



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Benarous Imane

DOMAINE : Sciences et Techniques

FILIERE : Hydraulique

OPTION : Ressources Hydrauliques

Thème

**ANALYSE TEMPS-FREQUENCE PAR LA DISTRIBUTION DE
WIGNER-VILLE ET LA TRANSFORMEE DE STOCKWELL
DES SIGNAUX HYDROLOGIQUES**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
TADJ Walid	MCB	Président
BOUACHE Mohamed	MAA	Examineur
CHETTIH Mohamed	Professeur	Rapporteur

Promotion : Juin - 2019

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé à ce travail, en premier lieu mon enseignant **Chettih Mohamed** qui m'a beaucoup appris et aidé énormément tout au long de la réalisation de notre mémoire .Ainsi que mes enseignants de spécialité, leurs conseils et leurs orientations tout au long de la formation, nous ont énormément servi dans la recherche scientifique.

Mes remerciements vont également à **mes parents** qui demeurent toujours mon soutien incontestable. Sans oublier ma sœur **Khaoula** et mes frères **Ali, Farouk** et **Amine**.

Dédicace

Ce travail n'est qu'un fruit d'un effort titanesque de la part de mes enseignants, mes parents et toute la famille mais également des personnes ressources. De ce fait, je dédie ce travail à toute personne qui contribue de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

ملخص

الحاجة الملحة الى تحليل، معالجة، وتحديد مميزات البيانات الهيدرولوجية، والتي هي في اغلب الأحيان غير مستقرة وغير خطية، اوجبت علينا التطرق الى تقنيات أكثر فعالية. يعتمد العمل في الأساس على تحليل التردد الزمني وذلك باستخدام تحويل فينير-فيل وتحويلات أخرى تابعة الى مجموعة كوهن، وقد تطرقنا على وجه الخصوص الى تحويل ستوكويل. يهدف هذا العمل الى تحليل بيانات التساقطات المطرية لبعض المحطات من شمال الجزائر، وذلك من اجل استخلاص ما أمكن من المعلومات الهيدرولوجية وتحديد العلاقات المحتملة بين الامطار ومؤشرات التذبذبات المناخية. النتائج المتحصل عليها مشجعة وثرية للمساعدة في فهم التقلبات الجوية في الجزائر.

كلمات مفتاحية: التردد الزمني، تحويل S، فينير-فيل، الهيدرولوجية، التقلبات الجوية، شمال الجزائر

Abstract

The need to analyse, process and describe the most commonly non-stationary and non-linear hydrological data, requires us to use more appropriate techniques. This work is based on a time-frequency analysis by the Wigner Ville distribution, and some other energy distributions of the Cohen class. We are particularly interested in the Stockwell transform. The work aims to analyse the series of rainfall of some stations of northern Algeria in order to extract the maximum hydrological information and establish the possible links between rainfall and climate oscillations indexes. The results are encouraging to help understand the problem of climate change in Algeria.

Key words: Time-Frequency, S Transform, Wigner-Ville, Hydrology, climate change, Northern Algeria.

Résumé

La nécessité d'analyser, traiter et décrire les données hydrologiques le plus couramment non stationnaire et non linéaire, nous oblige à recourir à des techniques plus appropriées. Ce travail est basé sur une analyse temps-fréquence par la distribution de Wigner Ville et quelques autres distributions énergétiques de la classe de Cohen, mais, on s'intéresse plus particulièrement la transformée de Stockwell. Le travail vise à analyser les séries de pluies de quelques stations de l'Algérie du Nord en vue d'extraire le maximum d'informations hydrologiques et établir les liens possibles entre les pluies et les indices d'oscillation climatiques. Les résultats s'avèrent encourageants et promoteurs pour contribuer à comprendre le problème des changements climatiques en Algérie.

Mots clés: Temps-fréquence, Transformée en S, Wigner-Ville, Hydrologiques, Changements climatiques, Algérie du Nord.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Quelques représentations Temps-Fréquence	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Transformée de Fourier	2
I.2.1 Définition.....	2
I.2.2 Transformée de Fourier Rapide (FFT).....	3
I.2.3 Transformée de Fourier à Fenêtre Glissante.....	4
I.3 La transformation en ondelettes (CWT).....	5
I.3.1 Définition.....	5
I.4 Distributions Temps-Fréquences Généralisées.....	6
I.4.1 Distribution de Wigner-ville.....	7
I.4.1.1 Définition.....	7
I.4.1.2 Propriétés.....	7
I.4.1.3 Pseudo Wigner-Ville.....	10
I.4.1.4 Pseudo Wigner-Ville lissée.....	10
I.4.2 Distribution de Choï-Williams.....	10
I.4.3 Distribution de Born-Jordan.....	11
I.4.4 Distribution de Bessel.....	11
Chapitre II : Transformée de Stockwell	
II.1 Introduction.....	12
II.2 Présentation de la Transformée en S.....	13
II.2.1 Définition.....	12
II.2.2 Transformée en S à partir de la STFT.....	14
II.2.3 Transformée en S à partir de la CWT.....	14
II.2.4 Propriétés de la transformée en S.....	16
II.3 Transformée en S discrète.....	21
II.3.1 Algorithme de la transformée en S.....	22
II.4 Auto-aliasing.....	23
II.5 Transformée en S généralisée.....	23
II.6 Scalogramme de la transformée en S	25
II.7 Analyse croisée	25
Chapitre III : Analyse Temps-Fréquence des pluies et des Indices d'oscillations climatiques	
III.1 Introduction	27
III.2 Présentation de la région d'étude	28
III.2.1 Situation géographique.....	28
III.2.2 Climatologie.....	28
III.3 Présentation des données.....	29
III.3.1 Précipitations	29
III.3.2 Indices d'oscillations climatiques.....	31
III.4 Résultats et interprétation.....	37
III.4.1 Analyses préliminaires.....	37

III.4.1.1 Gabor.....	37
III.4.1.2 STFT.....	38
III.4.1.3 Transformée en Ondelettes (WT).....	39
III.4.2 Les classe de Cohen.....	40
III.4.2.1 Wigner-Ville.....	40
III.4.2.2 Pseudo Distribution de Wigner-Ville Lissée.....	43
III.4.2.3 Distribution de Choï-Williams.....	45
III.4.2.4 Distribution de Born-Jordan.....	46
III.4.2.5 Distribution de Bessel.....	47
III.4.3 Transformée en S.....	49
III.4.3.1 Pluies et Indices mensuels.....	49
III.4.3.2 Pluies et Indices journaliers.....	53
III.4.3 Analyses croisées.....	56
III.5 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Liste des figures

N°		page
01	Organigramme de la transformée en S	22
02	Situation des sites d'étude	28
03	Répartition des pluies mensuelles pour la période 1901-2015	30
04	Répartition des pluies journalières à travers le temps	31
05	Répartition des Indices mensuelles (1901-2015)	35
06	Répartition de l'indice d'oscillation Méditerranéenne au pas journalier (1948-2016)	36
07	Répartition des Indices d'oscillations climatiques journaliers	36
08	Scalogrammes en 3D par la Distribution de Gabor, a : Dar El Beida, b : NAO et c : WEMO.	37
09	Spectre de puissance des pluies à Dar El Beida	38
10	Spectre de puissance du NAO	38
11	Spectre de puissance du WEMO	38
12	Spectre Global en ondelettes des pluies mensuelles à Dar El Beida	39
13	Spectre Global en ondelettes du NAO	40
14	Spectre Global en ondelettes du WEMO	40
15	Transformée de Wigner-Ville des pluies mensuelles à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global	40
16	Transformée de Wigner-Ville du NAO, a : scalogramme en 3D, b : scalogramme en 2D et c : spectre global	41
17	Transformée de Wigner-Ville du WEMO, a : scalogramme en 3D, b : scalogramme en 2D et c : spectre global	41
18	Transformée de Wigner-Ville des pluies journalières à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global	42
19	Transformée de Wigner-Ville de l'indice MO au pas journalier a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global	43
20	Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	44
21	Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée du NAO, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	44
22	Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée du WEMO, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	44
23	Distribution de Choi-Williams des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	45
24	Distribution de Choi-Williams du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	45
25	Distribution de Choi-Williams du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	46
26	Distribution de Born-Jordan des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	46
27	Distribution de Born-Jordan du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	47
28	Distribution de Born-Jordan du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	47
29	Distribution de Bessel des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	47

30	Distribution de Bessel du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	48
31	Distribution de Bessel du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global	48
32	Spectres Globaux des Distribution de BJ, Bessel, CW, SPWV pour les pluies mensuelles à Dar El Beida	49
33	Transformée en S des pluies mensuelles à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.	50
34	Spectres Globaux de la transformée en S des pluies mensuelles à : Annaba, Dar El Beida, Oran et Aïn Oussera.	50
35	Transformée en S du NAO au pas mensuel, a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.	51
36	Transformée en S du WEMO au pas mensuel a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.	52
37	Spectres Globaux de la transformée en S des Indices climatiques mensuels : PDO, SOI, NAO et WEMO	52
38	Transformée en S des pluies à Béjaia a) scalogramme en 3D ; b) scalogrammes en 2D ; c) spectre global	53
39	Spectres Globaux de la transformée en S des pluies journalières	53
40	Transformée en S du MO : a) scalogramme en 3D ;b) scalogrammes en 2D et c) spectre global	54
41	Spectres Globaux de la transformée en S des indices WPO, NAO, EPO	55
42	Spectres Globaux de la transformée en S des indices AO, NAO, PNA	55
43	Spectres Globaux de la transformée en S des indices AO, NAO, PNA et MO	55
44	Spectres Globaux de la transformée en S des pluies journalieres et le MO	56
45	Analyse croisée par la transformée en S (NAO-Dar El Beida) au pas mensuel (1901-2015) a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global ; d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle.	57
46	Analyse croisée par la transformée en S (WEMO-Dar El Beida) au pas mensuel (1901-2015) ; a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global ; d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle.	58
47	Analyse croisée par la transformée en S (MO-Dar El Beida) au pas journalier (1948-2009) a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global d) ; la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle	59

Liste des tableaux

N°		page
01	Classe de Cohen : quelques exemples de fonctions de paramétrisation et leurs représentations temps-fréquence associées	7
02	Stations d'observations et origines des données de pluies	29
03	Caractéristiques statistiques des pluies mensuelles.	30
04	Caractéristiques statistiques des pluies journalières	30
05	Description des indices mensuels	34
06	Caractéristiques statistiques des indices mensuels	34
07	Description des indices journaliers	35
08	Caractéristiques statistiques des indices journaliers	35
09	Principales composantes des indices d'oscillations climatiques	54
10	Cohérence moyenne obtenue par l'analyse croisée par la transformation en S au pas mensuel et journalier.	60

Liste des abréviations

AO	Oscillation arctique
BJ	Born Jordan
CW	Choï Williams
CWT	Transformation en ondelettes continue
DB	Distribution de Bessel
DFT	Transformation de Fourier discrète
DTFG	Distribution temps fréquence généralisé
EPO	Oscillation de l'est du Pacifiques
FFT	Transformation de Fourier rapide
MO	Oscillation Méditerranéenne
NAO	Oscillation atlantique du nord
PDO	Oscillation Décennale du Pacifique
PNA	Pacifique-Amérique du Nord
SLP	Sea level pressure
SOI	Indice d'Oscillation Australe
SPWV	Pseudo Wigner-Ville lissé
ST	Transformation de Stockwell
STFT	Transformation de Fourier à court terme
TF	Temps-fréquence
TWV	Transformation de Wigner-Ville
WEMO	Oscillation de la Méditerranée Occidentale
WPO	Oscillation Pacifique Occidentale
WT	Transformation en ondelettes
WV	Wigner-Ville

Introduction générale

Les phénomènes du changement climatique et hydro-climatologiques extrême (inondations, pluies torrentielles, ouragans, sécheresses, etc ...) sont devenus d'une actualité récurrente. En Algérie, la variabilité climatique notamment pluviométrique est imprécise en dépit des nombreuses études effectuées dans ce domaine.

Ce travail a pour le but de traiter, analyser, et caractériser les données hydrologiques, le plus couramment non-stationnaires et non-linaires comme la plupart des signaux naturels.

De ce fait, quelques techniques du traitement du signal seront appliquées aux signaux hydrologiques (pluies, indices d'oscillation climatique...), et on s'intéressera plus particulièrement aux analyses temps-fréquence qui améliorent la résolution en temps et en fréquence des signaux non-stationnaires, au-delà des méthodes spectrales classiques adaptées aux situations stationnaires.

Ce mémoire se compose en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente quelques représentation temps-fréquence : la transformée de Fourier à court terme, les transformées en ondelettes et ensuite les distributions temps-fréquence généralisées ou les class de Cohen qui regroupent l'ensemble des distributions suivantes : Wigner-Ville, Choï-Williams, Born-Jordan et Bessel.

Concernant le deuxième chapitre, on présente la transformée en S, qui est proposée par Stokwell est ses collègue en 1996 en vue d'atténuer les inconvénients des autres méthodes temps-fréquence. Dans ce chapitre, on a décrit les propriétés dont ; la facilité de la mise en œuvre de la ST en utilisant les avantages des algorithmes de la transformée de Fourier rapide (FFT), la linéarité qui est un avantage par rapport à la classe bilinéaire de représentation temps fréquence, le décalage dans le temps, ...etc. A la fin de ce chapitre et par analogie avec le co-spectre de Fourier, on a décrit et mis en œuvre une analyse croisée de la transformée en S entre deux signaux.

Le troisième chapitre traitera l'application des méthodes temps-fréquence et la transformée en S sur les séries pluviométriques mensuelles et journalières de quelques stations situées en Algérie du Nord, ainsi que sur les indices d'oscillation climatiques au pas mensuel et journalier, où les résultats ont été discutés pour chaque application.

Pour conclure, nous résumerons les principales contributions présentées dans ce mémoire, et nous proposerons quelques perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre I
Quelques représentations
Temps-Fréquence

Chapitre I

Quelques représentations Temps-Fréquence

I.1 Introduction

L'analyse fréquentielle basée sur la transformée de Fourier s'est montrée très prometteuse pendant plusieurs années dans le domaine du traitement de signal. D'un point de vue pratique, cette technique permet de transformer un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel (George, 2009).

La transformée de Fourier permet de fournir un spectre moyen dans le temps. Ceci convient spécialement pour les signaux stationnaires. La transformée de Fourier n'est pas adaptée aux signaux hydrologiques non-stationnaires et non-linéaires (Djoudi, 2018). Pour les signaux non-stationnaires, il est plus recommandé d'utiliser d'autres techniques et des outils mathématiques plus appropriés. A ce titre, de nouvelles approches de représentations Temps-Fréquence sont proposées (Assous, 2005).

Dans ce chapitre, on se limitera à quelques représentations Temps-Fréquence : la Transformée de Fourier à Fenêtre Glissante (STFT), la Transformée en Ondelettes (WT), et des principal classe des distributions énergétique : Distribution de Wigner-ville, de Choi-Williams, de Born-Jordan et la distribution de Bessel.

I.2 Transformée de Fourier

I.2.1 Définition

La transformation de Fourier L'une des technique d'analyse spectrale les plus communes. Il s'agit de transformer un signal du domaine temporel au domaine fréquentiel. La transformée de Fourier change la fonction de base Delta dans le domaine temporel en une fonction de base sinusoïdale infiniment longue dans le domaine fréquentiel (George, 2009). La transformée de Fourier $X(f)$ d'une série temporelle $x(t)$ est donnée par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad 01$$

et sa relation inverse est donnée par :

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad 02$$

Sa version discrète appelée Transformée Discrète de Fourier (DFT) d'une série temporelle de longueur N est donnée par :

$$X \left[\frac{n}{NT} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(kT) e^{-\left(\frac{i2\pi nk}{N}\right)} \quad 03$$

où T est l'intervalle d'échantillonnage de la série temporelle.

La relation d'inversion est :

$$x(kT) = \sum_{n=0}^{N-1} X \left[\frac{n}{NT} \right] e^{\left(\frac{i2\pi nk}{N}\right)} \quad 04$$

I.2.2 Transformée de Fourier Rapide (FFT)

La FFT pour Fast Fourier Transform est un algorithme rapide pour calculer la DFT (Heckbert, 1998). Découverte par Cooley & Tukey en 1965 elle a été largement adoptée par la suite. La FFT fournit un moyen efficace pour calculer la DFT. La FFT mise au point par Cooley et Tukey a permis en fait d'exploiter la Transformée de Fourier et d'en faire un outil mathématique de choix.

L'algorithme de Cooley-Tukey pour calculer la DFT de $X \in \mathbb{C}^N$ avec $N = 2^M$ peut-être simplifié par :

$$\begin{aligned} X_K &= \sum_{n=0}^{N-1} X_n \cdot e^{\frac{-i2\pi kn}{N}} \\ &= \sum_{n=0}^{N/2-1} X_{2n} \cdot e^{\frac{-i2\pi k(2n)}{N}} + \sum_{n=0}^{N/2-1} X_{2n+1} \cdot e^{\frac{-i2\pi k(2n+1)}{N}} \\ &= \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} X_{2n} \cdot e^{\frac{-i2\pi kn}{N/2}}}_{TFD_{N/2}} + e^{\frac{-i2\pi k}{N/2}} \underbrace{\sum_{n=0}^{N/2-1} X_{2n+1} \cdot e^{\frac{-i2\pi kn}{N/2}}}_{TFD_{N/2}} \end{aligned}$$

I.2.3 Transformée de Fourier à Fenêtre Glissante

La Transformée de Fourier à court terme (STFT pour *Short-Time Fourier Transform*) ou Transformée à Fenêtre Glissante était l'une des premières techniques de représentation temps-fréquence. Elle est définie par Portnoff (Portnoff, 1980) comme étant le résultat de la multiplication répétée de la série temporelle $x(t)$ par une fenêtre courte localisée dans le temps.

La STFT d'un signal $x(t)$ est donné par :

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t - \tau) e^{-i2\pi ft} dt \quad 05$$

où $\omega(t)$ est une fonction de fenêtre choisie arbitrairement (George, 2009)

Il faut noter que la largeur de la fenêtre $\omega(t)$ est constante durant toute l'analyse. Le choix de la largeur de cette fenêtre d'analyse est complètement arbitraire (Assous, 2005). La fenêtre d'analyse est décalée sur toute la durée d'existence du signal $x(t)$ afin de déterminer le spectre local à chaque moment (Deliou, 2013).

La représentation à deux dimensions (2D) de ce spectre s'appelle spectrogramme. Il permet d'assurer toujours des valeurs réelles positives ou nulles lorsque la STFT présente des valeurs complexes. Le spectrogramme est défini par la relation suivante :

$$SP(\tau, f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t - \tau) e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 \quad 06$$

Pour des raisons pratiques, il est préférable de calculer plusieurs STFT avec différentes largeur de la fenêtre afin d'aboutir à une représentation avec une résolution en temps et en fréquences adéquates (Deliou, 2013).

La résolution temporelle et fréquentielle dépend directement de la largeur de la fenêtre utilisée dans l'analyse temps-fréquence, tandis que la résolution temporelle est proportionnelle à la longueur de la fonction de fenêtrage. Ainsi, une fenêtre courte est nécessaire pour une bonne résolution temporelle et une fenêtre plus large offre une bonne résolution de fréquence. La limitation de la résolution temps-fréquence est due à l'égalité de Heisenberg-Gabor qui stipule que :

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq K \quad 07$$

où Δt : est la résolution temporelle ;

Δf : est la résolution en fréquence ;

K : est une constante qui dépend du type de fenêtre utilisée.

Par conséquent, pour obtenir une bonne résolution temporelle, il faut choisir une paire de *STFT*, une avec une fenêtre étroite (ce qui donne une bonne résolution temporelle) et une autre avec une fenêtre plus large (bonne résolution en fréquence) (George, 2009).

I.3 La transformation en ondelettes (CWT)

I.3.1 Définition

La transformation en ondelettes a été abordé dans les années 1980 avec les travaux de l'ingénieur J. Morlet et son équipe en définissant la Transformée en Ondelettes Continue (CWT) (The continuous Wavelet Transform) en utilisant une ondelette spécifique portant son nom (Deliou, 2013). La CWT est similaire à la transformée de Fourier à fenêtre glissante et à la transformée en S (Assous, 2005), puisqu'elle permet de fournir une représentation bidimensionnelle redondante pour mettre en évidence les caractéristiques oscillatoires locales du signal.

Une ondelette est un signal temporel continu satisfaisant les propriétés suivantes :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad 08$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad 09$$

où $\psi(t)$ est défini comme l'ondelette mère.

La transformée en ondelettes continue :

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad 10$$

où $x(t)$ est n'importe quelle fonction intégrable carrée, a est le paramètre de dilatation, b est le paramètre de translation et $\psi_{a,b}^*(t)$ est le complexe conjugué de l'ondelette mère définie comme :

$$\psi_{a,b}^*(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad 11$$

Le signal $x(t)$ peut être reconstruit à partir de la transformation en ondelettes continue à condition que l'ondelette mère satisfasse à la condition d'admissibilité :

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad 12$$

où $\psi(\omega)$ est la Transformée de Fourier de $\psi(t)$

À petite échelle (haute fréquence), la CWT offre une résolution temporelle élevée et à échelle supérieure (fréquence plus basse) la CWT donne une résolution fréquence élevée (George, 2009).

I.4 Distributions Temps-Fréquences généralisées

Une autre famille de représentations temps-fréquence s'appelle la classe de Cohen des Distributions Temps-Fréquence Généralisées (DTFG). La forme générale de la DTFG présentée par Cohen en 1989 est donnée par la relation suivante :

$$\rho_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi\xi(s-t)} f(\xi; \tau) x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\xi ds d\tau \quad 13$$

où $f(\xi; \tau)$ est une fenêtre d'observation vérifiant $f(\xi; \tau) = f^*(-\xi; -\tau)$ pour garantir le caractère réel de $\rho_x(t, f)$ (Ovarlez, 1998).

La présence du terme d'interférence peut causer une difficulté dans l'interprétation de la représentation temps-fréquence. Généralement, pour les signaux temporels qui possèdent plus de deux composantes spectrales, ce terme d'interférence croît rapidement. Quelques choix particuliers de $f(\xi; \tau)$ peuvent alléger le problème et lisser ainsi les interférences. La plus connue de ces représentations est la distribution de Wigner-Ville (WV) (Assous, 2005).

D'autres distributions temps-fréquence généralisées comme celle de Cone-Kernel, Choi-Williams, ainsi que le Pseudo Wigner-Ville lissée (SPWV) introduite par Hlawatsch et Boudreaux-Bartels (1992) permettent de réduire l'effet du terme d'interférence, mais ne satisfont pas aux propriétés énergétiques de la distribution de WV. Ronnmark et Larsson ont montré que l'approche de Wigner avec une fenêtre bien appropriée, est une autre façon d'effectuer la transformée de Fourier à fenêtre glissante pour localiser la puissance spectrale (Ronnmark et Larsson, 1988).

Le tableau 01 donne quelques exemples de définitions de distributions temps-fréquence de la classe de Cohen.

Tableau 01 : Classe de Cohen : quelques exemples de fonctions de paramétrisation et leurs représentations temps-fréquence associées (Ovarlez, 1998).

Nom	$f(\xi, \tau)$	$\rho_x(t, f)$
Wigner-Ville	1	$\int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau$
s-Wigner	$e^{2i\pi s\xi\tau}$	$\int_{-\infty}^{\infty} x\left(t - \left(s - \frac{1}{2}\right)\tau\right) x^*\left(t - \left(s + \frac{1}{2}\right)\tau\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau$
Rihaczek	$e^{i\pi\xi\tau}$	$x(t)X^*(f)e^{-2i\pi f\tau}$
Born-Jordan	$\frac{\sin \pi\xi\tau}{\pi\xi\tau}$	$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{ \tau } \int_{t- \tau /2}^{t+ \tau /2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds \right] e^{-2i\pi f\tau} d\tau$
Choi-Williams	$e^{-(\pi\xi\tau/\sigma)^2/2}$	$\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma}{ \tau } e^{-2\sigma^2(s-t)^2/\tau^2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2i\pi f\tau} ds d\tau$
Spectrogramme	$A_{h(\xi,\tau)}$	$\left \int_{-\infty}^{+\infty} x(s)h^*(s-t)e^{-2i\pi fs} \right ^2$
Séparable	$G(\xi)h(\tau)$	$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)(s-t)x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2i\pi f\tau} ds d\tau$

I.4.1 Distribution de Wigner-Ville

I.4.1.1 Définition

La transformation de Wigner-Ville (TWV) fut proposée pour la première fois par E. Wigner en 1932 dans le contexte de la mécanique quantique, puis introduite dès 1948 par J. Ville dans la théorie du signal (Yue Min, et al., 1987). La TWV est une distribution temps-fréquence énergétique qui est particulièrement intéressante (Deliou, 2013) et aussi l'élément central de la classe de Cohen (Jabloun, 2007) définie par la relation suivante :

$$WV_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad 14$$

La distribution de Wigner-Ville est une distribution temps-fréquence généralisée avec : $f(\xi; \tau) = 1$.

I.4.1.2 Propriétés

Cette distribution répond à un grand nombre de propriétés mathématiques :

- Elle est toujours réelle, cette propriété est l'un des premiers avantages de la TWV puisque cette représentation étant réelle, peut donc être facilement observée (Yue Min, et al., 1987) :

$$WV_x \in \mathfrak{R}, \forall t, f \quad 15$$

- Elle préserve le décalage en temps et en fréquence ;
- Elle satisfait à la propriété du principe de conservation d'énergie :

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WV_x(t, f) dt df \quad 16$$

- et satisfait aux propriétés marginales : De même, la DWV peut être considérée, à tout instant, comme une décomposition spectrale de la puissance instantanée (Flandrin et Sessarego, 1990) puisque :

$$\int_{-\infty}^{\infty} WV_x(t, f) dt = |X(f)|^2 \quad 17$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} WV_x(t, f) df = |x(t)|^2 \quad 18$$

Cette distribution représente le “spectre instantané” satisfaisant aux contraintes de distributions marginales. Elle ne nécessite pas l'introduction d'une fenêtre extrinsèque au signal comme dans le cas du spectrogramme (Jabloun, 2007).

- Covariance de translation : la distribution de Wigner-Ville est covariante en temps et en fréquence (Deliou, 2013) :

$$y(t) = x(t - t_0) \Rightarrow WV_y(t, f) = WV_x(t - t_0, f) \quad 19$$

$$y(t) = x(t)e^{i2\pi f_0 t} \Rightarrow WV_y(t, f) = WV_x(t, f - f_0) \quad 20$$

- Covariance de dilatation :

$$y(t) = \sqrt{k}x(kt), k > 0 \Rightarrow WV_y(t, f) = WV_x\left(kt, \frac{f}{k}\right) \quad 21$$

- Compatibilité avec filtrage : il traduit le fait que, si un signal y est le résultat de la convolution de x et h (c'est-à-dire la sortie du filtre dont l'entrée est h et x), la distribution de Wigner-Ville de y est la convolution temporelle entre la WV de h et la WV de x :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - s)x(s) ds \Rightarrow WV_y(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} WV_h(t - s, f) WV_x(s, f) ds \quad 22$$

- Compatibilité avec modulation : c'est la propriété duale de la précédente : si y est la modulation de x par une fonction m , la distribution de WV de y est la convolution fréquentielle entre la WV de x et la WV de m (Deliou, 2013)

La DWV préserve la structure convolutive d'entrée-sortie des filtres linéaires, tout en y adjoignant une dépendance fréquentielle explicite (Flandrin et Sessarego, 1990)

$$y(t) = m(t)x(t) \Rightarrow WV_y(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} WV_h(t, f - \xi) WV_x(t, \xi) d\xi \quad 23$$

- Conservation du support de signal temporelle et fréquentielle : si un signal a un support compact dans le temps (respectivement en fréquence), alors sa distribution de WV a également le même support compact dans le temps (respectivement en fréquence) :

$$x(t) = 0, |t| > T \Rightarrow WV_x(t, f) = 0, |t| > T \quad 24$$

$$X(f) = 0, |f| > B \Rightarrow WV_x(t, f) = 0, |f| > B \quad 25$$

- Unitarité : la propriété d'unitarité exprime la conservation du produit scalaire du domaine temporel au domaine temps-fréquence (en dehors du module au carré)

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y^*(t)dt \right|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WV_x(t, f) WV_y^*(t, f) dt df \quad 26$$

Cette formule est également connue comme la formule de Moyal.

- Fréquence instantané : la fréquence instantanée d'un signal x peut être déduite à partir de la distribution de WV comme son moment de premier ordre de la fréquence :

$$f_x(t) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f WV_{x_a}(t, f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} WV_{x_a}(t, f) df} \quad 27$$

où x_a est le signal analytique associé au signal x .

- La DWV est reliée à la fonction d'ambiguïté $Ax(n, \tau)$, qui est une mesure de corrélation temps-fréquence, par une relation de transformation de Fourier bidimensionnelle (Flandrin et Sessarego, 1990)

$$\begin{aligned}
 A_x(n, \tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi n u} du \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WV_x(t, f) e^{-i2\pi(nt + \tau f)} dt df
 \end{aligned} \tag{28}$$

I.4.1.3 Pseudo Wigner-Ville

La distribution de Wigner-ville a l'inconvénient de comporter, à cause de sa structure bilinéaire, des interférences entre composantes de fréquence positive et de fréquence négative (Allard et al., 1987). On peut effectuer une opération de lissage fréquentiel de la distribution de Wigner-Ville par l'intermédiaire d'une fenêtre $h(t)$. Il en résulte une distribution appelée Pseudo-Wigner-Ville (PWV) (Jabloun, 2007) définie par :

$$PWV_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h^2\left(\frac{\tau}{2}\right) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \tag{29}$$

I.4.1.4 Pseudo Wigner-Ville lissée

La solution fenêtrée de la distribution de Wigner-Ville a été proposée pour tenter de résoudre le problème d'interférences de nature oscillante produite par l'analyse d'un signal $x(t)$ par la distribution de Wigner-Ville (Deliou, 2013).

Cette distribution associée est la pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée (SPWV) smoothed pseudo Wigner-Ville (Allard et al., 1987). Son expression est :

$$SPWV_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t - u) PWV_x(u, f) du \tag{30}$$

où $g(t)$ est la fenêtre de lissage temporel.

I.4.2 Distribution de Choï-Williams

Cette distribution a été introduite dans le but de réduire les interférences intervenant dans la lecture des distributions temps-fréquence. Le noyau $f(\xi, \tau)$ choisi (Ovarlez, 1998) est de la forme $f(\xi, \tau) = e^{-(\pi\xi\tau/\sigma)^2/2}$. La distribution de Choï-Williams est définie par la relation suivante :

$$CW_x(t, f) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sigma}{|\tau|} e^{2\sigma^2(s-t)^2/\tau^2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i2\pi f \tau} ds d\tau \tag{31}$$

où σ est un paramètre de contrôle de la fenêtre de lissage (Ovarlez, 1998). Sa valeur en pratique varie entre 1 et 80 (Deliou, 2013).

I.4.3 Distribution de Born-Jordan

Si on impose à la distribution de Choi-Williams la préservation des supports temporel et fréquentiel, le choix simple aboutit à la définition de la distribution de Born-Jordan (BJ) (Ovarlez, 1998)

Si l'on choisit un noyau du type $f(\xi, \tau) = \frac{\sin 2\pi a \tau \xi}{2\pi a \tau \xi}$, où a est une constante $a = 1/2$, ceci permet encore de réduire l'énergie des termes d'interférences. La distribution (BJ_x) prend la forme suivante :

$$BJ_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{2a|\tau|} \int_{t-a\tau}^{t+a\tau} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds \right] e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad 32$$

I.4.4 Distribution de Bessel

La distribution de Bessel (DB) basée sur la fonction du Bessel du premier ordre pour un signal $x(t)$ est définie par la relation suivante :

$$DB_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) R_x(t, \tau) e^{-2i\pi f \tau} d\tau \quad 33$$

$$R_x(t, \tau) = \int_{t-|\tau|}^{t+|\tau|} \frac{2g(s)}{\pi|\tau|} \sqrt{1 - \left(\frac{s-t}{\tau}\right)^2} x\left(s + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(s - \frac{\tau}{2}\right) ds \quad 34$$

avec $h(\tau)$ et $g(s)$ représentent des fenêtres de lissages en temps et en fréquences respectivement.

La distribution de Bessel est une distribution à valeur réelle et elle conserve les propriétés de translation temporelle et fréquentielle. Nous avons aussi la satisfaction des propriétés marginales pour la distribution Bessel du premier ordre. Cette technique a été introduite comme étant une technique de réduction des termes d'interférences en se basant sur la fonction de Bessel du premier ordre afin de surmonter le principal inconvénient des distributions quadratiques tel la technique temps-fréquence de Wigner-Ville (Deliou, 2013).

Chapitre II
Transformée de Stockwell

Chapitre II

Transformée de Stockwell

II.1 Introduction

Dans le domaine du traitement de signal non stationnaire, la transformation temps-fréquence est une méthode importante.

La méthode d'analyse temps-fréquence est une méthode qui permet de convertir le signal d'un domaine temporel en un domaine temps-fréquence et d'analyser les signaux non stationnaires (Yun et al, 2013).

Un grand nombre de distributions temps-fréquence a été proposé dans la littérature. La plus grande partie a été regroupée sous le nom de la classe de Cohen qui est bilinéaire et covariante par le groupe des translations en temps et en fréquence (Ovarlez, 1998), contenant la distribution de Wigner-Ville, Choi-Williams, Born-Jordan et la Distribution de Bessel. Les méthodes d'analyse des signaux non stationnaire les plus connues sont : la transformation de Fourier à court terme (STFT), la transformation continue en ondelettes (CWT) et la distribution de Wigner-Ville (DWV). En effet, ces méthodes ont été largement exposées dans le premier chapitre.

Afin d'atténuer les défauts de ces méthodes, la transformée de Stockwell (*ST pour Stockwell Transform*) ou transformée en S est proposée par Stockwell et ses collègues en 1996 (Stockwell et al., 1996), pour permettre une représentation temps-fréquence du signal (Assous, 2005). Elle peut être considérée comme une méthode hybride entre la méthode STFT et WT. C'est une fenêtre variable de la Transformée de Fourier à court terme STFT ou une extension de la Transformée en Ondelettes WT (Yu-Hsiang, 2010).

Cette méthode a plusieurs propriétés très importantes dont ; la facilité de la mise en œuvre de la ST en utilisant les avantages des algorithmes de la transformée de Fourier rapide (FFT), la linéarité qui est un avantage par rapport à la classe bilinéaire de représentation temps fréquence, le décalage dans le temps, etc....

Pour améliorer la résolution en énergie dans le plan temps-fréquence on va présenter dans ce chapitre quelques algorithmes, ensuite, on va examiner les propriétés mathématique du scalogramme de la transformée en S qui est une transition normale entre les représentations linéaires et énergétiques.

II.2 Présentation de la Transformée en S

II.2.1 Définition

La transformation S, introduite par Stockwell, Mansinha et Lowe en 1996 pour traiter l'activité des ondes de gravité à partir d'un réseau à petite échelle d'imageurs Airglow, combine de manière appropriée les forces des transformations STFT et en ondelettes. Elle utilise une longueur de fenêtre variable et évolutive et utilise le noyau de Fourier pour fournir les informations de phase référencées à l'origine de temps (Lokhande, 2017).

La transformation S définie par Stockwell d'un signal $x(t)$ variant dans le temps est :

$$S_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\omega(t - \tau, f)e^{-2\pi ift} dt \quad 35$$

où $w(\tau - t, f)$ une fonction de fenêtre (gaussienne)

La fonction 1D de la variable de temps τ et de la fréquence fixe f_1 définie par $S_x = (\tau, f_1)$ s'appelle la voie. La fonction 1D de la variable de fréquence f et du temps fixe τ_1 défini par $S_x = (\tau_1, f)$ est appelé le spectre local. La voie à fréquence zéro est indépendante du temps et égale à la moyenne du signal. Elle peut être exprimée comme suit :

$$S_x(\tau, 0) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t) dt \quad 36$$

La fenêtre est normalisée comme :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \omega(t, f) dt = 1 \quad \forall f \in \mathbb{R} \quad 37$$

Cette normalisation permet à la transformation S d'être inversible et d'avoir une relation directe avec la transformation de Fourier, propriété très importante de la ST, comme nous le verrons plus loin.

II.2.2 Transformée en S à partir de la STFT

Pour simplifier et comprendre le principe de la transformée en S, il serait plus intéressant tout d'abord de présenter la relation qui existe entre cette dernière et la transformée de Fourier à fenêtre glissante. La transformation S peut dériver de l'équation (35) en remplaçant la fonction de fenêtre $\omega(t)$ par la fonction gaussienne, représentée par :

$$g(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad 38$$

avec

$$\sigma = \frac{1}{|f|} \quad 39$$

alors la transformation S sera définie comme :

$$S(\tau, f) = STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad 40$$

où f est la fréquence et t et τ sont les deux variables de temps.

La ST décompose un signal en composantes temporelles (τ) et fréquentielles (f). La valeur de τ représente le centre de la fonction de fenêtre. Ainsi, en choisissant toutes les valeurs possibles pour τ , les coefficients ST couvriront l'ensemble de l'axe temporel et créeront des résolutions complètes pour chaque fréquence désignée (Yanwei, 2011).

Différentes valeurs de f ajustent les tailles des fenêtres gaussiennes sur l'axe temporel pour obtenir une multirésolution sur différentes fréquences, c'est-à-dire une résolution plus élevée sur les fréquences élevées et une résolution inférieure sur les basses fréquences (Yanwei, 2011).

On peut donc dire que la transformation S est un cas particulier de *STFT* avec une fonction de fenêtre gaussienne. Si la fenêtre de transformation S est plus large dans le domaine temporel, la transformation S peut fournir une meilleure résolution de fréquence pour une fréquence inférieure. Bien que la fenêtre soit plus étroite, elle peut fournir une meilleure résolution temporelle pour une fréquence plus élevée (Yu-Hsiang, 2010).

II.2.3 Transformée en S à partir de la CWT

Une autre direction pour comprendre la transformée en S est de voir sa relation avec la transformée en ondelettes.

Comme représentée dans (Stokwell, 1996), la transformation S peut être exprimée en termes de CWT comme suit :

$$S_x(\tau, f) = \sqrt{|f|} e^{-2\pi i f t} W(a, b) \quad 41$$

où $W(a, b)$ est le CWT qui est donné par :

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad 42$$

et l'ondelette mère $\psi(t)$ est l'ondelette gaussienne modulée ou complexe de Morlet (Daubechies, 1992 in Moukadem et al., 2014)

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} e^{2\pi i t} \quad 43$$

Démonstration :

Revenons à l'équation (40) de la transformation en S :

$$S_x(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-\frac{(t-b)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt$$

En laissant $a = \frac{1}{f}$ et en extrayant une modulation de phase $e^{-2\pi i f b}$ et une amplitude $\sqrt{|f|}$ de l'intégrale dans la dernière équation (Gibson, 2006), $S_x = (\tau, f)$ devient :

$$\begin{aligned} S_x(\tau, f) &= \sqrt{|f|} e^{-2\pi i f b} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \sqrt{\frac{|f|}{2\pi}} e^{-\frac{(t-b)^2 f^2}{2}} e^{-2\pi i f (t-b)} dt \\ &= \sqrt{|f|} e^{-2\pi i f b} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-b)^2}{2a^2}} e^{-\frac{2\pi i (t-b)}{a}} dt \quad 44 \\ &= \sqrt{|f|} e^{-2\pi i f b} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \\ &= \sqrt{|f|} e^{-2\pi i f b} W(a, b) \end{aligned}$$

La transformée S peut être considérée comme un cas particulier du CWT avec l'ondelette mère de Morlet (Ventosa, 2008), avec les caractéristiques d'échelle de fréquence linéaire et la phase de référence absolue en contraste avec l'ondelette classique.

II.2.4 Propriétés de la transformée en S

Grâce à sa référence absolue à l'information de phase, la transformée en S a plusieurs caractéristiques importantes :

❖ Relation avec la transformée de Fourier

Une relation directe entre la transformée S et le spectre de Fourier peut être établie en effectuant la moyenne du spectre local dans le temps comme suit :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, f) d\tau = X(f) \quad 45$$

Cela donne :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, f) \right\} e^{i2\pi ft} df d\tau \quad 46$$

où $X(f)$ est la transformée de Fourier de $x(t)$.

Démonstration :

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, f) dt &= \iint_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(t - \tau, f) e^{-2\pi ift} dt \\ &= \iint_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi ift} \omega(t - \tau, f) dt \\ &= X(f) \int_{-\infty}^{+\infty} \omega(t - \tau, f) dt = X(f) \end{aligned} \quad 47$$

Un autre moyen d'exprimer directement le lien entre la transformation S et la transformation de Fourier (Moukadem et al., 2014) consiste à écrire le S sous forme de convolution comme suit :

$$\begin{aligned} S_x(\tau, f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} p(t, f) g(\tau - t, f) dt \\ &= p(\tau, f) * g(\tau, f) \end{aligned} \quad 48$$

où

$$p(\tau, f) = x(\tau) e^{-2\pi if\tau} \quad 49$$

et

$$g(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\tau^2 f^2}{2}} \quad 50$$

En calculant la transformée de Fourier de $S_x(\tau, f)$, la convolution devient une multiplication dans le domaine fréquentiel :

$$\begin{aligned} F_{\tau \rightarrow \alpha}\{S_x(\tau, f)\} &= P(\alpha, f)G(\alpha, f) \\ &= X(\alpha + f)e^{\frac{-2\pi^2\alpha^2}{f^2}} \end{aligned} \quad 51$$

où α est la variable de Fourier en fréquence liée à τ

Le lien direct entre la transformée S et la transformée de Fourier peut être obtenu en appliquant la transformée de Fourier inverse à l'équation ci-dessus :

$$S_x(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\alpha + f)e^{\frac{-2\pi^2\alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad 52$$

Cela facilitera la mise en œuvre de la ST en utilisant les avantages des algorithmes de transformée de Fourier rapide (FFT). La fonction exponentielle dans l'équation (49) est la fenêtre de localisation dépendante de la fréquence. Cette fenêtre est centrée sur la fréquence zéro et joue donc le rôle de filtre passe-bas pour chaque voie particulière (Stockwell et al., 1996).

❖ Linéarité

La transformation en S justifie la propriété de linéarité. Ceci est avantageux pour le cas de bruit additif (Moukadem et al., 2014) où les données peuvent être modélisées par :

$$Data(t) = signal(t) + bruit(t) \quad 53$$

Ainsi l'application de la transformée en S mène à :

$$S_{Data} = S_{signal} + S_{bruit} \quad 54$$

C'est un avantage par rapport à la classe bilinéaire des représentations temps-fréquences (Assous, 2005), où on trouve :

$$WV_{Data} = WV_{signal} + 2WV_{Data}WV_{bruit} + WV_{bruit} \quad 55$$

❖ Décalage dans le temps

Il n'est pas difficile de montrer que le décalage du signal $x(t)$ de t_0 dans le domaine temporel aboutit à la multiplication de la transformation S par un facteur de phase (Pinnegar et Eaton, 2003) :

$$S_y(\tau, f) = S_x(\tau, f)e^{-2\pi f t_0} \quad 56$$

où

$$y(t) = x(t - t_0) \quad 57$$

Démonstration :

Si nous traduisons la série chronologique par une valeur t_0 , on peut étudier l'effet sur la transformation en S en faisant un changement de variables

$t \rightarrow k - t_0$ (Moukadem et al, 2014).

L'équation de transformation S devient :

$$S_x(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(k - t_0) e^{\frac{-(k-t_0-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f(k-t_0)} dk \quad 58$$

En effectuant un autre changement de variables $\tau \rightarrow z - t_0$, on obtient :

$$\begin{aligned} S_x(z - t_0, f) &= \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(k - t_0) e^{\frac{-(k-t_0-z+t_0)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f(k-t_0)} dk \\ &= \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(k - t_0) e^{\frac{-(k-z)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f k} e^{-i2\pi f t_0} dk \end{aligned} \quad 59$$

Par conséquent, le théorème de décalage de la transformation S déclare que si :

$$x(t) \Leftrightarrow S_x(\tau, f) \quad 60$$

$$x(t - t_0) \Leftrightarrow S_x(\tau, f) e^{-i2\pi f t_0} \quad 61$$

❖ Transformée en S et fréquence instantanée

On peut montrer que la transformée en S fournit une extension de la fréquence instantanée aux signaux larges bandes (Assous, 2005). Une voie particulière de la transformée en S peut être écrite par :

$$S(\tau, f_0) = A(\tau, f_0) e^{i\Phi(\tau, f_0)} \quad 62$$

où

$$A(\tau, f_0) = \sqrt{\Re(S(\tau, f_0)^2) + \Im(S(\tau, f_0)^2)} \quad 63$$

et

$$\Phi(\tau, f_0) = \arctan\left(\frac{\Im(S(\tau, f_0))}{\Re(S(\tau, f_0))}\right) \quad 64$$

$A(\tau, f_0)$: L'Amplitude

$\Phi(\tau, f_0)$: La phase

Comme une voie isole une composante spécifique, on peut utiliser la phase de l'équation (64) pour déterminer la fréquence instantanée

(Stockwell et al., 1996)

$$FI(\tau, f_0) = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \tau} \{2\pi\tau f_0 + \Phi(\tau, f_0)\} \quad 65$$

❖ Information de phase

Dans de nombreuses applications, seule l'amplitude des transformations est observée car elle est plus intuitive. Cependant, les informations de phase dans les transformations complexes peuvent être utiles pour les schémas d'extraction et de classification. Une caractéristique clé de la transformation S est qu'elle associe de manière unique une résolution de l'espace TF (temps-fréquence) dépendant de la fréquence avec des informations de phase locale référencées de manière absolue, contrairement à la CWT. (Stokwell, 2007).

La CWT fournit une résolution temporelle en traduisant l'ensemble de sa fonction d'analyse (l'ondelette) le long de l'axe temporel. La transformée S est différente car seule l'enveloppe d'amplitude de la fonction d'analyse (la fenêtre gaussienne) est traduite, les oscillations sont données par la sinusoïde de Fourier fixe qui ne dépend pas de τ (Pinnegar, 2004)

❖ Amplitude-conservative

La transformation en S ne satisfait pas la propriété de conservation d'énergie contrairement aux transformées en ondelettes ou à la transformation de STFT. Cependant, la transformation S peut être considérée comme une transformation conservatrice d'amplitude dans laquelle l'amplitude moyenne du signal est conservée (Moukadem et al, 2014).

Cependant, la transformée S conserve l'amplitude du signal indépendamment de la fréquence analysée.

❖ **Transformée en S inverse**

Il existe deux manières de calculer la transformée S inverse en fonction de différentes philosophies, la transformée S en fréquence inverse et la transformée S en temps inverse.

- **Transformée en S en fréquence inverse**

Comme cela a été montré précédemment, la transformée de Fourier est obtenue en faisant la somme de la transformée S dans le temps :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, f) d\tau = X(f) \quad 66$$

Par conséquent, le signal original peut être obtenu en additionnant sur toutes les fréquences :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, f) \right\} e^{i2\pi ft} df dt \quad 67$$

- **Transformée en S en temps inverse**

Schimmel et Gallart (2005) proposent une fonction temps-temps du signal fenêtré $x(t)$:

$$z(\tau, t) = x(t) e^{\frac{-f^2(\tau-t)^2}{2k^2}} \quad 68$$

Pour toute fréquence f , la fonction $z(\tau, t)$ se réduit à $x(t) = z(t, t)$ à $\tau = t$. Après la transformation de Fourier de la fonction z , la fonction devient :

$$z(\tau, t) = \frac{k\sqrt{2\pi}}{|f|} S(\tau, f) \quad 69$$

et par conséquent, le signal original $x(t)$ peut être extrait du spectre S pondéré par les « éléments diagonaux » de la représentation temps-temps obtenue avec la transformation en retour suivante :

$$x(t) = k\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S(t, f)}{|f|} e^{i2\pi ft} dt \quad 70$$

Les inverses diffèrent en raison de leurs stratégies différentes. Cependant, le principal inconvénient de la version à fréquence inverse est qu'elle oblige à calculer un nombre de voie de fréquence égal à des échantillons de temps, ce qui peut être considéré comme un problème grave lorsqu'il s'agit de traiter des données volumineuses. L'approche temporelle peut souvent être le meilleur

choix si nous nous intéressons au post-traitement dans le domaine temporel ou à des interprétations.

II.3 Transformée en S discrète

Soit $x[kT], k = 0, \dots, N - 1$ désignent une série temporelle discrète correspondant à $x(t)$ avec un intervalle d'échantillonnage temporel de T . La transformée de Fourier discrète (Brigham, 1974) est représentée par :

$$X\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[kT] e^{-i2\pi nk} \quad 71$$

où $n = 0, 1, \dots, N - 1$. Dans le cas discret, la transformée en S est la projection du vecteur défini par $x[kT]$ en une base non orthogonale de vecteurs et les éléments de la transformée en S ne sont pas indépendants. Chaque vecteur de base (de la transformée de Fourier) est divisé en N vecteurs localisés par le produit élément par élément de N Gaussiennes translatées, tel que la somme de ces N vecteurs localisés soit égale au vecteur de base original. En utilisant la version discrète de l'équation (52), et en posant $f \rightarrow \frac{n}{NT}$ et $\tau = iT$ (Stockwell, 2006), la transformée en S d'un signal discret $x[kT]$ est donnée par :

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{i2\pi mj}{N}} \quad 72$$

Pour la voie $n = 0$, elle est égale à une constante définie par :

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x\left[\frac{m}{NT}\right] \quad 73$$

où j, m et $n = 0, 1, \dots, N - 1$ (Stockwell, 2006).

Cette équation établit la moyenne constante de la série temporelle dans la voie à fréquence zéro, de sorte que l'inverse soit exact. L'inverse de la transformation S discrète est :

$$x[kT] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} S\left[\frac{n}{NT}, jT\right] \right\} e^{\frac{i2\pi nk}{N}} \quad 74$$

II.3.1 Algorithme de la transformée en S

Comme mentionné précédemment, la relation directe entre la transformée en S et la transformation de Fourier facilite la mise en œuvre de la ST en utilisant les avantages de l'algorithme FFT. La transformée de Fourier du signal d'entrée doit être calculée une seule fois. Pour chaque valeur requise de la fréquence m , le spectre peut être décalé de m dans la direction de la fréquence négative. La fenêtre gaussienne $G[n, m]$ peut ensuite être évaluée, et la distribution S est calculée en utilisant la transformée de Fourier inverse.

L'algorithme de mise en œuvre peut être simplifié par la figure suivante (Fig. 01) :

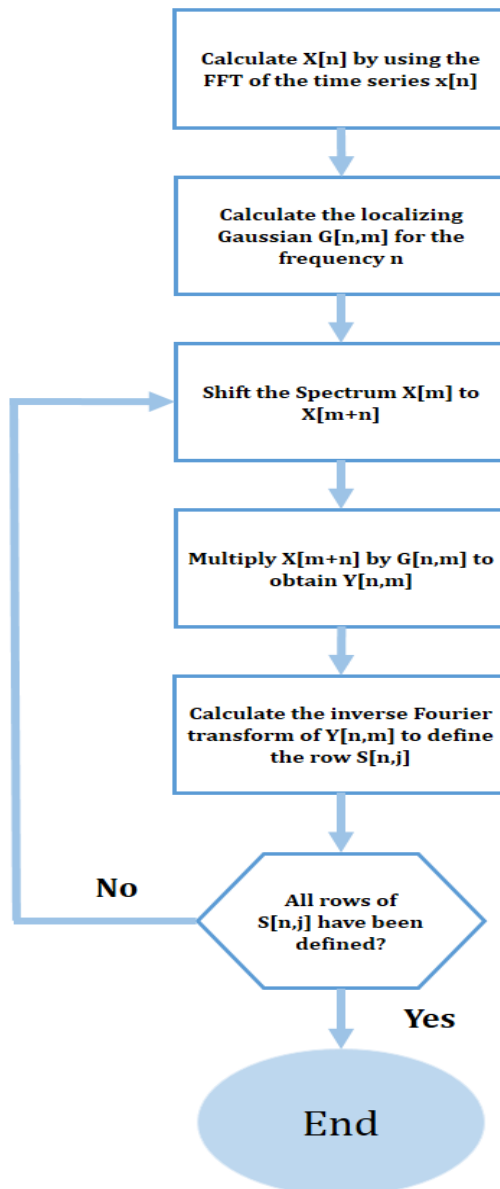


Figure 01 : Organigramme de la transformée en S
(D'après Moukadem et al., 2013)

II.4 Auto-aliasing

Avant de clarifier l'auto-aliasing (*Seft-aliasing*), nous introduisons d'abord le concept et la définition de la «voie gaussienne». La voie gaussienne est le spectre de Fourier de la fenêtre gaussienne à un n spécifique. À partir de l'équation (72), toute voie de la transformation S peut être calculée comme le produit du spectre de Fourier $X [m / NT]$ de la série temporelle et de la voie gaussienne. Comme on peut le voir dans l'équation (72), la voie gaussienne est :

$$G(m, n) = e^{-\frac{m^2}{2\left(\frac{n}{2\pi}\right)^2}} \quad 75$$

Nous avons vu que le spectre discret est périodique à cause de l'échantillonnage dans le domaine temporel. Ainsi, l'auto-aliasing se produit lorsque n / NT s'approche de la fréquence de Nyquist $1 / 2T$, la voie gaussienne se superpose aux fréquences négatives de $X [m / NT]$ ou lorsque la voie gaussienne devient assez large aux hautes fréquences. Pour minimiser l'effet de l'auto-aliasing, la première méthode consiste à définir une fréquence de Nyquist spéciale pour la transformation S en tant que S_N . Comme la voie gaussienne est centrée sur le nœud S_N , le point 2σ est situé à la fréquence de Nyquist de Fourier f_N (Stockwell et al., 1996). On peut écrire :

$$S_N + 2\frac{S_N}{2\pi} = f_N \quad 76$$

Par conséquent, la fréquence d'échantillonnage minimale T_s est :

$$T_s = \frac{\pi + 1}{2\pi f_N} \quad 77$$

La deuxième méthode utilise le signal analytique de la série temporelle pour la localisation, les fréquences négatives étant mises à zéro. Ainsi, il n'y a pas d'auto-aliasing (Yu-Hsiang, 2010).

II.5 Transformée en S généralisée

L'équation (42) a été définie sous l'hypothèse que la largeur σ de la fonction de modulation Gaussienne est proportionnelle à l'inverse de la fréquence. La fonction fenêtre Gaussienne dans l'équation (38)

avec

$$\sigma = \frac{k}{f} \quad 78$$

Normalement k est égale à l'unité comme indique dans la définition (38), fournissant approximativement un cycle de sinus et cosinus modulé. Néanmoins, k peut prendre des valeurs supérieures à l'unité dans le but d'augmenter la

résolution en fréquence, mais entraînant une perte de résolution temporelle correspondante. Ainsi, l'expression (40) légèrement modifiée devient :

$$S(\tau, f, K) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{\left| \frac{f}{k} \right|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2k^2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad 79$$

L'inverse peut aussi être trouvé par l'équation (46).

La transformée S généralisée peut également être obtenue par la transformée de Fourier donnée par :

$$S(\tau, f, K) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\alpha + f) \omega(\alpha, f, K) e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad 80$$

La fenêtre de transformation S doit remplir quatre conditions.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Re \{ \omega(\tau, f, K) \} d\tau = 1 \quad 81$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Im \{ \omega(\tau, f, K) \} d\tau = 0 \quad 82$$

$$\omega(\tau - t, f, K) = [\omega(\tau - t, -f, K)]^* \quad 83$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \Phi(\tau - t, f, K) |_{t=\tau} = 0 \quad 84$$

Les deux premières assurent que, lorsqu'elle est appliquée à tous les τ , la transformation S converge vers celle de Fourier (Stockwell et al., 1996) :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f, K) d\tau = X(f) \quad 85$$

La troisième condition permet d'assurer la propriété de symétrie entre les formes de la fonction d'analyse de la transformée S aux fréquences positives et négatives.

II.6 Scalogramme de la transformée en S

Une transition normale entre la transformée en S qui est une transformation linéaire et la distribution d'énergie TF (Temps Fréquence) correspondante est le carré de l'amplitude de la matrice S ; appelé scalogramme de ST, qui est une transformation quadratique (Cheng et al., 2010, Moukadem et al., 2013). Le spectrogramme ST peut être considéré comme une variation des distributions de classes de Cohen avec une fonction du noyau dépendante de la fréquence (Cheng et al., 2010). Il vérifie la propriété de non-négativité souhaitable pour une interprétation physique et rend possible la fameuse mesure de complexité de l'entropie de Shannon, ce qui n'est pas le cas du WVD par exemple (Cheng et al., 2010, Moukadem et al., 2013).

En considérant le module au carré de la transformée S ou du scalogramme ST, la distribution de l'énergie du signal est obtenue dans le plan TF. Le scalogramme ST est donné comme :

$$|S_x(t, f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \omega(\tau - t) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \right|^2 = S_x(t, f) \cdot S_x^*(t, f) \quad 86$$

Ce spectrogramme peut aussi être moyenné soit en temps, soit en fréquence entraînant alors une légère perte d'information. D'une part, l'opération de moyenne en temps donne la répartition de la variance du signal à travers les fréquences en donnant le « **spectre global** ». D'autre part, l'opération de moyenne à travers les échelles permet l'identification temporelle d'une composante particulière du signal.

II.7 Analyse croisée

Par analogie avec le co-spectre de Fourier et le co-spectre en ondelettes (Chettih, 2006), on peut définir un co-spectre en S $ST_{xy}(t, f)$ entre deux signaux $x(t)$ et $y(t)$:

$$ST_{xy}(t, f) = S_x(t, f) \cdot S_y^*(t, f) \quad 87$$

où $S_x(t, f)$ et $S_y^*(t, f)$ sont respectivement les coefficients de la transformée en S de $x(t)$ et les coefficients de la transformée en S conjugués de $y(t)$.

Les méthodes de prises de moyennes à la fois dans le temps et sur les fréquences appliquées sur les spectres en S sont aussi applicables dans le cadre du co-spectre en S pour la répartition de la variance entre les signaux $x(t)$ et $y(t)$ à travers les fréquences. Une autre information, toujours par analogie (Liu, 1995) par rapport à l'analyse de Fourier ou à l'analyse en ondelettes pour

l'analyse en S sur la relation entre les signaux de type temps-continu peut être extraite de la fonction de cohérence en S définie par :

$$\Gamma(t, f) = \frac{ST_{xy}(t, f)}{\sqrt{ST_{xx}(t, f)ST_{yy}(t, f)}} = \rho_{xy}(t, f)e^{i\Phi_{xy}(t, f)} \quad 88$$

Il faut noter que le module de la fonction de cohérence en S ρ_{xy} est toujours égal à 1 par construction quel que soit la fréquence f ; et le temps d'observation t .

Afin d'identifier temporellement les intervalles de temps où la relation Entrée-Sortie ($x - y$) est forte, les parties réelles et imaginaires de la fonction Γ seront représentées, ainsi que la fonction de phase Φ_{xy} (Chettih, 2006)

Chapitre III

Analyse Temps-Fréquence des pluies et des Indices d'oscillations climatiques

Chapitre III

Analyse Temps-Fréquence des pluies et des Indices d'oscillations climatiques

III.1 Introduction

La variabilité climatique de ces dernières décennies peut être expliquée par la modification de la composition chimique de l'atmosphère causée l'action anthropique, elle pourrait être aussi due aux fluctuations naturelles à basse fréquence du climat. Ces variabilités et ces tendances observées sont soumises à l'influence de ce que l'on appelle des téléconnexions, c'est-à-dire des oscillations océaniques et atmosphériques à grande échelle.

Le présent chapitre présente les résultats du traitement de l'analyse des séries pluviométriques et des indices d'oscillations océaniques et atmosphériques à l'aide des méthodes Temps-Fréquence. On présentera dans un premier temps les résultats obtenus par les méthodes préliminaires de Gabor, STFT et WT, ainsi que quelques représentations Temps-Fréquence de la classe de Cohen : Wigner-Ville, Choi-Williams, Born-Jordan et Bessel. Dans la deuxième partie de ce travail, on s'attachera à présenter les résultats de l'analyse de la Transformée de Stockwell en vue de mieux comprendre l'évolution temporelle à long et à court terme de la variabilité hydro-météorologique de la région d'étude, suivie par des analyses croisées Pluies-Indices, dans le but de montrer l'influence des Téléconnexions sur le régime pluviométrique en Algérie du Nord.

III.2 Présentation de la région d'étude

III.2.1 Situation géographique

L'Algérie septentrionale d'une superficie de 150 000 km² environ est limitée au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par l'Atlas Saharien. Elle occupe la partie centrale des Atlas. C'est un pays de montagnes basses et moyennes, de hautes plaines et de plateaux. L'altitude moyenne ne dépasse pas 900 m. La partie côtière est occupée par des plaines basses petites et d'anciens massifs cristallins très démembrés. En limite Sud se trouve le système montagneux de l'Atlas Tellien, dont certains sommets atteignent ou dépassent 2000 m d'altitude. Ces montagnes sont coupées de gorges profondes où s'intercalent d'importantes cuvettes.

Plus au Sud, s'étend la région des hauts-plateaux atteignant 800 à 1200 m d'altitude. Dans les parties les plus basses de ces derniers, s'encastrent les Chotts. Au sud les hauts plateaux sont encadrés par les chaînes de l'Atlas Saharien et par le massif des Aurès, dont certains sommets dépassent 2300 m d'altitude (Djoudi, 2018).

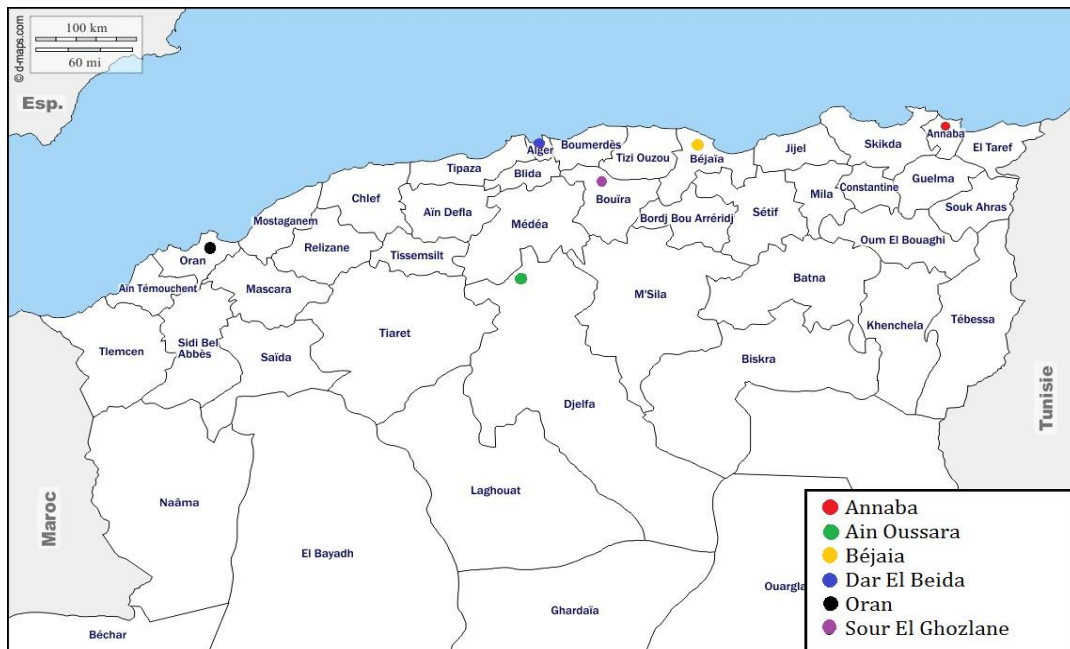


Figure 02 : Situation des sites d'étude

III.2.2 Climatologie

Le climat de l'Algérie du Nord est subtropical méditerranéen, se caractérise par un été très chaud et sec et un hiver relativement chaud et pluvieux. Dans les hauts-plateaux le climat est plus sec et plus continental. Le facteur prédominant dans la formation de l'écoulement des cours d'eau est évidemment les

précipitations, qui sont très irrégulières durant l'année. L'altitude et l'orientation des chaînes montagneuses vis-à-vis des vents dominants, l'éloignement de la mer et la nature de la couverture végétale ont une grande influence sur les précipitations et leur répartition spatiale. C'est pour cela que les précipitations moyennes annuelles en Algérie septentrionale varient très fortement d'une région à l'autre. Elles s'échelonnent de 1600 voire 1900 mm sur les cimes des montagnes de grande et petite Kabylie et jusqu'à 200 mm dans les régions intérieures du pays. En hiver, une petite partie de ces précipitations tombe sous forme de neige. Son épaisseur n'est jamais importante mais peut atteindre 30 cm et plus en montagne. Les températures moyennes annuelles de l'air sont de l'ordre de 18°C dans les régions côtières et de 14°C plus au Sud. Le couvert végétal naturel est méditerranéen ou semi-désertique et obéit à la loi de l'étagement en montagne (Djoudi, 2018).

III.3 Présentation des données

III.3.1 Précipitations

Dans ce travail nous nous intéressons aux données pluviométriques de l'Algérie Septentrionale au pas mensuel pour les stations d'Annaba, Dar El Beida, Oran et Aïn Oussara et au pas journalier pour les stations de Dar El Beida, Béjaia et Sour El Ghozlane. Ces stations ont été choisies selon la disponibilité des données.

Le tableau ci-dessous résume pour les stations pluviométriques citées précédemment les périodes d'observations, le type du pas d'échantillonnage, les coordonnées des stations et les sources ayant fournies ces données :

Tableau 02 : Stations d'observations et origines des données de pluies

Stations	Périodes	Type	Coordonnées	Sources
Annaba	1901-2015	mensuel	36.89° N - 7.79° E	
Dar El Beida	1901-2015	mensuel	36.54° N - 3.19° E	http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/
Oran	1901-2015	mensuel	35.69° N - 0.66° O	
Aïn Oussara	1901-2015	mensuel	35.48° N - 2.72° E	
Dar El Beida	1948-2009	journalier	36.54° N - 3.19° E	ANRH
Sour El Ghozlane	1973-2010	journalier	36.8°N-3.41°E	ANRH
Béjaia	1970-2012	journalier	36.72° N - 5.07° E	ONM

Les principales caractéristiques statistiques des pluies mensuelles sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 03 : Caractéristiques statistiques des pluies mensuelles.

Stations	Moyennes	Variances	Coef. Vari.	Min	Max
Annaba	54.3402	2.233.10 ³	0.8697	0	266.60
Dar El Beida	47.8459	2.128.10 ³	0.9642	0	334.60
Oran	31.0861	926.5115	0.9792	0	173.30
Aïn Oussera	34.8699	905.2414	0.8628	0	169.30

La figure(03) donne la répartition temporelle des pluies mensuelle pour les quatre stations.

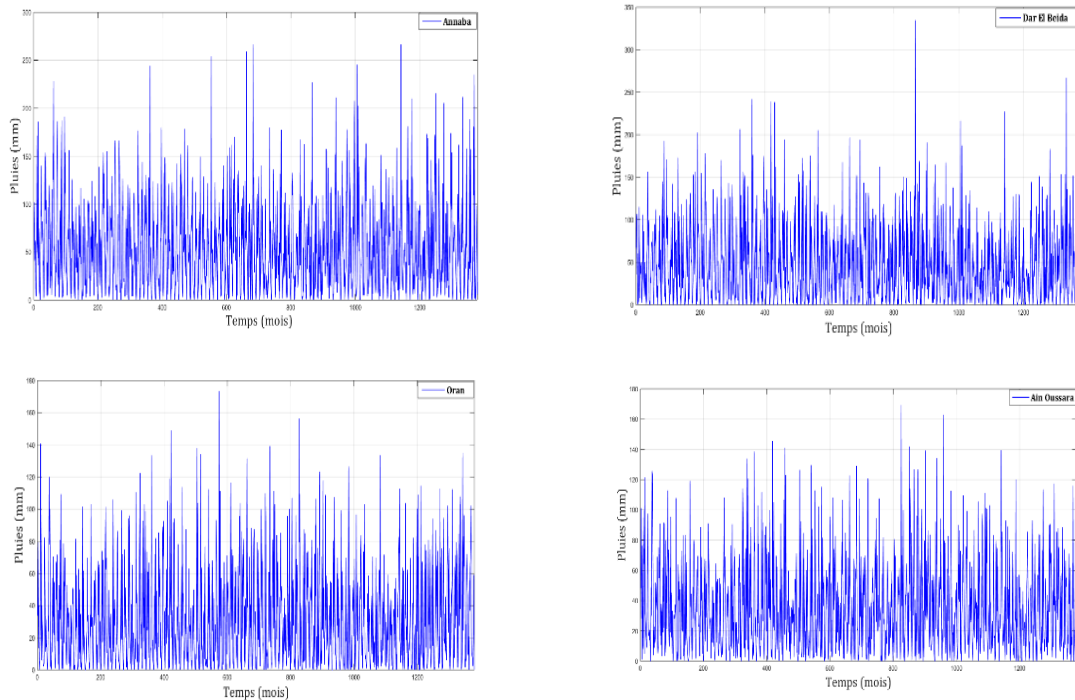


Figure 03 : Répartition des pluies mensuelles pour la période 1901-2015

Le tableau suivant regroupe les principales statistiques des pluies journalières :

Tableau 04 : Caractéristiques statistiques des pluies journalières

Stations	Moyennes	Variances	Coef. Vari.	Min	Max
Dar El Beida	1.8097	36.9221	3.3577	0	136.6
Bejaïa	2.1465	48.2040	3.2346	0	136.8
Sour El Ghozlane	1.1823	18.4262	3.6307	0	101.6

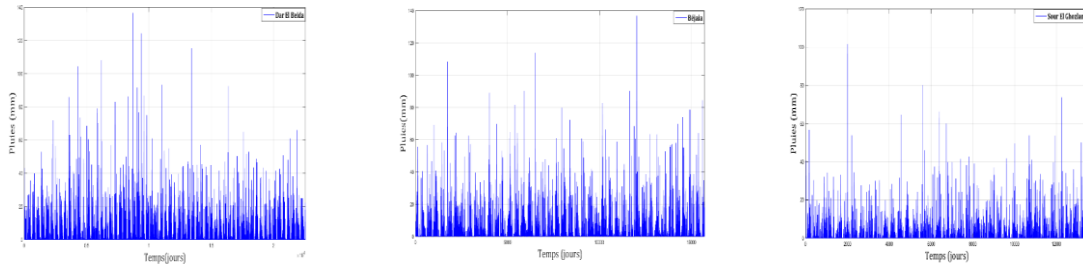


Figure 04 : Répartition des pluies journalières à travers le temps

III.3.2 Indices d'oscillation climatiques

Les indices climatiques représentent une différence de pression calculée entre deux points (un de haute pression et l'autre de basse pression). On va analyser ces indices climatiques afin d'expliquer la variabilité pluviométrique de la zone d'étude et pour voir leur influence sur les précipitations.

- **L'oscillation arctique**

L'Oscillation Arctique AO pour *Arctic Oscillation* ou l'oscillation de Nord-Atlantique est un modèle de variabilité des pressions atmosphériques des océans : Arctique et Nord-Atlantique, qui entraîne de grands changements météorologiques chaque année et chaque décennie.

Le climat arctique est très variable. L'indice AO nous donne des informations sur les phases naturelles de cette variation. Il nous informe sur les conditions météorologiques «normales» qui peuvent grandement varier au fil des décennies.

La zone d'effet ayant le plus grand effet en hiver (janvier, février et mars), l'indice est généralement représentée sous la forme de tendances du climat hivernal dans l'Arctique (enr.gov.nt.ca).

- **L'oscillation de l'est du Pacifique**

L'Oscillation de l'Est du Pacifique EPO pour *Eastern Pacific Oscillation Index* est une configuration dipolaire semblable à la NAO dans l'Atlantique, mais situé dans le Pacifique oriental. Les hauteurs / pressions / températures ont tendance à être plus hautes au nord et plus basses au sud dans la phase négative, plus basses au nord et plus hautes au sud dans la phase positive. La phase négative correspond au refroidissement généralisé sur le centre et l'est de l'Amérique du Nord et à la phase positive aux réchauffements (daculaweather.com).

- **l'Oscillation Méditerranéenne**

L'oscillation Méditerranéenne MO pour *Mediterranean Oscillation*, correspond au comportement opposé de la dynamique atmosphérique entre les sous bassins Est-Ouest de la Méditerranée. Le MO influence les précipitations dans le bassin méditerranéen (Maheras et al, 1999) , il est définie par (Conte et al. 1989) comme une différence de pression normalisée entre Alger (36.4°N, 3.1°E) et la Caire (30.1°N, 31.4°E). La MO peut être interprété par deux pressions de surface opposée (et hauteur géopotentielle), dans son mode positif par un anticyclone dans la Méditerranée occidentale et Iberia, et son mode négatif dans la Méditerranée orientale. La MO couvre principalement la dynamique atmosphérique de l'ensemble du bassin méditerranéen.

- **l'Oscillation Atlantique du Nord**

L'oscillation du Nord Atlantique NAO pour *North Atlantic Oscillation*. L'oscillation nord-atlantique à grande échelle correspond à la masse atmosphérique entre l'anticyclone subtropical (l'anticyclone des Açores) et la dépression polaire (Islande) dans la région de l'Atlantique Nord.

L'intensité de la NAO est généralement exprimée par un indice mesurant la différence entre la pression normalisé au niveau de la mer enregistrée dans l'Atlantique à haute latitudes (par exemple, Reykjavik, ou Akurejry, Islande) et faible latitudes (par exemple, Gibraltar ou Lisbonne / Ponta Delgada, Portugal). Les fluctuations du NAO sont des indicatives du transport, de la convergence de l'humidité atmosphérique (Hurrell 1995 in Zamrane, 2016) et des changements dans le régime de la température et des précipitations dans l'Europe.

- **Oscillation Décennale du Pacifique**

L'Oscillation Décennale du Pacifique PDO pour *Pacific Decadal Oscillation* est une mesure des températures de la surface de la mer du Pacifique Nord qui présente une très forte corrélation avec l'intensité de la dépression des Aléoutiennes (Mantua *et al*, 1997 in Bonsal et Shabbar, 2010). Les PDO positives sont caractérisées par des températures de la surface de la mer plus froides que la normale (c.-à-d. moyenne à long terme) dans la partie centre-est du Pacifique Nord et des températures de la surface de la mer plus chaudes le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, et vice versa.

Le PDO déplace la trajectoire des systèmes météorologiques de manière cyclique sur une période de plusieurs décennies (20 à 30 ans) (btb.termiumplus.gc.ca).

- **Téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord**

Le régime de la téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord PNA pour *Pacific North American* représente une structure d'ondes de la haute atmosphère présentant une séquence d'anomalies de haute pression et de basse pression s'étirant de la partie subtropicale du Pacifique Ouest jusqu'à la côte est de l'Amérique du Nord. La phase positive de la PNA présente une haute pression anormale près d'Hawaii et au-dessus de la partie occidentale du Canada, et des pressions inférieures à la moyenne dans les parties du centre et de l'est du Pacifique Nord (c.-à-d. une dépression des Aléoutiennes plus prononcée que la normale) et au-dessus du sud-est des États-Unis (Bonsal et Shabbar, 2010).

- **Indice d'Oscillation Australe**

L'Indice d'Oscillation Australe SOI pour *Southern Oscillation Index* : le terme oscillation australe a été introduit la première fois par Gilbert Walker 1923, 1924, 1931, pour décrire un ensemble complexe de relations climatologiques dans l'océan Indien et le Pacifique. La circulation est-ouest associée à l'oscillation australe est désignée comme circulation de Walker. Wright (1975) a indiqué que l'oscillation australe est une fluctuation de la circulation atmosphérique irrégulière d'une période allant de 3 à 5 ans. L'indice d'oscillation australe (SOI) est une mesure de la circulation de Walker qui l'emporte sur le secteur de l'océan indien/ Pacifique (Pant et Parthasarathy, 1981).

C'est le principal mode de variabilité de la pression dans les tropiques et influence le climat de nombreuses régions du monde. Le SOI est un phénomène de l'échelle planétaire, associés aux grandes variations interannuelles de la température de surface, des précipitations et de la force du vent sur une grande partie du Pacifique (Zamrane, 2016).

- **l'Oscillation Méditerranéenne de l'Ouest**

L'Oscillation de la Méditerranée Occidentale WEMO pour *Western Mediterranean Oscillation index* est définie que dans le cadre du bassin occidental de la Méditerranée et de ses alentours.

Le WEMO, a été définie la première fois par Martin vide et Lopez Bustin (2006), comme étant la différence des valeurs normalisées des pressions au niveau de la mer entre Cadix-San Fernando (Espagne) et Padoue (Italie).

- **L'Oscillation Pacifique Occidentale**

L'Oscillation Pacifique Occidentale WPO pour *Western Pacific Oscillation* : la variabilité de WPO, principalement sur des échelles de temps de sous-saison, se caractérise par un dipôle méridional à grande échelle dans la SLP (sea level pressure) et la hauteur géopotentielle sur le Pacifique .Il est liée aux

mouvements méridiens des jets Asie-Pacifique et la modulation de trajectoire tempête dans le Pacifique (Linkin, 2007).

● **Présentation des données des Indices climatiques**

Dans ce travail nous nous intéressons aux indices : NAO, PDO, SOI, WEMO au pas mensuel, AO, EPO, MO, NAO, PNA, SOI, WPO au pas journalier.

- **Les indices d'oscillation climatiques mensuels**

Le tableau (05) ci-dessous résume les sources des données et les périodes des indices d'oscillation climatiques mensuels.

Tableau 05 : Description des indices mensuels

Indices	Période	Source
NAO	1901-2015	Climatic Research Unit, University of East Anglia https://climatedataguide.ucar.edu/sites/default/files/nao_station_monthly.txt
PDO	1901-2015	http://www.esrl.noaa.gov/psd/
SOI	1901-2015	Climatic Research Unit, University of East Anglia https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/
WEMO	1901-2015	Group of Climatology-university of Barcelona -Javier Martin-Vide And Joan-Albert Lopez-Bustins (Spain) http://www.ub.edu/gc/English/wemo.htm

Les principales caractéristiques statistiques des indices mensuelles sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 06 : Caractéristiques statistiques des indices mensuels

Stations	Moyennes	Variances	Coef. Vari.	Min	Max
NAO	0.0709	2.9500	24.2305	-4.7	6.6
PDO	0.0241	1.0831	43.2598	-3.6	3.51
SOI	-0.1254	3.1565	-14.1723	-7.6	5.3
WEMO	0.1458	1.4634	8.2943	-4.29	4.18

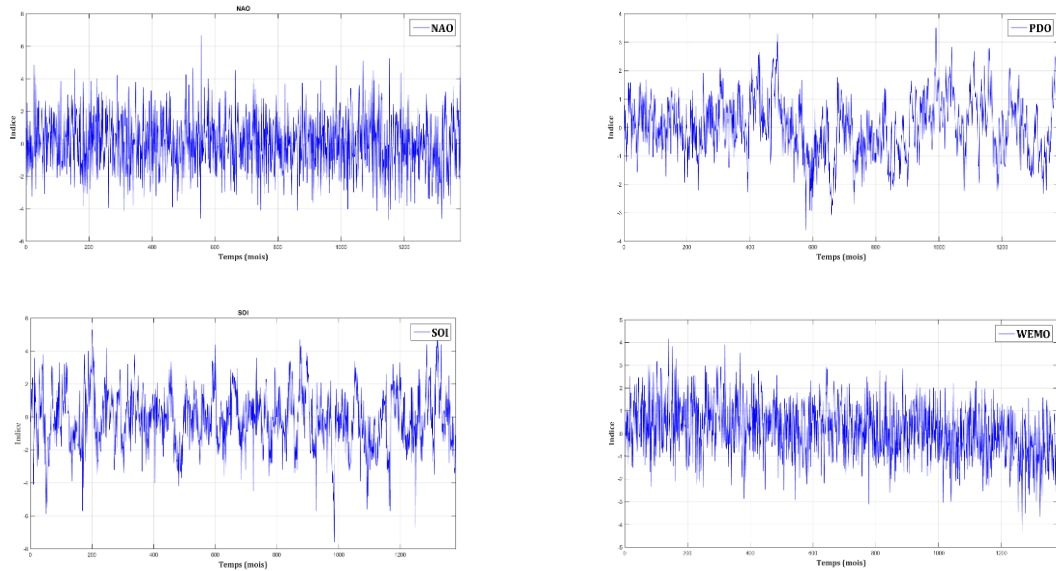


Figure 05 : Répartition des Indices mensuelles (1901-2015)

- Les indices d'oscillation climatiques journaliers

Le tableau (07) ci-dessous résume les sources des données et les périodes des indices d'oscillation climatiques journaliers.

Tableau 07 : Description des indices journaliers

Indices	Période	Sources
AO	1950-2019	ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks/
EPO	1948-2019	http://www.esrl.noaa.gov/psd/
MO	1948-2016	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/moi/moi1.output.dat
NAO	1948-2019	http://www.esrl.noaa.gov/psd/
PNA	1948-2019	
SOI	1991-2019	
WPO	1948-2019	ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Public/gbates/teleconn/wpo.reanalysis.t10trunc.1948-present.txt

Les principales caractéristiques statistiques des indices journaliers sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 08 : Caractéristiques statistiques des indices journaliers

Stations	Moyennes	Variances	Coef. Vari.	Min	Max
AO	-0.1154	2.0402	-12.3764	-7.433	5.911
EPO	1.2979	1.2722.10 ⁴	86.9070	-504.39	474.33
MO	-0.0186	0.9959	-53.7697	-5.138	3.55
NAO	-4.7128	1.4355.10 ⁴	-25.4230	-564.29	433.56
PNA	-11.1342	2.8963.10 ⁴	-15.2848	-707.32	630.62
SOI	-1.1890	250.2278	-13.3046	-85.72	74.55
WPO	-0.4688	7.8575.10 ³	-189.0728	-431.73	341.26

La figure 06 représente la répartition de l'indice MO au pas journalier. Il serait intéressant de voir l'influence du MO et les autres indices sur les pluies en Algérie. La répartition temporelle des autres indices utilisés sont présentées dans la figure 07.

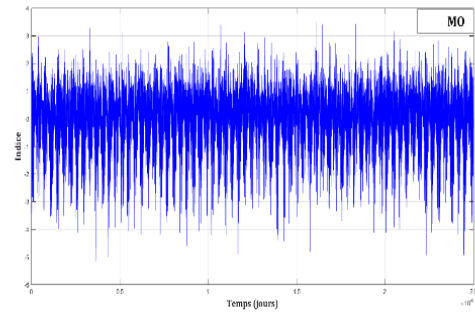


Figure 06 : Répartition de l'indice d'oscillation Méditerranéenne au pas journalier (1948-2016)

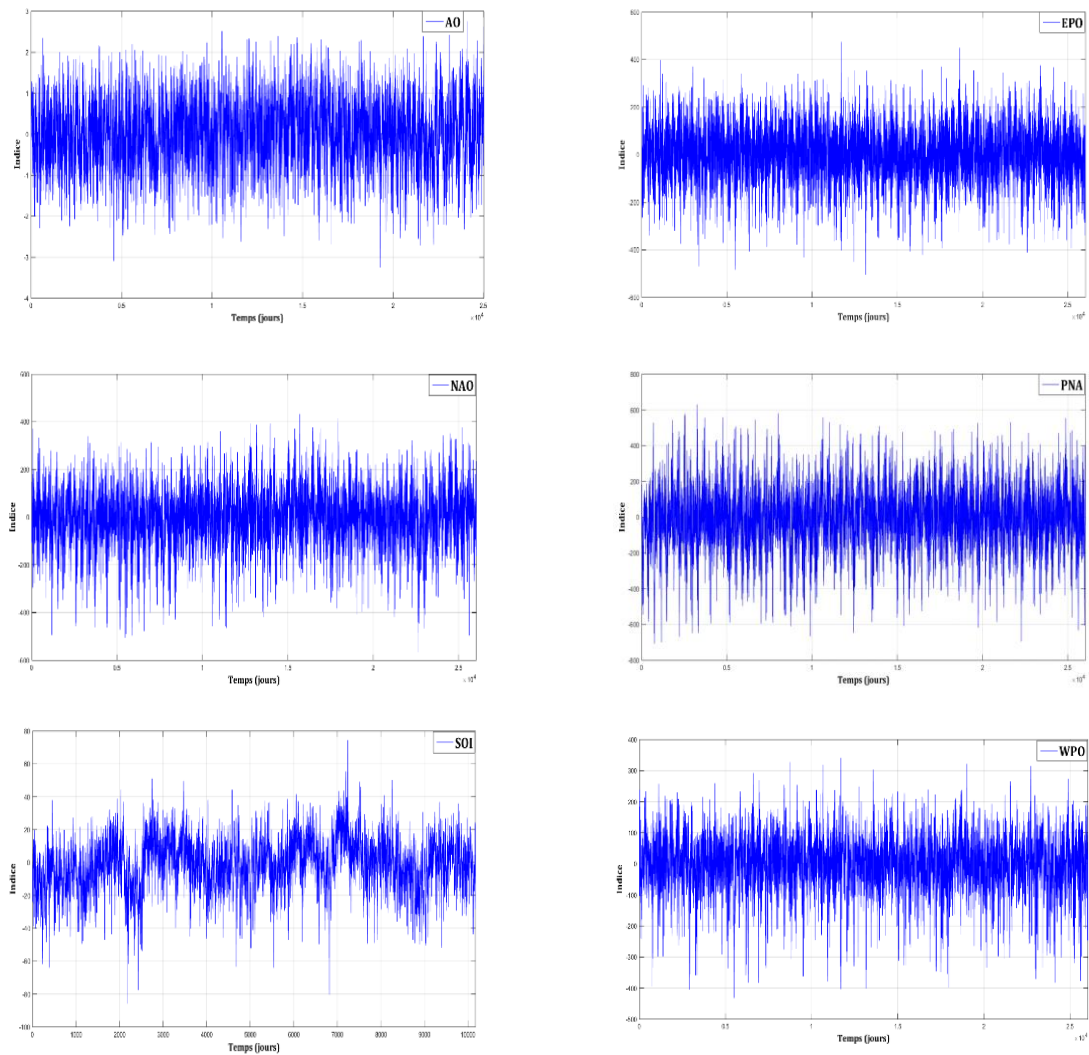


Figure 07 : Répartition des Indices d'oscillations climatiques journaliers

III.4 Résultats et interprétation

Nous avons obtenus énormément de résultats sous formes de spectres ou diagrammes, et afin de respecter le nombre de page du mémoire, nous présenterons les résultats par exemple pour les pluies uniquement ceux de la station de Dar El Beida qui sera considérée comme « *station de référence* » ses résultats seront décrit dans le texte, pour les résultats des autres stations qui sont très semblables à ceux de la station de Dar El Beida, ils seront reportés en annexes. Par contre, pour les indices, les résultats sont très différents, ils seront présentés séparément.

III.4.1 Analyses préliminaires

III.4.1.1 Gabor

Dans un premier temps nous avons utilisé la transformation de Gabor, qui est un cas particulier de la STFT, avec une fenêtre synthétique Gaussienne suggérée par Gabor.

La Figure (08) présente les résultats obtenus par l'application de cette transformation sur les pluies à Dar El Beida et sur les indices NAO et MO au pas mensuel.

Pour les pluies à Dar El Beida (Fig. 08 a), la représentation de Gabor montre clairement la fréquence 0.083 correspondant à la composante annuelle. Le spectre est également bruité par des phénomènes d'interférence et un aliasing à faibles fréquences.

Concernent les autres stations, Annaba, Oran et Aïn Oussara, leurs résultats sont regroupés en Annexes (Annexes I.1 et I.2), nous avons constaté pour ces stations le même comportement que celui des pluies de la station de Dar El Beida.

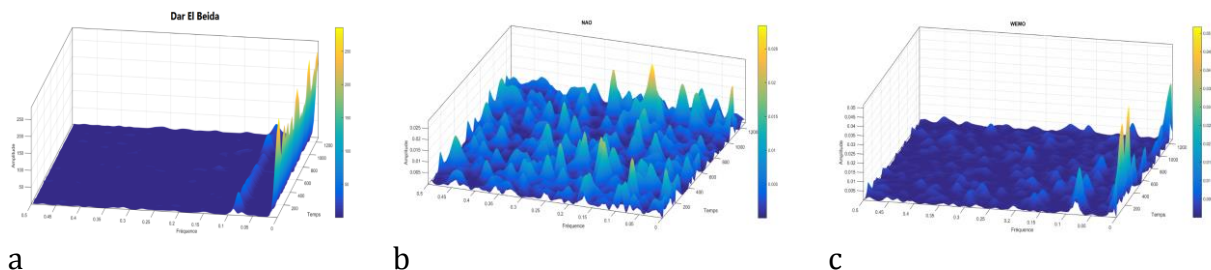


Figure 08 : Scalogrammes en 3D par la Distribution de Gabor, a :Dar El Beida, b : NAO et c : WEMO.

Pour l'Indice d'Oscillation Nord-Atlantique (NAO), la figure (08.b) montre plusieurs fréquences qui apparaissent à travers le temps mais d'une façon très

discontinue et épars, sans pour autant avoir une structure marquante et caractéristique, ceci est également visible pour la représentation en 2D (Annexes I.3). Pour le WEMO figure (08.c), on observe une certaine structure aux alentours de la fréquence 0.0833 à travers la première partie du temps avec une suite discontinue dans la dernière partie du temps (Annexes I.3).

Pour les indices PDO et SOI (Annexes I.3 et I.4), les basses fréquences (égales et inférieures à 0.05) sont les plus dominantes, aucune autre fréquence n'est visible.

III.4.1.2 STFT

Les figures (09, 10 et 11) présentent les résultats du calcul du STFT obtenues pour les pluies mensuelles à Dar El Beida et les indices mensuels (NAO, WEMO) en utilisant la transformée de Fourier à fenêtre glissante avec une fenêtre de lissage de type Hamming.

Le spectre de puissance pour les pluies mensuelles à Dar El Beida (Fig. 09) met en évidence uniquement la composante annuelle. Les scalogrammes 2D et 3D (Annexe II.1) montrent la même constatation. Ceci est également visible pour les autres stations.

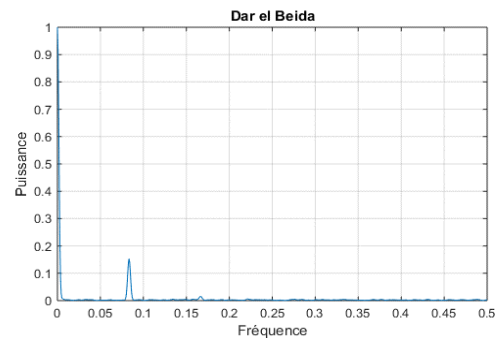


Fig.09 :- Spectre de puissance des pluies à Dar El Beida

Pour le NAO, la figure 10 montre plusieurs composantes les plus importantes sont : la composante annuelle et la composante semestrielle avec des ruptures à travers le temps très bien visibles sur les représentations en 2D et 3D (Annexe II.2). Une autre composante de fréquence 0.3181 correspondant à un cycle de 3 mois bien visible.

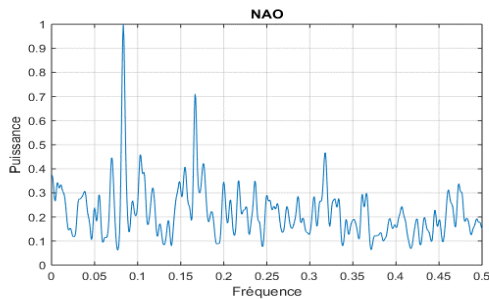


Fig. 10 :- Spectre de puissance du NAO

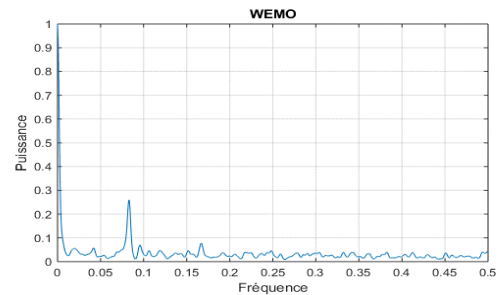


Fig. 11 :- Spectre de puissance du WEMO

Pour l'indice d'Oscillation Méditerranéenne Occidentale WEMO, la composante annuelle est clairement remarquable et bien individualisée sur le

spectre de puissance (Fig. 10). Sur les spectrogrammes 2D et 3D (Annexe II.2) cette composante est visible mais la composante semestrielle est très faiblement lisible. Pour le PDO et SOI les faibles fréquences sont les plus manifesté, avec une composante annuelle remarquable concernant le PDO.

Cependant, la STFT a une représentation spectrale robuste et lissée, mais pour obtenir une résolution temporelle suffisante à haute fréquence, elle souffre d'une résolution de fréquence souvent médiocre à basse fréquence (Hamnane, 2005).

On peut noter un inconvénient majeur de la STFT, en effet, la fenêtre est de longueur fixe ce qui est un handicap important lorsqu'on veut traiter des signaux dont les variations peuvent avoir des ordres de grandeur très variable (Hamnane, 2005) comme c'est le cas des signaux hydrologiques.

III.4.1.3 Transformée en Ondelettes (WT)

L'analyse des signaux hydrologiques par la transformation en ondelettes, nous donne les résultats illustrés dans les figures (12, 13 et 14) ainsi que les résultats en annexes III.1 et III.2.

Pour les pluies à Dar El Beida la figure (12) met nettement en évidence la composante annuelle sur le spectre global en ondelettes. Sur les scalogrammes en 2D et 3D en annexes III.1 nous constatons la composante annuelle ainsi que d'autres composantes mais d'une façon discontinue.

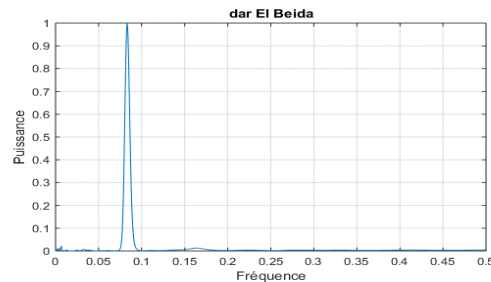


Fig. 12 : - Spectre Global en ondelettes des pluies mensuelles à Dar El Beida

Des composantes à grande échelle sont également visibles sur les scalogrammes en annexes III.1 mais d'une façon discontinue et qui correspondent aux cycles : 2-3 ans et plus de 10 ans.

Pour les autres stations Annaba, Oran et Aïn Oussera, on constate le même comportement sur les spectres globaux et sur les scalogrammes.

La composante annuelle est nettement visible pour le NAO et le WEMO sur les spectres globaux (Fig. 13 et 14). D'autres composantes sont également visibles pour le NAO et qui correspondent à celles de : 6-3 mois, 2-6 ans, 10-12 ans, et plus de 40 ans. Pour le PDO et SOI les basses fréquences sont les plus dominantes (Annexe III.2).

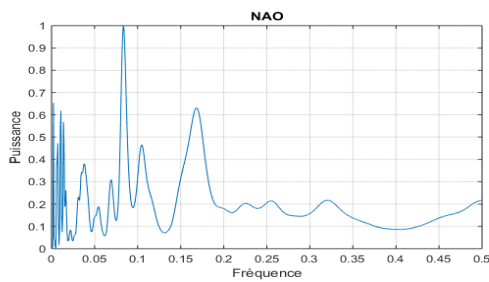


Fig. 13 : - Spectre Global en ondelettes du NAO

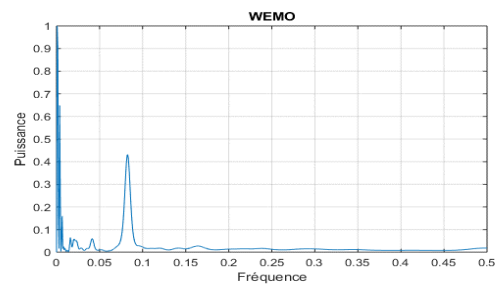


Fig. 14 : - Spectre Global en ondelettes du WEMO

III.4.2 Les classe de Cohen

III.4.2.1 Wigner-Ville

L'application de la distribution de Wigner-Ville pour les pluies et les indices d'oscillations climatiques a permis d'avoir les résultats illustrés par les figures (15, 16, 17, 18 et 19) et les annexes (IV.1, IV.2 et IV.3).

L'analyse des pluies mensuelles à Dar El Beida par la transformée de WV a montré les deux composantes : annuelle et semestrielle sur les scalogrammes 3D et 2D (Fig. 15 a et b) et sur le spectre global (Fig. 15 c). Cependant, sur le scalogramme en 2D ceci n'est pas très lisible en raison des termes supplémentaires dits termes d'interférences ; causées par la nature de représentation bilinéaire de la transformation de Wigner-Ville. Les mêmes constatations sont également remarquées sur les résultats de l'annexe (IV.1).

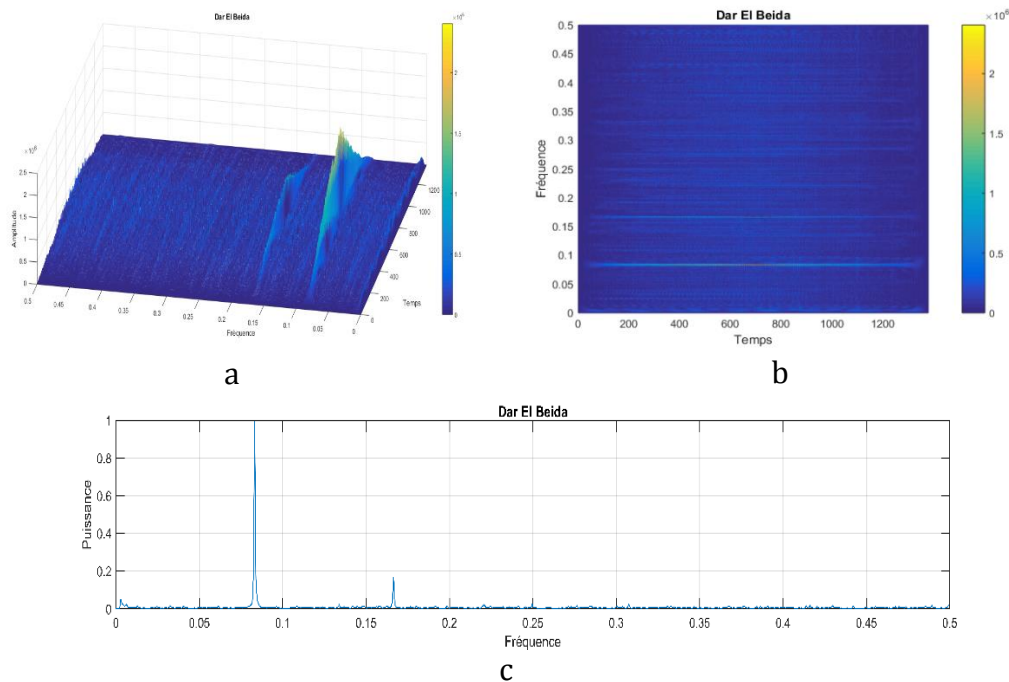


Figure 15 : Transformée de Wigner-Ville des pluies mensuelles à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global

Pour le NAO (Fig. 16), les composantes correspondant à 6 mois et à 1 an sont très peu visibles sur le spectre global (Fig. 16 c), mais aucune structure n'est nettement identifiable sur les scalogrammes (Fig. 16 a et b).

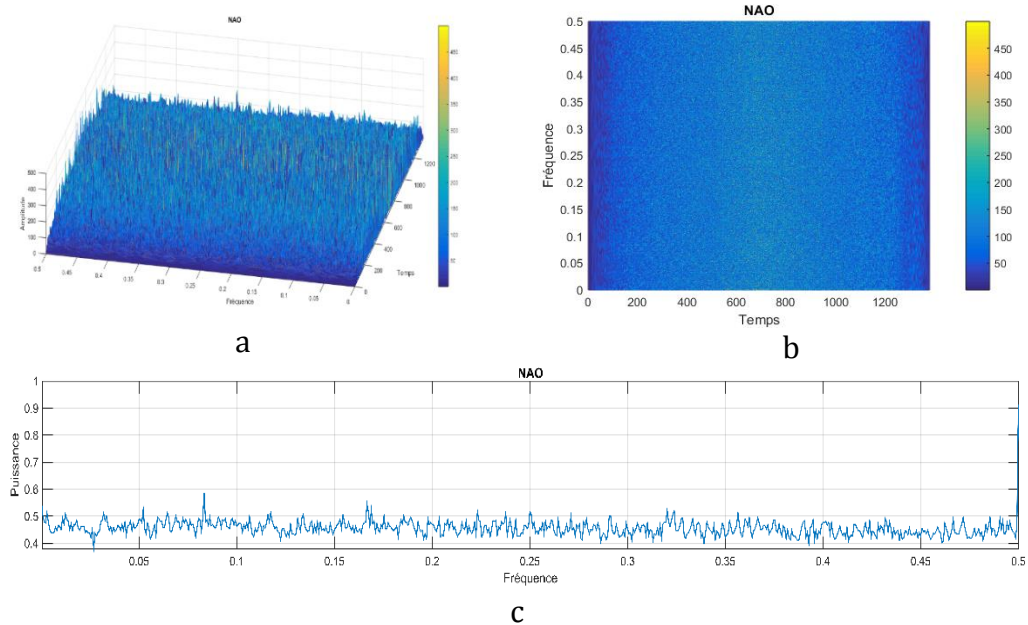


Figure 16 : Transformée de Wigner-Ville du NAO, a : scalogramme en 3D, b : scalogramme en 2D et c : spectre global

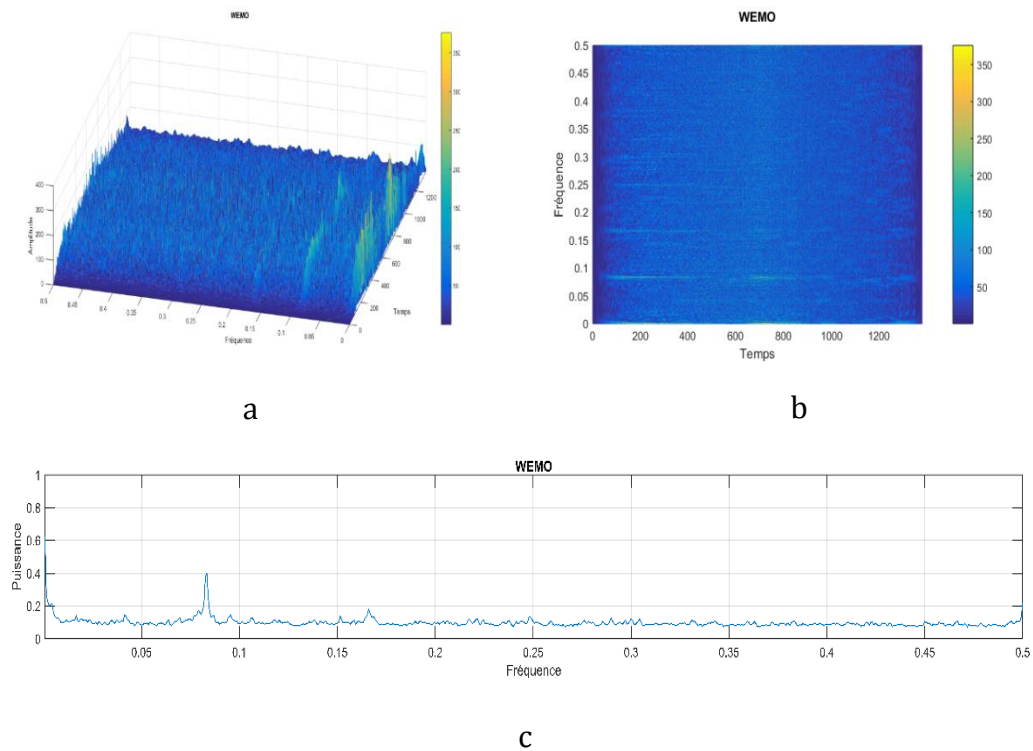


Fig. 17 : - Transformée de Wigner-Ville du WEMO, a : scalogramme en 3D, b : scalogramme en 2D et c : spectre global

Cependant, pour le WEMO (Fig. 17), la composante annuelle et la composante semestrielle sont visibles malgré l'intervention des termes d'interférences.

Pour le PDO et SOI, les fluctuations les plus spectaculaires sont ceux des fréquences inférieures à 0.05 (Annexes IV.2).

Quant à l'analyse des pluies journalières par la distribution de Wigner-Ville (Fig. 18), on constate que les scalogrammes (Fig. 18 a et b) mettent en évidence les composantes à basse fréquence et que les résultats seront probablement influencés par les valeurs de zéros des pluies. Cependant, le spectre global (Fig. 18 c) des pluies met nettement deux principales composantes : annuelle d'une fréquence de 0.0028 et semestrielle d'une fréquence de 0.0055.

Pour les pluies journalières à Bejaïa et Sour El Ghozlane leur comportement est semblable à celui de Dar El Beida (Annexe IV.3).

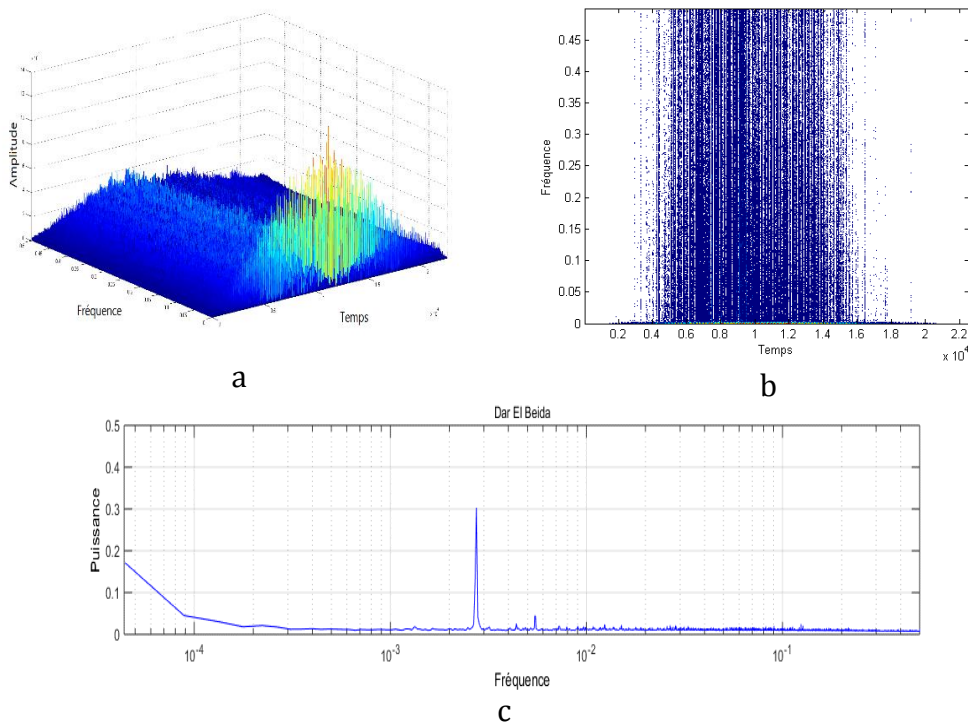


Figure 18 : Transformée de Wigner-Ville des pluies journalières à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global

Pour le MO, la figure (19) résume les résultats obtenus, elle montre des structures assez organisées pour les basses fréquences (Fig. 19 a et b). Sur le spectre global (Fig. 19 c) met trois principales composantes : annuelle d'une fréquence de 0.0028, semestrielle d'une fréquence de 0.0055 et une composante de quatre mois de fréquence de 0.0081. Une autre composante très faiblement manifestée de trois mois de fréquence 0.011.

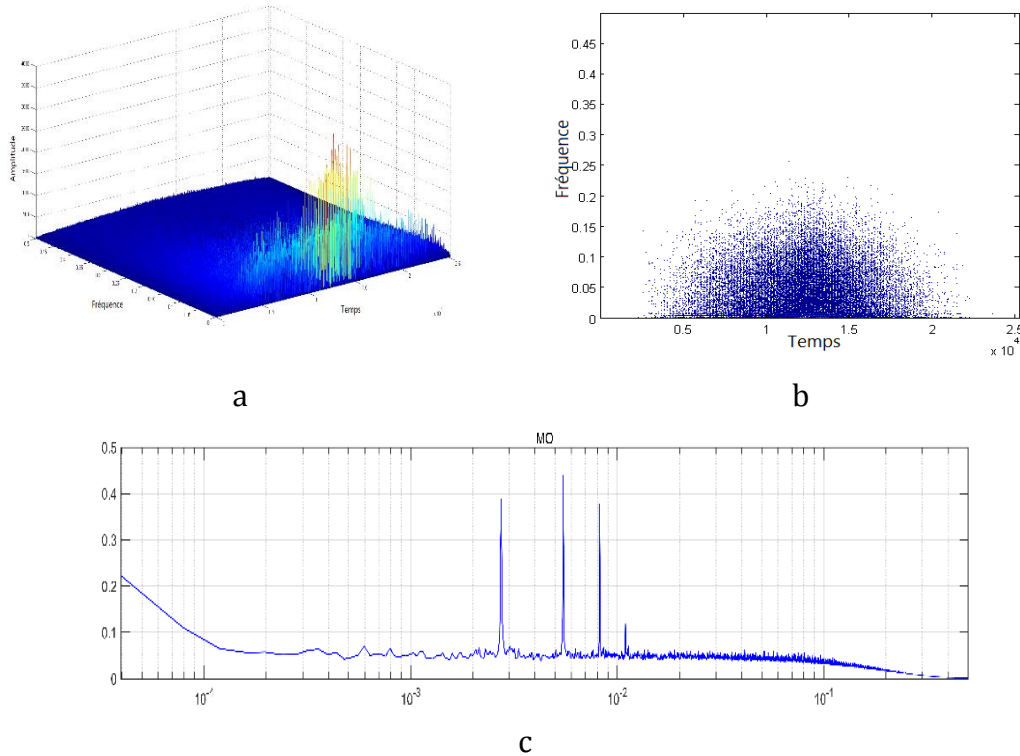


Figure 19 : Transformée de Wigner-Ville de l'indice MO au pas journalier a : scalogramme en 3D ; b : scalogramme en 2D et c : spectre global

III.4.2.2 Pseudo Distribution de Wigner-Ville Lissée

La Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée a été appliquée aussi pour les pluies et les indices au pas mensuel. La fenêtre choisie pour cette analyse est de type Kaiser pour le lissage en temps et en fréquence.

Pour les pluies à Dar El Beida, les résultats des traitements sont regroupés dans la figure (20, a, b et c). On note la nette visibilité des composantes : annuelle et semestrielle. Ce comportement est semblable à celui des stations d'Annaba, Oran et Aïn Oussera (Annexes V.1).

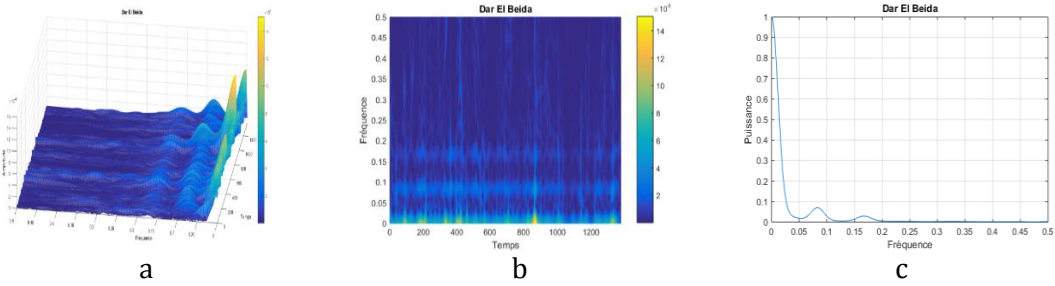


Fig. 20 : - Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Pour les indices climatiques NAO et WEMO, les résultats de l'analyse Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée sont regroupés dans les figures 21 et 22.

Pour le NAO, le scalogramme 3D (Fig. 21 a) montre une structure peu évidente ainsi que le scalogramme 2D (Fig. 21 b). Par contre le spectre global met nettement en évidence les cycles de 12 mois, 6 mois et 3 mois.

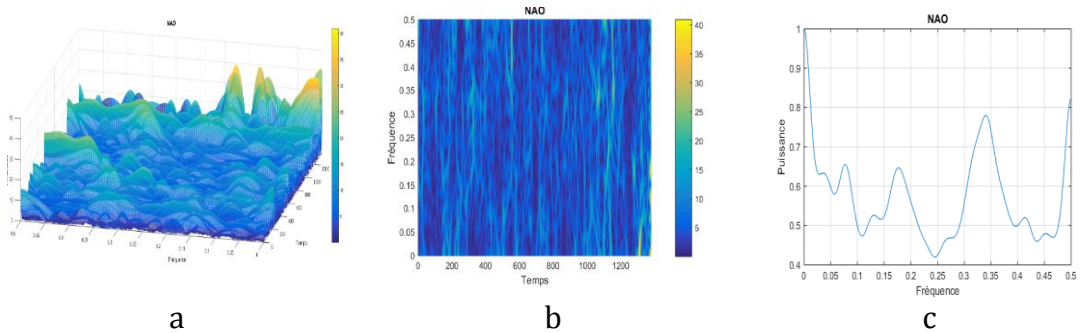


Fig. 21 : - Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée du NAO, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Pour le WEMO, les scalogrammes (Fig. 22 a, b) montrent des structures organisés mettant en évidences le cycle annuel et le cycle semestriel. Le spectre global (Fig. 22 c) les montre nettement. Pour le SOI et le PDO, ils ne mettent en évidence que les composantes à basse fréquence (Annexe V.2).

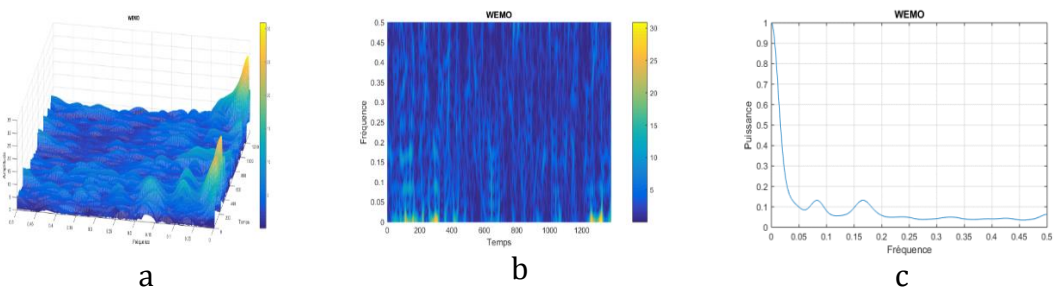


Fig. 22 : - Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée du WEMO, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

III.4.2.3 Distribution de Choi-Williams

Dans la Distribution de Choi-Williams une fenêtre de type Hamming a été choisie pour l'analyse des pluies et des indices avec un paramètre de contrôle de la fenêtre de lissage égal à 80. Les résultats d'analyse sont illustrés dans la figure (23) pour les pluies mensuelles et dans les figures (24) et (25) pour les indices. D'une manière générale, pour les pluies, les seules composantes visibles sont : la composante annuelle et la composante semestrielle (Fig. 23 c). Pour les autres stations Annaba, Oran et Aïn Oussera les résultats sont similaires en annexe VI.1.

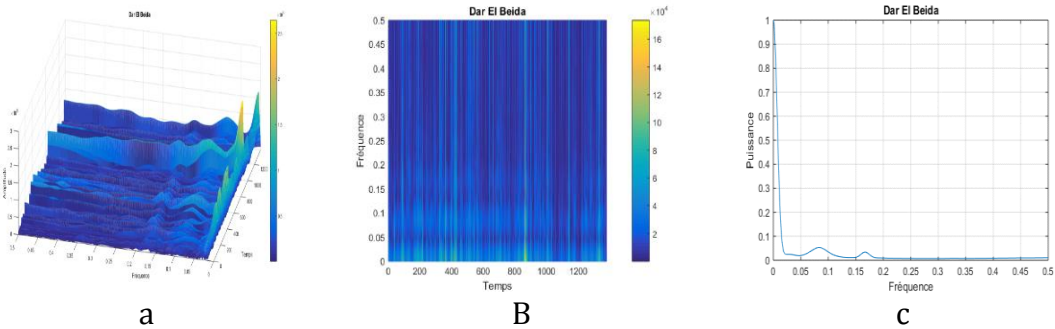


Fig. 23 : - Distribution de Choi-Williams des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Pour le NAO la seule représentation facilement lisible (Fig. 24 c) est celle du spectre global qui montre les composantes de 12 mois, 6 mois et 3 mois.

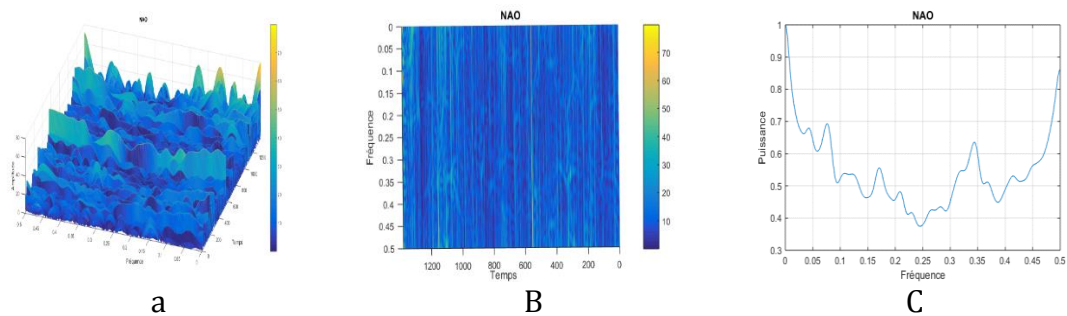


Fig. 24 : - Distribution de Choi-Williams du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Les composantes les plus visibles pour le WEMO sur le spectre global (Fig. 25 c) sont ceux du cycle annuel et du cycle semestriel. Elles sont identifiables sur les scalogrammes 3D et 2D (Fig. 25 a et b).

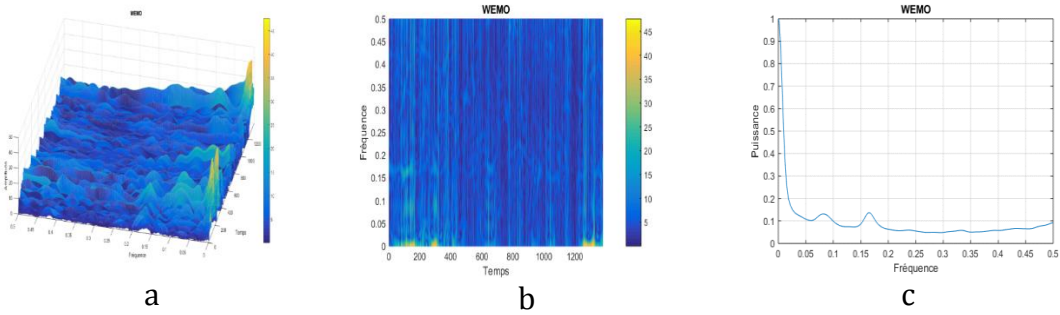


Fig. 25 : - Distribution de Choï-Williams du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

L'analyse via la Distribution de Choï-Williams pour le PDO et le SOI ne montre de structures que pour les basses fréquences (Annexe VI.2) qui pourraient s'agir d'interférences. Cependant, concernant la méthode de Choï Williams, le problème des interférences a été résolu par les auteurs, mais la résolution fréquentiel n'a pas donnée de résultat intéressant.

III.4.2.4 Distribution de Born-Jordan

L'analyse temps-fréquence des signaux hydrologiques par la distribution de Born-Jordan, a été réalisée avec une fenêtre de Kaiser, et les résultats sont visualisés dans les figures (26, 27, 28) et dans les annexes (VII.1 et VII.2).

Pour cette Distribution on constate les mêmes structures que les structures de la Distribution précédente. Les composantes les plus spectaculaires pour les pluies mensuelles sont celle du cycle annuel et celle du cycle semestriel (Fig.26 c).

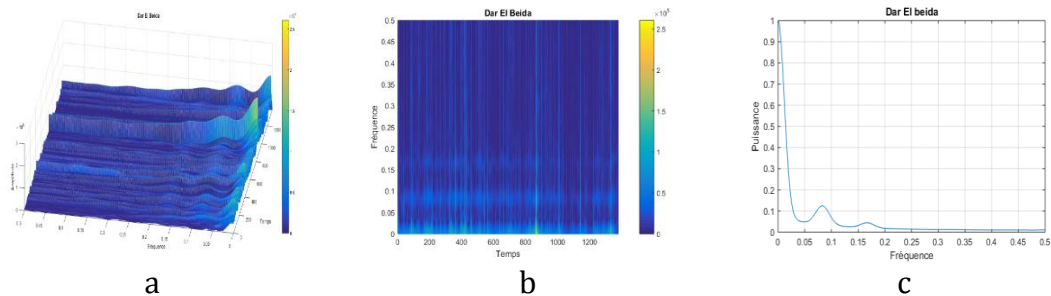


Fig. 26 : - Distribution de Born-Jordan des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

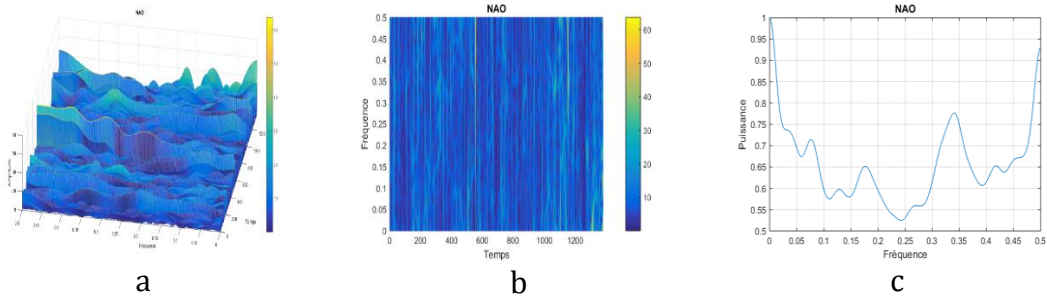


Fig. 27 : - Distribution de Born-Jordan du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

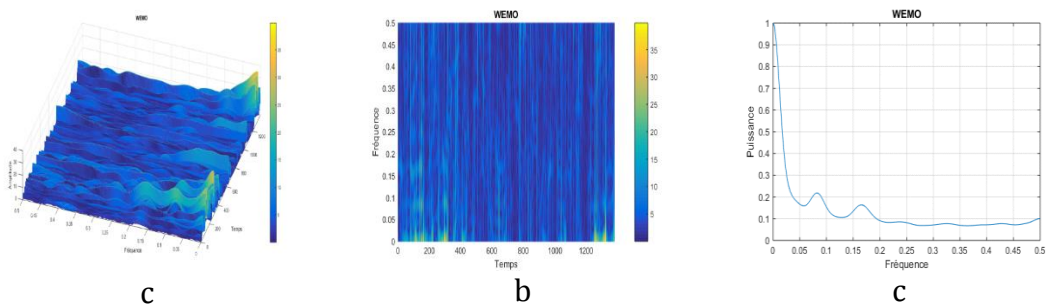


Fig. 28 : - Distribution de Born-Jordan du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

III.4.2.5 Distribution de Bessel

Une analyse temps fréquence par la distribution de Bessel a été appliquée aux pluies et aux indices d'oscillation climatiques au pas mensuel. Dans ce cas on a choisi la fenêtre rectangulaire.

Quant aux pluies des quatre stations on a remarqué sur les figures (29, 30 et 31) et sur l'annexe (VIII.1) que cette Distribution donne une bonne résolution particulièrement pour les basses fréquences, où nous remarquons plusieurs composantes qui correspondent aux cycles suivantes : 6 mois, 12 mois ainsi que d'autres à plus grandes échelles correspondant aux cycles : 2 ans et 4 ans.

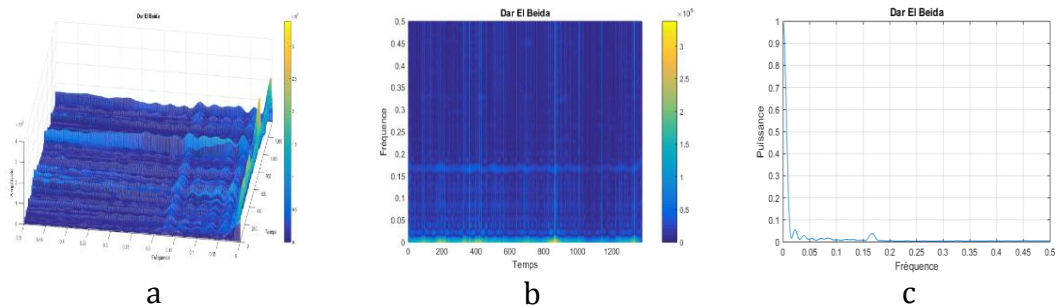


Fig. 29 : - Distribution de Bessel des pluies mensuelles, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

L'analyse par la Distribution de Bessel de l'indice NAO montre sur les scalogrammes (Fig. 30 a et b) des structures complexes et éparées, par contre le spectre global exhibe nettement les composantes de 4 ans, 1 an, 6 mois et 3-4 mois.

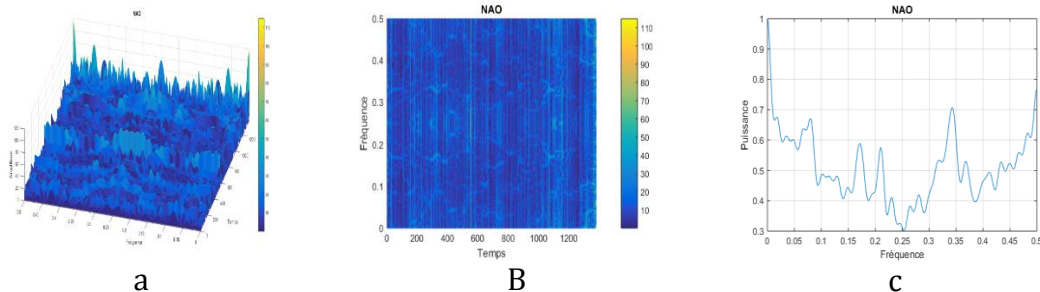


Fig. 30 : - Distribution de Bessel du NAO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Pour le WEMO, on peut voir qu'il y a une similitude impressionnante avec les pluies. Ceci est déjà révélateur de relation éventuelle entre les pluies et le WEMO à cette échelle. La composante la plus spectaculaire est celle du cycle semestriel.

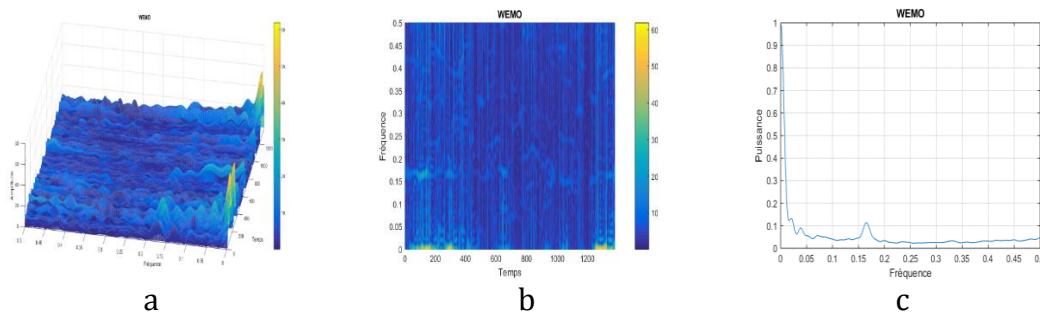


Fig. 31 : - Distribution de Bessel du WEMO au pas mensuel, a : Scalogramme 3D, b : scalogramme 2D et c : spectre global

Concernent le PDO, les résultats sont regroupés en annexe VIII.2. On note cependant, une composante à 4 ans. Pour l'indice d'Oscillation Australe SOI, trois composantes sont visibles, qui sont celles des cycles suivants : 18 mois, 2 an et 4 an.

Afin de comparer les différentes Distributions de la classe de Cohen, la figure (32), montre les spectres globaux des Distribution de BJ, CW, SPWV et Bessel des pluies mensuelles. Elle met en évidence les deux principales composantes classiques : annuelle et semestrielle pour les distributions de BJ, CW et SPWV, mais la distribution de Bessel visualise nettement les composantes pluriannuelles à basse fréquence.

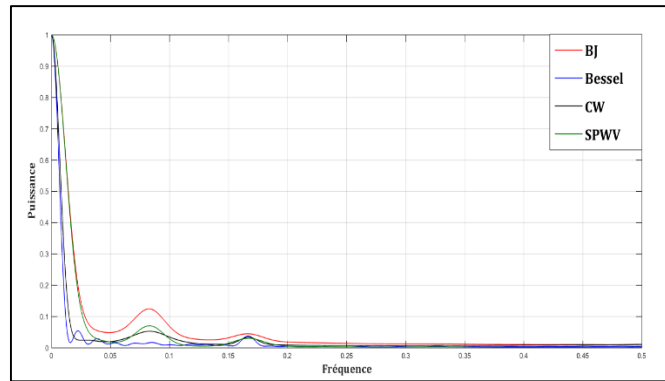


Fig. 32 : - Spectres Globaux des Distribution de BJ, Bessel, CW, SPWV pour les pluies mensuelles à Dar El Beida

III.4.3 Transformée en S

Pour la réalisation de la transformée en S, différentes méthodes exposées dans le chapitre II ont été exposées. Dans ce travail on a utilisé la relation entre ST et STFT, en utilisant les avantages des algorithmes de la transformée de Fourier rapide (FFT), avec une fenêtre de localisation dépendante de la fréquence "fonction exponentielle" (équation 49) qui joue donc le rôle de filtre passe-bas.

Dans cette section, l'application de la transformation de Stockwell pour les pluies et les indices aux pas mensuel et journalier a donné les résultats illustrés par les figures au-dessous et par les annexes IX.1, IX.2, IX.3, IX.4 et IX.5.

III.4.3.1 Pluies et Indices mensuels

Pour les pluies mensuelles à Dar El Beida, les résultats sont résumés par la figure 33. La fréquence 0.083 correspondant au cycle annuel est très bien visibles sur les scalogrammes et sur le spectre global (Fig. 33 a, b et c). La composante semestrielle est également visible, mais d'amplitude moindre. On peut aussi distinguer celle de 4 mois. Des composantes pluriannuelles sont faiblement manifestées, une à 2 ans et une à 6 ans. Pour les stations d'Annaba, Oran et Aïn Oussera, des comportements similaires à celui de Dar El Beida sont visibles sur la figure 34 et en annexe (IX.1). On note, cependant, que pour les composantes pluriannuelles des ruptures sont nettement visibles ce qui pourrait être un révélateur d'une variabilité climatique.

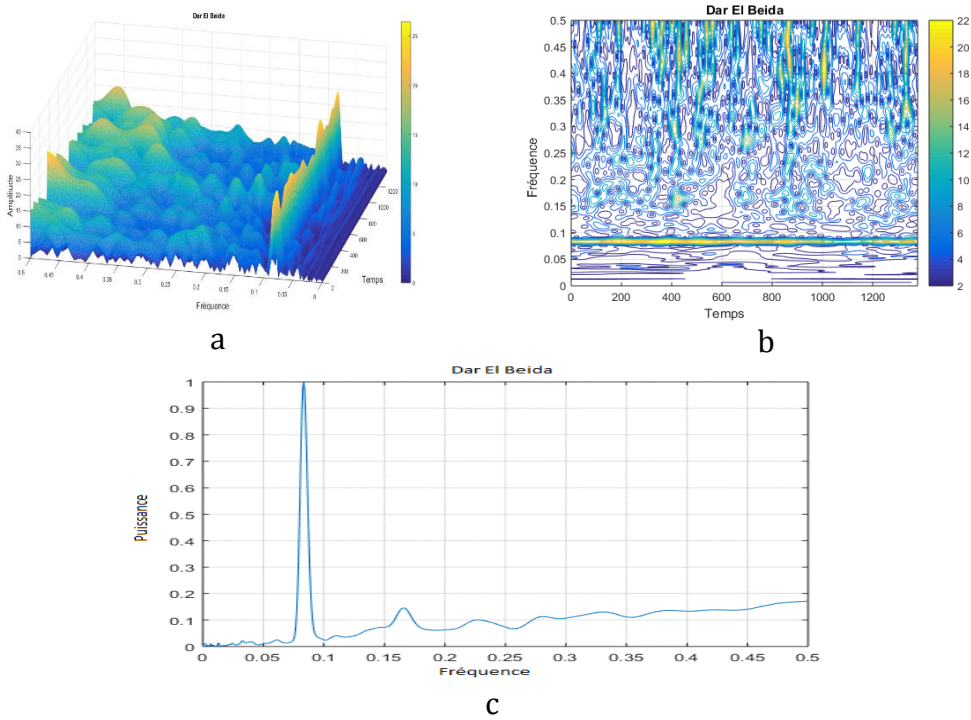


Figure 33 : Transformée en S des pluies mensuelles à Dar El Beida, a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.

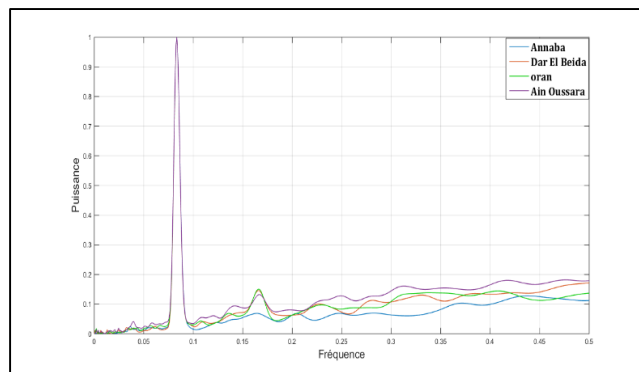


Fig. 34 : Spectres Globaux de la transformée en S des pluies mensuelles à : Annaba, Dar El Beida, Oran et Ain Oussera.

La transformation en S des indices d'oscillation climatiques nous donne plusieurs composantes dans les basses fréquences.

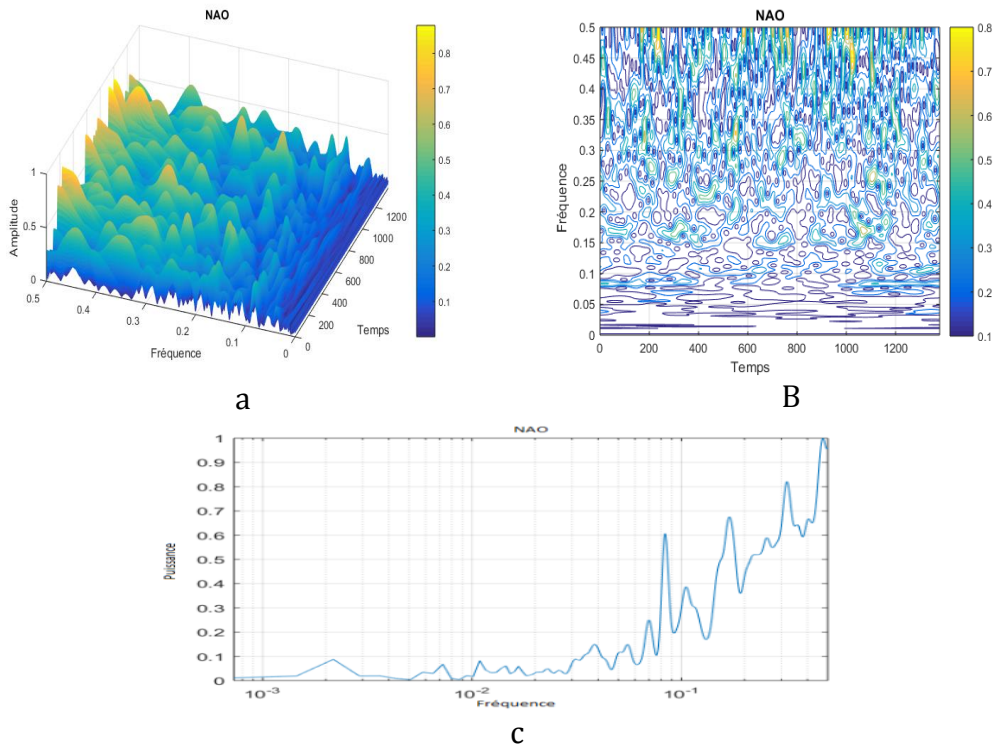


Figure 35 : Transformée en S du NAO au pas mensuel
 a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.

Pour le NAO nous remarquons clairement les composantes qui correspondent aux cycles : 3-6 mois et 12 mois ainsi que d'autres à plus grandes échelles, celles des cycles : 2 ans, 8 ans et 40 ans (Fig. 35 a, b et c).

Pour le WEMO, nous remarquons que la composante annuelle est la plus dominante, suivie par des composantes correspondent aux cycles : 3-6 mois et 2-4 ans 13 ans et 23 ans. Concernent le PDO, la figure 37 montre une fréquence caractéristique de 0.083 qui indique la composante annuelle, ainsi que deux autres composantes bien manifestées correspondant à des cycles pluriannuels de : 6 ans et 58 ans et d'autres d'amplitude plus faible de 3-9 ans et de 19 ans. Sachant, que pour le PDO le déplacement de la trajectoire des systèmes météorologiques se fait de manière cyclique sur une période de plusieurs décennies, habituellement de 20 à 30 ans.

Pour le SOI, les composantes les plus visibles et identifiables sont celles de 2 ans, 4 ans et 6 ans. On peut aussi identifier celle de 13 ans et celle 38 ans, sachant que l'influence du SOI se fait à grande échelle. Les résultats en détail pour le SOI et le PDO sont regroupés en annexe IX.2.

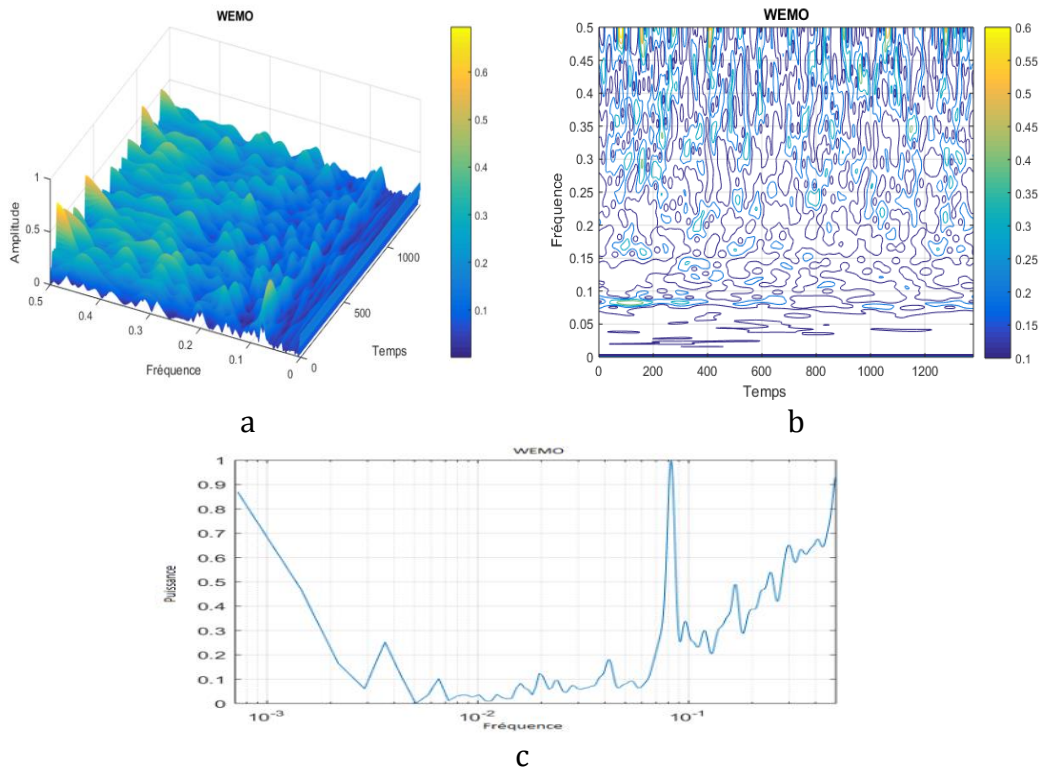


Figure 36 : Transformée en S du WEMO au pas mensuel
 a : scalogramme en 3D, b : scalogrammes en 2D et c : spectre global.

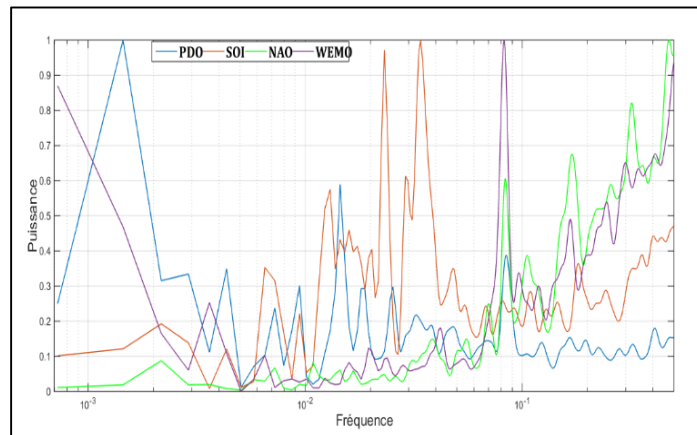


Fig. 37 : Spectres Globaux de la transformée en S des Indices climatiques mensuels : PDO, SOI, NAO et WEMO.

III.4.3.2 Pluies et Indices journaliers

Les scalogrammes 2D et 3D ainsi que le spectre global des pluies à Bejaïa au pas journalier sont présentés dans la figure (38). Le spectre global montre nettement la composante annuelle ainsi que plusieurs composantes à hautes fréquences.

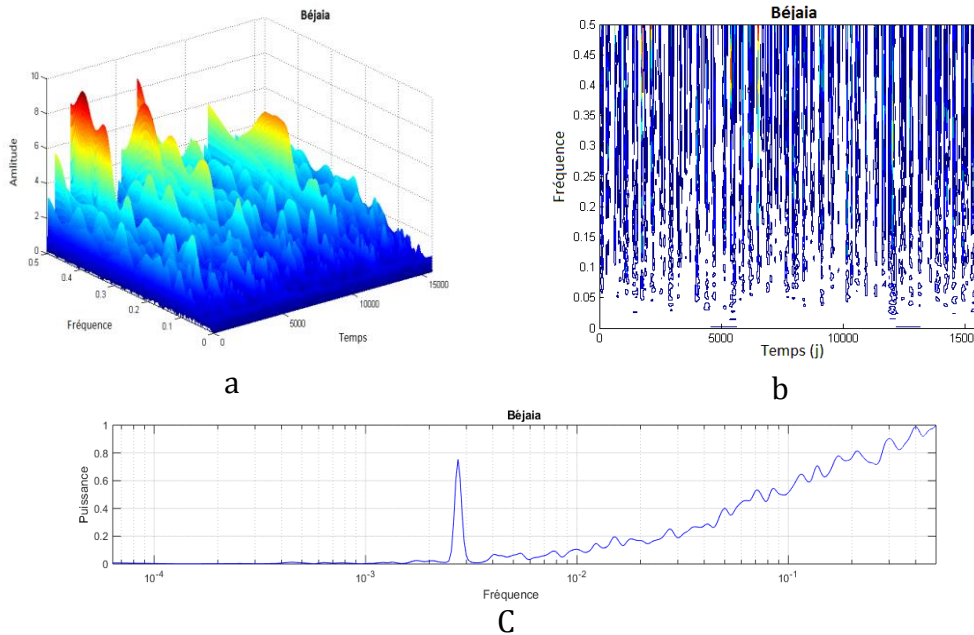


Figure 38 : Transformée en S des pluies à Béjaïa a) scalogramme en 3D ; b) scalogrammes en 2D ; c) spectre global

Les pluies aux Dar El Beida et Sour El Ghozlane (Annexes IX.3) ont montré également la composante annuelle mais avec des amplitudes plus ou moins faible, c'est dû probablement aux valeurs des hautes fréquences qui sont peut-être influencées par les valeurs zéro. Pour les pluies mensuelles on n'a pas remarqué ce problème. L'amplitude la plus forte est celle obtenue pour la station de Béjaïa.

Afin d'avoir une idée globale sur les comportements des pluies à Dar El Beida, Béjaïa et Sour El Ghozlane, la figure 39 illustre les spectres globaux obtenus par la ST sur le même graphique. On constate que les pluies ont un comportement semblable mettant clairement en évidence la composante annuelle.

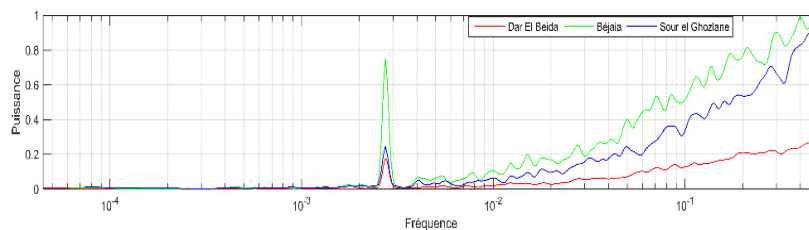


Figure 39 : Spectres Globaux de la transformée en S des pluies journalières

En ce qui concerne les indices d'oscillation climatiques au pas journalier on a remarqué les fréquences 0.0027 et 0.0055 correspondent aux cycles annuel et semestriel respectivement pour les indices : MO, NAO, AO et PNA, ce qui pourrait s'expliquer par une relation étroite entre les pluies en l'Algérie du Nord et ces indices climatiques. La figure 40 représente les résultats du traitement de la série du MO par la transformée de Stockwell.

Les principales composantes des indices sont regroupées dans le tableau 09. Les résultats des autres indices (EPO, WPO, SOI, NAO, AO, PNA) sont présentées en (Annexes IX.4 et IX.5).

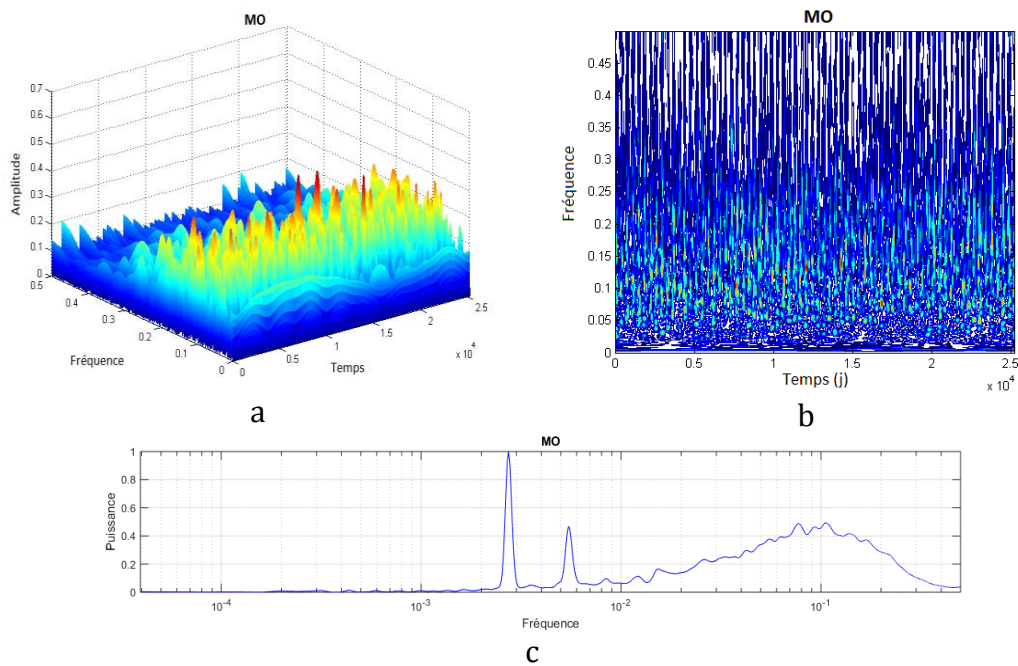


Figure 40 : Transformée en S du MO : a) scalogramme en 3D ; b) scalogrammes en 2D et c) spectre global

Tableau 09 : Principales composantes des indices d'oscillations climatiques

Indices	Composantes
AO	30 jours/6 et 12 mois /3 et 14 ans
EPO	30 jours/6 et 4 mois/2 ans
MO	12 jours/6 mois/1 année
NAO	30 jours/3, 6 et 12 mois/2 et 14 ans
PNA	30 jours/3, 4, 6 et 12 mois /2, 6 et 9 ans
SOI	30 jours/3, 10 mois/2, 3 et 6 ans
WPO	30 jours/3, 7 et 10 mois/10 et 24 ans

Afin de comparer le comportement spectral des indices d'oscillation climatique et de voir les relations éventuelles entre-eux, les figures 41 et 42 présentent respectivement les spectres globaux des indices WPO NAO EPO et AO NAO PNA.

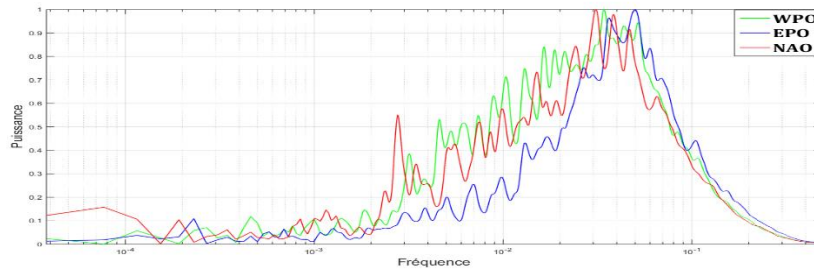


Figure 41 : Spectres Globaux de la transformée en S des indices WPO, NAO, EPO

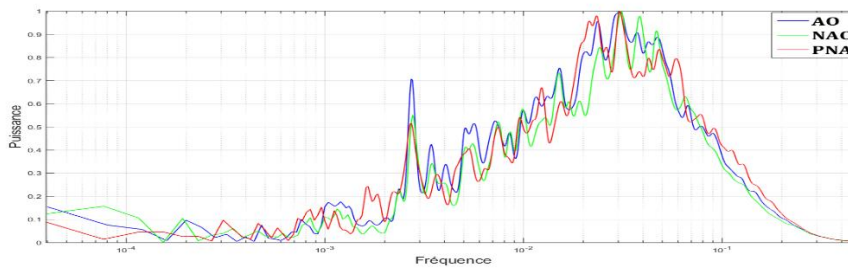


Figure 42 : Spectres Globaux de la transformée en S des indices AO, NAO, PNA

On remarque que les indices WPO et EPO ont un comportement semblable à celui du NAO (Fig.41).

La figure 42 nous montre que les indices AO, NAO et PNA ont un comportement presque identique et que le MO se comporte légèrement différemment avec des amplitudes plus faibles en ce concerne les hautes fréquences (Fig.43).

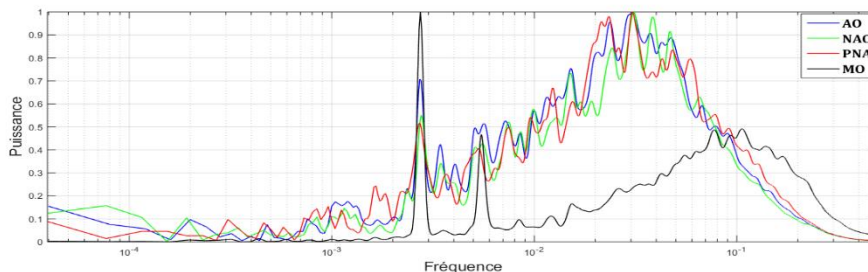


Figure 43 : Spectres Globaux de la transformée en S des indices AO, NAO, PNA et MO

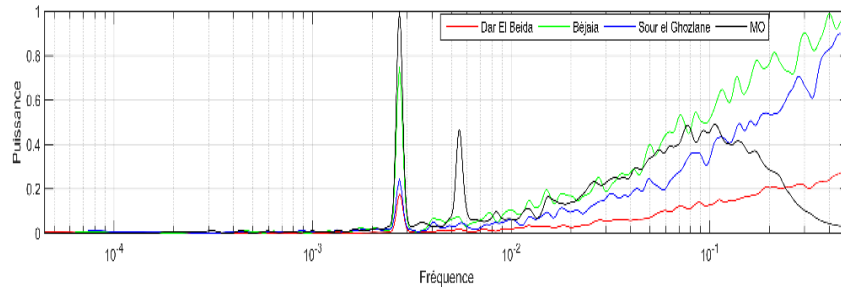


Figure 44 : Spectres Globaux de la transformée en S des pluies journalières et le MO

La figure 44 met en vue un comportement semblable pour le MO pour les basses fréquences avec les pluies, ce qui pourrait s'expliquer par une relation étroite entre les pluies dans le nord d'Algérie et l'indice d'oscillation méditerranéenne.

III.4.3 Analyses croisées

Afin de chercher à mettre en évidence une relation de causalité éventuelle entre les indices d'oscillation climatique et les pluies au pas mensuel et journalier, une analyse croisée a été effectuée. Deux principales composantes : 6 et 12 mois, ont été isolées afin d'être étudiées en utilisant le concept de la cohérence pour la transformée de Stockwell.

Dans un premier temps, nous avons effectué cette analyse avec les indices NAO, WEMO, SOI et PDO avec les pluies mensuelles de Dar El Beida sur la période d'observation 1901-2015. Par la suite, nous avons fait cette analyse avec les indices AO, MO et NAO avec les pluies journalières de Dar El Beida. Pour AO et NAO avec Dar El Beida on a pris la période 1950-2009, et pour le MO avec Dar El Beida on a pris la période 1948-2009.

L'analyse croisée entre les indices (NAO, WEMO) et les Pluies à Dar El Beida est illustrée par les figures (45 et 46), et pour l'analyse croisée entre les indices PDO, SOI et les Pluies à Dar El Beida sont en Annexes X.1 et X.2.

Les figures (45 d et e), nous présentent la fonction de cohérence et la fonction de phase pour les composantes annuelle et semestrielle.

Les deux composantes, annuelle et semestrielle sont bien manifestées pour l'analyse croisée entre (NAO-Dar EL Beida, PDO-Dar EL Beida, SOI-Dar EL Beida et WEMO-Dar EL Beida). Avec autres composantes remarquables pour (SOI-Dar EL Beida) correspondent aux : 2-3 et 6 ans. La composante annuelle isolée nous montre qu'il y a une variation à travers le temps, il y a une diminution très forte de la composante annuelle entre la période 1934-1988. La cohérence est plus faible dans cette période. Les figures (45 a et b) nous montrent des ruptures et une faible amplitude à travers cette période. La même période a été remarquée pour le PDO et SOI. La composante semestrielle est très faibles dans les périodes

(1911-1919, 1928-1933, 1939-1971, 1975-2015). La cohérence et la composante ont une variation presque identique presque les mêmes périodes sont observé pour le PDO et SOI.

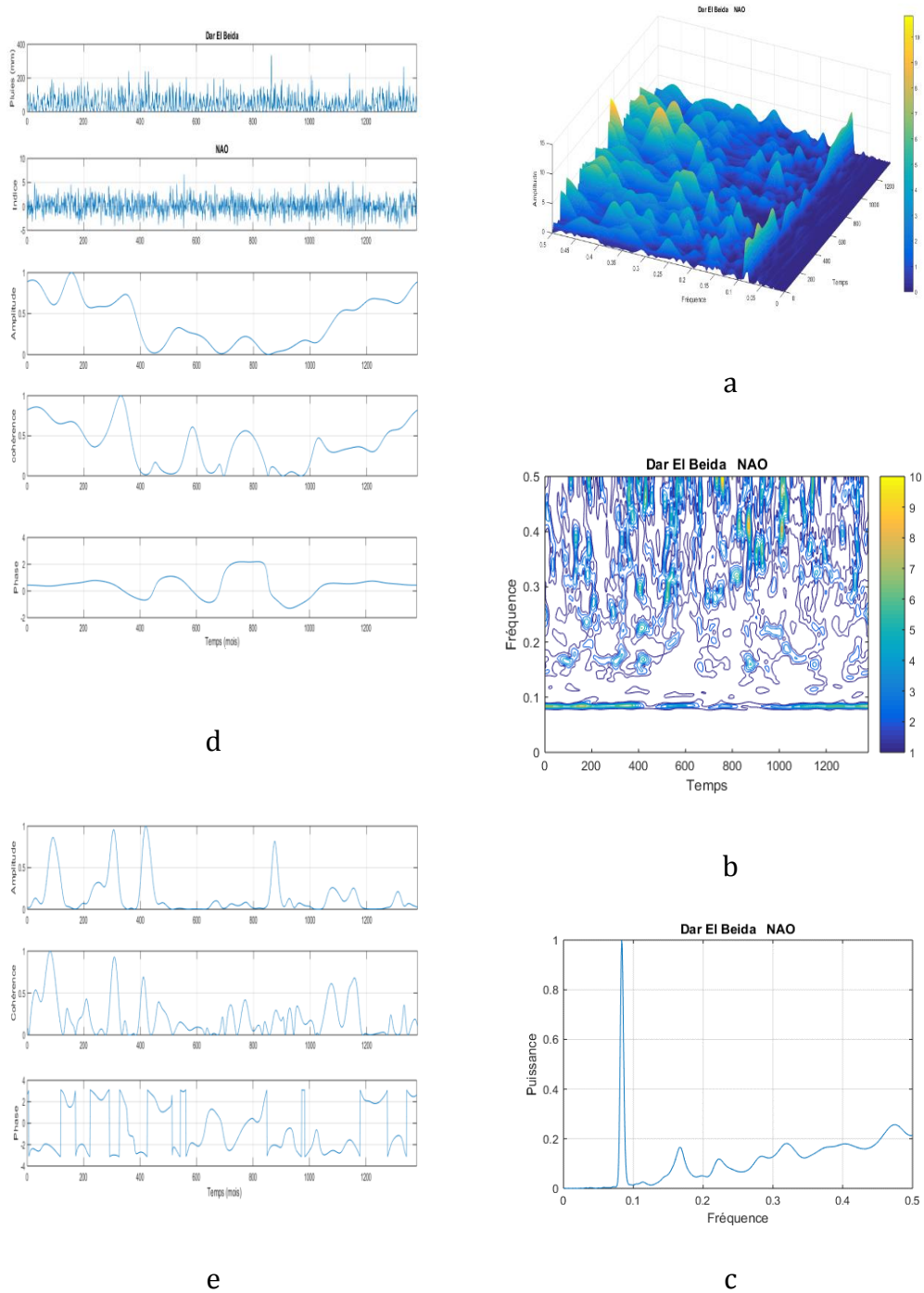


Figure 45 : Analyse croisée par la transformée en S (NAO-Dar El Beida) au pas mensuel (1901-2015) a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global ; d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle.

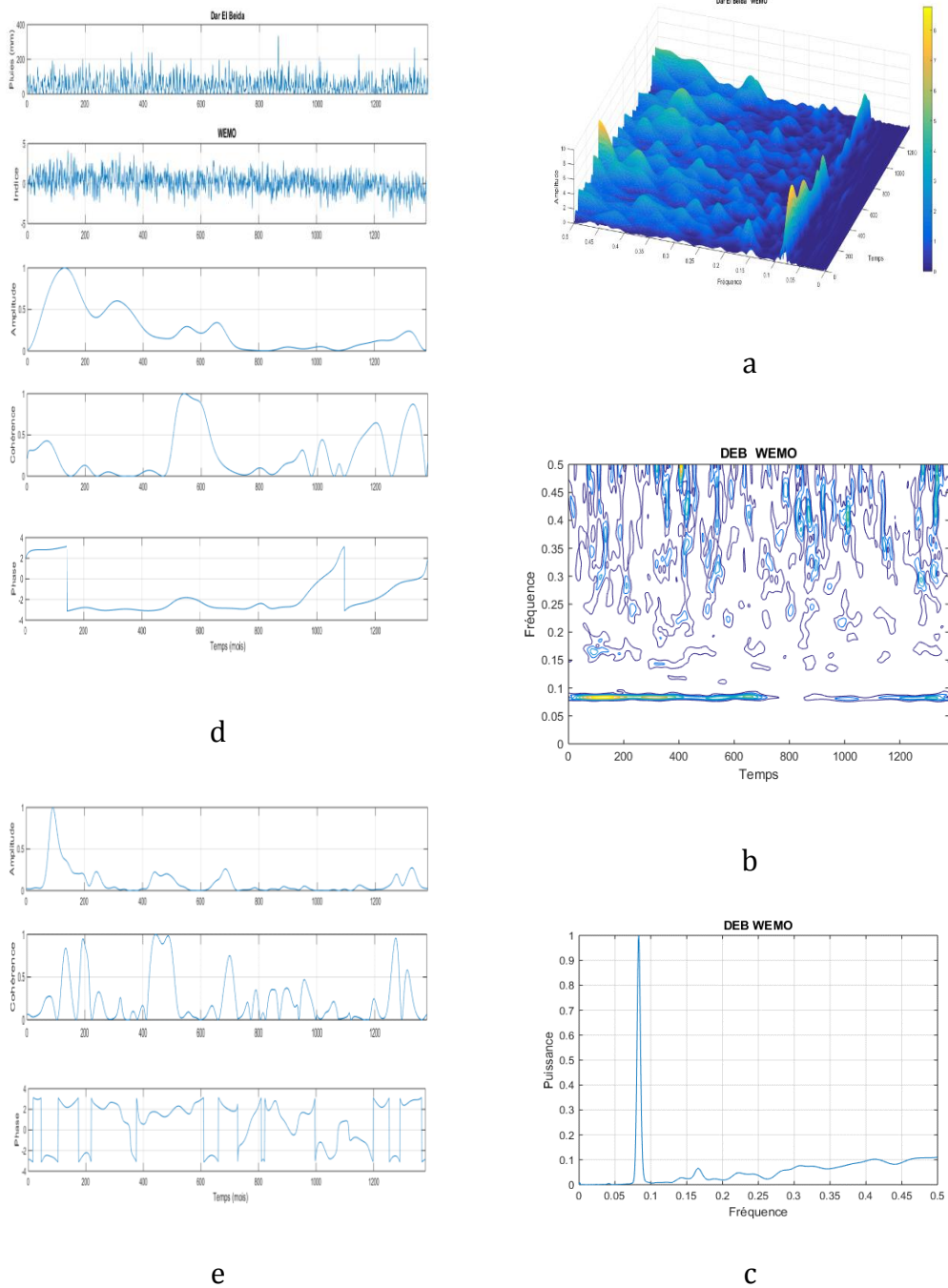


Figure 46 : Analyse croisée par la transformée en S (WEMO-Dar El Beida) au pas mensuel (1901-2015) ; a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global ; d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle.

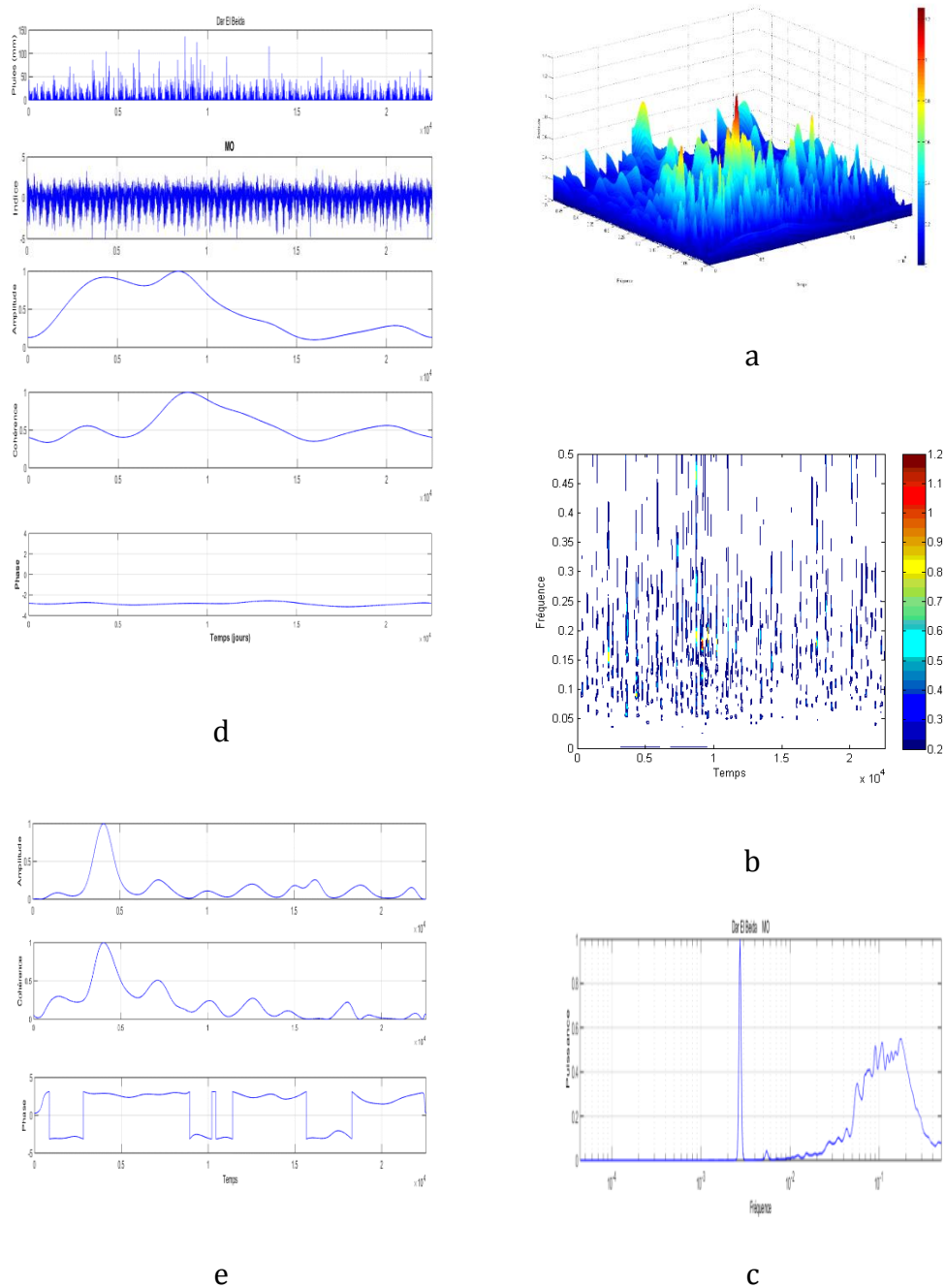


Figure 47 : Analyse croisée par la transformée en S (MO-Dar El Beida) au pas journalier (1948-2009) a) Scalogramme en 3D ; b) 2D ; c) Spectre global d) ; la cohérence et la phase pour la composante annuelle ; e) pour la composante semestrielle

Concernant l'analyse croisée entre les indices MO, AO, NAO et les pluies à Dar El Beida au pas journaliers, La composante annuelle est le plus manifestée avec la composante semestrielle, qui est très faible.

Les résultats de l'analyse croisée entre les indices AO, NAO et les pluies à Dar El Beida au pas journalier son en (Annexe X.3 et X.4)

- AO-Dar El Beida : on remarque les plus faibles cohérences pour la composante annuelle entre 1987-2009, et entre 1982-2009 concernant la composante semestrielle.
- NAO-Dar El Beida : Pour la composante 12 mois, dans la période 1978-2009 on a constaté une diminution très forte de la cohérence, et entre 1982-2009 pour la composante 6 mois.
- MO-Dar El Beida : Les faibles cohérences remarquables sont entre les périodes 1948-1964 et 1987-2009 pour la composante annuelle, et entre 1972-2009 pour la composante de 6 mois.

Le tableau 10 résume les cohérences moyennes obtenues par l'analyse croisée par la transformation en S au pas mensuel et journalier. On constate des mauvaises cohérences pour les deux composantes, puisque la partie réelle de la cohérence est très faible, tandis que la phase est différente à zéro. Ceci confirme la non-linéarité entre les indices et les pluies.

La cohérence la plus forte est celle de MO-Dar El Beida (55,90%) avec une très faible phase pour la composante annuelle (Fig. 47 d) ceci pourrait expliquer la relation éventuelle du MO avec les pluies au nord de l'Algérie, et la cohérence la plus faible est celle de NAO-Dar El Beida (13,36%) pour la composante de semestriel. Notons que les valeurs les plus élevées de la cohérence correspondent aux passages consécutifs des pluies importantes. Il apparaît également, pour la période sèche une très faible cohérence et une forte phase (Chettih, 2006).

Tableau 10 : Cohérence moyenne obtenue par l'analyse croisée par la transformation en S au pas mensuel et journalier.

	Analyse croisée	Cohérence moyenne	
		Composante annuelle	Composante semestrielle
Mensuelle	NAO- Dar El Beida	38,42%	20,61%
	PDO- Dar El Beida	26,49%	15,92%
	SOI- Dar El Beida	31,80%	24,33%
	WEMO- Dar El Beida	25,61%	23,37%
Journalier	AO- Dar El Beida	32,05%	18,37%
	MO- Dar El Beida	55,90%	19,99%
	NAO- Dar El Beida	31,21%	13,36%

Les résultats obtenues par la transformée en S ont été influencé à hautes fréquences par certaines perturbations, ceci est peut-être dû au choix du filtre.

On a déjà décrit précédemment que le filtre utilisé dans cette application joue le rôle d'un filtre passe bas qui atténue les hautes fréquences afin de conserver uniquement les basses fréquences. Pinnegar et Eaton, 2003 ont proposé une nouvelle méthode, conçue pour l'application à plusieurs séries temporelles dont les spectres présentent une dépendance temporelle similaire. Ils ont montré que les informations obtenues à partir la transformation en S peuvent être utilisées pour concevoir un filtre passe-bande efficace variant dans le temps.

Puisque la fenêtre gaussienne n'est pas idéale pour chaque application, on propose pour le futur de résoudre ce problème d'interférences à l'aide de la transformée en S généralisée, car elle nous permet d'utiliser une fenêtre d'analyse avec des dépendances en fréquence asymétriques, et des largeurs qui ne varient pas forcément avec l'inverse de la fréquence.

III.5 Conclusion

Au cours de cette étude, nous avons remarqué qu'à l'aide de la transformée de Gabor, la STFT, les ondelettes et les méthodes temps-fréquences de la classe de Cohen, les spectres mettent nettement en évidence les composantes annuelles, mais moins visiblement les autres composantes.

Nous avons observé que le comportement spectral des pluies par la transformée en S est presque identique aux quatre stations pluviométriques et que la composante annuelle est la plus dominante ainsi que d'autres composantes à plus petites échelles, notamment la composante semestrielle. Pour le MO, PNA, AO et NAO la composante annuelle est la plus dominante suivie par la composante semestrielle. D'autres fréquences moins spectaculaires correspondent aux cycles de 4 et 3 mois sont également visibles, ainsi que d'autres composantes à plus grande échelles (4-6 ans et plus).

Les analyses croisées entre les indices et les pluies montrent qu'il y a des relations à certaines échelles entre les indices et les pluies et une mauvaise cohérence ce qui suggère le non linéarité comportementale du processus.

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce projet est d'analyser les données hydrologiques à l'aide des distributions Temps-Fréquence afin d'extraire le maximum d'information et mettre en évidence les relations possibles entre les pluies et les indices climatiques et détecter les périodes humides et sèches et les tendances afin de comprendre ce phénomène de changement climatique.

Dans ce travail on a décrit dans un premier temps les différentes distributions temps-fréquence et présenté par la suite la transformée en S.

Le deuxième volet de ce travail a été consacré à l'application des méthodes d'analyse-temps fréquence présentées dans la première partie ; aux séries de données pluviométriques et aux indices d'oscillations climatiques au pas mensuels et journaliers. Les stations pluviométriques retenues pour cette étude sont : Ain Oussara, Annaba, Béjaia, Dar El Beida, Oran et Sour El Ghozlane. Concernent les indices climatiques on a retenus sont : NAO, PDO, SOI, WEMO, WPO, PNA, EPO, AO et MO.

Les résultats de ces analyses s'avèrent encourageants et promoteurs, ils mettent en évidence que :

- ✓ La transformation de Gabor montre la composante annuelle seulement pour les pluies et le WEMO, et la STFT a bien montré la composante annuelle pour les pluies et les indices NAO, WEMO.
- ✓ La composante annuelle est bien manifesté dans les pluies analysées par les ondelettes, avec une autre correspond aux : 6 mois faiblement remarquable avec des ruptures à travers le temps. Pour les indices climatiques (NAO, WEMO) on a observé aussi les composantes annuelle et semestrielle avec autres faiblement indiquées
- ✓ La distribution de WV nous montre la présence des composantes annuelle et semestrielle pour les pluies NAO et WEMO au pas mensuel, ainsi que pour les pluies journalières et le MO, avec l'apparition d'autres composantes dans le MO correspondant à : 4 et 3 mois.
- ✓ Les résultats obtenues par SPWV, CW, BJ des pluies mensuelles sont semblables, ils nous montrent les deux composantes annuelle et semestrielle, par contre DB, nous montre que la composante semestrielle avec autres correspondant à : 2 ans.
- ✓ Les fréquences inférieures à 0.05 sont les plus dominantes pour le PDO et SOI dans toutes les méthodes préliminaires.

- ✓ La transformée en S a montré que les quatre stations (Annaba, Ain Oussara Dar El Beida, Oran) ont un comportement presque identique.
- ✓ La transformée en S des pluies mensuelles et les indices NAO, WEMO nous montrent les fréquences 0.083 et 0.1667 correspondant aux cycles : 12 et 6 mois respectivement.
- ✓ Les pluies journalières à (Dar El Beida, Béjaia, Sour EL Ghazlane), ST nous montrent qu'elles ont un comportement presque identique avec une composante annuelle bien remarquable.
- ✓ Les indices d'oscillations climatiques le MO, NAO, AO et PNA ont bien montré les composantes annuelle et semestrielle.
- ✓ Les analyses croisées entre les indices et les Pluies montrent globalement une relation de causalité éventuelle faible, mais une capacité de régulation très significative.
- ✓ les cohérences moyenne ont confirmé l'absence de relation entre les indices et les pluies mensuelles ce qui suggère la non linéarité du système.

La transformée en S met en évidence un comportement similaire pour les indices NAO et WEMO avec les pluies à Dar El Beida (mensuelle), ce qui pourrait s'expliquer par une relation étroite entre les pluies et ces indices climatiques.

La transformée en S met en évidence un comportement similaire pour les indices NAO, PNA, AO et MO avec les pluies à Dar El Beida (journalière), ce qui pourrait s'expliquer par une relation étroite entre les pluies et ces indices climatiques à cette échelle.

L'analyse temps-fréquence par la transformée en S est utile pour analyser les données hydrologiques. En effet, la transformée en S fournit une bonne localisation temporelle dans les hautes fréquences et une meilleure résolution fréquentielle dans les basses fréquences, elle fournit aussi une meilleure estimation de l'amplitude du signal grâce à la fenêtre gaussienne utilisée dont l'amplitude varie en fonction de la fréquence.

L'information de phase référencée à l'origine dans la transformée en S, la correspondance exacte, la transformée inverse simple, et les possibilités supérieures de la résolution temporelle de cette transformée, sont des améliorations par rapport à l'analyse par ondelettes continue.

La distribution de Wigner-Ville a un inconvénient majeur de présenter des termes d'interférences, qui pose une difficulté dans l'interprétation des résultats. Ces termes d'interférences ont été minimisés par le pseudo Wigner Ville lissée et les autres distributions de la classe de Cohen, mais ces distributions ont une faible résolution de fréquence en comparaison avec ST.

Cependant, la transformée en S a bien montré, pour PDO et SOI des résultats à des échelles plus grandes, ce qui n'a pas été constaté par les autres méthodes.

Afin de mettre en évidence des résultats plus efficace par ST, nous proposons l'utilisation d'un filtre passe bande pour assurer une bonne résolution dans les basses et hautes fréquences au même temps, ou l'utilisation de la transformée en S généralisée qui pourra contribuer à une meilleure compréhension de ces phénomènes hydro-climatiques.

Références Bibliographiques

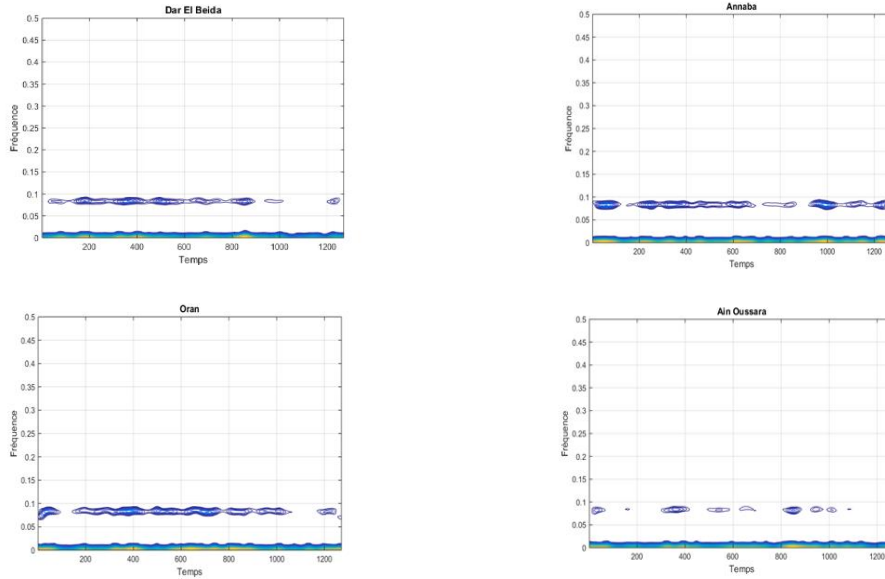
- Allrad J F, Bourdier R, Depollier C. (1987). Utilisation de la pseudo-distribution de Wigner-Ville lissée pour la détermination de l'instant de fermeture de la glotte. *Traitement du Signal*, volume 4 - n° 4, pp. 305-310.
- Assous S. (2005, décembre 14). Time-frequency analysis by the S transform and interpretation of the laser Doppler flowmetry signals: clinic diagnosis applications. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Bonsal B, Shabbar A. (2010). Oscillations climatiques à grande échelle ayant une incidence sur le Canada, de 1900 à 2008. Rapport technique thématique no 4 Publié par les Conseils canadiens des ministres des ressources.
- Brigham E. (1974). *The fast Fourier transform*. Prentice-Hall Inc.
- Cheng L, et al. (2010). Estimation of time-varying coherence and its application in understanding brain functional connectivity. *EURASIP Journal on Advances in Signal*.
- Chettih M. (2006). Analyse Fonctionnelle de quelques Systèmes Aquifères de l'Atlas Saharien Central, Thèse de Doctorat ès Sciences, USTHB, Alger, 196p.
- Conte M, Giuffrid A, Tedesco S. (1989). Mediterranean Oscillation: Impact on Precipitation and Hydrology in Italy. In *Conference on Climate and Water*. (Vol. 1). Daubechies I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. CBMS-NSF Regional Conference, Academic Press.
- Deliou A. (2013, juin 22). Extraction des caractéristiques fréquentielles des signaux biomédicaux et g acoustiques par des algorithmes basées sur des techniques temps fréquence non paramétriques. Faculté des sciences, Agadir.
- Djoudi A. (2018). Apport de la Transformée de Hilbert-Huang à l'étude de la. Université Amar Thelidji- Laghouat, faculte de genie civil et d'architecture, département de genie civil, Algerie, Laghouat.
- Environment and Natural Resources*. (2019/05/19). Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest: <https://www.enr.gov.nt.ca/en/state-environment/21-arctic-oscillation-index>
- Flandrin P, Sessarego J P. (1990). METHODES TEMPS-FREQUENCE EN ACOUSTIQUE. Laboratoire de Traitement du Signal (URA 346 CNRS), ICPI, 25 Rue du Plat, CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique. France: Colloque C2, supplbment au n02, Tome 51.
- George N V. (2009). S Transform: Time frequency analysis & filtering. Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India.

- Gibson P C, Lamoureux M.P, Margrave G F. (2006). Letter to the editor: Stockwell. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, vol. 12, no. 6, pp 713–721.
- Hamnane S. (2005). De l'analyse de Fourier traditionnelle aux ondelettes : une approche par le signal musical, Université Pierre et Marie Curie.
- Heckbert P. (1998, janvier 27). Fourier Transforms and the Fourier Transforms and the.
- Hlawatsch F , Bartels B G. (1992). Linear and quadratic time-frequency signal representations, pp. 21-67.
- Hurrell J W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), pp 676-679.
- Linkin M E, Nigam S. (2007). The North Pacific Oscillation–West Pacific Teleconnection Pattern: Mature-Phase Structure and Winter Impacts. *Journal of climate*.
- Lokhande A. (2017). A Survey on S-Transform. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, pp 35-39.
- Liu P. (1995). Wavelet Spectrum Analysis and Ocean Wind Waves. (Wavelets in Geophysics). Academic Press, pp 151-166.
- Maheras P, Xoplaki E, & Kutiel H. (1999). Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean basin and their relationship with circulation, 1860–1990. *Theoretical and Applied Climatology*, 64(3-4), pp 189-199.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78, 1069-1079.
- Martin-Vide J, López-Bustín J A. (2006). The Western Mediterranean Oscillation and rainfall in the Iberian peninsula. *Int. J. Climatol.*, 26, 1455–1475.
- Moukadem A, Ould Abdeslam D, Dieterlen A. (2014). Time-Frequency Domain for Segmentation and Classification of Non-stationary Signals: The Stockwell Transform Applied on Bio-signals and Electric Signals FOCUS Series, ISSN 2051-2481 Focus series in digital signal and image processing. John Wiley & Sons.
- MOUKADEM A., DIETERLEN A., BRANDT C.,. (2013). A robust heart sound segmentation. *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, pp 273–281.
- NorthGeorgiaWx.(2019).DaculaWeather:
https://www.daculaweather.com/4_epo_index.php
- Ovarlez J P. (1998). Distributions Temps-Fréquence. France: ONERA DEMR/TSI, BP72, 92322 Châtillon.

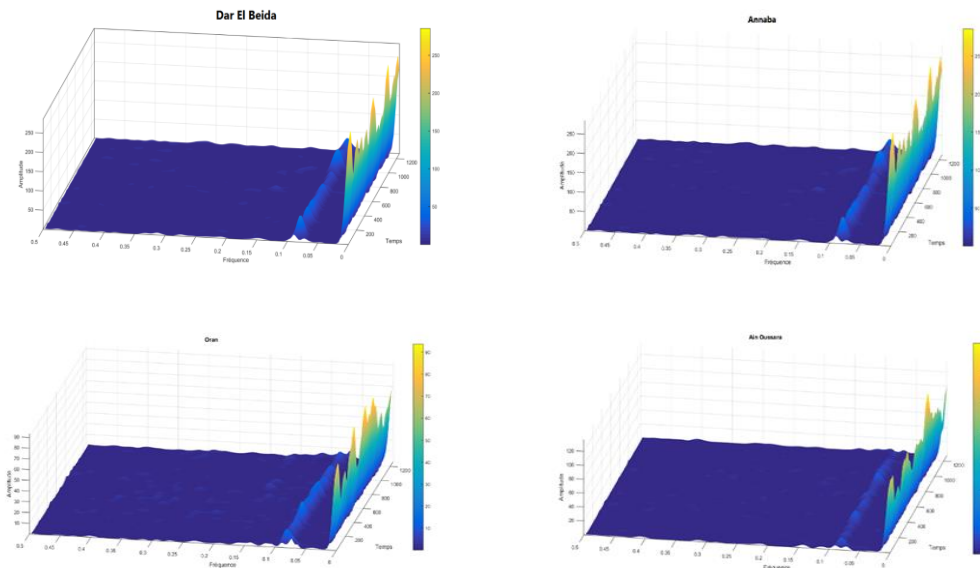
- Pant G B, Parthasarathy S B. (1981). Some aspects of an association between the Southern Oscillation and Indian summer monsoon. Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B, 29(3), pp 245-252.
- Pinnegar C R, Eaton D V. (2003). Application of the S transform to prestack noise attenuation filtering. Journal of Geophysical Research, vol. 108, NO. B9, 2422, doi:10.1029/2002JB002258.
- Pinnegar C R, Mansinha L. (2004). The Bi-Gaussian S transform. SIAM Journal on Scientific Computing, vol. 24, no. 5, pp 1678–1692.
- Portnoff M. (1980). Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis. IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-28, No. 1.
- Schimmel M, Gallart J. (2005). The inverse S-transform in filters with time-frequency. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 53, no. 11, pp 4417–4422.
- Stockwell R G. (2006). A basis for efficient representation of the S-transform, Northwest Research Associates, Colorado Research Associates Division, 3380 Mitchell Lane, Boulder, CO 80301, USA. Digital Signal Processing, pp 1-23.
- Stockwell R G. (2007). Why use the S-transform? Pseudo-Differential Operators: Partial Differential Equations and Time-Frequency Analysis, Fields Institute, Communications, vol. 52, American Mathematical Society, Providence, RI, pp 279–309.
- Stockwell R, Mansinha L, Lowe R. (1996). Localization of the complex spectrum : S Transform. IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 44, No. 4, pp 998-1001.
- Termium Plus. (2019, 5 31). Ressources du Portail linguistique du Canada: <http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&index=alt&srchtxt=OSCILLATION%20DECENNALE%20PACIFIQUE>
- Ventosa S, Simon C, Schimmel M, et al. (2008). The S-transform from a wavelet. IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 56, no. 7, pp 2771–2780.
- Wright P B. (1975). An index of the Southern Oscillation. Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia.
- Yue Min Z, Peyrin F, Goutte R. (1987). Transformation de Wigner-Ville: description d'un nouvel outil de traitement du signal et des images. Annee Tieliecommun., 42, n ° 3-4, pp 105-118.
- Zamrane Z. (2016). Recherche d'indices de variabilité climatique dans des séries hydroclimatiques au Maroc : identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques : cas des grands bassins de la Moulouya, du Sebou et du Tensift. Délivré par Université Montpellier.

Annexes

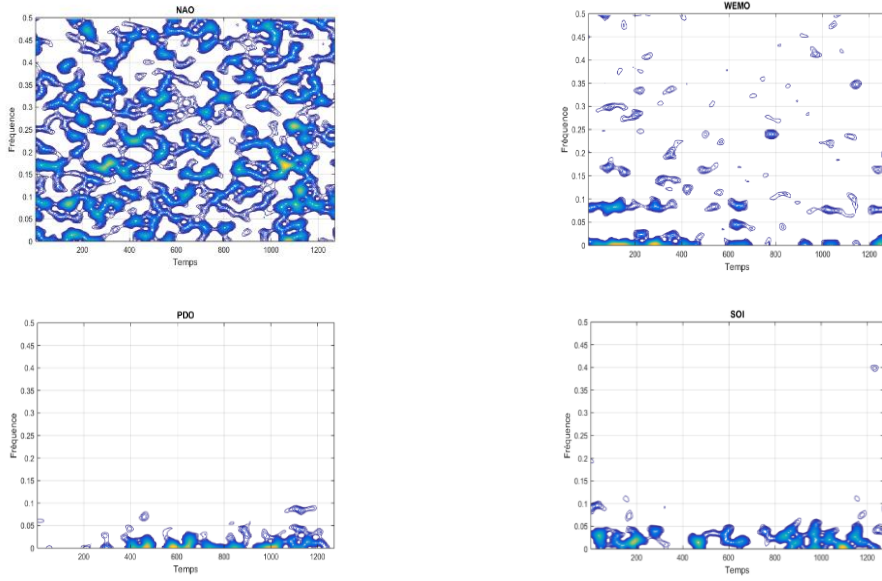
Annexe I



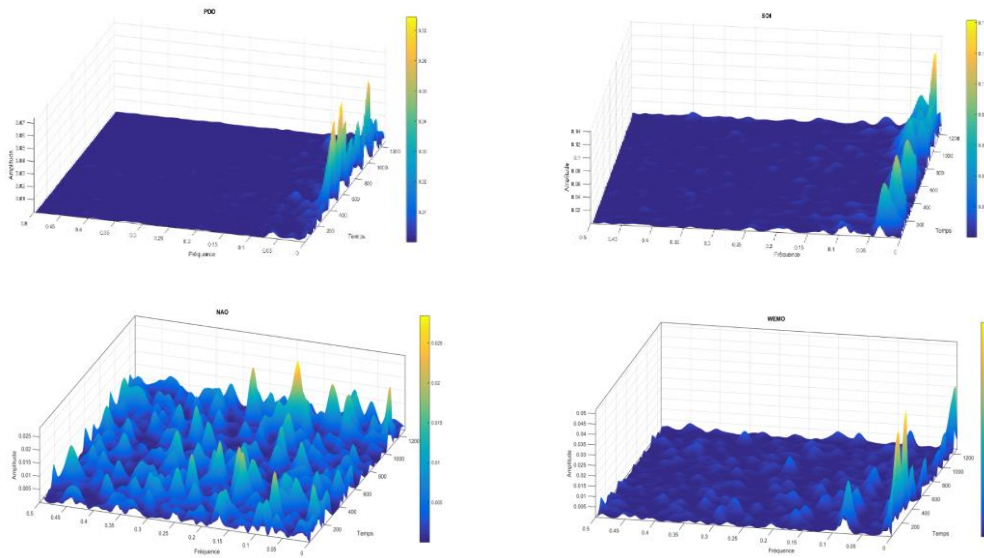
Annexe I.1 : Représentation en 2D des pluies mensuelles par la transformée de Gabor (Dar El Beida, Annaba, Oran et Aïn Oussera).



Annexe I.2 : Représentation en 3D des pluies mensuelles par la transformée de Gabor (Dar El Beida, Annaba, Oran et Aïn Oussera).

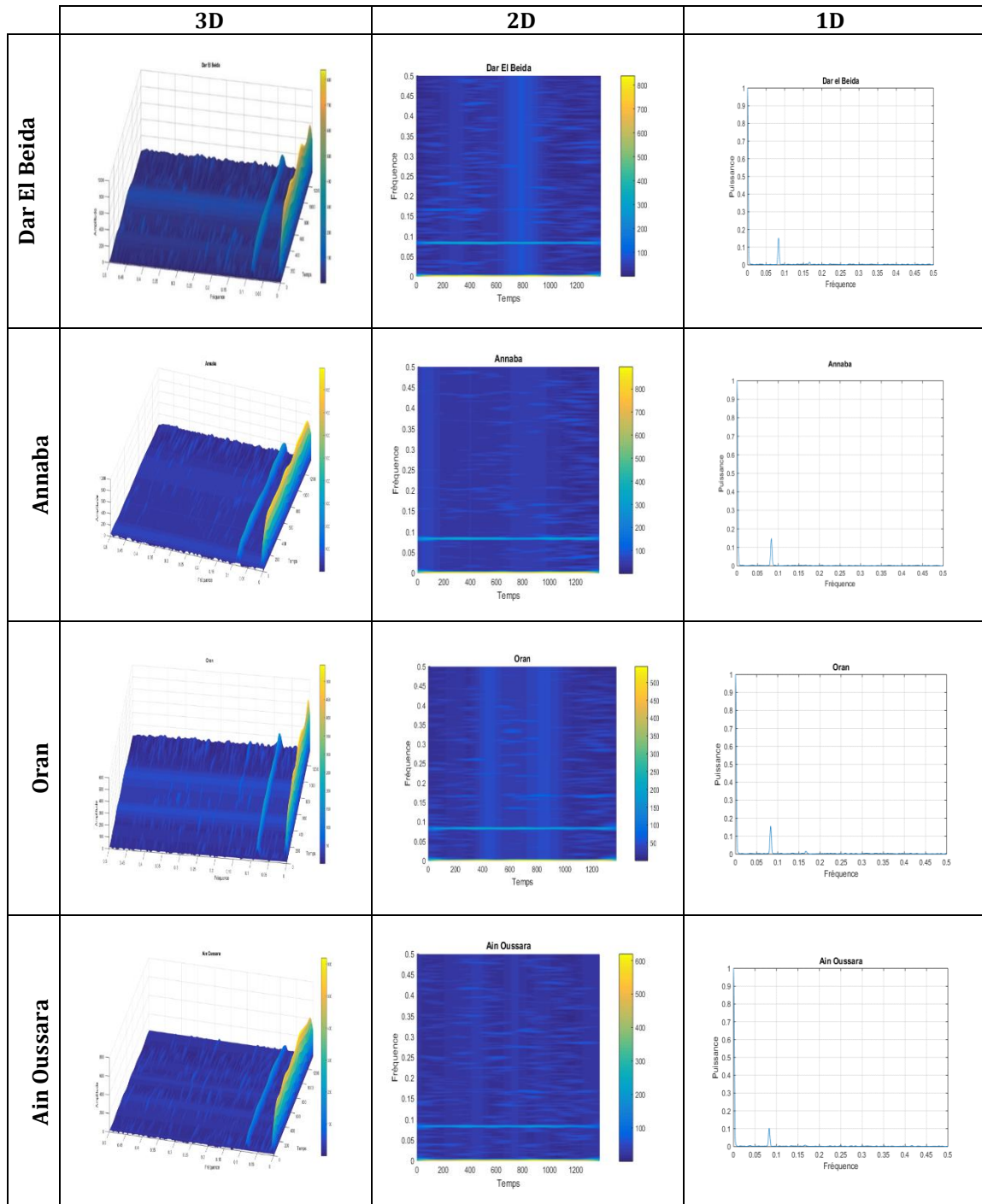


Annexe I.3 : Représentation en 2D des indices d'oscillation climatique au pas mensuel par la transformée de Gabor (NAO, WEMO, PDO et SOI)

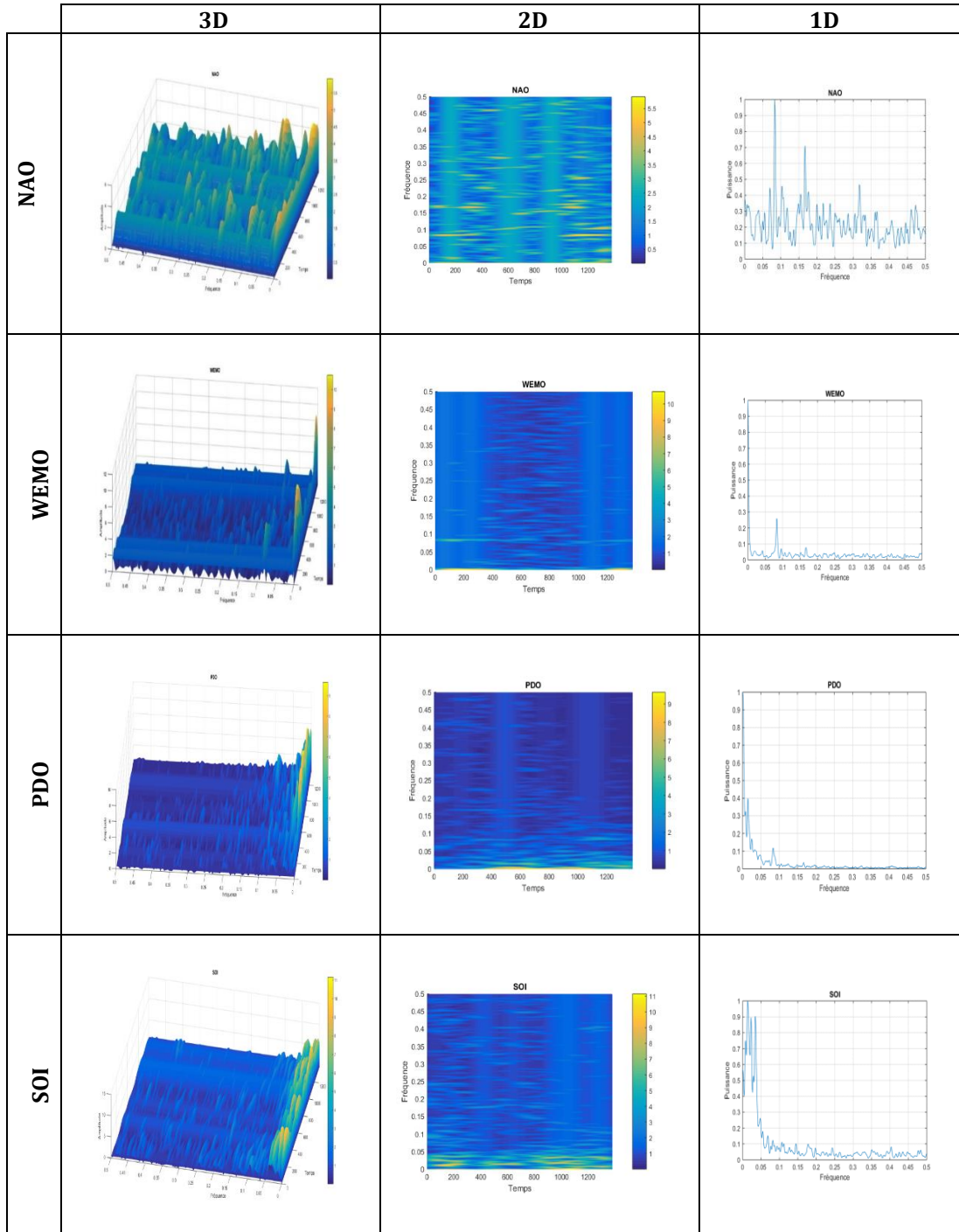


Annexe I.4 : Représentation en 3D des indices d'oscillation climatique au pas mensuel par la transformée de Gabor

Annexe II

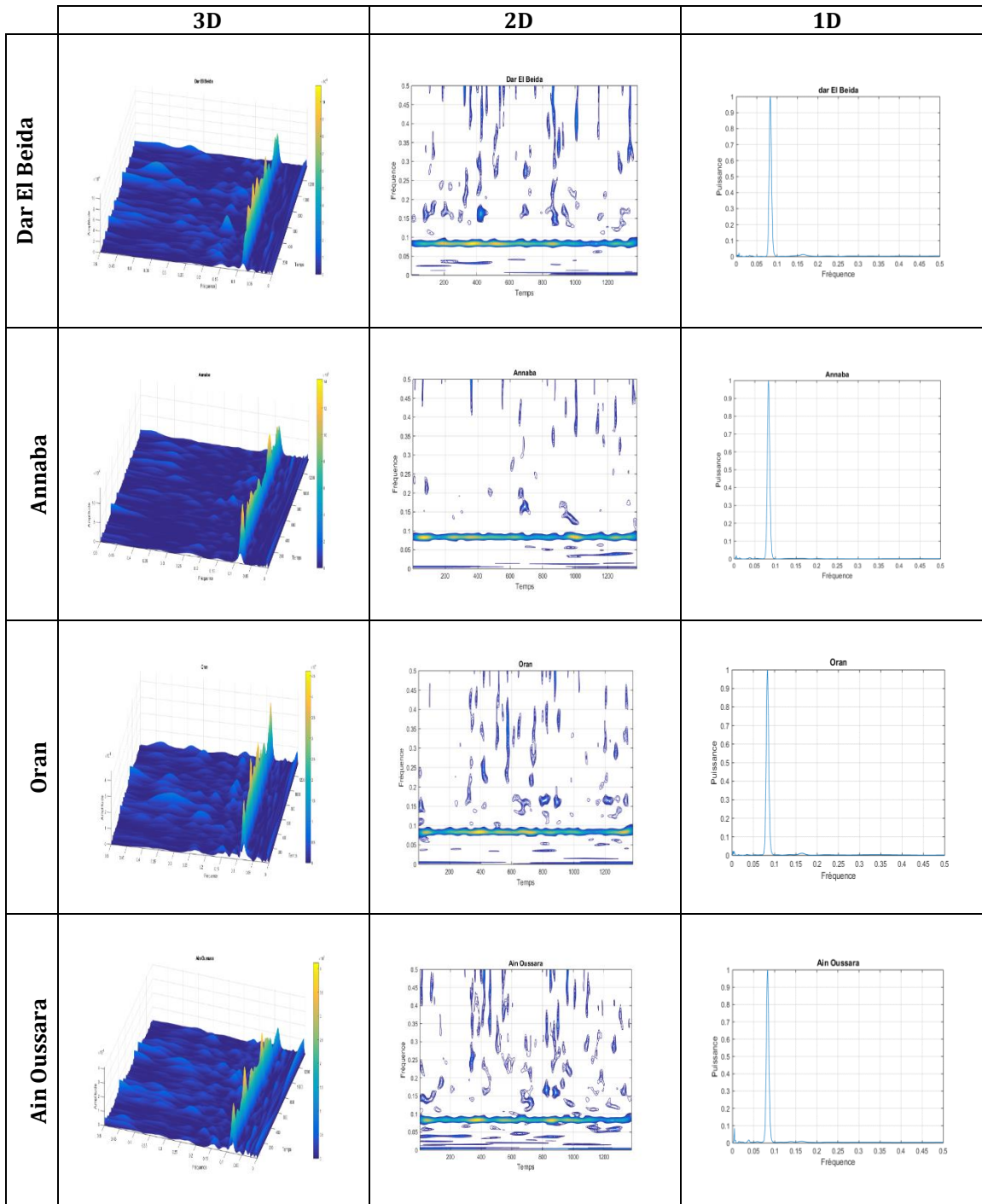


Annexe II.1 : La transformation STFT pour les pluies mensuelles (Dar El Beida, Annaba, Oran, Ain Oussara)

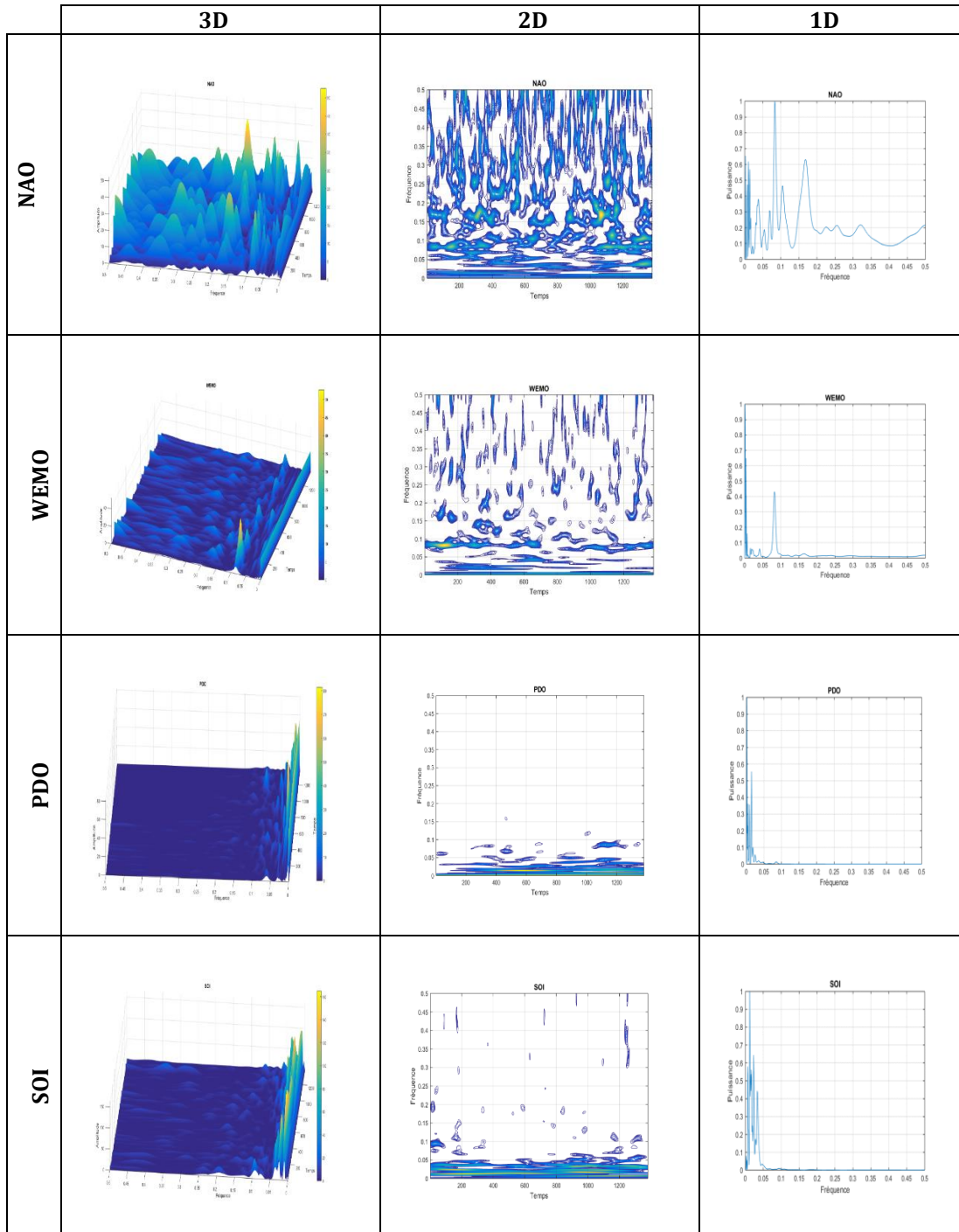


Annexe II.2 : La transformation STFT pour les indices d'oscillations climatiques au pas mensuel (NAO, WEMO, PDO, SOI)

Annexe III

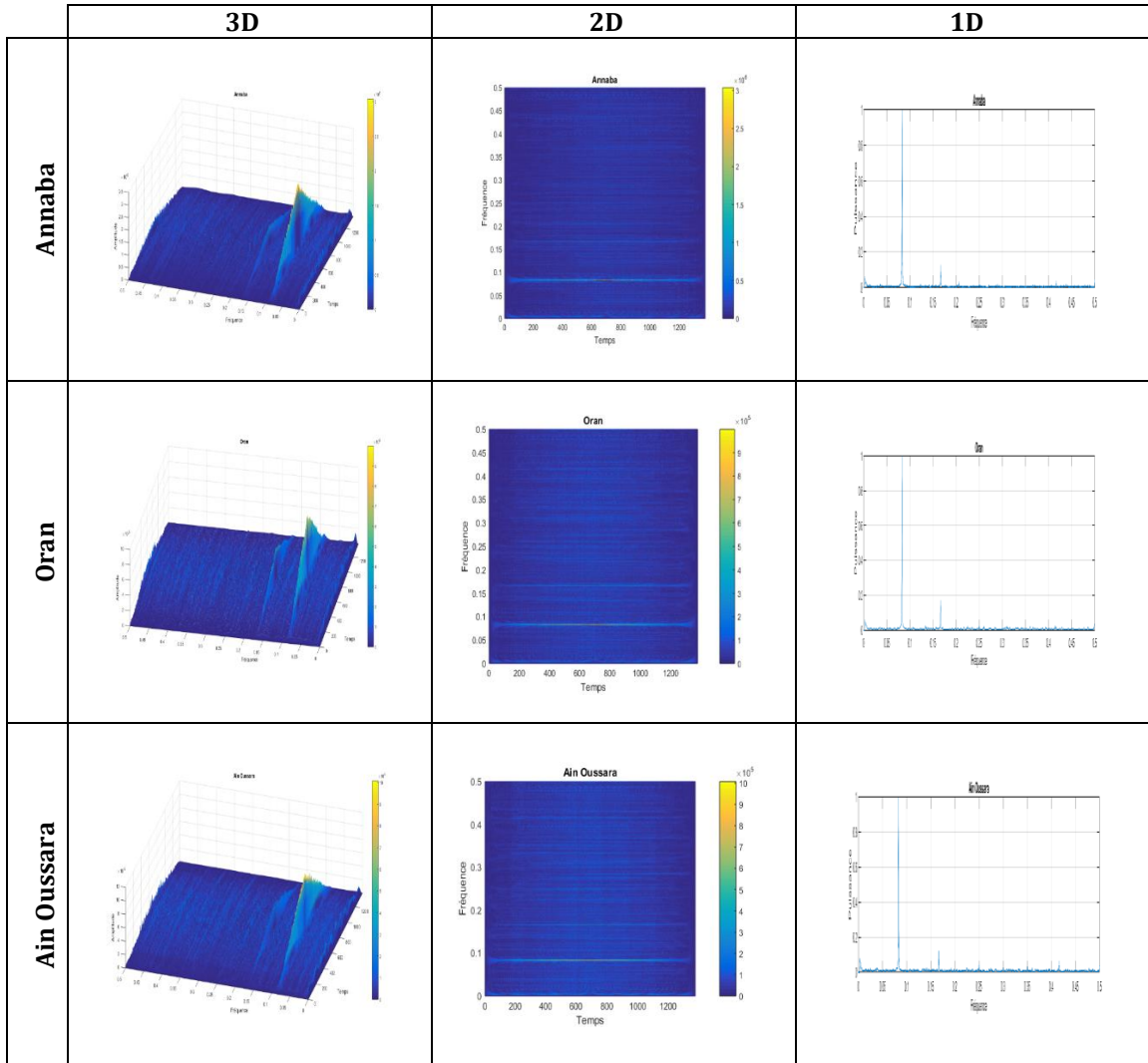


Annexe III.1 : La transformée en ondelettes des pluies au pas mensuel (Dar El Beida, Annaba, Oran, Ain Oussara)

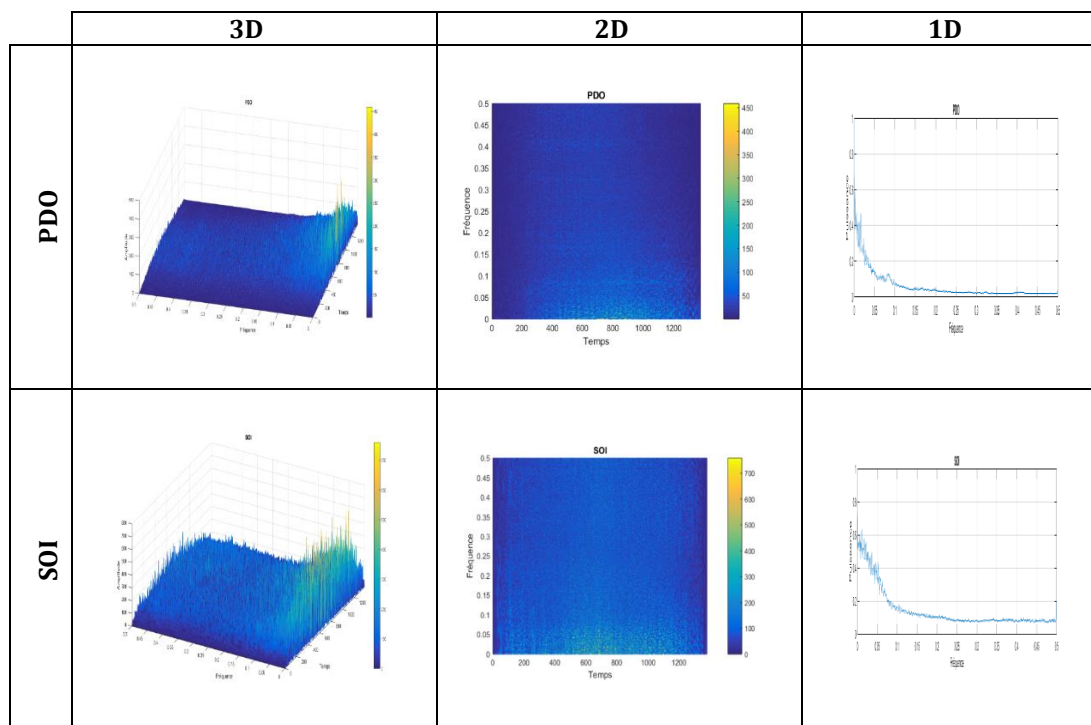


Annexes III.2 : la transformée en ondelettes des indices d'oscillations climatiques au pas mensuel (NAO, WEMO, PDO, SOI).

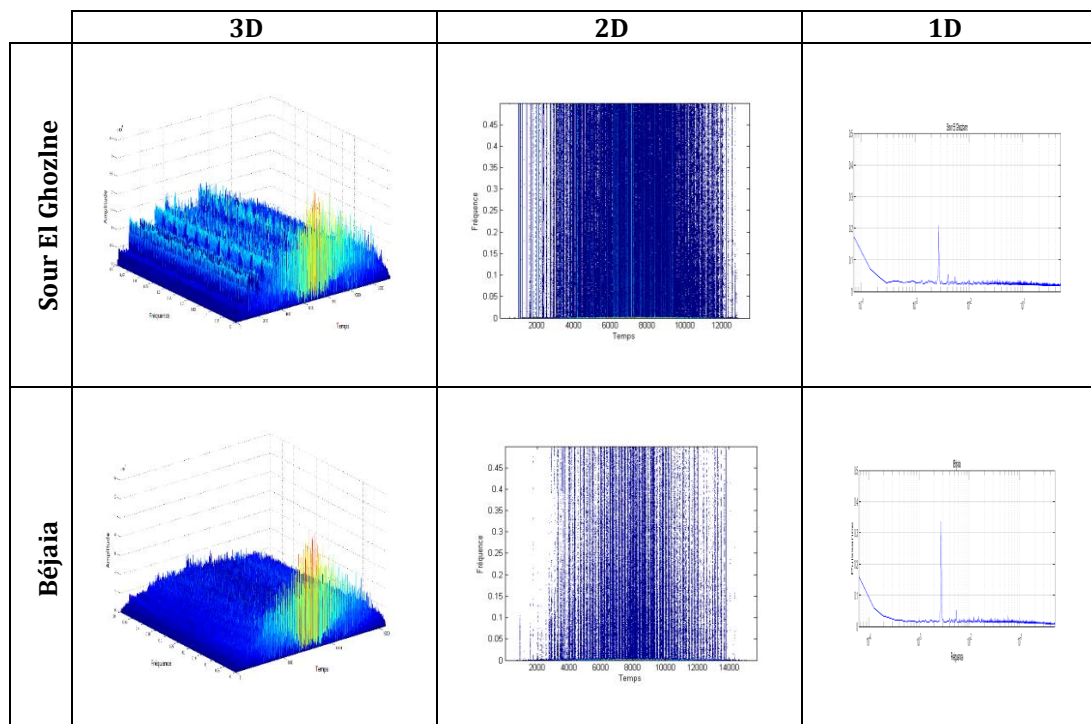
Annexe IV



Annexe IV.1 : La distribution de Wigner-Ville des pluies au pas mensuel (Annaba, Oran, Ain Oussara)

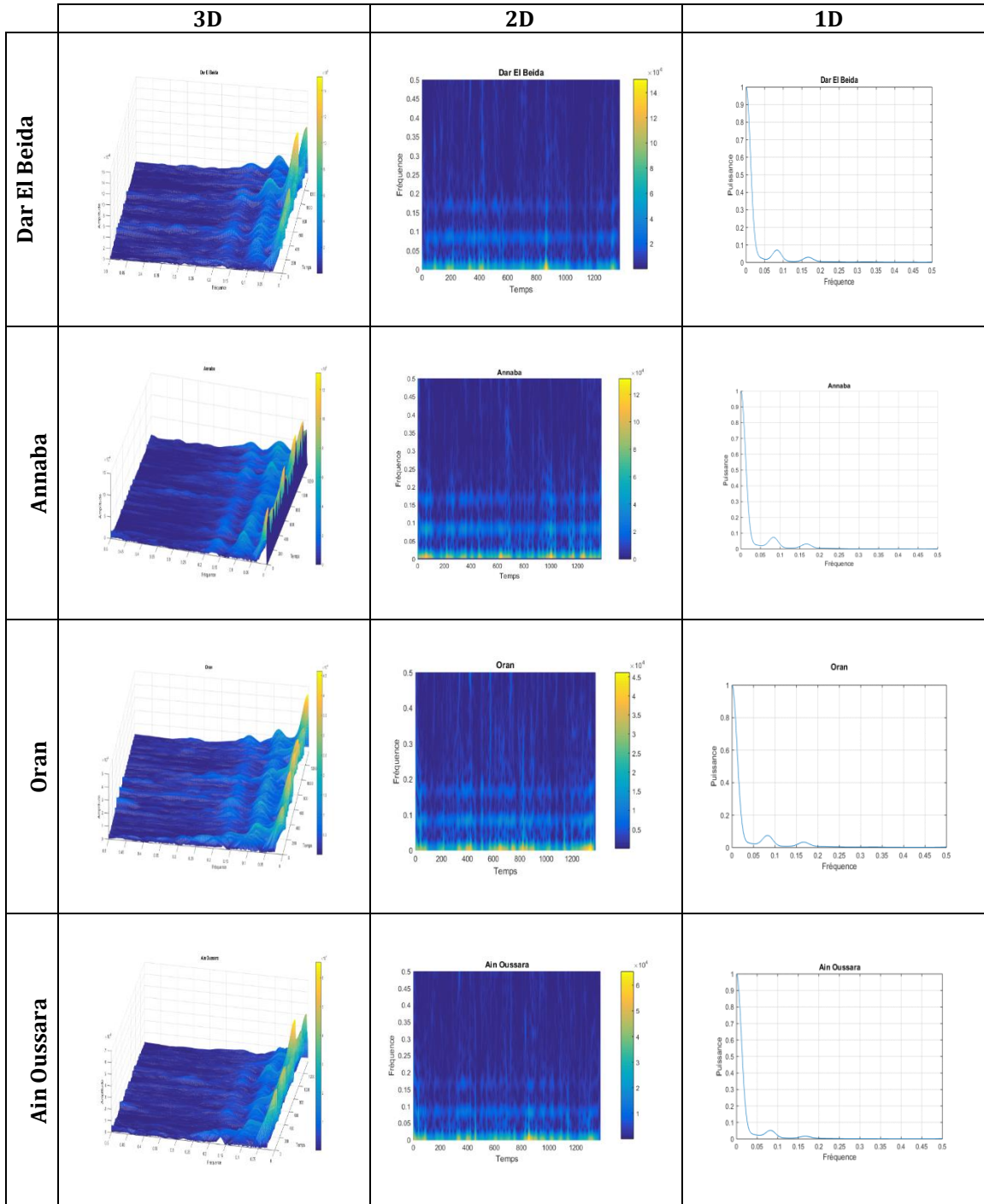


Annexe IV.2 : La distribution de Wigner-Ville des indices d'oscillations climatiques au pas mensuel (PDO, SOI).

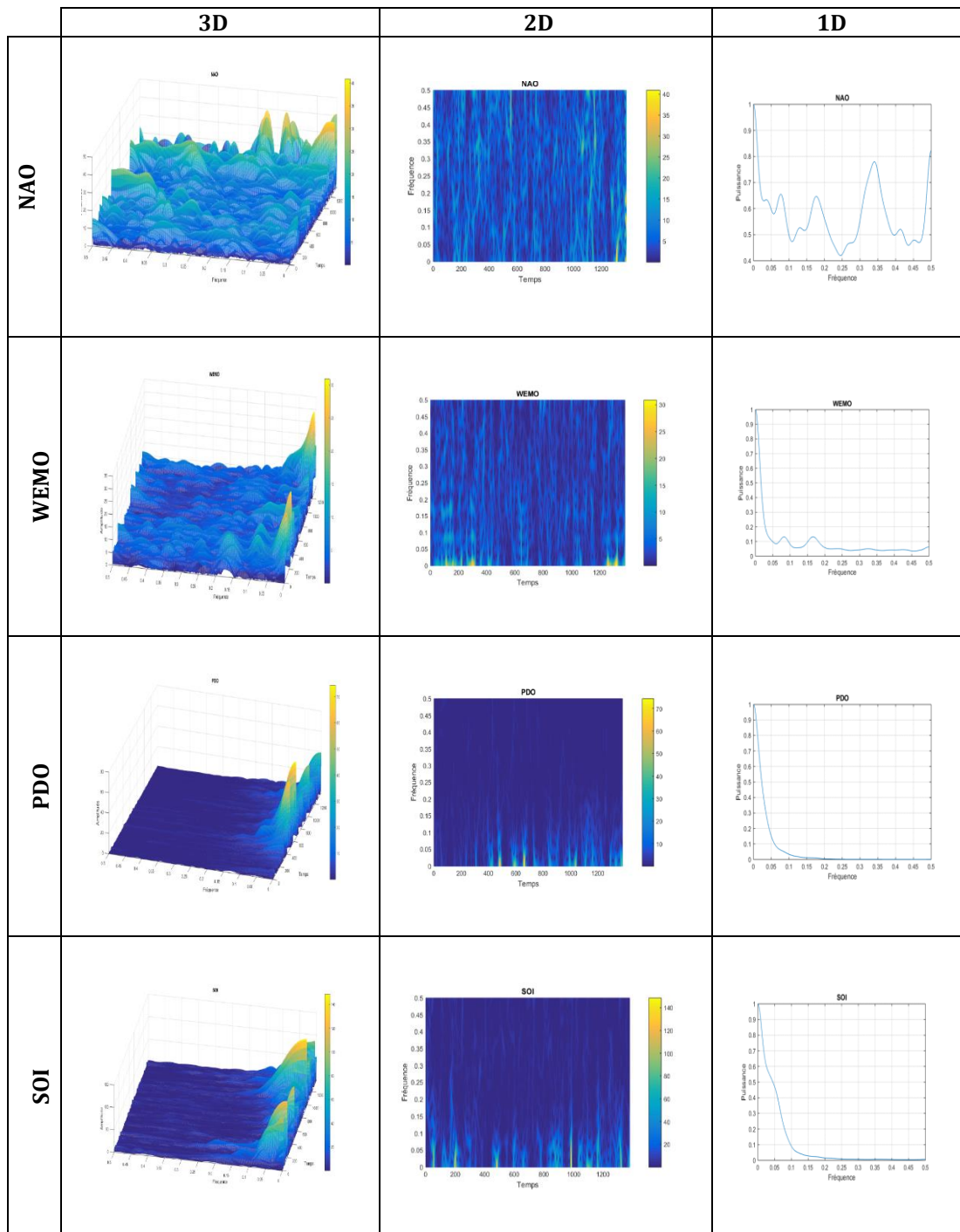


Annexe IV.3 : La distribution de Wigner-Ville des pluies au pas journalier (Béjaia, Sour El Ghozlane)

Annexe V

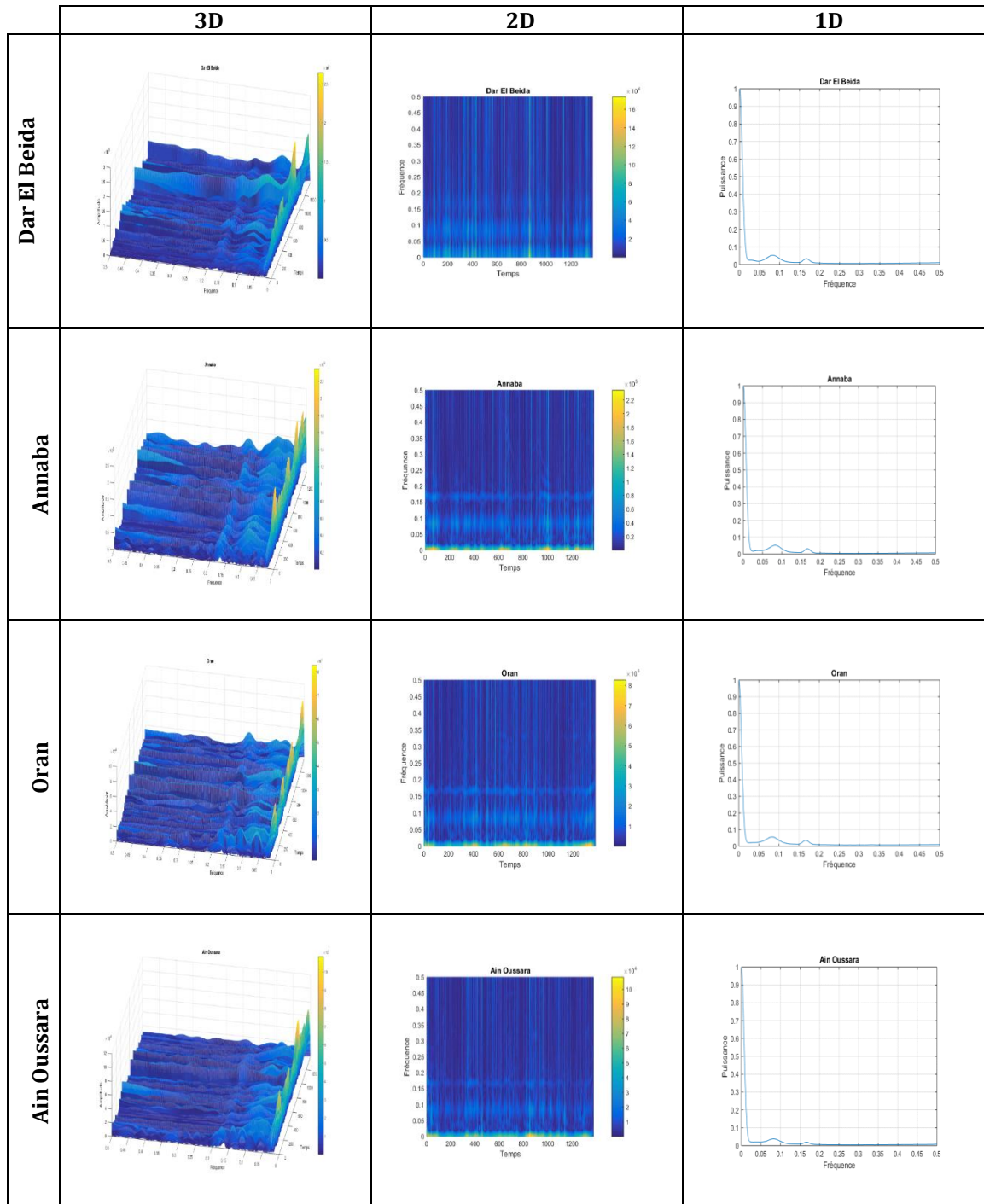


Annexe V.1 : Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée des pluies mensuelles (Dar El Beida, Annaba, Oran et Ain Oussara)

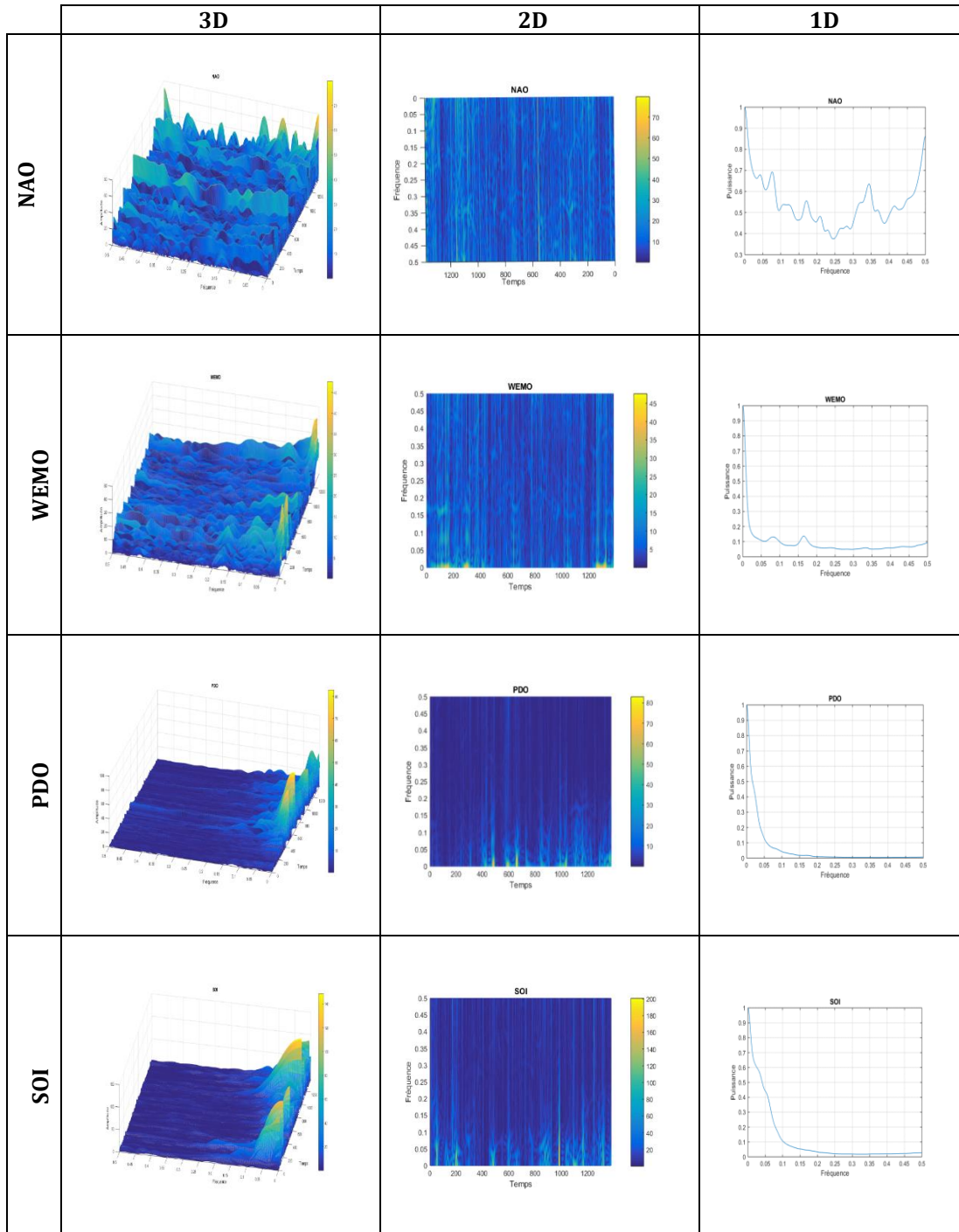


Annexe V.2 : Pseudo-Distribution de Wigner-Ville Lissée des indices mensuels (NAO, WEMO, PDO, SOI).

Annexe VI

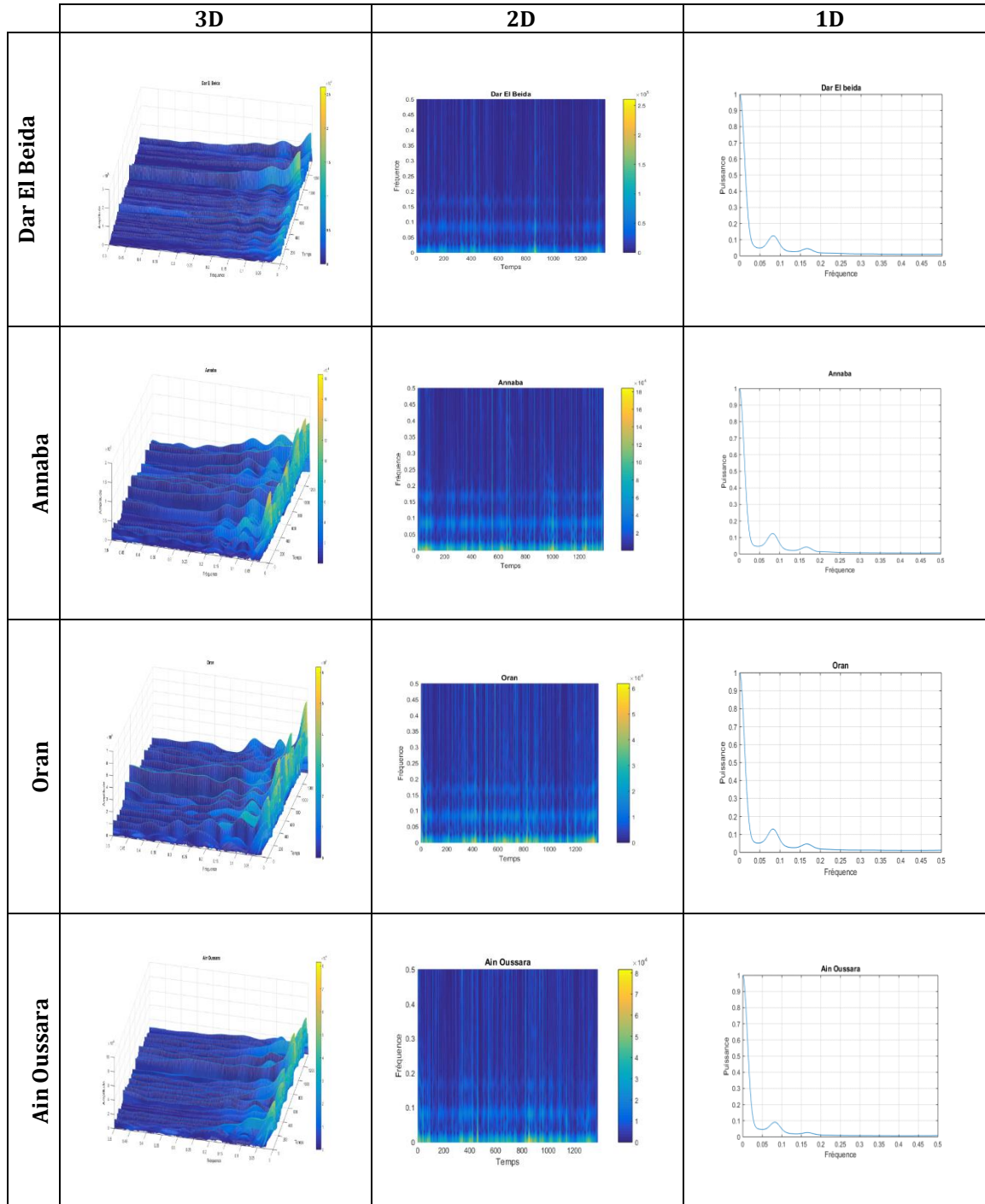


Annexe VI.1 : Distribution de Choi-Williams pour les pluies au pas mensuel : (Dar El Beida, Annaba, Oran et Ain Oussara)

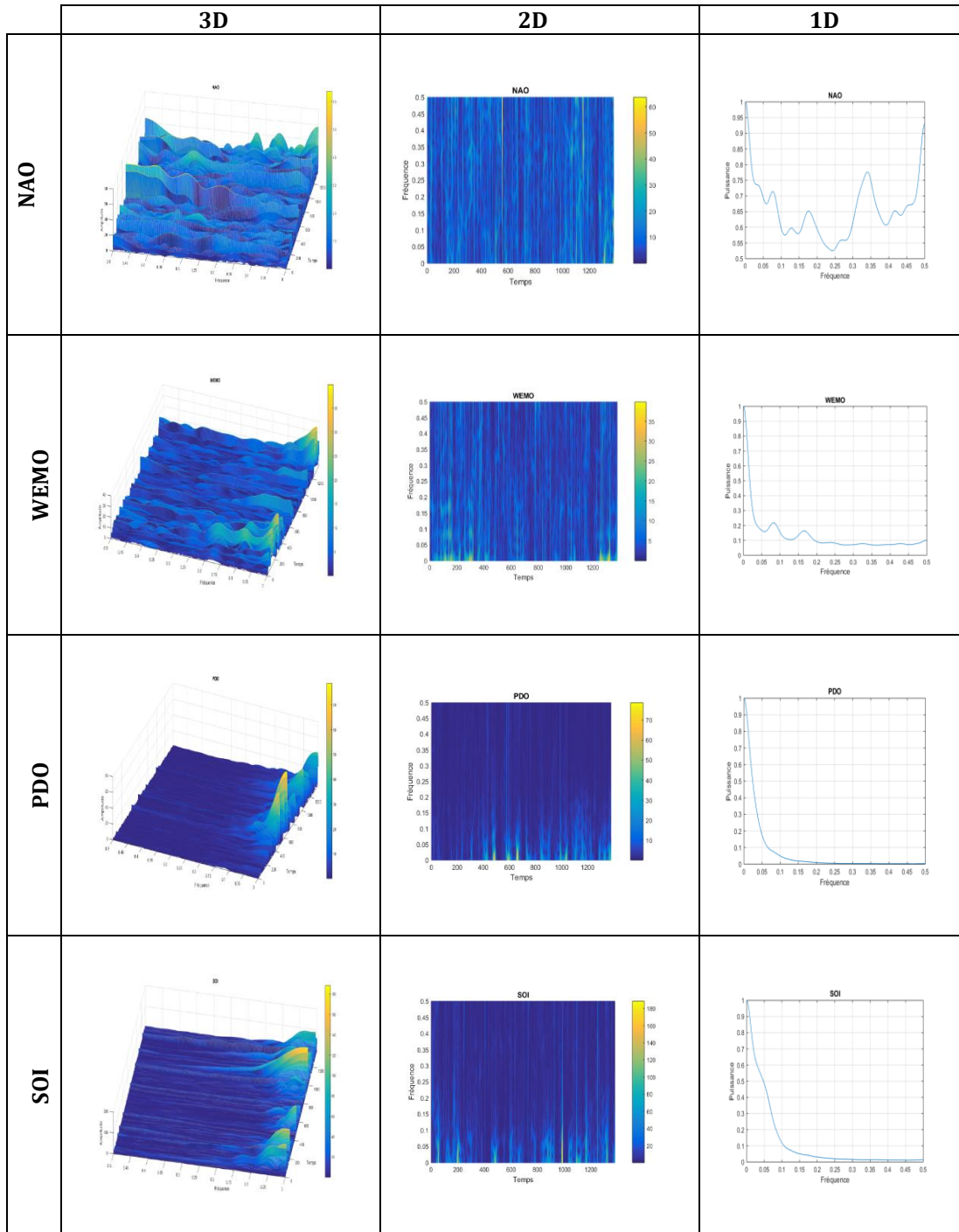


Annexe VI.2 : Distribution de Choi-Williams des indices d'oscillations climatiques au pas mensuel (NAO, WEMO, PDO, SOI).

Annexe VII

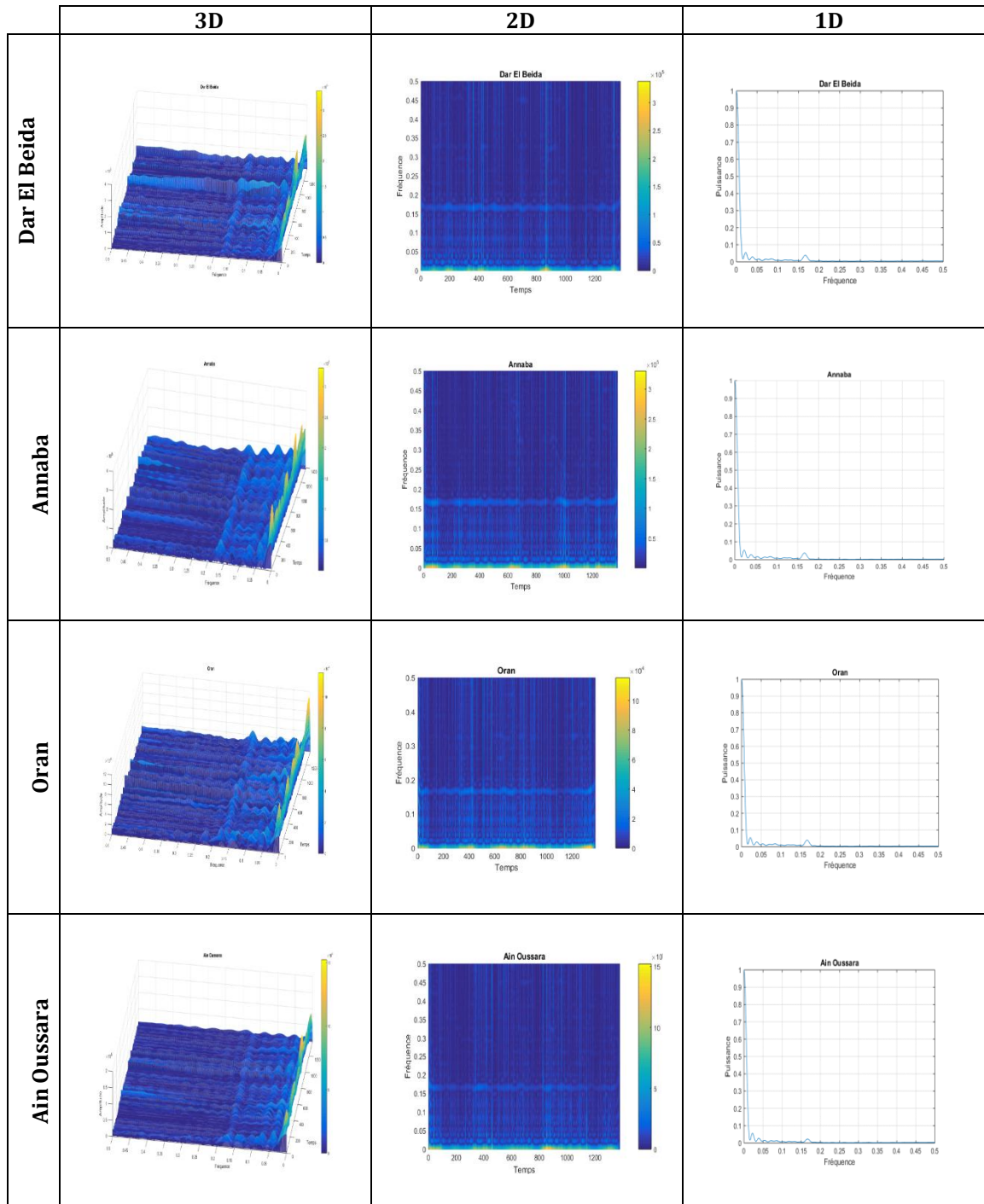


Annexe VII.1 : Distribution de Born-Jordan des pluies mensuelles : (Dar El Beida, Annaba, Oran, Ain Oussara)

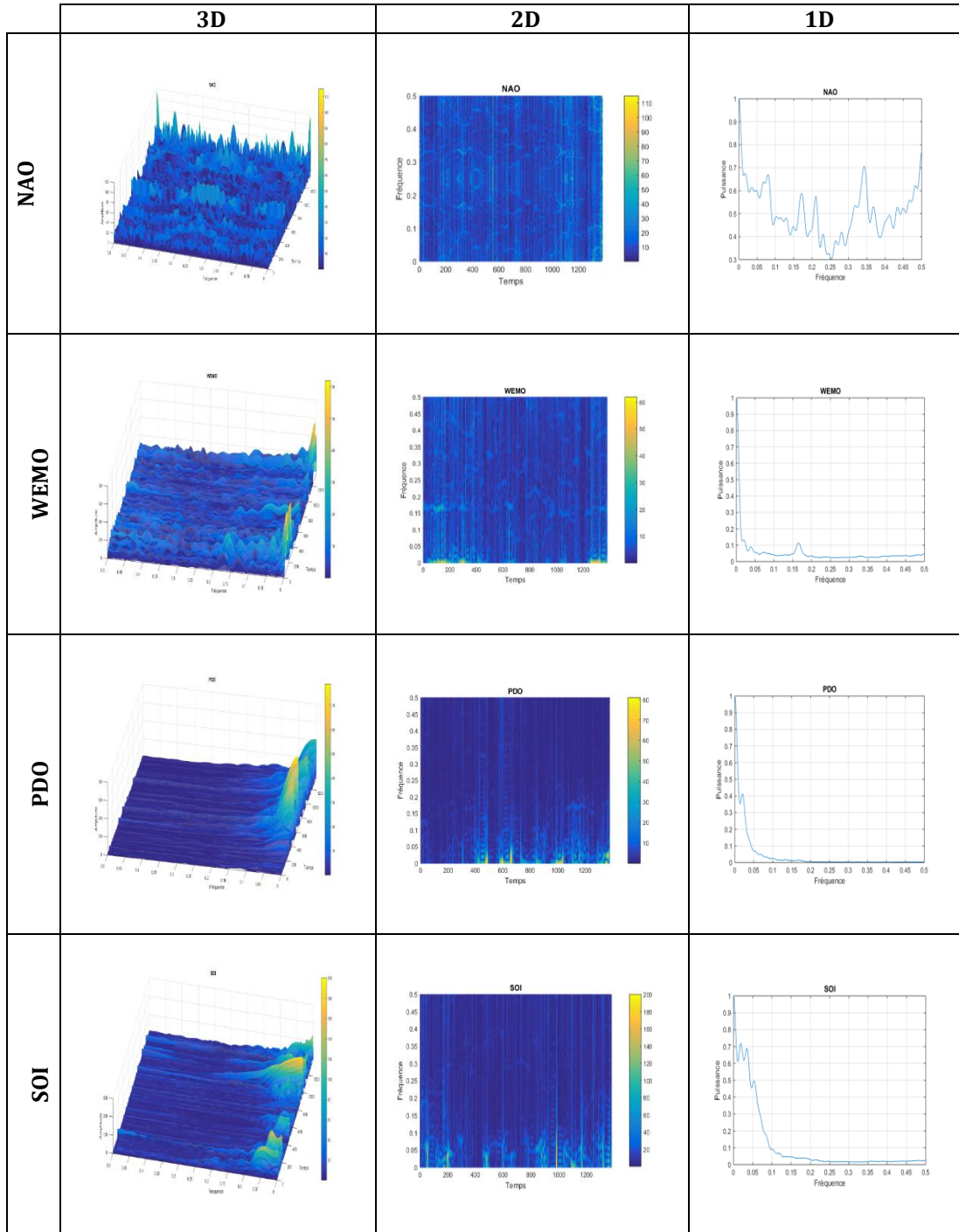


Annexe VII.2 : Distribution de Born-Jordan des indices climatiques au pas mensuel : (NAO, WEMO, PDO, SOI).

Annexe VIII

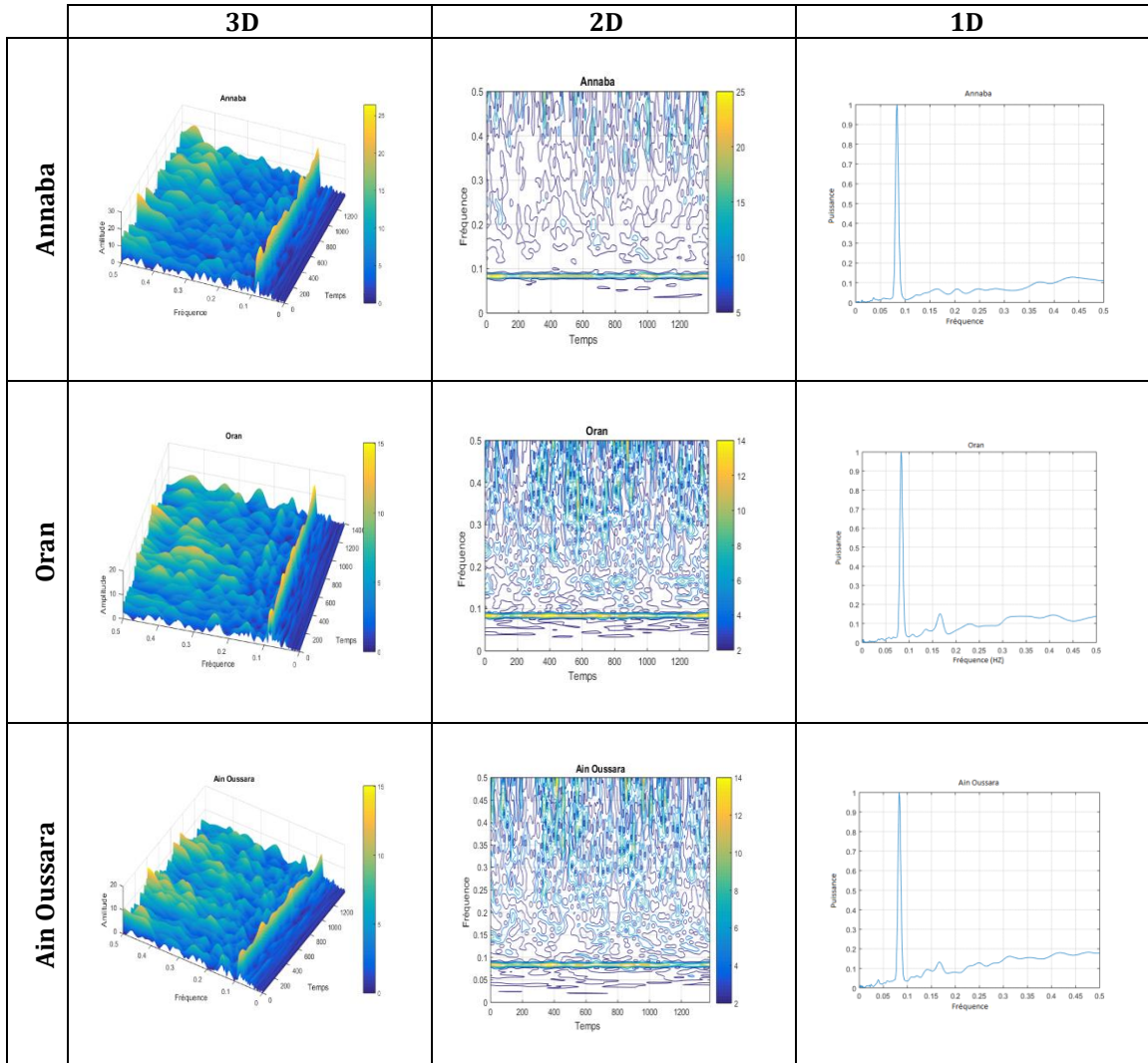


Annexe VIII.1 : Distribution de Bessel des pluies au pas mensuel : (Dar El Beida, Annaba, Oran, Ain Oussara)

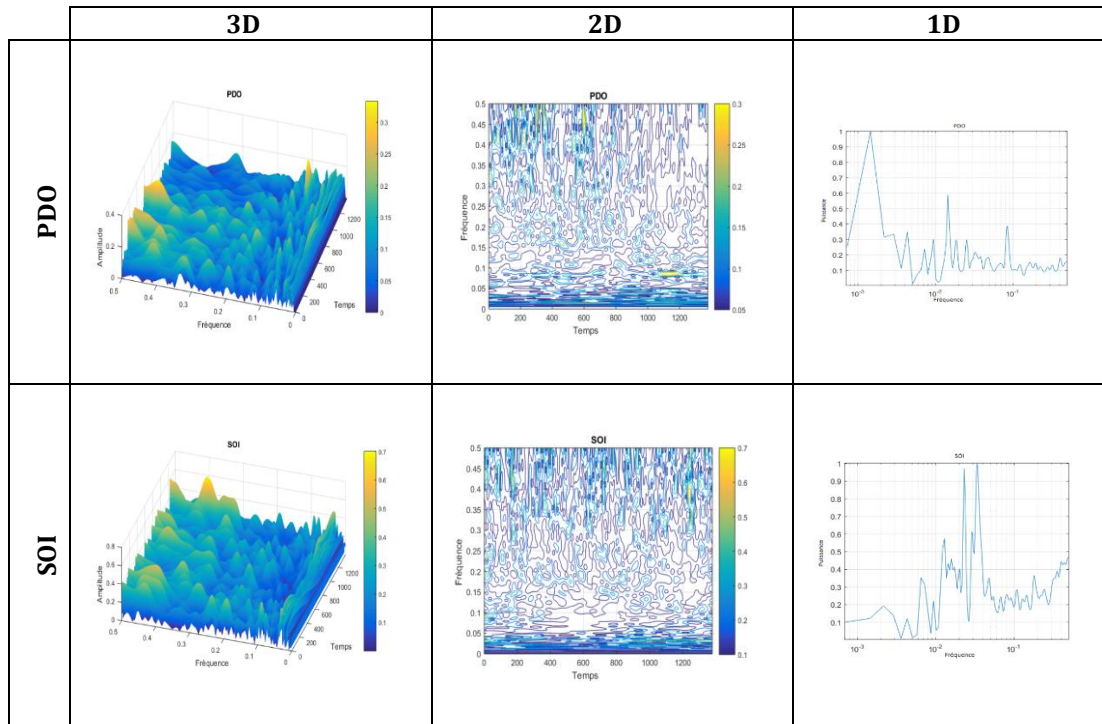


Annexe VIII.2 : Distribution de Bessel des indices d'oscillations climatiques au pas mensuel : (NAO, WEMO, PDO, SOI).

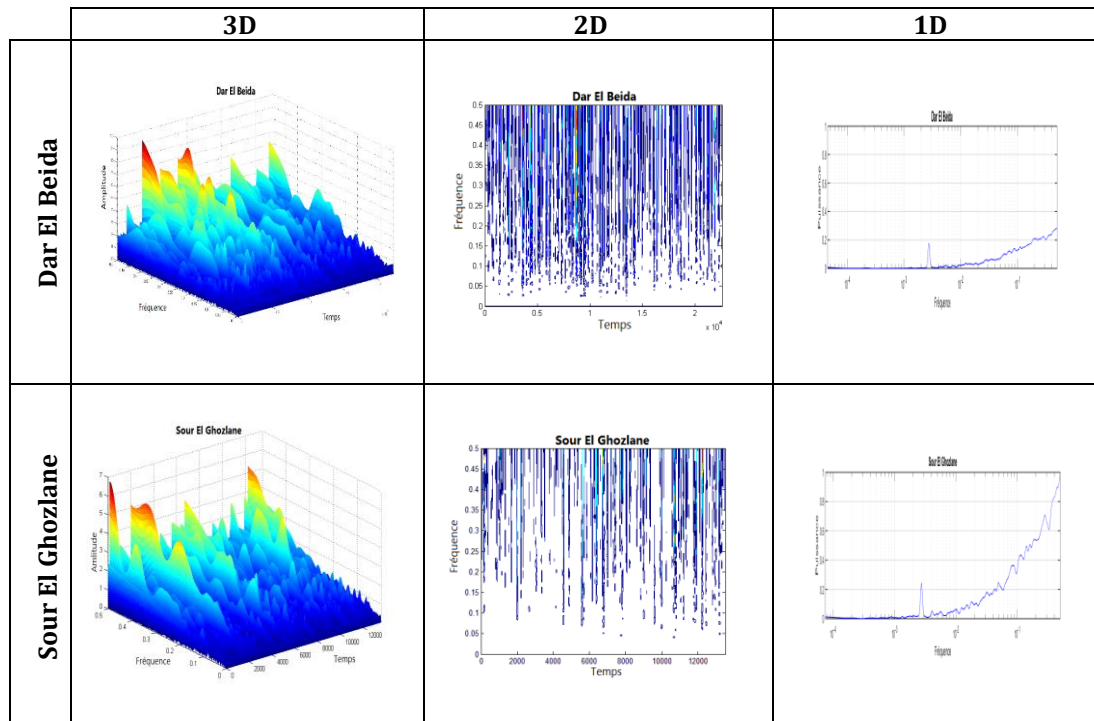
Annexe IX



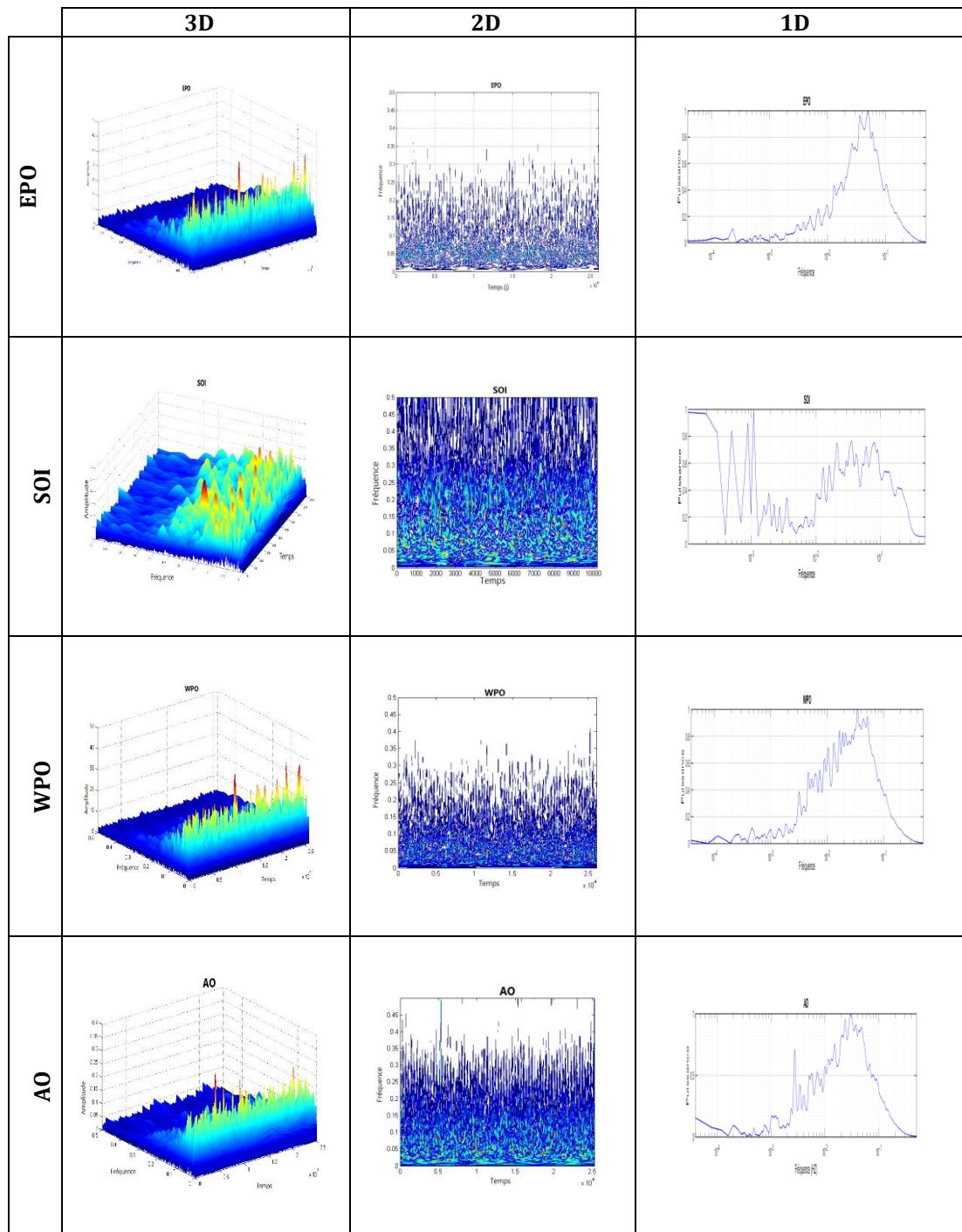
Annexe IX.1 : Transformée en S des pluies mensuelle (Annaba, Oran, Ain Oussara)



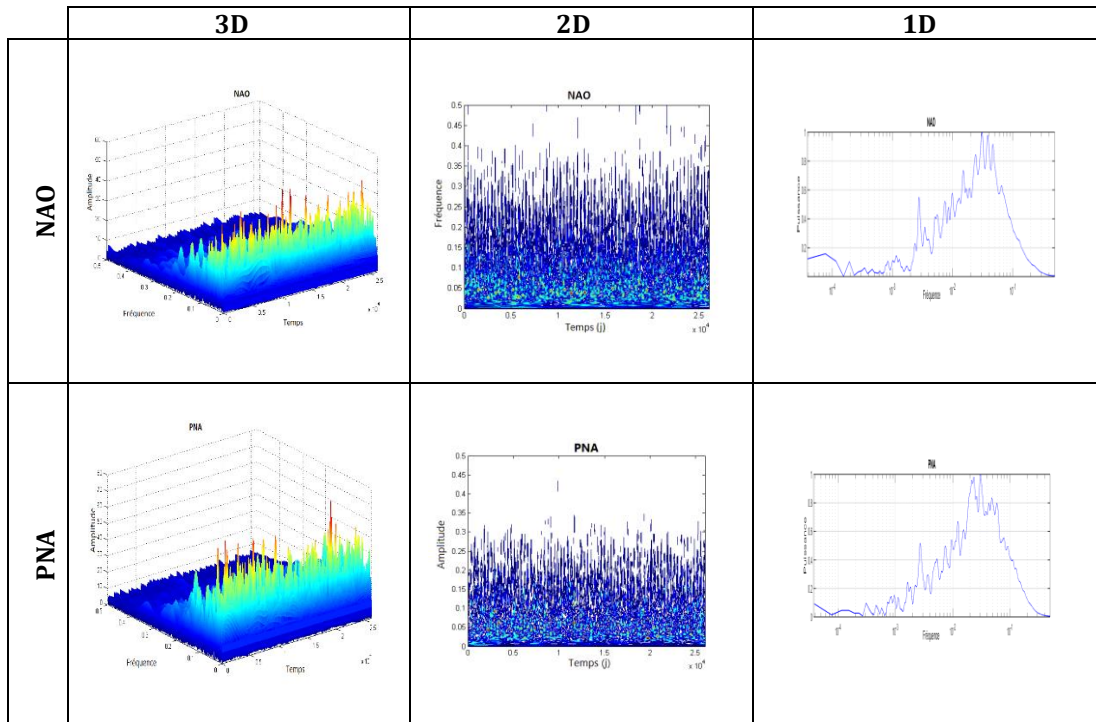
Annexe IX.2 : Transformée en S des indices d'oscillations climatiques (PDO, SOI)



Annexe IX.3 : Transformation en S des pluies au pas journaliers (Dar El Beida, Sour El Ghozlane)

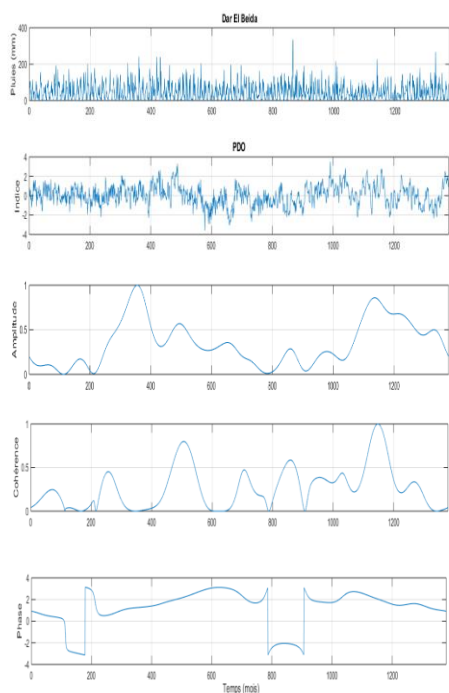


Annexe IX.4 : Transformée en S des indices d'oscillations climatiques au pas journalier (EPO, SOI, WPO et AO)

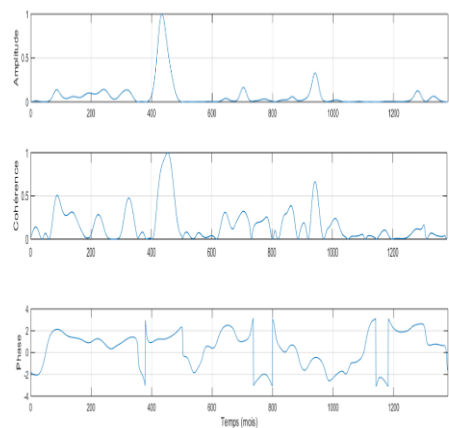


Annexe IX.5 : Transformée en S des indices d'oscillations climatiques au pas journalier (NAO et PNA)

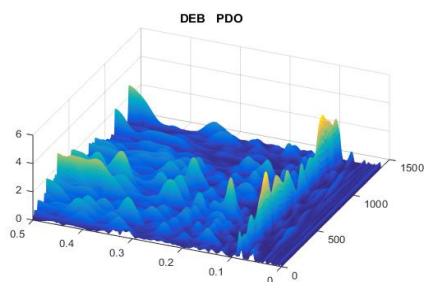
Annexe X



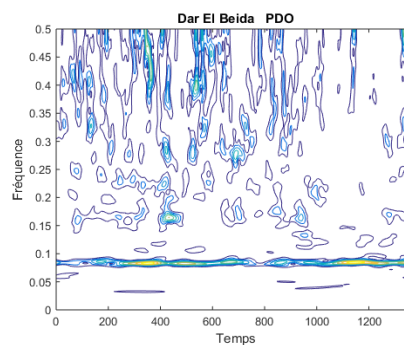
d



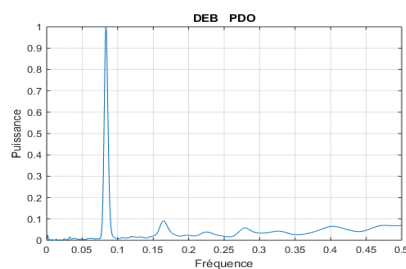
e



a

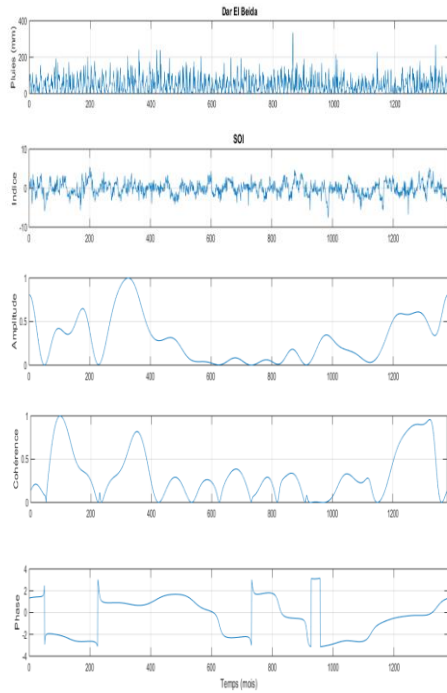


b

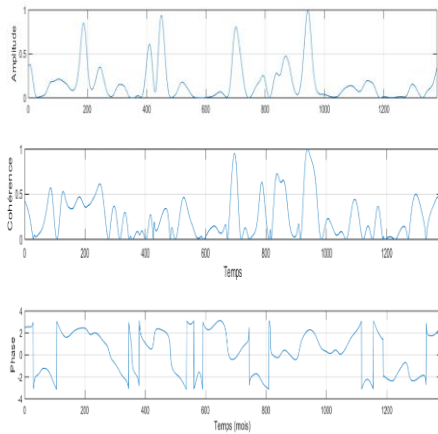


c

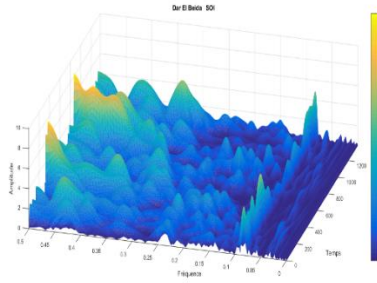
Annexe X.1 : Analyse croisée par la transformée en S (PDO-Dar El Beida) au pas mensuelle (1901-2015) a) Scalogramme en 3D b) 2D c) Spectre global d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle e) pour la composante semestrielle.



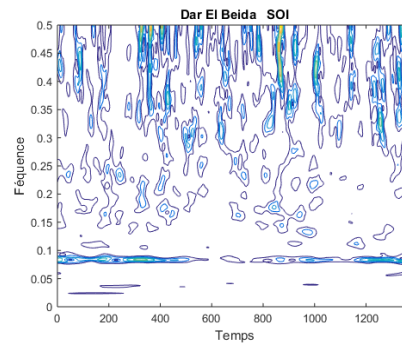
d



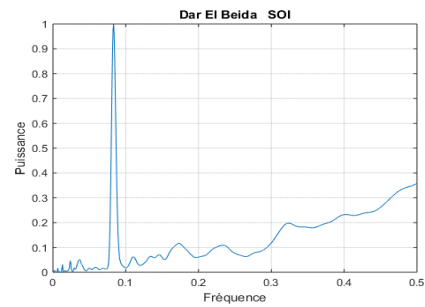
e



a

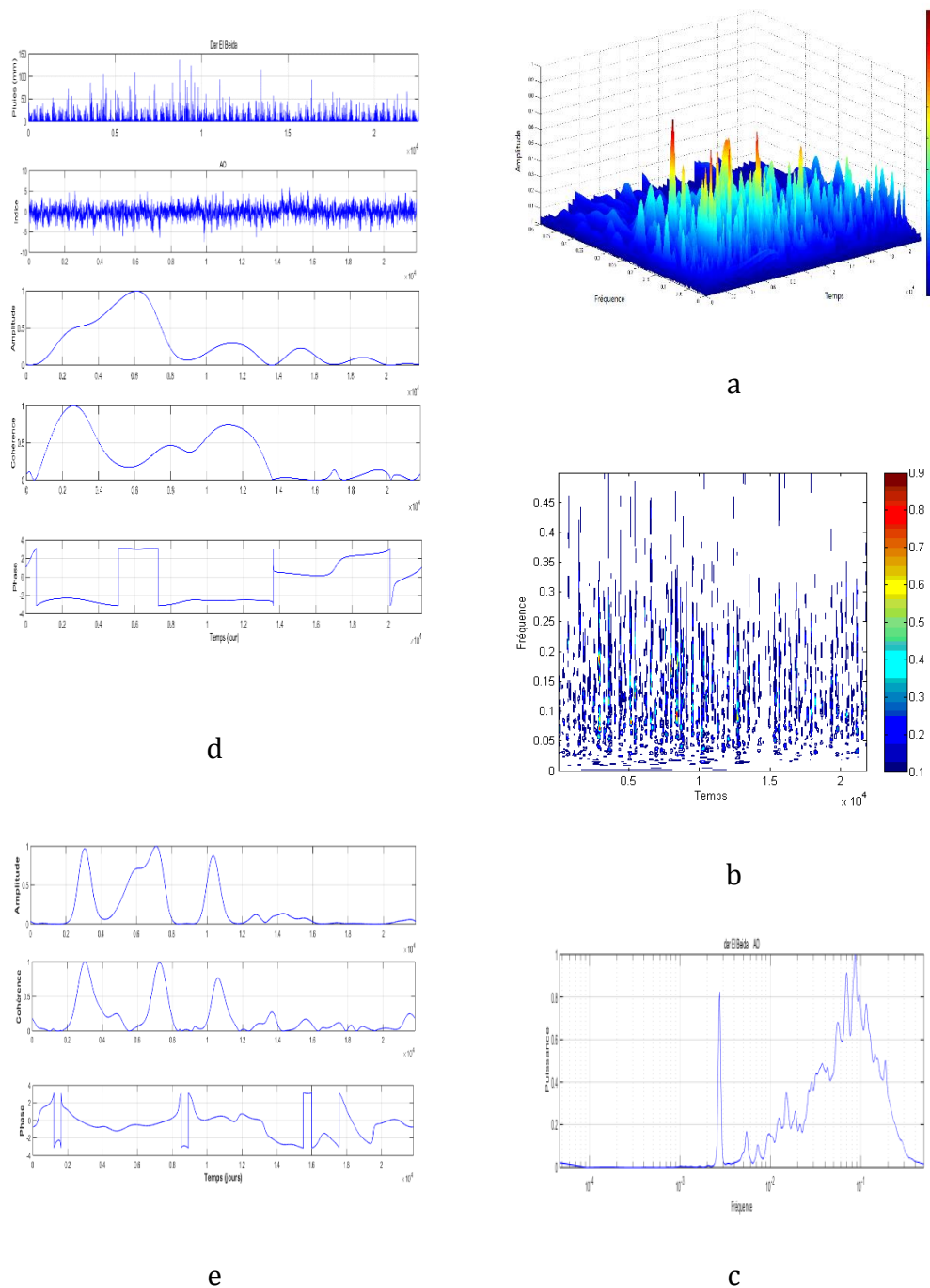


b

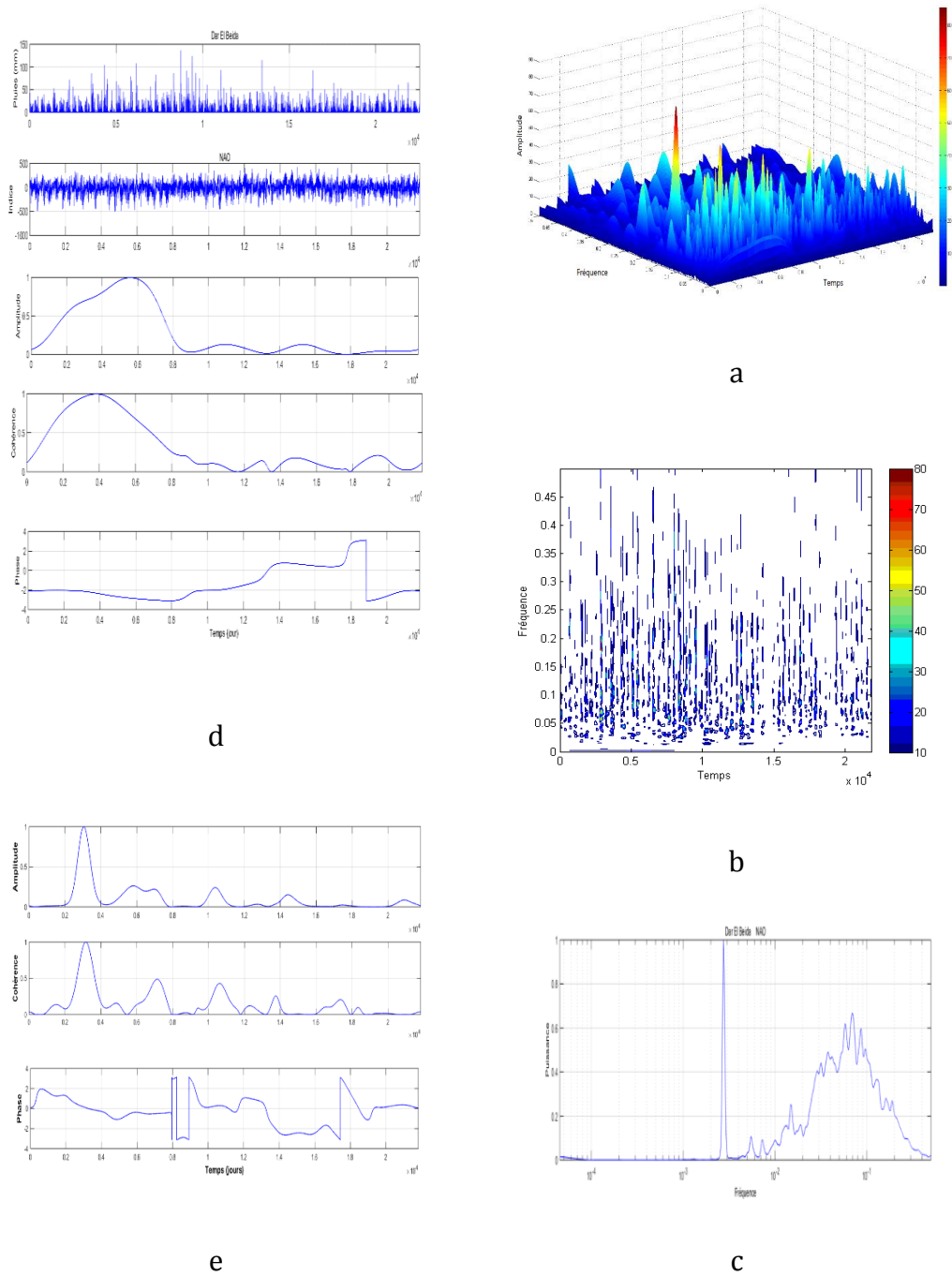


c

Annexe X.2 : Analyse croisée par la transformée en S (SOI-Dar El Beida) au pas mensuelle (1901-2015) a) Scalogramme en 3D b) 2D c) Spectre global d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle e) pour la composante semestrielle.



Annexe X.3 : Analyse croisée par la transformée en S (AO-Dar El Beida) au pas journalier (1950-2009) a) Scalogramme en 3D b) 2D c) Spectre global d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle e) pour la composante semestrielle.



Annexe X.4 : Analyse croisée par la transformée en S (NAO-Dar El Beida) au pas journalier (1950-2009) a) Scalogramme en 3D b) 2D c) Spectre global d) la cohérence et la phase pour la composante annuelle e) pour la composante semestrielle

عنوان المذكرة: تحليل التردد الزمني للإشارات الهيدرولوجية باستعمال تحويل فينير-فيل وتحويل ستوكويل

المؤطر: شتيح محمد

الإسم: ايمان

اللقب: بن عروس

ملخص: الحاجة الملحة الى تحليل، معالجة، وتحديد مميزات البيانات الهيدرولوجية، والتي هي في اغلب الأحيان غير مستقرة وغير خطية، اوجبت علينا التطرق الى تقنيات أكثر فعالية. يعتمد العمل في الأساس على تحليل التردد الزمني وذلك باستخدام تحويل فينير-فيل وتحويلات أخرى تابعة الى مجموعة كوهن، وقد تطرقنا على وجه الخصوص الى تحويل ستوكويل. يهدف هذا العمل الى تحليل بيانات التساقطات المطرية لبعض المحطات من شمال الجزائر، وذلك من اجل استخلاص ما أمكن من المعلومات الهيدرولوجية وتحديد العلاقات المحتملة بين الامطار ومؤشرات التذبذبات المناخية. النتائج المتحصل عليها مشجعة وثرية للمساعدة في فهم التقلبات الجوية في الجزائر.

كلمات مفتاحية: التردد الزمني، تحويل S، فينير-فيل، الهيدرولوجية، التقلبات الجوية، شمال الجزائر

Memory title : Time-Frequency Analysis by the Wigner-Ville Distribution and the Stockwell Transform of Hydrological Signals

Name : Benarous

First name : Imane

Directed by : Chettih Mohamed

Abstract : The need to analyse, process and describe the most commonly non-stationary and non-linear hydrological data, requires us to use more appropriate techniques. This work is based on a time-frequency analysis by the Wigner Ville distribution, and some other energy distributions of the Cohen class. We are particularly interested in the Stockwell transform. The work aims to analyse the series of rainfall of some stations of northern Algeria in order to extract the maximum hydrological information and establish the possible links between rainfall and climate oscillations indexes. The results are encouraging to help understand the problem of climate change in Algeria.

Key words: Time-Frequency, S Transform, Wigner-Ville, Hydrology, climate change, Northern Algeria.

Titre du mémoire : Analyse Temps-Fréquence par la Distribution de Wigner-Ville et la Transformée de Stockwell des signaux Hydrologiques

Nom: Benarous

Prénom: Imane

Encadreur: Chettih Mohamed

Résumé : La nécessité d'analyser, traiter et décrire les données hydrologiques le plus couramment non stationnaire et non linéaire, nous oblige à recourir à des techniques plus appropriées. Ce travail est basé sur une analyse temps-fréquence par la distribution de Wigner Ville et quelques autres distributions énergétiques de la classe de Cohen, mais, on s'intéresse plus particulièrement la transformée de Stockwell. Le travail vise à analyser les séries de pluies de quelques stations de l'Algérie du Nord en vue d'extraire le maximum d'informations hydrologiques et établir les liens possibles entre les pluies et les indices d'oscillation climatiques. Les résultats s'avèrent encourageants et promoteurs pour contribuer à comprendre le problème des changements climatiques en Algérie.

Mots clés : Temps-fréquence, Transformée en S, Wigner-Ville, Hydrologiques, Changements climatiques, Algérie du Nord.