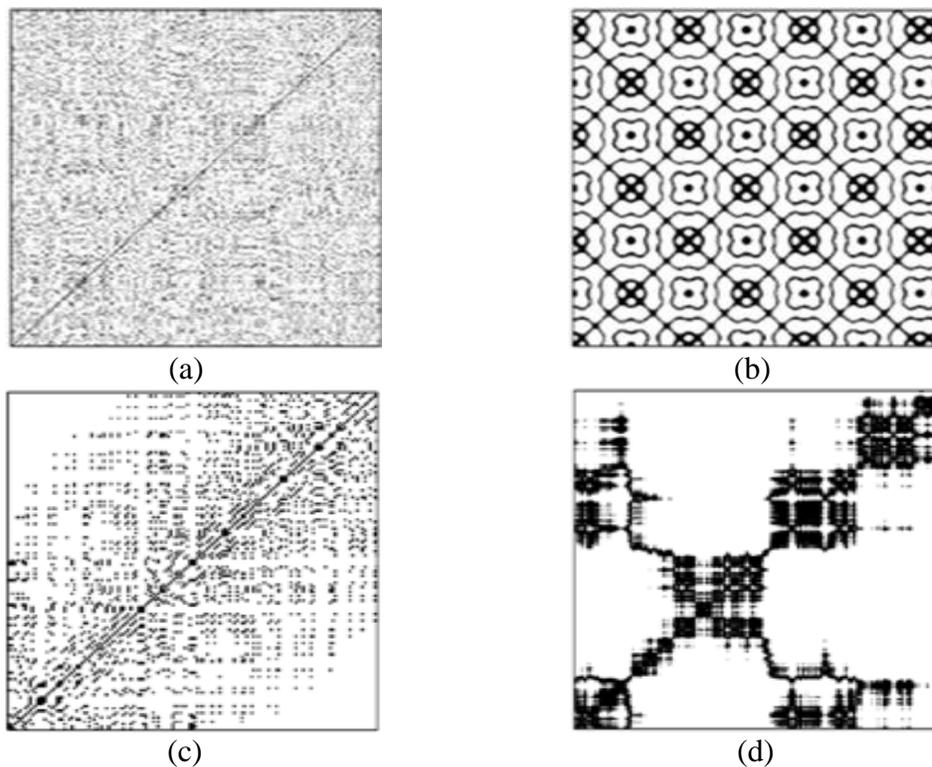
### I.1.2. Les structure dans les diagrammes de récurrence

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.3), 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.3.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.3.b).
- diagramme dévié: est provoquée par des systèmes avec des paramètres lentement variables, c.-à-d. systèmes non stationnaires (Figure I.3.c).
- diagramme interrompu: Les changements brusques de la dynamique causent les secteurs blancs ou les bandes dans le RP (Figure I.3.d) [7].



**Figure I.3.** 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 [8].

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>Exemple</b>	<b>Signification</b>
<b>(1) Homogénéité</b>	Le processus est stationnaire.
<b>(2) Éclaircissement des coins haut gauche et bas droit</b>	Données non stationnaires; le processus contient un mouvement ou un décalage.
<b>(3) Disruptions (bandes blanches)</b>	Données non stationnaires ; certains état sont rares; présence de transitions.
<b>(4) 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.
<b>(5) Points isolés</b>	Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.
<b>(6) 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.

<p><b>(7) Lignes diagonales (parallèles à la LOI)</b></p>	<p>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.</p>
<p><b>(8) Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)</b></p>	<p>L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion <math>m</math> insuffisante.</p>
<p><b>(9) Lignes verticales et horizontales</b></p>	<p>Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquent des états laminaires.</p>
<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 $\varepsilon$

Le seuil  $\varepsilon$  est un paramètre crucial de la RP. Par conséquent, une attention particulière est exigée pour ce qui est de son choix. Si le  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$ .

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  $\varepsilon$ , par exemple, il a été suggéré de prendre la valeur de quelque pour cent du diamètre maximum de l'espace de phase comme seuil [9]. En outre, il ne devrait pas dépasser 10% du diamètre moyen ou maximum de l'espace de phase [10].

Une autre possibilité est de choisir le seuil  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  tels que la densité de point de répétition est approximativement de 1% [11].

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  $\sigma$  [12]. La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à  $0.25\sigma$ ,  $\sigma$  représentant la déviation standard du signal étudié.

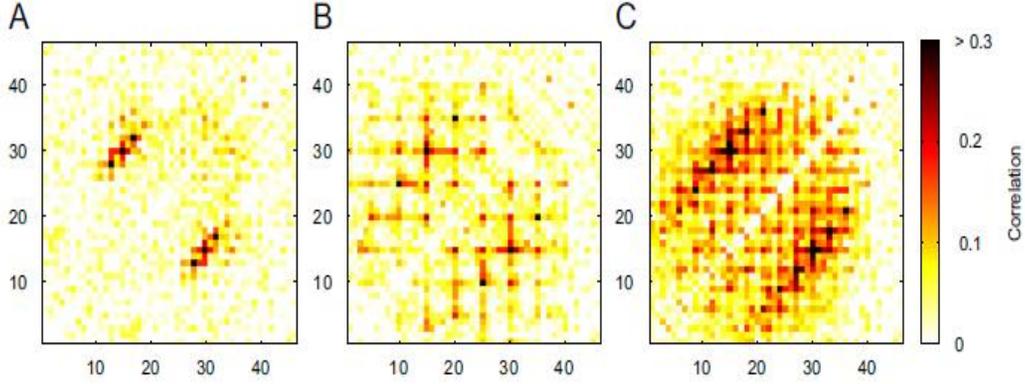
#### **I.1.4. Influence de l'immersion sur les structures de la RP**

Dans le cas où seulement une série temporelle scalaire aurait été mesurée, la phase spatiale devra être reconstruite, par exemple, par la technique du délai d'immersion. Cependant, cette immersion peut causer une quantité considérable de fausse corrélation dans le système étudié, qui se reflètent dans la RP (figure I.4). Cet effet peut même ajouter des structures diagonalement orientés dans une RP d'une série de temps de valeurs non-corrélatives si l'immersion est haute, bien que les structures diagonales doivent être extrêmement rares pour de telles données non-corrélatives.

Afin de comprendre cela, on prend en considération le bruit gaussien non-corrélatif  $\varepsilon_i$  avec une standard déviation  $\sigma$  et on calcule analytiquement les corrélations qui sont induites par une immersion non-appropriée. Car le procédé considéré est non-corrélatif, les corrélations détectées après doivent être due à la méthode d'immersion.

Utilisant un délai d'immersion temporelle avec une dimension d'immersion  $m$  et un délaire  $\tau$ , un vecteur dans la phase spatiale reconstruite est donné par :

$$\vec{x}_i = \sum_{k=0}^{m-1} \varepsilon_{i+k\tau} \vec{e}_k, \quad (\text{I.3})$$



**Figure I.4.** *Corrélation entre un point récurrent en (15,30) (marqué par des cercles gris) et d'autres points récurrents dans une RP pour un bruit Gaussien non-corrélatifs (estimé d'après 2000), Les paramètres d'immersion sont (A)  $m = 1, \tau = 1, \varepsilon = 0.38$ , (B)  $m = 3, \tau = 5, \varepsilon = 1.22$  et (C)  $m = 5, \tau = 2, \varepsilon = 1.62$ , ce qui préserve une densité de point récurrent (0.2) approximativement constante.*

La distance entre chaque pair de ces vecteurs est  $D_{i,j} = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$ . Ce déplaçant de  $h$  étapes en avant dans le temps (c'est-à-dire, le long d'une ligne diagonale de la RP) la distance respective est :

$$D_{i+h,j+h} = \|\vec{x}_{i+h} - \vec{x}_{j+h}\|, \quad (\text{I.4})$$

Pour la convenance, la fonction d'auto-covariance de  $D_{i,j}^2$  sera calculée à l'instar de calculer la fonction d'auto-covariance de  $D_{i,j}$ . Utilisant la norme  $L_2$ , la fonction d'auto-covariance est :

$$\text{cov}_{D^2}(h, j - i) = \langle (\sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+k\tau} - \varepsilon_{j+k\tau})^2 - E) (\sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+h+k\tau} - \varepsilon_{j+h+k\tau})^2 - E) \rangle, \quad (\text{I.5})$$

Ou

$$E = \langle \sum_{k=0}^{m-1} (\varepsilon_{i+k\tau} - \varepsilon_{j+k\tau})^2 \rangle = 2\sigma^2 m (1 - \delta_{0,j-i}), \quad (\text{I.6})$$

La valeur d'espérance et  $\delta_{i,j}$  est delta de Kronecker ( $\delta_{i,j} = 1$  si  $i = j$ , et  $\delta_{i,j} = 0$  si  $i \neq j$ ). Mettant  $p = j - i$  et en assumant  $p > 0$  et  $h > 0$  pour éviter les cas insignifiants, on trouve [13] :

$$\text{cov}_{D^2}(h, p) = \sum_{k=0}^{m-1} (m - k) (8\delta_{k\tau, h} + 2\delta_{k\tau, p+h} + \delta_{k\tau, p-h}), \quad (\text{I.7})$$

Cette équation montre qu'il y aura des pics dans la fonction d'auto-covariance si  $h, p + h$  ou  $p - h$  est égale à l'un des premiers  $m - 1$  multiples de  $\tau$ . Ces pics ne sont pas présents lorsque l'immersion ( $m = 1$ ). De telles fausses corrélations induites par l'immersion conduisent à des structures modifiées de petite-échelle dans la RP : une augmentation des dimensions de l'immersion nettoie la RP des points singuliers récurrent (représentatifs des états non-corrélatifs) et souligne les structures diagonales (représentatifs des états corrélatifs). Cela, bien sûr, influence n'importe quelle quantification de la RP, qui est basée sur les lignes diagonales. Ainsi, on doit être prudent pour ce qui est de l'interprétation et la quantification des structures dans la RP des systèmes mesurés. Si la dimension d'immersion est, par exemple, non convenablement haute, des fausses longues lignes diagonales apparaissent dans la RP. Pour éviter ce problème, les paramètres de l'immersion doivent être choisis prudemment, ou en alternative les mesures quantitatives qui sont indépendantes des dimensions de l'immersion doivent être utilisées [14].

Les fausses corrélations de la RP due à l'immersion peuvent être appréhendées du fait qu'une RP calculée avec n'importe quel dimension d'immersion peut être dérivée d'une RP calculée sans immersion ( $m = 1$ ). Considérant, par exemple,  $m = 2$  avec un certain  $\tau$  et une norme maximum. Un point récurrent en  $(i, j)$  se produit si :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \iff \max(|x_i - x_j|, |x_{i+\tau} - x_{j+\tau}|) < \varepsilon, \quad (\text{I.8})$$

C'est la même chose que  $x_i \approx x_j$  et  $x_{i+\tau} \approx x_{j+\tau}$  correspondent à deux points récurrent en  $(i, j)$  et  $(i + \tau, j + \tau)$  dans une RP sans immersion. Ainsi, un point récurrent pour une trajectoire reconstruite avec une dimension d'immersion  $m$  est :

$$R_{i,j}^{(m)} = R_{i,j}^{(1)}, R_{i+\tau, j+\tau}^{(1)}, \dots, R_{i+(m-1)\tau, j+(m-1)\tau}^{(m)}, \quad (\text{I.9})$$

Ou  $R^{(1)}$  est la RP sans immersion (ou RP parent) et  $R^{(m)}$  est la RP pour la dimension d'immersion  $m$  [15]. L'entrée en  $(i, j)$  dans la matrice récurrence  $R^{(m)}$  consiste en des informations dans les temps  $(i + \tau, j + \tau), \dots, (i + (m - 1)\tau, j + (m - 1)\tau)$ .

Si le seuil  $\varepsilon$  est assez large, les faux points récurrent suivant la ligne  $(i + k, j + k)$  pour  $k = 0, \dots, (m - 1)\tau$  peuvent apparaitre. C'est clair que, par exemple, dans le cas de signal stochastique qui est immergé dans un espace haut-dimensionnel, de telles lignes diagonales dans une RP peuvent simuler un déterminisme non-existant.

## I.2. 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).

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 :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}) = \theta(\varepsilon^{\vec{x}} - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|)\theta(\varepsilon^{\vec{y}} - \|\vec{y}_i - \vec{y}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (I.10)$$

Ou plus généralement pour N systèmes est en utilisant l'équation (I.9), la matrice à multi variable de récurrence jointe peut être introduite par :

$$JR_{i,j}^{\vec{x}(1,\dots,n)}(\varepsilon^{\vec{x}_1}, \dots, \varepsilon^{\vec{x}_n}) = \prod R_{i,j}^{\vec{x}(k)}(\varepsilon^{\vec{x}(k)}), \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (I.11)$$

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 :

$$JR_{i,j}^{\vec{x},\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{x}}, \varepsilon^{\vec{y}}, \tau) = JR_{i,j}^{\vec{x}}(\varepsilon^{\vec{x}})JR_{i+\tau,j+\tau}^{\vec{y}}(\varepsilon^{\vec{y}}), \quad i, j = 1, \dots, N - \tau, \quad (\text{I.12})$$

Ce qui est le plus utilisé pour l'analyse des systèmes retardés en interaction (exemple pour la synchronisation de retard) [16,17], 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.

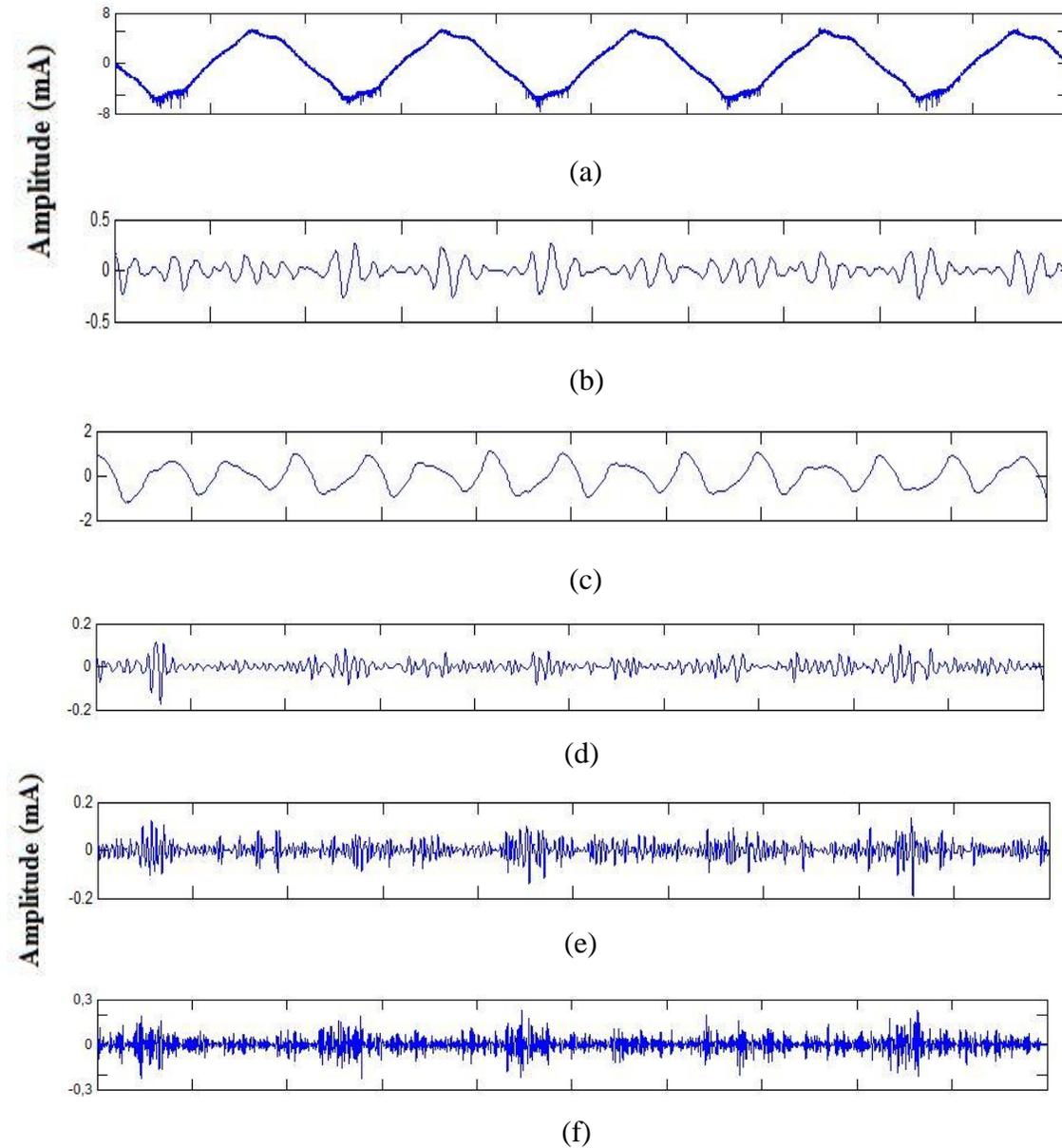
### II.3. La technique RP appliquée au détail du signal du courant de fuite

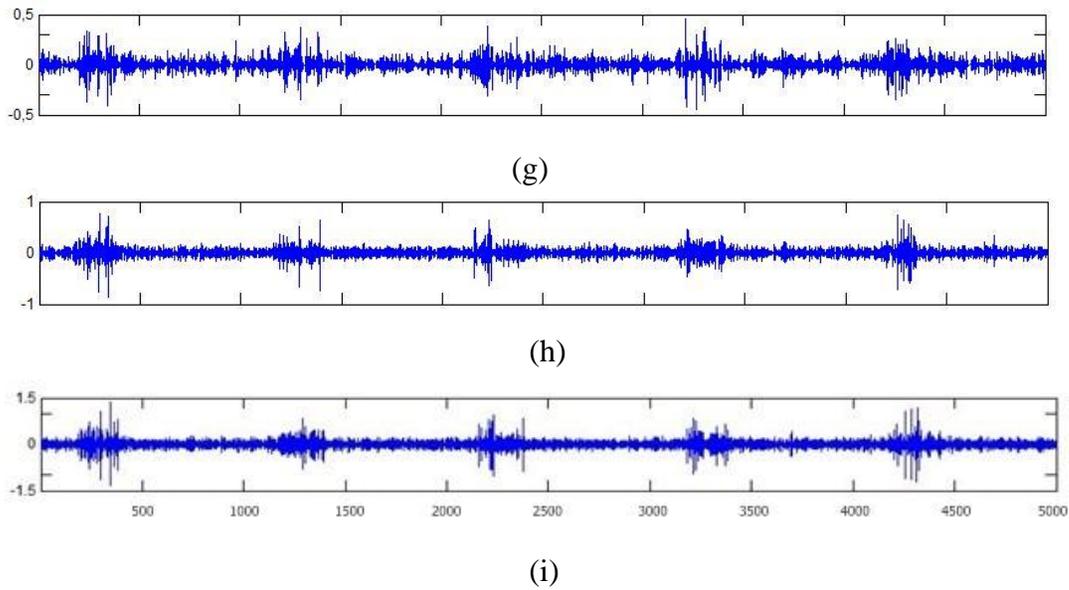
Dans notre travail, nous allons appliquer la DWT en utilisant l'ondelette de *Daubechies 4* pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'identifier les transitions des décharges pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [18].

La décomposition fréquentielle du signal de courant de fuite s'avère être nécessaire avant d'utiliser la techniques RP. Différents détails correspondant aux différents niveaux de décomposition sont donc extraits.

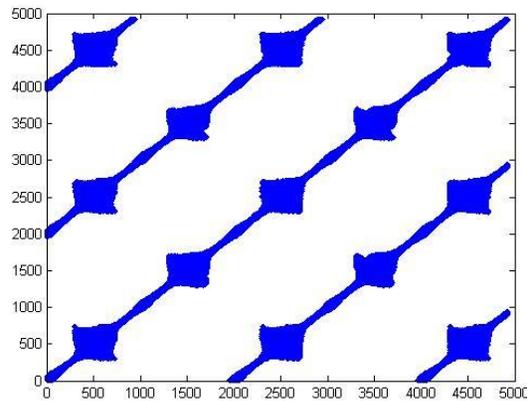
On décompose le signal du courant de fuite précédant un contournement par la DWT à l'aide de l'ondelette *Daubechies 4* jusqu'à 10 niveaux. On extrait alors les différents détails correspondant aux différentes bandes de fréquences.

On appliquera la technique RP aux différents niveaux de décomposition obtenus, comme montré sur la figure I.5. Dans cette partie, les résultats sont obtenus en exploitant l'ensemble de signaux G1Mod1 (annexe A).

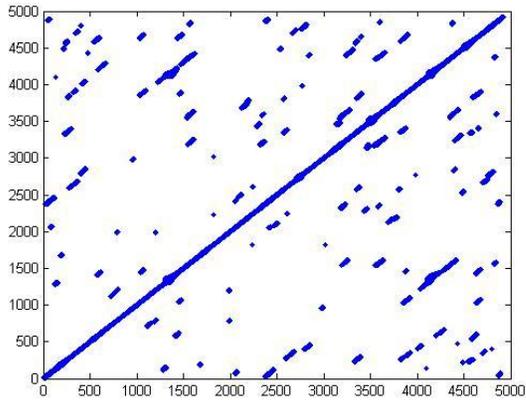




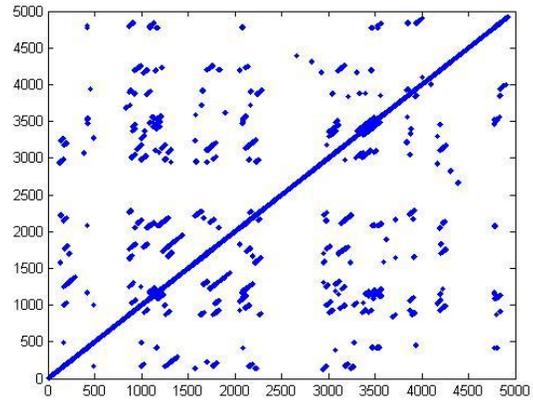
**Figure I.5.** Extraction des composantes fréquentielles du courant de fuite précédant le contournement: (a) indique le signal de courant de fuite, (b) définit le coefficient D10 (50 Hz), (c) définit D8 (390- 1953 Hz), (d) définit D6 (781 – 1562 Hz), (e) définit D5 (1,56 – 3,12 kHz), (f) définit D4 (3,12 – 6,25 kHz), (g) définit D3 (6,25 – 12,5 kHz), (h) définit D2 (12,5 - 25 kHz), (i) définit D1(25 - 50 kHz).



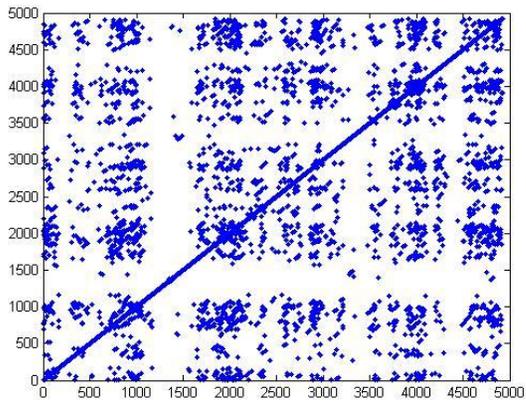
**Figure I.6.** la technique RP appliquée directement sur le signal du courant de fuite.



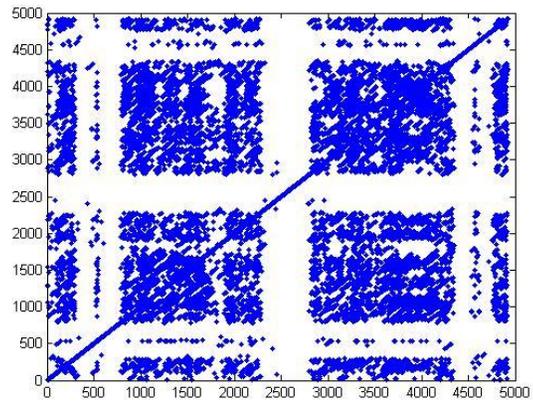
(a)



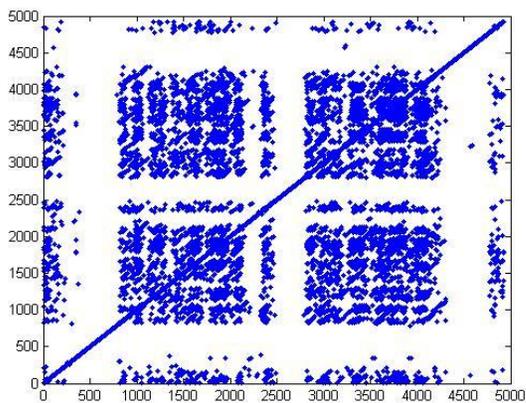
(b)



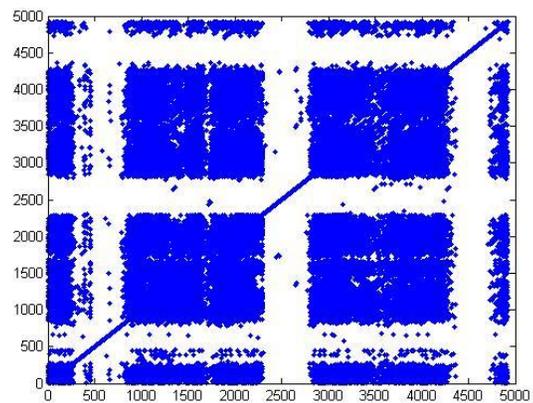
(c)



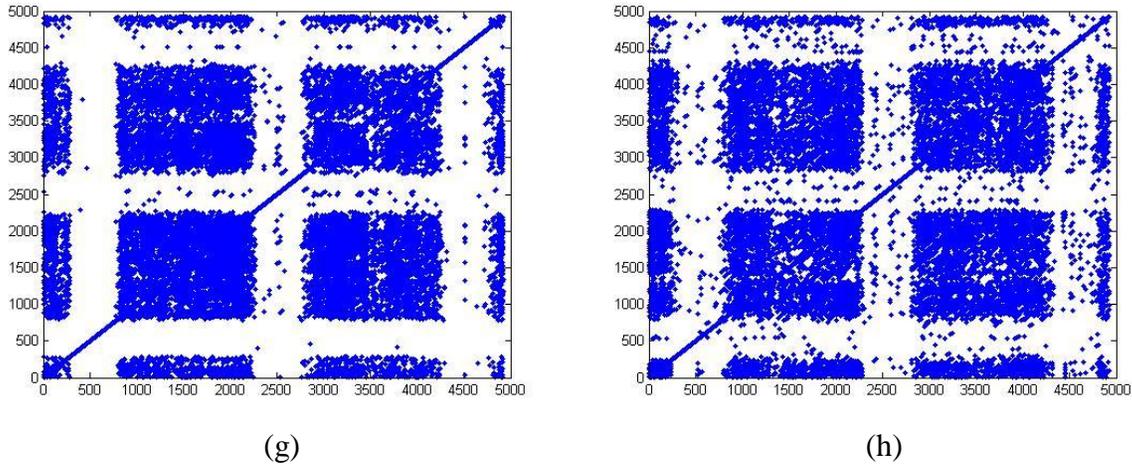
(d)



(e)



(f)



**Figure I.7.** RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite (a) définit le coefficient  $D10(50\text{ Hz})$ , (b) définit  $D8(390-1953\text{ Hz})$ , (c) définit  $D6(781-1562\text{ Hz})$ , (d) définit  $D5(1,56-3,12\text{ kHz})$ , (e) définit  $D4(3,12-6,25\text{ kHz})$ , (f) définit  $D3(6,25-12,5\text{ kHz})$ , (g) définit  $D2(12,5-25\text{ kHz})$ , (h) définit  $D1(25-50\text{ kHz})$ .

Les études déjà menées [19,20] ont montré que les composantes fréquentielles peuvent être séparées en trois intervalles : basses (ch1 à ch3), moyennes (ch4 à ch7) et hautes fréquences (ch8).

Pour les basses fréquences (50 – 1562 Hz) :

La figure I.7.a présente des structures pauvres. Elle est composée de quelques points ainsi que des fragments de lignes parallèles à la LOI. L'interprétation de cette structure indique très peu de décharges électriques sur la surface de l'isolateur, ces décharges suivent un comportement déterministe et cela d'après les courtes lignes diagonales. Cette interprétation est totalement en contradiction avec ce qui se passe réellement et même avec la théorie.

La figure I.7.b se rapportant au ch2, les fragments des diagonales se rassemblent et deviennent plus denses, mais cela reste loin de la réalité, aussi, des bandes blanches sont visiblement nettes, cela peut être interprété par un état de transition certain, ce qui suit la théorie.

Pour la figure I.7.c, la dernière structure pour les basses fréquences, diffère des deux précédentes, les lignes diagonales à la LOI ont presque disparues, le nombre de points a augmenté un peu, mais reste toujours loin de refléter la réalité. Par ailleurs, les bandes blanches

sont toujours présentes, ce qui suit toujours la théorie. Toutefois, bien que ces figures suivent la théorie pour ce qui est de l'état de transition imminent (bandes blanches bien dessinées), on se retrouve face à des contradictions. Le nombre de points bien insuffisant pour refléter l'activité des décharges superficielles réelle. La deuxième contradiction étant les fragments des lignes diagonales parallèles à la LOI, ce qui en désaccord avec la théorie.

Pour les moyennes fréquences (1,56 – 25 kHz) :

Les bandes blanches sont toujours présentes, ce qui indique l'imminence de l'état de transition. La figure I.7.d, les points se densifient grandement ce qui signifierait une forte activité des décharges superficielles toute fois avec la présence de zones blanches (vide) dans ces structures.

La figure I.7.e, paraît similaire à la précédente, mis à part la plus grande concentration des points et la diminution des vides internes ce qui traduit toujours de fortes décharges superficielles, ceci ne reflète pas concrètement la réalité.

Concernant les figures I.7.f et I.7.g, les deux structures sont pratiquement similaires devenues opaques à cause de la forte densité de points. Ceci se traduit par une très forte activité des décharges superficielles. On pourrait utiliser les moyennes fréquences dans notre étude mais cette dernière sera faussée car cette activité est trop intense par rapport à la réalité.

La figure I.7.h, correspond au RP des hautes fréquences (25 – 50 kHz), cette structure semble la même que celle pour les moyennes fréquences mais la seule différence réside au niveau de l'absence de l'opacité. Présente dans les structures précédentes, cela traduit en réalité des décharges superficielles intenses ainsi que quelques décharges de faible intensité. Elles se préconisent sur la RP comme des points isolés. Cela suit aussi la théorie, les bandes blanches sont toujours bien visibles, un état de transition imminent [21].

Donc on pourra conclure que pour chaque palier de fréquence, la RP donne une représentation différente qui ne peut pas être toujours associée aux décharges superficielles et au

contournement. Pour les basses fréquences la RP est inadéquate, vue que l'interprétation est totalement contradictoire pour ce qui se passe réellement.

Pour les moyennes fréquences, la RP peut être utilisable, toute fois l'interprétation sera profondément faussée, une structure si opaque décrit maladroitement l'activité des décharges au niveau de l'isolateur. Ainsi les hautes fréquences correspondantes au détail D1. Elles nous donnent la meilleure interprétation possible pour ce qui se passe réellement sur la surface de l'isolateur.

### **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 une dérivée de cette méthode, 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 et JRP sur  
les signaux du courant de fuite,  
de la tension appliquée 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 et de la JRP appliquées aux signaux du courant de fuite, de la tension appliquée 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 trois 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 JRP des signaux du courant de fuite et de la charge électrique.

La troisième partie porte sur la JRP du signal de la tension appliquée, une fois avec celui du courant de fuite et l'autre avec celui de la charge électrique. Ces deux dernières parties nous permet de tirer quels sont les signaux qui donnent les meilleurs résultats.

On notera que désormais, dans ce chapitre, la technique RP ainsi que 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*.

### II.1. Les applications de la RP sur le signal de courant de fuite et sa JRP avec le signal de la charge électrique

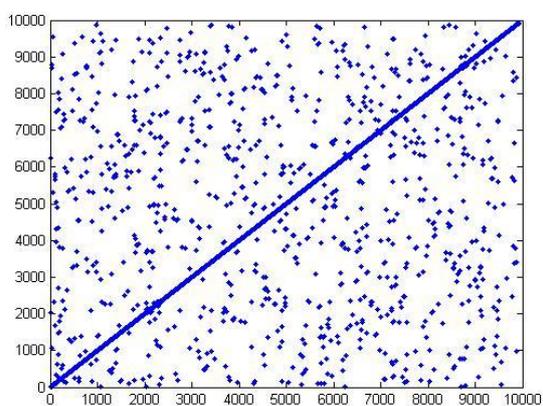
Pour notre étude des différentes RP en fonction des classes de pollutions, nous avons utilisé la base de données **G1Mod1** pour la technique RP et les bases de données **G1Mod1** et **G2Mod1** (annexe A) pour la JRP.

### II.1.1. RP de la composante haute fréquence du signal de courant de fuite

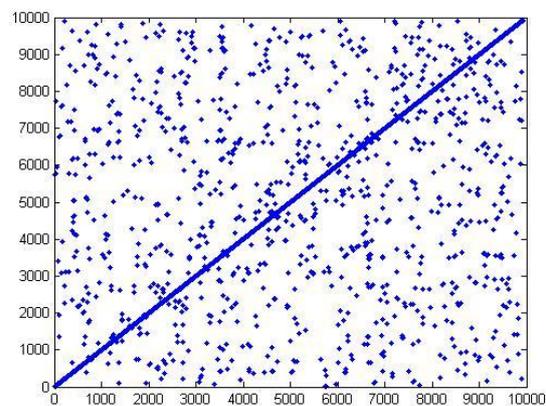
On applique la technique RP sur le détail D1 (cf. chapitre I) du courant de fuite pour les trois classes de pollution à différents niveaux de tensions appliquées.

#### II.1.1.1. Cas d'une pollution de classe 1

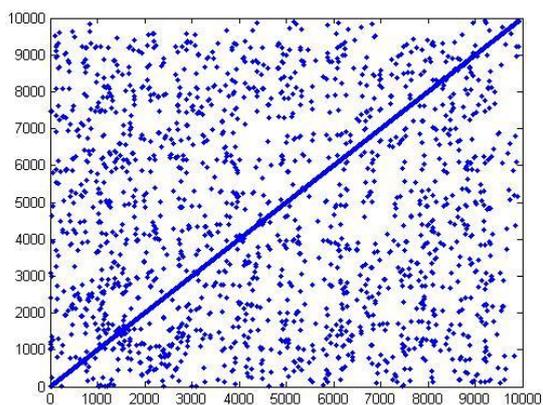
Pour cette classe de pollution, on s'intéressera à un signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 3,5mS/cm.



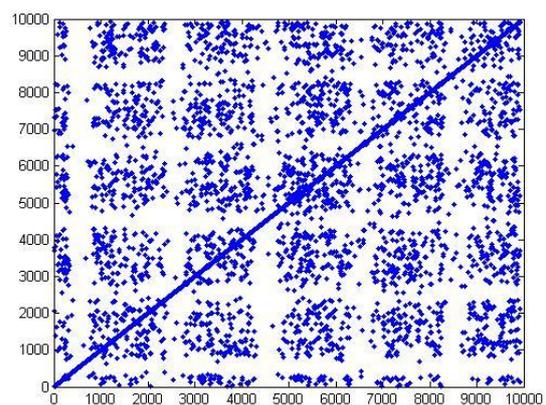
(a)



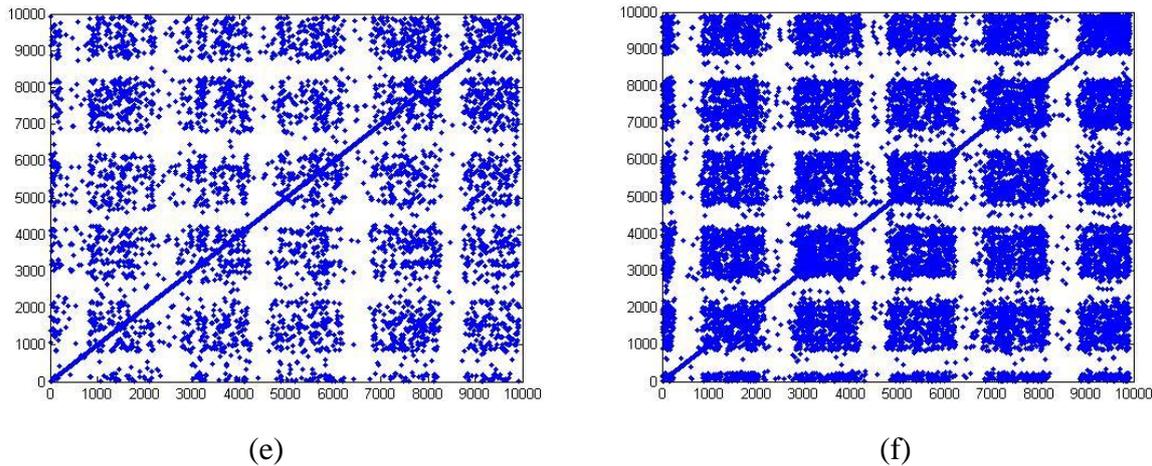
(b)



(c)



(d)



**Figure II.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 II.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 II.1.a de tension appliquée de 5kVeff, 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 II.1.b, où la tension appliquée est de 10kVeff, 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 II.1.c, où la tension appliquée est de 15kVeff, 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.

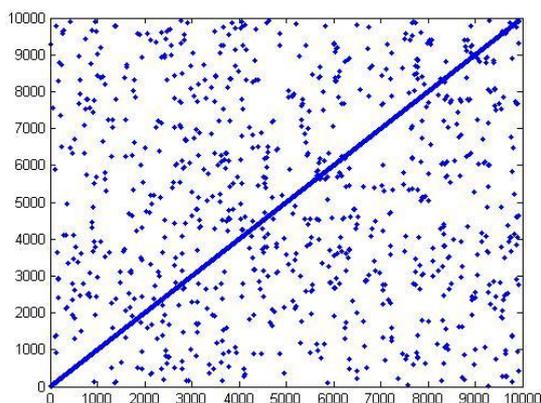
Dans la figure II.1.d, où la tension appliquée est de  $20kV_{eff}$ , nous donne une nouvelle structure bien différente des deux premières, plus ordonnée. Les points sont plus denses dans des espaces de formes rectangulaires, bien que très grossières. Cela dit, on remarque l'apparition de bandes blanches 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 II.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.

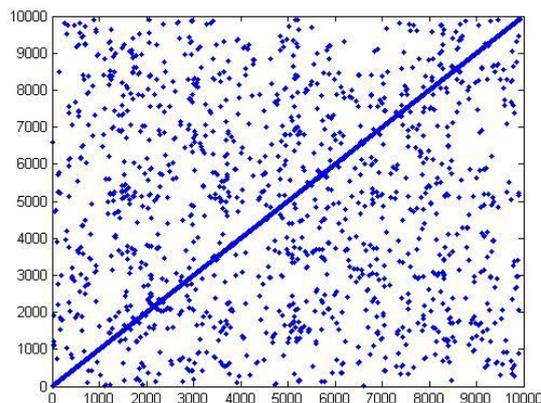
Finalement, la figure II.1.f, avec une tension de  $30kV_{eff}$ , représente une structure encore plus affinée, avec tout de même cette fois une très grande densité de points séparés par des bandes blanches bien dessinées. Cette structure définit ce qui se passe sur l'isolateur par le fait de la présence 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.

#### II.1.1.2. Cas d'une pollution de classe 2

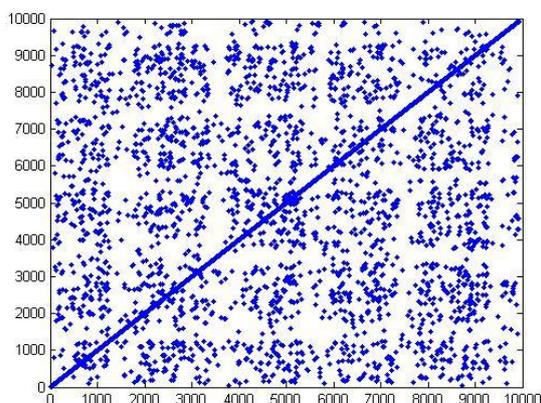
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $6mS/cm$ .



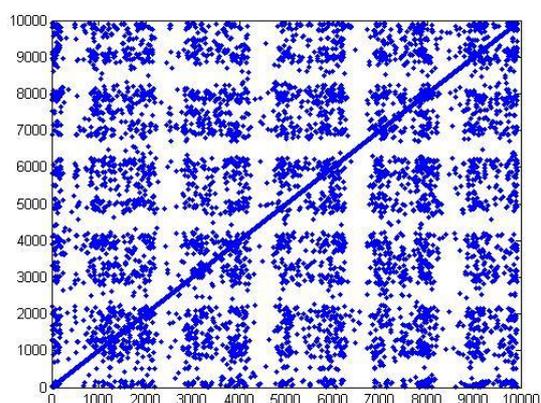
(a)



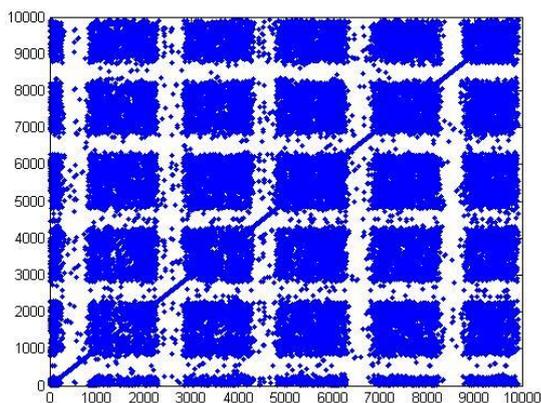
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure II.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 II.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 II.2.a, tension appliquée de  $5kV_{eff}$ , 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 II.2.b, où la tension appliquée est de  $10kV_{eff}$ , 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 II.2.c, la tension appliquée est de  $15kV_{eff}$ , 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.

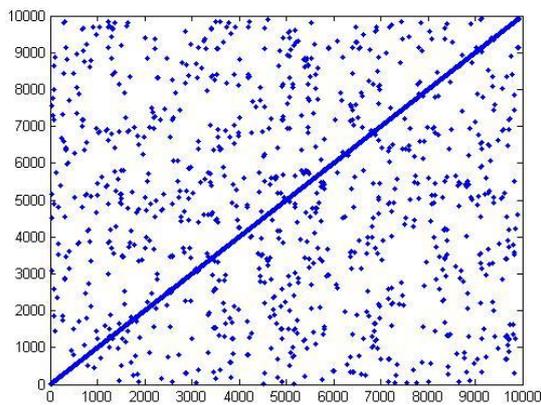
Dans le cas de la figure II.2.d, où la tension appliquée est de  $20kV_{eff}$ , nous avons une structure bien plus affinée que la précédente. Les points se densifient dans des espaces de formes rectangulaires moins grossières, cela dit, on remarque la distinction des bandes blanches un peu grossières 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 II.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,

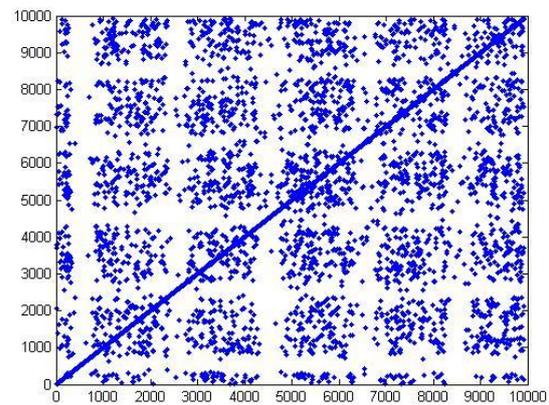
l'imminence du claquage et quasi ressenti, début de formation de l'arc électrique de contournement.

### II.1.1.3. Cas d'une pollution de classe 3

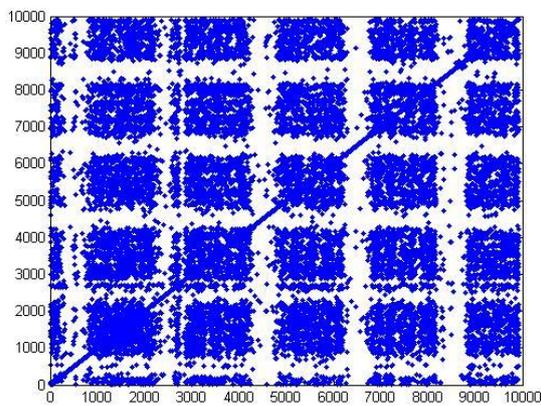
Pour cette classe de pollution, nous nous intéresserons au RP du signal du courant de fuite sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 20mS/cm.



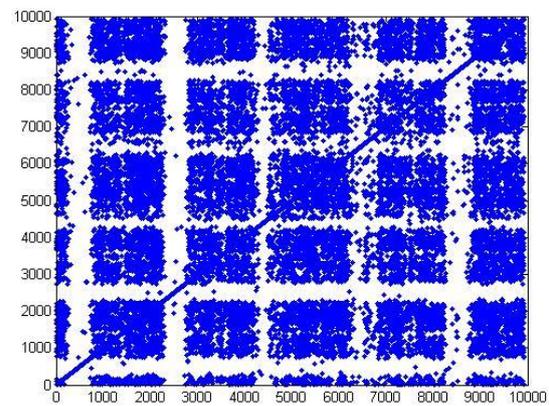
(a)



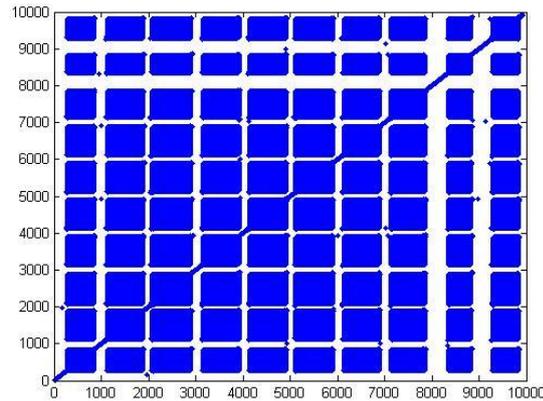
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure II.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 II.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 II.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 II.3.b, où la une 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'apparait pas si prématurément pour un tel bas niveau de tension, cela est du à la sévérité de pollution. Cette structure annonce la présence d'un état non stationnaire. Cela relate ce qui arrive en pratique, des décharges surfaciques plus prononcées avec un état de contournement proche par rapport à un tel niveau de tension.

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

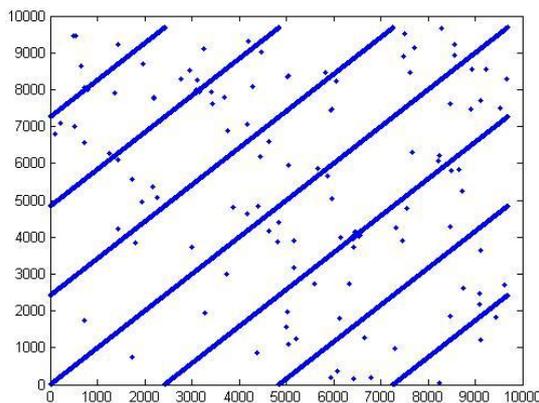
Par contre, la figure II.3.d d'une tension appliquée de  $20kV_{eff}$ , montre une structure encore mieux affinée. On a les mêmes bandes blanches avec un peu plus d'intensité dans les points. Ce qui caractérise les décharges très intenses et de plus en plus intermittentes. La saturation complète des 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 II.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 superficielles 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 superficielles avec l'augmentation de la tension.

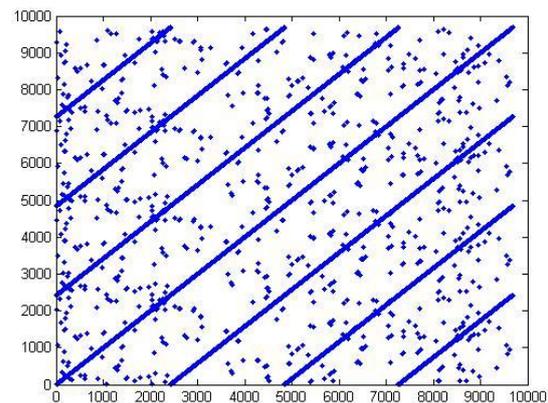
## II.1.2. JRP des composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de la charge électrique

### II.1.2.1. Cas d'une pollution de classe 1

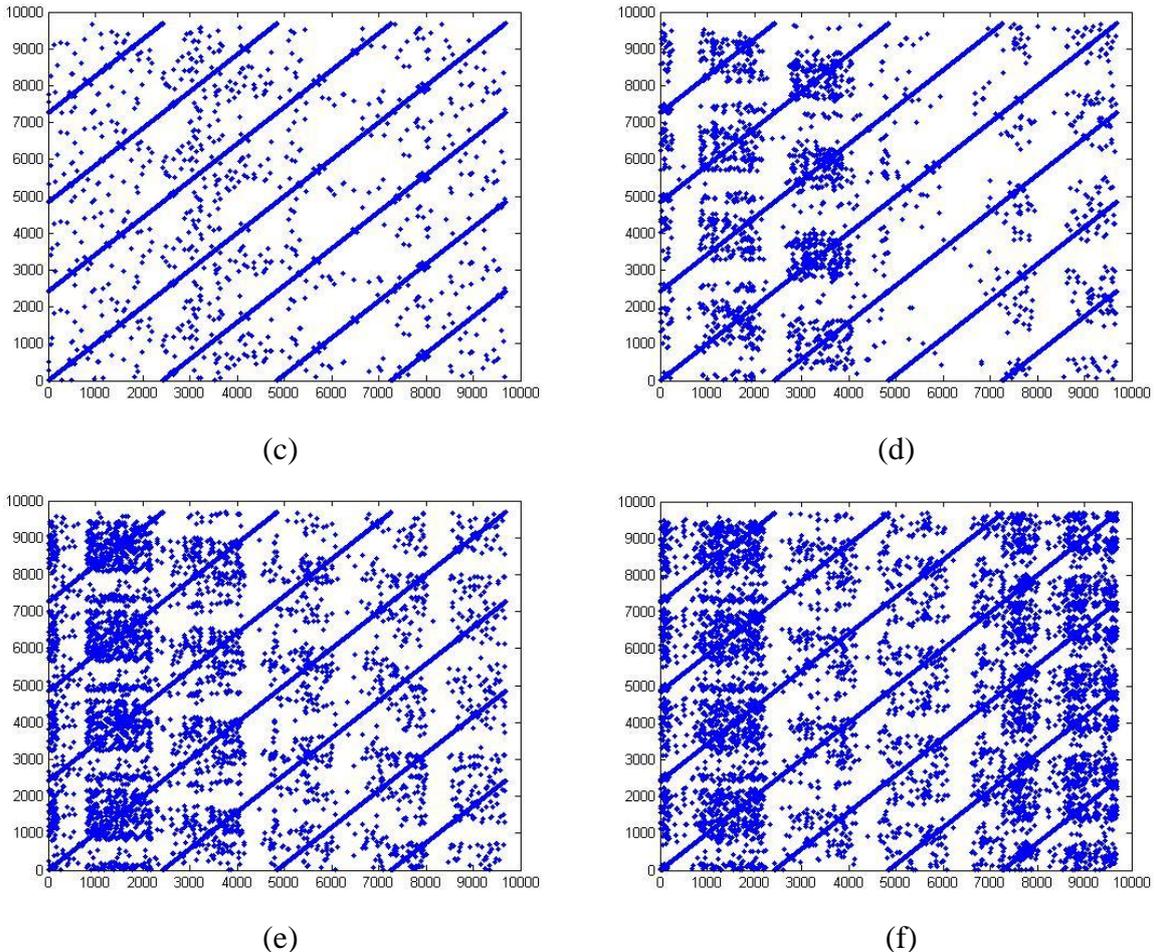
On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge sous une pollution non uniforme d'une conductivité de  $3,5mS/cm$ .



(a)



(b)



**Figure II.4.** 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 II.4 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, vu 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 II.4, 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 II.4.a, où la tension appliquée est de  $5kV_{eff}$ , 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 II.4.b, où la tension appliquée est de  $10kV_{eff}$ , comporte une structure très semblable à celle de la figure II.4.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 II.4.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 II.4.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 II.4.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 II.4.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.

II.1.2.2. 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.

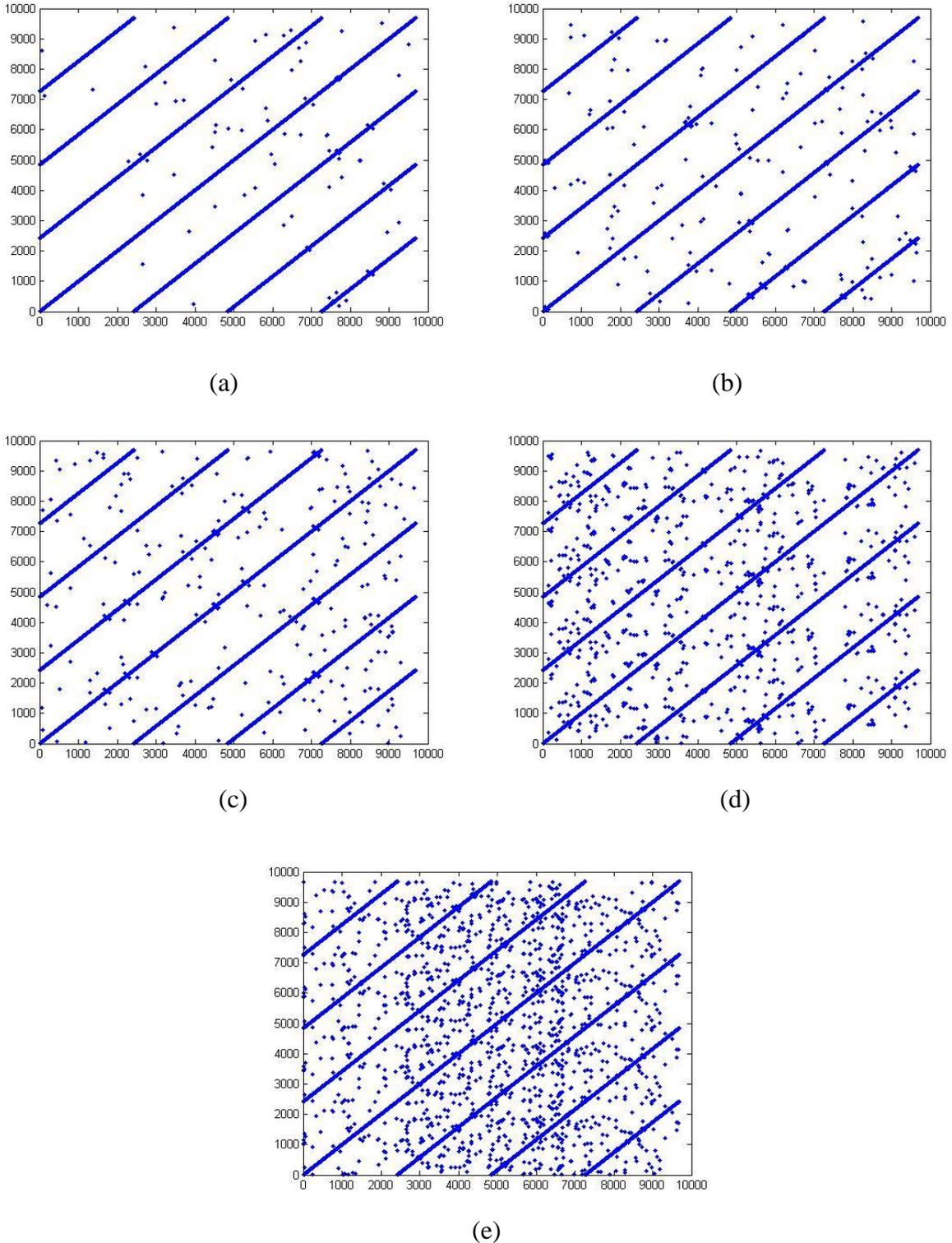


Figure II.5. JRP des composantes hautes fréquences (D1) en fonction de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 10kVeff, (b) 15kVeff, (c) 20kVeff, (d) 25kVeff, (e) 30kVeff.

La figure en II.5 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 II.5.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 II.5.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 II.5.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.

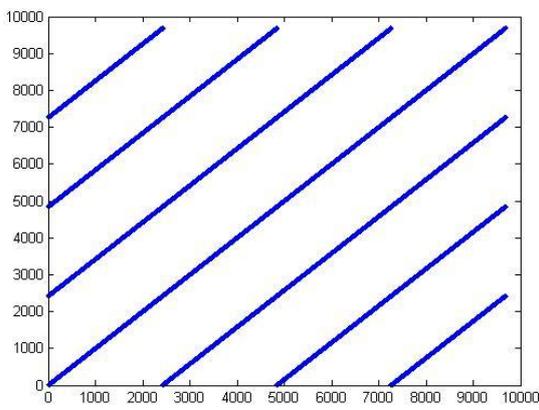
Concernant la figure II.5.d, de tension égale à  $25kV_{eff}$ , la structure diffère des précédentes. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches qui commencent à mieux se dessiner. On note aussi l'apparition de petites lignes diagonales orthogonales à la LOI qui indique qu'il y a 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 II.5.e), la structure est totalement différente. Elle est caractérisée par une grande densité de points en symétrie par rapport aux diagonales.

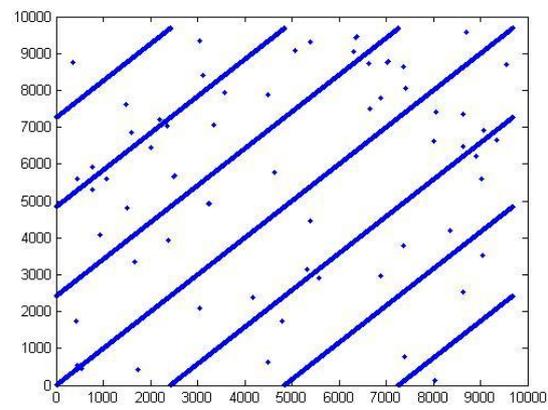
Cela contraste de plus en plus les bandes blanches, qui s'associent physiquement à de fortes décharges partielles sur les zones propres en vue d'un état de transition certain. Ces décharges se relient entre elles formant un arc électrique qui produit le contournement.

### II.1.3.3. Cas d'une pollution de classe 3

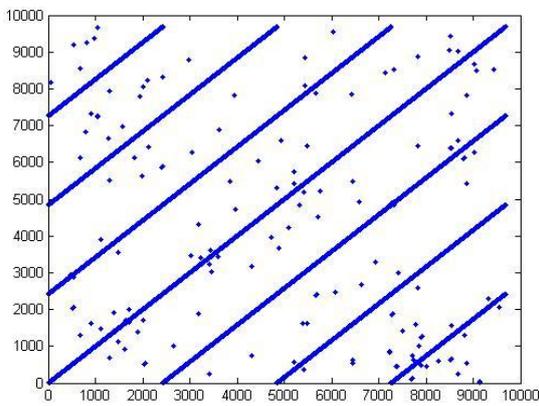
On s'intéressera à un signal du courant de fuite et de la charge électrique sous une pollution non uniforme d'une conductivité de 20mS/cm.



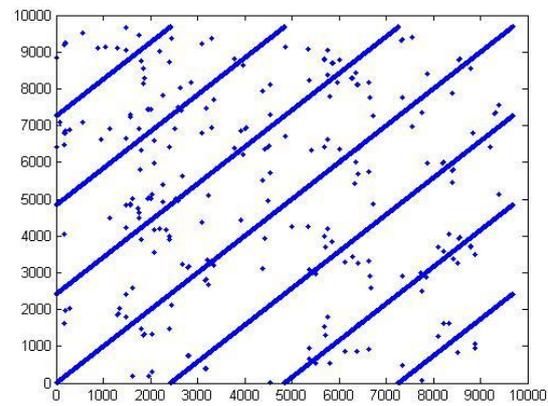
(a)



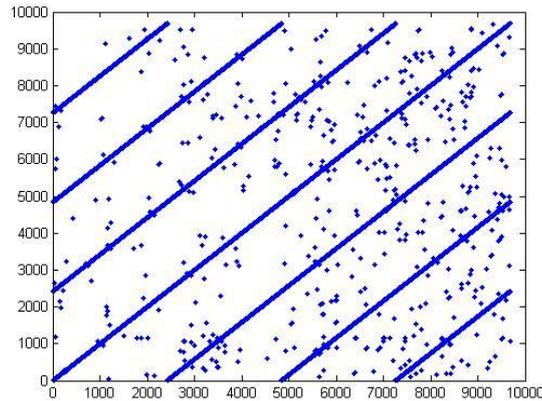
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure II.6.** 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 II.6, 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 II.6.a, de tension appliquée de 5kVeff, 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 10kVeff, la figure II.6.b a une structure caractérisée par un petit nombre de points éparpillés. Les coins haut gauche 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.

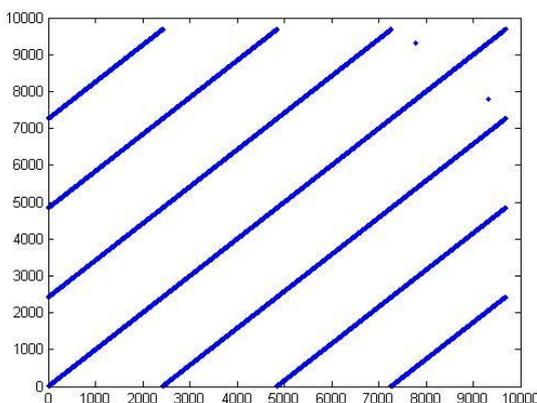
La figure II.6.c, de tension de 15kV $_{eff}$ , a une structure inchangée mis à part l'augmentation du nombre de points éparpillés. Cela est dû au nombre croissant de décharges qui commencent à paraître de plus en plus stationnaires. Au delà de cette tension, le système évolue vers un schéma déterministe.

Concernant la figure II.6.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, vue le rapprochement de l'état de transition, l'arc électrique commence à se faire ressentir.

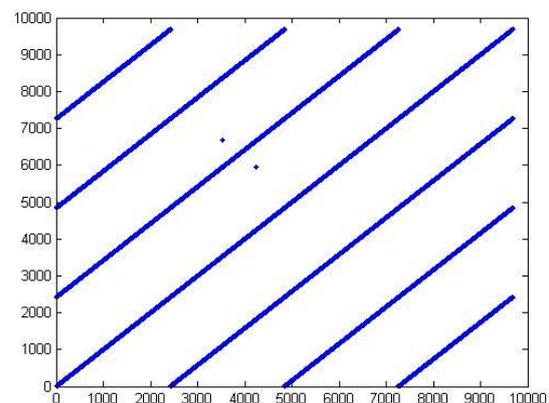
Pour la figure II.6.e, la tension est à 25kV $_{eff}$ , une structure qu'on peu caractériser de finale apparait. Les points sont plus denses dans des zones délimitées par les bandes blanches plus apparentes. Cela revient au fait que les décharges superficielles s'intensifient dans des surfaces maintenant saturées. Le contournement peut se produire à tout moment et l'arc électrique se formera pour n'importe quelle tension supérieure à celle-ci.

## II.2. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée

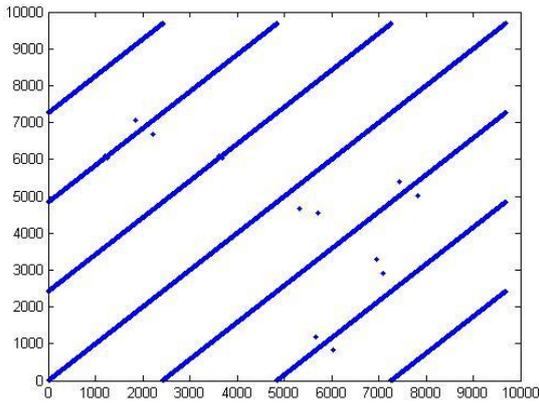
La figure II.7 représente la JRP des premiers détails du signal de courant de fuite et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1.



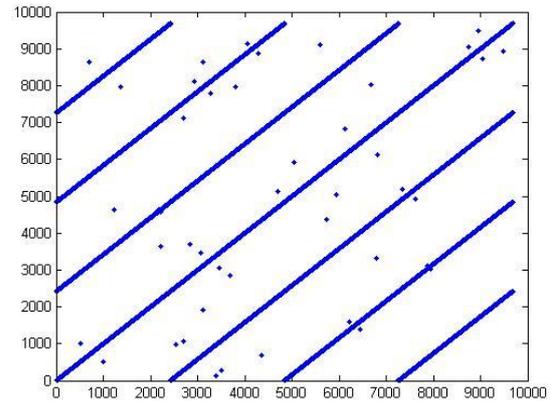
(a)



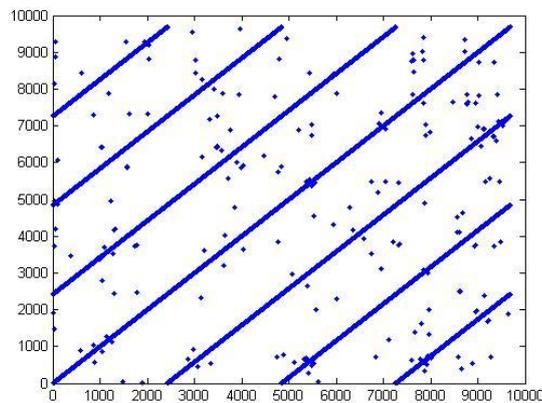
(b)



(c)



(d)



(e)

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

On commence, par les lignes diagonales parallèle à la LOI qui est loin des points isolés. Cette structure décrit l'évolution périodique déterministe.

La figure II.7.a, de tension 5kVeff, ainsi que la figure II.7.b, de tension 10kVeff, ont la même structure dépourvue de points récurrents mis à part pour les diagonales. En réalité, ce qui caractérise ces niveaux de tension est la rareté des décharges superficielles qui rend la présence des décharges partielles impossible. Cela nous a poussés à associer les points récurrents directement aux décharges partielles.

Dans la figure II.7.c, de tension égale à  $15kV_{eff}$ , on remarque l'apparition des premiers points isolés. Réellement, ceci est dû à l'augmentation des décharges superficielles et de leur intensification. Cela n'est pas encore suffisant pour générer l'arc électrique.

La figure II.7.d, à une tension de  $20kV_{eff}$ , est caractérisée par une augmentation de points plus visibles. Ces derniers se concentrent autour des diagonales changeant son évolution de déterministe à chaotique. Physiquement, on remarque l'augmentation des décharges superficielles, qui génèrent de plus en plus de décharges partielles. Celles-ci ne semblent être régies par aucune loi. Ceci confirme l'évolution chaotique.

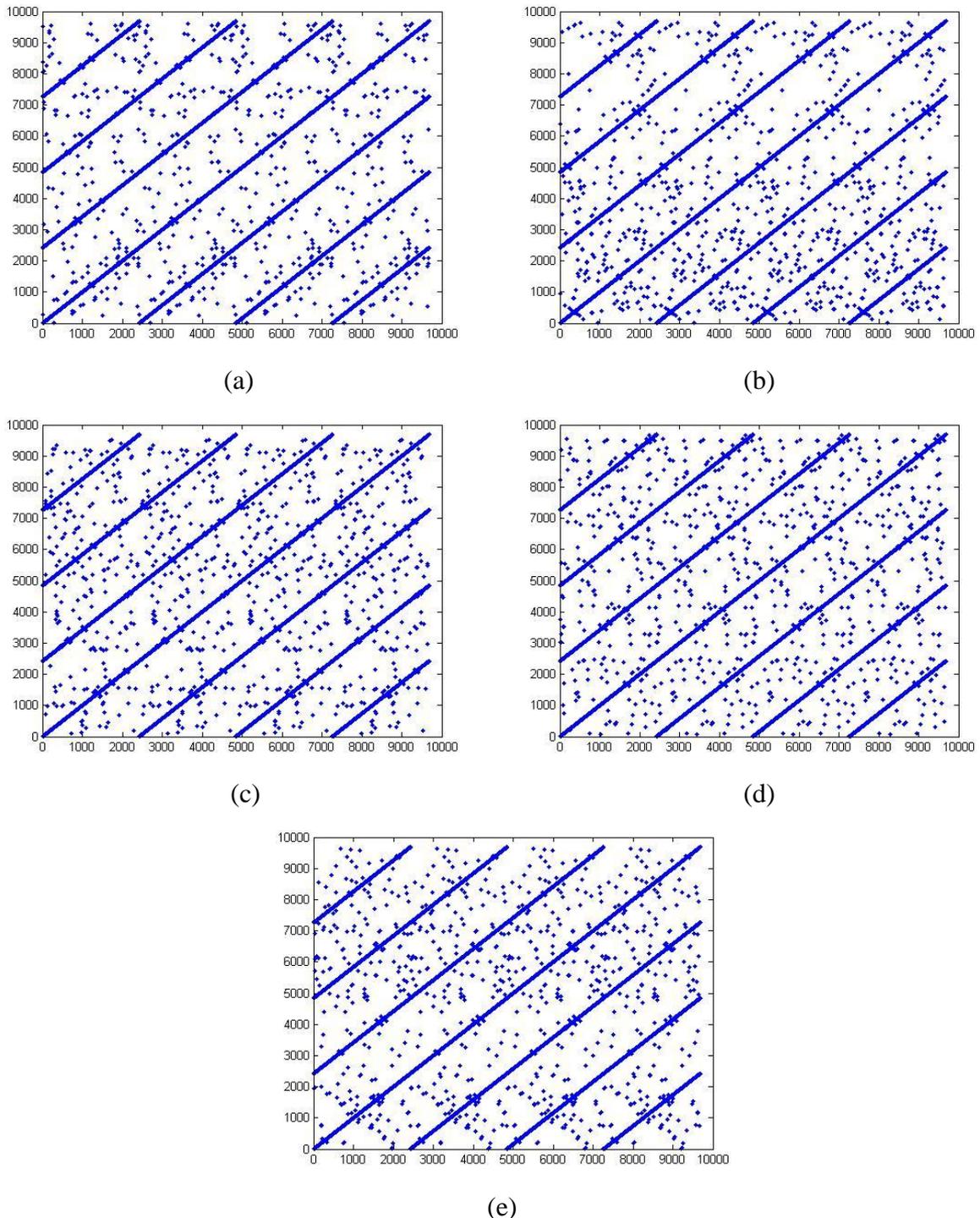
Pour finir, la figure II.7.e, de tension  $25kV_{eff}$ , représente une structure différente. Le nombre de points a significativement augmenté, sans qu'ils ne deviennent plus denses. Cela explique les décharges partielles présentes sur les bandes propres et qui commencent à former l'arc électrique. Le contournement apparaît très brièvement après leur apparition.

Cette interprétation ne sera pas valable pour d'autres classes de pollution. Les décharges superficielles pour les classes 2 et 3 sont si intenses qu'elles ont presque le même comportement que celui des décharges partielles, donc l'interprétation sera erronée et le diagnostic du degré de pollution sera faux.

L'utilisation de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux du courant de fuite et de celui de la tension appliquée pour le diagnostic de la sévérité pollution, est possible dans les cas où d'autres paramètres supplémentaires sont pris en compte. Parmi ces paramètres, on peut citer les conditions climatiques et géographiques dans lesquelles se trouve l'isolateur à surveiller.

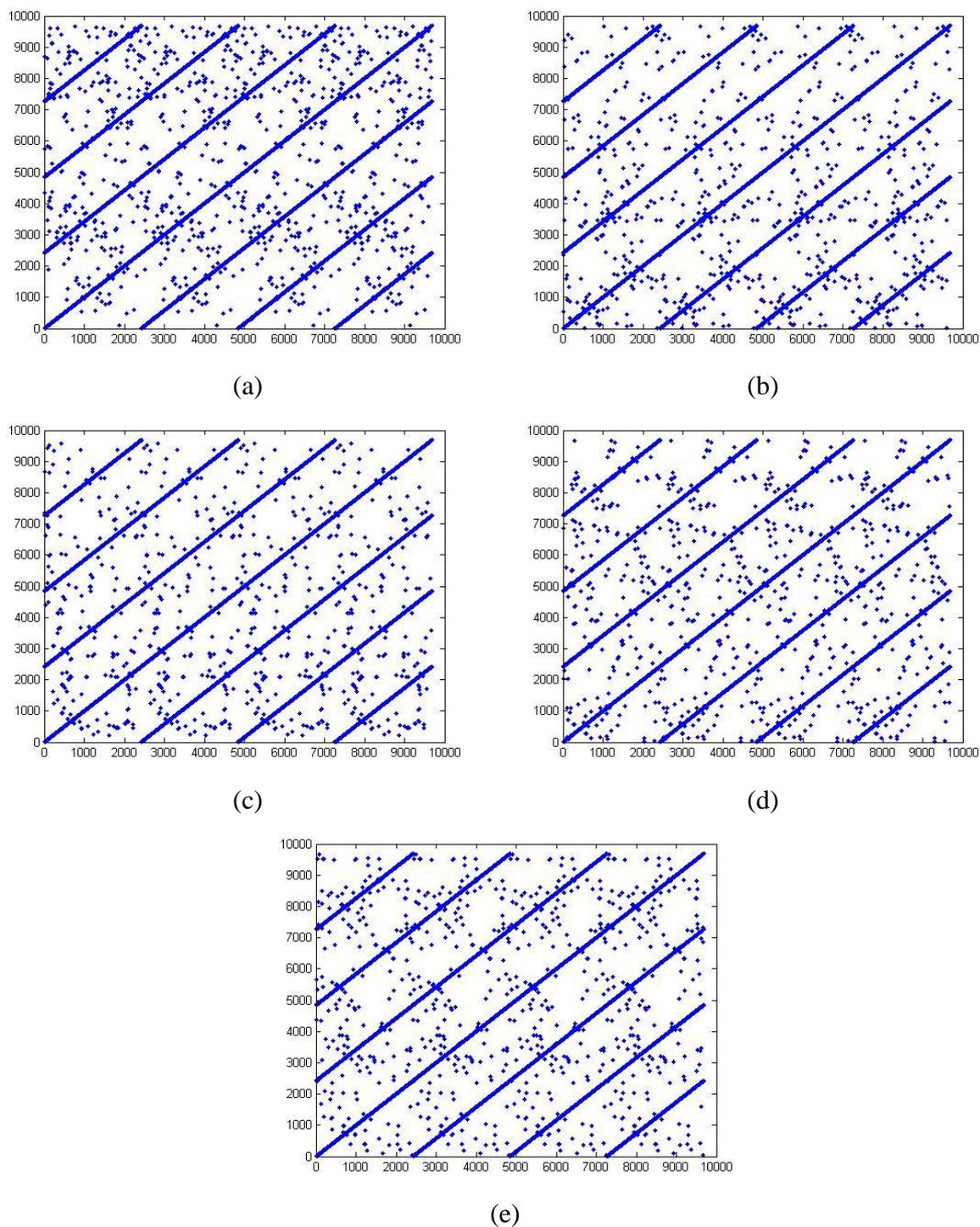
### II.3. Les applications de la JRP sur les composantes hautes fréquences des signaux de la charge électrique et de la tension appliquée

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



**Figure II.8.** JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 1 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

## II.3.2. Cas d'une pollution de classe 2



**Figure II.9.** JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 2 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

II.3.3. Cas d'une pollution de classe 3

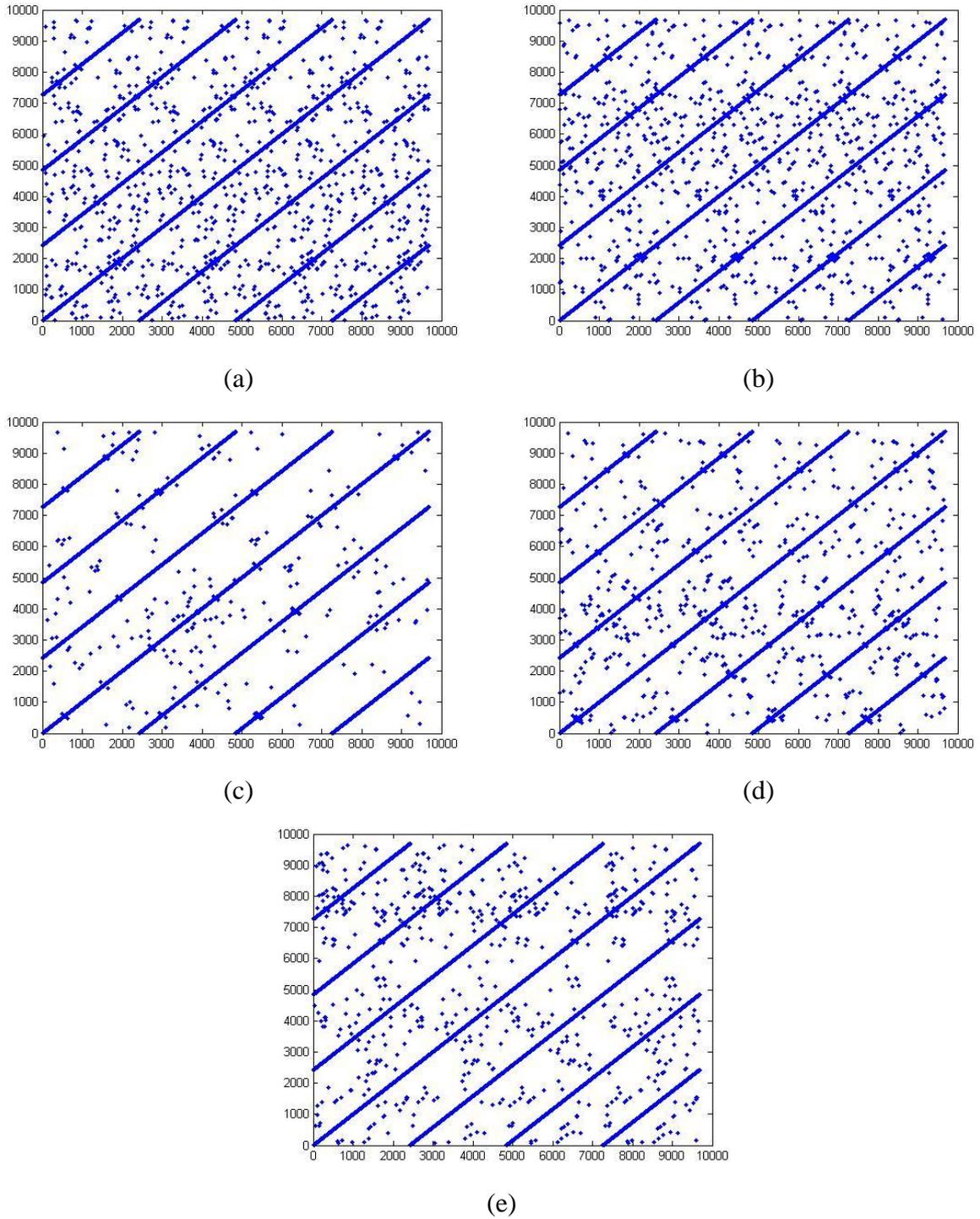


Figure II.10. JRP des composantes hautes fréquences (D1) du signal de la charge électrique et de la tension appliquée pour une pollution de classe 3 : (a) 5kVeff, (b) 10kVeff, (c) 15kVeff, (d) 20kVeff, (e) 25kVeff.

Les interprétations des figures II.8, II.9 et II.10 qui concernent les JRP de la tension et de la charge sont les mêmes, donc on les a rassemblées toutes ici.

Il est bien évident que les JRP du signal de tension appliquée et de la charge électrique pour les différents niveaux de tension ont la même structure. Le même nombre de points isolés et des lignes diagonales parallèles à la LOI. Ces dernières décrivent une évolution chaotique semblable à d'autres périodes entre les deux signaux.

La JRP étant une étude comparative, ces structures décrivent les différences entre deux signaux d'un point de vue temporelle. Ces structures restent inchangées car une relation directe existe entre la tension appliquée et la charge électrique. Ceux-ci évoluent sans déphasage avec un coefficient, suivant la relation :  $Q = \frac{1}{2}CV^2$ . Ce qui rend la JRP de la charge et de la tension inutilisable pour les diagnostics des décharges et du contournement, et cela pour les trois classes de pollution.

## **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.
- l'étude comparative entre les différents signaux nous a permis de définir la combinaison optimale qui nous permet de déterminer le degré de pollution présent sur la surface de l'isolateur.

**Conclusion**

**Générale**

Le travail présenté nous a permis l'application d'une nouvelle technique comparative dérivée 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 JRP qui est une technique comparative dérivée 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.

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 JRP.

Par la suite, on a étudié les possibilités de l'utilisation de cette méthode sur les différents signaux électriques présents dans la base de données du laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique.

On a appliqué la JRP sur les combinaisons possibles des trois signaux du courant de fuite, de la tension appliquée et de la charge électrique. Cela pour déterminé la meilleure combinaison, toujours en se basant sur le critère du nombre d'informations utilisables.

La JRP appliquée sur les signaux du courant de fuite et de la charge électrique, est celle qui donne les meilleurs résultats.

# **Références Bibliographiques**

- [1] R.Porzel and M.Muhr, "Technical diagnostics, non-destructive state-estimation instead of damaging voltage test", in Proc. 10th Int. Conf. on HV Eng., pp. 405-408, Montreal, Canada, (1997).
- [2] M. Shah, G. G. Karady, and R. L. Brown, "Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation - II", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10 (4), pp. 1972-1978, (1995).
- [3] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of Polymer Insulating Materials Degradation Using Daubechies Wavelet Transform", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phen. (CEIDP), pp. 323-326, (2002).
- [4] B.X.Du, Y.Liu and H.J.Liu, "Recurrent plot analysis of leakage current for monitoring outdoor insulator performance", IEEE Trans. on Dielec And Elect . Insul., Vol. 16, No. 1, pp. 139-146, February 2009.
- [5] H. Poincaré, "Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique", Acta Mathematica, 13, pp. 1–271, (1890).
- [6] J.-P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle, "Recurrence plots of dynamical systems, Europhys", Lett. 5, 973–977, (1987).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] G.M. Mindlin, R. Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", Physica D 58 (1–4), pp.229–242, (1992).
- [10] M. Koebbe, 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).
- [11] 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).
- [12] 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).

- [13] M. Thiel, M.C. Romano, J. Kurths, "Spurious structures in recurrence plots induced by embedding", *Nonlinear Dynam.* 44 (1–4), pp.299–305, (2006).
- [14] N.Marwan, M.C.Romano, M Thiel, J. Kurths, "Recurrence plots for the analysis of complex systems", *Science direct, Physics Reports* 438, pp. 274– 283, January 2007.
- [15] T.K. March, S.C. Chapman, R.O. Dendy, "Recurrence plot statistics and the effect of embedding", *Physica D* 200 (1–2), pp.171–184, (2005).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] J.P. Zbilut, C.L. Webber Jr., "Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots", *Phys. Lett*, 171 (3–4), pp. 199–203, (1992).
- [19] L. Trulla, A. Giuliani, J.P. Zbilut and C.L. Webber Jr., "Recurrence quantification analysis of the logistic equation with transients". *Physics Letters*, 223 (4), pp. 225-260, (1996).
- [20] T. Suda, "Frequency Characteristics of leakage current waveforms of a string of suspension insulator", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, pp. 481-487, (2005).
- [21] B. X. Du, Yong Liu, H. J. Liu, "Recurrent plot analysis of leakage current for monitoring outdoor insulator performance", *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*,Vol. 16, No. 1; February 2009.

## Annexe A

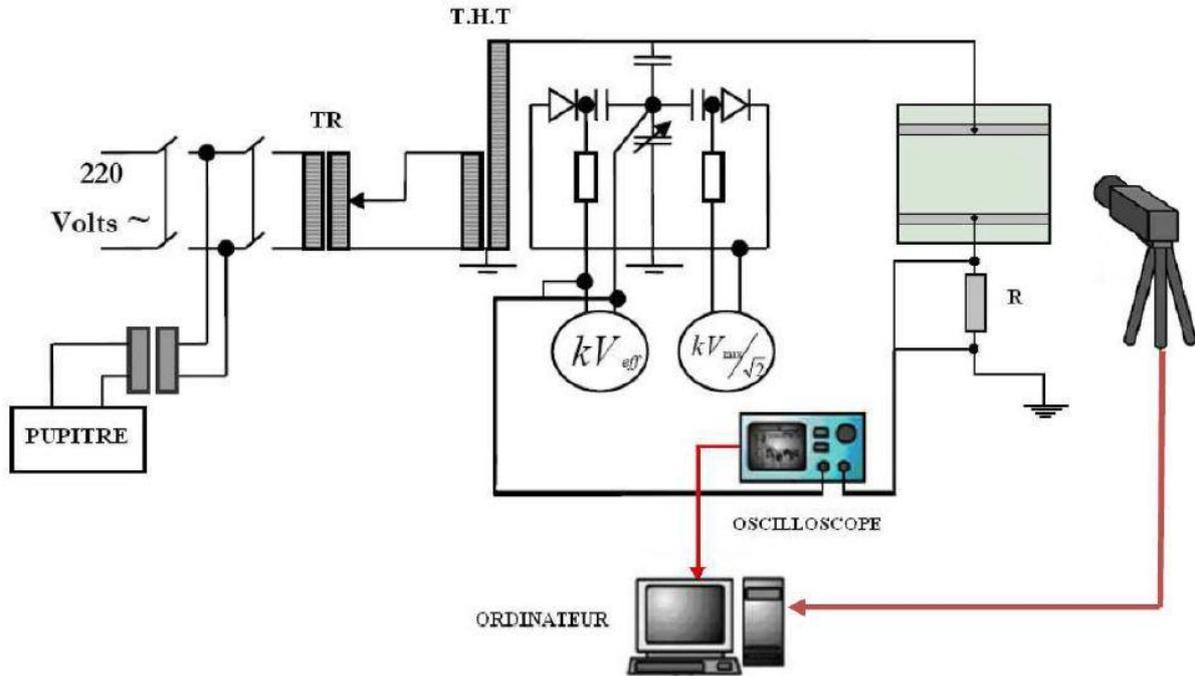
### Base des signaux utilisés

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.*