

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

**Etude de comportement d'un model
d'isolateur de haut tension pollue**

Diriger par:
Guia talal

Réaliser par:
Laiche Faouzi
Meraghni Tahar

Soutenu 04 Juin 2013

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES SYMBOLES

Introduction Générale	1
Chapitre I	
Généralités	
Introduction	3
I.1. Isolateurs de haute tension	3
I.2. Types des isolateurs	3
I.2.1 Isolateurs rigides	3
I.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	4
I.2.2.1 Isolateur long fut	4
I.2.2.2. Isolateur capot et tige	5
I.2.2.2.1. Profil standard	5
I.2.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A)	6
I.2.2.2.3. Profil anti-brouillard (forme B)	6
I.2.2.2.4. Profil plat	7
I.2.2.2.5. Profil sphérique	7
I.2.2.2.6. caractéristiques géométriques	7
I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs	8
I.3.1. Céramique	8
I.3.2. Verre	9
I.3.3. Matériaux synthétiques	9
I.4. Pollution des isolateurs	10
I.5. Sources de pollution	10
I.5.1. Pollution naturelle	10
I.5.1.1. Pollution marine	11
I.5.1.2. Pollution désertique	11
I.5.2. Pollution industrielle	11
I.5.3. Pollution mixte	11
I.6. Mesure de la sévérité de la pollution des sites	11
I.7. Comportement des isolateurs sous pollution	12
I.8. Conclusion	13

Chapitre II

Traitements du signale par la méthode des ondelettes	
II-1-Historique	15
II-2-Intérêt du diagnostic par les ondelettes	15
II-3-Transformée en ondelette continue (CWT)	16
II-3-1-Définitions	17
II-3-1-1-Concepts mathématiques pour les ondelettes	17
II-3-1-2-Ondelette de Morlet	18
II-3-1-3-Scalogramme	20
	20
II-4-Calcul des coefficients de la CWT	
II-5-Transformée en ondelette discrète (DWT)	22
II-5-1-Expression mathématique	22
II-5-2-Algorithmes de décomposition pyramidale	22
II-5-3-Décomposition en bandes de fréquences	24
II-5-4- Niveau maximal de décomposition	26
II-5-5-Choix de l'ondelette analysante	26
II-6-Conclusion	27

Chapitre III

Etude des signaux de tension éfcomant de futé par la technique des ondelettes

III-1-Introduction	29
III-2-Pollution uniforme	29
III-2-1-Conductivité 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$	29
III-2-2-Conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$:	30
III-2-3-Conductivité 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$	31
III-2-4-Conductivité 1,2 mS/cm	32
III-2-5-Conductivité 10,1 mS/cm	33
III-3-Conclusion sur l'analyse par la CWT	34
III-4-Pollution non-uniforme	35
III-4-1-Pollution côté HT	36
III-4-2-Pollution du côté terre	39
III-4-3-Pollution de la couche centrale	43
III-5-Conclusion sur l'analyse par la DWT	46
Conclusion générale	47

Dédicace

Nous consacrons CE MODESTE TRAVAIL A :
Nos chers parents
Nos sœurs et nos frères
Toute nos familles
Tous nos amis
Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour licencié d'électrotechnique

Chapitre I

Figures (I .1)	Isolateur rigide	4
Figures (I .2)	Isolateur long fut	4
Figures (I .3)	Isolateur long fut	4
Figures (I .4)	Isolateur capot et tige	5
Figures (I .5)	Isolateur capot et tige de profil standard	6
Figures (I .6)	Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A)	6
Figures (I .7)	Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B)	6
Figures (I .8)	isolateur capot et tige de profil plat	7
Figures (I .9)	Isolateur capot et tige de profil sphérique	7
Figures (I .10)	isolateurs en matériaux synthétiques	9
Figures (I .11)	isolateurs en matériaux synthétiques	10
Figures (I .12)	isolateurs en matériaux synthétiques	10

Chapitre II

Figures (II .1)	Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide	15
Figures (II .2)	Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes	16
Figures (II .3)	Exemple de l'ondelette chapeau mexicain	17
Figures (II .4)	Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour $s=1$: (a) $u=4$, (b) $u=2$.	19
Figures (II .5)	Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).	19
Figures (II .6)	Représentation fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).	19
Figures (II .7)	Atome de la Wavelet Transforme	20
Figures (II .8)	Comparaison de l'ondelette à une portion du signal	21
Figures (II .9)	Balayage du signal par l'ondelette	21
Figures (II .10)	Dilatation de l'ondelette et balayage du signal	21
Figures (II .11)	Représentation des coefficients obtenus après calcul régressif	22
Figures (II .12)	: Chaîne de décomposition de la DWT incluant le filtrage et le sous-échantillonnage.	23
Figures (II .13)	Effet du sous-échantillonnage	24
Figures (II .14)	Réponse en fréquence des filtres miroirs en quadrature	24
Figures (II .15)	Réponse fréquentielle des filtres passe-bas (à gauche) et passe-haut (à droite) pour les ondelettes db12 et db3	25

Figures (II .16)	Bandes des fréquences pour les filtres FMQ a plusieurs niveaux.	25
Figures (II .17)	Représentation de l'ondelette de Daubechies 4	27
Figures (II .18)	Représentation des filtres de décomposition de l'ondelette de Daubechies 4 (a) filtre passe-bas, (b) filtre passe-haut	27
<u>Chapitre III</u>		
Figures (III .1)	: Conductivité 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 20 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée pour 20 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.	30
Figures (III .2)	Conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$	31
Figures (III .3)	Conductivité 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; pour $a = 105$.	32
Figures (III .4)	: Conductivité 1,2 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$	33
Figures (III .5)	Conductivité 10,1 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.	34
Figures (III .6)	: Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté HT à 27 kV_{eff} : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.	37
Figures (III .7)	Côté HT : (a) représentation de la déviation standard pour chaque détail, (b) Agrandissement pour le détail 10 (Illustration du fait que l'énergie du détail 10 pour la couche 20 cm est légèrement plus élevée que celle du détail 10 pour la couche 15 cm).	38
Figures (III .8)	Evolutions du détail D_{10} à 27 kV_{eff} pour la pollution du côté HT: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm	39
Figures (III .9)	Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté terre à 27 kV_{eff} : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.	40
Figures (III .10)	Représentation de la déviation standard pour chaque détail du courant de fuite pour la pollution du côté terre.	41
Figures (III .11)	Evolutions du détail D_{10} à 27 kV_{eff} pour la pollution du côté terre : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.	42
Figures (III .12)	Evolutions du détail D_8 pour la pollution du côté terre à 27 kV_{eff} : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.	42

Figures (III .13)	Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution de la couche centrale à $40kV_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.	43
Figures (III .14)	Forme d'onde du courant de fuite à $36 kV_{\text{eff}}$ pour une pollution de la couche centrale de largeur 25 cm.	44
Figures (III .15)	: Déviation standard pour chaque détail du courant de fuite : (a) pour les quatre couches centrales polluées, (b) pour la couche 25 cm à $36 kV_{\text{eff}}$	44
Figures (III .16)	: Evolutions du détail D_8 pour la pollution de la couche centrale à $40 kV_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d)couche 20 cm.	45
Figures (III .17)	: Evolutions du détail D_1 pour la pollution de la couche centrale kV_{eff} : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d)couche 20 cm.	40 45
Figures (III .18)	Couche centrale polluée de largeur 25 cm à $36 kV_{\text{eff}}$: (a) détail D_1 , (b)détail D_8	46

CWT	Continuous Wavelet Transform
DWT	Discrete Wavelet Transform
STD-MRT	Standard deviation - Multi Resolution Analysis
LF	Standard deviation - Multi Resolution Analysis
HF	High Fréquence
QMF	Quadrature Mirror Filtre

Introduction :

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique.

En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. La tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces. Ils peuvent même conduire au contournement des isolateurs dans certains cas critiques.

I.1. Isolateurs de haute tension :

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.

I.2. Types d'isolateurs :

Vu les différentes façons d'utilisations et les différentes conditions de fonctionnement des isolateurs, on en distingue des types différents des isolateurs. La différence entre ces types peut se faire soit par leur fonction (support ou traversée), soit par le matériau isolant utilisé pour la fabrication de ces isolateurs, soit encore par leur profil ou par leur mode de fixation.

I.2.1 Isolateurs rigides :

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (**Figure I.1**). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [5].

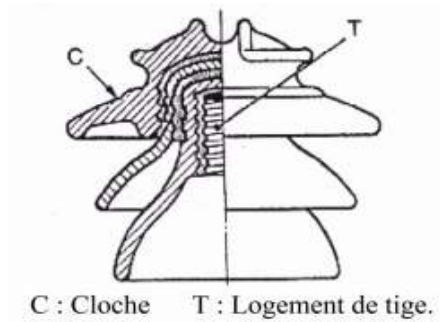


Figure I.1 : Isolateur rigide

I.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [5-7]. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

L'isolateur capot et tige.

L'isolateur long fut.

I.2.2.1 Isolateur long fut :

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons [7]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (**figure I.2**), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (**figure I.3**) [5,6].

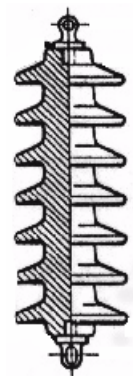


Figure I.2. Isolateur long fut



Figure I.3. Isolateur long fut

I.2.2.2. Isolateur capot et tige :

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment (**Figure I.4**) [6].

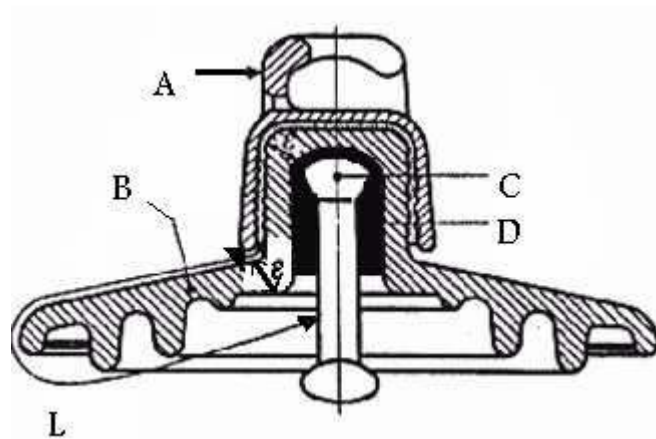


Figure I .4.Isolateur capot et tige

A: le capot.

B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).

D : le ciment de fixation.

C: la tige.

L : Plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

ε : Longueur du canal de perforation, $\varepsilon \ll L/2$.

On peut trouver plusieurs profils d'isolateurs capot et tige et ceci pour un meilleur fonctionnement.

I.2.2.2.1. Profil standard :

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne (**Figure I.5**) [5]



Figure I.5 : Isolateur capot et tige de profil standard.

I.2.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A):

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto lavage par l'action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire (**Figure I.6**) [5, 6].



Figure I.6 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A).

I.2.2.2.3. Profil anti-brouillard (forme B):

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières (**Figure I.7**).



Figure I.7 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B).

I.2.2.2.4. Profil plat :

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquent par la pluie (**figure I.8**).



Figure I.8 : un isolateur capot et tige de profil plat.

I.2.2.2.5. Profil sphérique :

La forme sphérique d'une longueur de fuite importante avec absence des rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace (**Figure I.9**).



Figure I.9 : Isolateur capot et tige de profil sphérique.

I.2.2.2.6. caractéristiques géométriques :

En effet, les caractéristiques géométriques (diamètre externe de la partie isolante, longueur de la ligne de fuite...) des isolateurs à capot et tige diffèrent selon leurs conditions de service (tension de service, sévérité de la pollution du site ...). Ci-dessous quelques caractéristiques géométriques selon la publication CEI 60305 (**Tab I.1**) [5].

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Diamètre extérieur (mm)	Pas Nominal (mm)	Longueur de la ligne de fuite (mm)
U 40	40	175	100 110	185
U 70	70	255	127 146	280
U 100	100	255 288 ⁽¹⁾	127 146 ⁽¹⁾	318 440 ⁽¹⁾
U 160	160	280 320 ⁽¹⁾	146 170 ⁽¹⁾	370 540 ⁽¹⁾
U 300	300	320	195	480
U 400	400	360 380	206 220	525 550
U 530	530	380 440	240 255	600 640

Tableau I.1 : Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305)

¹ Isolateurs utilisés dans des zones polluées.[5]

I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [5, 7].

I.3.1. Céramique :

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance... [5,6].

I.3.2. Verre :

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [5-7]. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

Le verre trempé :

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [5, 7].

Le verre recuit :

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension [5,6].

I.3.3. Matériaux synthétiques :

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (**Fig. I.10**) [5, 6, 7].

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (**Fig. I.11**) [6]. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) (**Fig. I.12**) [6].

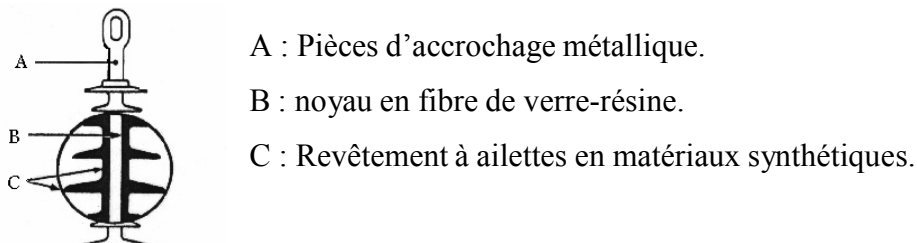


Figure I.10. isolateurs en matériaux synthétiques

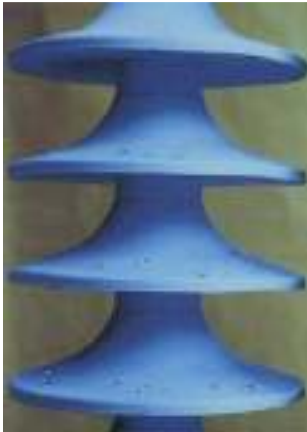


Figure I.11. isolateurs en matériaux synthétiques



Figure I.12. isolateurs en matériaux synthétiques

I.4. Pollution des isolateurs :

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs.

La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur [5,7].

I.5. Sources de pollution :

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

I.5.1. Pollution naturelle :

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants), de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [6].

I.5.1.1. Pollution marine :

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement [5,6].

I.5.1.2. Pollution désertique :

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [4,5].

I.5.2. Pollution industrielle :

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [7].

I.5.3. Pollution mixte :

Ce type de pollution est le plus dangereux, elle est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme les zones industrielles dans des régions côtières.

I.6. Mesure de la sévérité de la pollution des sites :

La sévérité de la pollution d'un site est généralement mesurée par différentes méthodes. Il y a la méthode de salinité équivalente qui consiste à mesurer la conductivité de la solution obtenue par la dissolution des agents polluants dans de l'eau distillée. Il y a aussi la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement. Les essais de laboratoire sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site [5,4]. La mesure de la sévérité de la pollution d'un site est importante lors du choix des isolateurs à installer dans ce site [4-6].

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyenne, forte et très forte (**Tab. I.2**) [5].

Faible 0.06 mg/cm ²	<p>Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage</p> <p>Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies.</p> <p>Régions agricoles.</p> <p>Régions montagneuses.</p>
Moyenne 0.20mg/cm ²	<p>Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipées d'installation de chauffage.</p> <p>Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.</p> <p>Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.</p>
Forte 0.60mg/cm ²	<p>Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes.</p> <p>Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement fort venant de la mer.</p>
Très forte > 0.60 mg/cm ²	<p>Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.</p> <p>Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.</p> <p>Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.</p>

Tableau I.2 : Classement de degré de pollution selon CEI 815

I.7. Comportement des isolateurs sous pollution :

Le comportement des isolateurs sous pollution est un facteur essentiel pour la conception et l'exploitation des lignes en zones polluées. Il convient donc de connaître les différents phénomènes de conduction sous pollution.

Lors de la mise en place d'une chaîne d'isolateurs, la longueur de la ligne de fuite de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point est très inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. La conductivité superficielle créée par la couche de

pollution, modifie la répartition du potentiel de la ligne de fuite, selon les contraintes auxquelles est soumis. Trois cas peuvent se présenter :

Arc non localisé : l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution).

Arc fixe : l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et de la surface propre d'isolateur est en série avec l'arc, elle limite ainsi le courant de l'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Généralement ce type d'arcs entraîne par effet thermique une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

Contournement électrique : le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.

dépôt d'une couche de matériaux solides (conductrice ou isolante). humidification de ces dépôts.

existence d'une tension appliquée.

Le contournement des isolateurs pollués est accompli selon les phases suivantes:

Phase 1: un courant de fuite s'écoule à travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant, il provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite courant.

Phase 2: l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante. Phase

3: la tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer, élargissant ainsi la zone sèche.

Phase 4 : à partir de ce stade, l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes est provoqué ainsi le contournement. L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué: tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite...

I.8. Conclusion :

Avant toute réalisation de n'importe quel ouvrage de haute tension, une étude de détermination du degré de pollution du site concerné doit être nécessairement faite, afin de permettre le bon dimensionnement et le bon choix de l'isolation à utiliser. En effet, la détermination du degré de pollution par, entre autres, la méthode de la salinité équivalente du

site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce site, est recommandée pour les sites à pollution forte ou même très forte.

Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont proposées. Nous citons par exemple le lavage manuel périodique des isolateurs lors de la diminution des précipitations pluviales, l'allongement de la ligne de fuite totale de la chaîne d'isolateurs en augmentant le nombre de ces derniers ...

Parmi les préoccupations des exploitants de production et de transport de l'énergie électrique, il y a la fiabilité et la continuité de service durant toute l'année. Pour cela, il faut minimiser au maximum les coupures d'électricité. Une partie importante de ces coupures est due aux incidents survenus sur les lignes des réseaux de transport d'électricité en haute tension (220 kV et 60 kV). Nous citons par exemple :

La rupture d'un câble d'un pylône.

La foudre.

Un arrêt brusque de la production dans une centrale électrique.

Les perturbations climatiques.

Les contournements des isolateurs des lignes de transport de haute tension.

Parmi les principales causes qui mènent au contournement des isolateurs des lignes de haute tension, la pollution des surfaces de ces derniers. On sait bien que la rigidité diélectrique des isolateurs est élevée si leurs surfaces sont propres et sèches, et que cette rigidité diminue si la surface est polluée. L'humidification de ces dépôts polluants engendre, dès la mise sous tension, la naissance d'un faible courant de fuite [1-2]. Ce dernier circule le long des zones de résistivités différentes et modifie la répartition du potentiel entre les électrodes. La décharge électrique peut s'amorcer, si le champ électrique local atteint un certain seuil [3]. Sous certaines conditions, cette décharge peut s'allonger sur la surface de l'isolateur menant au court-circuit de l'électrode haute tension et la masse; c'est le phénomène de contournement, dont les conséquences vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé [3-4].

Le premier chapitre présente des généralités traitant des isolateurs de haute tension, leurs caractéristiques, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication. Ce premier chapitre traite aussi du phénomène de la pollution en générale et ses conséquences néfastes sur le comportement des isolateurs.

Le deuxième chapitre présente de manière succincte l'environnement du traitement du signal par la transformée en ondelettes. Nous insistons sur le concept d'énergie qui va nous permettre d'évaluer son importance dans le courant de fuite pendant la décharge électrique. Cela pourrait être une explication du phénomène d'évaporation de la solution conductrice pendant la décharge. Par la suite, nous introduisons la théorie des ondelettes discrètes et continues dans lesquelles nous décrivons les principales idées se rapportant à l'analyse multi-résolution ainsi qu'à la représentation temps-échelle, qui peuvent faire l'objet

d'une surveillance de l'état de surface des isolateurs.

Dans le troisième chapitre, nous mettons en application l'analyse par la technique des ondelettes. Pour la pollution uniforme, la transformée en ondelette continue (CWT) appliquée sur le signal de la tension pour un éventuel diagnostic de l'état de surface. Pour la pollution non-uniforme, la transformée en ondelette discrète (DWT) est utilisée pour estimer l'augmentation de la largeur de la couche polluée via la représentation STD-MRA plot

II-1-Historique:

En 1807, Joseph Fourier a développé une méthode pour la décomposition et la représentation d'un signal dans le domaine fréquentiel qui est basée sur les fonctions trigonométriques ; il était à l'origine du développement de la théorie des ondelettes grâce à ses travaux accomplis en mathématique.

Le mot **ondelette** a été employé pour la première fois par Alfred Haar en 1909 dans sa thèse pour l'obtention du PhD. En 1930, Paul Levy a performé l'étude des ondelettes en introduisant le concept de variation d'échelle en utilisant la fonction de Haar qui a démontré sa supériorité face l'analyse de Fourier.

Les méthodes de décomposition et de reconstruction d'un signal par les transformées en ondelettes ont été introduites par *Jean Morlet* et *Alex Grossman* en 1981. Stéphane Mallat et Yves Meyer ont développé l'analyse multi-résolution en 1986 qui a permis à plusieurs scientifiques et chercheurs de construire leur propres familles d'ondelettes.

En 1998, Ingrid Daubechies a utilisé l'analyse multi-résolution pour la construction de sa propre famille d'ondelettes qui, actuellement connaît de nombreuses applications dans le domaine du traitement du signal.[9]

II-2-Intérêt du diagnostic par les ondelettes_:

Pour des signaux de nature non-stationnaire, la transformée de Fourier semble inapte à fournir une représentation fréquentielle locale satisfaisante à cause du compromis temps-fréquence (Figure II.1) imposé par le principe d'incertitude de Heisenberg. L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, qui sont souvent de hautes fréquences[10]

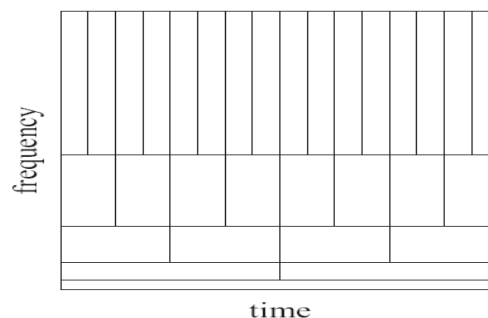


Figure II.1: Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide.

On constate d'après la représentation temps-fréquence que les composantes de faibles fréquences (en bas) ont une longue évolution temporelle alors que celles de hautes fréquences apparaissent pendant un très court instant ; cela signifie que la résolution fréquentielle d'un signal de grande durée est meilleure pour les faibles fréquences. Par contre, si la durée du signal est relativement courte, la résolution fréquentielle sera affectée, ce qui constitue un compromis **temps-fréquence**.

Le traitement du signal par les ondelettes permet d'élargir les intervalles de temps lorsque l'on recherche plus de précision sur les composantes de basses fréquences ; elle permet également de rétrécir les zones pour l'extraction d'informations sur les hautes fréquences ; cela démontre la capacité des ondelettes à garder une bonne résolution temporelle et fréquentielle. L'analyse par la méthode des ondelettes nous permet aussi de partitionner l'énergie du signal en différentes bandes de fréquences pour séparer toutes ses composantes.

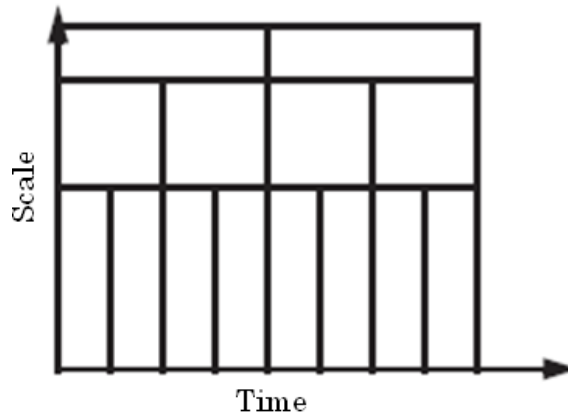


Figure II.2: Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes.

II-3-Transformée en ondelette continue (CWT):

La transformée en ondelette continue (CWT) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle en gardant le même nombre d'oscillations. Fondamentalement, la transformée en ondelette se calcule de la même manière que la transformée de Fourier fenêtrée, autrement dit on regarde la corrélation au sens du produit scalaire sur $L^2(\mathbf{R})$ entre le signal à analyser et la famille de fonction $[\Psi_{a,b}(t), a \in \mathbf{R}_+^*, b \in \mathbf{R}]$.

II-3-1-Définitions:**II-3-1-1-Concepts mathématiques pour les ondelettes :**

Une ondelette est une onde qui oscille à fréquence constante et qui s'annule au bout d'un instant donné. En comparant avec la transformée de Fourier, la fonction analysante pour la transformée en ondelette peut être choisie en toute liberté contrairement à la TF qui se restreint uniquement aux fonctions sinusoïdales. [11,12]

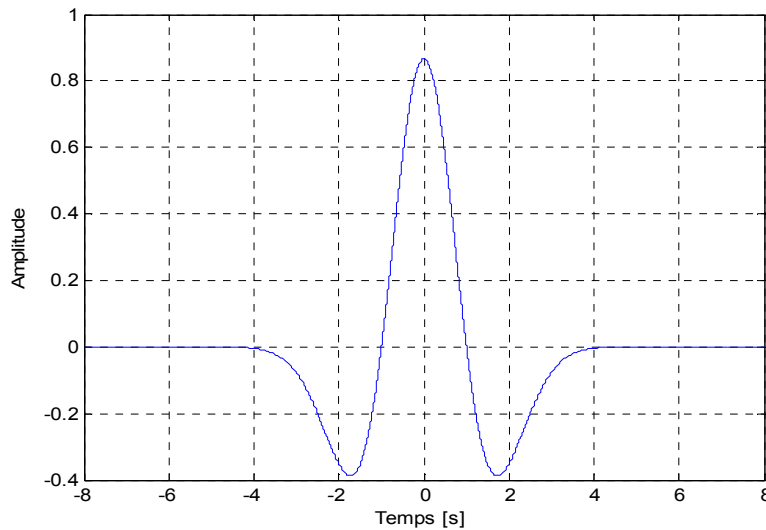


Figure II.3 : Exemple de l'ondelette chapeau mexicain.

Les ondelettes ont une expression de la forme :

$$\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (\text{II.1})$$

Ψ représente l'ondelette mère et les paramètres u et s désignent respectivement l'échelle et la translation de l'ondelette. La normalisation par le facteur $\frac{1}{\sqrt{s}}$ engendre la conservation d'énergie de l'ondelette mère durant son oscillation temporelle.

Les ondelettes sont des fonctions qui remplissent les conditions suivantes :

- Une ondelette doit être à énergie finie :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (\text{II.2})$$

- Dans le cas où $\psi(f)$ est la transformée de Fourier de l'ondelette $\psi(t)$
- on obtient :

$$C_{\psi} = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(f)|^2}{f} df < \infty \quad (\text{II.3})$$

Cette condition signifie que la moyenne de l'ondelette doit être $\psi(t)$ égale à zéro et que le spectre fréquentiel doit s'annuler pour garantir une convergence de l'intégrale en zéro, en d'autres termes :

$$\Psi(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.4})$$

La transformée en ondelette continue de la fonction f pour l'échelle s et la position u , est calculée en associant la fréquence f_0 à une ondelette telle que :

$$W f(u,s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \quad (\text{II.5})$$

La formule de **Fourier-Parseval** appliquée à l'équation (II.27) nous donne :

$$W f(u,s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*_{u,s}(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega) \psi_{u,s}(\omega) d\omega \quad (\text{II.6})$$

Les coefficients d'ondelette $W f(u, s)$ dépendent ainsi des valeurs de $f(t)$ et $f^{\wedge}(\omega)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\Psi_{u,s}(t)$ et $\Psi^{\wedge}_{u,s}(t)$ est concentrée. Ainsi, des signaux variables dans le temps sont détectés à partir des coefficients et de l'échelle des coefficients.

La formule de Fourier-Parseval nous donne une interprétation plus physique des coefficients de $W f(u, s)$ qui peuvent être perçus comme la série temporelle d'un banc de filtres qui se déduit d'un filtre unique par le changement d'échelle. Cela confère à la CWT la propriété de travailler à une échelle logarithmique vu que la largeur de bande relative $\Delta f/f$ est invariante dans le temps. Cette propriété coïncide avec ce que perçoivent l'oreille et l'œil humains qui eux aussi travaillent à la même échelle.

II-3-1-2-Ondelette de Morlet

Pour notre analyse temps-échelle, nous utilisons l'ondelette de Morlet qui avec son enveloppe de forme gaussienne, minimise le produit des résolutions temporelle et fréquentielle, et permet par conséquent d'optimiser le résultats [13]. L'échelle s est déterminée par la fréquence centrale f_c qui correspond à la fréquence d'oscillation de l'ondelette.

L'ondelette de Morlet complexe translatée par u et dilatée par s a pour expression mathématique :

$$\Psi_{a,b(t)} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} e^{-\pi \left(\frac{t-u}{s} \right)^2} * e^{-10 * j * \pi * \left(\frac{t-u}{s} \right)} \quad (\text{II.7})$$

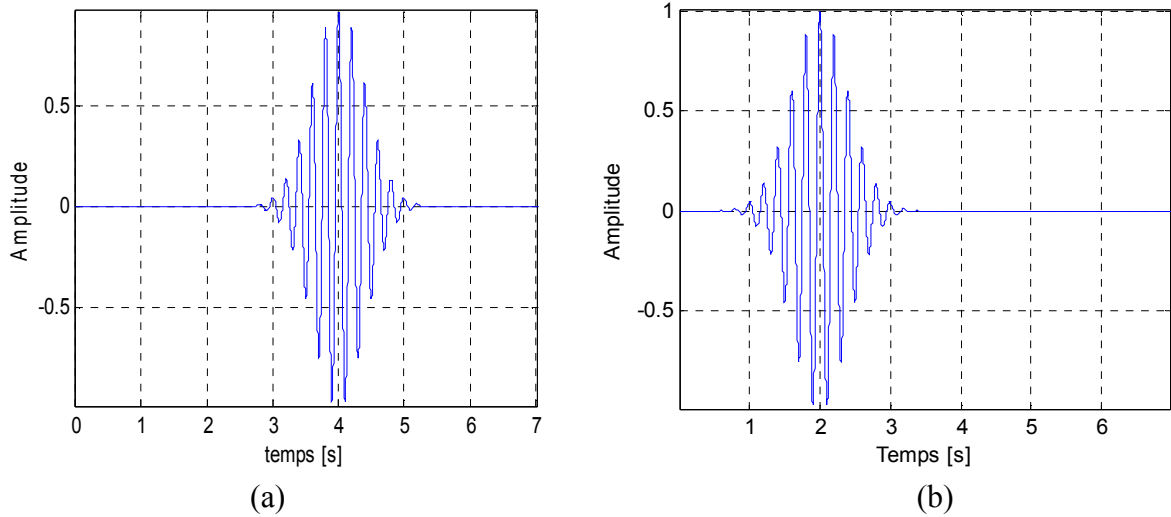


Figure II.4: Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour $s=1$: (a) $u=4$, (b) $u=2$.

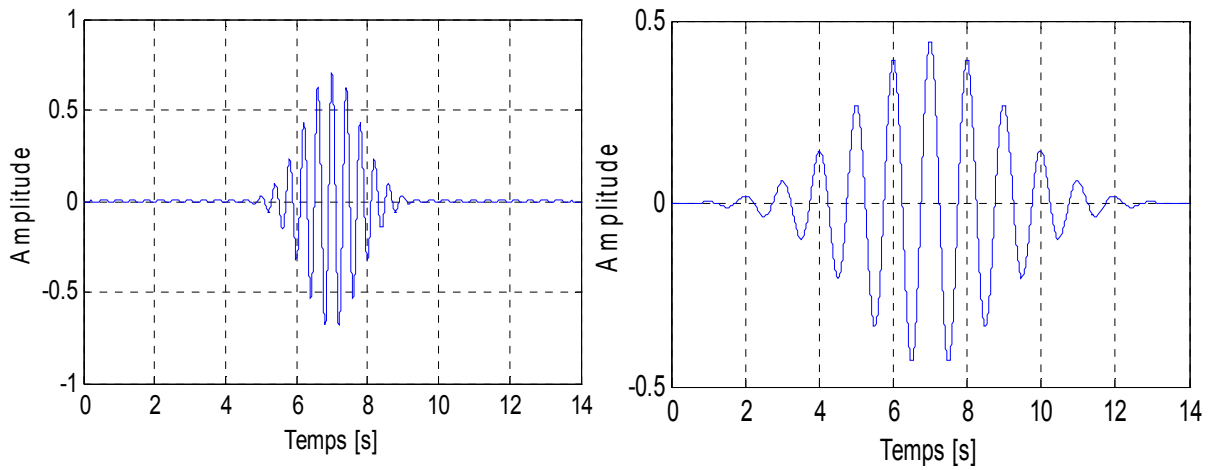


Figure II.5 : Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

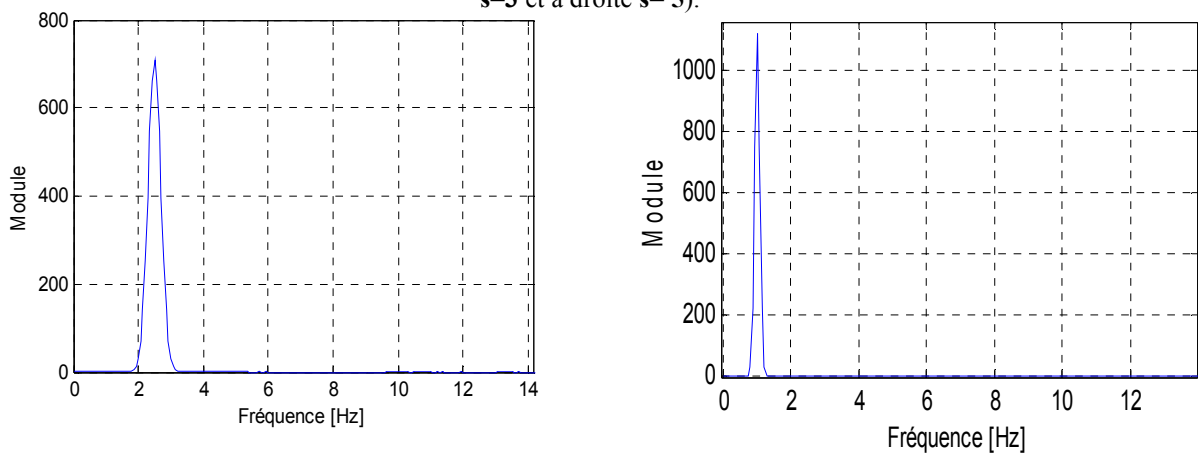


Figure II.6 : Représentation fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $u=7$ (à gauche $s=3$ et à droite $s=5$).

II-3-1-3-Scalogramme :

Le scalogramme d'un signal est défini par :

$$P_{Wf}(u,\xi) = |Wf(u,s)|^2 = |Wf(u,\frac{\eta}{\xi})|^2 \tag{II.8}$$

La normalisation de celui-ci revient à multiplier l'expression par un facteur égal à ϵ/η . η est le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire qui a une énergie concentrée dans un intervalle positif centré en η/s dont la taille est donnée par $1/s$. Dans le domaine temps-fréquence de l'analyse par les ondelettes, un atome d'ondelette est représenté par le rectangle de Heisenberg de largeur temporelle $s \cdot \sigma_t$ et de largeur fréquentielle $1/s \cdot \sigma_w$; σ_t et σ_w correspondent aux dimensions du rectangle de Heisenberg pour l'ondelette mère ; ces dernières restent constantes pour toute la transformée car $S_{rect} = \sigma_w \cdot \sigma_t$ [14].

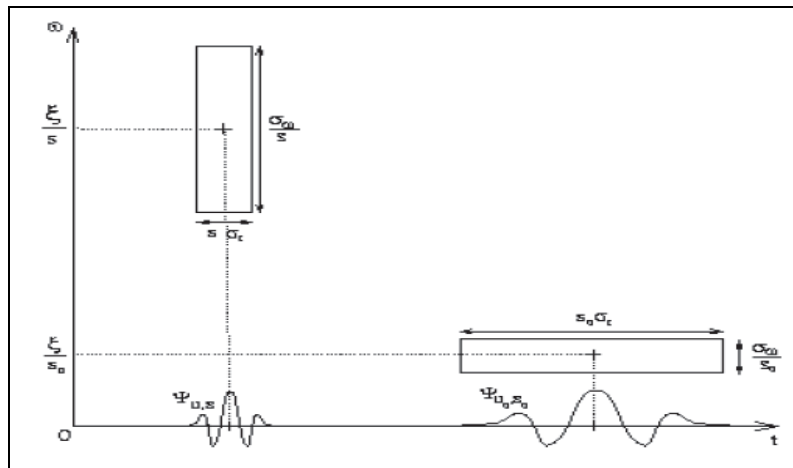


Figure II.7 : Atome de la Wavelet Transforme

II-4-Calcul des coefficients de la CWT

La procédure de calcul des coefficients s'effectue en multipliant le signal par l'ondelette analysante puis en calculant l'intégrale du produit. Ce processus est accompli en quatre étapes :

- Dès le départ, on compare l'ondelette à une portion du signal.
- On calcul le coefficient **W** qui étudie le degré de similitude entre la portion du signal et l'ondelette analysante ; celles-ci sont similaires lorsque la valeur numérique du coefficient **W** est élevée. Plus précisément, lorsque l'énergie du signal et celle de l'ondelette sont relativement proches, le coefficient **W** peut être interprété comme un facteur de corrélation. [15]

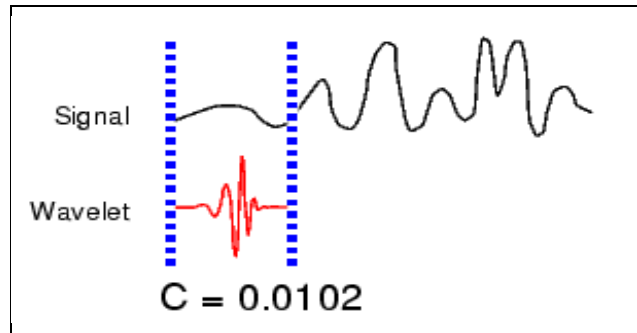


Figure II.8 : Comparaison de l'ondelette à une portion du signal.

- On translate l'ondelette vers la droite jusqu'au balayage total du signal.

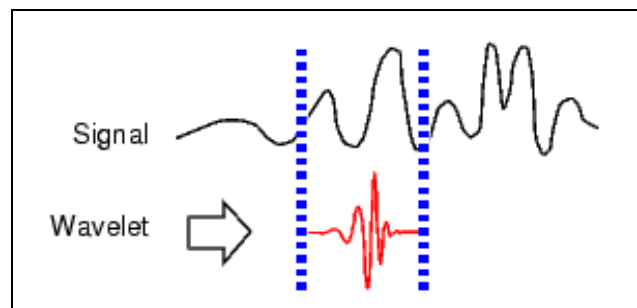


Figure II.9 : Balayage du signal par l'ondelette.

On passe ensuite à une échelle plus élevée qui induit une dilatation temporelle de l'ondelette analysante. Cela a pour effet d'augmenter la portion de comparaison.

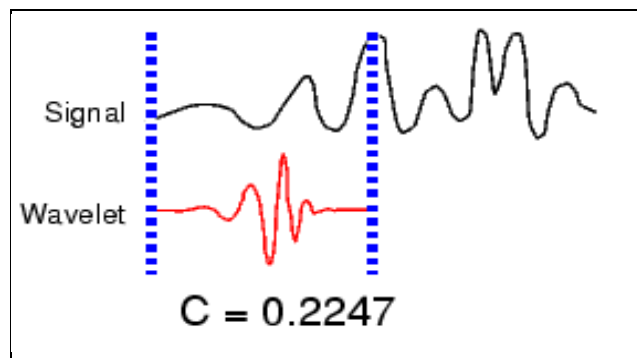


Figure II.10: Dilatation de l'ondelette et balayage du signal.

Cette opération est répétée pour chaque échelle jusqu'au calcul des coefficients pour toutes les échelles et pour différentes portions du signal. Les coefficients constituent le résultat d'une régression effectuée sur le signal original. Cette technique d'analyse nous permet d'avoir une représentation temps-échelle du signal original qui procure une vision différente par rapport à la représentation temps-fréquence de Fourier, mais qui lui est complémentaire. En effet, une

petite échelle correspond à une variation temporelle rapide de l'ondelette qui se traduit par une haute fréquence ; par contre une grande échelle correspond à une variation lente de l'ondelette qui se traduit par une basse fréquence.

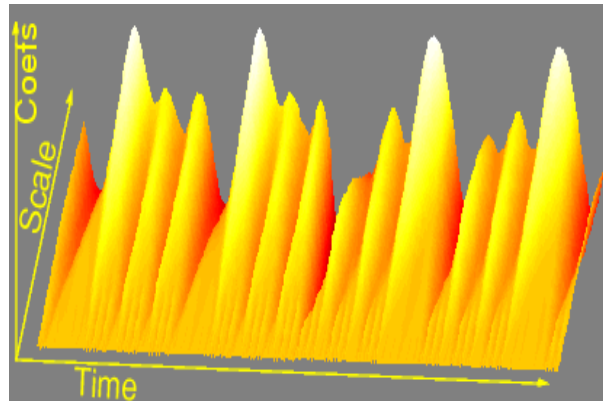


Figure II.11 : Représentation des coefficients obtenus après calcul régressif.

La relation entre l'échelle s et la fréquence f est donnée par :

$$f = \frac{f_c}{s * \Delta t} \quad (\text{II.9})$$

Δt : est la période d'échantillonnage du signal.

f_c : est la fréquence centrale de l'ondelette mère.

s : est l'échelle.

f : est la fréquence instantanée.

II-5-Transformée en ondelette discrète (DWT)[16] :

II-5-1-Expression mathématique

La transformée en ondelette discrète a pour expression mathématique :

$$\text{DWT}_{\psi} f(m,k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (\text{II.10})$$

Ψ est l'ondelette mère dilatée par le paramètre a_0^m et translatée via le paramètre $nb_0 a_0^m$. a_0 et b_0 sont des valeurs fixées tel que $a_0 > 1$ et $b_0 > 0$; m et n sont des entiers naturels[17].

II-5-2-Algorithmme de décomposition pyramidale :

La structure pyramidale constitue une propriété intéressante à exploiter pour la transformée en ondelette discrète qui est plus connue sous le nom de **chaîne de filtre logarithmique** ; celle-ci est composée d'une paire de filtres, l'un étant passe-bas et l'autre passe-haut. Lorsqu'un signal est décomposé avec la DWT, il passe obligatoirement par ces deux filtres

LF et **HF** en subissant un algorithme de sous échantillonnage ; ceci induit une séparation des composantes de basses fréquences appelées **approximations** et des composantes de hautes fréquences appelées **détails**. L'approximation est à son tour décomposée lors de son passage par la paire de filtres LF et HF. La reconstruction du signal s'effectue grâce à l'algorithme de sur-échantillonnage nommé **transformée en ondelette inverse** (IDWT).

Comme montré dans la figure II.18, le résultat de la DWT est constitué de plusieurs détails et d'une approximation pour un niveau de décomposition donné. Ils sont représentés par C_{aN}, C_{dN}, C_{dN-1} jusqu'à C_{d1} .

N est le niveau de décomposition final.

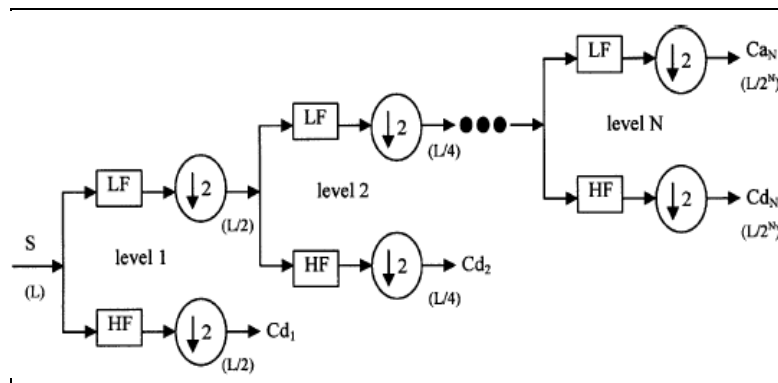


Figure II.12 : Chaîne de décomposition de la DWT incluant le filtrage et le sous-échantillonnage.

La procédure de décomposition impose un découpage systématique du signal original à chaque passage par la paire de filtres, laissant ainsi le signal sortant avec une longueur de $1/2, 1/4, 1/8, \dots, 1/N$ de celle du signal original pour les niveaux de décomposition $1, 2, 3, \dots, N$.

En fait, le sous-échantillonnage est une opération qui élimine les données impaires du signal et génère un vecteur avec une dimension qui est la moitié de celle du signal. Autrement dit, sous échantillonner un signal par un facteur de 2 est équivalent à réduire de moitié la fréquence d'échantillonnage. Par conséquent, Les fréquences correspondantes aux niveaux $1, 2, 3, \dots, N$ sont $1/2 * F_s, 1/4 * F_s, 1/6 * F_s, 1/8 * F_s, \dots, 1/(2)^N * F_s$. F_s représente la fréquence d'échantillonnage du signal original.

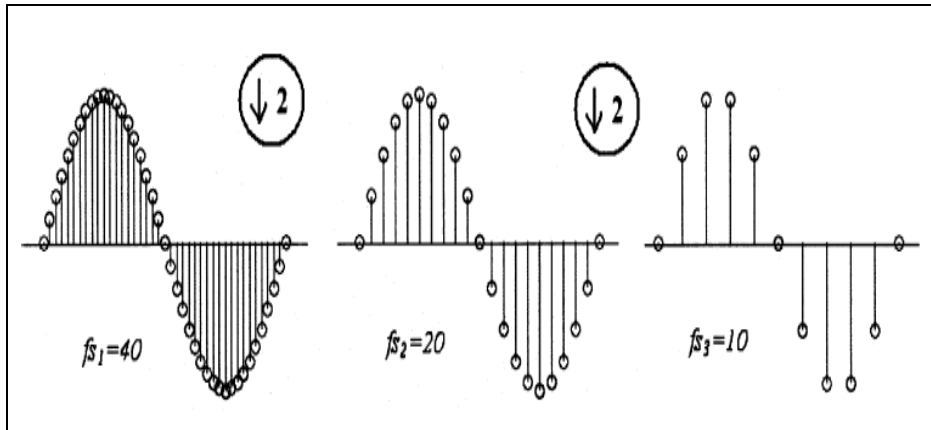


Figure II.13 : Effet du sous-échantillonnage.

II-5-3-Décomposition en bandes de fréquences :

Comme il a été décrit précédemment, effectuer une DWT sur un signal est équivalent à un filtrage par une paire de filtres : un passe-bas $H(Z)$ et l'autre passe-haut $G(Z)$. Les filtres $H(Z)$ et $G(Z)$ sont appelés filtres miroirs en quadrature (QMF) à cause de leurs réponses en fréquence qui présente un point d'intersection de $\pi/2$ tel qu'illustré sur la figure II.20.

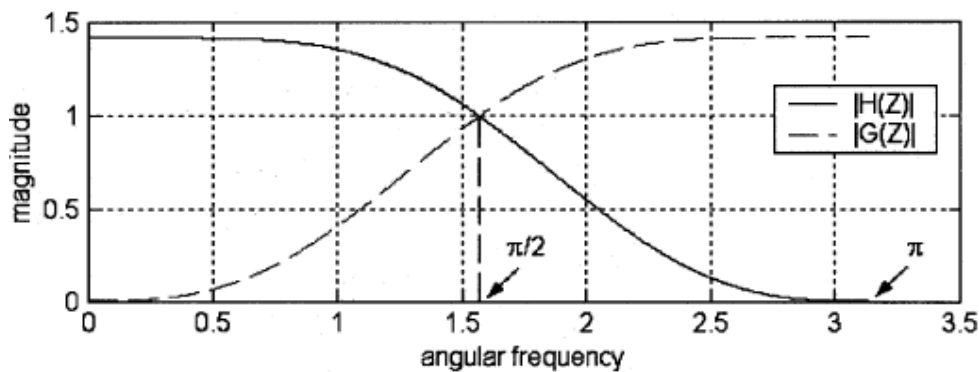


Figure II.14 : Réponse en fréquence des filtres miroirs en quadrature.

L'allure des FMQ est déterminée d'après l'ondelette mère qui leur est associée. Prenons par exemple le cas des deux ondelettes de Daubechies 3 et 12, on constate que l'allure du filtre passe-bas de l'ondelette **db12** est régulière à partir de $\omega = 0$ puis devient tombante pour $\omega = \pi/2$ comparativement à l'ondelette **db3** qui se comporte différemment. Le filtre passe-haut est régulier pour $\omega = \pi$ et montant à partir de $\omega = \pi/2$ pour les deux ondelettes.

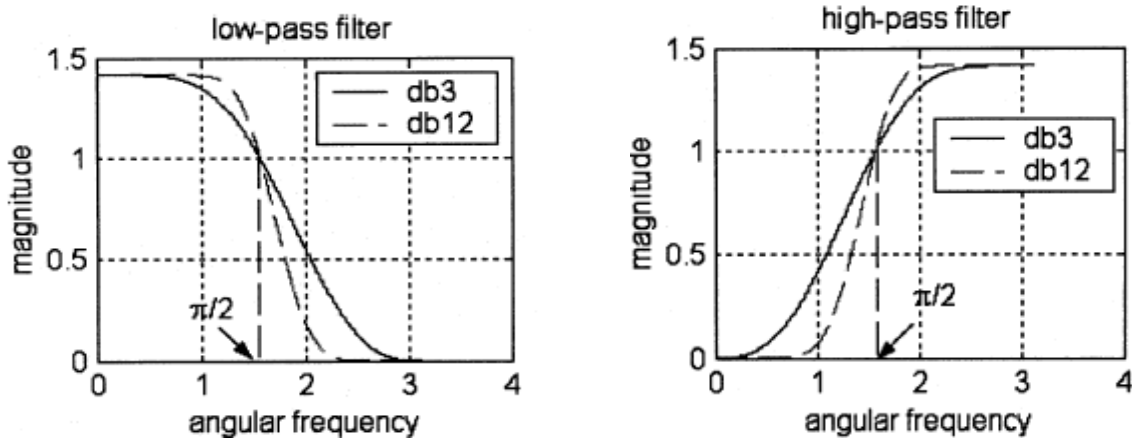


Figure II.15 : Réponse fréquentielle des filtres passe-bas (à gauche) et passe-haut (à droite) pour les ondelettes db12 et db3.

D'après la figure ci-dessus, la fréquence angulaire maximale qui correspond à la moitié de la fréquence d'échantillonnage est π . Pour une fréquence d'échantillonnage donnée, la fréquence angulaire peut être convertie en Hertz. Par exemple, si la fréquence d'échantillonnage est $F_s=10$ kHz, la plus grande fréquence dans la figure 1 correspondant à π est $F_s/2 = 5$ kHz et la fréquence de coupure correspond à $F_s/4= 2.5$ kHz. Pour le second niveau de décomposition, la fréquence de coupure devient égale à $F_s/8 = 1250$ Hz. Pour les niveaux de décomposition suivants, la fréquence de coupure est divisée par deux à chaque fois.

Si maintenant on considère que le recouvrement n'a pas lieu, la décomposition en ondelettes d'un signal peut être interprétée comme une décomposition par bandes de fréquences séparées l'une de l'autre. Ceci signifie que la bande des fréquences du filtre passe-haut (*détails*) pour un niveau M est comprise entre $(1/2^{M+1}) * F_s$ et $(1/2^M) * F_s$ alors que pour un filtre passe-bas (*approximations*), la bande des fréquences est comprise entre 0 et $(1/2^{N+1}) * F_s$ avec $1 < M < N$, N étant le niveau de décomposition maximal.

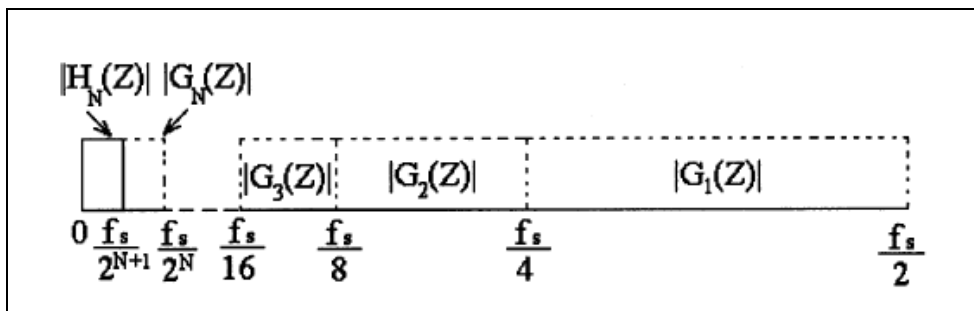


Figure II.16 : Bandes des fréquences pour les filtres FMQ à plusieurs niveaux.

II-5-4- Niveau maximal de décomposition:

Avant de décomposer un signal en approximations et détails, il y a lieu de considérer un niveau maximal pour lequel on récupérera toutes les informations fréquentielles et temporelles contenues dans celui-ci.

Pour la DWT, le nombre maximal pour lequel un signal est décomposé est obtenu par la relation :

$$J_{\text{ful}} = \text{fix}(\log_2(N)) \quad (\text{II.11})$$

N est la longueur du signal échantillonné et la fonction **fix** donne le nombre entier le plus proche de la valeur obtenue après calcul du logarithme à base 2 de N .

Cependant, lorsque la Wavelet Toolbox est employée sous MATLAB® pour le traitement du signal, la taille de celui-ci notée N ne doit pas être inférieure à celle du filtre de l'ondelette considérée notée N_ω . A ce moment, le nombre de décomposition maximal du signal considéré est donné par :

$$J_{\text{max}} = \text{fix}(\log_2(N/N_\omega - 1)) \quad (\text{II.12})$$

La décomposition d'un signal au delà de J_{max} est sans intérêt et constitue une perte de temps.

II-5-5-Choix de l'ondelette analysante :

Le choix de l'ondelette analysante joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions de décharges électriques observées sur le courant de fuite pour un état de pollution d'isolateurs sous des conditions humides. Il est cependant connu que les ondelettes **db4** et **db6** sont plus appropriées pour la détection des perturbations de courtes durées alors que les ondelettes **db8** et **db10** sont adéquates pour l'étude des perturbations de relatives longues durées [18].

Dans notre travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de Daubechies 4 pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'en identifier les transitions pour la pollution non-uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [19,20].

L'ondelette mère complexe de Daubechies a comme expression mathématique :

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * (e^{j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}}) \quad (\text{II.13})$$

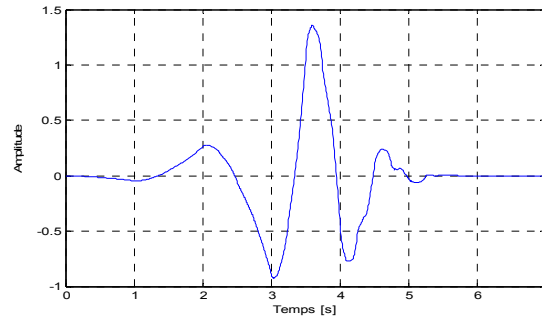


Figure II.17 : Représentation de l'ondelette de Daubechies 4.

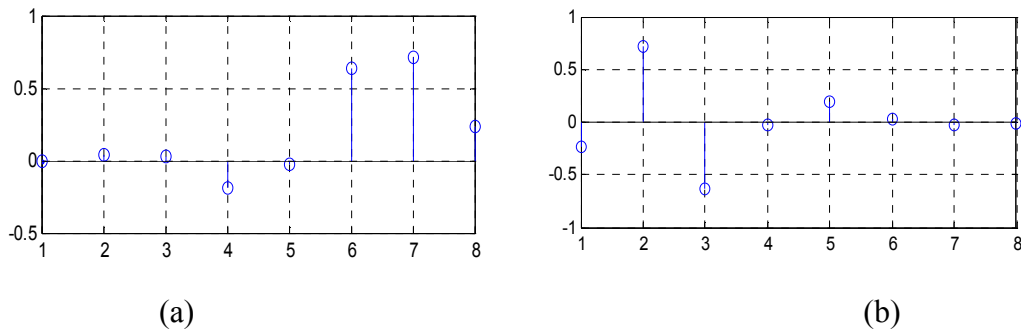


Figure II.18 : Représentation des filtres de décomposition de l'ondelette de Daubechies 4 : (a) filtre passe-bas, (b) filtre passe-haut.

II-6-Conclusion :

Dans cette partie concernant les ondelettes, nous avons présenté de manière succincte la transformée en ondelette continue (CWT) et la transformée en ondelette discrète (DWT) à cause des propriétés dont chacune d'elle dispose pour le traitement local des signaux ; celui-ci a pour objectif la détection des points de discontinuité en utilisant la CWT ainsi que les différentes perturbations de hautes fréquences par la DWT.

L'ondelette de Morlet est intéressante pour le traitement des signaux par la CWT car elle procure une bonne résolution temporelle et fréquentielle pour le calcul des coefficients de la transformée en ondelette. Ces derniers nous renseignent sur le "degré" de corrélation qui existe entre le signal original et l'ondelette analysante à partir de leurs valeurs numériques pour des échelles données.

Le scalogramme d'un signal constitue un formidable outil pour la représentation des coefficients d'un signal dans le domaine temps-échelle et permet une meilleure étude du contenu fréquentiel du signal pour une possible interprétation du phénomène observé.

L'ondelette de Daubechies 4 est choisie pour appliquer la DWT sur le signal du courant de fuite qui affiche des pics de hautes fréquences à partir d'un certain niveau de tension. Cette

ondelette semble adéquate pour la détermination des bandes fréquentielles qui caractérisent les perturbations de hautes fréquences via l'analyse multi-résolution. A cet effet, la détermination du niveau de décomposition est importante pour récupérer de bonnes informations sans trop de calculs.

III-1-Introduction

Dans ce chapitre, l'utilisation de la technique des ondelettes a pour objectif de caractériser l'état de surface du modèle. Nous exploitons en premier lieu le signal de la tension appliquée pour la conductivité uniforme sur le surface d'un isolateur de haut tension en utilisant la CWT qui étudie la nature fractale de cette onde pour chaque conductivité. En deuxième lieu et pour la conductivité non-uniforme, le signal du courant de fuite est décomposé par la DWT pour comprendre le comportement des composantes fréquentielles avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée. Cette étude est réalisée à partir des différentes formes d'ondes du courant de fuite pour les trois cas de pollution non-uniforme.

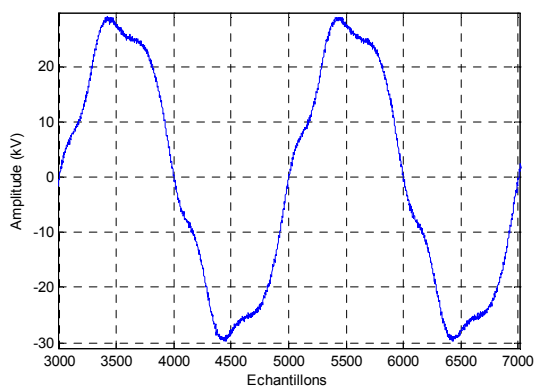
III-2-Pollution uniforme :

Pour ce cas, un problème majeur se pose qui est de différencier une onde de tension déformée par les harmoniques du réseau d'une autre, qui subirait des distorsions par les décharges parallèles. Pour cela, la comparaison est faite par rapport à une onde de tension parfaitement sinusoïdale et une autre déformée par les harmoniques (Voir annexe C).

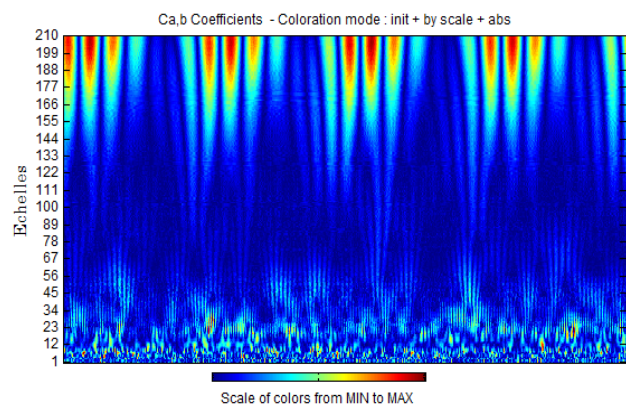
Le traitement des signaux de la tension appliquée est effectué grâce au logiciel MATLAB® qui calcule les coefficients de la CWT et la fréquence correspondante à chaque échelle

III-2-1-Conductivité 10 $\mu\text{S/cm}$:

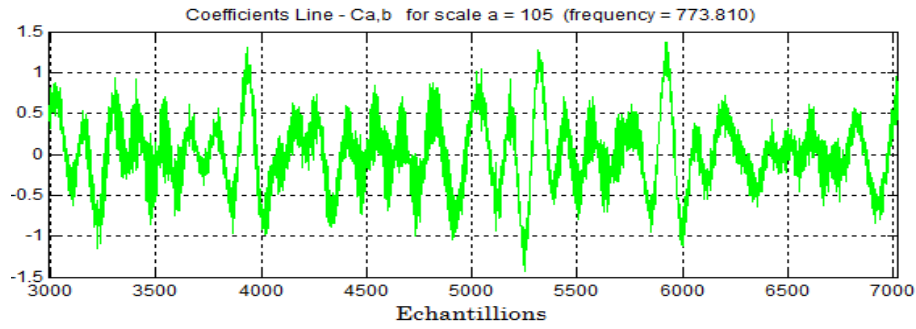
Tension appliquée 20 kV_{eff}



(a)



(b)



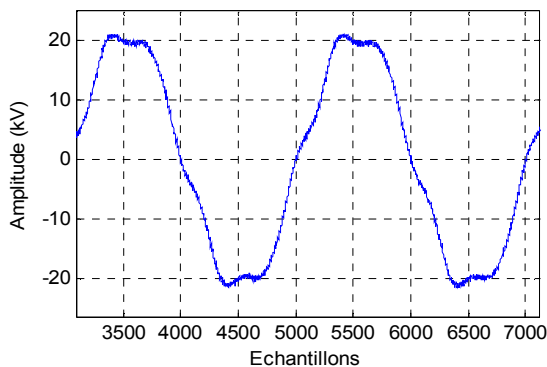
(c)

Figure III.1 : Conductivité 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 20 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée pour 20 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.

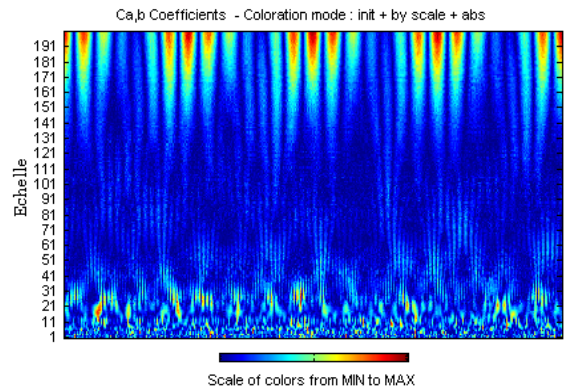
Pour cette conductivité, nous remarquons que le signal de la tension affiche de multiples distorsions au niveau de la crête et au voisinage de l’axe des temps. Son scalogramme montre que les coefficients ont une valeur maximale (couleur rouge intense) pour de grandes échelles (de 177 à 210) pour les déformations observées sur la crête du signal (signe de faibles chutes de tension). Cela signifie que ces perturbations oscillent à des fréquences très faibles indiquant que l’activité des décharges parallèles à la surface est moindre. Les coefficients de la CWT pour l’échelle $a = 105$ montre que la corrélation entre l’oscillation de l’ondelette de Morlet et celle de la transformée en ondelette de la tension est quasi inexistante vue la faible activité des décharges. Le choix de cette échelle nous permet de bien différencier les conductivités volumiques et donc de caractériser la sévérité de pollution.

III-2-2-Conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$:

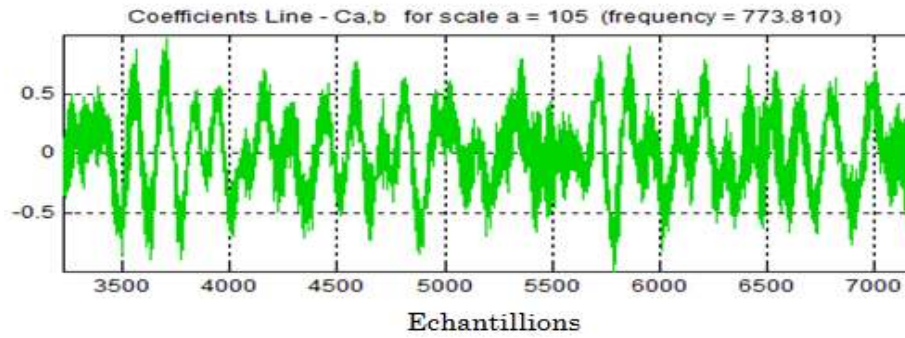
Tension appliquée 15 kV_{eff} :



(a)



(b)



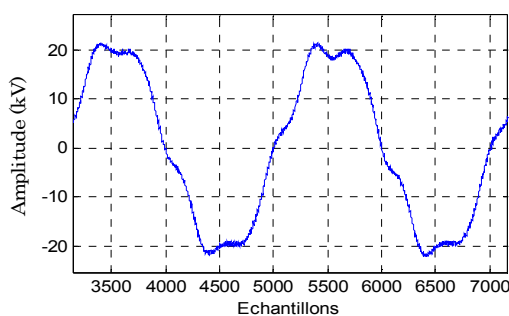
(c)

Figure II.2 : Conductivité 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.

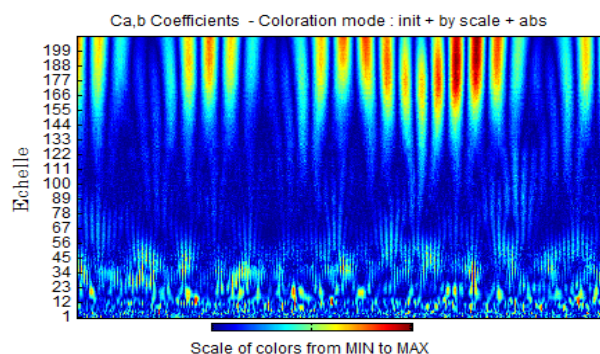
Pour ce cas, nous observons que l’onde de tension a une allure presque sinusoïdale avec des pics descendants sur la crête à cause d’un court-circuit partiel et brutal causé par les décharges électriques à la surface de l’isolateur. Le scalogramme correspondant à cette tension montre de manière similaire que les perturbations causées par ces décharges sont de faibles fréquences à cause de la forte corrélation entre la transformée en ondelette du signal de la tension et l’ondelette analysante pour les grandes échelles (couleur rouge intense). Toutefois ces perturbations sont un peu plus nombreuses puisqu’elles déforment la tension à des instants relativement rapprochés comparativement à la conductivité précédente. Les coefficients pour l’échelle 105 affichent toujours une faible corrélation qui indique que ces déformations sont de faibles amplitudes.

III-2-3-Conductivité 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$:

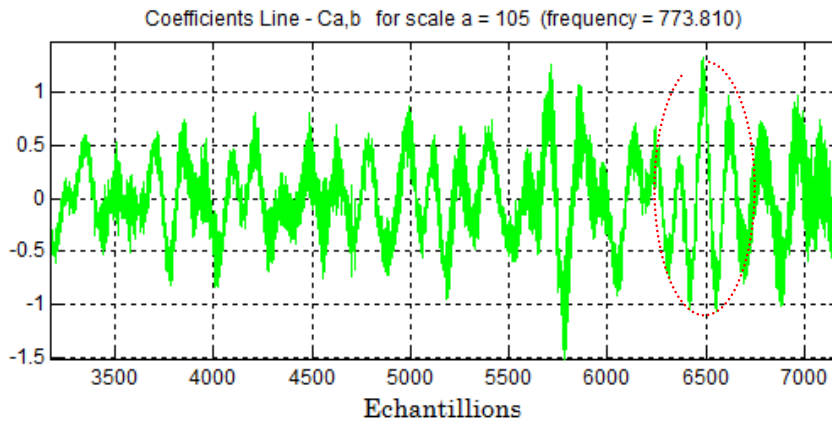
Tension appliquée 15 kV_{eff} :



(a)



(b)



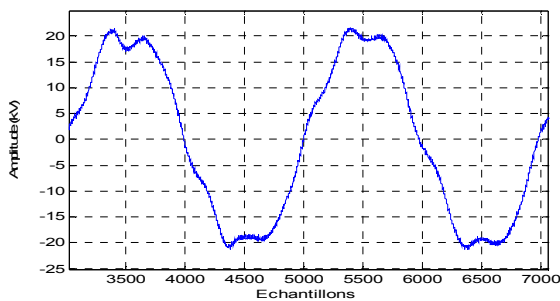
(c)

Figure III.3 : Conductivité 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$: (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff} ; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff} , (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour $a = 105$.

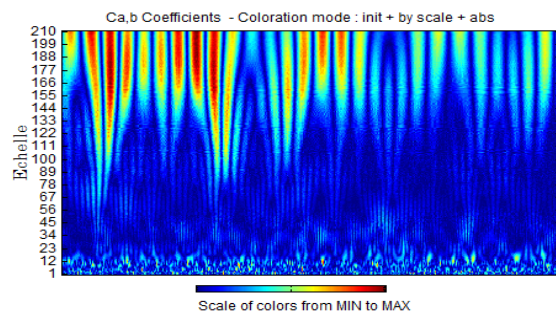
Pour cette conductivité, nous constatons que les perturbations sur l’onde de la tension appliquée s’intensifient avec des chutes de tension plus remarquables au niveau de la crête et au voisinage de l’axe des temps. Le scalogramme montre que les chutes de tension sont causées à des instants très rapprochés avec des coefficients très élevés pour des échelles encore plus faibles comparativement aux deux conductivités précédentes ; ce qui signifie que la fréquence de ‘cassure’ de l’onde de tension est encore plus élevée indiquant que les décharges parallèles deviennent de plus en plus nombreuses à la surface de l’isolateur. Nous pouvons également dire que l’assèchement du modèle plan est plus rapide vue l’augmentation de l’activité des décharges électriques. Les coefficients de la CWT pour l’échelle 105 montrent une légère corrélation entre l’ondelette et la transformée continue de la tension appliquée (zone encerclée en rouge) ; ils indiquent que les perturbations atteignent petit à petit les hautes fréquences.

III-2-4-Conductivité 1,2 mS/cm :

Tension appliquée 15 kV_{eff} :



(a)



(b)

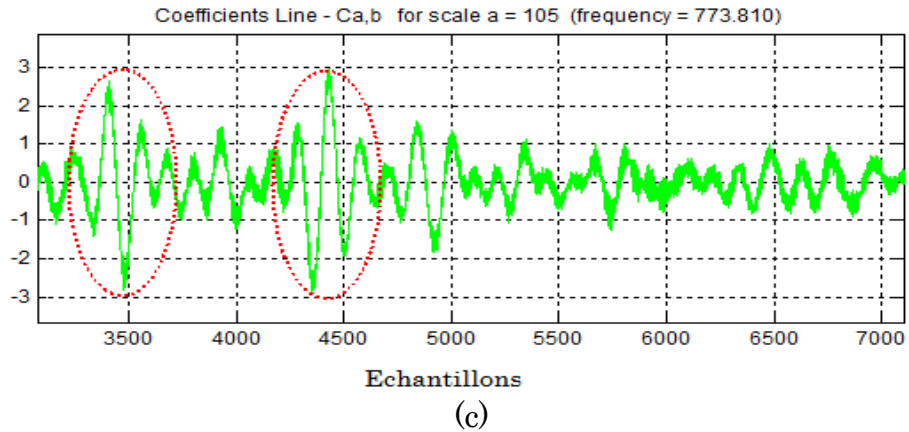
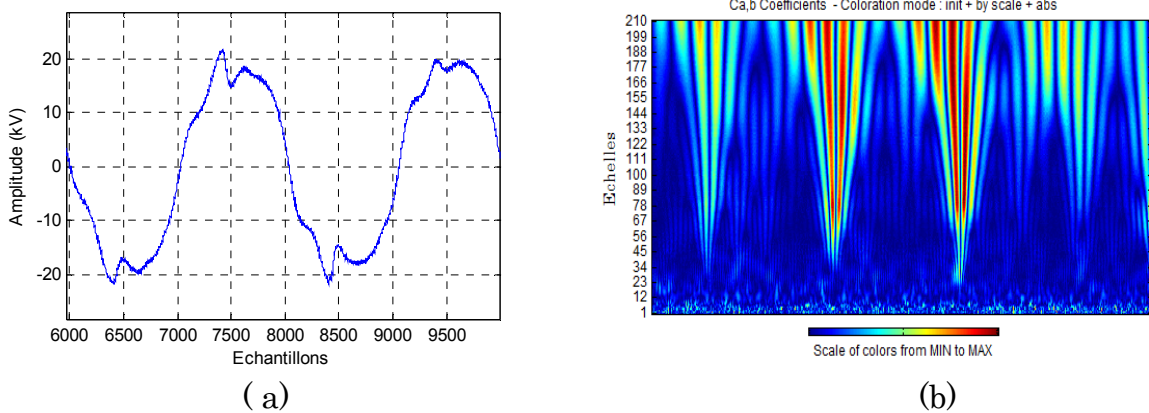


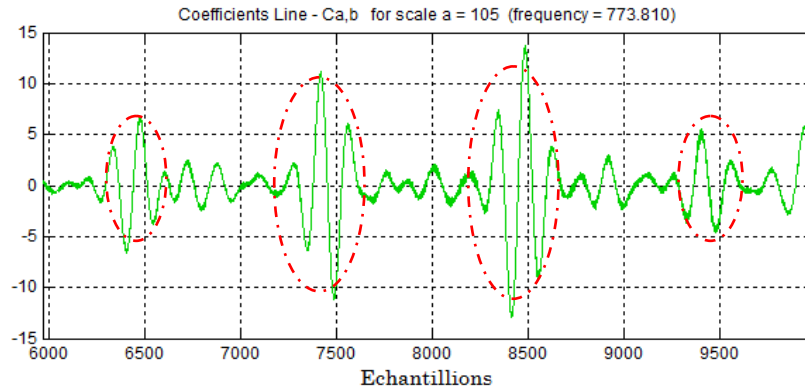
Figure III.4 : Conductivité 1,2 mS/cm : (a) Forme d’onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff}, (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour a = 105.

Pour cette conductivité élevée, les perturbations gagnent pratiquement toutes les régions du signal de la tension appliquée. Le scalogramme indique que les coefficients de la CWT sont très élevés pour des échelles encore plus faibles par rapport à la conductivité précédente ; c'est-à-dire que des perturbations de plus hautes fréquences apparaissent en plus de celles à faibles fréquences. Ceci peut expliquer l’assèchement encore plus rapide dû à la diminution de la résistance de la couche polluée en présence de solution hautement conductrice. Les coefficients de la CWT calculés pour l’échelle a =105 montrent une corrélation de plus en plus évidente entre l’ondelette de Morlet et la transformée continue de la tension appliquée.

III-2-5-Conductivité 10,1 mS/cm:

Tension appliquée 15 kV_{eff} :





(c)

Figure III.5 : Conductivité 10,1 mS/cm : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (b) Scalogramme de la tension appliquée à 15 kV_{eff}; (c) Exemple des Coefficients de la CWT pour a = 105.

Pour cette très haute conductivité, la cassure de l'onde de tension est très visible pour ce niveau de tension à cause de l'assèchement ultra rapide de la plaque qui intensifie les zones sèches à la surface de l'isolateur. Le champ électrique est très élevé dans ces espaces, ce qui a pour effet de court-circuiter les micro-capacités existantes et par conséquent une chute de tension encore plus importante. L'analyse par le scalogramme montre que l'activité des décharges électriques induit des déformations très sévères sur la tension appliquée qui va jusqu'aux très hautes fréquences (échelle 23). Les coefficients de la CWT calculés pour a = 105 montrent d'avantage de corrélation entre la transformée en ondelette de la tension et l'ondelette de Morlet avec une amplitude plus élevée, qui traduit la sévérité des chutes de tension observée sur le signal.

III-3-Conclusion sur l'analyse par la CWT :

D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire soit par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal, soit par l'intermédiaire des coefficients d'une échelle bien déterminée.

Concernant l'analyse par le scalogramme, l'augmentation de la conductivité de la couche polluée est détectée grâce aux décharges qui ont lieu à la surface de l'isolateur. Cette augmentation peut être observée par la couleur des coefficients qui spécifient leurs valeurs selon qu'elles soient faibles ou élevées. Un coefficient élevé pour une grande échelle indique une oscillation du signal à basse fréquence et inversement pour une échelle de plus petite valeur. Dans notre cas, la fréquence des perturbations occasionnées sur la tension augmente avec la sévérité de la conductivité du milieu. Cela montre que le diagnostic de l'état de surface de

l'isolateur est possible grâce à la tension appliquée mais pendant l'occurrence des décharges électriques et pour une pollution uniforme.

Ce diagnostic peut également être fait à travers une échelle bien déterminée (105 dans notre cas) qui nous renseigne sur la pollution du milieu grâce aux coefficients de cette même échelle. Lorsque la corrélation entre la CWT du signal et l'ondelette analysante est quasi inexistante avec une faible amplitude, la conductivité de la surface est faible (10 et 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette corrélation est autant plus apparente avec l'augmentation de la conductivité volumique qui fait augmenter l'amplitude des coefficients de la CWT ainsi que le nombre d'oscillations qui ressemblent beaucoup à celles de l'ondelette choisie (Morlet dans notre cas).

Enfin, le niveau de tension pris pour la conductivité 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ n'est pas le même que les autres conductivités, ce qui peut sembler à priori contradictoire. En réalité, une activité de décharges électriques qui a lieu pour des tensions élevées nous permet de classer la conductivité concernée comme étant la plus faible.

III-4-Pollution non-uniforme :

Pour les trois cas, le courant de fuite subit une décomposition par l'ondelette de Daubechies 4 jusqu'au niveau 10. Les bandes de fréquences correspondantes à chaque détail sont montrées au **tableau III.I**

Les valeurs de la déviation standard sont calculées pour les détails correspondants afin d'identifier les transitions d'énergie présentes dans le signal du courant de fuite pour chaque largeur de la couche polluée. La déviation standard peut être considérée comme une mesure de la quantité d'énergie présente dans un signal de moyenne nulle [20]. Elle est donnée par l'expression

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_n - m_n)^2}{N-1}}$$

d_n : correspond à un échantillon du détail d.

δ : est la déviation standard du signal d.

m_n : est la moyenne du signal.

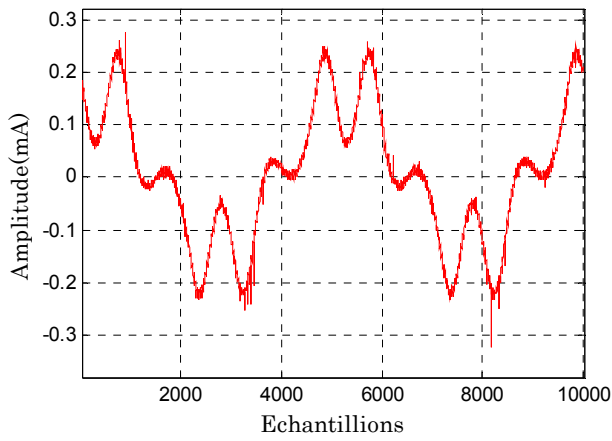
N : correspond à la taille du signal.

Détails de la décomposition par la DWT	Bande de fréquences (kHz)
D ₁	62,5 - 125
D ₂	31,25 - 62,25
D ₃	15,625 - 31,25
D ₄	7,8125 - 15,625
D ₅	3,90625 - 7,8125
D ₆	1,953125 - 3,90625
D ₇	0,765625 - 1,953125
D ₈	0,488281 - 0,765625
D ₉	0,244140 - 0,488281
D ₁₀	0,12207 - 0,244140

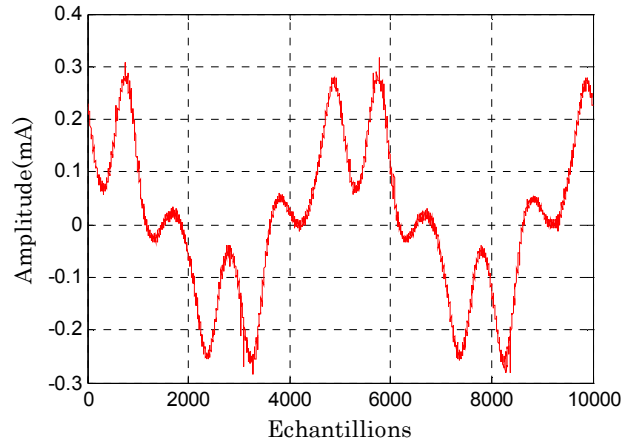
Tableau III.1 : Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.

III-4-1-Pollution côté HT :

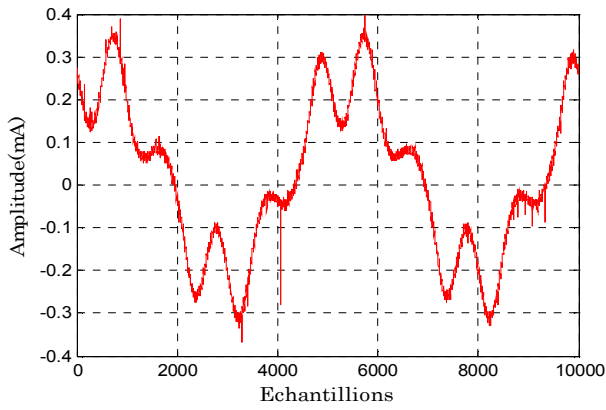
La figure III.6 montre les différentes formes d'onde obtenues pour les cinq largeurs de la couche conductrice à 27 kV_{eff}. Nous remarquons que la distorsion de ces signaux est très importante et due à l'amplification des harmoniques de tension par l'intermédiaire de la surface de l'isolateur partiellement polluée. Nous constatons également la présence de pics sur tout le signal du courant de fuite ; leur amplitude augmente avec l'élargissement de la couche polluée. Pour la couche 25 cm, les décharges électriques ont lieu à la surface de l'isolateur et elles déforment davantage la forme du courant de fuite et augmentent l'amplitude des pics. L'augmentation de l'amplitude de ces pics peut être interprétée par la diminution de la résistance de la couche polluée sur l'isolateur lorsque sa largeur croit, ce qui rend l'occurrence d'une décharge de contournement très probable



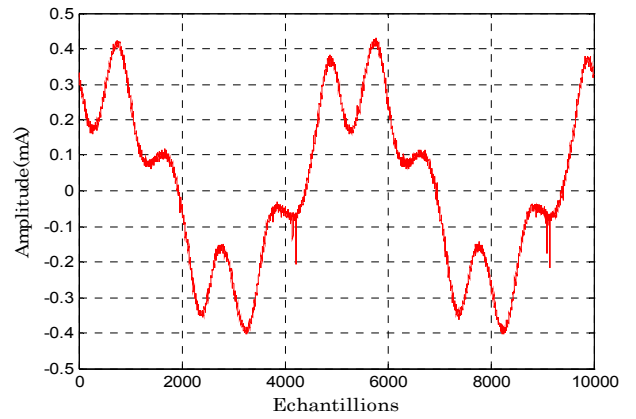
(a)



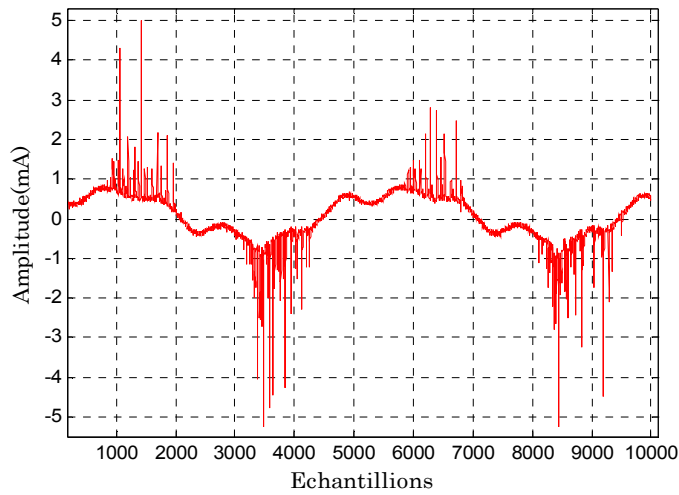
(b)



(c)



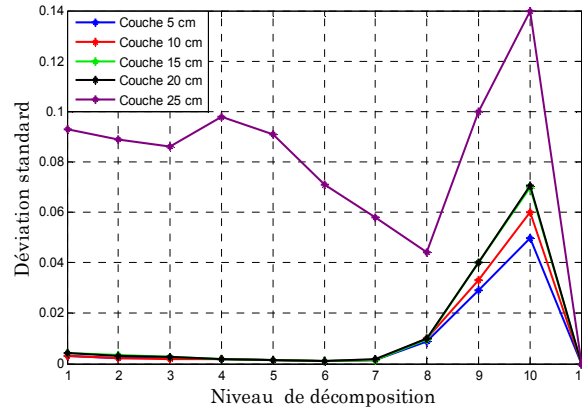
(b)



(e)

Figure III.6 : Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté HT à 27 kV_{eff}: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

La décomposition du courant de fuite par la DWT permet d'identifier les composantes fréquentielles qui peuvent servir au diagnostic de l'état de surface. **La figure III.7** représente la valeur de la déviation standard pour chaque détail correspondant. Autrement dit, cette représentation va permettre de cibler le détail intéressant pour le diagnostic. La déviation standard est calculée à l'aide du logiciel MATLAB®.



(a)

Figure III.7 : Côté HT :(a) représentation de la déviation standard pour chaque détail, (b) Agrandissement pour le détail 10

D'après la représentation précédente, nous remarquons que la composante D_{10} a une énergie qui augmente avec l'agrandissement de la couche conductrice. En réalité le détail D_{10} contient l'harmonique 3 qui a une très grande énergie pour la couche 25 cm à cause des décharges parallèles ayant lieu à la surface du plan. Cela confirme une fois de plus que ce phénomène est en relation avec l'harmonique 3 du courant de fuite. Ainsi, le détail D_{10} pourrait éventuellement servir au diagnostic de la pollution du modèle plan lorsque celle-ci débute du côté HT. Les variations du détail D_{10} pour chaque largeur de la couche polluée sont montrées à la **figure III.8**

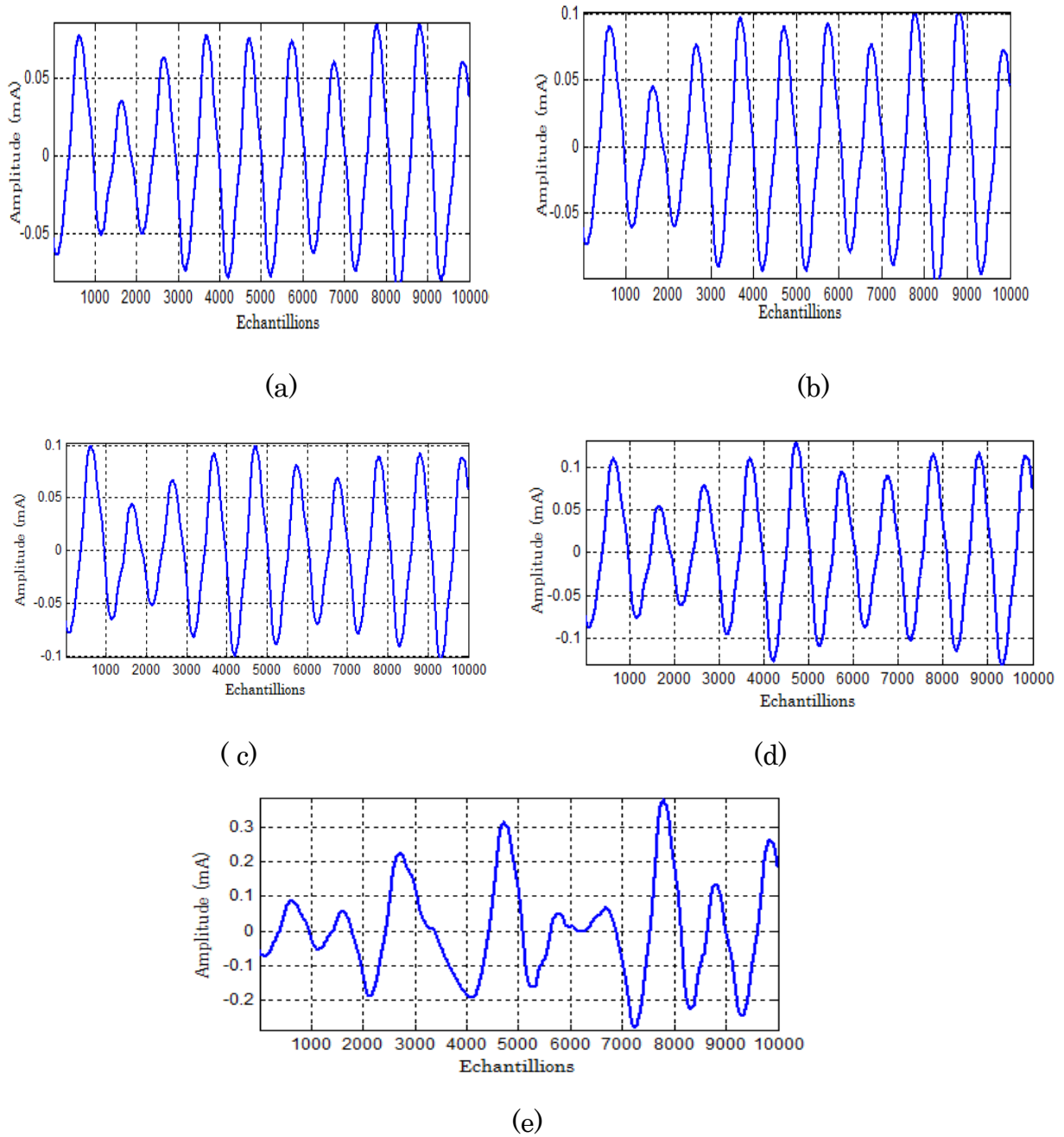


Figure III.8 : Evolutions du détail D_{10} à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$ pour la pollution du côté HT: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

III-4-2-Pollution du côté terre :

Pour cette configuration, les formes d’ondes du courant de fuite pour chaque largeur de la couche polluée sont pratiquement similaires à celles obtenues pour le côté HT. Toutefois, les pics présents sur les différents signaux ont une amplitude légèrement plus importante par rapport au côté HT. La **figure III.9** montre une forme d’onde typique lorsque les décharges ont lieu dans les intervalles d’air formés par les électrodes et la couche conductrice de largeur 25 cm.

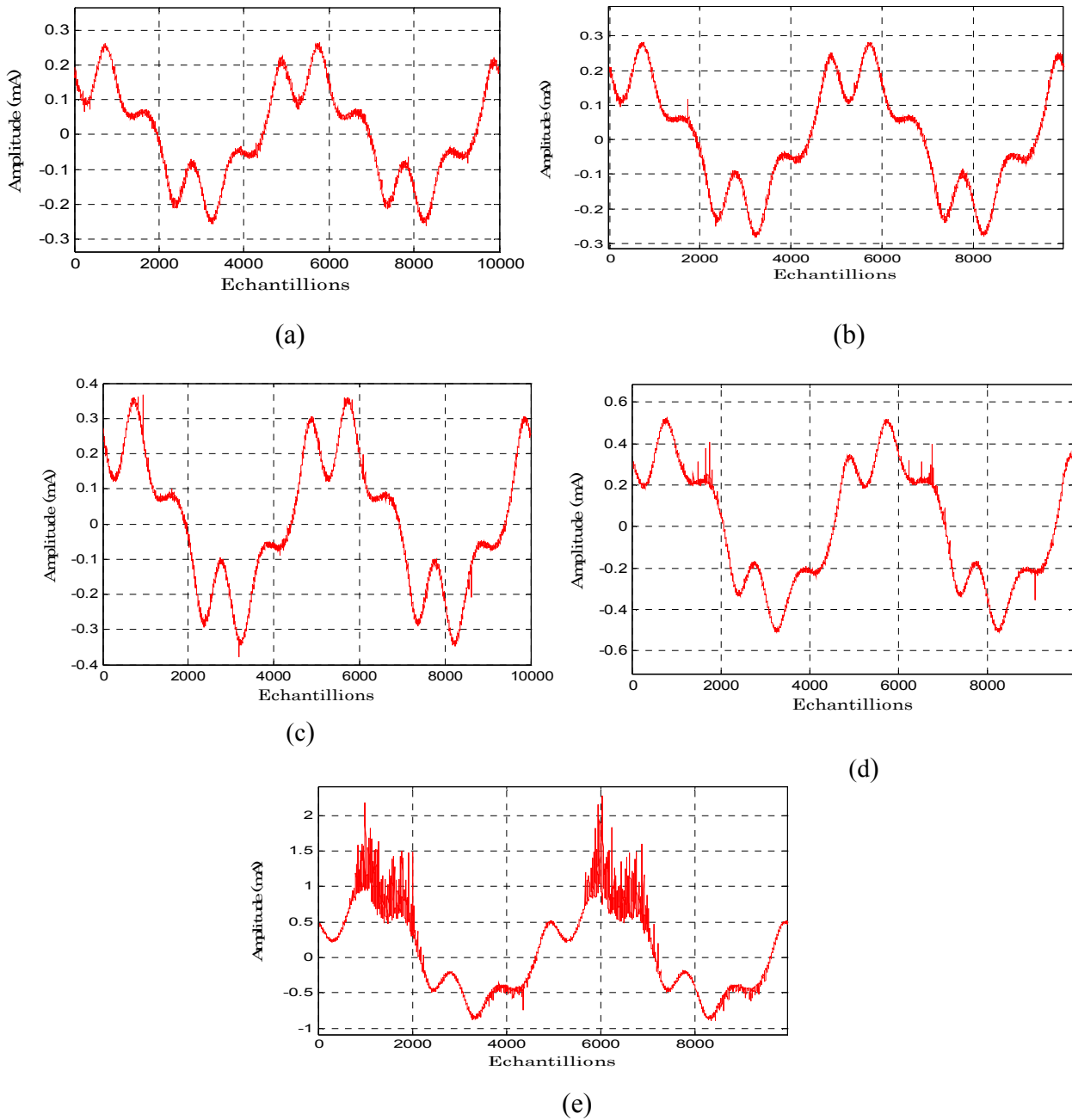
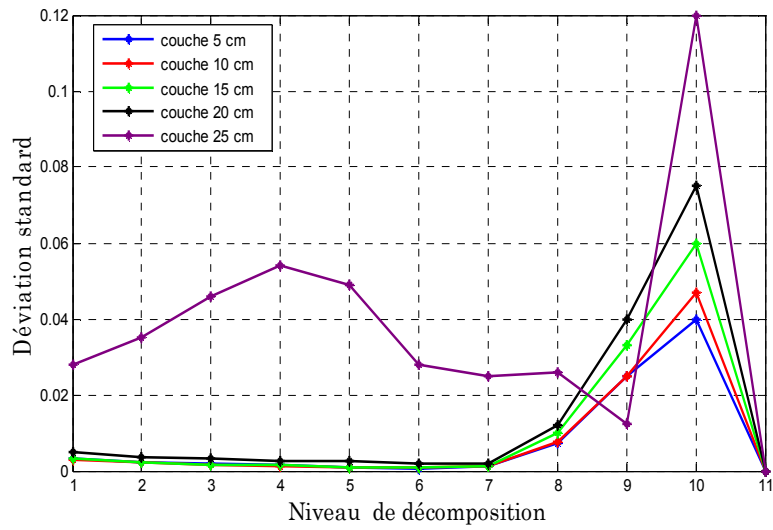


Figure III.9: Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution du côté terre à $27 \text{ kV}_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

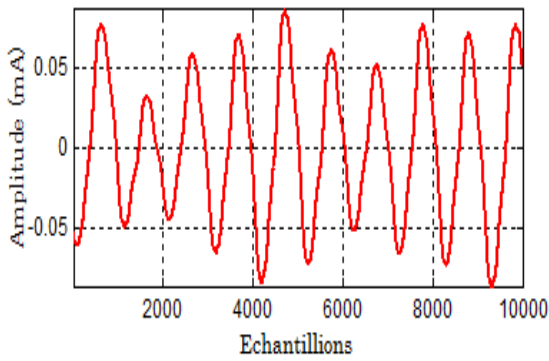
Pour cette configuration, la représentation de la déviation standard en fonction des détails du courant de fuite, permet de constater que les composantes D_{10} et D_8 sont susceptibles de caractériser l'augmentation de la largeur de la couche polluée. En effet, les détails D_{10} et D_8 ont une énergie qui augmente avec l'agrandissement de cette couche. Nous remarquons également pour la couche 25 cm que l'énergie de la composante D_{10} augmente de la même manière que le côté HT pour les mêmes raisons. Notons également que l'énergie de la composante D_9 baisse

au moment de la décharge électrique. Les variations des composantes D_8 et D_{10} sont montrées aux figures III.11 et III.12.

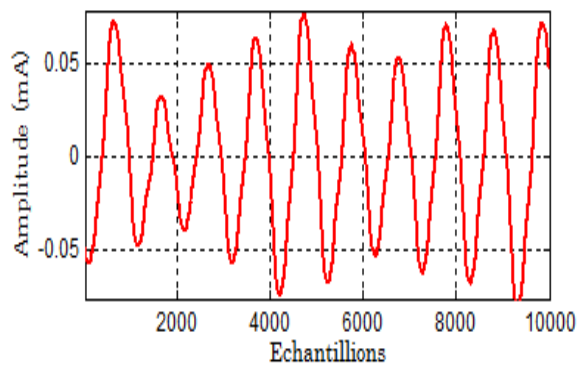


(e)

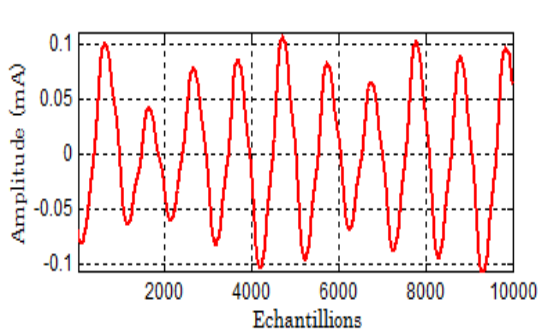
Figure III.10 : Représentation de la déviation standard pour chaque détail du courant de fuite pour la pollution du côté terre.



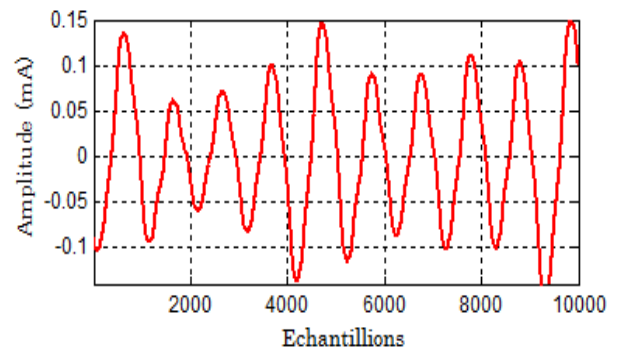
(a)



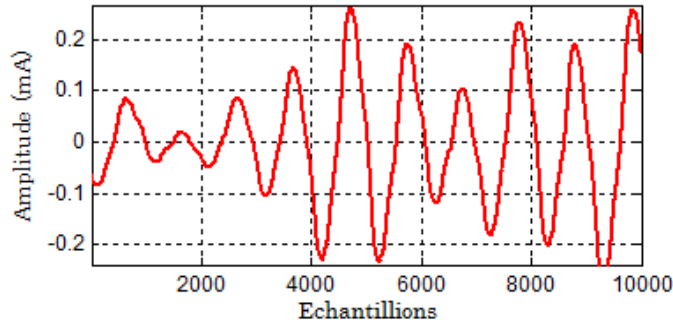
(b)



(c)

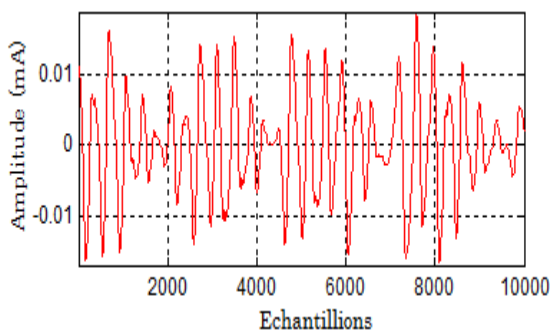


(d)

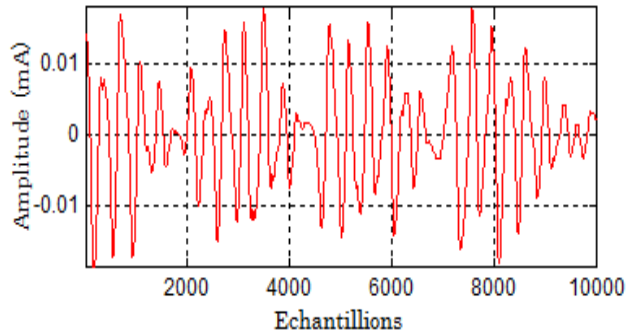


(e)

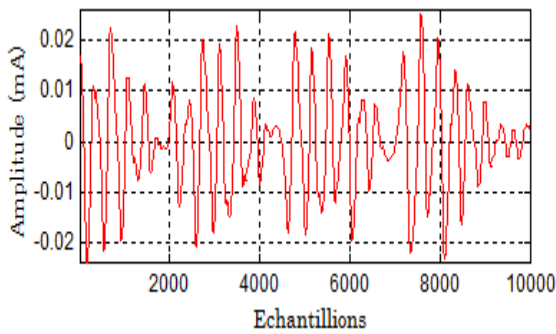
Figure III.11 : Evolutions du détail D_{10} à $27\text{ kV}_{\text{eff}}$ pour la pollution du côté terre : (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.



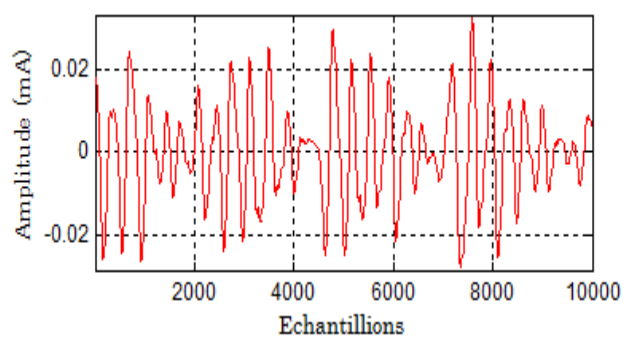
(a)



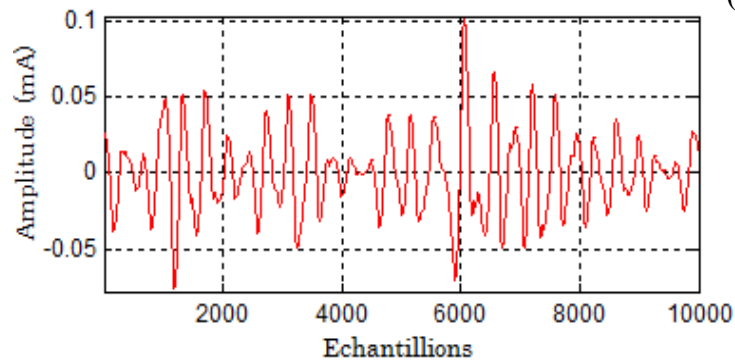
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.12 : Evolutions du détail D_8 pour la pollution du côté terre à $27\text{ kV}_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm, (e) couche 25 cm.

III-4-3-Pollution de la couche centrale :

Pour cette dernière configuration, l'amplitude du courant de fuite est la plus petite parmi les trois cas, ce qui confirme la bonne rigidité de l'isolateur pour une pollution de la couche centrale. Nous remarquons que le nombre de pics observés sur le courant de fuite augmente suivant la largeur de la couche polluée. Pendant les décharges électriques et pour un niveau de tension proche de celui du contournement (**Figure III.13**), le courant de fuite a une amplitude très élevée avec une distorsion remarquable et des pics de décharges au niveau de la crête. Les annulations du courant de fuite (**Figure III.14**) pendant un bref instant prouvent que la tension appliquée à ces instants est faible pour pouvoir amorcer une décharge électrique dans les intervalles d'air électrode-couche polluée

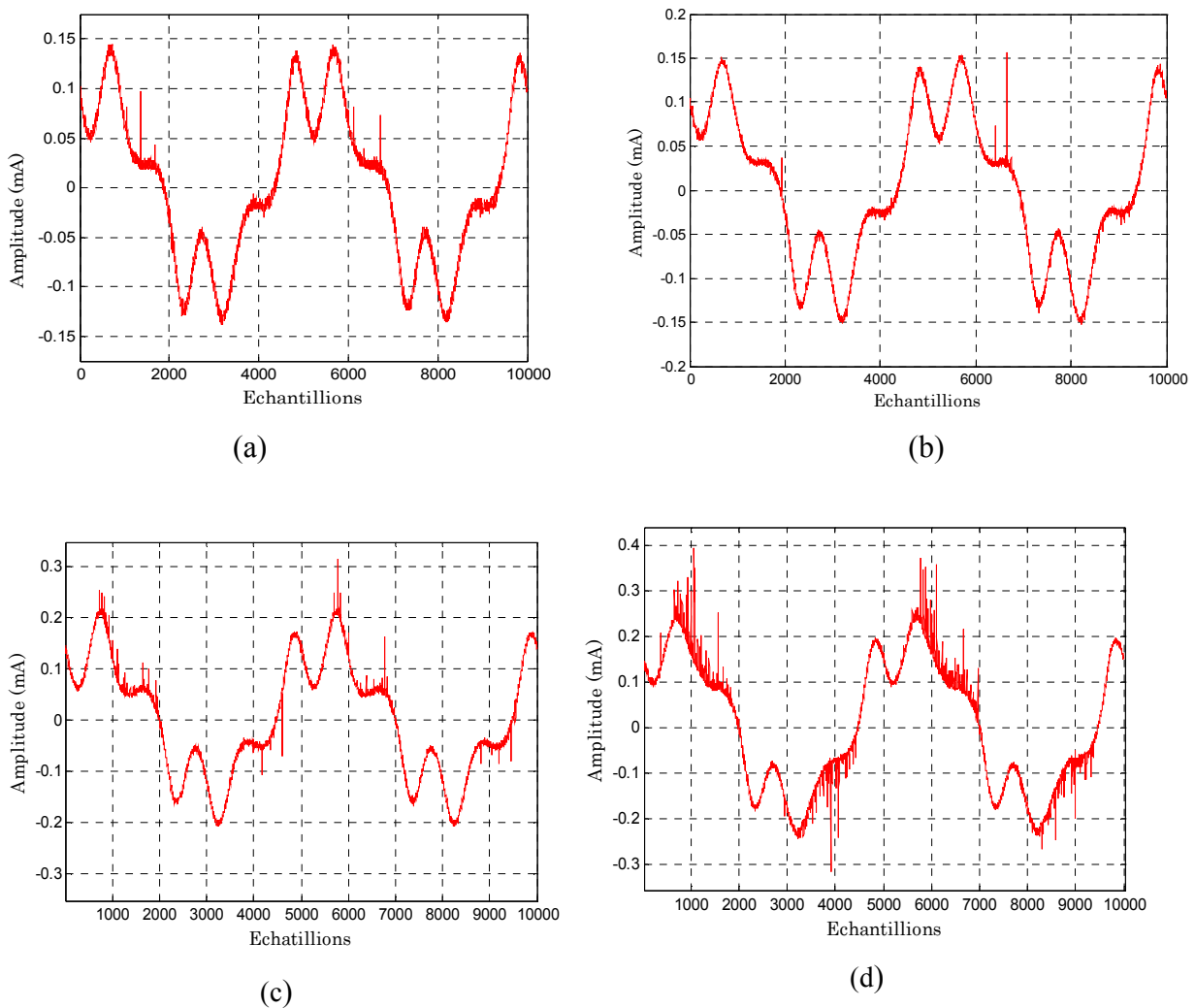
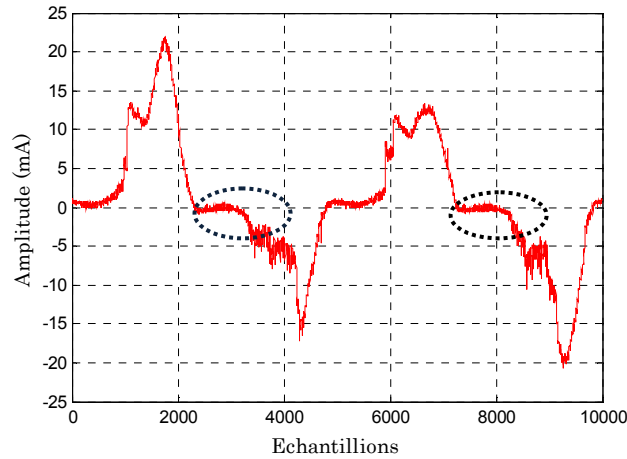


Figure III.13 : Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution de la couche centrale à $40kV_{eff}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.



(e)

Figure III.14: Forme d'onde du courant de fuite à 36 kV_{eff} pour une pollution de la couche centrale de largeur 25cm.

La représentation STD-MRA pour les quatre couches polluées (5, 10, 15 et 20 cm) indique que les détails D_1 et D_8 ont une énergie qui augmente pour chacune d'elles. On constate également pour la couche 25 cm et pour une tension de 36 kV_{eff}, que l'énergie du détail D_{10} est très élevée à cause des décharges électriques ayant lieu à la surface de l'isolateur. Cela confirme que le 3^{ème} harmonique décrit parfaitement les phénomènes de décharges dans l'intervalle d'air électrode-couche polluée. Les variations de D_8 et D_1 sont représentées sur les figures III.16 et III.1

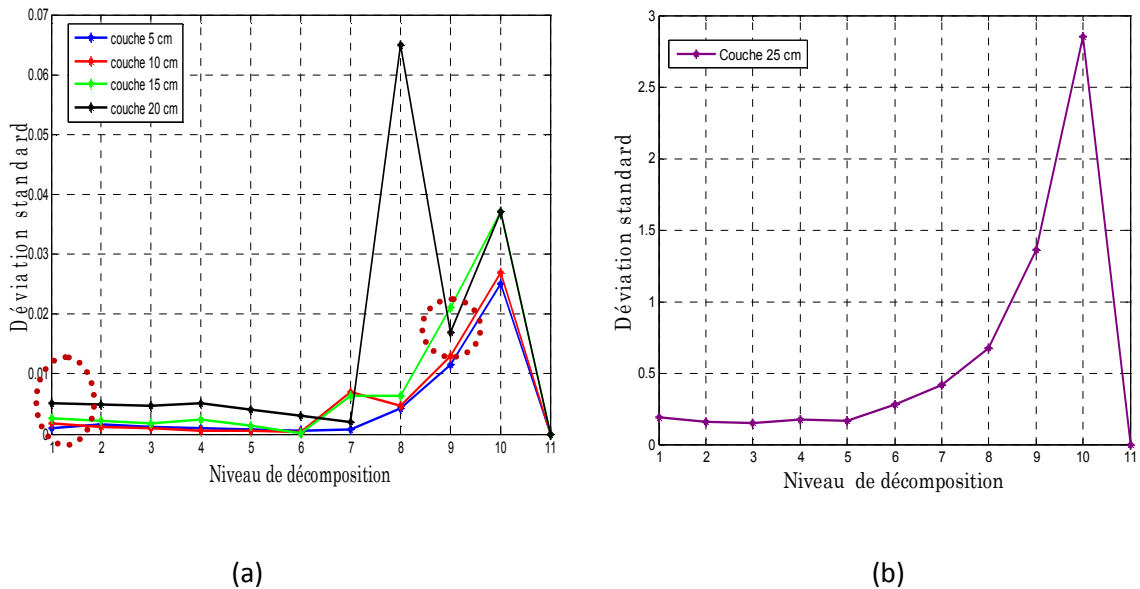


Figure III.15 : Déviation standard pour chaque détail du courant de fuite : (a) pour les quatre couches centrales polluées, (b) pour la couche 25 cm à 36 kV_{eff}.

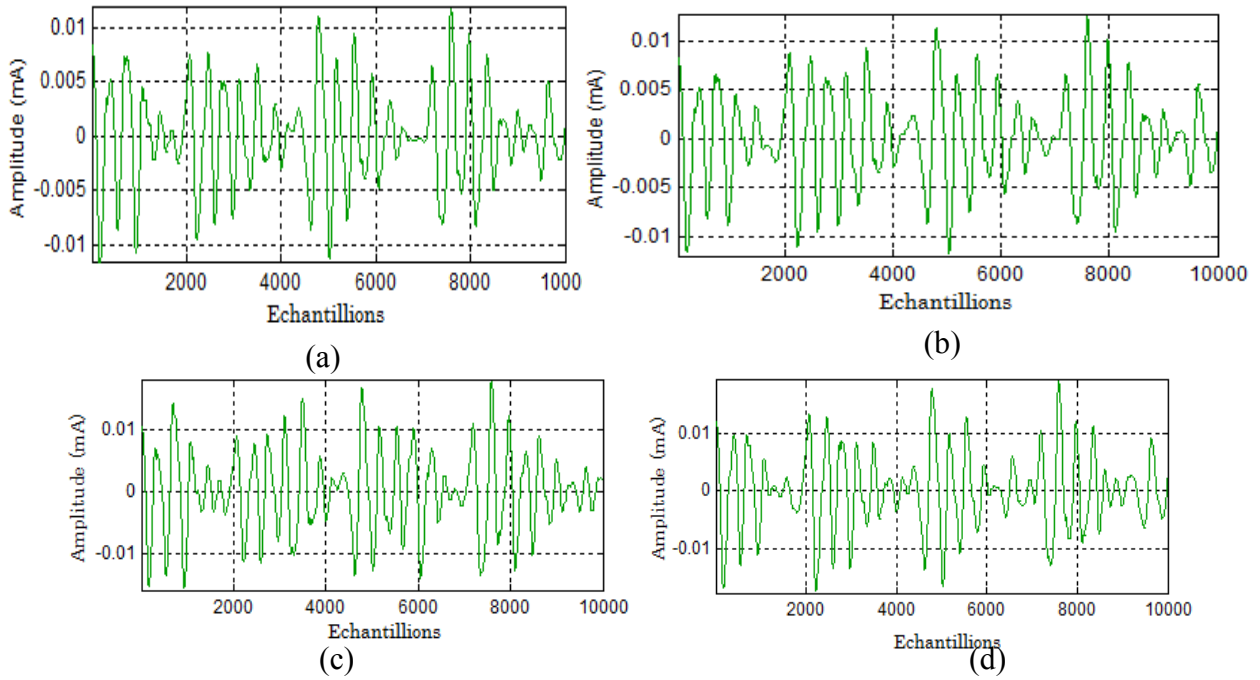


Figure III.16 : Evolutions du détail D_8 pour la pollution de la couche centrale à $40 \text{ kV}_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.

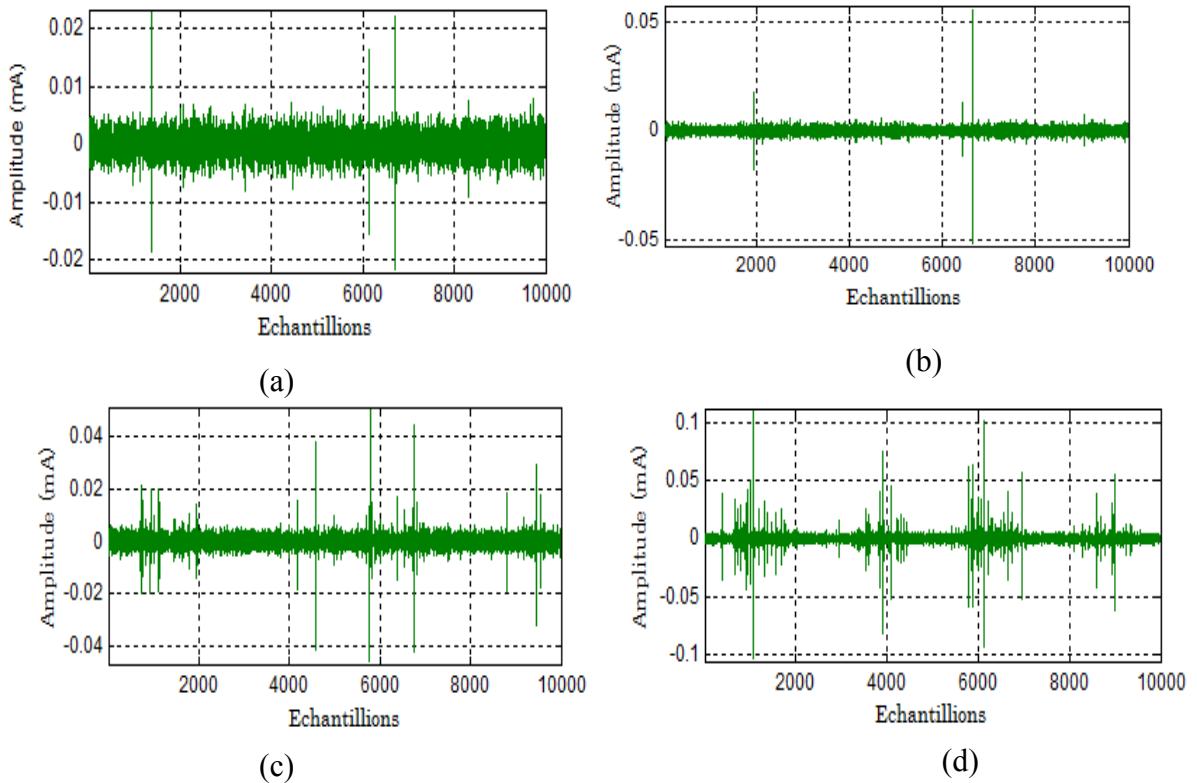


Figure III.17 : Evolutions du détail D_1 pour la pollution de la couche centrale à $40 \text{ kV}_{\text{eff}}$: (a) couche 5 cm, (b) couche 10 cm, (c) couche 15 cm, (d) couche 20 cm.

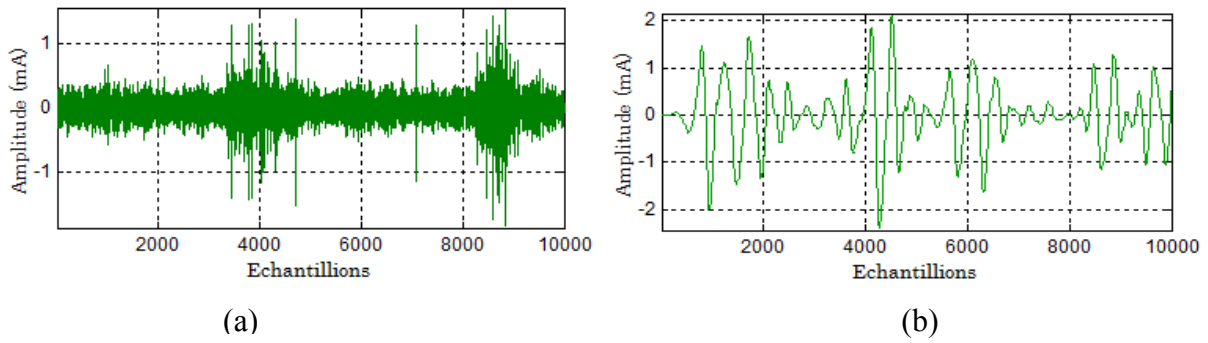


Figure III.18 : Couche centrale polluée de largeur 25 cm à 36 kV_{eff} : (a) détail D₁,

(a) détail D₈

III-5-Conclusion sur l'analyse par la DWT

La décomposition du courant de fuite par la DWT a pu identifier la presque totalité de ses composantes fréquentielles pour étudier l'attitude de ces dernières vis-à-vis du type de pollution non uniforme. La STD-MRA plot est une représentation de la déviation standard en fonction du niveau de décomposition qui permet d'identifier les bandes fréquentielles dont l'énergie augmente avec la largeur de la couche polluée, afin d'optimiser l'étude du courant de fuite en fonction de l'état de surface de l'isolateur considéré.

Pour la pollution du côté HT, la STD-MRA plot indique que le détail D₁₀ distingue entre les différentes couches polluées. En effet, plus la couche polluée s'élargit et plus l'énergie du détail D₁₀ augmente.

Pour la pollution du côté terre, les détails D₈ et D₁₀ sont ceux qui identifient l'élargissement de la couche polluée. Cela signifie que la différenciation entre la pollution du côté HT et celle du côté terre peut être faite grâce à l'augmentation d'énergie du détail D₈.

Pour la pollution de la couche centrale, les composantes fréquentielles D₁ et D₈ déterminent l'agrandissement de la zone conductrice. Ce type de pollution peut être également séparé des deux autres cas grâce à l'augmentation d'énergie de la composante D₁ de très haute fréquence.

Dans le cas où la pollution de la couche n'est pas connue, nous nous basons sur la représentation STD-MRA plot qui va identifier le signal approprié pour le diagnostic de la sévérité de pollution.

Le diagnostic de l'état de surface par la techniques des ondelettes nous a également permis de caractériser la sévérité de la pollution grâce au signal de la tension appliquée (conductivité uniforme) via la CWT et pendant l'activité des décharges parallèles. En effet, plus la conductivité volumique du milieu augmente plus les distorsions de la tension tendent vers les hautes fréquences. Cela signifie que la fréquence d'apparition des décharges électriques augmente en fonction de la conductivité du milieu. Pour la pollution non-uniforme, la DWT est plus utile pour estimer l'élargissement de la couche polluée de conductivité

1.2 mS/cm et différencier les trois cas de pollution. En effet l'analyse multi résolution permet de suivre l'évolution des composantes fréquentielles du courant de fuite, en se basant sur la représentation STD-MRA plot qui mesure qualitativement l'énergie du signal et permet de cibler le détail susceptible de caractériser la sévérité de la pollution pour chaque cas. Les détails D10 D8 et D1 permettent d'identifier le positionnement de la couche polluée selon qu'elle est du côté de l'électrode HT, de l'électrode terre ou au centre du modèle plan.

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

*Nous remercions nos encadreurs *GUIA TALAL* pour le effort qu'ils ont déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.*

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à notre formation universitaire.