

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université de Batna  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Électronique



## Mémoire

Pour Obtenir le diplôme de Magister en Électronique

Option :

Micro-ondes Pour Télécommunication

Présenté Par :

Mr: MERIANE Brahim

## Thème

Analyse du Signal de Parole par Les Ondelettes  
'Application Aux Mots Isolés'

Soutenu le : 21 / 12 / 2009

Devant le Jury :

- Dr. Lamir SAIDI	M.C U de Batna	Président
- Dr. Moussa BENYOUCEF	M.C U de Batna	Rapporteur
- Pr. Djamel BENATIA	Professeur U de Batna	Examineur
- Dr. Redha BENZID	M.C U de M'sila	Examineur

# Remerciements

*Tout d'abord je Remercie le bon Dieu le tout puissant pour la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donné pour accomplir ce travail.*

*Je remercie très sincèrement " Dr. Benyoucef Moussa " L'encadreur de ce travail, pour ses conseils pertinents, Ses orientations judicieuses, et sa patience.*

*Nous tenons à remercier également les membres de jury Pr. D.BENATIA, Dr. L. SAIDI, Dr. R. BENZID, de Bien vouloir accepter d'examiner et de juger ce modeste travail.*

*Meriane, Brahim*

# Dédicaces

*Je Dédie ce Travail à :*

*Ma Mère,*

*Mes Frères et Mes Sœurs, Surtout Nadia*

*Tous mes amis sans exception.*

*A tout ma famille Meriane Surtout. Dr. Meriane moussa*

*A tous mes amis particulièrement : Simo, M, Ouassim,*

*A, Mohammed, B, Halima, D, Slimane, D, Ali, I, Hamid, Rahabe A.R.*

*H, Mourad.A, Abd El Ali, Karim,*

*Et Tous Les Etudiants De La Promotion 2009*

*À toute Personne Qui de Prés ou De Loin a Rendu*

*Agréable Mon Séjour à Batna*

*Meriane, Brahim*

## *Chapitre I*

### *Le Signal Vocal*

Introduction générale	1
Introduction	3
1. Aspect Anatomico-physiologique	3
1.1 Poumons et conduit Trachéo-bronchique	3
1.2 Larynx	3
1.3 Cordes vocales	3
1.4 Conduit vocal	4
2. L'appareil phonatoire humain	4
2.1 Généralités	4
2.2 Modèles Articulateurs	5
3. Mécanisme de la phonation	6
3.1 Modèle équivalent du Conduit vocal	6
3.2 Acoustique des Voyelles	8
4. Son voisé et Non voisé	8
5. Caractérisation acoustique et articulatoire des voyelles	10
6. Classes phonétiques	11
6.1 Définition du phonème	11
6.2 Différentes classes phonétiques	11
6.2.1 Les voyelles	12
6.2.2 Les Occlusives	12
6.2.3 Les Fricatives	12
6.2.4 Les sonantes	12
6.2.5 Les semi-consonnes (ou semi-voyelles ou glissantes)	12
6.2.6 Les liquides	13
6.2.7 Les nasales	13
6.2.8 Les affriquées	13
7. Caractéristiques de phonation	13
8. Les Méthodes d'analyse de la parole	14
Conclusion	16

## *Chapitre II*

### *Analyse Des Signaux*

Introduction	17
1. Classification des Signaux	17
1.1 Classification phénoménologique	17
1.1.1 Signaux Déterministes	17
1.1.2 Signaux Aléatoires	18
1.2 Classification énergétique	19
2. Analyse temporelle des Signaux (Comparaison des Signaux)	19
2.1 Corrélation de signaux à énergie finie	20
2.1.1 Inter-corrélation de deux signaux	20
2.1.2 Auto-corrélation d'un signal	20
2.2 Corrélation de Signaux à Puissance Finie	20
2.3 Propreté de l'Auto-corrélation	21
3. Analyse fréquentielle des Signaux (Transformée de Fourier)	22
3.1 Transformation de Fourier	22
3.1.1 Définition de la transformation de Fourier	22
3.1.2 Transformée de Fourier Discrète	23
3.1.3 Transformée de Fourier d'un signal continu non-périodique	24
3.2 Discrétisation de la fréquence	24
3.3 Puissance et énergie d'un signal	25
3.4 Transformée de Fourier Rapide	26
3.5 Transformée de Fourier Fenêtrée	27
3.5.1 Généralités	27
3.5.2 Applications	30
4. Limitation de la transformée de Fourier	30
4.1 TF du Signal Stationnaire	30
4.2 TF du signal non Stationnaire	31
4.2.1 Définition du Signal Non-Stationnarité	31
4.2.2 Les Convenaient de la TFCT	33
Conclusion	34

## *Chapitre III*

## *Les Ondelettes - Etude théorique -*

Introduction	35
<b>1. La transformée en Ondelettes</b>	<b>35</b>
1.1 Un peu d'histoire	36
1.2 Définition	37
1.2.1 De la Transformée de Fourier à la Transformée en Ondelette	37
1.2.2 La transformée d'Ondelette	37
1.2.3 Illustration du changement d'échelle et de la translation	39
1.3 L'Algorithme de calcul des Coefficients	39
<b>2. Transformée en Ondelettes Continue ( CWT )</b>	<b>41</b>
<b>2.1</b> Initialisation de a	41
<b>2.2</b> Incrémentation de b	41
<b>3. Transformée en Ondelettes Discrète</b>	<b>42</b>
<b>4. Analyse Multi-résolution</b>	<b>44</b>
<b>5. Les Différents Types d'Ondelettes</b>	<b>46</b>
5.1 Ondelette de Haar	46
5.2 Ondelette de Littlewood Paley	46
5.3 Ondelette Splines	47
5.4 Ondelette Bi orthogonale	48
5.5 Ondelette de Morlet	48
5.6 Chapeau Mexicain	48
5.7 Ondelette de Daubechies	49
<b>6. Avantages de l'analyse en Ondelettes</b>	<b>50</b>
Conclusion	55

### *Chapitre IV      Application des Ondelettes sur le signal de Parole*

Introduction	56
<b>1. Analyse classique</b>	<b>56</b>
1.1 Acquisition de Parole avec CoolEdit	56
1.2 Calcul des Formants	58
1.3 Calcul de la Fréquence Fondamentale $F_0$	58
<b>2. Acoustique des consonnes</b>	<b>60</b>

3. Simulation Avec Matlab	63
3.1 Choix de l'Ondelette	63
3.2 Choix des échelles	64
4. CWT de Voyelles	66
4.1 CWT de Voyelles / A /	66
4.2 CWT de Voyelles / I /	66
4.3 CWT de Voyelles / A / avec différent locuteurs	67
4.4 CWT de Voyelles / U / avec différent locuteurs	68
5. CWT des mots isolé	69
5.1 CWT de Voyelle /A/, mot Baffe	69
5.2 CWT CWT de Voyelle / U / de mot / Une /	70
5.3 CWT de mot / Une /	71
5.4 CWT de mot / Oui /	71
Conclusion	73
Conclusion Générale	74

# *Introduction générale*

**L**e Traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement d'analyse et d'interprétation des signaux, elle fait donc largement appel aux résultats de la théorie de l'information des statistiques ainsi qu'à de nombreux autres domaines des mathématiques appliquées [1].

Les Signaux à traiter peuvent provenir de sources très diverses, mais la plupart sont des signaux électriques ou devenues électriques à l'aide de capteurs et transducteurs (microphones, capteurs thermiques, optiques, pression, vitesse, accélération, et en général de toutes grandeurs physiques & chimiques) [1.2].

Habituellement, les signaux issus des phénomènes physiques sont de nature Non-Stationnaire, voire également formés de plusieurs composantes fréquentielles et se manifestent par des oscillations évoluant au cours du temps. Parmi les signaux non-Stationnaires, on peut citer les signaux de parole, de radar ou de sonar, biomédicaux, acoustiques, astronomiques ... [3.12].

Dans de telles situations, la représentation temporelle classique du signal ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples, tandis que la représentation fréquentielle (transformée de Fourier) n'en permet pas la localisation temporelle de ces composantes. Ainsi, partant des propriétés de ces signaux et des limitations de la transformée de Fourier TF, il est naturel de s'orienter vers un schéma d'analyse Temps-Fréquence Multi-Composantes. En effet par définition, les représentations Temps-Fréquence (RTF) sont des transformations [8.9].

Conjointes du temps et de la fréquence et fournissent une information sur la façon dont la fréquence du signal varie au cours du temps.

Bien que ces représentations sont adaptées à ce genre de signaux non stationnaire en donnant plus de détails, ils représentent des inconvénients tel que l'apparition des terms d'interférences.

Pour remédier à ce problème, la transformée en Ondelettes est utilisée. Elle permet de réaliser une analyse des structures locales d'un signal avec un zoom qui dépend de l'échelle considérée. C'est-à-dire une analyse dont la résolution fréquentielle (représentation temporelle) varie avec la localisation temporelle (représentation fréquentielle). [11.19].

Notre mémoire comprend quatre chapitres

- La première est consacrée à la description du signal de parole, ses caractéristiques, son système de production et quelques rappels essentiels.
- Dans le deuxième chapitre on a exposé les différents types de signaux, Et leurs caractéristiques.
- Dans troisième chapitre, la théorie des ondelettes a été exposée en mettant en exergue les différents types d'ondelettes utilisées dans le traitement du signal et particulièrement la parole.
- Le dernier chapitre a été consacré aux différentes applications des ondelettes sur le signal de parole notamment les voyelles et les mots isolés. Les discussions des résultants obtenus ont fait partie de ce chapitre.

Enfin, le manuscrit est clôturé par une conclusion générale résumant le travail effectué ainsi que les perspectives

*Chapitre I*  
*Le Signal Vocal*

---



## Introduction

**L**a parole est le principal moyen de communication dans toute société humaine. Son apparition peut être considérée comme concomitante à l'apparition des outils, l'homme ayant alors besoin de raisonner et de communiquer pour les façonner.

D'un point de vue humain, la parole permet de se dégager de toute obligation de contact physique avec la machine, libérant ainsi l'utilisateur qui peut alors effectuer d'autres tâches.

Nous allons présenter, dans ce chapitre, certaines méthodes utilisées pour la modélisation de la parole, ainsi que les différentes taxonomies des sons observables en parole, et les variations qui peuvent y être constatées. Nous allons cependant tout d'abord parler des notions qui se rattachent à l'étude des organes biologiques de production, et de compréhension.

On distingue généralement plusieurs niveaux de description du signal parole : acoustique, phonétique et phonologique.

**Au niveau acoustique**, on s'intéresse essentiellement au signal que l'on tentera de caractériser par son intensité, sa fréquence, son timbre et ses propriétés statistiques. **Au plan phonétique**, on considère la génération des sons, les phonèmes qui composent un mot et les classes auxquels ils se rattachent. Enfin, la phonologie s'attache à décrire le rythme, la prosodie, la mélodie d'une phrase. [1].

### 1. Aspect Anatomo-physiologique

Le système vocal humain peut être décomposé en quatre sous-systèmes élémentaires, en l'occurrence :

**1.1 Poumons et conduit Trachéo-bronchique** : la trachée-artère est un conduit cylindrique qui relie le larynx et les bronches qui se ramifient à l'intérieur des poumons.

**1.2 Larynx** : est un ensemble de muscles et de cartilages mobiles qui entourent une cavité située à la partie supérieure de la trachée.

**1.3 Cordes vocales** : en sortes de lèvres symétriques placées en travers du larynx en s'écartant, ils déterminent une ouverture triangulaire appelée glotte, les



Sous voisés résultent d'une vibration périodique des cordes vocales dans un plan horizontale obéissant à un phénomène d'oscillation et de relaxation.

**1.4 Conduit vocal :** et un ensemble de cavités situées entre la glotte et les lèvres. On peut distinguer aussi :

- la cavité nasale : formée des fosses nasales qui sont deux cavités de fixes.
- la cavité buccale
- la cavité pharyngienne

Les cavités buccale et pharyngienne forment le conduit oral, qui possède un volume et une géométrie extrêmement variable grâce essentiellement à la grande mobilité de la langue. [2]

## 2. L'appareil phonatoire humain

### 2.1 Généralités

La production de la parole est assurée, chez l'homme, par plusieurs organes successifs. Les poumons sont indispensables dans ce processus puisqu'ils assurent la génération d'un composant incontournable: de l'air sous pression. Cet air, expulsé, traverse alors les cordes vocales qui entrent ou non en action pour produire un voisement. Ce voisement correspond à la fréquence fondamentale qui est le timbre de la voix. [2, 3].

Cette fréquence fondamentale étant produite, elle est propagée dans l'ensemble du conduit vocal. Ce conduit est de forme de volume variable. Plusieurs organes concourent à des possibles modifications du volume qui permettent de produire des sons différents. Parmi ces organes se trouve la langue, acteur principal des modifications qui peut agir par constriction ou occlusion du conduit vocal. Les dents et les lèvres agissent également par occlusion ou constriction, à des degrés cependant moindres. Le conduit vocal est, la plupart du temps, constitué du seul conduit buccal. La luvette et son prolongement vers le palais, le vélum, assurent normalement la fermeture du conduit nasal pendant la production de parole. Le conduit nasal peut, dans certains cas, être connecté au conduit vocal. Cette connexion permet de générer des sons supplémentaires en modifiant le



Volume de la caisse de résonance normalement constituée par le seul conduit buccal. Une coupe de l'appareil phonatoire humain est donnée par la figure 1.1. Les différents organes de la production de la parole et leur agencement peuvent servir de base à des modélisations du conduit vocal,

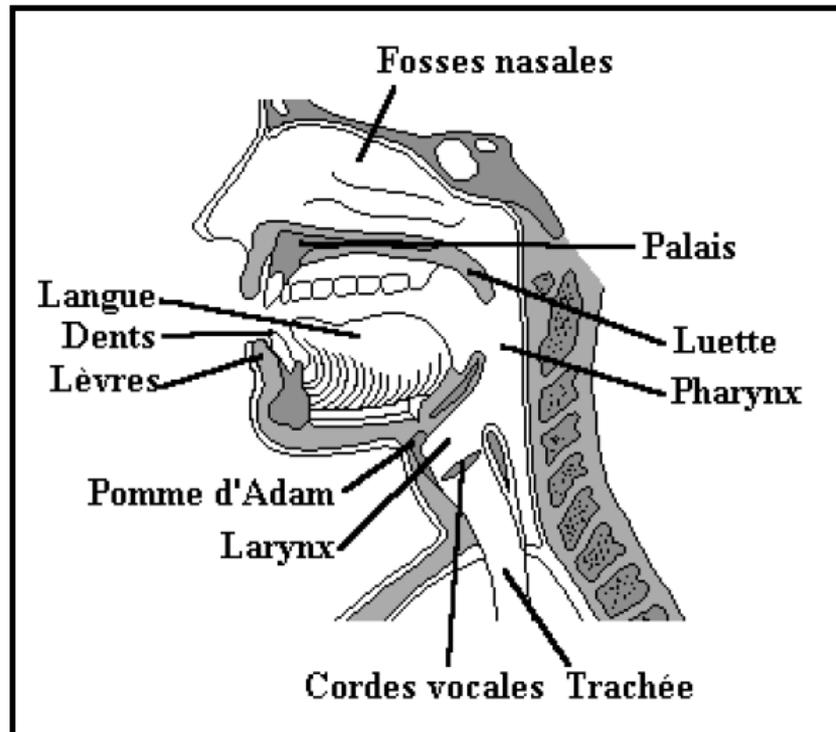


Fig. 1.1 : Coupe de l'appareil phonatoire humain [3].

## 2.2 Modèles Articulateurs

Pour mieux comprendre le fonctionnement de l'appareil phonatoire, il semble judicieux d'essayer de simuler physiquement cet organe faisant intervenir la mécanique et la dynamique des fluides. De telles études partent du principe que la parole est un ensemble de mouvements rendus audibles plutôt qu'un ensemble de sons produits par des mouvements.

Un des modèles les plus connus est le modèle de Maeda [maeda79] qui caractérise le conduit vocal grâce à un ensemble de mesures réalisées sur des images radiographiques par le biais d'une grille semi-polaire.



Ce modèle n'est pas à proprement parler articulatoire mais est plus simplement descriptif. Un ensemble de mesures détermine cependant une forme de conduit et permet donc de prévoir le son qui est y est associé. Certaines études vont actuellement dans le sens d'une exploration fonctionnelle du modèle de Maeda.

### 3. Mécanisme de la phonation

La parole est le résultat de l'action volontaire et coordonnée des appareils respiratoire et masticatoire sous le contrôle du système nerveux central qui reçoit en permanence des informations par rétroaction auditive et par sensation cénesthésiques. [4]

#### 3.1 Modèle équivalent du Conduit vocal

La fonction vocale est difficile à cerner dans la mesure où il n'y a pas d'unité organique particulière exclusivement destinée à produire la voix, cette fonction se greffe sur différents systèmes analogiques.

On peut schématiser le système vocal humain de la manière suivante :

Un excitateur délivre un signal de source qui est modifié par la fonction de transfert d'un résonateur, le fonctionnement du système se déroule, selon la nature du signal excitateur (signal périodique, signal de bruit continue, signal impulsionnel)

Tout cela se passe dans un espace très restreint dans le larynx.

On sait qu'en mécanique des fluides, il suffit de créer une turbulence sur un écoulement gazeux pour créer un bruit, si cette turbulence persiste et devient régulière on obtient un son et l'émetteur vibre, c'est ce qui se passe au niveau des cordes vocales parce qu'il y a accord entre la force d'écoulement de l'air venant des poumons et la force de Bernoulli qui tend à fermer le larynx.

Pour que le son créé par les vibrations des cordes vocales devienne parole, il faut qu'il y ait modulation par un résonateur. Ce qui consiste à transformer un phénomène continu en signal signifiant.

Cette modulation est attribuée au conduit vocal, qui être assimilée à un ensemble de résonateurs [2].



Le conduit vocal peut être assimilé à des cellules élémentaires (Fig.1.2),

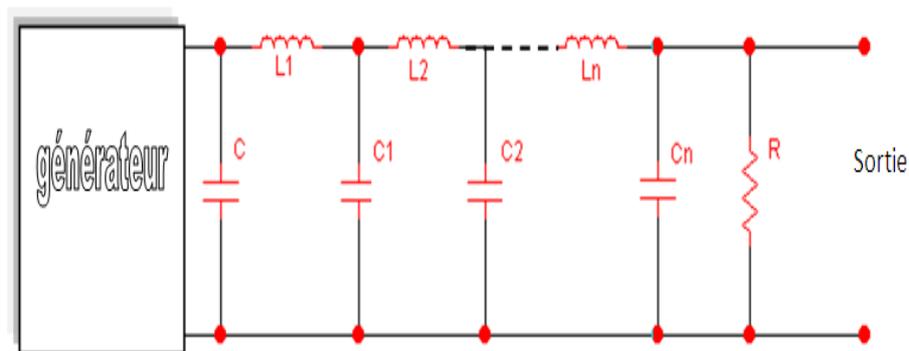


Fig. 1.2 : Schéma électrique équivalent du conduit vocal.

Chacune de ces cellules correspond à un schéma électrique (Fig.1.3). Au débit d'air du conduit et à une certaine pression, correspondent une intensité et une tension électrique (Fig. 1.4).

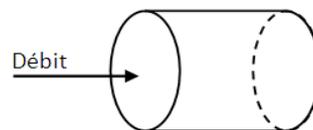
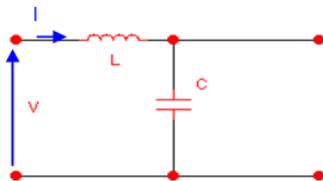


Fig.1.3 : Schéma électrique équivalent

Fig.1.4 : Schéma acoustique équivalent

Pour les sons voisés figure 1.5. Le fonctionnement de la source périodique située à l'entrée de l'appareil phonatoire est caractérisé par le mécanisme de contraction (relaxation au niveau des cordes vocales), autrement dit, les sons voisés mettent les cordes vocales en vibrations quasi-périodiques, sous l'action de la pression de l'air et des muscles du larynx, le spectre d'un son voisé de raies correspondantes aux harmoniques. L'enveloppe de ces raies représente les formants. Les trois premiers formants suffiront pour caractériser un spectre vocal



### 3.2 Acoustique des Voyelles

Le Modèle « Source-Filtre » présenté sur la figure suivant

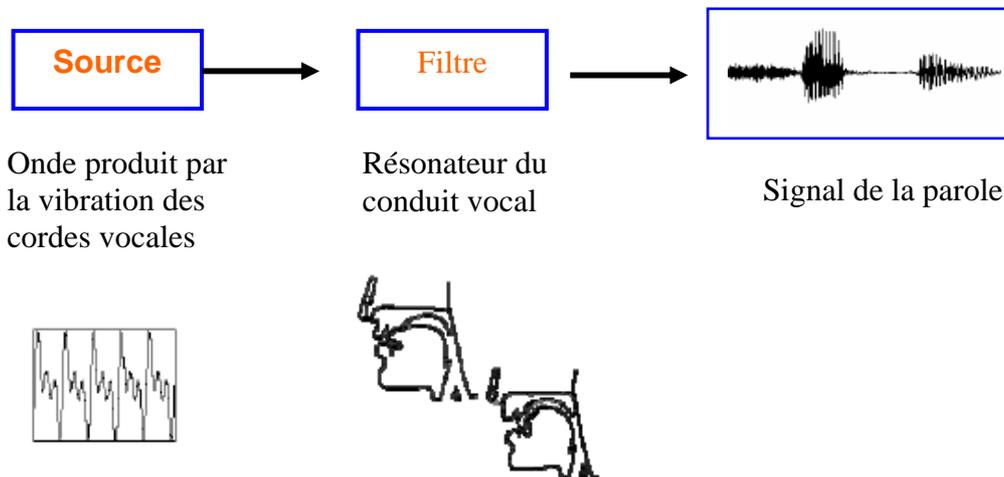


Fig.1.5 : Acoustique Des Voyelles

Le rôle des cavités de résonance du conduit vocal est d'amplifier certaines des composantes de la source et d'amortir les autres. Les cavités de résonance ont un rôle de filtre.

Lorsque l'onde produite par la vibration de cordes vocales se propage dans les cavités, celles-ci se mettent à résonner à leur fréquence de résonance propre, ce qui va amplifier les composantes de la source qui sont à la même fréquence.

## 7. Son voisé et Non voisé

Les sons voisés sont produits lorsque les cordes vocales se mettent en vibration (Fig. 1.6), Tandis que les sons non voisés, les cordes n'entrent pas en vibration, et le passage de l'air ne se fait pas librement, ce qui donne naissance à un bruit qui se propage sur les parois du conduit vocal, et leurs spectres ne présentent pas de structures de fondamental [2].

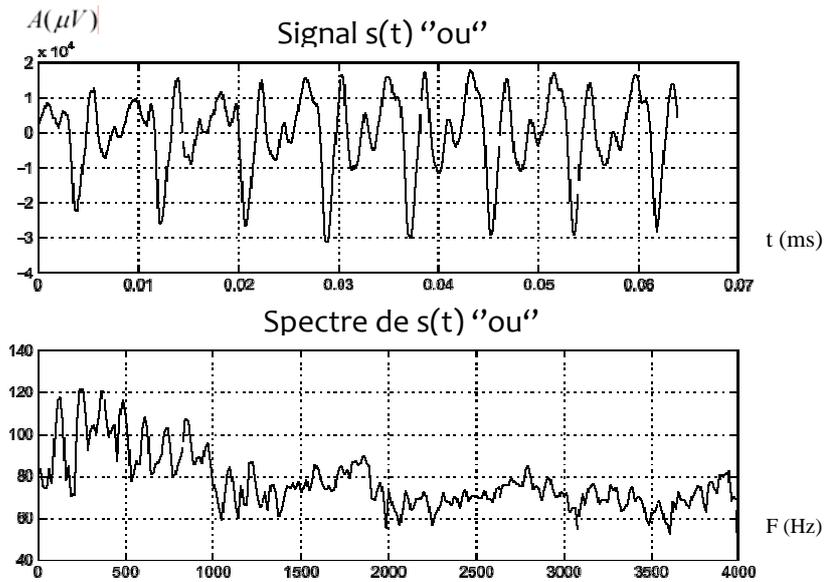


Fig.1.6 : Signal Voisé et Son Spectre

Les sons voisés sont Quasipériodique et caractérisés par la fréquence fondamentale (communément appelée le pitch). Cette fréquence est un paramètre très important pour la synthèse de la parole car l'oreille est très sensible à ses variations [1].

Les sons voisés sont Quasipériodique et caractérisés par la fréquence fondamentale (communément appelée le pitch). Cette fréquence est un paramètre très important pour la synthèse de la parole car l'oreille est très sensible à ses variations [1].

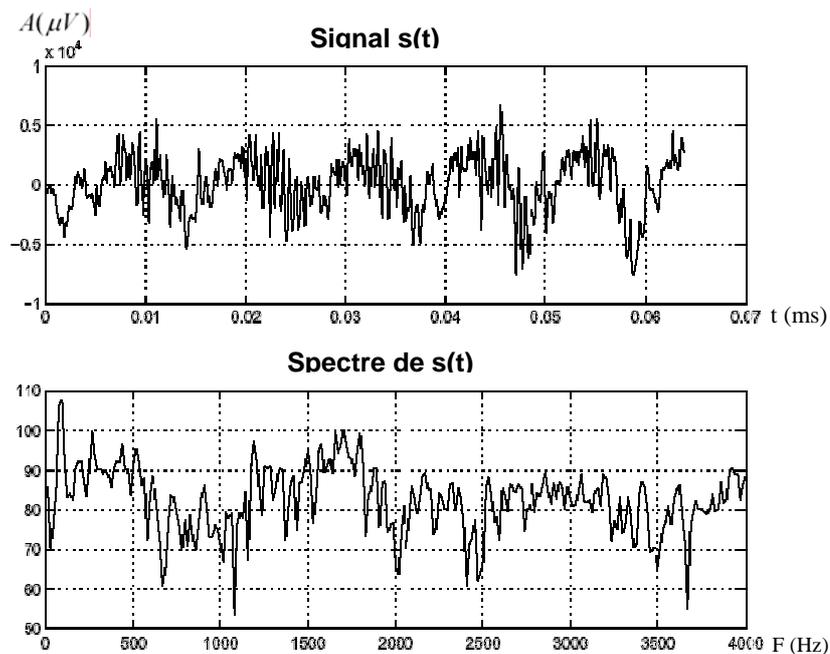


Fig.1.7 : Signal Non Voisé et Son Spectre



## 8. Caractérisation Acoustique et Articulatoire des Voyelles

Bien évidemment, c'est la position des articulateurs qui va déterminer ce mode de propagation et donc les sons produits. Une différence fondamentale est faite entre les sons où l'air circule librement de la glotte aux lèvres (il s'agit des voyelles) et ceux où l'air rencontre des obstacles sur son trajet (il s'agit des consonnes et des semi-voyelles).

- les voyelles sont caractérisées acoustiquement par leurs formants (renforcement spectraux qui correspondent aux fréquences de résonance du conduit vocal),
- les voyelles sont caractérisées articulatoirement par le lieu de la plus forte constriction du conduit vocal

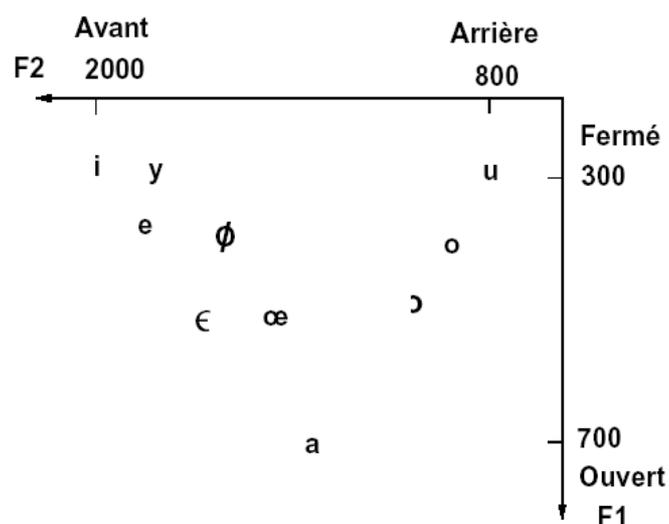
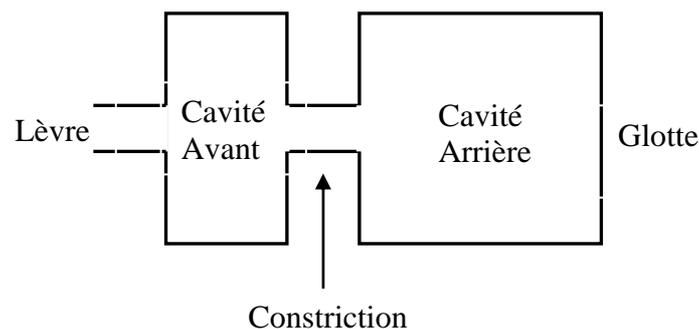


Fig.1.8 : Triangle Vocalique Pour le Français



Les propriétés du conduit vocal varient dans le temps. D'un part, la forme du conduit vocal varie durant la production de la parole à cause des mouvements des articulations. D'autre part, des variations apparaissent au rythme du cycle glottique, à cause de la variation des corde vocales, en effet, les cordes vocales oscillent entre une phase fermée et une phase ouverte, ce qui modifie les caractéristique du système : pendant la phase fermée, le conduit vocal est fermé à la glotte et le signal de la parole résulte des résolution libres dans le conduit, tandis que pendant la phase ouverte, le conduit vocal est couplé acoustiquement avec la glotte et la trachée, ce qui modifie les résolution du conduit [12].

## 6 Classes phonétiques

### 6.1 Définition du phonème

La plupart des langues naturelles sont composées à partir de sons distinct, les phonèmes. Un phonème est la plus petite présente dans la parole et susceptible par sa présence de changer la signification d'un mot. Par exemple riz et rat. Pari et mari,...

Le nombre de phonèmes est toujours très limité, normalement inférieur à cinquante ; on considéré généralement que la langue française comprend 36 phonèmes, un système de phonèmes est un ensemble d'images acoustique Emmagasinées dans le cerveau du locuteur dans la mesure où celui-ci maîtrise de langue.

La production d'un phonème donné laisse toutefois place à une certaine variabilité sur le plan acoustique. [4].

### 6.2 Différentes classes phonétiques

Les différents sons de la parole sont regroupés en classes phonétiques en fonction de leurs caractéristiques principales. Ces caractéristiques représentent des différences qui sont suffisamment importantes pour qu'il soit possible de classer les différents sons visibles sur un spectrogramme selon leur classe respective en très peu de temps et sans aucune écoute de la phrase correspondante.

Les différentes classes phonétiques présentes en français et en anglais sont



**6.2.1 Les voyelles** : cette classe correspond, à quelques nuances supplémentaires près, aux voyelles de l'écrit. Elles se caractérisent principalement par le voisement qui crée des formants. Ces formants, qui sont des zones fréquentielles de forte énergie, correspondent à une résonance dans le conduit vocal de la fréquence fondamentale produite par les cordes vocales. Ces formants peuvent s'élever jusqu'à des fréquences de 5 kHz mais c'est principalement les formants en basses fréquences qui caractérisent les voyelles. Cette caractéristique permet d'ailleurs de distinguer grossièrement les voyelles en fonction de leur premier et deuxième formant.

**6.2.2 Les Occlusives** : les phonèmes de cette classe se caractérisent oralement par la fermeture du conduit vocal, fermeture précédant un brusque relâchement. Les occlusives sont donc constituées de deux parties successives une première partie de silence, correspondant à l'occlusion effective, et une deuxième partie d'explosion, au moment du relâchement. Les occlusives peuvent être voisées, à la manière des voyelles, ou sourdes, c'est à dire non voisées. Les occlusives voisées peuvent également être appelées occlusives sonores.

**6.2.3 Les Fricatives** : dans cette classe sont regroupés les sons produits par la friction de l'air dans le conduit vocal lorsque celui-ci est rétréci au niveau des lèvres, des dents ou de la langue. Cette friction produit un bruit de hautes fréquences et peut être voisée ou sourde.

**6.2.4 Les sonantes** : cette classe est en fait constituée, pour simplification, du regroupement des trois sous-classes que sont les semi-consonnes, les liquides et les nasales.

**6.2.5 Les semi-consonnes (ou semi-voyelles ou glissantes)** : elles ont la structure acoustique des voyelles mais ne peuvent en jouer le rôle car elles ne sont que des transitions vers d'autres voyelles qui sont les véritables noyaux syllabiques. D'un point de vue syntaxique, une règle stricte de la langue française veut que deux voyelles ne puissent jamais se suivre. Cette règle est très largement respectée dans la construction des mots mais présente, comme toute règle, quelques exceptions. La classe des semi-consonnes a été créée pour pallier ces exceptions de manière gracieuse. Les semi-consonnes sont évidemment sonores.



**6.2.6 Les liquides** : Les liquides sont très similaires aux voyelles et aux semi-consonnes mais leur durée et leur énergie sont généralement plus faibles. Elles sont sonores.

**6.2.7 Les nasales** : les phonèmes sont formés par passage de l'air dans le conduit vocal depuis les cordes vocales. Ce passage exclut normalement toute connexion du conduit normal, le conduit buccal, avec le conduit nasal. Ce dernier peut cependant être employé, dans un nombre limité de cas puisque sa physiologie ne permet pas de créer des sons autrement qu'en modifiant le volume de la caisse de résonances qu'il constitue par l'intermédiaire de la langue,

**6.2.8 Les affriquées** : cette classe est, elle aussi, propre à l'anglo-américain mais les affriquées peuvent également être observées dans le français québécois. Les affriquées sont composées d'une occlusive immédiatement suivie par une fricative de durée cependant plus faible que celle de la véritable fricative [3].

## 7. Caractéristiques de phonation

Toute phrase d'une langue est perçue comme une suite d'éléments discrets phonèmes : voyelle et consonnes.

Les 36 phonèmes de la langue française (42 en langue anglaise), suffisent pour représenter tous les mots de la même langue [2].

L'alphabet phonétique international (IPA) associe des symboles phonétiques aux sons, de façon à permettre l'écriture compacte et universelle des prononciations (voir tableau 1.1 pour le français).



IPA	EXEMPLES	IPA	EXEMPLES
i	idée, ami	p	patte, repas, cap
e	ému, ôté	t	tête, ôter, net
ɛ	perdu, modèle	k	carte, écaille, bec
a	alarme, patte	b	bête, habile, robe
ɑ	bâton, pâte	d	dire, rondeur, chaud
ɔ	Obstacle, corps	g	gauche, égal, bague
o	auditeur, beau	f	feu, affiche, chef
u	coupable, loup	s	sœur, assez, passe
y	punir, élu	ʃ	chanter, machine, poche
ø	creuser, deux	v	vent, inventer, rêve
œ	malheureux, peur	z	zéro, raisonner, rose
ə	petite, fortement	ʒ	jardin, manger, piège
ɛ̃	peinture, matin	l	long, élire, bal
ɑ̃	vantardise, temps	ʀ	rond, chariot, sentir
ɔ̃	rondeur, bon	m	madame, aimer, pomme
œ̃	lundi, brun	n	nous, punir, bonne
j	piétiner, briller		agneau, peigner, règne
w	oui, fouine	ŋ	jumping, smoking
ɥ	huile, nuire	h	halte, hop (exclamations)

Tableau 1.1 Les symboles de l'alphabet phonétique international Utilisés en français.



## 8. Les Méthodes d'analyse de la parole

Les deux problèmes principaux d'analyse de la parole présentée dans le schéma synoptique suivent figure 1.9 [5]

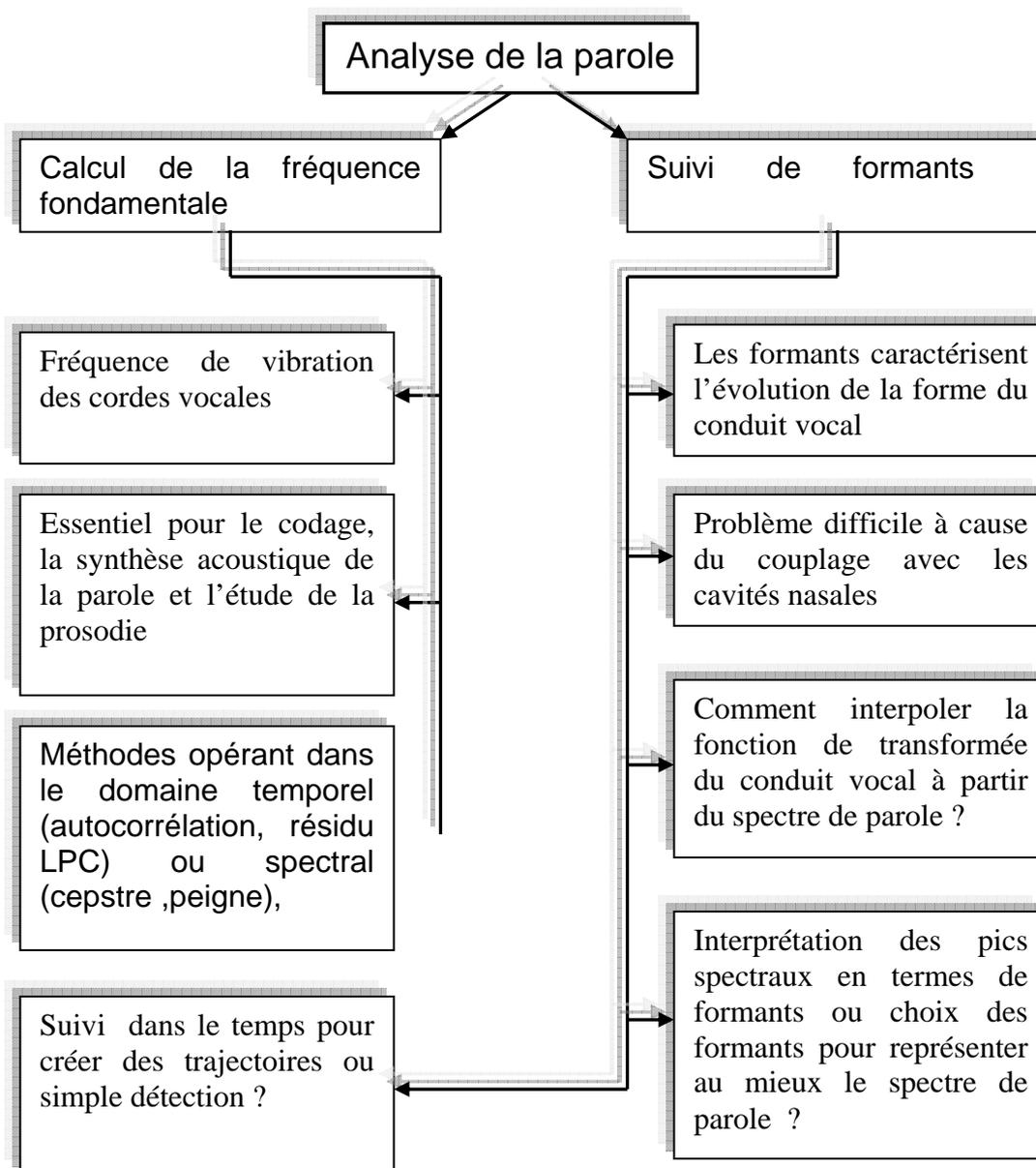
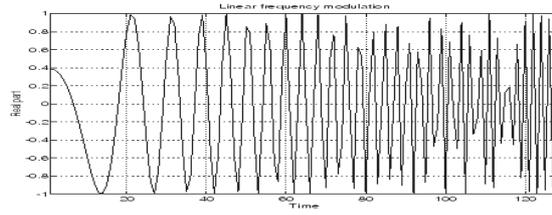


Fig.1.9 : Schéma Synoptique de Différentes Méthodes d'analyse de la Parole



## Conclusion

Le traitement de la parole est aujourd'hui une composante fondamentale des sciences de l'ingénieur. Située au croisement du traitement du signal numérique et du traitement du langage (c'est-à-dire du traitement de données symboliques), cette discipline scientifique a connu depuis les années 60 une expansion fulgurante, liée au développement des moyens et des techniques de télécommunications. L'importance particulière du traitement de la parole dans ce cadre plus général s'explique par la position privilégiée de la parole comme vecteur d'information dans notre société humaine.



# *Chapitre II*

## *Analyse*

### *Des Signaux*

---

## Introduction

**L**e traitement du signal est désormais reconnu comme une discipline originale, où confluent des mathématiques (théorie des nombres, processus aléatoires, statistique, algèbre linéaire), de la physique (influence des capteurs et milieux, domaine de validité des hypothèses simplificatrices,...) et de l'informatique (mise en œuvre d'algorithmes...) avec une méthodologie propre (analyse spectrale, filtrage, optimisation), des problèmes spécifiques (quantification, rapidité des algorithmes, compromis précision complexité temps de calcul, élimination de bruit,...) et un large champ d'application dans divers domaines de l'activité humaine (médecine, géologie, télécommunications, données financières, industries mécaniques,...).

Les deux principaux domaines de représentation utilisés en Traitement du Signal sont le Temps (exprimé en unité physique ou en nombre d'échantillons) et la fréquence (en Hertz ou en fraction de la fréquence d'échantillonnage du signal). L'outil désormais classique permettant de passer d'un domaine à l'autre est la transformée de Fourier.

La TF permet d'estimer les fréquences présentes dans un signal, mais pas de localiser l'endroit où ces fréquences apparaissent ou disparaissent, car elle agit sur la totalité du signal.

### 1. Classification des Signaux

On distingue plusieurs classifications de signaux. Dans notre cas, on s'intéresse à :

- La classification phénoménologique qui met l'accent sur le comportement Temporel Du signal ;
- La classification énergétique où l'on classe les signaux suivant qu'ils sont à Énergie finie Ou à puissance finie [1].

#### 1.1 Classification phénoménologique

Dans cette classification, on répartit généralement les signaux en deux classes Principales.

**1.1.1 Signaux Déterministes** : Sont les signaux prévisibles et peuvent être Décrit par un Modèle mathématique tel :

- Les signaux périodiques dont la forme se répète régulièrement ;
- Les signaux pseudo-aléatoires qui sont des signaux périodiques mais Avec, à L'intérieur De la période, un comportement aléatoire ;
- Les signaux quasi-périodiques qui résultant d'une somme de sinusoides dont le Rapport des périodes ne sont pas rationnels ;
- Les signaux non périodiques ; ils sont essentiellement représentés par des Signaux Transitoires dont l'existence est éphémère.

**1.1.2 Signaux Aléatoires** : Sont les signaux qui ne sont pas prévisibles Et obeient Au hasard et leur description est lié à la théorie des Probabilités. On peut citer :

- Les signaux stationnaires dont les caractéristiques statistiques ne changent Pas Au cours du temps.
- Les signaux non-stationnaires dont le comportement statistique évolue au cours du temps (Ex : la parole) [1]. La figure 2.1 montre les différents types de signaux.

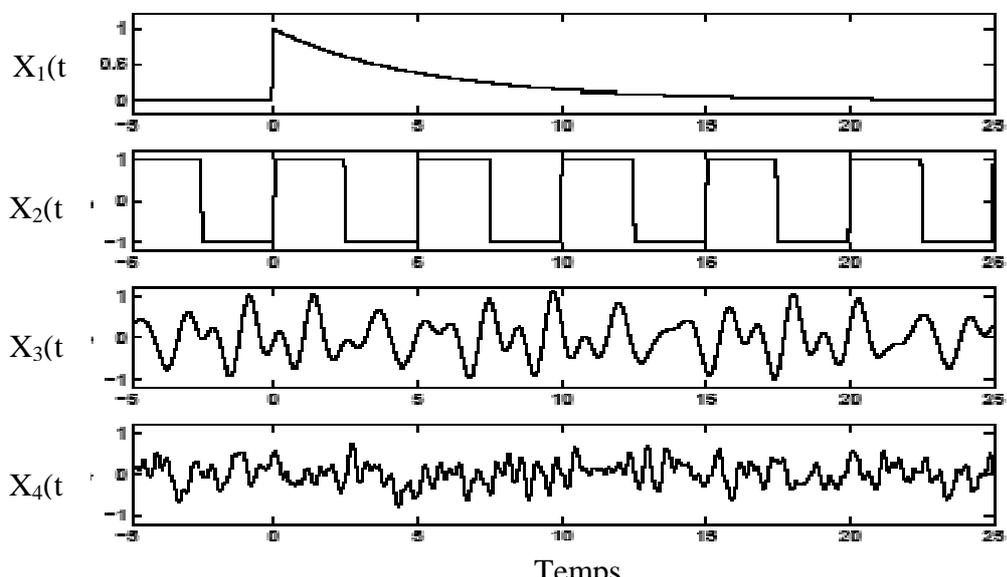


Fig.2.1 : Quatre Signaux Types

## 1.2 Classification énergétique

L'énergie  $W_x$  d'un signal  $x(t)$  est définie comme suit

$$W_x \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \quad (2.1)$$

On dira que ce signal est à énergie finie si  $W_x < \infty$ . Dans cette catégorie, on rencontre tous les signaux temporellement éphémères qu'ils soient déterministes ou aléatoires.

La puissance moyenne  $P_x$  d'un signal  $x(t)$  est définie par

$$P_x \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x^2(t) dt \equiv X_{eff}^2 \quad (2.2)$$

On notera que cette définition coïncide avec celle du carré de la valeur efficace du signal  $x(t)$ . On dira que celui-ci est à puissance finie si  $P_w < \infty$ . Cette catégorie

Englobe les signaux périodiques, quasi-périodiques et les signaux permanents aléatoires ou non, dans le cas où le signal est périodique, la durée d'intégration  $T$  est prise égale à une période du signal.

Certains signaux théoriques n'appartiennent à aucune de ces catégories ; c'est le cas, par exemple, de l'exponentielle,

$$x(t) = e^{-a.t}, \quad -\infty < t < +\infty \quad (2.3)$$

## 2. Analyse temporelle des Signaux (Comparaison des Signaux)

Une opération mathématique qui, de par sa forme, est très proche de la convolution est la fonction de corrélation de deux signaux. Cependant, contrairement à la convolution, le but de la corrélation est de mesurer le degré de ressemblance de ces signaux et d'extraire des informations qui, dans une large mesure, dépendent de l'application considérée.

## 2.1 Corrélation de signaux à énergie finie

### 2.1.1 Inter-corrélation de deux signaux

Considérant deux signaux  $x(t)$ ,  $y(t)$ , à énergie finie, on définit la fonction inter-corrélation comme l'intégrale de produit du signal  $x(t)$  avec le signal  $y(t)$  décalé d'une valeur  $\tau$  :

$$r_{x,y}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).y(t + \tau).dt \quad (2.4)$$

Cette relation valable dans l'espace temps à bien son équivalent dans l'espace des fréquences :

$$R_{x,y}(f) = X^*(f).Y(f) \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Auto-corrélation d'un signal

Dans le cas particulier ou  $y(t) = x(t)$ , on obtient la fonction d'auto-corrélation du signal :

$$r_{x,x}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).x(t + \tau).dt \quad (2.6)$$

Qui pour le décalage nul, donne l'énergie du signal  $x(t)$

$$r_{x,x}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)^2 .dt \equiv W_x \quad (2.7)$$

## 2.2 Corrélation de Signaux à Puissance Finie

Dans ce cas, les signaux sont permanent et possèdent une énergie infiniment grande, on ne peut donc pas utiliser les définitions précédentes, pour cette catégorie de signaux, on redéfinit les deux fonctions de corrélation comme suit : [1,2]

$$r_{x,y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t).y(t + \tau).dt \quad (2.8)$$

$$r_{x,x}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t)x(t+\tau).dt \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un décalage nul, on trouve la puissance du signal  $x(t)$ ,

$$r_{x,x}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t)^2 .df \equiv X_{eff}^2 = P_x \quad (2.10)$$

### 2.3 Propriété de l'Auto-corrélation

La fonction d'auto-corrélation présente une propriété importante du signal aléatoire et un intérêt particulier en analyse de parole par exemple.

La fonction d'auto-corrélation jouit de quelque propriété :

- la fonction d'auto-corrélation d'un signal périodique et de même période
- la fonction d'auto-corrélation d'un signal aléatoire tend vers zéro si, le signal est moyenne nulle,
- la fonction d'auto-corrélation de deux signaux X et Y indépendants est nulle, la réciproque n'est pas toujours vraie.
- La partie réelle de la fonction d'auto-corrélation  $R_{x,x}(T)$ . Est paire, et la partie imaginaire de  $R_{x,x}(T)$ . Est impaire [2].

La densité spectrale d'un signal  $x(t)$  est donnée par :

$$S_{x,x}(f) = TF(R_{x,x}(T)) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x,x}(T) . \exp(-j.2.\pi.f.T) . dT \quad (2.11)$$

La fonction d'auto-corrélation s'applique directement sur le signal temporel, elle est facile à réaliser par un câblage numérique, un multiplieur et un accumulateur.

La fonction d'auto-corrélation est peu sensible à la variation de la phase, cette propriété lui permet d'être utilisée souvent en transmission sur une ligne téléphonique [2].

Dans le cas d'un signal aléatoire comme le signal de parole, il est raisonnable de définir une fonction d'auto-corrélation court-terme qu'opère sur des courts segments de parole.

La corrélation est utilisée dans les radars, les sonars, les communications numériques, la détection de signaux noyés dans du bruit, la mesure de temps de transmission, le GPS , etc. ...

### **3. Analyse fréquentielle des Signaux (Transformée de Fourier)**

L'analyse du signal porte sur un vaste ensemble de phénomènes et des réalités physique diverses : la variation de la pression de l'air en un lieu donné en fonction du temps est un signal sonore ; l'évolution de l'intensité du courant en un point d'un réseau est un signal électrique ; la vibration du sol est un signal sismique et fluctuations de l'indice de la bourse constituent un signal économique. Ces signaux dépendent d'une seule variable (ici le temps). Mais ce n'est pas toujours le cas. Une photographie en noir et blanc peut être interprétée comme une quantité numérique (le niveau de gris) fonction de deux considéré. L'analyse du signal consiste à extraire dans chacun de ces cas l'information pertinente. La nature de celle-ci différant selon la nature physique du signal Le signal dans le domaine temporel est un signal brut, et un signal transformé par une quelconque des Transformations mathématique disponibles est un signal traité. [6].

Les transformations sont appliquées aux signaux pour obtenir plus d'informations. Du signal, qu'il n'y en a apparemment de disponibles dans le signal brut. La transformation la plus populaire dans le domaine du traitement du signal en général est sans doute la transformation de Fourier [7].

#### **3.1 Transformation de Fourier**

Si l'analyse fréquentielle de Fourier met en œuvre deux représentations conjuguées et globales, l'une de type temporel, l'autre de type fréquentiel, la nature est cependant riche en signaux pour lesquels l'information utile est véhiculée non seulement par les fréquences émises mais aussi par la structure temporelle même du signal [8,10].

##### **3.1.1 Définition de la transformation de Fourier**

Les transformations de Fourier directe et inverse sont définies comme suit

$$x(t) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} X(jf) e^{+j.2.\pi.f.t} df \quad (2.30)$$

$$X(jf) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) . e^{-j.2.\pi.f.t} dt \quad (2.31)$$

On constate que les descriptions temporelle et spectrale sont parfaitement symétriques et que les unités de  $X(f)$  ne sont pas les mêmes que celles du signal original  $x(t)$ . Dans le cas où  $x(t)$  est une tension électrique, sa transformée  $X(f)$  s'exprime en  $[V/Hz]$  et elle est définie comme la **densité spectrale d'amplitude** du signal temporel  $x(t)$ . [1].

En notation abrégée, on décrira ces deux transformations par les opérateurs TF { } & TFI { }. La correspondance réciproque s'écrit alors :

$$x(t) = TFI\{X(f)\} \leftrightarrow TF\{x(t)\} = X(f)$$

Si la fonction  $x(t)$  ne possède pas de symétries particulières, sa densité spectrale d'amplitude  $X(f)$  est une fonction complexe :

$$x(t) \leftrightarrow X(f) = X_r(f) + jX_i(f) \quad (2.32)$$

Le module et la phase de la densité spectrale d'amplitude valent alors :

$$|X(f)| \equiv X(f) = \sqrt{X_r^2(f) + X_i^2(f)} \quad (2.33)$$

$$\angle X(f) \equiv \alpha(f) = \arctan \frac{X_i(f)}{X_r(f)} \quad (2.34)$$

### 3.1.1 Transforme de Fourier Discrète

La version numérique de la transformée de Fourier continue est la transformée de discrète (TFD). Elle s'introduit lorsqu'il faut calculer la transformée de Fourier d'une fonction à l'aide d'un calcul numérique [2,10].

Un signal  $x(t)$  peut être décomposé en série de Fourier

$$x(t) = \sum_n x_n \cdot e^{(j.2.\pi.\frac{1}{T}).n.t} \quad (2.35)$$

Avec

$$x_n = \frac{1}{T} \int_T x(t) \cdot e^{-j.2.\pi.t.\frac{1}{T}} \cdot dt. \quad (2.36)$$

La transformée de Fourier de  $x(t)$  est :

$$X(f) = \int x(t) \cdot e^{-j.2.\pi.f.t} dt. \quad (2.37)$$

Alors

$$X_n = \frac{1}{T} \cdot X[nf] \quad \Rightarrow \quad X_n = \frac{1}{T} \cdot X[n/T]. \quad (2.38)$$

Le passage de  $X(f)$  à  $X_n$  est obtenu par échantillonnage de  $X(f)$  à une cadence  $F=1/T$  [2].

### 3.1.1 Transformée de Fourier d'un signal continu non-périodique

Un signal analogique  $x(t)$  et sa densité spectrale  $X(jf)$  sont reliés entre eux par les relations

$$X(jf) = \int x(t) \cdot \exp(-j.2.\pi.f.t) \cdot dt \quad [V \cdot \text{sec}] \quad (2.39)$$

$$x(t) = \int X(f) \cdot \exp(+2.\pi.f.t) \cdot df \quad [V] \quad (2.40)$$

Ces transformation discrète et inverse montrent à l'évidence, la parfaite symétrie qui relie les espaces temps et fréquence, à cette symétrie correspondant la propriété <sup>'1'</sup>

## 3.2 Discrétisation de la Fréquence

Afin de pouvoir calculer numériquement un spectre, il est évidemment nécessaire de discrétisation de la fréquence. En divisant le domaine fréquentiel en  $N$  intervalles,

---

<sup>'1'</sup> à la discrétisation du domaine spectral correspond un signal temporel périodique

L'incrément fréquentiel vaut  $\Delta f = f_e / N$  et la fréquence analysée, au nombre de  $N$ , sont :

$$f - k.\Delta f - k.f_e / N \quad (2.41)$$

Cette discrétisation de la fréquence n'est rien d'autre qu'un échantillonnage dans le domaine spectrale et les résultants des opérations d'échantillonnage et de Multiplication vues plus haut pour les l'espace temps s'appliquent également dans l'espace des fréquences et conduisent à la propriété <sup>'2'</sup> tous se passe comme si la durée d'acquisition  $T$  correspondait à une période du signal temporel  $x[n]$ . Le spectre considéré à présent est donc un spectre discret que l'on écrit  $X[jk]$  avec  $0 \leq k \leq N-1$ . Tenant compte des relations temps-fréquence, l'argument du phaseur s'écrit

$$\pm j.2.\pi.f.n.Te = \pm j.2.\pi.k\Delta f.n.Te = \pm j.2.\pi.k.\frac{f_e}{N}.n.Te = \pm j.2.\pi.\frac{k.n}{N} \quad (2.42)$$

Le spectre  $X[jk]$  et le signal temporel  $x[n]$  se calculent alors comme suit :

$$X[jk] = Te \sum_{n=1}^{N-1} x[n].\exp\left(-\frac{j.2.\pi.k.n}{N}\right) \quad [V \quad \text{sec}] \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.43)$$

$$x[n] = \frac{1}{NTe} \sum_{k=0}^{N-1} X[jk].\exp\left(+\frac{j.2.\pi.k.n}{N}\right) \quad [V] \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2.44)$$

### 3.1 Puissance et énergie d'un Signal

Les signaux permanents, périodiques ou non, sont caractérisés par leur puissance moyenne (leur énergie est infiniment grande).

$$P = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x^2(t).dt \quad [V^2] \quad (2.45)$$

$$P = \sum_{-\infty}^{+\infty} |X(jk)|^2 \quad [V^2] \quad (2.46)$$

Où  $X(jf)$  est l'amplitude complexe de la composante spectrale de l'ordre  $k$ .

---

<sup>'2'</sup> À un signal temporel continu non périodique correspond un spectre continu non périodique

Dans le cas des signaux non permanents, on prendra grande à parler de leur énergie et non pas de leur puissance, car celle-ci est nulle si l'on considère une durée infiniment longue. De même que pour les signaux périodiques, on peut calculer l'énergie d'un signal apériodique dans les domaines temporels et fréquentiels :

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt \quad [V^2 \cdot \text{sec}] \quad (2.47)$$

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} |X(jf)|^2 df \quad [V^2 / \text{Hz}] \quad (2.48)$$

L'expression de l'énergie d'un signal  $x(t)$  dans le domaine des fréquences entraîne la définition de la **densité spectrale d'énergie**  $S_x(f)$  :

$$S_x(f) \equiv |X(jf)|^2 = X(jf) \cdot X(jf)^* \quad [V^2 / \text{Hz}^2] \quad (2.49)$$

On notera que ses unités s'expriment en  $[V^2 / \text{Hz}^2]$  lorsque le signal est une tension [1].

### 3.1 Transformée de Fourier Rapide

Des industries entières sont passées de lentes à rapides grâce à cette seule idée, qui est la mathématique pure [9].

L'intégrale de Fourier est très générale, car on peut l'appliquer sans faire d'hypothèse sur l'origine physique du signal : elle s'est révélée très fructueuse aussi bien d'un point de vue théorique que numérique et tout particulièrement depuis que l'on a mis au point, pour la calculer, un algorithme extrêmement économique, la transformée de Fourier rapide,

Les équations de définition de TFD donnent une relation entre deux ensembles de nombres complexes qu'on peut écrire sous une forme matricielle en posant [2].

$$W = e^{\frac{-j \cdot 2 \cdot \pi}{N}} \quad (2.50)$$

alors :

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x(n) \cdot W^{nk} \quad (2.51)$$

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W & W^2 & W^3 & \cdot & \cdot & \cdot & W^{N-1} \\ 1 & W^2 & W^4 & W^6 & \cdot & \cdot & \cdot & W^{2(N-1)} \\ 1 & W^3 & W & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & W^{3(N-1)} \\ 1 & \cdot \\ 1 & \cdot \\ 1 & \cdot \\ 1 & W^{N-1} & W^{2(N-1)} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_{N-1} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

La matrice carrée N, présente des particularités évidentes, les lignes et les colonnes de même indice ont les mêmes éléments et ces éléments sont des puissances d'un nombre de base W tel que  $W^N = 1$ . dans ces conditions des simplifications importantes peuvent être envisagées conduisant à des algorithmes de calcul rapides. [2,10].

### 3.1 Transformée de Fourier Fenêtrée

#### 3.1.1 Généralité

Les fenêtrages que l'on utilise pour analyser le signal dans le plan temps-fréquence<sup>'3'</sup> (pour rappel celle-ci a une largeur en temps et en fréquence ) sont appelées des atomes de Gabor,<sup>'4'</sup> elles sont construites en translatent une fenêtrage de base g en temps et en fréquence :

$$g_{u,\xi}(t) = g(t - u).e^{j\xi t} \quad (2.53)$$

L'énergie de  $g_{u,\xi}$  est localisée au voisinage de U sur une largeur propre à la fonction g et donnée par  $\sigma_t$  qui est l'écart-type de  $|g(t)|^2$ . [9,10].

---

<sup>'3'</sup> le plan temps-fréquences est simplement un moyen facile de représenter des signaux et des fonctions en temps et en fréquence. Il se compose d'un axe des temps et d'un axe des fréquences perpendiculaire.

<sup>'4'</sup> l'expression atomes vient de la mécanique quantique.

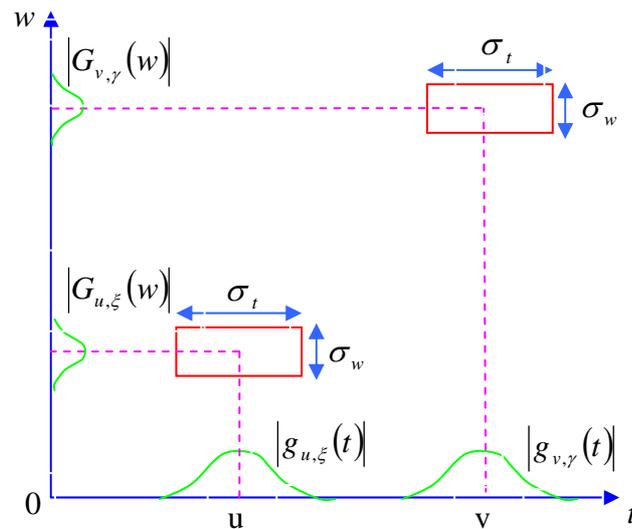


Fig.2.2 : Atome Fixe de la WFT

Pour évaluer la translation en fréquences, on peut prendre la transformée de fourier de  $g_{u,\xi}$  :

$$g_{u,\xi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g_{u,\xi}(t) e^{-j \cdot w \cdot t} dt \quad (2.54)$$

$$g_{u,\xi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t-u) e^{-j \cdot \xi \cdot t} \cdot e^{-j \cdot w \cdot t} dt \quad (2.55)$$

$$g_{u,\xi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t-u) e^{-j \cdot t \cdot (w-\xi)} dt \quad (2.56)$$

En posant  $t-u = t'$  on a :

$$dt = dt' \quad (2.57)$$

$$t = t'+u \quad (2.58)$$

Ce qui donne :

$$g_{u,\xi}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t') e^{-j \cdot (t'+u) \cdot (w-\xi)} dt' \quad (2.59)$$

$$g_{u,\xi}(w) = \left( \int_{-\infty}^{\infty} g(t') e^{-j.t'(w-\xi)} dt' \right) e^{-j.u(w-\xi)} \quad (2.60)$$

Or

$$g(w-\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t') e^{-j.t'(w-\xi)} dt' \quad (2.61)$$

Donc, en remplaçant dans l'équation (2.25) on obtient enfin :

$$g_{u,\xi}(w) = \hat{g}(w-\xi) e^{-j.u(w-\xi)} \quad (2.62)$$

L'énergie de  $g_{u,\xi}(w)$  donc localisée au voisinage de la fréquence  $\xi$  sur un intervalle de largeur  $\sigma_w$ . On voit donc bien que l'énergie de la fonction est localisée dans les deux représentations. On peut symboliquement représenter cette localisation par un Rectangle <sup>'S'</sup> de largeur temporelle  $\sigma_t$  et de largeur fréquentielle  $\sigma_w$ .

La surface de ces rectangles est bornée inférieurement par le théorème de Heisenberg et l'équation suivant :

$$\sigma_t^2 \cdot \sigma_w^2 \geq \frac{1}{4} \quad (2.63)$$

Donne

$$\sigma_t \cdot \sigma_w \geq \frac{1}{2} \quad (2.64)$$

La meilleur localisation possible sera obtenue quand la surface des rectangles sera minimum, c'est-à-dire quand on aura l'égalité dans l'équation (2.64). on peut montrer qu'alors  $g$  est nécessairement une gaussienne, les atomes  $g_{u,\xi}$  étant alors appelés fonctions de Gabor. La transformée de Fourier consiste alors à décomposer le signal en atomes  $g_{u,\xi}$ , elle calcule la corrélation entre le signal et chaque atome. Elle s'écrit :

$$Sf(u, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{g_{u,\xi}(t)} dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t-u) e^{-j.\xi.t} dt \quad (2.65)$$

---

<sup>'S'</sup> Appelé rectangle d'Heisenberg.

### 3.1.2 Application

La musique et la voix sont des signaux dont la fréquence varie avec le temps. La transformée de Fourier fenêtrée permet la mesure des harmoniques non-stationnaire en pratique, on suit les composantes de grande amplitude à des Fréquences  $\xi(u)$ , on en déduit les relations entre fréquence et temps dans les signaux.

## 4. Limitation de la transformée de Fourier

### 4.1 TF du Signal Stationnaire

Ce sont les signaux dont le contenu en fréquence ne change pas au cours du temps. Autrement dit, la composition en fréquences des signaux stationnaires est indépendante du temps. Dans ce cas, on n'a pas à connaître quels instants les composantes en fréquence existent : ces composantes en fréquence existent tout le temps

Par exemple, le signal suivant :

$$x_1(t) = \cos(2.\pi.20.t) + \cos(2.\pi.35.t) + \cos(2.\pi.50.t) \quad (3.1)$$

Est un signal stationnaire car il présente des composantes de fréquence à 20,35 Et 50 Hz à tout instant ce signal est représenté ci-dessous :

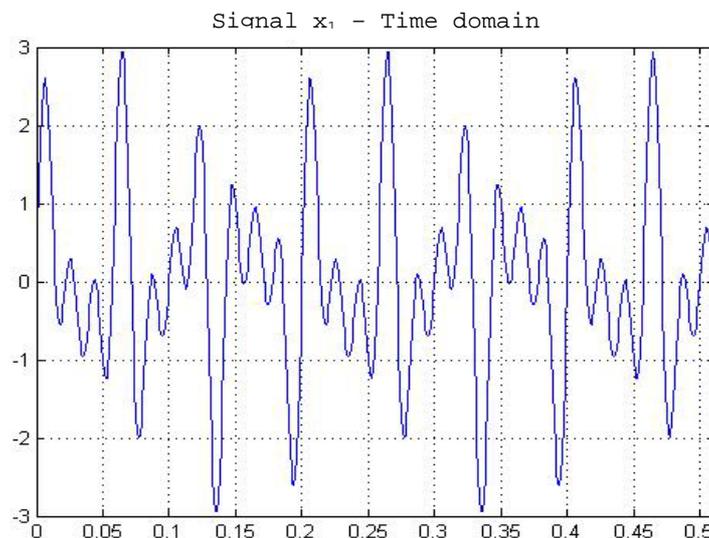


Fig.2.3 : Représentation temporelle d'un signal Stationnaire

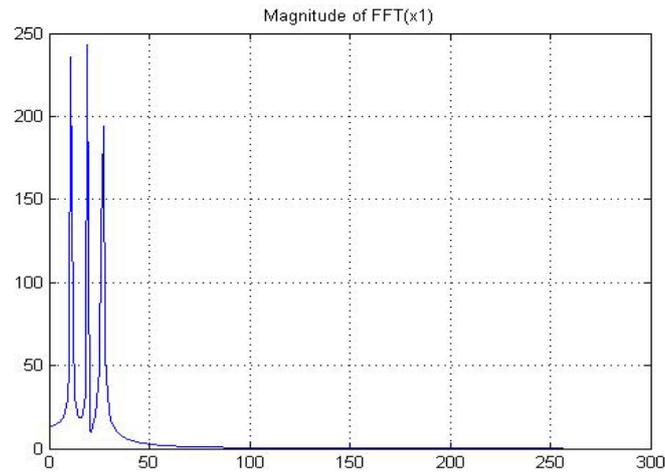


Fig.2.4 : Représentation temporelle d'un signal Stationnaire

Dans la figure (2.4) est le spectre en fréquence du signal de la figure (3.3), le graphe du bas est une version agrandie montrant l'intervalle des fréquences qui présentent un intérêt. Remarquez les trois composantes spectrales correspondant aux fréquences 20, 35 & 50,

## 4.2 TF du signal non Stationnaire

### 4.2.1 Définition du Signal Non-Stationnarité

Un signal non-stationnaire est défini par opposition au signal stationnaire pour lequel toutes ses propriétés statistiques sont invariantes au cours de temps. Dans le contexte déterministe, on appelle signal non-stationnaire un signal dont le contenu fréquentiel change dans le temps. Il suffit qu'une seule propriété statistique ou une seule composante fréquentielle soit variable dans le temps pour que l'on puisse parler de signal non-stationnaire. Si, par exemple, dans un signal il y a une dérive d'une fréquence au cours du temps ou un saut de moyenne temporelle, alors il s'agit d'un signal non-stationnaire.

Contrairement au signal de la figure (3.5), montre un signal non stationnaire

Sur l'intervalle ( 0 – 180 ms )  
c'est une Sinusoïde à 10 Hz,  
sur l'intervalle (180 – 360  
ms) c'est une Sinusoïde à 20  
Hz , sur l'intervalle ( 320 –  
540 ms ) c'est une sinusoïde  
à 30 Hz

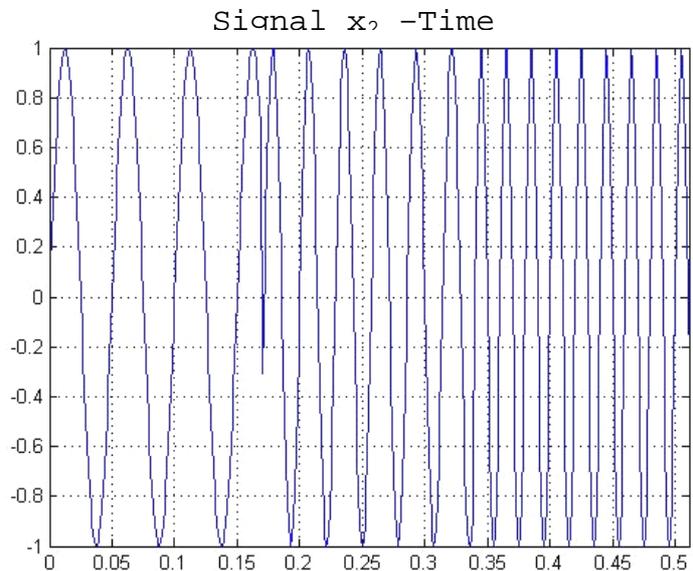


Fig.2.5 : Représentation temporelle d'un signal Non Stationnaire

Pour le signal de la Figure 2.4, nous savons que dans le premier intervalle nous avons la composante de plus haute fréquence et dans le dernier intervalle la composante de plus basse fréquence. Pour ces signaux, donc, les composantes de fréquence n'apparaissent pas en permanence.

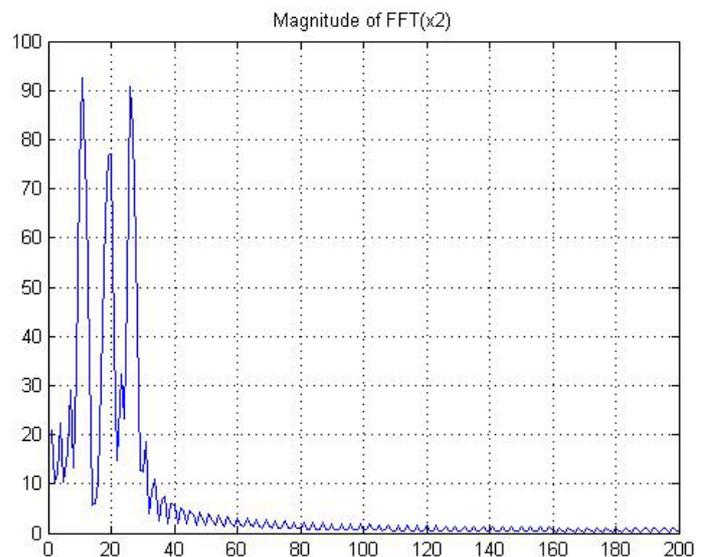


Fig.2.6 : Représentation spectrale d'un signal non stationnaire

On Remarque l'absence d'une propriété de localisation : si le signal change à un endroit, tous les coefficients de Fourier changent

#### 4.2.2 Inconvénients de la TFCT

- ✓ Une fois la fenêtre choisie, la résolution fréquentielle et temporelle sont à leur tour définitivement fixée.
- ✓ Le signal doit être stationnaire dans la fenêtre utilisée par la TFCT.
- ✓ Une fenêtre étroite permet d'obtenir une bonne localisation du signal en temps par contre la localisation fréquentielle sera mauvaise.
- ✓ Une fenêtre temporel large conduit à une à une mauvaise résolution temporelle et une bonne résolution fréquentielle.
- ✓ Du moment où la longueur de la fenêtre est fixée une fois pour toute, l'analyse simultanée

Des phénomènes dont les échelles du temps sont différentes est impossible.

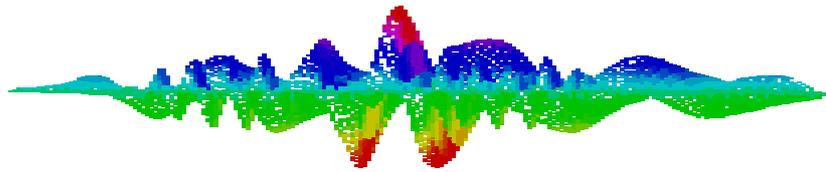
Pour palier à tous ces inconvénients, un autre outil de traitement est utilisé, c'est la transformée en Ondelettes. L'apport principal de ce nouvel outil est la représentation conjointe Temps-échelle de signaux non-stationnaires et c'est l'objet du paragraphe Suivant. [14].

## Conclusion :

L'inconvénient de cette procédure, outre sa faible résolution conjointe temps / fréquence, est que la taille de la fenêtre est constante. Il serait plus pertinent d'adapter la taille de la fenêtre d'analyse aux caractéristiques locales du signal : petite fenêtre lorsque le signal varie rapidement (hautes fréquences) et plus grande fenêtre lorsque ses variations sont lentes (basses fréquences).

L'analyse en Ondelette vise à apporter une solution à ce problème en décomposant le signal sur une base de signaux élémentaires ( les fameuses *Ondelettes* ) obtenus par dilatation et décalage d'une Ondelette de base. En modifiant ainsi par dilatations ou contractions successives la taille de l'Ondelette analysante, il est possible de détecter des détails localisés plus facilement qu'avec la transformée de Fourier

De ce fait, la Transformée en Ondelettes, et le concept de Multi-résolution sous-jacent, procurent un ensemble de techniques prometteuses dans l'analyse et le traitement de signal.



## *Chapitre III*

# *Les Ondelettes* *Etude théorique*

---

# Introduction

D'abord, pourquoi a-t-on besoin des transformées, ou encore qu'est-ce une transformée ? Les transformations mathématiques sont appliquées aux signaux bruts pour obtenir davantage d'informations qui sont disponibles dans ces signaux. Dans la suite, le signal dans le domaine temporel s'appellera le **signal brut**, et un signal transformé par une transformation mathématique sera un **signal traité**.

Il existe un grand nombre de transformations qui peuvent s'appliquer à un signal. Parmi celles-ci la transformée de Fourier.

Dans la pratique, la plupart des signaux sont des signaux dépendant du temps (du domaine Temporel) sous leur format brut. La représentation du signal est une **représentation temps - amplitude**. Cette représentation n'est pas toujours la meilleure pour la plupart des applications de traitement du signal. Dans beaucoup de cas, l'information la plus pertinente est cachée dans la composante de fréquence du signal. Le **SPECTRE de fréquence** d'un signal est constitué par les composantes de fréquence de ce signal. Le spectre de fréquence d'un signal indique quelles sont les fréquences qui existent dans le signal.

## 1. La Transformée en Ondelettes

Cet outil mathématique s'ajoute aux méthodes classiques d'analyse du signal. Il met l'accent sur les caractéristiques importantes du signal et semble en outre correspondre à des réalités physiques du traitement des signaux acoustiques et chez l'homme. [6, 12, 19].

Quand on cherche à analyser un signal, il est très fréquent qu'on établisse, de manière explicite ou implicite, une représentation temps-fréquence de ce signal. L'image qu'on peut avoir d'une telle opération est celle de la transcription d'une partition de musique, qui indique au musicien les notes (donc l'information fréquentielle) qu'il doit produire à un moment donné. La transformée de Fourier n'est pas l'outil approprié pour mener cette analyse puisqu'elle masque l'évolution temporelle du signal. Par contre, comme nous le montrerons, la Transformée en ondelettes et ses extensions fournissent des solutions intéressantes dans ce contexte. Les ondelettes sont issues de l'intuition d'un ingénieur en géophysique, J. Morlet, dans les années 1980. Sous l'impulsion de personnalités scientifiques telles que le physicien A. Grossman [39] ou le mathématicien Y. Meyer [55],

Les ondelettes se sont imposées comme des outils fondamentaux de l'analyse harmonique moderne. D'un point de vue applicatif, les ondelettes ont eu une influence importante dans divers domaines : physique, analyse numérique (par exemple, pour la résolution d'équations aux dérivées partielles, statistiques, traitement du signal et des images, vision par ordinateur...

Dans le contexte de traitement du signal dans lequel nous nous placerons, le lien existant entre les décompositions en ondelettes et des outils plus traditionnels que sont les bancs de filtres, confère une certaine légitimité à ces transformations. Les bancs de filtres considérés agissent en divisant le spectre des signaux de manière logarithmique et constituent ainsi d'assez bonnes approximations du mode de fonctionnement des systèmes perceptuels visuel ou auditif humains. Les ondelettes et les techniques multirésolutions ont connu un grand succès en traitement d'images pour des problèmes tels que l'estimation de mouvement, la reconnaissance de formes, la recherche dans des bases de données et la transmission progressive d'informations. La propriété essentielle qui est exploitée dans ces applications est la possibilité d'approximer les images à plusieurs échelles, en partant d'une vue « grossière » qu'on vient affiner au cours de traitement successifs [13, 25, 26].

### 1.1 Un peu d'histoire

- 1805 : Analyse de Fourier
- 1965 : Transformée de Fourier rapide
- 1980 : Début des ondelettes « *ad hoc* »  
pourquoi/quand cela marche (physique, vision, parole) ?
- 1983 : Analyse d'image Multirésolution (Burt)
- 1985 : Transformée continue (Morlet & Grossman)  
Reconstruction sans redondance ?
- 1986-87 : Unification des travaux disparates (Mallat)
  - analyse Multirésolution
  - transformée discrète
- 1988 : Classe d'ondelettes (Daubechies)
  - compactes
  - orthogonales
  - nombre de moments quelconques
- 1990 : Les ondelettes attirent théoriciens et ingénieurs, le décollage !
- 1992 : Paquets d'ondelettes (Coifman)

## 1.2 Définition

### 1.2.1 De La Transformée de Fourier à la Transformée en Ondelette

La plupart des signaux ne sont pas stationnaires, et l'essentiel de l'information qu'ils contiennent réside dans ce non stationnarité. L'analyse de Fourier propose une approche globale du signal. Toute notion temporelle dans l'espace de Fourier (espace fréquentiel) disparaît.

Il faut trouver une transformation qui nous renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps / fréquence.

Plusieurs solutions ont été proposées. [14,24].

Ces solutions sont : la transformée de Fourier à fenêtre glissante, et la transformée de Gabor. Mais ces deux méthodes donnent une même résolution temporelle pour les hauts et les basses fréquences. Donc l'analyse n'est pas idéale.

C'est dans ce contexte qu'intervient la transformée en Ondelettes qui propose une solution de compromis entre la résolution temporelle et la résolution fréquentielle. [9, 14, 15].

### 1.2.2 La Transformée d'Ondelette

Une Ondelette mère  $\Psi$  est une fonction  $f$  de base que l'on va traduire et dilater<sup>6</sup> pour recouvrir le plan temps fréquences et analyser le signal [6, 11, 15].

On peut définir la transformée en Ondelettes d'un signal  $f(t)$  comme une projection sur la

base des fonctions Ondelettes  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  (3.1) :

$$TO(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad \text{Avec } a, b \in \mathbb{R}, \quad a \neq 0 \quad (3.2)$$

Dans cette expression,  $a$  est le facteur d'échelle,  $b$  est le paramètre de translation.

En posant :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.3)$$

<sup>6</sup> Dilater est ici à prendre dans le sens particulier de comprimer et Dilater.

Où  $\psi_{a,b}(t)$  sont une famille d'Ondelettes analysantes générales à partir d'une Ondelette « mère »  $\psi(t)$  par dilatation (facteur a) et translation (paramètre b). L'équation (3.2) devient : [15, 18, 19].

$$TO(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{a,b}(t) dt = \langle f, \psi_{a,b} \rangle \quad (3.4)$$

$\langle f, g \rangle$  Est un produit scalaire entre deux fonctions  $f.g$ .

La fonction Ondelette doit vérifier un certain nombre de propriétés, la première d'entre elle se nomme condition d'admissibilité.

Soit  $\psi(t) \in L^2$  (ensemble des fonctions à carré sommable) [23].

Alors

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3.5)$$

Cette condition permet d'analyser le signal, puis de le synthétiser sans perte d'information.

La condition d'admissibilité implique en outre que la transformée de Fourier de l'Ondelette à la Fréquence continue (pour  $\omega = 0$ ) doit être nulle. Soit :

$$\psi(\omega) \Big|_{\omega=0} = 0 \quad (3.6)$$

Ceci implique en particulier deux conséquences importantes :

- la première est que les Ondelettes doivent posséder un spectre de type passe-bande
- la seconde apparaît en réécrivant l'équation (3.6) de façon équivalente sous la forme :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (3.7)$$

Donc  $\psi(t)$  doit être à moyenne nulle.  $\psi(t)$  Est une fonction à largeur temporelle finie (fenêtre temporelle) possédant un caractère oscillatoire. On est alors bien en Présence d'une petite onde : une Ondelette [6, 12, 15].

Cette Ondelette agit comme un filtre passe bande, pour retrouver la partie du spectre éliminée par l'Ondelette (les basses fréquences), on utilise une autre fonction appelée fonction échelle  $\varphi(t)$ , sa moyenne est non nulle [6, 14].

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt \neq 0 \quad (3.8)$$

### 1.2.3 Illustration du changement d'échelle et de la translation

Le changement d'échelle sert à compresser ou dilater l'onde mère, ce qui permet d'analyser les hautes fréquences ou les basses respectivement contenues dans un signal. [12,15]

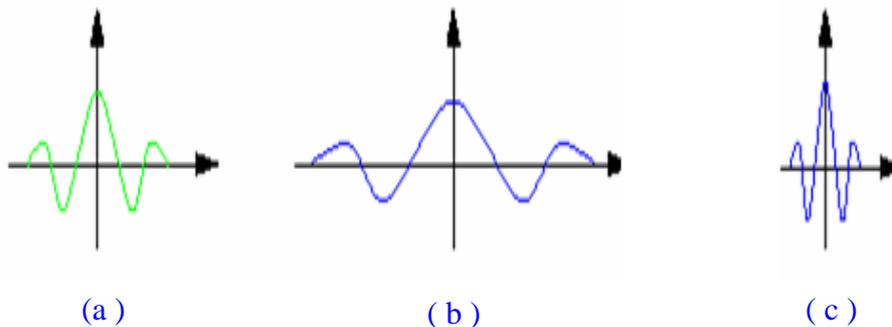


Fig.3.1 : illustration de la variation du facteur d'échelle, (a) l'Onde mère, (b) l'Onde pour  $0 < s < 1$ , (c) l'Onde pour  $a > 1$ .

### 1.3. L'Algorithme Pour Calcul des Coefficients

La procédure de calcul des coefficients  $C_f(s, u)$  s'effectue comme suit :

On multiplie le signal et la fonction analysante et l'on calcule l'intégrale du produit. C'est un processus assez simple ; en fait il se déroule en cinq étapes : [12, 15].

1. On prend une Ondelette et on l'a compare à une section au début du signal original
2. On calcule le coefficient  $C_x(a,b)$  qui représente le degré de corrélation de l'Ondelette avec cette portion du signal.
3. On translate l'Ondelette vers la droite et on répète les étapes (1) et (2) jusqu'à ce que le signal soit couvert en entier.
4. On dilate l'Ondelette et on répète les étapes une (1) à trois (3).
5. On recommence l'opération pour toutes les étapes à différentes échelles

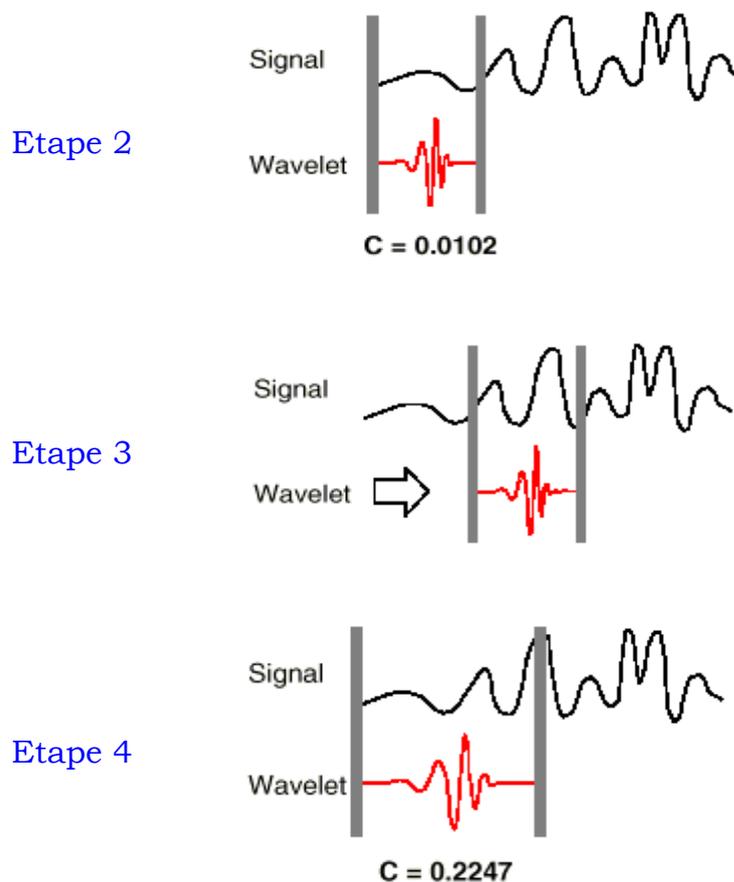


Fig.3.2 : les étapes de Calcul Les Coefficients

### 3. Transformée en Ondelettes Continue ( CWT )

Une fois que l'ondelette mère est choisie le calcul commence par  $a = 1$  et la CWT est calculée pour toutes les valeurs de  $a < 1$  et  $a > 1$ . Cependant, selon le signal, une transformée complète n'est habituellement pas nécessaire. Pour tous les besoins pratiques, les signaux sont limités en largeur de la bande (bandlimited) et donc, calcul de la transformation pour un intervalle limité d'échelles est habituellement adéquat.

Si le signal a une composante spectrale qui correspond à la valeur courante de  $a$ , le produit de l'ondelette mère avec le signal à l'endroit où cette composante spectrale existe donne une valeur relativement grande. Autrement ce produit donne une valeur relativement petite ou nulle.

#### 2.1 Initialisation de $a$

Pour la Convenance, le procédé sera commencé à partir de l'échelle  $a = 1$  et continuera pour les valeurs croissantes de  $a$ , i.e., l'analyse commencera à partir des haute fréquences et procédera vers les basses fréquence. Cette première valeur de  $a$  correspondra à l'ondelette la plus comprimée.

L'ondelette est placée au début du signal au point qui correspond à temps = 0. la fréquence d'ondelette à l'échelle 1 est multipliée par le signal et puis intégrée sur tout le temps. Le résultant de l'intégration est alors multiplié par le nombre constant  $1/\sqrt{a}$ . Cette multiplication est pour la normalisation d'énergie de sorte que le signal transformé ait le même énergie à chaque échelle. Le résultat final est la valeur de la transformation, i.e., la valeur de la CWT au temps zéro et à l'échelle  $a = 1$ . en d'autres termes, c'est la valeur qui correspond au point  $b = 0, a = 1$  dans le plan temps-échelles

#### 2.2 Incrémentation de $b$

L'ondelette à l'échelle  $a = 1$  et ensuite transformée ( ou décalée ) vers la droite par une valeur  $\tau$  à l'emplacement  $t = b$ , et l'équation (3.2) est calculée de nouveau pour obtenir la CWT au point  $t = b$ , et  $a = 1$  dans le plan temps-échelle.

Ce procédé est répété jusqu'à ce que l'ondelette atteigne l'extrémité du signal. Une rangée des points sur le plan temps-échelle pour l'échelle  $a = 1$  est maintenant accomplie.

Puis,  $a$  est augmenté par une petite valeur. Notez qu'il s'agit d'une transformation continue, et donc,  $b$  et  $a$  doivent être incrémentés d'une façon continue. Cependant, si cette transformée a besoin d'être calculée par un ordinateur, alors les deux paramètres sont augmentés par un pas suffisamment petit. Ceci correspond à l'échantillonnage du plan temps-échelle.

Le procédé ci-dessus est répété pour chaque valeur de  $a$ . Chaque calcul pour une valeur donnée de  $a$  remplit une rangée simple correspondante du plan d'échelle de temps. Quand le processus est complété pour toutes les valeurs désirées de  $a$ , CWT du signal a été calculé.

#### 4. Transformée en Ondelettes Discrète

Dans le monde d'aujourd'hui, les ordinateurs sont presque tous les calculs. Il est évident que ni la WT, ni le STFT, ni le CWT ne puissent être pratiquement calculés en employant des équations analytiques, des intégrales, etc. .... Il est donc nécessaire de discrétiser les transformées. Comme dans la FT et le STFT, la manière la plus intuitive de faire ceci est simplement d'échantillonner le plan temps-fréquence (échelle). Encore intuitivement, l'échantillonnage du plan avec un taux d'échantillonnage uniforme semble le choix le plus normal. Cependant, dans le cas de la WT, le changement de l'échelle peut être employé, pour réduire le taux d'échantillonnage.

De par cet aspect, la transformée en Ondelettes telle qu'elle est définie est redondante, c'est-à-dire que l'on obtient plus de coefficients d'Ondelettes qu'il n'en est nécessaire pour décrire le signal de manière exhaustive. En pratique, on a plus

Souvent affaire à des signaux discrets, mais même sans cela, on a intérêt à discrétiser les valeurs de  $a$  et  $b$ .

Pour ce rendre compte d'une part, de l'intérêt d'utiliser les Ondelettes et d'autre part, de la manière dont on va discrétiser les valeurs de  $a$  et  $b$ , on va regarder comment les Ondelettes se déploient ou se répartissent en temps et en fréquence, par rapport, par exemple, à une transformée de Fourier à fenêtre glissante.

Pour cela, on a représenté, en les juxtaposant, les supports temporels et fréquentiels des Ondelette dans le plan défini en abscisse par l'axe temporel et en ordonnées par l'axe fréquentiel. On visualise ainsi comment est découpé le plan Temps-Fréquence pour chaque type de transformée figure (3.3) [13, 14].

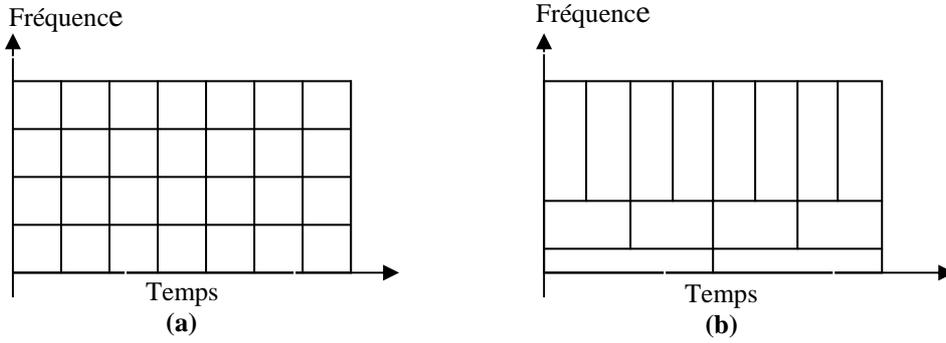


Fig.3.3 : Plan Temps-Fréquence : a) transformée de Fourier à fenêtre Glissante, b) transformée en Ondelette.

On remarque que les résolutions temporelle et fréquentielle pour la transformée de Fourier à fenêtre glissant sont constants, alors que pour la transformée en Ondelette les résolutions varient en sens inverse [12, 24].

Le pavage Temps-Fréquence utilisé sur la figure (3.3,a) précédent suggère une méthode de discrétisation exponentielle pour les échelles et pour le temps.

Soit  $a = a_0^j$  et  $b = n.b_0.a_0^j$  avec  $a_0$  &  $b_0 \in \mathbb{Z}$ . on obtient alors une transformée en Ondelettes discrète :

$$TO(n, j) = a_0^{\frac{-j}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi(a_0^{-j}t - nb_0) dt \quad (3.9)$$

Si on choisi  $a_0 = 2$  &  $b_0 = 1$ , on parle alors d'une **Transformée en Ondelette dyadique**.

$$TO(n, j) = \sqrt{2}^{-j} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(2^{-j}t - n) dt \quad (3.10)$$

**Remarque** : il faut noter dans ce cas que c'est la transformée que est discrète, et non l'Ondelette qui reste toujours fonction continue [15].

#### 4. Analyse Multi-résolution

On construira une analyse multi résolutions à l'aide du son espace d'approximation  $V_j$  (génééré par la fonction échelle) emboîtés les uns dans autres, tel que le passage de l'un à l'autre soit résultat d'un changement d'échelle (zoom) [28].

L'espace des détails  $W_j$  (génééré par la fonction Ondelette) vient compléter l'analyse. On peut définir pour  $V_j$  son complément orthogonal  $W_j$  dans  $V_{j-1}$  tel que :

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j \quad (3.11)$$

Le schéma de la décomposition est représenté symboliquement sur la figure (3.4) dans laquelle la largeur des rectangles symbolisant les sous espaces est proportionnelle à la densité de l'échantillonnage réalisé par la projection du signal dans le sous espace considéré [10, 15, 18].

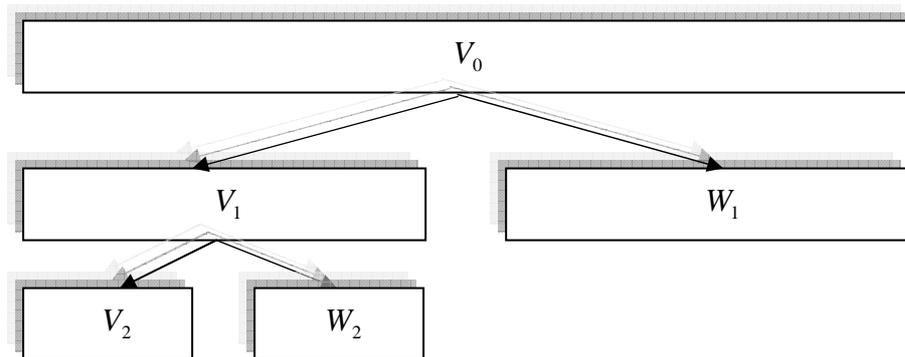


Fig.3.4 : Schéma d'analyse Multi-résolution

La décomposition en Ondelettes est similaire à la décomposition de Gabor, un signal s'écrit sous la forme d'une superposition de telles Ondelettes décalées et dilatée. Les poids de ces Ondelettes dans la décomposition (appelés les coefficients d'Ondelette) forment la Transformé en Ondelettes, qui est donc une fonction de deux variable ; le temps et l'échelle (ou dilatation) [11, 12, 13].

Avec l'analyse par Ondelettes, le signal est décomposé en fonction élémentaires, engendrée par des Transformations simples d'une fonction de base qui est translatés et dilatée, (**fig.3.5**). Les Ondelettes sont très étendues et dilatée pour étudier les basses fréquences (les grandes échelles),

Et très fines pour étudier des phénomènes plus transitoires (hautes fréquences, ou petites échelles). Cette procédure, développée par S.Mallat et systématisée par I.Daubechies, pour le nom de Multirésolution, et suggère une interprétation différente de l’analyse par Ondelettes, basée sur les idées de lissage, ou d’approximation des fonctions

Les décompositions en Ondelettes existent dans plusieurs versions, que l’on choisit en fonction de l’application visée [14,17].

La décomposition du signal en Ondelettes permet à l’utilisateur de s’adapter plus au signal selon son contenu fréquentiel pour extraire les informations utilisées. Dans ce cas tout changement de fréquence se traduira par un changement sur un plusieurs niveaux d’échelles. La classification sera appliquée sur certains signaux de détails et non sur le signal original. [27].

$$Détail_m(t) = approx_{m-1}(t) - approx_m(t) \quad (3.12) \text{ , Voir (figure 3.9),}$$

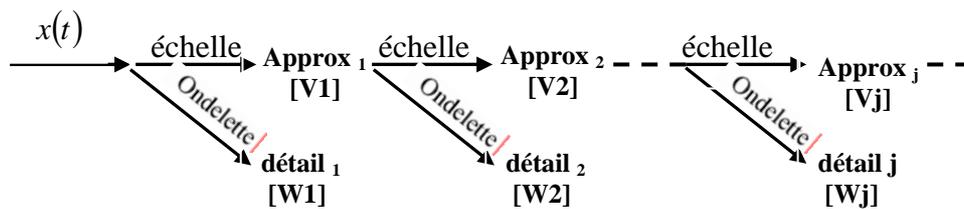


Fig.3.5 : Analyse Multi-résolution : décomposition successive en Approximation et détails.

La transformée en Ondelettes mesure la similitude entre le signal et l’Ondelette pour ses différentes dilatations (résolution) et translation (localisation) [13, 26, 28].

$$V_{j+1} = V_j + W_j \quad (3.10)$$

**Echantillonnage de départ**

**Approximation**  
 $\varphi$

**Détails**  
 $\psi$

## 5. Les Différents Type d'Ondelettes

Généralement quand il est question de filtrage, la nature des filtres utilisés (RIF, ou RII, symétrique ou non, récursifs ou non) conditionne le choix de l'Ondelette. On donne ici quelques types d'Ondelettes couramment utilisées :

### 5.1 Ondelette de Haar

La fonction échelle  $\varphi(t)$  et la fonction d'Ondelette  $\psi(t)$  sont données par :

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (3.13)$$

La fonction de transfert des filtres associés s'écrit :

$$H(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} z^{-1} \quad (3.14)$$

$$G(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} z^{-1} \quad (3.15)$$

L'inconvénient de cette analyse est sa très mauvaise résolution fréquentielle son intérêt est la grande simplicité des filtres associés [15, 21].

### 5.2 Ondelette de Littlewood Paley :

La fonction échelle est de types sinc, on peut considérer que c'est le duale de la fonction de Haar. Les fonctions d'échelle et d'Ondelette s'écrivent donc :

$$\varphi(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi} \quad (3.16)$$

$$\psi(t) = \frac{\cos \pi t - \sin 2\pi t}{\pi \left( t - \frac{1}{2} \right)} \quad (3.17)$$

On donne les filtres numériques associés :

$$h[n] = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sin n\pi/2}{n\pi/2} \quad (3.18)$$

$$g[n] = \frac{(-1)^{n-1}}{\sqrt{2}} \frac{\sin \frac{1-n}{2}\pi}{\frac{1-n}{2}\pi} \quad (3.19)$$

On remarque que les filtres  $h[n]$  et  $g[n]$  sont de longueur infinie (RII), et contrairement à la précédente cette Ondelette manque de localisation temporelle [14].

### 5.3 Ondelette Splines :

Les B Spline sont construites par auto convolution de la fonction boîte noté  $I(t)$  :

$$I(t) = \begin{cases} 1 & -1/2 \leq t \leq 1/2 \\ 0 & \text{si } t < -1/2 \text{ ou } t > 1/2 \end{cases} \quad (3.20)$$

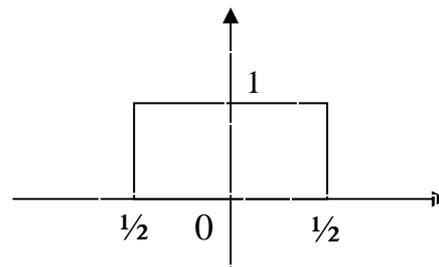


Fig.3.6 : La Fonction Boîte  $I(t)$ .

La famille des fonctions B Spline ne constitue pas une base orthonormée, mais on peut appliquer une méthode d'opérationnalisation, par une combinaison linéaire des fonctions B Spline d'Ordre  $n$ , et obtenir ainsi une base orthogonale, les filtres numériques associés auront une réponse en phase linéaire, mais ils sont de type RII, coûteux à mettre en œuvre. La B Spline d'ordre  $n$  sera :

$$\text{Si } n \text{ est impair : } \beta^{(n)}(t) = \underbrace{I(t) * I(t) * \dots * I(t)}_{n+1} \quad (3.21)$$

$$\text{Si } n \text{ est pair : } \beta^{(n)}(t) = \underbrace{I(t-1/2) * I(t-1/2) * \dots * I(t-1/2)}_{n+1} \quad (3.22)$$

On posant  $n = 0$  on retrouve la base de Haar qui est la seule de la série qui soit orthonormée.[14].[18].

#### 5.4 Ondelette Bi orthogonale

Dans certaines applications, on préfère utiliser des Ondelettes bi orthogonales qui permettent d’allier les propriétés de linéarité en phase avec la compacité des supports des filtres utilisés. L’analyse et la reconstruction sur les bases bi orthogonales n’utilisent pas les mêmes familles de fonctions, deux jeux de bases duales nécessaires [15, 18].

#### 5.5 Ondelette de Morlet

L’Ondelette de Morlet a un grand intérêt et dans l’étude des signaux sismiques, comme nous allons le voir plus tard, puisque sa forme ‘’ ressemble ‘’ beaucoup à celle de l’Ondelette sismique (l’impulsion). Cette Ondelette est inspirée du signal élémentaire de Gabor elle est obtenue par modulation d’une gaussienne

$$\psi(t) = (\pi.t_0)^{-1/4} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{t_0}\right)^2 + 2j\pi f_0 t\right] \quad (3.23)$$

#### 5.6 Chapeau Mexicain

Le chapeau mexicain Fig. (3.7), Ondelette réelle qui doit son nom à sa forme, est construite à partir de la dérivée seconde de la gaussienne :

$$\psi_{CM}(t) = (1-t^2).exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) \quad (3.24)$$

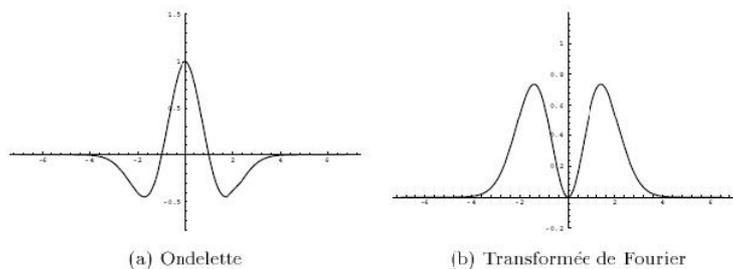


Fig.3.7: Ondelette Chapeau Mexicain et module de sa transformée de Fourier

Cette Ondelette appartient à l'espace de Schwartz  $S$ , elle est symétrique, ce qui permet de ne pas introduire des décalages (déphasages) dans la transformée en Ondelettes contrairement à des Ondelettes non symétriques (comme le sont les Ondelettes orthogonales à support compact de Daubechies), elle est particulièrement adaptée à la détection des discontinuités.

### 5.7 Ondelette de Daubechies

Les Ondelettes d'Ingrid Daubechies sont intéressantes puisque elles sont orthogonales et bien localisées en temps (ou espace) de plus elles donnent la possibilité de choisir le degré de régularité voulue en imposant un certain nombre de moments nuls (fig.3.8), leur régularité augmente avec  $N$ , cependant elles ne sont pas symétriques ce qui peut causer de problèmes dans certaines situations

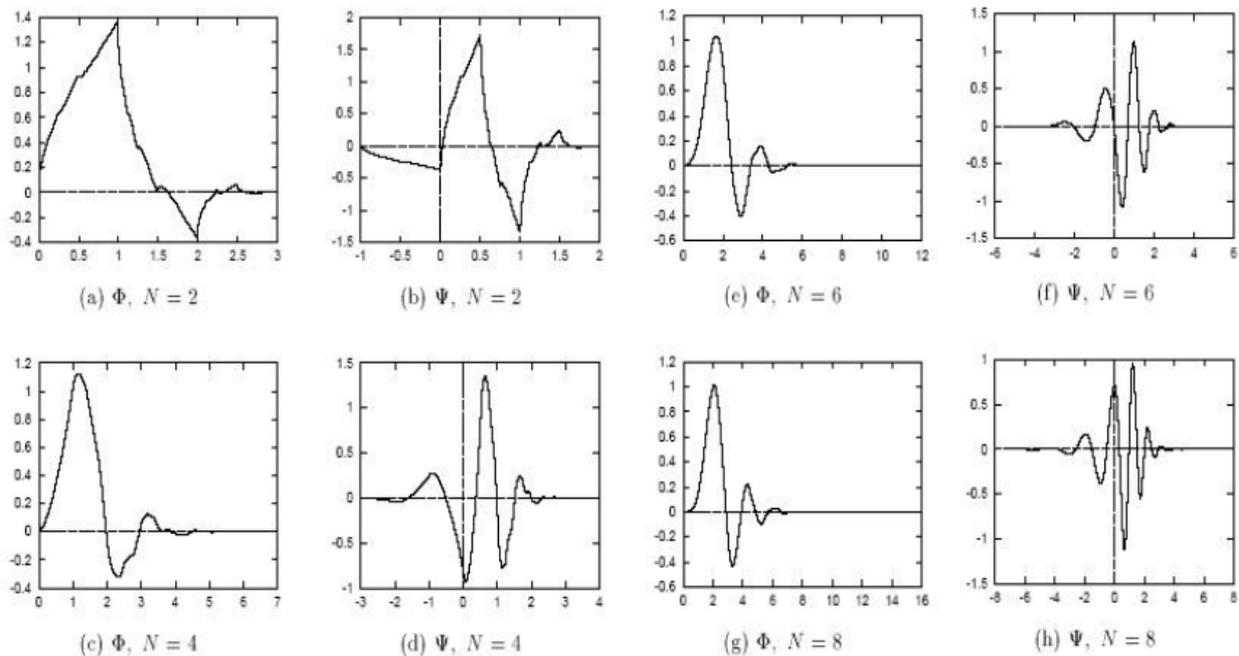


Fig.3.8 : Ondelettes de Daubechies avec  $N$  moments nuls ( $N = 2, 4, 6, 8$ )

## 6. Avantage l'analyse en Ondelettes

Le fait que la transformée utilise des fonctions bien localisées dans le plan Temps-Fréquence lui donne beaucoup d'avantages :

- La Résolution en fréquence de la transformée dépend du facteur de dilatation  $a$  par le principe d'Heisenberg, on peut donc choisir arbitrairement celle-ci suivant ce que l'on désire analyser.
- Pour les signaux physiques présentant des variations très rapides, des sauts, des marches, bref des discontinuités ; l'analyse en Ondelettes est adaptée car l'Ondelette va détecter ces variations et analyser celle-ci cette particularité rend l'analyse en Ondelettes complémentaire à l'analyse de Fourier. En effet, avec l'analyse de Fourier, les discontinuités d'un signal ne sont pas facilement analysables, car les coefficients des fréquences correspondances sont étalés dans toute la transformée.
- La localisation en temps est précieuse pour nombre d'application.
- La transformée en Ondelette peut représenter complètement et efficacement un signal quelconque en peu de coefficients.

Considérons le signal non stationnaire. Le signal est composé de 3 composantes

La translation est strictement liée au temps, puisqu'elle indique où l'ondelette mère est localisée. Rappelez-vous que le paramètre  $a$  de l'échelle dans l'équation 3.3 est réellement inverse de la fréquence. En d'autres termes, celui que Concernant la résolution de fréquence, l'inverse de lui apparaîtra sur la figure montrant la WT du signal dans le domaine temporel [13].

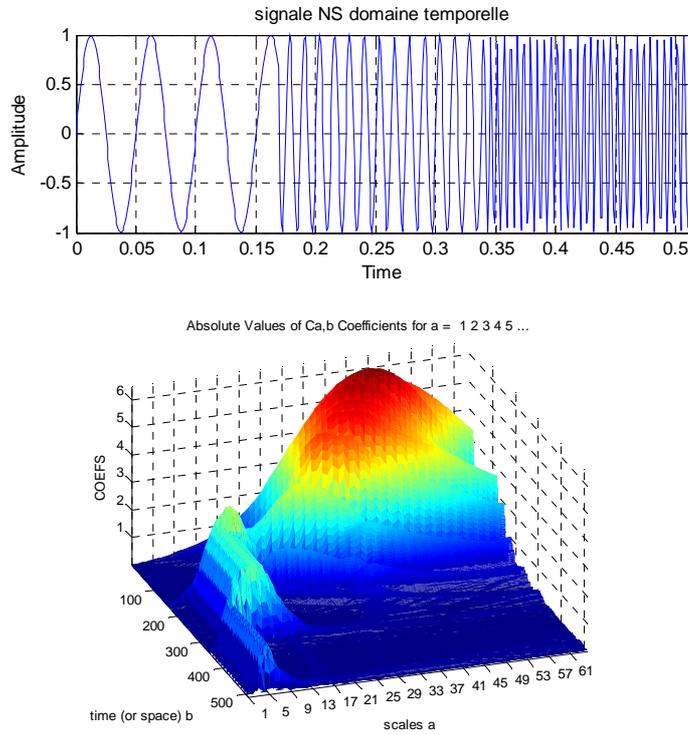


Fig.3.9 : *CWT* de Fonction de a et b. Du Signal N.S  $x_1(t)$

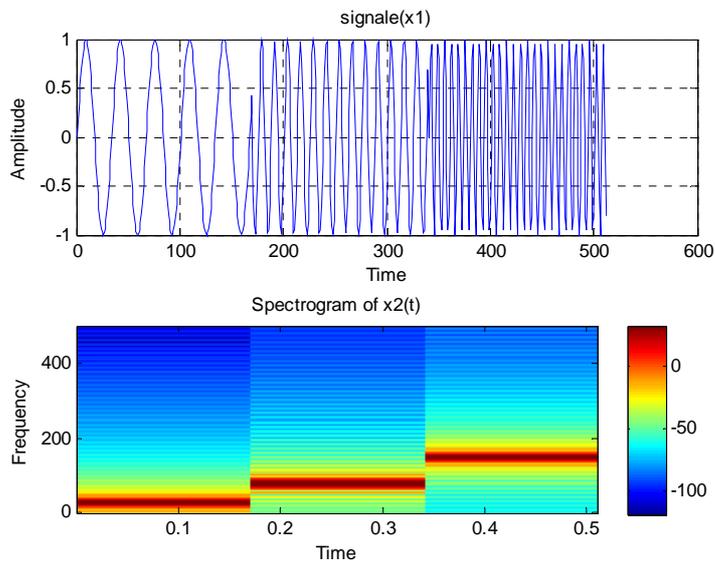


Fig.3.10 : *STFT* d'un Signal non stationnaire



La figure (3.11), présent le résultat de transformée d'ondelettes CWT et la transformée STFT de signal non stationnaire  $x_2(t)$

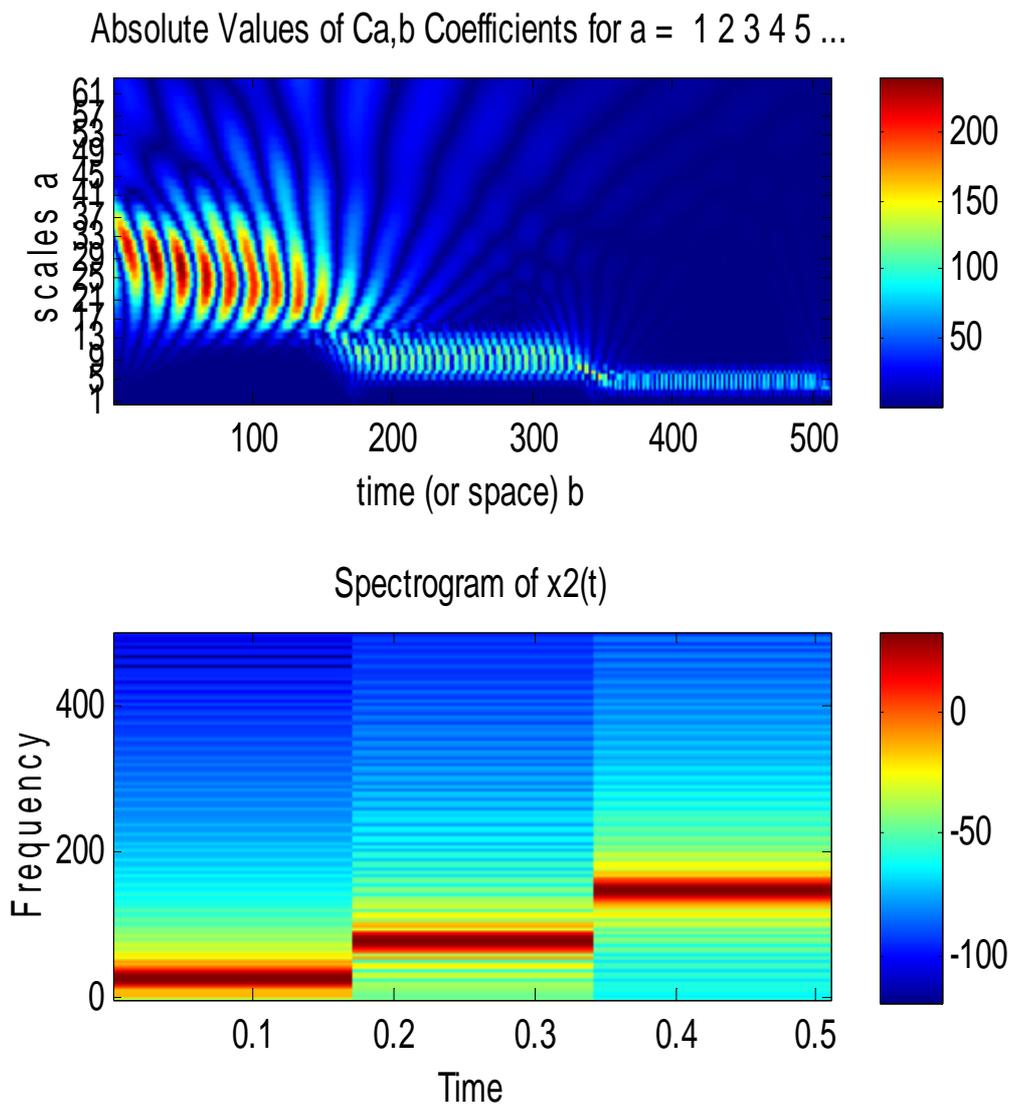


Fig.3.11 : *CWT et STFT* de Signal Non Stationnaire

Bien que les largeurs et les tailles des cases changent la surface changent, (déterminée par la CWT) est constante, i.e. chaque case représente une partie égale du plan temps-fréquence, mais donne des proportions différentes pour le temps et la fréquence [13].

- Aux basses fréquences, les tailles des cases sont plus courtes (qui correspond à de meilleures résolutions de fréquence, puisqu'il y a moins d'ambiguïté concernant la valeur exacte de la fréquence), mais leurs largeurs sont plus longues (qui correspondent à la résolution faible de temps, puisqu'il y a plus d'ambiguïté concernant la valeur exacte du temps)
- À des fréquences plus élevées la largeur des cases diminue, i.e., la résolution de temps va mieux, et les tailles des cases augmentent, temps). i.e., la résolution de fréquence devient plus pauvre

La figure (3.12 –a), présent le résultat de transformée STFT de signale stationnaire  $x_1(t)$  avec fenêtre  $w = 170$ , et la figure (3.12 –b), présent le résultat de transformée STFT de signale stationnaire  $x_1(t)$  avec fenêtre  $w = 50$ , mais la figure (3.13) présent la CWT de signale  $x_1(t)$ ,

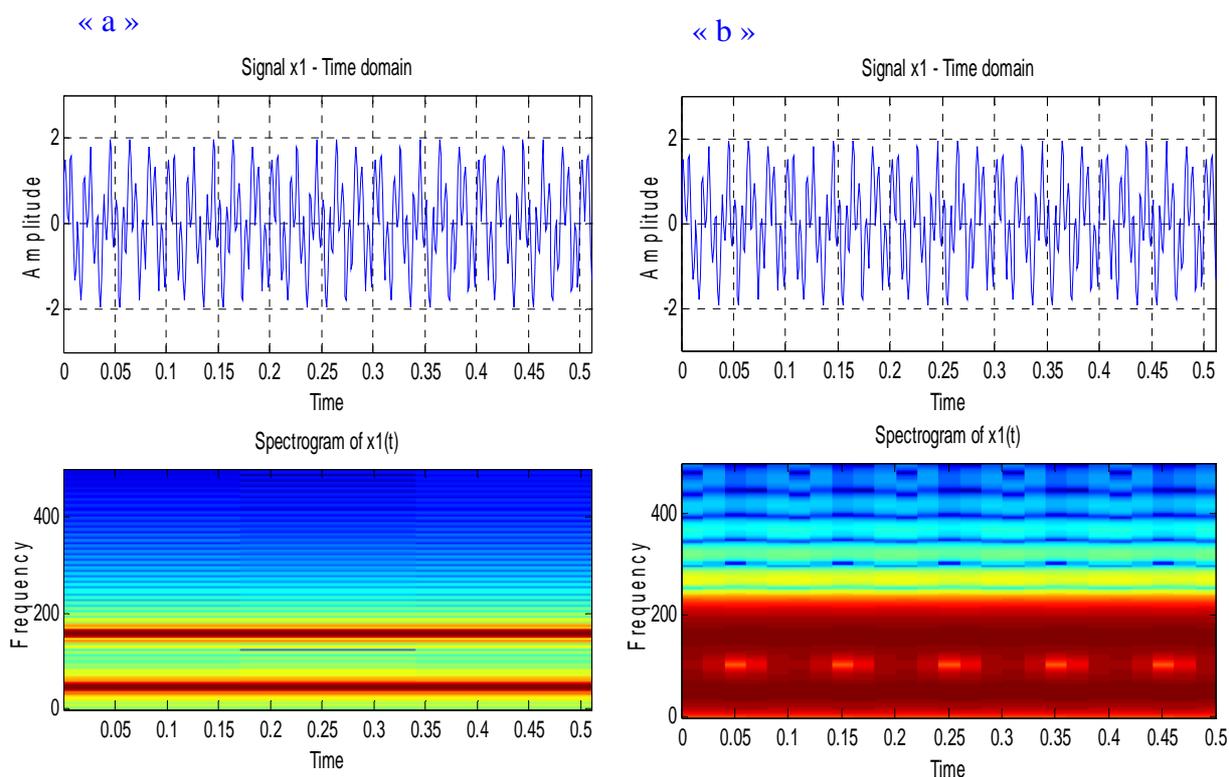


Fig.3.12 : Transformée de STFT de Signal stationnaire avec différents valeur de fenêtre

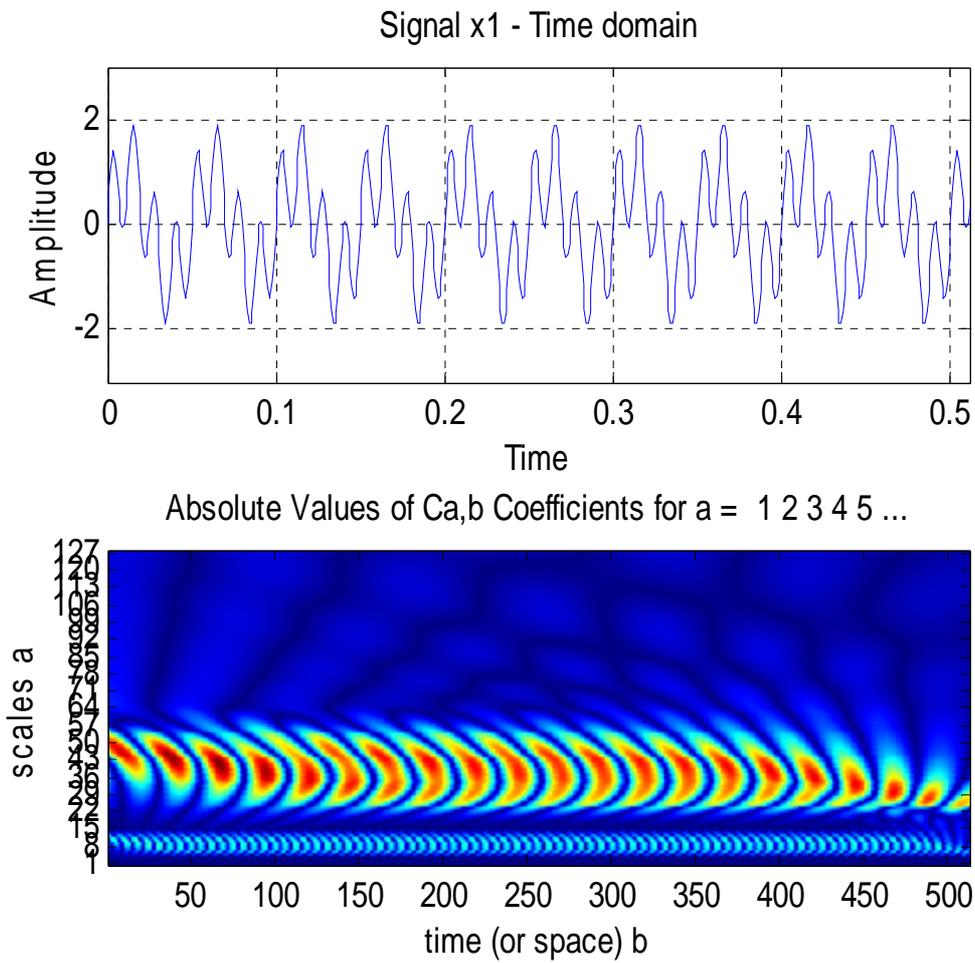


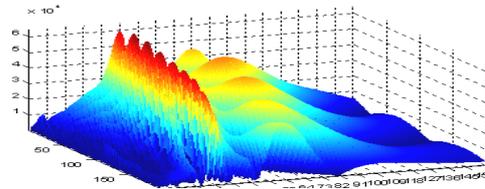
Fig.3.13 : CWT de signal stationnaire

Les exemples précédents correspondent à des signaux réels stationnaires, L'objectif de ces exemples est de donner uniquement une idée sur l'allure de CWT pour ces signaux.



## Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montrée que la transformé en Ondelettes permet D'obtenir une distribution Temps-Fréquence et temps-échelle de l'énergie d'un signal et par conséquent la distribution Temps-fréquence . Nous Avons également vu qu`a partir de cette distribution, les fréquences instantanés des composantes d'un signal peuvent être estimées, pour autant que l'écart Fréquentiels entre les composantes soit suffisant.



*Chapitre IV*  
*Application des*  
*Ondelettes*  
*Sur le signal de Parole*

---

## Introduction

**A**près avoir étudié les Ondelettes dans les chapitres précédents, nous allons dans cette partie appliquer la transformée en ondelette sur le signal de parole, l'acquisition du signal de parole a été faite par un logiciel CoolEdit en choisissant les paramètres qui conviennent à notre application.

### 1. Analyse classique

#### 1.1 Acquisition de parole avec CoolEdit

- le programme CoolEdit pour l'enregistrement, l'analyse auditive et visuelle des sons et de leurs spectres ;
- et le programme Matlab pour l'analyse et le traitement numériques des signaux.

On s'intéresse à des sons de la bande téléphonique, on les enregistrera en monophonie à la fréquence d'échantillonnage de 10 kHz avec un convertisseur 16 bits donc la période d'échantillonnage  $T_e$

$$T_e = \frac{1}{F_e} = \frac{1}{10 \times 10^3} = 0.1 \times 10^{-3} \text{ s} \quad (4.1)$$

Donc

$$T_e = 0.1 \text{ m.s}$$

L'opération de numérisation, schématisée à la figure (4.1) requiert successivement : un filtrage de garde, un échantillonnage, et une quantification.

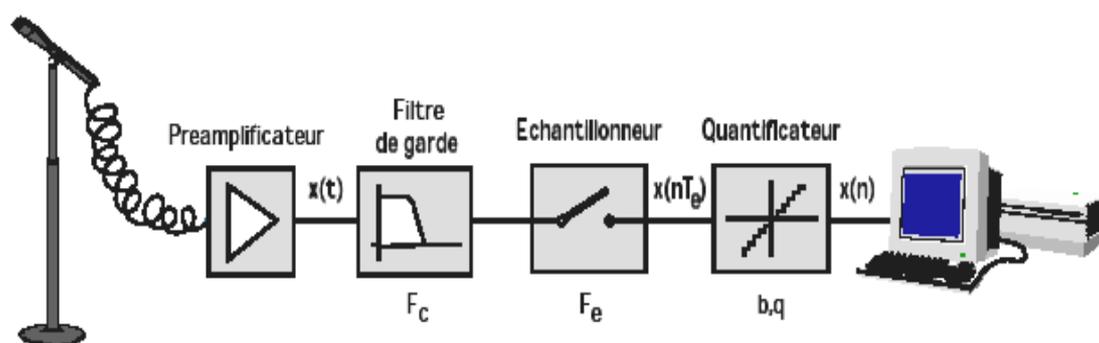


Fig. 4.1 : Enregistrement numérique d'un signal acoustique.

La figure (4.2) représente l'évolution temporelle du signal vocal pour les mots parenthèse, avec sons spectrogramme

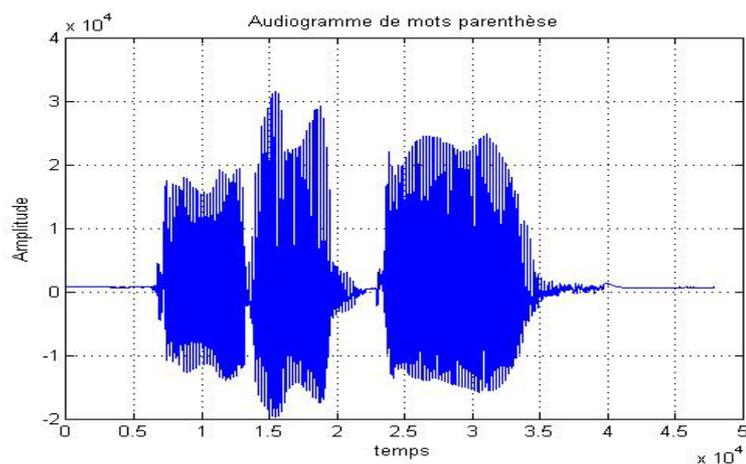


Fig.4.2 : Audiogramme de mots parenthèse

Il est souvent de représenter l'évolution temporelle du spectre à court terme d'un signal, sous la forme d'un spectrogramme. L'amplitude du spectre y apparaît sous la forme de niveaux de gris dans un diagramme en deux dimensions temps-fréquence. On parle de spectrogramme à large bande ou à bande étroite selon la durée de la fenêtre de pondération Figure (4.3), Les spectrogrammes à bande large sont obtenus avec des fenêtres de pondération de faible durée, les mettent en évidence l'enveloppe spectrale du signal, et permettent par conséquent de visualiser l'évolution temporelle des formants. Les périodes voisées y apparaissent sous la forme de bandes verticales plus sombres. Les spectrogrammes à bande étroite sont moins utilisés. Ils mettent plutôt la structure fine du spectre en évidence,

Les harmoniques du signal dans les zones voisées y apparaissent sous la forme de bandes horizontales.

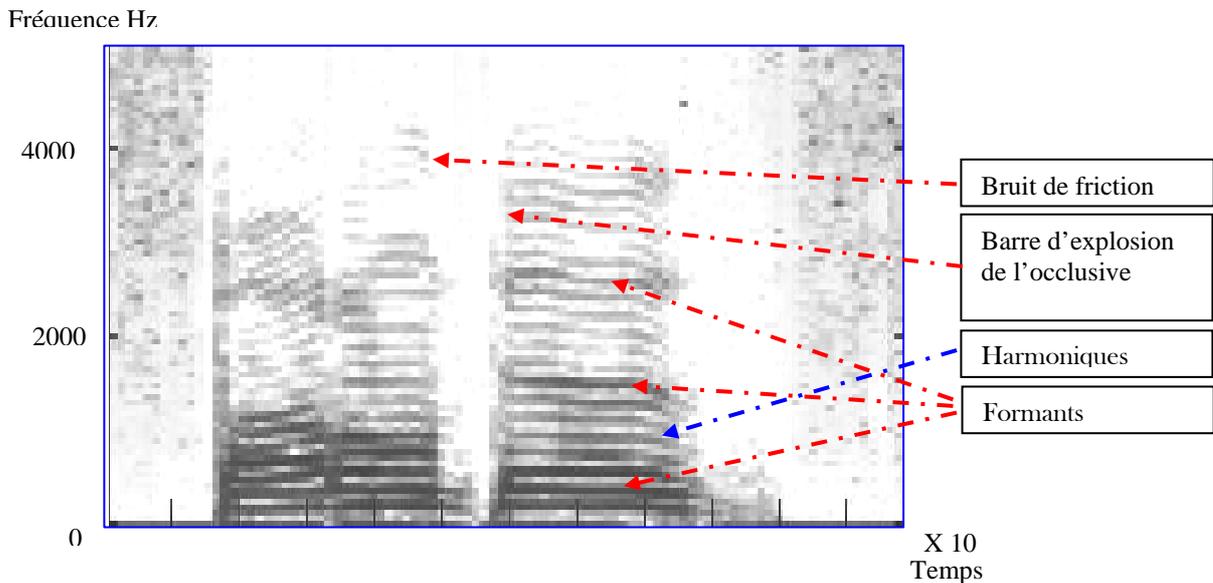


Fig.4.3 : Spectrogramme du mot parenthèse

Nous avons déjà vu que le spectrogramme qui figure dans Matlab lorsque l'on édite un son permet de représenter les formants sous la forme de bandes larges d'énergie. Les valeurs exactes des formants se trouvent au centre de ces bandes d'énergie. En fait, on peut aussi modifier les paramètres de calcul du spectrogramme pour obtenir une représentation où l'on voit les différents harmoniques.

## 1.2 Calcul des Formants :

Les Formants sont généralement mesurés à l'aide de la technique dite « **Codage linéaire Prédicatif** » ou **LPC** « Linear Predictive Coding » cette méthode utilise l'autocorrélation (le même principe de base que pour calcul de F0), mais pour repérer les patrons réguliers qui sont cette fois de durée inférieure à la période. [16]. [17].

## 1.3 Calcul de la Fréquence Fondamentale F0

De façon générale, on calcule la valeur de F0 par une méthode dite d'autocorrélation. Cette méthode est basée sur le principe qu'il existe une forte corrélation entre les périodes successives d'une onde complexe. On utilise cette propriété des sons voisés pour estimer la valeur de F0, le programme utilise deux fenêtres d'analyse (w1 et w2), normalement dont la longueur est plus grande qu'une période, mais moins grande que deux périodes. On fait

Glisser la fenêtre  $w_2$  vers la droite jusqu'à ce qu'on obtienne la meilleure corrélation entre  $w_1$  et  $w_2$ . On calcule alors le délai c'est-à-dire l'intervalle de temps entre les débuts de  $w_1$  et  $w_2$ . c'est la période [29].

Dans un son voisé, la composante qui a la fréquence la plus basse correspond à la fréquence de vibration des cordes vocales = la fréquence fondamentale (F0) La F0 donne la hauteur de la voix du locuteur [17, 23].

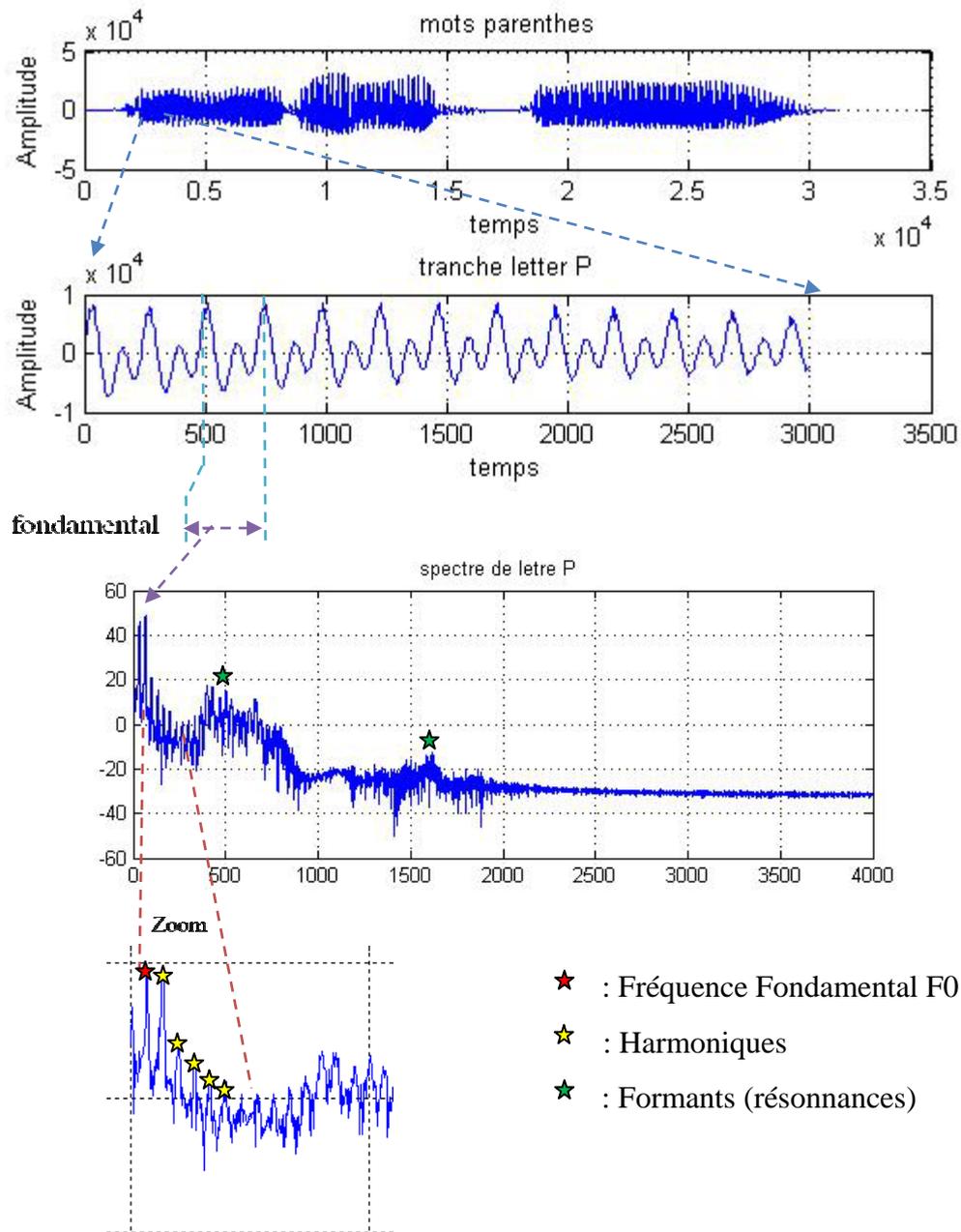


Fig.4.4 : Déférents Fréquences du mot parenthèse

Les autres composantes périodiques de l'onde produite par la vibration des cordes vocales sont les harmoniques. Ce sont des multiples entiers de la fréquence Fondamentale, [17, 30].

## 2. Acoustique:

- Pour les consonnes non voisées, la source n'est pas produite par les cordes vocales puisqu'elles ne vibrent pas.
- Pour les fricatives, la source est le signal turbulent qui est produit à l'endroit du resserrement des articulateurs.
- Pour les occlusives, la source est le signal d'explosion qui se forme lors du relâchement de l'occlusion.

Leur signal source est un signal apériodique (du bruit).

- Pour les consonnes voisées, il y a deux sources : celle produite par la vibration des cordes vocales, et celle produite à l'endroit du resserrement dans le conduit vocal.

Le tableau suivant présente les différentes fréquences des formants de voyelles

“ A, E, I, O, U ” respectivement :

Fréquence Hz Voyelle	Fréquence F1	Fréquence F2	Fréquence F3
<b>a</b>	695	1391	2612
<b>e</b>	430	2013	2784
<b>i</b>	335	2112	3015
<b>o</b>	354	744.8	2442
<b>u</b>	354	764	2240

Tableau 4.1 : Différentes Fréquences Des Formants de Voyelles première lecture

Fréquence Hz \ Voyelle	Fréquence F1	Fréquence F2	Fréquence F3
<b>a</b>	625	1491	2356
<b>e</b>	387	1985	2875
<b>i</b>	246	2018	3196
<b>o</b>	313	756	2271
<b>u</b>	312	750	2079

Tableau 4.2 : Différentes Fréquences Des Formant de Voyelles Deuxième lecture

La figure suivant présenté les voyelles " A, i, e, u, o " avec le spectre qui coresponsable

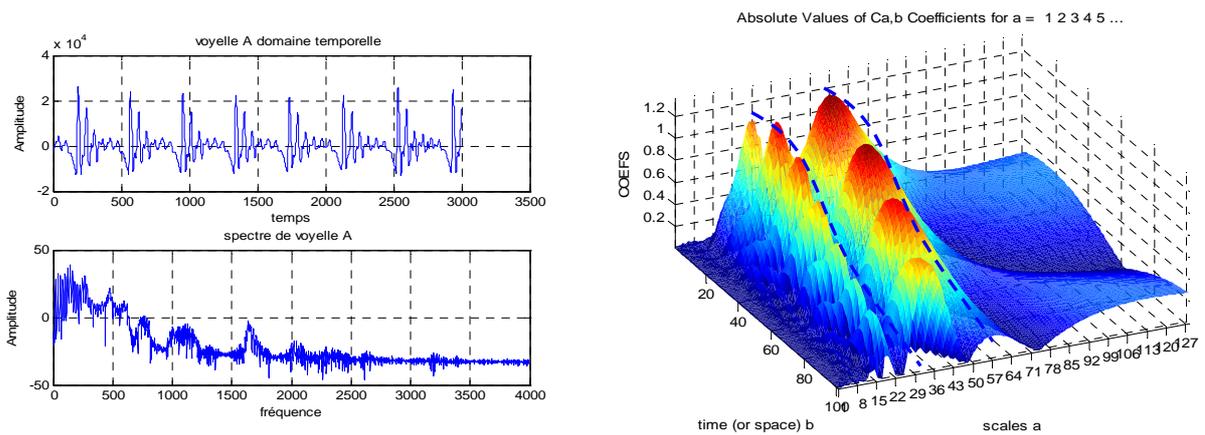


Fig.4.5 : le Voyelle A avec le spectre et le CWT

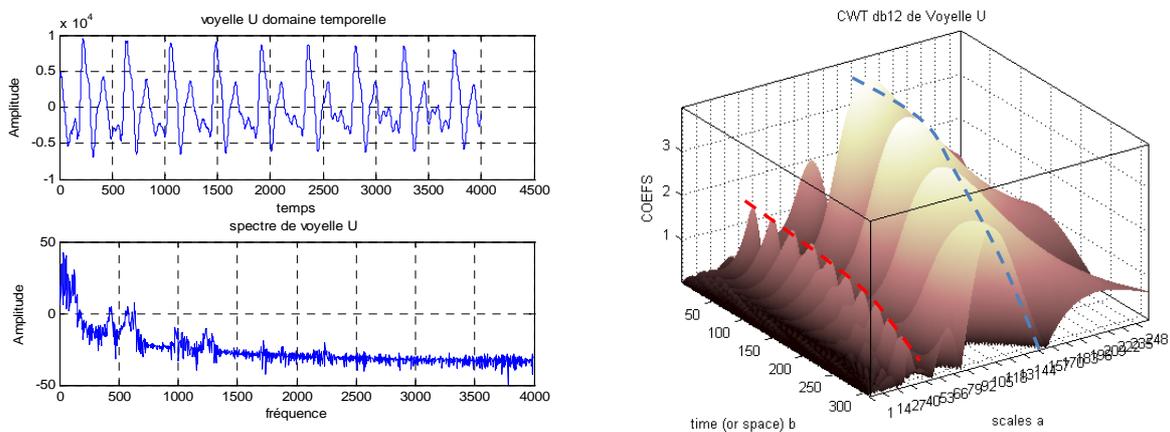


Fig.4.6 : le Voyelle U avec le spectre et le CWT

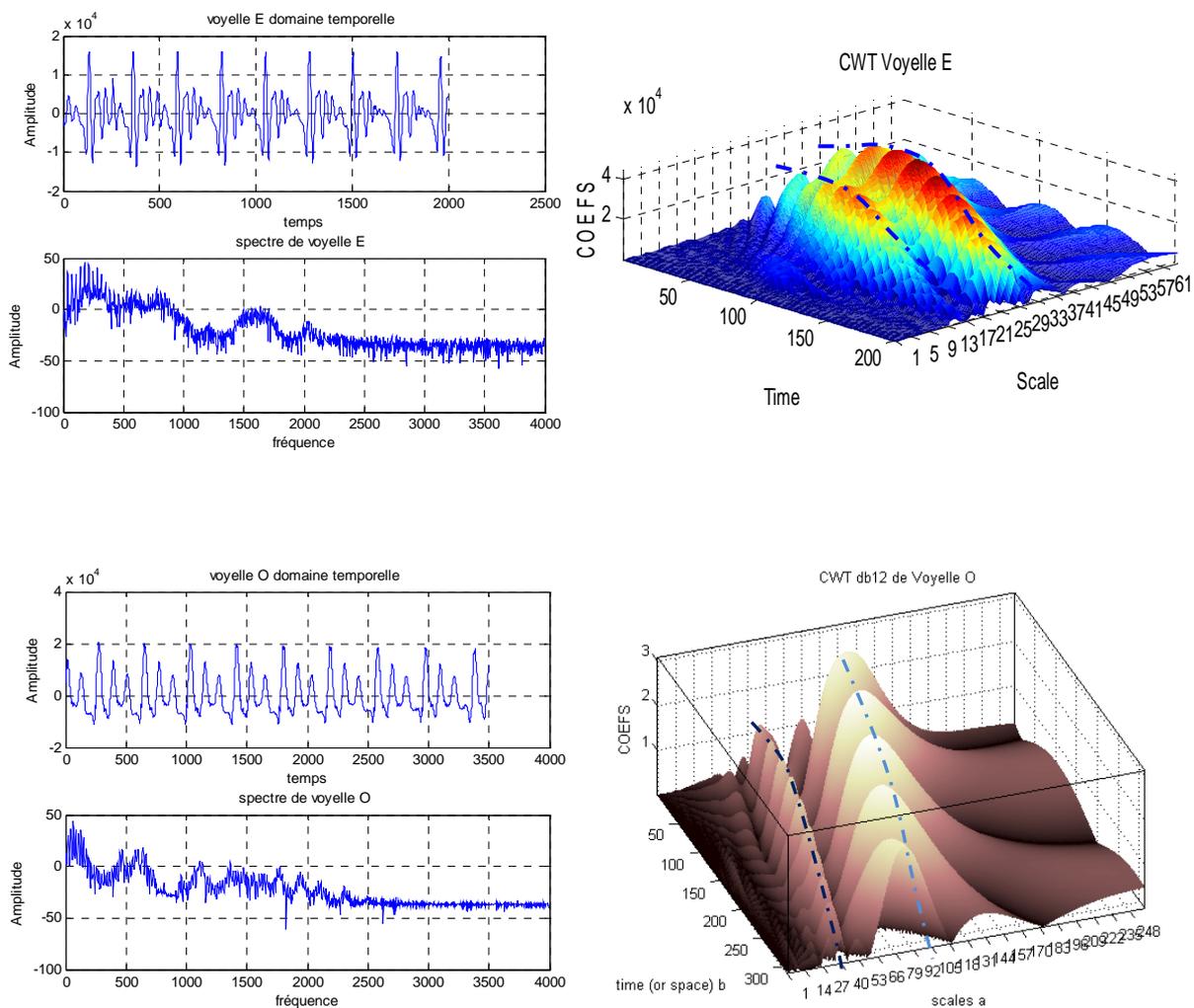


Fig.4.8 : le Voyelle O avec le spectre et le spectrogramme

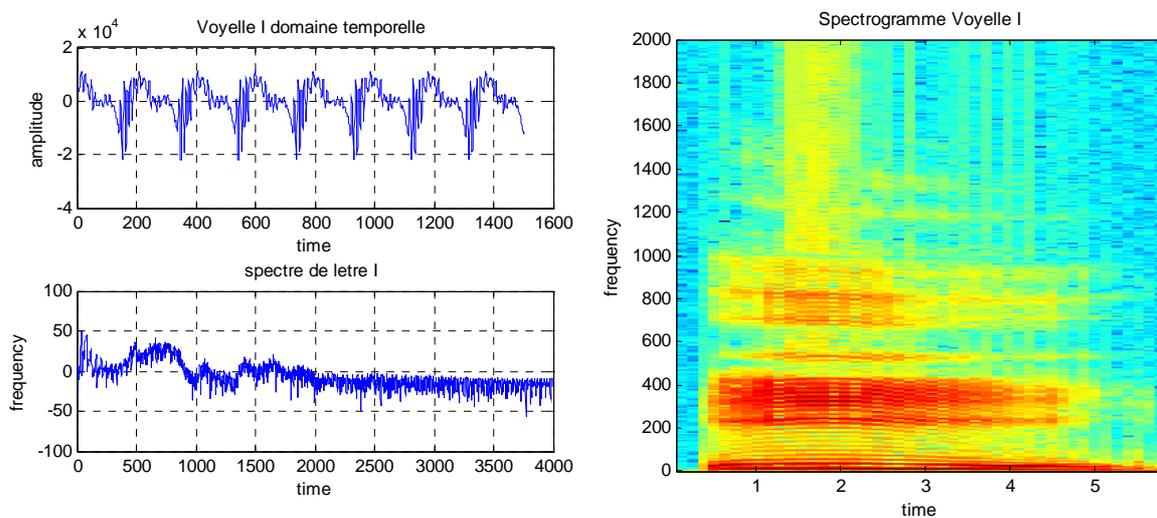


Fig.4.9 : le Voyelle I avec le spectre et le spectrogramme

Le tableau suivant présente les caractéristiques acoustiques de la lettre Voisée et non Voisée

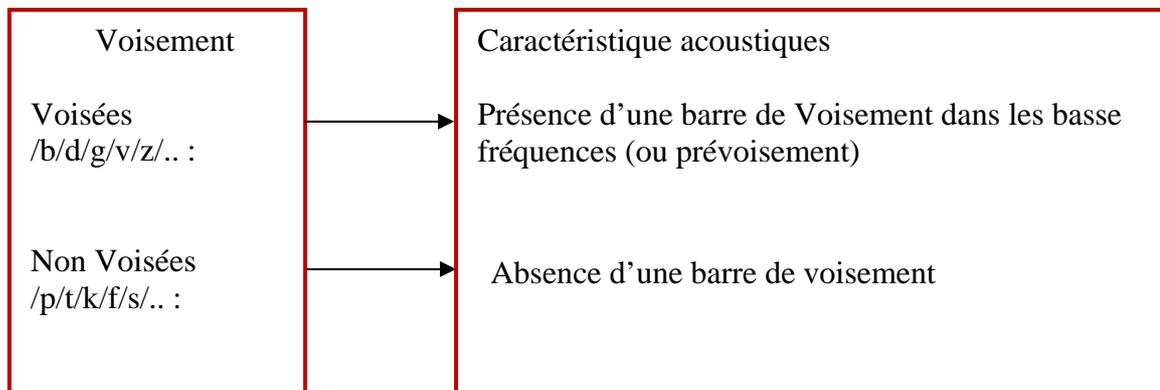


Tableau 4.3 : Caractéristiques acoustiques de la lettre V & NV

### 3. Simulation Avec Matlab

#### 3.1 Choix de l'Ondelette

Le choix de l'Ondelette analysante est un problème critique dans la théorie d'Ondelettes. Pour extraire des événements spécifiques dans un signal, le choix de l'Ondelette devient important pour que l'Ondelette soit adaptée à la forme de l'événement à détecter [20].

Dans les domaines d'application très différents. La décomposition en Ondelettes est utilisée à des fins de détection des transitoires. Elle a été utilisée dans les domaines de détection des contours des images (Mallat, 2000), la compression (Truchetet, 1998), et dans le traitement de parole, de plus elle a été utilisée pour le débruitage (Marque 1986) et comme outil de classification (Diab septembre 2004, décembre 2004, 2005).

Dans les applications biomédicales, Li (Li et al, 1995) a utilisé une Ondelette spline quadratique qui lui permet de distinguer facilement les caractéristiques du bruit et de la ligne de base dans le signal électrocardiographique ECG. C'est une ondelette à support compact et à phase linéaire, Shenhadji (1995) a utilisé une ondelette complexe pour la détection des ruptures dans l'ECG. [14, 18, 20]

La transformée en ondelettes (chapeau mexicain) est appliquée maintenant sur un signal de parole de type voisé,

### 3.2 Choix des échelles

Le choix de l'Ondelette permet de choisir les niveaux d'échelles les plus appropriés avant d'appliquer le paramétrage utilisant les échelles choisies. Sachant que l'augmentation des valeurs d'échelles donne une composante du signal correspondant à chaque niveau d'échelle afin de choisir les niveaux les plus convenables (Abry, 1997) (Krim et Pesquet, 1995) [19].

La décomposition en ondelettes est similaire à la décomposition de Gabor : un signal s'écrit sous la forme d'une superposition de telles ondelettes décalées et dilatées [18, 23].

Avec l'analyse par ondelettes, le signal est décomposé en fonctions élémentaires, engendrées par des transformations simples d'une fonction de base qui est translatée et dilatée. Les ondelettes sont très étendues pour étudier les basses fréquences (les grandes échelles), et très fines pour étudier des phénomènes plus transitoires (hauts fréquences, ou petites échelles). Cette procédure, développée par a, [30].

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour divers cas de simulation suivant l'ordre des ondelettes de Daubechies, appliquée sur la voyelle ' a '

V.éffi de Voyelle a		Baub.2	Baub.4	Baub.8	Baub.16	Baub.20
Appro N°=1	A1	7268.9	7269.8	7268.4	7265.6	7264.3
Décom N°=1	D1	209.2332	146.5979	144.4224	144.1895	137.3471
Appro N°=2	A2	5139.5	5139.6	5137.7	5133.7	5131.8
Décom N°=1	D2	147.9397	103.6432	102.0855	101.8817	97.0284
Appro N°=3	A3	5139.0	5138.1	5134.2	5126.3	5122.5
Décom N°=1	D3	0.2686	0.0442	0.0555	0.0760	0.0567
Appro N°=4	A4	5138.5	5136.7	5130.8	5119.0	5113.2
Décom N°=1	D4	0.0529	0.0104	0.0174	0.0269	0.0285
Appro N°=5	A5	5138.5	5135.2	5127.3	5111.7	5104.0
Décom N°=1	D5	0.0529	<b>0.0092</b>	0.0068	0.0208	0.0192

La figure suivante présentée le résultat de multi-résolution de voyelles « A », par l'Ondelettes de Haar,

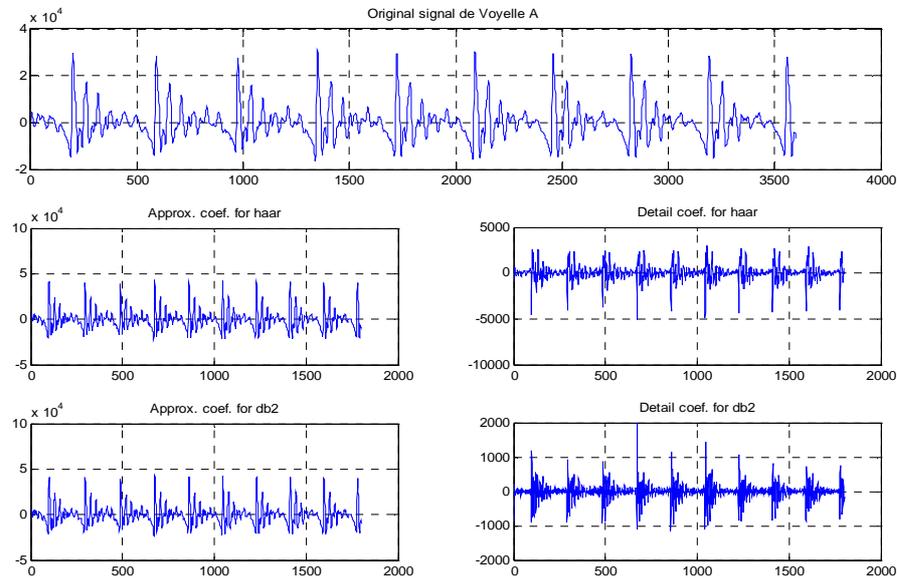


Fig.4.10 : Décomposition de Voyelle 'a' par Haar

La figure suivante présentée le résultat de multi-résolution de voyelles « E », par l'Ondelettes de Haar,

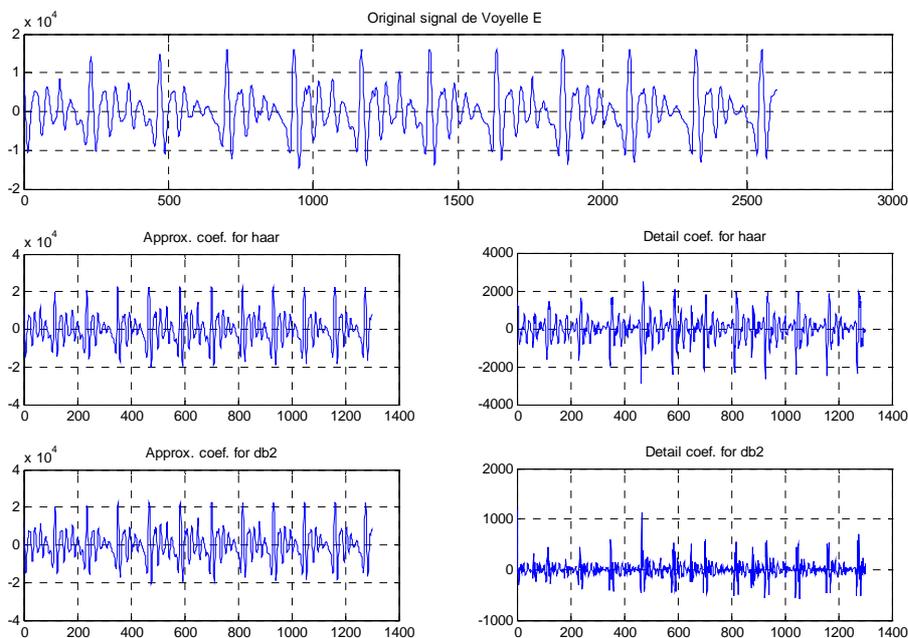


Fig.4.11 : Décomposition de Voyelle 'E' par Haar

## 4. CWT de Voyelles

### 4.1 CWT de Voyelles / A /

Maintenant nous avons appliquée la CWT sur le Voyelles " A, i, ", représenté sur la Figure suivante "Temps-échelles de Daubechies "

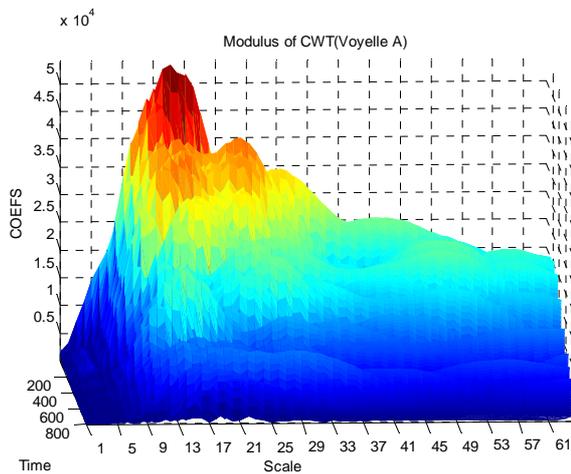


Fig.4.12.: CWT 'A' Coefficients des Ondelettes en Fonction de a et b.

### 4.2 CWT de Voyelles / I /

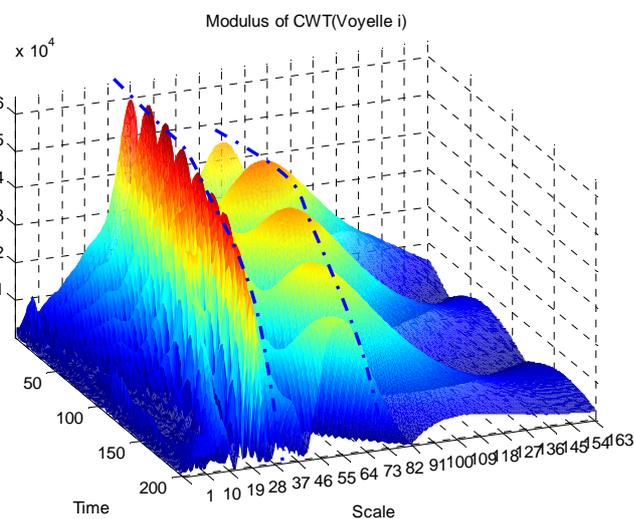


Fig.4.13. : CWT 'I' Coefficients des Ondelettes en Fonction de a et b.

À la Différence du STFT qui a une résolution constante à tous les instants du temps et à toutes les fréquences, la WT a une bonne résolution temporelle et une faible résolution fréquentielle aux hautes fréquences, et une bonne résolution fréquentielles et une faible résolution temporelle aux basses fréquences.

**4.3 CWT de Voyelles / A / avec différent locuteurs :**

La figure suivante montre la CWT, Daubechies db12, de voyelle /A/ avec différent locuteur

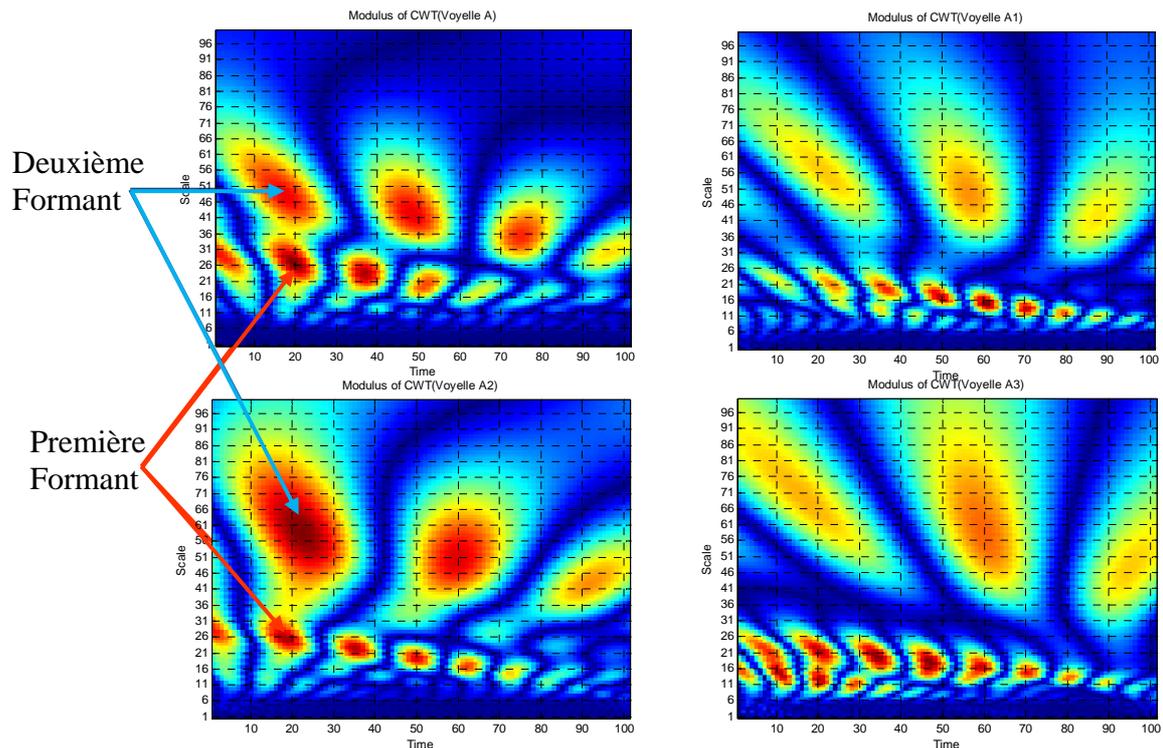


Fig.4.14 : CWT de voyelle /A/, avec différent locuteur par db12

Le Tableaux suivant montre que les formant de voyelle /A/ est le même dans tous les locuteurs, le couleur rouge correspondants la densité spectral Maximum et le couleur bleu correspondes la fréquence minimum

	<i>Locuteur 1</i>	<i>Locuteur 2</i>	<i>Locuteur 3</i>	<i>Locuteur 4</i>
	<i>/A/</i>	<i>/A1/</i>	<i>/A2/</i>	<i>/A3/</i>
<i>L'échelle de Première Formant</i>	<i>26</i>	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>24</i>
<i>L'échelle de Deuxième Formant</i>	<i>51</i>	<i>49</i>	<i>50</i>	<i>53</i>

Tableau 4.5 : Résultat de formant de voyelle a en fonction l'échelle

4.4 CWT de Voyelles / U / avec différent locuteurs :

La figure suivante montre la CWT, Daubechies db12, de voyelle /U/ avec différent locuteur

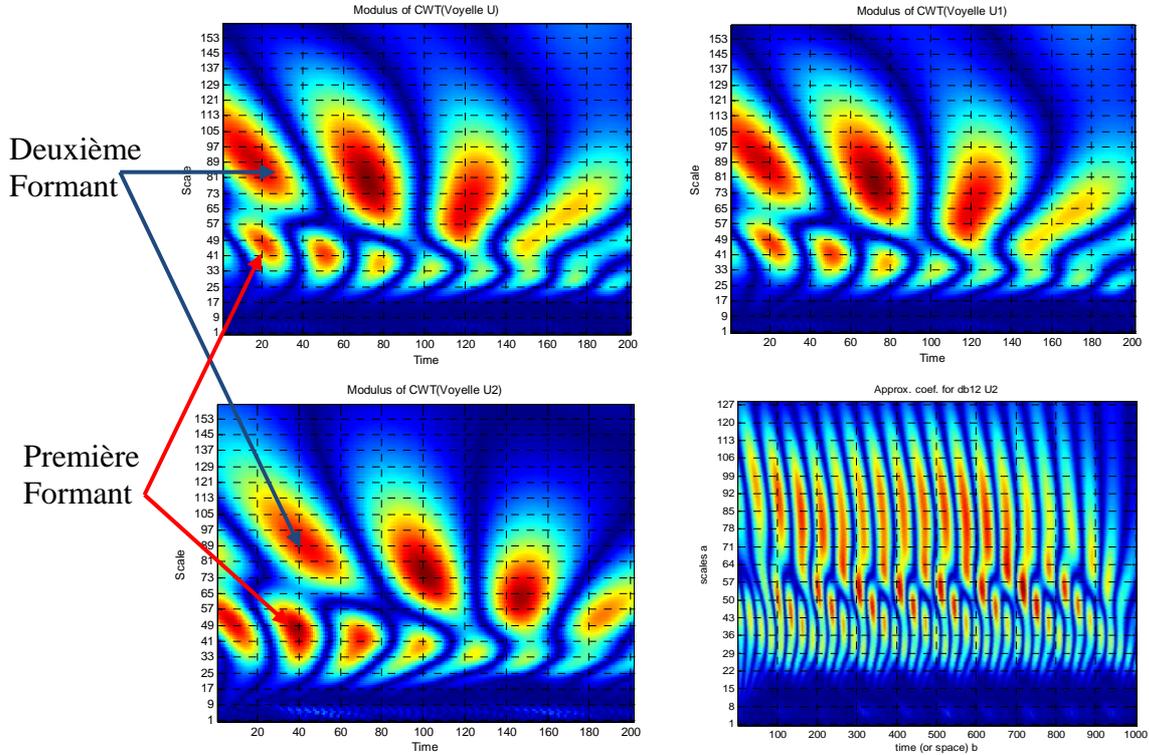


Fig.4.15 : CWT de voyelle /U/, avec différent locuteur par db12

Le Tableau suivant montre que les formant de voyelle /A/ est le même dans tous les locuteurs,

	<i>Locuteur 1</i>	<i>Locuteur 2</i>	<i>Locuteur 3</i>	<i>Locuteur 4</i>
	<i>/U/</i>	<i>/U1/</i>	<i>/U2/</i>	<i>/U3/</i>
<i>L'échelle de Première Formant</i>	<i>41</i>	<i>42</i>	<i>44</i>	<i>41</i>
<i>L'échelle de Deuxième Formant</i>	<i>89</i>	<i>82</i>	<i>80</i>	<i>85</i>

Tableau 4.6 : Résultat de formant de voyelle a en fonction l'échelle

## 5. CWT des mots isolé

### 5.1 CWT de Voyelle /A/, mot Baffe

Le système reconnaît-il des *mots isolés* ou de la parole continue ? Evidemment, il est plus simple de reconnaître des mots isolés bien séparés par des périodes de silence que de reconnaître la séquence de mots constituant une phrase. En effet, dans ce dernier cas, non seulement la frontière entre mots n'est plus connue mais, de plus, les mots deviennent fortement articulés (c'est-à-dire que la prononciation de chaque mot est affectée par le mot qui précède ainsi que par celui qui suit - un exemple simple et bien connu étant les liaisons du français).

La figure suivante présente la Tranche d'une zone de voyelle A du mot /baffe/ avec CWT de Daubechies

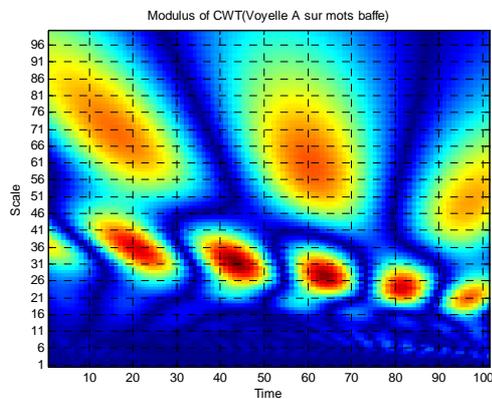


Fig.4.16 : CWT de Voyelle /A/, mot Baffe

En remarque que les formants présentés sur la même échelle, le Tableau suivant montre les comparaisons entre le Voyelle /A/ de mot Baffe et voyelle /A/ séparé :

	<i>Voyelle /A/ séparé</i>	<i>Voyelle /A/ Du mot baffe</i>
<i>L'échelle de Première Formant</i>	26	28
<i>L'échelle de Deuxième Formant</i>	51	56

Tableau 4.7 : Résultat de formant de voyelle /A/ du mot baffe

### 5.2 CWT de Voyelle / U / de mot / Une /

La figure suivante présente la Tranche d'une zone de voyelle /U/ du mot /Une/ avec CWT de Daubechies :

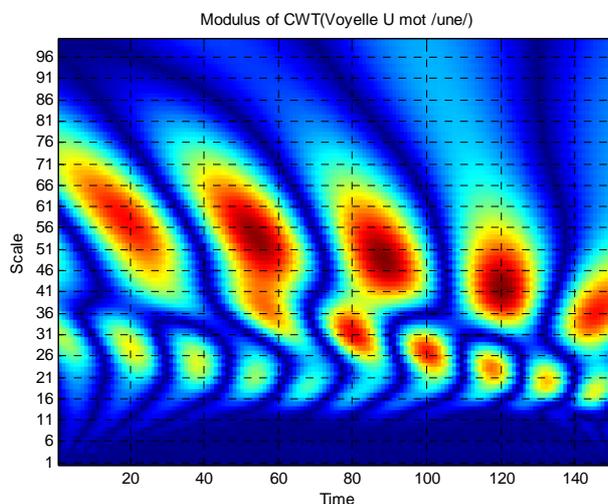


Fig.4.17 : CWT de voyelle /U/ du mot une

En remarque que les formants présentés sur la même échelle, le Tableau suivant montre les comparaisons entre le Voyelle /U/ de mot Baffe et voyelle /U/ séparé,

	<i>Voyelle /U/ séparé</i>	<i>Voyelle /U/ Du mot baffe</i>
<i>L'échelle de Première Formant</i>	42	39
<i>L'échelle de Deuxième Formant</i>	82	79

### 5.3 CWT de mot / Une /

La figure suivante présente le mot une avec CWT de Daubechies :

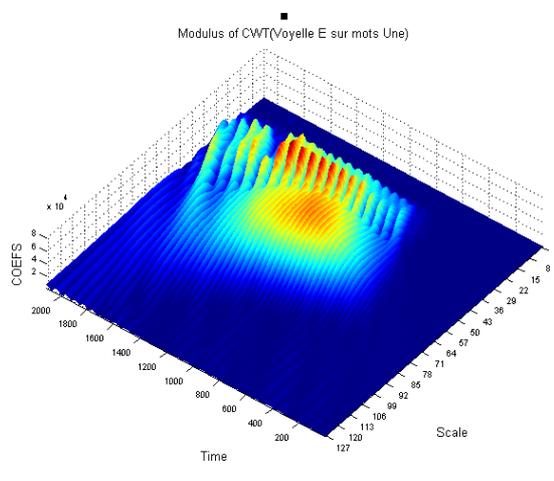


Fig.4.18 : CWT de mot une

### 5.4 CWT de mot / Oui /

La CWT de mot Oui présente comme suit :

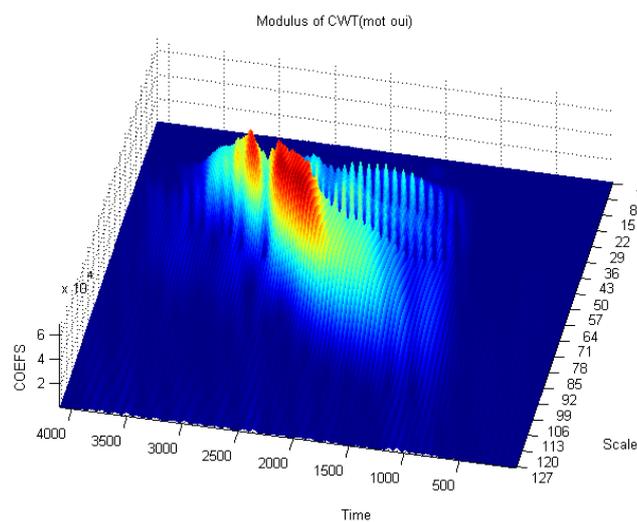


Fig.4.19 : CWT de mot / Oui /

La figure (4.20), présentée le classification des formant du voyelles en fonction l'échelles Correspondant avec 10 locuteurs

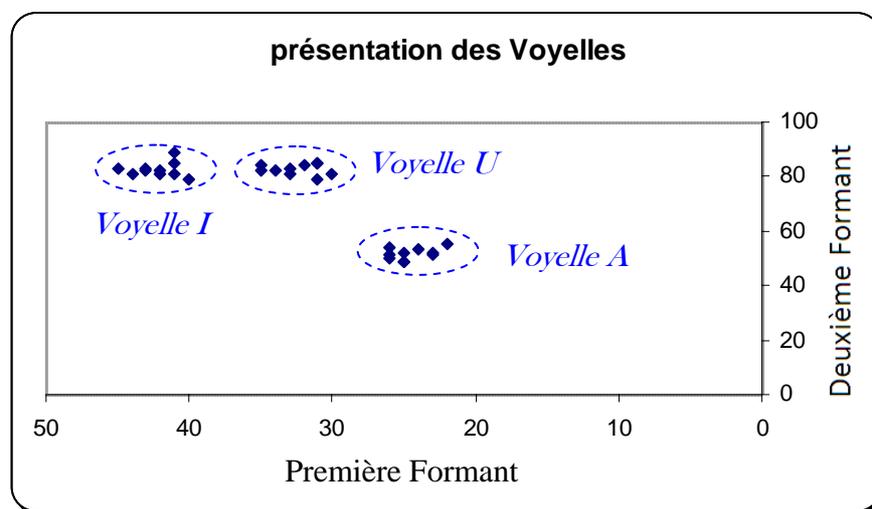


Fig.4.20 : Classification les Voyelles

## *Conclusion :*

*La décomposition en ondelettes est similaire à la décomposition de Gabor : un signal de parole s'écrit sous la forme d'une superposition de telles ondelettes décalées et dilatées.*

*Dans ce chapitre on applique la ondelette sur le signal de parole notamment la voyelle et les mos isolés, d'un autre côté, vu la nature du signal de parole, est décomposée avec plissure signal correspondant le niveaux d'approximation Multi-échelle,*

*Finalement on considère la CWT comme utile Mathématiques importantes pour le traitement les signaux non stationnaire comme la parole et ainsi présent le signal de forme tems-échelle pour classée chaque formant par les échelles correspondent*

# *Conclusion Générale*

---

## *Conclusion générale*

*L'acquisition analogique du signal de parole est la première chose à considérer pour faire une analyse spectrale des voyelles ou les mots isolés. Sans celle-ci, il serait impossible de décomposer ce signal de façon correcte et précise afin de l'étudier. Cette représentation n'est pas toujours la meilleure pour la plupart des applications de traitement du signal. Dans beaucoup de cas, l'information la plus pertinente est cachée dans la composante de fréquence du signal. Le SPECTRE de fréquence d'un signal est constitué par les composantes de fréquence de ce signal. Le spectre de fréquence d'un signal indique quelles sont les fréquences qui existent dans le signal.*

*Dans ce mémoire montre que les théories classiques de traitement de signaux non stationnaire illimité pour la détection de formant, Au cours de ce mémoire, nous avons considéré les nouveaux outils d'appliquée la Transformée en Ondelettes pour traitement du parole et détecté les différent Formant de voyelles,*

## *Bibliographie*

---

- [1]. **FREDDY MUDRY**, " Traitement des signaux quelques applications  
<http://www.yopdf.com/freddy-mudry-pdf.html#a3>
- [2]. **BENYOUCEF M**, " Reconnaissance Automatique de Parole pour la Commande Des Systèmes " thèse Magister université de Batna 1995
- [3]. **BUNIET Laurent**, " Traitement automatique de la parole en milieu bruité : Étude De modèles connexionnistes statiques et dynamiques " THÈSE Doctorat de l'Université Henri Poincaré - Nancy 1 1997
- [4]. **BOITE. R & KUNT. M**, " Complément au traité d'électricité, Traitement de la Parole"
- [5]. **LAPRIE Yves**, " analyse spectrale de la parole" PDF
- [6]. **Yves Meyer, Stéphane Jaffard et Olivier Rioul**, " L'analyse par Ondelettes " Pour la science. Septembre 1987
- [7]. **ROBI POLIKAR**, " Concepts Fondamentaux - vue d'ensemble de la théorie Des Ondelettes "
- [8]. **NADEGE THIRION-MOREAU** " Analyses temps-fréquence linéaire et Quadratique" Techniques de l'ingénieur, traité télécoms, TE 5 240
- [9]. **Demaeyer Jonathan, Bebronne Michael et Forthomme Sébastien**, " les Ondelettes " Université Libre de Bruxelles
- [10]. **ALAIN YGER**, " traitement du signal et Ondelettes Master ingénieur Mathématique" 18 octobre 2006
- [11]. **A. BOUZID et N.ELLOUZE<sup>2</sup>**, "Caractérisation des singularités du signal de Parole", **ISET** de Sfax, Rte Mahdia Km 2.5, BP 88A, 3099 Elbustan Sfax, Tunisie, <sup>2</sup>ENIT, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP. 37, Le Belvédère 1002 Tunis, Tunisie
- [12]. **YOUSSEF BENTALEB**. " Analyse par Ondelettes des Signaux Sismiques : Applications Aux ondes de surface ". Thèse de Doctorats Université *Mohamed V AGDAL Rabat*
- [13]. **Tarik AL ANI**. " Introduction aux ondelettes, Deuxième partie : Quelques concepts Généraux de la théorie des ondelettes. " Département Informatique ESIEE-Paris
- [14]. **AMRANE ANIS ABDE EL AZIZ**, " Détection de l'onde P de L'électrocardiogramme Par des algorithmes basés sur la transformée en Ondelette et modèle Markov caché " Thèse magistère en électronique Université de Skikda
- [15]. **Redha BENZID**, " Ondelettes et statistiques d'Ordre supérieur aux signaux uni Et Bidimensionnels " thèse de doctorat science en électronique Université de Batna, 2005

- [16]. *Jérôme AUBIN*, "Phonétique instrumentale", **LIN-3021 "PDF"**
- [17]. *Jean-Yves ANTOINE*, " Outils informatiques d'analyse de corpus " LI - Université Rabelais de Tours.
- [18]. *Y. LAKSARI, H. AUBERT et J.Y. TOURNERET* " Analyse en Ondelettes de la Réponse Impulsionnelle Bruitée de Structures Multicouches Fractales " Laboratoire D'Electronique, 31071 Toulouse, France
- [19]. *Alain MAGUER \* - Pierre ALINAT \* - Georges GOULLET* " Etude de bruits Impulsifs Par analyse par banc de filtres a Q constant " Douzième Colloque Grets - Juan-les-Pins 12 Au 16 Juin 1989,
- [20]. *M.O.Diab, C.Marque, M.Khalil*, " Une Approche de Classification des Contractions utérines basée sur la théorie des Ondelettes et la statistique
- [21]. *Amina CHENTIR \* . Madjid AREZKI\* . Adbrezzak GUESSOUM\* .* " Codage en Sous Bande par Ondelettes Orthogonales Application à la Parole. " Communication International - IEEE 2005.
- [22]. *Béatrice PESQUET- POPESCU* " Ondelettes et applications " Techniques de L'Ingénieur, TE 5 215.
- [23]. *Aicha BOUZID & Noureddine ELLOUZE* " production Multiéchelle pour la Détection Des Instants d'ouverture et de Fermeture de la Glotte Sur le Signal de Parole, Laboratoire Signal, Image et reconnaissance de formes (LSTS-ENIT), Tunis,
- [24]. *Doriano-Boris POUGAZA* "Compression Sans Perte Par Ondelettes "Mars 2008, PDF
- [25]. **Béatrice PESQUET-POPESCU et Jean-Christophe PESQUET**  
" Ondelettes et applications " Techniques de l'ingénieur, traité télécoms, **TE 5 215**
- [26]. **Yves Meyer** " Ondelettes, Filtres Miroirs en Quadrature et Traitement Numérique " Exposé n° 2 .PDF
- [27]. *Talbi MOURAD, Cherif ADNEN* " Débruitage de la parole par paquet D'ondelettes " Conférence International IEEE. SETIT 2007 TUNISIA.
- [28]. *JAFFARD Stéphane* " Décompositions en ondelettes " PDF
- [29]. *Laurence CNOCKAERT, Jean SCHOENTEN et Francis GRENEZ* " Estimation de la Fréquence des formants basée sur une transformée en ondelettes complexes " Université Libre de Bruxelles "
- [30]. *A. BOUZID et N.ELLOUZE.* " Produit Multiéchelle pour la détection des instants D'ouverture et de fermeture de la glotte sur le signal de parole " (LSTS-ENIT) TUNISIA.