

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.**  
**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**  
**HOUARI BOUMEDIENE (U.S.T.H.B) - ALGER.**



**FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE.**

## **THESE**

**Présentée pour l'obtention du grade de Magister**  
**EN ELECTRONIQUE.**

**SPECIALITE : ELECTRONIQUE DES SYSTEMES.**

**par :**

**TAFININE FARID.**

### **THEME :**

**Caractérisation de matériaux par analyse des signaux**  
**Ultrasonores.**

Soutenue publiquement le : 09 / 06 / 2002.

Devant le jury composé de :

Mme.A.BELHADJ-AISSA	Maître de conférences (USTHB)	Présidente.
M. A.HOUACINE	Maître de conférences (USTHB)	Directeur de thèse.
M.D.BERKANI	Professeur (ENP)	Examineur.
M.Y.CHIBANI	Docteur d'état (USTHB)	Examineur.
M.R.DRAI	Chargé de recherche (CSC Chéraga)	Examineur.



**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
HOUARI BOUMEDIENE (U.S.T.H.B).**

**FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE.**

**Thèse de Magister en Electronique.  
Option: Electronique des systèmes.**

***Présentée par :***

**TAFININE FARID.**

***Thème :***

**CARACTERISATION DE MATERIAUX  
PAR ANALYSE DES SIGNAUX  
ULTRASONORES.**

***Soutenue le 09 juin 2002.***

*« Il faut qu'il y ait, dans les choses représentées le murmure insistant de la ressemblance ; il faut qu'il y ait dans la représentation, le repli toujours possible de l'imagination. »*

*M.F*

*« Je cherche en même temps l'éternel et l'éphémère. »*

*G.P*



## *Dédicaces*



*Je dédie ce travail :*

- ❖ *À ma grand-mère qui m'a encouragé, et qui m'a toujours souhaité la réussite dans mes études 🌹.*
- ❖ *À mes parents qui, de leur compréhension et encouragement, ont pu me porter au bout de mon travail 🌹.*
- ❖ *À mes frères et sœurs 🌹.*
- ❖ *À tous mes cousins et cousines 🌹.*
- ❖ *À tous mes amis qui ont su me soutenir 🌹.*



# Remerciements

Je profite de cette opportunité pour remercier en premier lieu **Dieu**, le Tout Puissant, de m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

De l'autre coté ce travail ne pouvait aboutir sans l'aide et l'encouragement que j'ai reçu, de la part de plusieurs personnes. J'exprime ma gratitude à Monsieur Amrane Houacine, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire de : « Traitement de signal » et de m'avoir proposé un sujet de recherche exaltant. Je le remercie sincèrement pour le soutien et la confiance qu'il m'a accordé, les nombreuses discussions que nous avons eues ensemble m'ont beaucoup éclairé la voie de recherche ; je lui exprime ma vive gratitude pour ses précieux conseils et pour m'avoir formé pour la recherche.

J'exprime mes vifs remerciements à Madame A.Belhadj-Aissa, Maître de conférences à la Faculté d'Electronique et d'Informatique de l'USTHB, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury, pour tout l'intérêt qu'elle porte à mon travail.

Je prie, Monsieur D.Berkani, Professeur à l'ENP, de croire à ma reconnaissance et le remercie pour avoir accepté de participer au jury.

J'adresse mes remerciements également à Monsieur Y.Chibani, Docteur d'état et prochainement Maître de conférences à la Faculté d'Electronique et d'Informatique de l'USTHB, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de le juger.

Je ne remercierai jamais assez Monsieur R.Drai, Chargé de recherche au CSC (Chéraga) pour avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa précieuse collaboration.

Je remercie enfin, tous les membres et collègues du laboratoire de Communication Parlée et de Traitement de Signal (LCPTS), pour leurs encouragements et leur sympathie, Mme Meksen, pour ses conseils et sa collaboration dans la compréhension de la problématique posée, ainsi que dans le côté pratique du sujet, Mr Mekaoui, pour les nombreuses explications fructueuses aux questions que je lui ai posées le long de ce travail, ainsi que pour sa documentation qui a été mise à ma disposition, ainsi que tous les éléments du CSC de Chéraga, à leur tête, Mr R.Drai chef de laboratoire LTSI du CSC, ainsi qu'à Mr M.Khelil.

Que tous ceux qui ne trouvent pas leurs noms, cités dans ce bref passage, et méritent le remerciement, m'en excusent et trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

---

---

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE.**

**Faculté d'électronique et d'informatique.**

**Résumé de Thèse de Magister.**

**Spécialité : Electronique.**

**Option : Electronique des systèmes.**

**Thème :**

**Caractérisation de matériaux par analyse des signaux ultrasonores.**

**Soutenue par : M. TAFININE FARID.**

**Directeur de thèse : M. HOUACINE AMRANE, Maître de conférences à la Faculté d'Electronique et d'Informatique de l'USTHB.**

***Résume :***

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) sont assez nombreuses, elles résultent de la mise en œuvre des principes et techniques physiques, à ce titre, on peut citer la méthode de contrôle visuel, la magnétoscopie, le ressuage, la radiographie et les ultrasons qui font l'objet de notre étude.

Les signaux ultrasonores sont largement utilisés en contrôle non destructif, pour la caractérisation de matériaux, et en particulier pour la mise en évidence de défauts et le contrôle de qualité. Nous nous intéressons dans ce travail à résoudre certains problèmes posés dans le CND, le premier est la détection des petits défauts noyés dans du bruit, en utilisant les outils de traitement du signal, selon trois approches : analyse fréquentielle, analyse temps-fréquence et analyse temps-échelle. Après détection, on peut être amené, à les identifier (volumique ou plan), pour en déduire leur degré de nocivité. Cette procédure constitue une contribution à la résolution de problèmes industriels très importants, tels que la détection et la caractérisation de défaut dans les soudures. L'autre application des outils du traitement du signal, est la mesure des fines épaisseurs, cette application présente une réponse à certains problèmes posés dans le CND par ultrasons à savoir la résolution.

Les résultats obtenus, ont donné entière satisfaction, au vu de l'avis des experts en CND. Les expérimentations, que nous avons menées sur plusieurs échantillons de défauts, ont démontrés l'efficacité du logiciel conçu concernant la détection et la caractérisation des défauts, ces résultats reflètent l'intérêt des approches adoptées.

Au vue de cette étude, un certain nombre de conclusions et de remarques sont extraites.

## I- Introduction :

Le Contrôle Non Destructif (CND) joue un rôle important dans différents domaines, il permet de contrôler des matériaux ou des structures afin d'en vérifier l'état, ainsi que de détecter des défauts sans endommager les pièces inspectées [1]. De nombreux domaines industriels ont recours à ce type de contrôle, parmi lesquels on peut citer [2] : l'industrie des canalisations et du stockage notamment dans les secteurs du pétrole et de gaz, le nucléaire, l'automobile, le chemin de fer, l'aéronautique, l'aérospatial, ...

Les méthodes de contrôle non destructif sont assez nombreuses, elles résultent de la mise en œuvre des principes et techniques physiques ; le choix d'une méthode de contrôle est guidé par la nécessité de reconnaître les défauts réputés dangereux que l'objet peut contenir [1], [3]. Après une étude bibliographique, nous avons pu avoir une idée globale sur les techniques de contrôle non destructif et de l'importance qu'elle revêt dans le domaine industriel, ce qui nous a permis une meilleure compréhension du problème. A ce titre, on peut citer la méthode de contrôle visuel la plus simple, la magnétoscopie, la radiographie et les ultrasons qui font l'objet de notre étude.

Les effets ultrasonores sont connus depuis 1812, cependant leur utilisation n'a été généralisée qu'à partir de 1945 où les ultrasons ont été utilisés pour la détection des sous-marins, depuis elle n'a cessé d'évoluer et d'occuper plusieurs domaines tels que la biologie, la médecine et l'industrie. Avec l'évolution de l'électronique dans les années 1970, les ultrasons ont connu le sommet de leur évolution [4], [5].

Le travail qui nous a été demandé, en plus de l'aspect théorique de l'étude, est de faire des applications sur les signaux ultrasonores afin de cerner les différents aspects du problème industriel posé. Nous avons jugé utile de donner quelques définitions, de présenter sommairement les techniques classiques et de montrer l'utilité de l'approche par outil informatique. Toutefois, l'exploitation des techniques de traitement du signal offre un moyen de décortiquer les informations données par les échos ultrasonores afin de détecter des irrégularités et d'effectuer une caractérisation des pièces. Dans ce travail, nous présentons un état de l'art des techniques de traitement du signal par les différentes approches, à savoir : l'analyse fréquentielle, temps-fréquence et temps-échelle selon la documentation disponible.

L'écho ultrasonore est de nature non-stationnaire, ceci est dû au milieu de propagation non uniforme et qui contient des discontinuités et qui provoque la variation de la fréquence de l'onde reçue par rapport à l'onde émise [6]. Sachant que l'information utile est contenue dans cette même non-stationnarité et comme la transformée de Fourier suppose la stationnarité du signal analysé, ajouter à cela le fait que cette transformation ne permet aucune localisation des fréquences dans le temps, nous a conduit à chercher une solution partielle à ce problème fût l'introduction de la transformée de Fourier à court terme (TFCT), qui permet une analyse spectrale à court terme sur une fenêtre de taille fixe telle que la condition de stationnarité est supposée satisfaite, mais le choix de la taille de la fenêtre pour toutes les fréquences fixe la résolution spectrale. Pour affranchir à la condition de stationnarité imposée à la TFCT on a recours à la transformée de Wigner-Ville (TWV), qui permet de décrire l'évolution du spectre dans le temps donc permet d'accéder à une représentation dite Temps-Fréquence de signal, mais la TWV étant une loi quadratique, elle présente des interactions qui faussent sa représentation, différentes solutions furent proposées pour réduire ces termes d'interactions en introduisant un lissage en temps et/ou en fréquence telles la Pseudo Wigner-Ville (PWV) et la Pseudo Wigner-Ville Lissée (PWVL), Choi-Williams, Zhao-Atlas-Marks. Ce qui conduit à l'amélioration de l'image Temps-Fréquence [7].

Une autre alternative à la TFCT est la décomposition en Ondelettes, cette dernière s'appuie sur une décomposition de signal sur une famille d'ondelettes et non plus sur une famille d'exponentiels comme la transformée de Fourier, l'extension de cette méthode nous a conduit à l'analyse en multirésolution qui permet d'observer un signal à plusieurs échelles d'analyses donc à la fois finement en temps et en fréquence à des échelles différentes [8].

Notre travail apporte, nous l'espérons, une solution qui répond à ce cahier de charge. Pour ce faire, nous avons utilisé Matlab, qui par ses multiples possibilités (Toolbox et interface graphique), offre un outil idéal pour la réalisation de ce travail.

## **II- Le contrôle non destructif (CND) :**

### **II-1- Principe :**

Le Contrôle Non Destructif (CND), comme son nom l'indique, a l'avantage de pouvoir porter sur la structure interne d'une pièce mécanique ou d'assemblage sans l'abîmer, contrairement au contrôle destructif par essais mécaniques. Il peut se faire même après l'utilisation de la pièce. Il consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant d'apprécier sans destruction l'état des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées ; il s'avère un outil très efficace pour la maintenance industrielle des installations [1].

Il existe plusieurs méthodes utilisées en CND, les principales sont :

- Les ultrasons.
- Les rayons X et autres rayonnements.
- Les courants de Foucault.

Il existe également d'autres comme : la thermographie, la magnétoscopie, le ressuage, ... , elles sont toutes de nature différente et chacune a son domaine d'application.

### **II-2 - La technique ultrasonore :**

Le contrôle non destructif par ultrasons consiste à envoyer dans l'échantillon une onde ultrasonore, créée par un palpeur qui peut jouer le rôle d'émetteur et de récepteur en même temps, puis on mesure l'écho réfléchi par les défauts des pièces contrôlées. Les défauts sont décelés comme des interfaces qui renvoient une partie du faisceau vers le palpeur [3].

La méthode apporte souvent plus d'informations que les autres. Elle est très efficace, son énorme avantage est que les ultrasons ne sont pas de tout dangereux pour l'homme, (d'où l'application de cette méthode aussi dans le domaine médical ) [1].

Son inconvénient est que parfois elle apporte trop d'informations et qu'il y a souvent une notion de bruit à prendre en compte.

### **II-3 - Contrôle des soudures :**

L'opération de soudage peut concerner des ouvrages industriels pouvant provoquer un danger public, exemple : des chaudières, des réservoirs de stockage de gaz ou de matière chimique, des conduites de gaz ou de pétrole, les lignes de chemin de fer... ; le contrôle de la qualité du joint soudé est indispensable, et l'assurance de fiabilité du joint ainsi que la prédiction de la durée de vie de l'ouvrage sont d'une importance capitale.

Les défauts apparaissent comme dispersion anormale des grains, ils peuvent se présenter isolés ou en chapelets ; donc lors d'un procédé de soudage, différents types de défauts peuvent apparaître. On distingue deux familles de défauts [9] :

- Défauts linéaires se présentent comme une juxtaposition linéaire de grains.
- Défauts volumiques se présentent comme un amas important de grains, sans direction privilégiée.

## **III- Les ultrasons :**

### **III-1- Généralités :**

Le terme " ultrason", par analogie aux micro-ondes (électromagnétisme), est utilisé pour définir une vibration mécanique, dont la propagation n'est possible que dans un milieu matériel fluide ou solide [10]. Depuis de nombreuses années, les ondes ultrasonores de faibles

amplitudes et de fréquences appartenant au domaine du Méga-Hertz sont largement utilisées dans l'industrie et en médecine. Le développement des diverses applications faisant appel aux ultrasons se confirme de plus en plus.

Le rayonnement ultrasonore est d'un usage très répandu, car ses propriétés sont très intéressantes : son amortissement dans les métaux est généralement faible ce qui implique une bonne pénétration, sa longueur d'onde est liée au pouvoir séparateur de la détection qu'est de l'ordre de grandeur des hétérogénéités à découvrir.

### III-2- Le signal ultrasonore :

On appelle ultrasons les vibrations mécaniques de même nature que le son, mais de fréquence très élevée (20 Khz à plusieurs centaines de Mhz) pour qu'une oreille humaine ne puisse la percevoir. Les ultrasons peuvent se propager dans les gaz, les liquides ou les solides, c'est-à-dire dans toute substance possédant des propriétés élastiques. Pour cela, la physique des ondes élastiques de fréquences supérieures à 20 Khz est appelée : science des ultrasons [11]. La propagation des ultrasons est rectiligne, les discontinuités brusques sur le trajet de l'onde ne sont pratiquement pas contournées. Toute frontière ou écran s'il est bien orienté, empêche l'onde de passer et la renvoie partiellement vers sa source.

Notons que les fréquences utilisées en CND par ultrasons conduit à des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, ceci constitue un avantage, car la longueur d'onde est suffisamment petite devant les dimensions de la source et lui confère un comportement voisin de celui de la lumière en optique géométrique [10]. Dès lors, on pourra observer les phénomènes de propagation rectiligne, de réflexion et de réfraction. De plus, la longueur d'onde est compatible avec les dimensions des défauts que l'on recherche et reste toutefois plus grand que les dimensions du grain.

### III-3- Production des ultrasons :

On ne peut parler d'ultrasons et de leur propagation sans évoquer les dispositifs leur donnant naissance : "les transducteurs" ou " les palpeurs". Ces derniers sont des dispositifs destinés à convertir l'énergie électrique, qu'on lui envoie, en énergie acoustique et inversement, l'énergie mécanique qui lui parvient de la pièce en énergie électrique ; donc c'est un convertisseur d'énergie [12].

On peut citer certains types de transducteurs :

- Transducteurs électromagnétiques.
- Transducteurs électroacoustiques.
- Transducteurs piézo-électriques.

Seuls les capteurs piézo-électriques couvrent tout le spectre ultrasonore ; actuellement, avec les semi-conducteurs piézo-électriques déposés sous forme de couche mince dans des cavités électromagnétiques, il est possible de produire des oscillations de l'ordre de Ghz [13].

### IV- Choix de la technique de contrôle :

Pour le contrôle non destructif des matériaux par ultrasons, on peut citer deux principales méthodes d'examen : la méthode par **transmission** et la méthode par **écho** [1], [14]. La dernière méthode citée a été retenue pour les avantages qu'elle présente tels que :

- Localisation précise des défauts.
- Possibilité de n'utiliser qu'un seul traducteur en émission-réception.
- L'accès, à une seule surface du matériau, est suffisant pour effectuer le contrôle.

### V- Les différentes techniques de mise en œuvre :

Pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit de *couplage*, qui consiste à diminuer le phénomène de rupture d'impédance acoustique et pour garder la proportion d'énergie transmise sensiblement

constante lorsque le transducteur se déplace. Deux techniques existent pour assurer ce couplage : le contrôle par contact et le contrôle par immersion [1], [14].

### **V-1- Contrôle par contact :**

Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler, la liaison acoustique est assurée par un film d'agent de couplage qui est généralement soit une graisse ou une huile. Cette technique est surtout employée lors de contrôles manuels, c'est-à-dire lorsque le déplacement du traducteur est assuré par un opérateur.

Cette méthode est très simple pour la mise en œuvre, puisqu'elle ne nécessite qu'un traducteur et un appareil de contrôle. Mais elle présente deux inconvénients : premièrement elle nécessite l'intervention d'un opérateur pour le déplacement du traducteur ; deuxièmement la constante du couplage n'est pas bonne.

### **V-2- Contrôle en immersion :**

Cette méthode se développe pour pallier aux deux inconvénients de la méthode de contrôle par contact. Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Cette technique est d'une mise en œuvre délicate lorsque les pièces sont lourdes et encombrantes. Mais elle se prête facilement à l'automatisation.

L'utilisation de cuves dans lesquelles les pièces sont immergées permet de résoudre de nombreux problèmes : le couplage étant bien assuré par l'eau, les palpeurs ne sont plus situés au contact de la pièce mais sont fixés à l'extrémité d'un bras manipulateur permettant, des rotations suivant plusieurs axes et sa translation verticale.

## **VI- Description des méthodes de traitement des échos ultrasonores :**

### **VI-1- Introduction :**

L'analyse du signal porte sur un vaste ensemble de phénomènes et sur des réalités physiques diverses. Les signaux réels présentent, en général, de nombreuses caractéristiques non-stationnaires qui constituent une part importante de l'information contenue dans la série : rupture, tendance, phénomène transitoire, ...

La plupart des approches mathématiques utilisées, entre autres, la transformée de Fourier, sont adéquates pour l'étude des processus stationnaires. De nouvelles méthodes mises au point ces dernières années, permettent d'analyser des signaux non-stationnaires. Parmi ces méthodes, nous citons la transformée de **Wigner-Ville** et la transformée en **Ondelettes**.

### **VI-2- Représentation fréquentielle :**

L'information essentielle contenue dans un signal est présentée dans son spectre fréquentiel, dès lors on a cherché à développer des outils à même d'offrir cette représentation. En 1819 **Joseph Fourier** proposa sa transformée ; appliquée à un signal temporel, permettait d'avoir son spectre fréquentiel (une décomposition en sinusoides de fréquences différentes).

Une description fréquentielle des signaux est souvent un complément essentiel à une description temporelle. Cependant une représentation temporelle ou fréquentielle d'un signal offre une description limitée [15]. Ainsi, certaines informations (fréquence instantanée et retard de groupe) ne sont pas accessibles directement à partir de ces représentations. De même de nombreuses contributions ont montré que les deux méthodes sont complémentaires mais insuffisantes prises séparément.

Le souci de dépasser ces limites et de pouvoir traduire la réalité physique des signaux naturels a conduit les chercheurs à développer d'autres méthodes d'analyse conjointes en temps et en fréquence.

Pour traduire la réalité physique des signaux naturels (parole, E.C.G, E.E.G, ...), dont les caractéristiques fréquentielles sont variables au cours du temps, les chercheurs ont d'abord

essayé de modifier la TF pour l'adapter à l'analyse de signaux non-stationnaires. Ainsi, le signal est découpé en segments, pouvant se recouvrir partiellement, au moyen d'une fenêtre de pondération glissante sur les données. On évalue en suite la TF de chaque tranche du signal, ce qui permet de suivre les variations du spectre du signal sur chaque intervalle d'analyse. L'hypothèse, à priori, est que le spectre du signal évolue lentement pendant la durée de la fenêtre. On parle alors de la transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou d'une manière équivalente du module carré de la TFCT appelé : *spectrogramme* [32].

### VI-3- Transformée de Fourier à court terme :

Jusqu'en 1932 la transformée de Fourier à court terme (TFCT) constitua l'essentiel des outils d'analyse des signaux, et elle permet d'avoir une représentation conjointe en temps et en fréquence, cette dernière mettrait en évidence les caractéristiques évolutives du signal en décrivant l'évolution temporelle de son spectre [17].

Bien qu'elle connut un grand succès en traitement de la parole, cette méthode est néanmoins conditionnée par l'inévitable compromis entre les résolutions temporelles et fréquentielles [18]. Une bonne résolution fréquentielle exige une grande durée d'observation, cependant, un tel intervalle réalise un moyennage sur le contenu spectral du signal, et perd par conséquent toute information sur son caractère instantané. Inversement, une fenêtre d'observation courte, réalise une bonne résolution temporelle, bien que la résolution fréquentielle soit dégradée [19], [21].

De même, comme la TFCT suppose la stationnarité du signal sur la fenêtre d'analyse, la nature de ce signal nous impose la taille de la fenêtre à utiliser, ce qui fixe aussi la résolution spectrale du fait qu'une seule fenêtre est utilisée pour toutes les fréquences, la résolution de l'analyse est la même en tout lieu de l'espace. Cet inconvénient trouve toute sa signification quand il s'agit de séparer deux fréquences voisines.

### VI-4- Spectrogramme : [21]

C'est le module carré de la transformée de Fourier à court terme.

Sa définition à temps continu est donnée par :

$$\rho_x(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t + \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right|^2 \quad (1)$$

Et sa définition à temps discret est donnée par :

$$\rho_x(n, f) = \left| \sum_{k=-N+1}^{N-1} h[k] x[n + k] e^{-i2\pi f k} \right|^2 \quad (2)$$

Avec N : taille de la fenêtre d'analyse.

### VI-5- Représentation temps-fréquence :

L'idée d'une description de signaux par la distribution de leur énergie dans le plan temps-fréquence, est déjà très ancienne. L'objectif d'une représentation temps-fréquence est de mettre en évidence les caractéristiques évolutives d'un signal en décrivant l'évolution temporelle de son contenu spectral, une telle analyse présentera donc son intérêt dès qu'il s'agit de considérer un signal non-stationnaire. Les représentations temps-fréquence peuvent se diviser en deux grandes classes [20], [22] :

- Représentation temps-fréquence linéaires.
- Représentation temps-fréquence bilinéaires.

Historiquement, les chercheurs ont rencontré beaucoup de difficultés à donner à ce concept "temps-fréquence" une formulation unique. En 1966 **L.Cohen** [22] proposa une formulation générale à partir de laquelle toutes les R.C.T.F bilinéaires peuvent être obtenues

par le choix d'une fonction de pondération. L'expression de cette classe des représentations temps-fréquence bilinéaire est donnée par :

$$C_x(t, w, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \phi(\xi, \tau) \exp[j(\xi t - \tau w - \xi u)] du d\tau d\xi \quad (3)$$

Avec  $x(u)$  le signal temporel analysé,  $x^*(u)$  son complexe conjugué ;

$\phi(\xi, \tau)$ : fonction arbitraire de pondération ou noyau représentatif d'une RCTF.

### VI-5-1- La transformée de Wigner-Ville :

La distribution de **Wigner-Ville (DWV)**, pour laquelle le noyau  $\phi(\xi, \tau) = 1$ , est le prototype de toutes les RCTF de la classe de **Cohen**. Originellement, elle fut proposée par : **E.P.Wigner** en 1932 en mécanique quantique [23].

En 1948, **J.Ville**, développa la notion de signal analytique et par suite, étendit le champ des applications de la distribution de **Wigner** vers l'analyse des signaux [24]. Depuis, on parle de la distribution de **Wigner-Ville** pour faire référence à la distribution de **Wigner** utilisant le signal analytique associé au signal réel.

C'est une méthode d'analyse qui permet de représenter l'énergie du signal simultanément en temps et en fréquence et qui possède des avantages significatifs sur d'autres méthodes voisines d'analyse temps-fréquence (cf. spectrogramme).

#### VI-5-1-1- Définition :

La transformée de Wigner-Ville, associée à un signal temporel représenté par la fonction  $x(t)$ , la fonction des deux variables  $t$  et  $f$ ,  $W_x(t, f)$  [17],[22],[25], définie par :

$$w_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (4)$$

#### VI-5-1-2- Termes d'interférences :

La TWV est une représentation temps-fréquence dont les propriétés semblent en faire un outil excellent pour une analyse dans le plan temps-fréquence. Cependant, malgré sa compatibilité avec les opérateurs classiques du traitement du signal, elle présente l'inconvénient de n'être pas un opérateur linéaire. C'est-à-dire que la TWV n'est pas compatible avec la somme des deux signaux  $x_1$  et  $x_2$ , monocomposants, qui est égale à la somme de leurs TWV respectives, plus une contribution liée à l'interaction entre les deux signaux. Le produit de cette interaction est appelé termes d'interférence [17].

### VI-5-2- Différentes versions de la DWV et méthodes de lissages :

#### VI-5-2-1- DWV simple :

On appelle DWV simple, la transformée telle qu'elle a été définie par la relation (4), c'est-à-dire qu'on applique directement la formule sur le signal à traiter sans lui subir un traitement préalable. Cette version présente l'avantage d'une simplicité de mise en œuvre et de préserver les propriétés originales de la DWV, et de la réversibilité qui est immédiate. Cependant, pour les signaux multicomposantes, l'apparition de termes d'interférences inhérentes à la méthode, rendent l'interprétation des résultats difficile [17], [20].

#### VI-5-2-2- La Pseudo Wigner-Ville :

On applique la relation (4) sur une tranche du signal  $x(t)$  découpée par une fenêtre d'observation  $h(t)$  [17], [19], [20] :

##### • Définition en temps continu :

$$PWV(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u - t) x\left(u + \frac{t}{2}\right) x^*\left(u - \frac{t}{2}\right) e^{-j2\pi fu} du \quad (5)$$

• **Définition en temps discret :**

$$PWV(n, f) = 2 \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x(n+k)x^*(n-k)g(k)e^{-j4\pi fk} \quad (6)$$

Tel que :  $g$  est une fenêtre de lissage temporelle (Hamming, Hanning, Bartlett, Parzen, Blackman, ...). Le lissage dépend de la fenêtre choisie  $g(t)$ , ainsi que de sa largeur.

Le résultat de cette opération montre un effet de lissage suivant la direction des fréquences, cependant le terme d'interférence subsiste, le lissage en fréquence n'est donc pas suffisant vu la nature oscillatoire (en temps) des termes d'interférences. Un autre lissage suivant la variable temporelle est nécessaire [17].

**VI-5-2-3- La Pseudo Wigner-Ville lissée :**

Un moyen simple de réduire leur influence est d'opérer un lissage temps-fréquence. On est ainsi amené à introduire une version modifiée de la DWV dite Pseudo distribution de Wigner-Ville lissée [17], [20], [21] :

• **Définition en temps continu :**

$$PWVL(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| h\left(\frac{\tau}{2}\right) \right|^2 \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t)x\left(u-\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(u+\frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (7)$$

• **Définition en temps discret :**

$$PWVL(n, f) = 2 \sum_{k=-N+1}^{k=N-1} |h(k)|^2 \left[ \sum_{m=-M+1}^{m=M-1} g(m)x(n+m+k)x^*(n+m-k) \right] e^{-j4\pi fk} \quad (8)$$

Tels que  $h$  : fenêtre de lissage fréquentiel.

$g$  : fenêtre de lissage temporel.

**VI-6- Autres méthodes de lissage temps-fréquence :**

**VI-6-1- Méthode de Choi-Williams :**

L'idée générale de cette méthode est la réduction des termes d'interférences de la distribution de Wigner-Ville en effectuant un lissage dans le plan temps-fréquence, tout en préservant les distributions marginales temporelle et fréquentielle.

Le principe de la méthode consiste à utiliser une fonction de pondération (dans la classe de Cohen), un choix effectif est une gaussienne paramétrée par son " écart type " :  $\sigma$  [21], [26].

• **Définition en temps continu :** [27]

$$CW(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\sigma}} e^{-\frac{(u-t)^2}{4\tau^2/\sigma}} x\left(u+\frac{\tau}{2}\right)x^*\left(u-\frac{\tau}{2}\right) du e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (9)$$

• **Définition en temps discret :** [27]

$$CW(n, f) = 2|h(0)|^2 |x(n)|^2 + 2 \sum_{\substack{k=-N+1 \\ k \neq 0}}^{k=N-1} |h(k)|^2 K(n, k) e^{-j4\pi fk} \quad (10)$$

$$\text{avec: } K(n, k) = \sum_{m=-M+1}^{M-1} g(m) \frac{e^{-\frac{m^2}{16k^2/\sigma}}}{\sqrt{16\pi k^2/\sigma}} x(n+m+k)x^*(n+m-k) \quad (11)$$

- $h$  : fenêtre d'observation à court terme de  $2N-1$  points.
- $g$  : fenêtre de lissage temporel de  $2M-1$  points.

Pour un bon résultat, on choisira :  $1 < \sigma < 80$  (constatation empirique) [17].

### VI-6-2- Méthode de Zhao-Atlas-Marks :

Le principal objectif de cette méthode est de réduire les interférences de la méthode de Wigner-Ville de façon plus précise. Le respect de la condition de conservation du support du signal conduit les auteurs à proposer une famille de représentation temps-fréquence, paramétrée par une fonction mono-variable  $h$  [28].

On effectue un lissage dans le plan fréquentiel par une fonction de pondération  $h$  (dans la classe de Cohen) qui soit nulle en dehors d'un cône [26].

Le paramètre :  $(a)$  qui ajuste la pente du cône est compris entre :  $2 \leq a < \infty$ , en général on prend  $a = 2$ .

- **Définition en temps continu :** [28]

$$\text{ZAM}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| h\left(\frac{\tau}{2}\right) \right|^2 \left[ \int_{t-|\tau|/2}^{t+|\tau|/2} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

- **Définition en temps discret :** [28]

$$\text{ZAM}(n, f) = 2 \sum_{k=-N+1}^{k=N-1} |h(k)|^2 \left[ \sum_{m=-|k|}^{m=|k|} x(n+m+k) x^*(n+m-k) e^{-j4\pi f k} \right] \quad (13)$$

Telle que :  $h$  est la fenêtre de pondération fréquentielle (Hamming, Hanning, ...).

Pour un coût en calcul moindre que celui nécessaire à la Choi-Williams, la transformée de Zhao-Atlas-Marks offre un bon compromis entre souplesse d'utilisation et efficacité de lissage [17].

### VI-7- Analyse temps-échelle :

#### VI-7-1-Introduction :

La transformée de Wigner-Ville et ses variantes constituent un outil important de l'analyse temps-fréquence, d'autres méthodes d'analyse des signaux, plus robustes, sont élaborées afin de lever les inconvénients des signaux non-stationnaires, elles consistent à chercher directement un autre outil adapté à ce type de problème, sans référence directe aux méthodes issues du cas stationnaire, on trouve ainsi des méthodes dites affinées, d'autres dérivées de la définition du signal analytique (méthode de la fréquence instantanée) ou encore celles basées sur le temps-échelle.

Afin d'avoir une information, tant spatiale que fréquentielle, sur un signal, il faut décomposer ce signal sur des fonctions bien localisées à la fois en temps et en fréquence. Ces fonctions sont appelées des ondelettes analysantes. Dans notre travail, l'analyse temps-échelle est utilisée pour améliorer la détection des non-stationnarités dans les signaux ultrasonores et, pour cela, nous présenterons quelques notions de base de la théorie mathématique sur les ondelettes qui seront importantes pour la suite.

#### VI-7-2- La Transformée en Ondelettes Continue (TOC) :

Elle consiste à remplacer le paramètre fréquence par un paramètre d'échelle. Ce qui conduit à une analyse temps-échelle ou espace-échelle.

Soit  $x \in L^2(\mathfrak{R})$  et  $(a, b) \in \mathfrak{R}_+^* \times \mathfrak{R}$ , l'analyse par ondelettes de la fonction  $x(t)$  telle qu'elle a été définie par **J.Morlet** est un produit scalaire [29],[30] :

$$C_x(a, b) = K \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (14)$$

Avec :  $C_x(a, b)$  est le coefficient d'ondelette de la fonction  $x(t)$  ;

$\psi^*$  est le complexe conjugué de l'ondelette analysante  $\psi$  ;

$a$  est le facteur d'échelle ou de dilatation, joue le rôle inverse de la fréquence ;

$b$  est un paramètre de translation (homogène à un temps) ;

$K$  est un coefficient de normalisation, en général,  $K = \frac{1}{\sqrt{a}}$  (normalisation de

l'énergie), mais on peut prendre  $K=1$  ou  $K = \frac{1}{a}$ .

Les coefficients réels  $C_x(a, b)$  calculés par (14), représentent les contributions locales du signal à des instants et échelles diverses qui dépendent du choix des paramètres :  $a$  et  $b$ .

On peut interpréter cette expression comme une projection du signal sur une famille de fonction analysantes  $\psi_{a,b}(t)$  telle que :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (15)$$

$\psi_{a,b}(t)$  Représente les fonctions ondelettes de base, ou parfois appelées ondelettes "filles", elles sont générées à partir de l'ondelette "mère"  $\psi(t)$ .

### VI-7-3- Transformée en Ondelettes Discrète (TOD) : [8]

Elle est donnée par la formule ci dessus en prenant  $a_0=2$  et  $b_0=1$ .

$$C_x(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_i x(i) \psi(2^{-m}i - n) \quad (17)$$

### VI-8-L'analyse en Multirésolution :

L'approche multirésolution vise à présenter un signal quelconque à différentes échelles ou niveaux de résolution [31], [32].

On considère l'espace vectoriel  $L^2$  de fonction carré intégrable dans  $\mathfrak{R}$  :

$$L^2 = \left\{ x : \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt < \infty \right\}$$

Et on cherche à écrire une fonction  $x(t)$  de  $L^2$  comme une suite d'approximations successives, chacune d'elle étant la fonction  $x(t)$  lissée avec des fonctions de plus en plus concentrées, ces approximations n'ont pas la même résolution.

#### VI-8-1- Algorithme de S.Mallat :

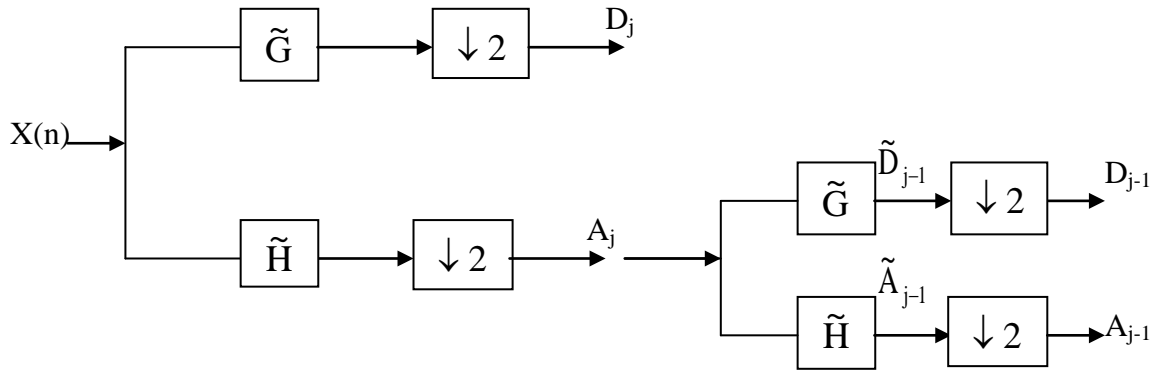
L'algorithme de S.Mallat permet d'effectuer la décomposition de n'importe quel signal  $x(t)$ , ainsi que sa synthèse ou sa reconstruction [19], [32].

##### VI-8-1-1- Décomposition :

Elle s'effectue par un algorithme en cascade : figure (1) ; procédant, respectivement par filtrages successifs puis sous-échantillonnage à une cadence de 2, conformément au théorème de **Shannon**, par l'introduction du filtre numérique  $h$  dont la réponse impulsionnelle

est donnée par [8], [19] :  $h(n) = \frac{1}{2} \langle \varphi^{-1}(u), \varphi(u-n) \rangle \quad \forall n \in \mathbb{Z}$

Avec  $\varphi$  : fonction d'échelle.



$\downarrow 2$  : Signifie enlever un échantillon sur deux.

**Fig.1 : Schéma bloc de l'algorithme de décomposition de S.Mallat.**

Si on note  $\tilde{h}(n) = h(-n)$  et  $\tilde{g}(n) = g(-n)$  : les séquences retournées ou les filtres symétriques ou miroirs de  $h$  et  $g$  respectivement, on obtient, après la convolution de  $\tilde{h}$  et le signal d'entrée, le signal d'approximation  $A_{j-1}$  :

$$\tilde{A}_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-n)A_jx(k) \quad (18)$$

Et après décimation par 2, cette même équation s'écrira :

$$A_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-2n)A_jx(k) \quad (19)$$

De même la convolution du signal à analyser avec le filtre numérique  $g$ , dont la réponse impulsionnelle est donnée par :

$$g(n) = \frac{1}{2} \langle \psi^{-1}(u), \varphi(u-n) \rangle \quad \forall n \in \mathbb{Z}$$

Avec  $\psi$  : fonction d'échelle.

Donne l'équation de détail suivante :

$$\tilde{D}_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-n)A_jx(k) \quad (20)$$

L'équation de décomposition du signal de détail après l'opération de décimation s'écrit :

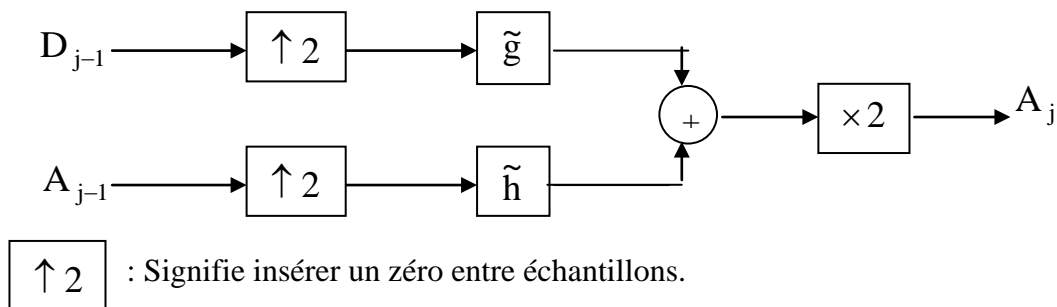
$$D_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-2n)A_jx(k) \quad (21)$$

### VI-8-1-2- La reconstruction :

La reconstruction du signal original est aussi aisée [8], [19] :

$$A_jx(n) = 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-2n)A_{j-1}x(k) + 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-2n)D_{j-1}x(k) \quad (22)$$

Ainsi, l'approximation discrète du signal à la résolution  $2^j$  peut être reconstituée en ajoutant l'approximation discrète à la résolution  $2^{j-1}$  aux détails correspondants. Une interpolation par 2 est réalisée avant l'addition, cette opération consiste à insérer un zéro entre chaque 2 points successifs et afin de restituer parfaitement le signal de départ, il ne faut pas oublier le terme multiplicatif 2. Tout ceci est illustré par la figure (2) :


**Fig. 2 : Schéma bloc de l'algorithme de reconstruction de S.Mallat.**

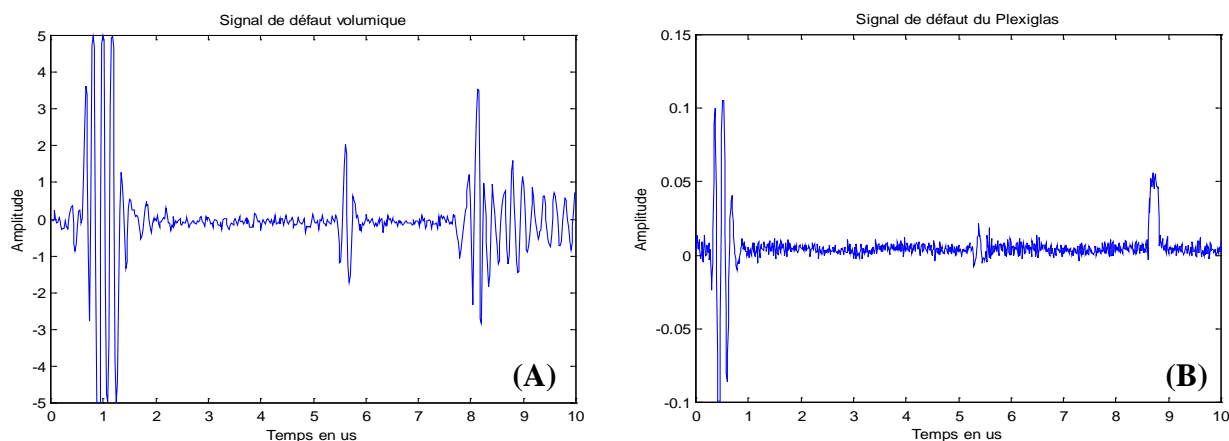
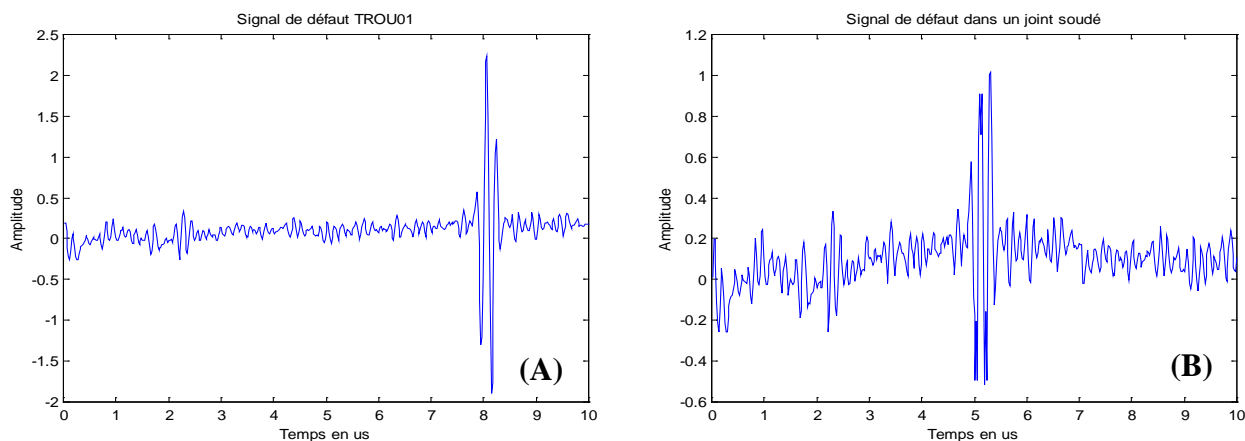
## VII- Résultats de l'analyse et interprétations :

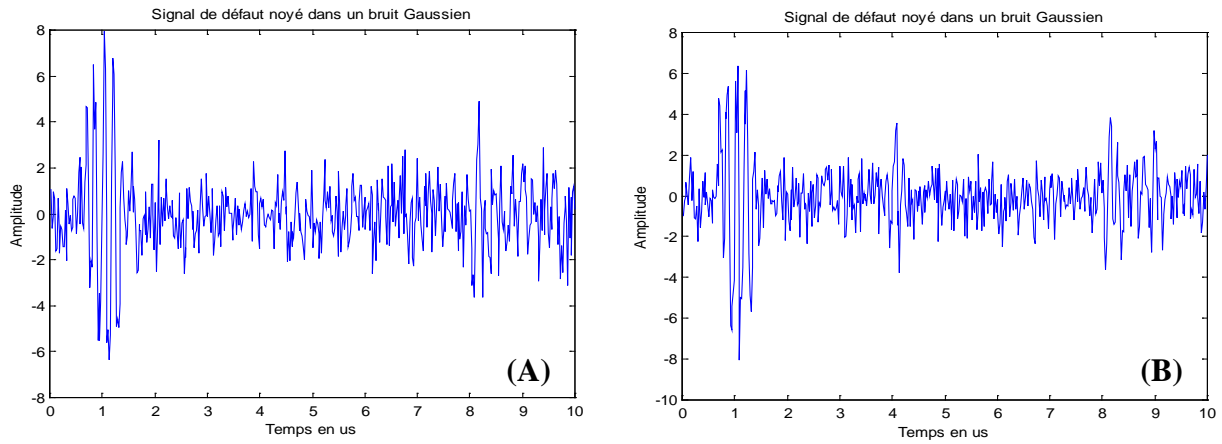
Nous présenterons dans ce qui suit, le résultat de l'application des méthodes d'analyses fréquentielle, temps-fréquence, temps-échelle et leurs différentes versions, sur des échos ultrasonores provenant : d'une pièce en acier et d'un joint soudé contenant un défaut.

Nous présenterons également, une étude comparative détaillée entre les résultats des différentes méthodes implémentées.

### VII-1-Exemple des échos obtenus :

Dans ce qui suit, on donnera la représentation graphique de certains échos ultrasonores obtenus :


**Fig. 3 : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce : (A) en acier VL110, (B) en Plexiglas, contenant un défaut volumique inconnu.**

**Fig. 4 : Exemples de signaux d'écho provenant : (A) d'une pièce en acier, contenant un trou, (B) d'un joint soudé avec défaut, sans la prise en compte des échos des faces avant et arrière.**

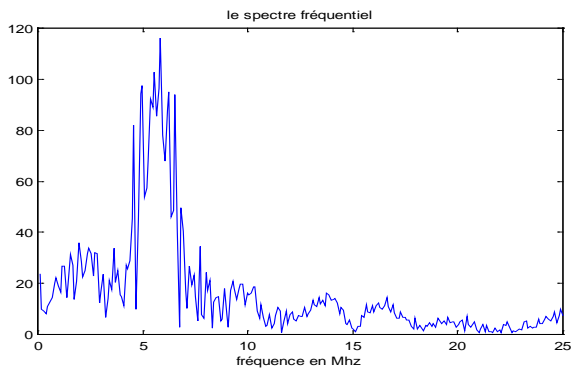


**Fig. 5 : Exemples de signaux d'écho noyé dans un bruit Gaussien.**

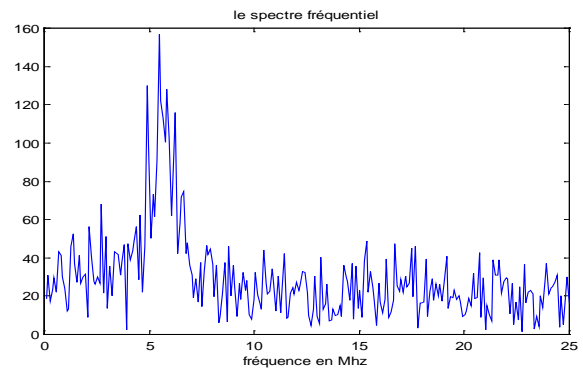
## VII-2- Résultats de l'analyse :

On présente seulement les résultats obtenus lors de l'analyse du signal VL110 : Fig. 3.A, du signal provenant d'un joint soudé : Fig. 4.B, et celui du signal bruité : Fig. 5.A

### VII-2-1- Résultat de l'analyse fréquentielle :



**Fig. 6 : Spectre fréquentiel du signal VL110.**



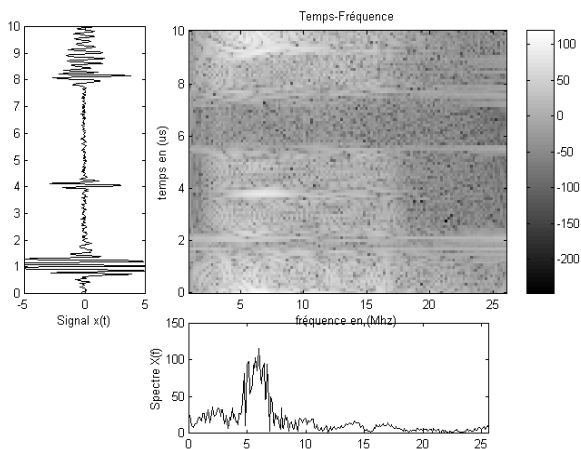
**Fig. 7 : Spectre fréquentiel du signal noyé dans un bruit Gaussien.**

D'après les figures précédentes, on remarque que le spectre fréquentiel présente un étalement du spectre sur une plage de 0 à 25 Mhz, et admet des amplitudes élevées autour de 5 Mhz, qui correspond à la fréquence du palpeur. Mais, il ne donne aucune informations sur la présence ou l'absence du défaut, ni sur sa position.

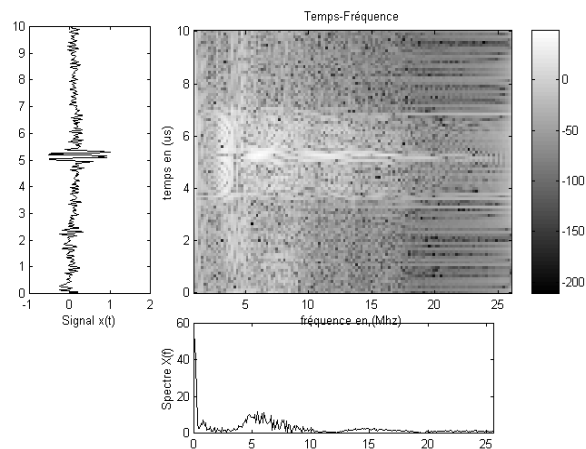
## VII-2-2- Résultat de l'analyse Temps-fréquence :

### A- Spectrogramme :

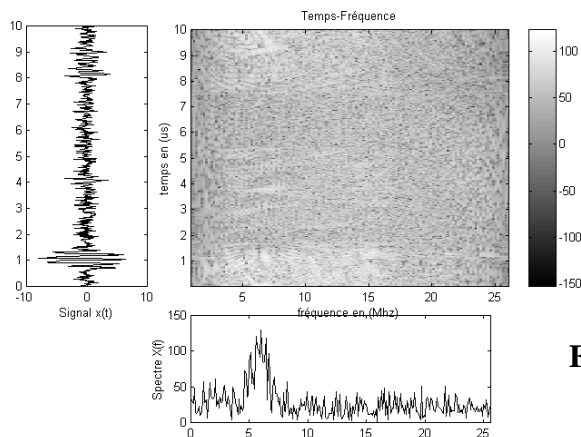
Pour représenter le spectrogramme de ces signaux, on a choisi les paramètres suivants : une fenêtre temporelle de Hanning de largeur 32 échantillons qui est inférieure à la largeur de défaut, et un décalage de 4 échantillons. Le résultat est présenté en fig.8 et 9.



**Fig. 8 : Spectrogramme du signal VL 110.**



**Fig. 9 : Spectrogramme du signal provenant du joint soudé.**



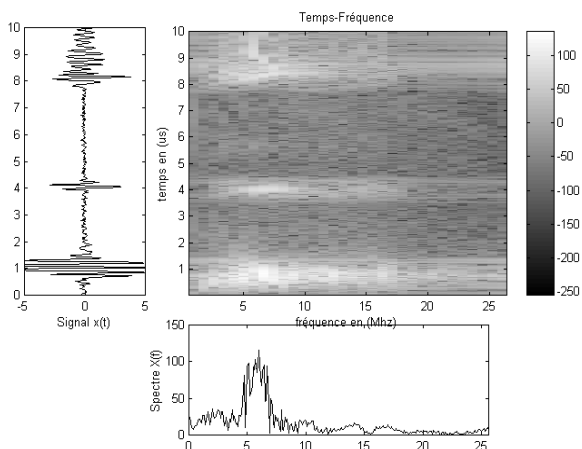
**Fig. 10 : Spectrogramme du signal bruité.**

Les résultats de l'analyse par Spectrogramme, montrent un avantage par rapport au spectre fréquentiel en ce qui concerne la détection du défaut, mais il présente aussi des inconvénients, comme la résolution temporelle, où on remarque un étalement considérable des composantes du signal, d'où la mauvaise localisation des termes recherchés. De plus, il laisse apparaître des termes d'interférences qui peuvent masquer les composantes du signal surtout en présence du bruit (exemple du signal bruité : Fig. 10).

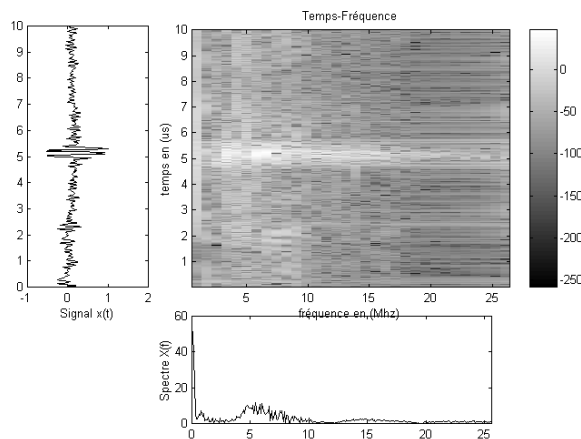
Ceci est dû à la résolution du Spectrogramme, qui est liée à la durée limitée de signal, à l'aide d'une fenêtre glissante choisie afin de tenir comptes des non-stationnarités. Il ne permet donc pas d'avoir une bonne résolution temporelle et fréquentielle simultanément.

**B- Transformée de Wigner-Ville :**

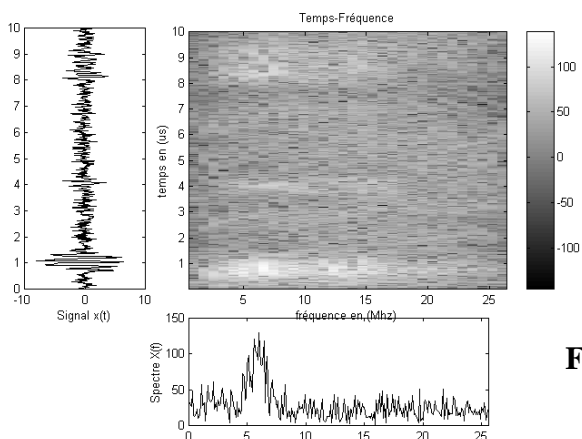
On applique la formule de la TWV sur ces signaux, et on obtient les résultats ci-dessous :



**Fig. 11 : Distribution de Wigner-Ville du signal VL 110.**



**Fig. 12 : Distribution de Wigner-Ville du signal provenant du joint soudé.**

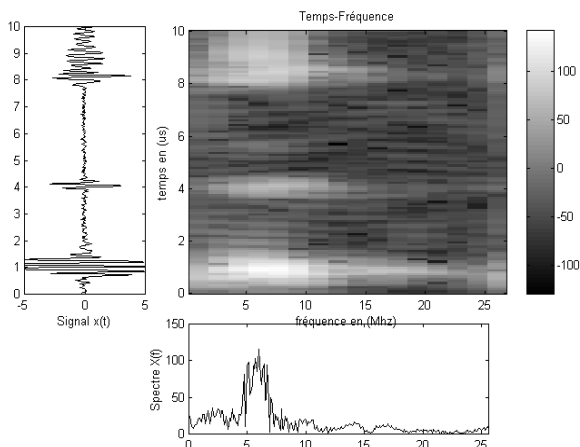


**Fig. 13 : Distribution de Wigner-Ville du signal bruité.**

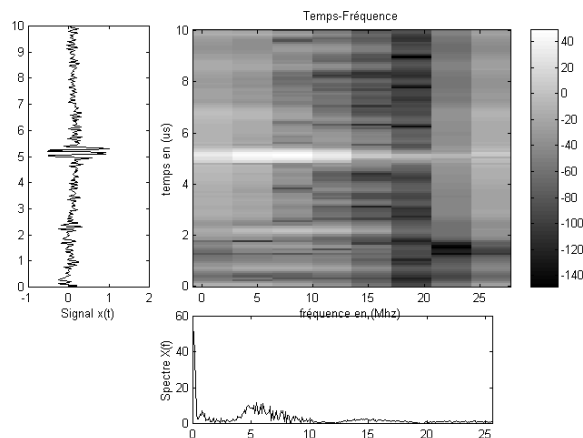
La transformée de Wigner-Ville de ces signaux, a permis d’une part une analyse plus fine, en temps et en fréquence par rapport au Spectrogramme, et d’autre part une concentration d’énergie plus élevée autour des composantes du signal. Mais elle présente l’inconvénient de faire apparaître des termes d’interférences qui peuvent masquer les composantes du signal (défauts) surtout en présence du bruit Fig. 13. Ces termes d’interférence s’étalent dans les deux directions : sur toute la bande fréquentielle du signal (0 à 25 Mhz) et sur toute la durée du signal (0 à 10 us), d’où l’obligation de réaliser un lissage temporel et fréquentiel pour l’amélioration de l’image temps-fréquence.

### C- La Pseudo Wigner-Ville Lissée :

On choisit pour cela une fenêtre de lissage temporelle de Hamming de largeur 16 échantillons, et une fenêtre de lissage fréquentielle de Hanning de largeur également de 16 échantillons, avec un décalage de 2, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 14-16.



**Fig. 14 :** La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal VL110.

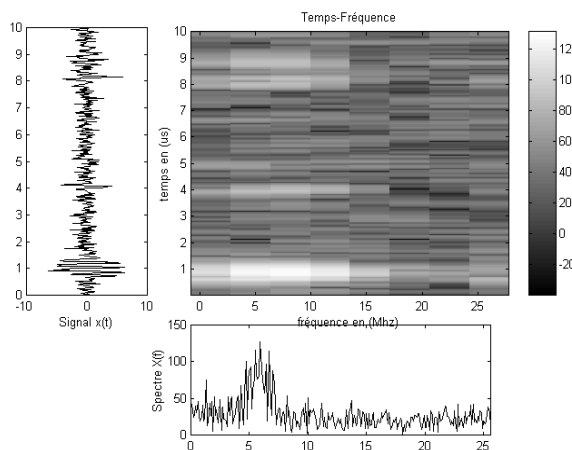


**Fig. 15 :** La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal provenant d'un joint soudé.

La Pseudo Distribution de Wigner-Ville Lissée PWVL, figures : (14) à (16), montre un lissage selon les deux directions : temporelle et fréquentielle. Ceci est très visible, en comparant à la DWV, et on remarque une réduction très nette de l'amplitude et de l'étalement des termes d'interférences, selon l'axe des fréquences, et selon l'axe des temps, ce qui facilite d'avantage la visualisation du défaut, ainsi que la détermination de sa position, et sa nature (par la signature spectrale du défaut, devenue plus nette) : c'est-à-dire la caractérisation du défaut.

Les images temps-fréquence obtenues avec un lissage plus important, permettent néanmoins de visualiser les composantes de niveau plus faible masquées par des interférences. Exemple du signal noyé dans le bruit : Fig (16). D'où l'obligation de réaliser plusieurs analyses d'un même signal avec des paramètres d'analyses différents, c'est-à-dire en faisant varier les largeurs des fenêtres d'analyses temporelles et fréquentielles et la nature de ces fenêtres (Hamming, Hanning, Kaiser, Blackman, ...) de même le pas du décalage.

L'autre alternative choisie pour l'amélioration des résultats, est l'utilisation d'autres méthodes de lissage temps-fréquence, par construction d'un autre noyau, c'est-à-dire, une nouvelle représentation temps-fréquence qui conserve les avantages de la TWV, et permet d'éliminer les termes d'interférences, pour cela on a considéré deux représentations : celles de *Choi-Williams* et *Zhao-Atlas-Marks*.



**Fig. 16 :** La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal bruité.

### D- Méthode de Choi-Williams :

On choisit pour cette représentation une fenêtre de lissage temporelle de Hamming de largeur 16 échantillons, et la même fenêtre de lissage fréquentielle dont sa largeur est aussi de 16 échantillons, et une variance de 2, avec un décalage de 2 échantillons, la représentation est illustrée en fig. 17 et 18.

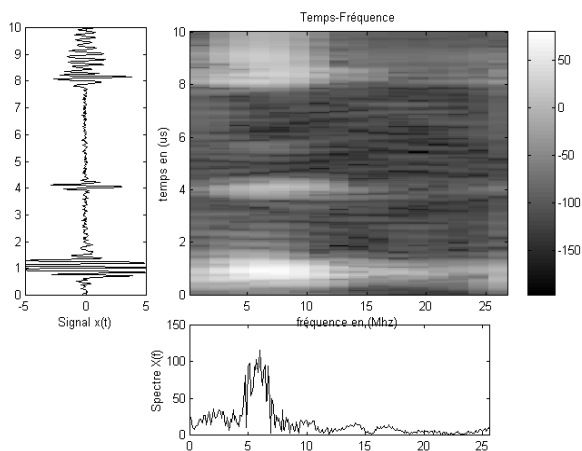


Fig. 17 : Distribution de Choi-Williams du signal VL 110.

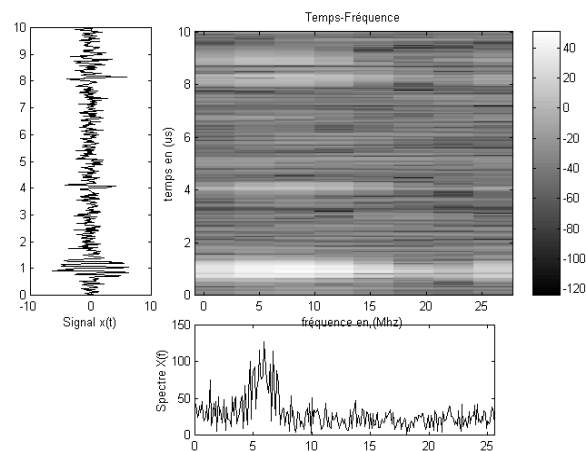


Fig. 18 : Distribution de Choi-Williams du signal bruité.

### E- Méthode de Zhao-Atlas-Marks :

On a opté, pour cette représentation, une fenêtre de lissage fréquentielle de Kaiser de largeur 16 échantillons, avec un décalage de 4 échantillons, le résultat obtenu sur les deux signaux : Fig. 3.A et Fig. 5.A est illustré dans les figures (19) et (20).

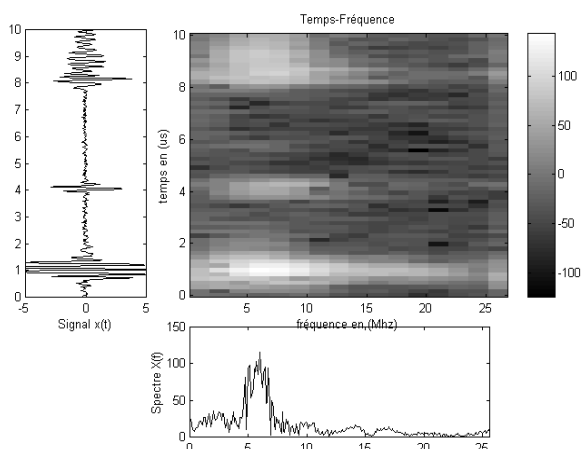


Fig. 19 : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal VL 110.

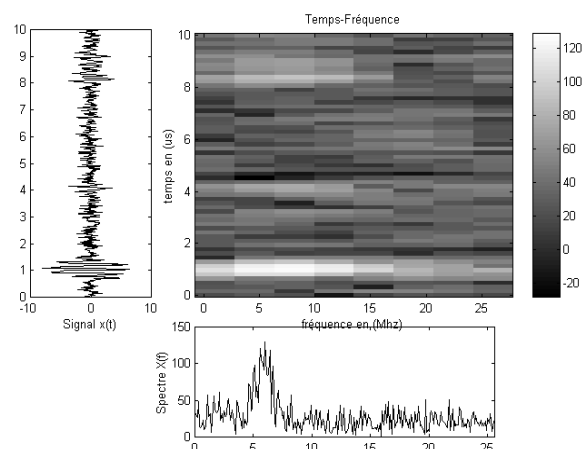


Fig. 20 : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal bruité.

D'après les résultats obtenus par les méthodes de Choi-Williams et Zhao-Atlas-Marks, on remarque qu'elles offrent une meilleure résolution par rapport à la DWV et le spectrogramme, et donnent des résultats très voisins de ceux de la PWVL. Ces dernières donnent de meilleurs résultats pour des signaux plus complexes, tel que le signal bruité Fig. 18, et Fig. 20.

### Remarques sur les résultats temps-fréquence obtenus :

Nous remarquons, que toutes les représentations temps-fréquence implémentées, illustrent le défaut recherché, plus au moins lisiblement selon la version utilisée ; contrairement aux résultats donnés par le spectre fréquentiel. Ces résultats, confirment, encore

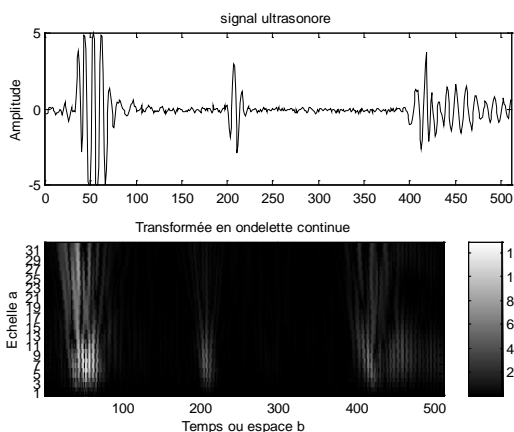
une fois, que la DWV est celle qui présente la plus importante concentration d'énergie, mais l'apparition des termes d'interférences rend nécessaire l'utilisation de la PWVL, qui, malgré une perte de résolution (concentration d'énergie), a l'avantage de clarifier la représentation de Wigner-Ville en conséquence une meilleure caractérisation de la réponse du défaut en temps et en fréquence, d'où une meilleure caractérisation du matériau.

Un fait important remarqué dans ces représentations est que l'amplitude de ces termes d'interférences oscille entre les valeurs positives et négatives contrairement aux termes propres du signal qui, eux, sont presque partout positifs. Notons que toutes ces représentations ont été calculées sur le signal analytique associé au signal réel, notons également que le pas de calcul temporel est un paramètre réglable par l'utilisateur, permettant de ce fait de fixer le nombre de spectres instantanés désirés. Le temps de calcul est d'autant plus élevé que le pas est réduit.

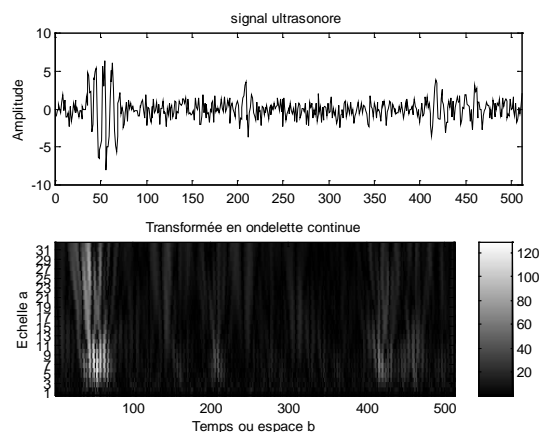
### VII-2-3- Résultats de l'analyse Temps-échelle :

#### A-Transformée en ondelette continue :

On calcule la transformée en ondelette continue de ce signal en utilisant l'ondelette de Morlet, à l'ordre 4 et on obtient les résultats aux figures (21) et (22).



**Fig. 21 : Transformée en ondelette continue du signal VL 110.**



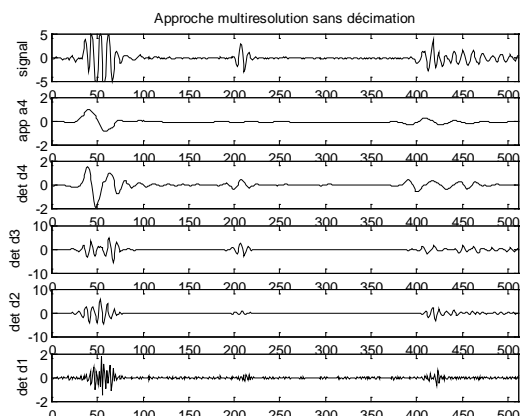
**Fig. 22 : Transformée en ondelette continue du signal bruité.**

Les résultats obtenus par la transformée en ondelettes continue illustrent convenablement les termes propres de ces signaux (écho de face, écho de fond et écho de défauts) de même les petites irrégularités des matériaux, qu'on peut expliquer par la diminution des termes d'interférences, par rapport à la Distribution de Wigner-Ville (DWV), ceci est dû à la nature de la transformée en ondelettes, qui est une transformation linéaire.

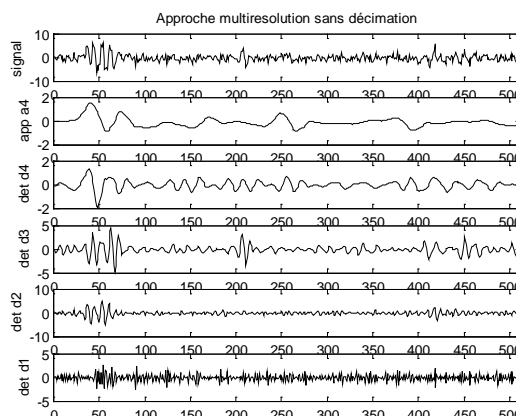
Ce qui permet une très bonne localisation des irrégularités (défauts), même s'elles sont de très faible dimension, ou même noyées dans un bruit.

### B- Analyse en multirésolution sans décimation :

On représente dans ce qui suit les coefficients de détail et d'approximation, résultat de la décomposition de ces signaux en ondelette, à 4 niveaux en utilisant l'ondelette de Daubechies de régularité 2.



**Fig. 23 : Analyse en multirésolution sans décimation du signal VL 110.**



**Fig. 24 : Analyse en multirésolution sans décimation du signal bruité.**

Les résultats donnés ci-dessus montrent que l'approche multirésolution sans décimation, donne une meilleure représentation du signal analysé, les petits coefficients sont dominés par le bruit, alors que, les coefficients avec une grande valeur détiennent plus d'information sur le signal que sur le bruit (écho de face et de fond). En outre, cette approche nous a permis de décorrélérer le signal du bruit, ce dernier affecte tous les coefficients de plus, il a été démontré que son niveau n'est pas élevé. Ce résultat nous ouvre la voie à traiter ce type de signaux pour d'autres applications ultérieures (exemple identification des défauts), après avoir éliminé le bruit affectant le signal.

D'autre part, selon le théorème des moments, la transformation en ondelettes permet de révéler l'aspect irrégulier des signaux. Pour cela, elle exhibe aux petites échelles, des coefficients de grande amplitude là où le signal est irrégulier, et des coefficients nuls ou quasi nuls là où il est régulier. En exploitant ce principe, on remarque bien sur les figures précédentes, que les pics des échos, dus à l'interface et au fond de la pièce inspectée, apparaissent bien à chaque échelle, de même que le pic de l'écho de défaut. On détermine par la suite l'échelle où l'amplitude de ce pic est maximale (échelle : 3), c'est dans cette échelle que la probabilité de détecter le défaut est maximale. Comme cette échelle correspond à une certaine bande de fréquence dans le plan temps-fréquence, on peut facilement localiser ce défaut simultanément en fréquence et en temps ou en espace.

Les coefficients obtenus par ces résultats, sont exploités dans certains cas pour la caractérisation des défauts et l'identification de leur nature, ceci après une analyse d'une base de données types.

### VIII- Applications en CND :

Les méthodes de contrôle non destructif, ont classiquement pour but deux objectifs : la recherche de défauts, et la caractérisation globale de matériaux ou de pièces. Dans le premier cas, on garantit la qualité de la pièce par la preuve de l'absence de défauts, micro-structuraux ou non. On peut être amené, après détection, à les identifier (volumique ou plan) pour en déduire leur degré de nocivité, ce qui constitue le premier but de ce paragraphe. L'autre but de ce même paragraphe, est l'application des outils de traitement du signal pour la mesure des fines épaisseurs, cette application présente une réponse à certains problèmes posés dans le CND par ultrasons à savoir la résolution.

### VIII-1- Caractérisation des défauts :

Les analyses effectuées sur plusieurs échos de défauts détectés dans des pièces métalliques, ont montré clairement que l'on peut bien faire la discrimination entre un défaut plan et un défaut volumique, ceci par l'analyse de l'image temps-fréquence du signal.

#### VIII-1-1- Image temps-fréquence des défauts :

On applique la méthode de **Zaho-Atlas-Marks**, pour l'ensemble de ces signaux, avec une fenêtre de Hamming de longueur 16 échantillons, et un décalage de 2 échantillons. On obtient les représentations temps-fréquence (Fig. 25 et 26).

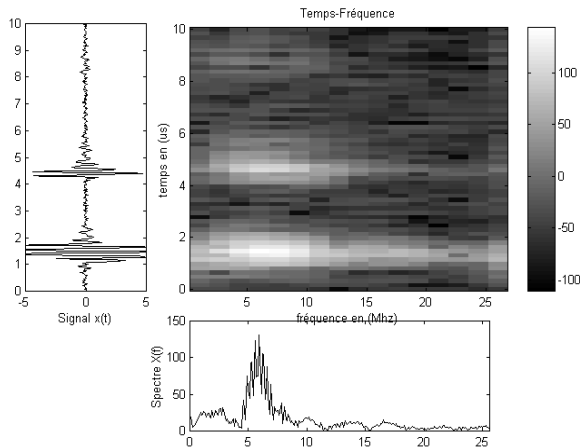


Fig. 25 : Image temps-fréquence d'un défaut plan.

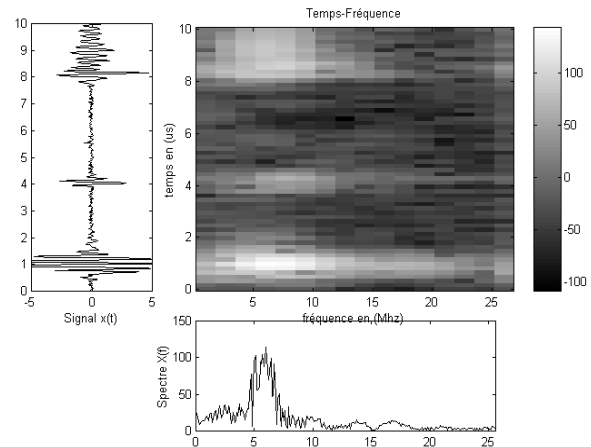


Fig. 26 : Image temps-fréquence d'un défaut volumique.

#### VIII-1-2- Remarques et classifications :

D'après les résultats obtenus, on remarque pour les défauts plans que l'écho de défaut se caractérise par un niveau d'énergie très élevé par rapport au niveau d'énergie de l'écho du fond (qui est négligeable), ceci est dû à la réflexion de la majorité de l'énergie ultrasonore lors de sa rencontre avec un défaut plan, par conséquent il y a moins d'énergie qui atteint le fond de la pièce.

Part contre, dans les défauts volumiques, l'écho de défaut présente un niveau d'énergie très faible, devant celui de l'écho de fond, donc seule une très faible quantité d'énergie ultrasonore sera réfléchiée par le défaut volumique, par conséquent une grande partie de l'énergie ultrasonore arrive au fond de la pièce et est réfléchiée alors vers le transducteur.

Les expériences que nous avons menées, sur plusieurs défauts montrent que :

- ❖ Si le rapport de :  $\frac{\text{l'énergie de l'écho de fond}}{\text{l'énergie de l'écho de face avant}} \geq 0.4$ , le défaut est considéré comme un défaut volumique.
- ❖ Si le rapport de :  $\frac{\text{l'énergie de l'écho de fond}}{\text{l'énergie de l'écho de face avant}} < 0.4$ , le défaut est de type plan.

La seule explication de ces deux résultats, constatés lors des expériences, effectuées sur plusieurs échantillons d'échos ultrasonores provenant des défauts volumiques et défauts plans, est reliée à la physique des ultrasons, qui sont plus sensibles aux problèmes de continuité (c'est-à-dire aux défauts plans), qu'à l'absence de matière donc aux défauts volumiques. Ces derniers sont bien décelés par la radiographie qui est très sensible à ce genre de défaut (l'absence de matière).

### VIII-2- Mesures des fines épaisseurs :

Les méthodes classiques telles que : la détection de l'enveloppe (par la transformée de Hilbert), ou la mesure de temps de vol sur le signal temporel, posent beaucoup de problèmes de résolution, puisque la mesure n'est possible que si les échos ne se superposent pas dans le temps. Et grâce aux méthodes d'analyse temps-fréquence, nous pouvons mesurer une épaisseur très fine avec une bonne précision.

Les représentations temps-fréquence ont été appliquées à des signaux simulant des signaux ultrasonores selon l'expression [33], [34] :

$$s(t) = s_m \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} t^2\right) \cos(2\pi f_0 t) \quad (23)$$

$\sigma^2$  : définissant l'amortissement du transducteur ultrasonore.

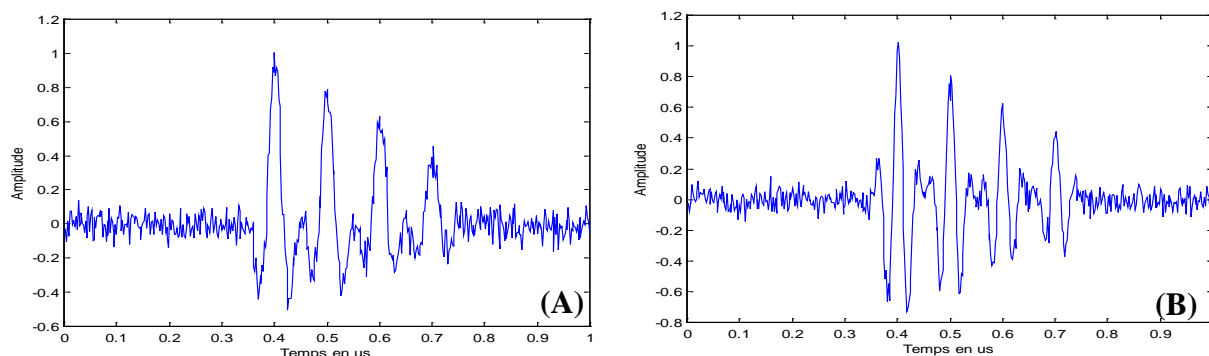
$f_0$  : définissant la fréquence de résonance du transducteur ultrasonore.

$s_m$  : amplitude désirée.

La distance entre deux pics est déduite de la formule :

$$x = \frac{1}{2} v \cdot t \quad (24)$$

Par exemple pour l'aluminium, la vitesse de propagation de l'onde est  $V_L \approx 6320$  m/s, donc pour une durée de 0.4 microsecondes, nous avons l'équivalent en épaisseur égal à  $e \approx 1.3$  mm. Le test porte sur quatre échos ultrasonores, équidistants, sur une fenêtre de 1 microseconde à différentes énergies, ce signal simule la mesure d'une épaisseur d'un matériau en aluminium, figure (27).



**Fig. 27 : Signal provenant d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.3 mm  
(A) :  $f = 15$  Mhz, (B) :  $f = 25$  Mhz.**

Le tableau (1) donne le résultat des cinq représentations, de toutes les mesures faites :

Fréquence	$f = 15$ Mhz			$f = 25$ Mhz		
	0.1 us 0.3 mm	0.16 us 0.5 mm	0.32 us 1 mm	0.1 us 0.3 mm	0.16 us 0.5 mm	0.32 us 1mm
<b>WV</b>	0.309 mm	0.518 mm	1.035 mm	0.312 mm	0.513 mm	1.033 mm
<b>PWVL</b>	0.315 mm	0.523 mm	1.038 mm	0.314 mm	0.517 mm	1.035 mm
<b>CW</b>	0.320 mm	0.524 mm	1.039 mm	0.318 mm	0.526 mm	1.042 mm
<b>ZAM</b>	0.332 mm	0.525 mm	1.050 mm	0.325 mm	0.515 mm	1.050 mm

**Tableau (1) : Résultats de la mesure des épaisseurs par les différentes représentations.**

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que le résultat de la mesure donné par les méthodes implémentées, est très voisine de l'épaisseur réelle de la pièce, avec l'introduction d'une erreur très faible (voir acceptable).

Ces méthodes ont permettent la mesure des épaisseurs très fines (0.3, 0.5 mm, ...), ce qui reste difficile à réaliser par l'analyse temporelle de ces signaux. Les algorithmes développés et appliqués à la mesure des fines épaisseurs sont très précis.

Une autre remarque peut être tirée de ces résultats : lorsqu'on effectue un lissage sur la représentation temps-fréquence, l'erreur sur l'épaisseur mesurée augmente, ceci est dû à la délocalisation des composantes du signal lors du lissage.

---

---

## *Conclusion :*

L'objectif principal de ce travail est d'expérimenter des outils de traitement numérique des signaux pour la caractérisation d'un contrôle ultrasonore des matériaux, pour cela, nous avons utilisé des méthodes basées sur des algorithmes mathématiques très puissants selon trois approches : analyse fréquentielle, analyse temps-fréquence et analyse temps-échelle.

Nous avons appliqué les approches proposées, sur les échos provenant des pièces et joints soudés présentant des défauts. Les résultats obtenus donnent entière satisfaction, selon l'avis des experts en CND. Les expérimentations, que nous avons menées sur plusieurs échantillons de défauts, ont démontré l'efficacité de logiciel conçu concernant la détection et la caractérisation des défauts.

L'état de l'art de tous les traitements étudiés et implantés, nous a donné l'idée de concevoir un logiciel convivial intégrant tous les outils suscités. Nous avons ainsi axé nos efforts pour développer une méthode de détection de défaut basée sur l'observation de l'image temps-fréquence ou temps-échelle du signal analysé. En effet en suivant le processus de détection de cette méthode, l'opérateur pourra très facilement estimer la présence ou l'absence du défaut, même s'il est noyé dans du bruit. Par ailleurs nous avons développé une technique pour la classification des défauts (volumique et plan) après leur détection, basée sur le calcul du rapport de l'énergie de l'écho de fond à l'écho de face avant. Le résultat de la classification sur l'ensemble des signaux, nous encourage à mener d'autres expériences sur une base de données plus riche, afin d'intégrer cette procédure dans le contrôle industriel. Nous avons vu aussi, que l'application des représentations temps-fréquence, dans la mesure des fines épaisseurs, donne de bons résultats, ainsi nous avons pu mesurer une épaisseur d'Aluminium de l'ordre d'un dixième de millimètre.

En conclusion, la détection des non-stationnarités des échos ultrasonores, n'est pas une fin en soi, mais un passage obligatoire et important pour la caractérisation d'un matériau, ce qui ouvre par la suite la voie à l'identification de la nature du défaut, et à son dimensionnement. Le dimensionnement des défauts est très important dans le CND. Pour cela on a besoin d'une base de donnée très riche et d'autres techniques d'analyse à savoir le traitement d'image, cette partie constitue une perspective de notre travail.

## *Bibliographie :*

- [1] : J.L.Pellier, Y.Le tohic, J.C.Caron : " La pratique du contrôle industriel par ultrasons." Edition communication actives, Paris 1979.
- [2] : Y.Kabir : " Segmentation d'images de film radiographie dédiée au contrôle non destructif (CND). ", Thèse de Magister en électronique université de BLIDA, juillet 1999.
- [3] : A.Lambert, J.Rivenez, G.Wache : " Les contrôles non destructifs, généralités. " CETIM, 3ème édition 1994.
- [4] : O.Nedjah : " Echographie ultrasonore médicale." ICSS' 94 USTHB Alger, P II.16 - P II.19
- [5] : O.Nedjah : " Ultrasonic imaging system for non destructive testing. " ICSS' 94 USTHB Alger, P II.30 - P II.33.
- [6] : C.H.Chen, G.G.Lee : " Neural Networks for ultrasonic NDE signal classification using Time -Frequency analysis." IEEE 1993, ICASSP, USA. P I.493- P I.496.
- [7] : P.Flandrin : " Temps-Fréquence." Edition Hermès, Paris 1993.
- [8] : Y.T.Chan : " Wavelet basics." Edition, Kluwer academic publishers, USA 1996.
- [9] : S.Femmam, N.K.M'SIRDI : " Analyse spectrale en contrôle non destructif par ultrason. " COMAEI ; Telemcen décembre 1996 vol : 2, P 48 - P 54.
- [10] : S.Tazibt : "Caractérisation de défauts volumiques dans les métaux par voie acoustique." Thèse de Magister en électronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 1992.
- [11] : B.Brown, J.E.Goodman : " Ultrason de haute intensité. " édition Dunod 1971.
- [12] : S.Aliouane : " conception, réalisation et expérimentation d'un capteur ultrasonore sans contact de type EMAT. " Thèse de Magister en électronique, ITS de L'USTHB 2000.
- [13] : F.Lakestani : " Etude théorique et expérimentale des transducteurs ultrasonores piézo-électriques fonctionnant dans le domaine du Mégahertz. " Thèse docteur d'état Es-science INSA (Lyon) 1986.
- [14] : M.Lacroix : " Essais non destructifs." Techniques de l'ingénieur volume M1 métallurgie 1986. PM 110-1- PM 110-21.
- [15] : Y.M.Zhu, F.Peyrin, R.Goutte : " Transformation de Wigner-Ville : Description d'un nouvel outil de traitement du signal et des images." ANN.Télécommun, 42, No3-4, 1987.
- [16] : P.Flandrin : " Représentation temps-fréquence des signaux non stationnaires." Revue de traitement du signal volume 6, No 2 1989 , P 89 - P 101.
- [17] : P.Flandrin : " Représentations bi-dimensionnelles d'un signal de parole : Représentations temps-fréquence et paramétrisations" Eléments de monographie Version 1999.
- [18] : J.P.Djamdj : " Analyse en Ondelettes et mises en correspondance en Télédétection." Thèse de doctorat, université de Nice 1993.
- [19] : L.Fergani : " Représentation Temps-Fréquence et Temps-Echelle de signaux non-stationnaires." Thèse de Magister en électronique USTHB 1992.
- [20] : B.Fergani : " Application de la distribution de Wigner-Ville à l'analyse de signaux non-stationnaires." Thèse de Magister en électronique USTHB 1992.
- [21] : M.Basseville, P.Flandrin, N.Martin : " Méthodes Temps-Fréquence. " Revue de traitement du signal volume 9, No 1 1992 , P 79 - P 100.
- [22] : L.Cohen : " Time-Frequency distributions - A review." Proceeding of IEEE Vol 77, No 7. July 1989, P 941- P 979.
- [23] : E.P.Wigner : " On the quantum correction for thermodynamic equilibrium." Phys. Rev. 40, 1932. P 749 - P 759.
- [24] : J.Ville : " Théorie et applications de la notion de signal analytique." Câbles et transmission, 2A, (1), 1948. P 61- P 74.
- [25] : P.Flandrin, W.Martin : " Wigner-Ville spectral analysis of non stationary processes." IEEE Transactions on ASSP, Vol -33, No 6, December 1985. P 1461- P 1469.

- [26] : F.Auger, C.Doncarli : " Quelques commentaires sur des représentations Temps-Fréquence proposées récemment." Revue de traitement du signal Vol 9- No 1, 1992. P 3 - P 25.
- [27] : H.Choi, W.J.Williams : " Improved Time-Frequency representation of multi - components signals using exponential Kernels." IEEE Transactions on ASSP Vol : 37, No.6. June 1989. P 862 - P 871.
- [28] : Y.Zhao, L.E.Atlas, R.J.Marks : " The use of cone-shaped kernels for generalized Time-Frequency representation of non stationary signals. " IEEE Transactions on ASSP Vol.38, No.7, july 1990, P 1084 - P 1091.
- [29] : O.Rioul, P.Flandrin : " Time-Scale Energy distributions : A general class extending wavelet transforms." IEEE Transactions on signal processing, Vol.40, No7, july 1992. P 1746- P 1757.
- [30] : R.Drai, M.Khelil, A.Benchaala : " Flaw detection in ultrasonics using wavelets transform and Split spectrum processing." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [31] : A.Boudouani : " Elimination du bruit dans les images par décomposition en Ondelettes." Thèse de Magister en électronique USTHB mars 2001.
- [32] : S.Mallat: " A theory for multiresolution signal decomposition : The Wavelet representation." IEEE Transactions on pattern analysis machine intelligence, Vol.11, No.7, july 1989. P 674 - P 693.
- [33] : C.H.Chen : " Application of wavelet transforms to ultrasonic NDE and remote-sensing signal analysis." IEEE 1994, P 472 - P 475.
- [34] : M.Khelil : " Analyse tridimensionnelle des signaux ultrasonores, application au contrôle non destructif des matériaux." Thèse de Magister en électronique USTHB janvier 2002.

## *Sommaire :*

<b>Introduction</b> .....	P 1
---------------------------	-----

### **Partie 1 : Aperçu sur le contrôle non destructif.**

#### **Chapitre 1 : Techniques de contrôle non destructif (C.N.D)**

I- Introduction.....	P 5
II- Différentes méthodes de contrôle non destructif.....	P 5
II-1- Ressuage.....	P 6
II-2- La magnétoscopie.....	P 6
II-3- Courant de Foucault.....	P 7
II-4- Rayonnements.....	P 8
II-5- Les ultrasons.....	P 9
III- Nature des pièces et défauts dans le C.N.D.....	P 9
III-1- Défauts internes.....	P 9
III-2- Défauts de surface.....	P 10
IV- Contrôle des soudures.....	P 10
IV-1- Le soudage.....	P 11
IV-2- Description d'un joint soudé.....	P 11
IV-3- Type de joints.....	P 12
IV-4- Sources de défaut.....	P 12
IV-5- Caractérisation des défauts de soudures.....	P 13
IV-6- Défauts de soudures.....	P 13
IV-7- Choix du palpeur dans le contrôle des soudures.....	P 15
V- Conclusion.....	P 16

#### **Chapitre 2 : Généralités sur les ultrasons**

I- Introduction.....	P 17
II- Le signal ultrasonore.....	P 17
II-1- Définition.....	P 17
II-2- Spectre des ultrasons.....	P 18
III- Propagation des ultrasons.....	P 18
III-1- Lois de propagation.....	P 18
III-2- Types d'ondes.....	P 20
III-3- Champ ultrasonore.....	P 22
III-4- Atténuation des ondes ultrasonores.....	P 23
III-5- Impédance acoustique.....	P 24

IV- Génération des ultrasons.....	P 25
IV-1- Piézo-électricité.....	P 25
IV-2- Transducteur Piézo-électrique.....	P 26
IV-3- Focalisation des ondes ultrasonores.....	P 27
V- Choix de la technique de contrôle.....	P 28
V-1- Méthode par transmission.....	P 28
V-2- Méthode par écho.....	P 29
VI- Les différentes techniques de mise en œuvre.....	P 30
VI-1- Contrôle par contact.....	P 31
VI-2- Contrôle par immersion.....	P 31
VII- Chaîne ultrasonore avec module d'acquisition sur micro-ordinateur.....	P 31
VIII- Qualité des contrôles.....	P 33
IX- Conclusion.....	P 33

## **Partie 2 : Outils de traitement du signal.**

### **Chapitre 1 : Analyse Temps-Fréquence**

I- Introduction.....	P 34
II- Notions préliminaires sur la représentation des signaux.....	P 34
II-1- Représentation temporelle.....	P 34
II-2- Représentation fréquentielle.....	P 34
III- L'analyse classique.....	P 35
III-1- Transformée de Fourier.....	P 35
III-2- Position du problème.....	P 36
IV- Transformée de Fourier à court terme (TFCT).....	P 36
V- Représentations Temps-Fréquence.....	P 37
VI- La transformée de Wigner-Ville.....	P 38
VI-1- Définition.....	P 38
VI-2- Propriétés.....	P 39
VI-3- Caractéristiques de la Transformée de Wigner-Ville.....	P 41
VI-4- Importance du signal analytique.....	P 41
VI-5- Termes d'interférences.....	P 42
VII- Différentes versions de la DWV et méthodes de lissages.....	P 44
VII-1- DWV simple.....	P 44
VII-2- La Pseudo Wigner-Ville.....	P 44
VII-3- La Pseudo Wigner-Ville lissée.....	P 45
VIII- Autres méthodes de lissage temps-fréquence.....	P 45
VIII-1- Méthode de Choi-Williams.....	P 45
VIII-2- Méthode de Zhao-Atlas-Marks.....	P 47
IX- Exemple d'application de ces méthodes sur un signal simulé.....	P 48
X- Conclusion.....	P 50

**Chapitre 2 : Analyse Temps-Echelle**

I- Introduction.....	P 51
II- Historique et l'état de l'art.....	P 51
III- Temps- échelle.....	P 52
IV- La transformée en ondelettes continue (TOC).....	P 52
IV-1- Définition.....	P 52
IV-2- Propriétés de la transformée en ondelettes continue.....	P 54
IV-3- Choix de l'ondelettes d'analyse $\psi$ .....	P 54
IV-4- Exemple d'ondelettes.....	P 55
IV-5- Scalogramme.....	P 56
V- Discrétisation.....	P 56
V-1- Introduction.....	P 56
V-2- Discrétisation de demi-plan (a, b).....	P 57
V-3- Transformée en ondelettes discrète (TOD).....	P 57
VI- L'analyse en Multirésolution.....	P 58
VI-1- Définition.....	P 58
VI-2- Décomposition .....	P 59
VI-3- Algorithme de S.Mallat .....	P 60
VII- Ondelettes et moments.....	P 62
VIII- Conclusion.....	P 62

**Partie 3 : Application des outils de traitement du signal dans le CND.****Chapitre 1 : Résultats de l'analyse**

I- Introduction.....	P 63
II- Description des signaux.....	P 63
II-1- Données expérimentales.....	P 63
II-2- Exemple des échos obtenus.....	P 63
IV- Résultats de l'analyse.....	P 66
IV-1- Résultats de l'analyse fréquentielle.....	P 66
IV-2- Résultats de l'analyse temps-fréquence.....	P 67
IV-3- Résultats de l'analyse temps-échelle.....	P 73
VI- Conclusion.....	P 76

**Chapitre 2 : Applications en CND**

I- Introduction .....	P 77
II- Caractérisation des défauts.....	P 77
II-1- Image temps-fréquence des défauts.....	P 77
II-1-1- Image temps-fréquence des défauts plans.....	P 77
II-1-2- Image temps-fréquence des défauts volumiques.....	P 78
II-2-Remarques et classifications.....	P 78
II-3-Explication.....	P 78

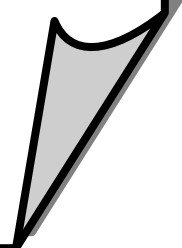
III- Mesures des fines épaisseurs.....	P 79
III-1- Cas de signaux avec trajets multiples.....	P 79
III-2- Autres mesures.....	P 81
IV- Conclusion .....	P 82

**Chapitre 3 : Description du logiciel élaboré.**

I- Introduction.....	P 83
II- Caractéristiques du Matlab.....	P 83
III- Aperçu sur le logiciel réalisé.....	P 84
IV- Conclusion.....	P 89

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>P 90</b>
---------------------------------	-------------

<b>Bibliographie.....</b>	<b>P 92</b>
---------------------------	-------------



## Liste des figures :

### **Partie I :**

Fig (I.1) : Fissure nette.

Fig (I.2) : Nombreuses petites fissures.

Fig (I.3) : Défaut sous la surface.

Fig (I.4) : Formation d'un film de radiographie.

Fig (I.5) : Présentation du cordon de soudure.

Fig (I.6) : Types de joints.

Fig (I.7) : Cordon de soudure présentant des fissures.

Fig (I.8) : Cordon de soudure présentant un manque de fusion.

Fig (I.9) : Cordon de soudure présentant des cavités.

Fig (I.10) : Palpeur d'angle.

Fig (I.11) : Contrôle des soudures.

Fig (II.1) : Onde ultrasonore lors d'un changement de milieux.

Fig (II.2) : Divergence des faisceaux.

Fig (II.3) : Intensité acoustique sur l'axe en fonction de la distance à l'émetteur.

Fig (II.4) : Schéma d'un transducteur piézo-électrique.

Fig (II.5) : Focalisation par une lentille acoustique.

Fig (II.6) : Focalisation par coupelles hémisphériques.

Fig (II.7) : Contrôle par transmission.

Fig (II.8) : Contrôle par échographie.

Fig (II.9) : Chaîne de contrôle ultrasonore.

### **Partie II :**

Fig (I.1.a) :  $x(t)$  modulation linéaire.

Fig (I.1.b) : La TF de  $x(t)$ .

Fig (I.2) : TWV de la somme de 2 sinus.

Fig (I.3) : Somme d'une modulation linéaire et hyperbolique.

Fig (I.4) : TWV de la somme des 2 modulations.

Fig (I.5) : PWV de la somme des 2 modulations.

Fig (I.6) : PWVL de la somme des 2 modulations.

Fig (I.7) : CW de la somme des 2 modulations ( $\sigma=20$ ).

Fig (I.8) : CW de la somme des 2 modulations ( $\sigma=60$ ).

Fig (I.9) : ZAM de la somme des 2 modulations.

Fig (II.1) : Banc de filtres de la transformée en ondelettes.

Fig (II.2) : Ondelette de Morlet.

Fig (II.3) : Ondelette chapeau mexicain.

Fig (II.4) : Ondelette de Haar.

Fig (II.5) : Schéma bloc de l'algorithme de décomposition de S.Mallat.

Fig (II.6) : Schéma bloc de l'algorithme de reconstruction de S.Mallat.

## **Partie III :**

Fig (I.1) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en acier contenant un défaut.  
(A) : volumique VL 110 - (B) : plan PL 2.

Fig (I.2) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en acier, contenant un trou, avec les échos des faces avant et arrière non représentés.

Fig (I.3) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en Plexiglas contenant un défaut.

Fig (I.4) : Exemples de signaux d'écho provenant d'un joint soudé contenant un défaut.

Fig (I.5) : Exemples de signaux d'écho noyés dans un bruit Gaussien.

Fig (I.6) : Spectre fréquentiel du signal VL110.

Fig (I.7) : Spectre fréquentiel du signal TROU01.

Fig (I.8) : Spectre fréquentiel du signal provenant d'un joint soudé.

Fig (I.9) : Spectre fréquentiel du signal noyé dans un bruit gaussien.

Fig (I.10) : Spectrogramme du signal VL110.

Fig (I.11) : Spectrogramme du signal TROU01.

Fig (I.12) : Spectrogramme du signal provenant du joint soudé.

Fig (I.13) : Spectrogramme du signal bruité.

Fig (I.14) : Distribution de Wigner-Ville du signal VL 110.

Fig (I.15) : Distribution de Wigner-Ville du signal TROU01.

Fig (I.16) : Distribution de Wigner-Ville du signal provenant du joint soudé.

Fig (I.17) : Distribution de Wigner-Ville du signal bruité.

Fig (I.18) : La Pseudo Wigner-Ville du signal VL110.

Fig (I.19) : La Pseudo Wigner-Ville du signal TROU01.

Fig (I.20) : La Pseudo Wigner-Ville du signal provenant d'un joint soudé.

Fig (I.21) : La Pseudo Wigner-Ville du signal bruité.

Fig (I.22) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal VL110.

Fig (I.23) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal TROU 01.

Fig (I.24) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du provenant d'un joint soudé.

Fig (I.25) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal bruité.

Fig (I.26) : Distribution de Choi-Williams du signal VL110.

Fig (I.27) : Distribution de Choi-Williams du signal TROU01.

Fig (I.28) : Distribution de Choi-Williams du signal provenant du joint soudé.

Fig (I.29) : Distribution de Choi-Williams du signal bruité.

Fig (I.30) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal VL110.

Fig (I.31) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal TROU01.

Fig (I.32) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du joint soudé.

Fig (I.33) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal bruité.

Fig (I.34) : Transformée en ondelette continue du signal VL 110.

Fig (I.35) : Transformée en ondelette continue du TROU01.

Fig (I.36) : Transformée en ondelette continue du joint soudé.

Fig (I.37) : Transformée en ondelette continue du signal bruité.

Fig (I.38) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal VL 110.

Fig (I.39) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal TROU 01.

Fig (I.40) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal provenant d'un joint soudé.

Fig (I.41) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal bruité.

Fig (II.1) : L'image temps-fréquence du défaut plan 1.

Fig (II.2) : L'image temps-fréquence du défaut plan 2.

Fig (II.3) : L'image temps-fréquence du défaut volumique 1.

Fig (II.4) : L'image temps-fréquence du défaut volumique 2.

Fig (II.5) : Signal provenant de la plaque d'aluminium d'épaisseur 1.3 mm

Fig (II.6) : Représentation de Wigner-Ville du signal simulé.

Fig (II.7) : Représentation de Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal simulé.

Fig (II.8) : Représentation de Choi-Williams du signal simulé.

Fig (II.9) : Représentation de Zhao-Atlas-Marks du signal simulé.

Fig (II.10) : Signal provenant de plaque d'aluminium d'épaisseur 0.3 mm avec une fréquence  
 $f = 15 \text{ Mhz}$ .

Fig (II.11) : Signal provenant de plaque d'aluminium d'épaisseur 0.3 mm avec une fréquence  
 $f = 25 \text{ Mhz}$ .

Fig (III.1) : Structure du logiciel élaboré.

Fig (III.2) : Menu principal du logiciel.

Fig (III.3) : Fenêtre d'ouverture d'un signal à traiter.

Fig (III.4) : Paramètre d'analyse fréquentielle.

Fig (III.5) : Exemple d'une fenêtre de paramètres pour l'analyse temps-fréquence.

Fig (III.6) : Exemple d'une fenêtre de paramètres pour l'analyse temps-échelle.

## *Introduction :*

Le Contrôle Non Destructif (CND) joue un rôle important dans différents domaines ; il permet de contrôler des matériaux ou des structures afin d'en vérifier l'état, ainsi que de détecter des défauts sans endommager les pièces inspectées [1]. De nombreux domaines industriels ont recours à ce type de contrôle, parmi lesquels on peut citer : l'industrie des canalisations et du stockage notamment dans les secteurs du pétrole et du gaz, le nucléaire, l'automobile, le chemin de fer, l'aéronautique, l'aérospatial, ...

Ce type de contrôle a pour but de détecter le ou les défauts présents dans la pièce. Il est important ensuite de les dimensionner et de les identifier. Par exemple, la taille d'une fissure détectée dans un matériau peut être incluse dans le calcul de la mécanique de la rupture afin d'estimer la durée de vie de ce matériau fissuré, et par conséquent, la durée de vie de l'installation industrielle.

Les méthodes de contrôle non destructif sont assez nombreuses, elles résultent de la mise en œuvre des principes et techniques physiques ; le choix d'une méthode de contrôle est guidé par la nécessité de reconnaître les défauts réputés dangereux que l'objet peut contenir [1], [3]. Après une étude bibliographique, nous avons pu avoir une idée globale sur les techniques de contrôle non destructif et de l'importance qu'elle revêt dans le domaine industriel, ce qui nous a permis une meilleure compréhension du problème.

Le choix d'une technique de contrôle dépend de la structure à examiner, des conditions dans lesquelles sera effectué le contrôle, ainsi que des contraintes du temps et de coût [7]. Les différentes techniques utilisées dans le CND sont en perpétuelle évolution afin de répondre aux besoins de plus en plus croissants des industriels, mais elles ont également ouvert les portes du CND à des domaines moins «classiques» comme le contrôle des monuments historiques pour leur restauration ou le contrôle d'équipements sportifs dans le cadre de la sécurité. A cet effet, différentes techniques de contrôle non destructif, plutôt complémentaires que concurrentes, ont été développées et admettent, en outre, des champs d'application. A ce titre, on peut citer la méthode de contrôle visuel la plus simple, la magnétoscopie, la radiographie et les ultrasons qui font l'objet de notre étude.

Les effets ultrasonores sont connus depuis 1812 [17] ; cependant leur utilisation n'a été généralisée qu'à partir de 1945 où les ultrasons ont été utilisés pour la détection des sous-marins, depuis elle n'a cessé d'évoluer et d'occuper plusieurs domaines tels que la biologie, la médecine et l'industrie. Avec l'évolution de l'électronique dans les années 1970, les ultrasons ont connu le sommet de leur évolution [17], [18].

Le présent travail s'inscrit dans le cadre du contrôle non destructif par ultrason de milieux matériels. Certes, différents laboratoires, notamment à l'étranger, ont déjà mené des travaux dans ce domaine, cependant, il nous a été permis de nous initier en la matière et de nous confronter aux difficultés inhérentes aux traitements des signaux ultrasonores. Pour ce faire, nous avons réalisé certaines expériences grâce au concours apporté par le laboratoire de traitement du signal et de l'image du CSC (centre de recherches scientifiques et techniques en soudage et contrôle de Chéraga ).

Le travail qui nous a été demandé, en plus de l'aspect théorique de l'étude, est de faire des applications sur les signaux ultrasonores afin de cerner les différents aspects du problème industriel posé. Nous avons jugé utile de donner quelques définitions, de présenter sommairement les techniques classiques et de montrer l'utilité de l'approche par outil informatique. Toutefois, l'exploitation des techniques de traitement du signal offre un moyen de décortiquer les informations données par les échos ultrasonores afin de détecter des irrégularités et d'effectuer une caractérisation des pièces. Dans ce travail, nous présentons les techniques de traitement du signal utilisées par les différentes approches, à savoir : l'analyse fréquentielle, temps-fréquence et temps-échelle.

Le passage en revue et l'implémentation des différents algorithmes qui s'y rattachent, permettra d'extraire un certain nombre de conclusions et de remarques très utiles pour cerner la problématique posée. Celle-ci est tout simplement liée aux résultats fournis par chacune des méthodes d'analyse, en exploitant les avantages de certaines méthodes pour résoudre les inconvénients des autres.

L'écho ultrasonore est de nature non-stationnaire. Ceci est dû au milieu de propagation non uniforme qui contient des discontinuités provoquant ainsi la variation de la fréquence de l'onde reçue par rapport à l'onde émise [46]. Sachant que l'information utile est contenue dans cette même non-stationnarité et comme la transformée de Fourier suppose la stationnarité du signal à analyser, ajouter à cela le fait que cette transformation ne permet aucune localisation des fréquences dans le temps, nous a conduit à chercher une solution partielle à ce problème par l'introduction de la transformée de Fourier à court terme (TFCT), qui permet une analyse spectrale à court terme sur une fenêtre de taille fixe telle que la condition de stationnarité locale est supposée satisfaite, mais le choix de la taille de la fenêtre limite la résolution spectrale. Pour s'affranchir de la condition de stationnarité imposée à la TFCT, on a recours à la transformée de Wigner-Ville (TWV), qui permet de décrire l'évolution du spectre dans le temps, donc permet d'accéder à une représentation dite Temps-Fréquence de signal. Mais la TWV présente des interactions qui faussent son interprétation. Différentes solutions furent

proposées pour réduire ces termes d'interactions en introduisant un lissage en temps et/ou en fréquence telles la Pseudo Wigner-Ville (PWV) et la Pseudo Wigner-Ville Lissée (PWVL), Choi-Williams, Zhao-Atlas-Marks. Ce qui conduit à l'amélioration de l'image Temps-Fréquence [36].

Une autre alternative à la TFCT est la décomposition en Ondelettes ; cette dernière s'appuie sur une décomposition de signal sur une famille d'ondelettes et non plus sur une famille d'exponentielles comme la transformée de Fourier. L'extension de cette méthode nous a conduit à l'analyse en multirésolution qui permet d'observer un signal à plusieurs échelles d'analyses donc à la fois finement en temps et en fréquence à des échelles différentes [53].

Plusieurs méthodes dans le CND par ultrasons ont été développées ces dernières années, elles sont basées sur le fait que le signal reçu à partir de défaut contient beaucoup d'informations qui ne sont pas prises en considération par les techniques classiques [61]. Ces dernières considèrent que l'information essentielle à prendre en considération est l'amplitude maximale de l'écho de défaut ultrasonore, mais en réalité la possibilité d'acquérir l'information qui caractérise la nature de défaut, sa taille, et son orientation, nécessite l'introduction de plusieurs techniques développées de traitement de signal [56], [62]. Cependant, l'amélioration de détection de défaut, par l'utilisation des techniques de traitement de signal, n'est pas un concept nouveau. Plusieurs techniques ont été déjà utilisées telles que : l'autocorrélation, l'analyse spectrale, l'analyse paramétrique, le filtrage, ... [8], [30], [68]. Dans ces méthodes, le signal est analysé dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel ; l'utilisation conjointe de ces deux analyses est plus appropriée, puisque ce signal est limité en temps et en fréquence [61]. Pour cela, la représentation temps-fréquence des signaux ultrasonores est un outil très répandu pour simultanément, la caractérisation de signal ultrasonore, et particulièrement pour caractériser les effets dispersifs dans les matériaux, et mettre en évidence la variation de la fréquence dans le temps [46], [61]. De même, la transformée en ondelette est utilisée dans plusieurs cas pour filtrer le bruit dans les signaux ultrasonores [61], la caractérisation des défauts [63] et la détermination de la vitesse des ultrasons et leurs atténuations [64], [65]. Un autre aspect récemment introduit dans le CND par ultrasons est qu'à partir des représentations temps-fréquence et temps-échelle, on peut classifier les défauts, chose qui n'est pas possible avec les méthodes classiques [29], [46], [66], [70].

Notre travail apporte, nous l'espérons, une solution qui répond à ce cahier de charge. Pour ce faire, nous avons utilisé Matlab, qui par ses multiples possibilités (Toolbox et interface graphique), offre un outil idéal pour la réalisation de ce travail. Notre choix s'est porté sur la version (5.3) de Matlab qui offre des outils graphiques qui permettent la création

d'interfaces graphiques. La finalité de notre travail est la réalisation d'un Toolbox muni d'une interface graphique d'analyse Temps-Fréquence & Temps-Echelle des signaux, appliqué dans le contrôle ultrasonore des matériaux.

Notre travail se divise en trois grandes parties : la première partie elle-même est partagée en deux chapitres : le premier sera consacré aux techniques utilisées dans le contrôle non destructif et nous mettrons l'accent sur la technique de contrôle par ultrasons. Le deuxième chapitre est destiné aux rappels relatifs sur les ultrasons et leur propagation, aux transducteurs piézo-électriques responsable de leur génération ou de leur détection, ainsi qu'aux différentes techniques de contrôle ultrasonores.

La deuxième partie est aussi partagée en deux chapitres : le premier décrit les limites de l'analyse classique de Fourier et la nécessité d'introduire une analyse Temps-Fréquence, nous présenterons différentes méthodes d'analyse, une discussion va permettre de tirer les points forts et les insuffisances de chacune. Le deuxième chapitre est destiné à la description d'un autre outil récent d'analyse des signaux non-stationnaires, qui est l'analyse Temps-Echelle par l'introduction de la transformée en Ondelette continue et discrète, puis le passage à l'analyse en multirésolution, et nous étudierons d'une manière sommaire l'algorithme de S.Mallat qui permet l'analyse-synthèse de toute sorte de signal.

La troisième partie constitue le cœur de ce document, elle est partagée en trois chapitres : nous présenterons dans le premier, les résultats obtenus par l'application des différentes méthodes sur les signaux ultrasonores, afin de détecter les non-stationnarités (ou les défauts), suivis par des commentaires et des comparaisons sur les résultats obtenus, après détection, on passera à l'identification de ce défaut (volumique ou plan) pour en déduire le degré de nocivité, ce qui constitue une première application des outils de traitement du signal dans le CND. La deuxième application concerne la mesure des fines épaisseurs pour résoudre certains problèmes de résolution en CND. Ces deux applications font l'objet du deuxième chapitre. Le troisième chapitre de cette partie sera consacré à l'aspect logiciel de ce travail. Nous expliquerons le choix de l'environnement et du langage, une description du logiciel conçu sera présenté.

A la fin de ce document, une conclusion générale est faite et des propositions sont données comme perspectives pour ouvrir la voie à des travaux futurs.

## **Chapitre 1 : Techniques de contrôle non destructif (C.N.D).**

### **I- Introduction :**

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D), comme son nom l'indique, a l'avantage de pouvoir porter sur la structure interne d'une pièce mécanique ou d'assemblage sans l'abîmer, contrairement au contrôle destructif par essais mécaniques. Il peut se faire même après l'utilisation de la pièce. Il consiste à mettre en œuvre des méthodes d'investigation permettant d'apprécier sans destruction l'état des pièces et de formuler un avis sur leur aptitude à remplir la fonction à laquelle elles sont destinées ; il s'avère être un outil très efficace pour la maintenance industrielle des installations [1].

Il est donc d'une très grande utilité surtout dans certains domaines (aéronautique, nucléaire, ...), on peut trouver une très grande analogie entre le domaine médical où il s'agit de contrôler l'état d'un patient, et le contrôle non destructif qui diagnostique une pièce.

La définition suppose une bonne connaissance de tous les phénomènes mis en jeu, en particulier de la nocivité des défauts et leur évolution dans le temps, ainsi que les lois générales de la mécanique de la rupture [2].

Il existe plusieurs méthodes utilisées en C.N.D [4], les principales sont :

- Les ultrasons.
- Les rayons X et autres rayonnements.
- Les liquides pénétrants.
- Les courants de Foucault.

Il existe également d'autre comme : la magnétoscopie, le ressuage, la thermographie ... , elles sont toutes de nature différente et chacune a son domaine d'application.

### **II- Différentes méthodes de contrôle non destructif :**

Certaines méthodes sont basées sur l'examen visuel, elles présentent l'énorme avantage d'être simples. Cependant, elles ont pour inconvénient d'être souvent fastidieuses et sujettes aux erreurs humaines.

Dans les industries de pointe, telles que l'aéronautique et les applications nucléaires, les critères d'acceptation ou de rejet d'une fabrication sont très sévères. Ils sont définis en fonction des conditions de fonctionnement où la haute performance et la sécurité doivent être

menées de pair [2]. Le contrôle doit permettre d'obtenir la plus haute probabilité possible de détection, le plus juste dimensionnement et l'exacte orientation de ces défauts [3].

Dans ce qui suit nous présenterons, d'une manière très succincte, les méthodes de contrôle non destructif les plus classiques, insistant sur les ultrasons qui restent une des méthodes les plus utilisées.

### **II-1- Ressuage :**

C'est une méthode très répandue et complémentaire au contrôle visuel, applicable uniquement sur les défauts débouchants, elle permet la détection des fissures de surface. La procédure suivie consiste à nettoyer puis sécher la pièce puis à utiliser un liquide «pénétrant » imprégnant coloré qui pénètre dans toutes les cavités en laissant les fissures pleines, l'excès de ce liquide est éliminé par lavage et après séchage un second produit révélateur est appliqué, ce dernier aspire le liquide d'imprégnation des cavités.

La différence des couleurs du pénétrant et de révélateur permet de visualiser la position de la déféctuosité et d'en donner un ordre de grandeur [2].

L'inconvénient du ressuage est qu'il ne permet pas de dimensionnement des défauts (en profondeur), et l'interprétation des résultats se fait par l'homme (probabilité d'erreurs plus grande). Mais l'avantage du ressuage est qu'il est assez rapide et global, il permet aussi la détection des fissures débouchantes qui sont les plus dangereuses en mécanique [1].

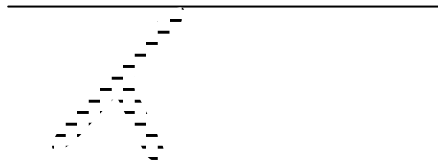
### **II-2- La magnétoscopie :**

C'est une méthode issue du ressuage mais plus développée. Elle concerne uniquement les matériaux ferromagnétiques, ce qui constitue la 1<sup>ère</sup> restriction de cette méthode, et le procédé consiste à magnétiser la pièce à contrôler [2].

On utilise en magnétoscopie, un appareil nommé magnétoscope et un liquide révélateur. Les résultats dépendent de l'observation du champ magnétique créé. Le révélateur est un liquide contenant en suspension des particules magnétique très fines ; la fissure se comporte comme un aimant qui les agglutine en formant un spectre [1].

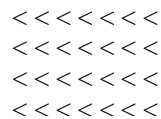
S'il y a un défaut, trois résultats sont possibles :

A) Cas d'une fissure nette et profonde : on observe sur la pièce une forme de chenille posée dessus, c'est-à-dire : il y a un relief.



**Fig (I.1) : Cas d'une fissure nette.**

B) Cas de nombreuses petites fissures : le spectre prend l'allure de banc de poisson.



**Fig (I.2) : Cas de nombreuses petites fissures.**

C) Cas d'un défaut sous la surface : le spectre est alors flou.



**Fig (I.3) : Cas d'un défaut sous la surface.**

### II-3- Courant de Foucault :

Le contrôle par courant de Foucault est indiqué pour les matériaux métalliques conducteurs, il repose sur l'induction de courants électriques dans la masse d'un conducteur [67], le principe de contrôle est donc d'injecter dans une bobine (la sonde) un courant variable, en l'occurrence périodique. Celui-ci crée un champ magnétique, dont le flux varie ; il induit donc dans le matériaux à contrôler des courants, dont l'effet est de contre carter le phénomène qui leur a donné naissance (loi de lenz).

L'ensemble « source + matériau en vis-à-vis » présente alors une impédance  $Z_0$  que l'on peut mesurer aux bornes de la bobine (rapport tension/courant). Si l'on place maintenant la sonde devant une zone présentant un défaut, les lignes de courant induit seront modifiées et l'impédance deviendra  $Z$ .

La mesure de la variation de l'impédance fournira une « image » de perturbation du matériau, c'est-à-dire du défaut.

L'inconvénient de la méthode est qu'elle se limite aux matériaux conducteurs [1].

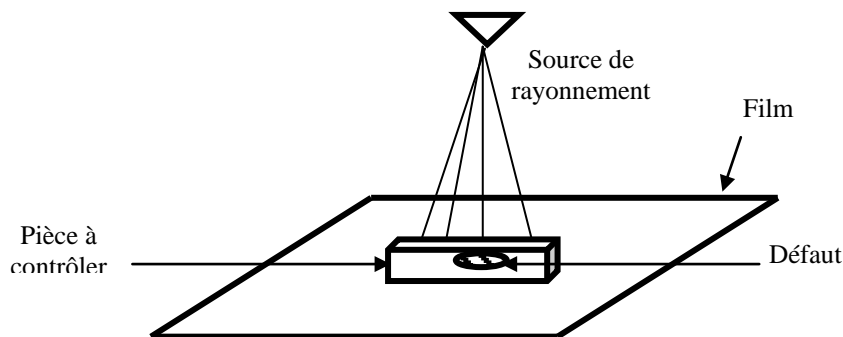
## II-4- Rayonnements :

Il s'agit de la radiographie  $X$  ou  $\gamma$ , qui sont de même nature physique, c'est-à-dire des radiations électromagnétiques, néanmoins, ils ne sont pas produits de la même manière. En effet, les rayons  $X$  sont produits à partir d'appareillages électriques, les rayons Gamma proviennent de la désintégration des noyaux atomiques d'un élément radioactif [5].

La radiographie est la technique de production de radiogramme. Le radiogramme est une image sur émulsion d'un objet traversé par un rayonnement ionisant, le principe de la formation de l'image est en fonction de l'absorption des rayonnements aux différentes épaisseurs et densité du matériau à contrôler [2].

Pour un matériau donné, l'absorption sera d'autant plus forte que la matière à traverser sera épaisse, tout défaut, tout manque ou surplus de matière aura une action sur cette absorption.

Lorsque les photons frappent le film, il se forme des amas de grains d'argent (figure (I.4)). L'importance de ces agglomérats d'argent dépend de l'énergie des radiations, les défauts présents dans la matière se traduisent par une variation locale de la densité des amas de grain.



**Fig (I.4) : Formation d'un film de radiographie.**

L'inconvénient de la méthode est qu'elle nécessite un cliché, et l'observation se fait après la mesure (contrairement aux ultrasons), et qu'elle est relativement dangereuse pour l'homme ; d'autre part lorsque les rayons sont envoyés perpendiculairement sur une fissure par exemple, celle-ci n'apparaît pas forcément sur le cliché.

La méthode possède cependant l'avantage qu'elle se fait avec les rayons qui traversent presque toute matière, et la propagation n'est pas déviée [1].

## **II-5- Les ultrasons :**

Le contrôle non destructif par ultrasons consiste à envoyer dans l'échantillon une onde ultrasonore, créée par un palpeur qui peut jouer le rôle d'émetteur et de récepteur en même temps, puis on mesure l'écho réfléchi par les défauts des pièces contrôlées. Les défauts sont décelés comme des interfaces qui renvoient une partie du faisceau vers le palpeur [3].

La méthode apporte souvent plus d'informations que les autres. Elle est très efficace, son énorme avantage est que les ultrasons ne sont pas du tout dangereux pour l'homme, (d'où l'application de cette méthode aussi dans le domaine médical ) [1].

Son inconvénient est que parfois elle apporte trop d'informations et qu'il y a souvent une notion de bruit à prendre en compte. Le principe de cette méthode sera bien expliqué dans le chapitre suivant.

## **III- Nature des pièces et défauts dans le C.N.D :**

Les pièces inspectées sont de forme et d'épaisseur variables, les zones à risque sont celles soumises à des contraintes physiques importantes. Deux types sont principalement contrôlés :

- ◆ Les soudures, arasées ou non arasées.
- ◆ Les pièces moulées, telles que les coudes.

Les défauts, pouvant intervenir dans les pièces, sont répertoriés par des normes officielles, ils sont divisés en deux grandes catégories : défauts volumiques et les défauts linéaires. Un défaut est considéré comme linéaire si sa largeur est inférieure à deux fois la taille du grain, tous les autres défauts sont considérés comme des défauts volumiques [6]. Une autre classification est basée sur la position du défaut [7], on distingue alors :

### **III-1- Défauts internes :**

Il s'agit de tous les défauts des pièces massives, qu'elles soient issues de forge, de fonderie ou de laminage, il s'agit également des défauts des soudures, domaine extrêmement important du contrôle non destructif. Il peut s'agir de porosités, d'amas inclusionnaires ou de fissures comme des flocons.

Deux techniques sont utilisées en industrie pour la recherche des défauts internes : la *radiographie* et les *ultrasons*. Le critère essentiel de choix entre ces deux techniques réside dans l'accessibilité des pièces ; si les deux faces de la pièce sont accessibles, la radiographie est applicable, si une seule face est accessible, alors seuls les ultrasons sont utilisables.

En cas de choix possible, une présomption sur la nature des défauts recherchés peut être d'un grand secours : la radiographie est sensible à l'absence de matière métallique, donc aux défauts volumiques et les ultrasons sont sensibles aux solutions de continuité, donc aux décohésions par excellence, même si leur volume est très faible.

### **III-2-Défauts de surface :**

La situation dans ce domaine est moins claire, la notion de défaut dépend de l'usage du produit. Les méthodes sont plus nombreuses : courant de Foucault, magnétoscopie, ressuage, ..., renforcées par les puissants outils de traitement d'image et du signal.

D'une façon générale une méthode comme le ressuage, extrêmement simple dans son principe, a une bonne sensibilité aux fissures et une faible productivité. La magnétoscopie est très sensible à de nombreux défauts facilement mécanisable pour atteindre une bonne productivité mais demande quelques précautions d'emploi (défauts facilement masqués).

Les techniques électromagnétiques (exemple : courant de Foucault) fournissent souvent des signaux délicats à interpréter, mais très fiables et permettent, en outre, de détecter des défauts de surface dans des zones non visibles.

### **IV - Contrôle des soudures :**

L'opération de soudage peut concerner des ouvrages industriels pouvant provoquer un danger public, exemple : des chaudières, des réservoirs de stockage de gaz ou de matière chimique, des conduites de gaz ou de pétrole, les lignes de chemin de fer... ; le contrôle de la qualité du joint soudé est indispensable, et l'assurance de fiabilité du joint ainsi que la prédiction de la durée de vie de l'ouvrage sont d'une importance capitale.

Pour détecter la qualité d'un joint soudé, des méthodes de contrôle non destructif sont utilisées et ce pour ne pas détériorer l'ouvrage ou la construction ; les défaut extérieures sont généralement détectable par un examen visuel, tandis que les défauts intérieurs sont détectés par les méthodes déjà citées [2].

Les défauts apparaissent comme une dispersion anormale des grains, ils peuvent se présenter isolés ou en chapelets ; donc lors d'un procédé de soudage, différents types de défauts peuvent apparaître. On distingue deux familles de défauts [8] :

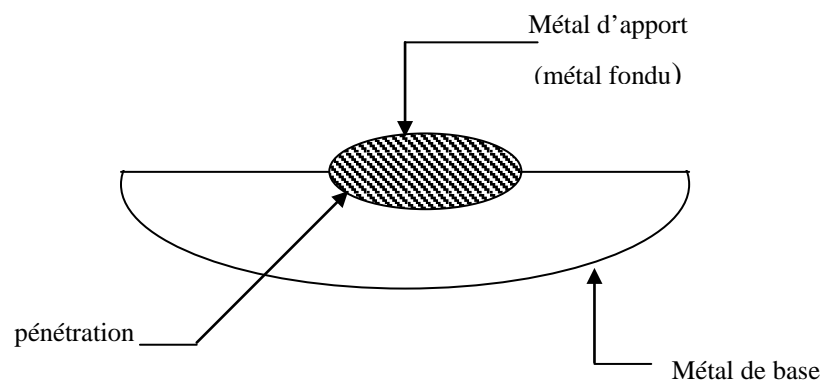
- Défauts linéaires se présentent comme une juxtaposition linéaire de grains.
- Défauts volumiques se présentent comme un amas important de grains, sans direction privilégiée.

Ces défauts peuvent être dû au procédé de soudage ou à des contraintes d'utilisation intenses. Avant de citer les grands types de défauts que le CND cherche à détecter et à identifier, on commence par un aperçu très bref sur le soudage.

#### IV-1- Le soudage :

Le soudage est une technique permettant l'assemblage des pièces, en mettant à profit l'aptitude physique de la liaison des atomes des pièces à souder, en réalisant ainsi la continuité du métal de base : figure (I.5). A cette fin, on utilise l'échauffement localisé ou global de ces pièces pour assurer leur déformation [9].

Le soudage s'applique aussi bien, aux métaux, qu'aux verres, qu'aux caoutchoucs, .... Dans le soudage des pièces métalliques, la liaison atomique du joint nécessite l'intervention d'une forme d'énergie extérieure de type : électrique, chimique, optique (rayon laser) ou mécanique [10]. Le soudage est souvent réalisé à l'arc électrique avec un métal d'apport et à plusieurs passes pour obtenir une bonne pénétration. Le soudage à l'arc est obtenu par une décharge électrique de longue durée qui se produit dans un mélange de gaz et de vapeur ionisé entre deux électrodes.



**Fig (I.5) : Présentation du cordon de soudure.**

#### IV-2- Description d'un joint soudé : [4]

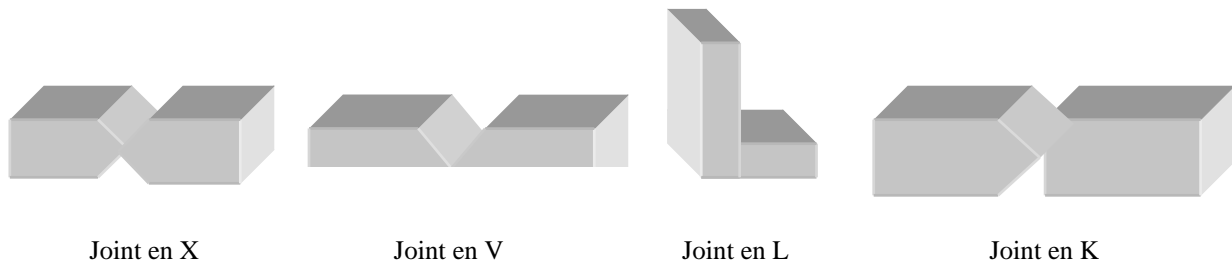
L'étude d'un joint soudé s'intéresse aux zones les plus sensibles de la soudure affectant la qualité de cette dernière. Nous constatons quatre zones (figure (I.5)) :

- Le métal de base : le métal de base est une partie de l'assemblage qui ne subit aucune action thermique.
- La zone affectée thermiquement (ZAT) : c'est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone fondue, c'est une région qui subit des transformations dues au soudage.
- La zone de liaison : cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base est porté à la fusion.

• La zone fondue : elle est obtenue par la fusion du métal de base avec la participation d'un métal d'apport suivi d'une solidification.

### IV-3 - Types de joints : [2]

Il existe plusieurs configuration de dispositions des deux pièces à souder ; les plus courantes sont les joints en : X en V, en L et en K, figure (I.6).



**Fig (I.6) : Types de joints.**

### IV-4- Sources de défaut :

Une soudure est susceptible de comporter des défauts lors ou après le procédé de soudage, à cause des contraintes de fonctionnement (surcharge, pression ...) ; c'est pour cette raison qu'il existe des normes, fixant le choix du métal de base, le produit d'apport et le procédé de soudage [7].

Lors d'un procédé de soudage, différents types de défauts peuvent apparaître [2] :

A- Défauts aux phases préparatoires, avant soudage :

- ◆ Mauvaise qualité du métal de base ou de métal d'apport ;
- ◆ Mauvaise qualification de l'opérateur ;
- ◆ Equipement défectueux ou mal réglé.

B- Défauts aux phases de pré-assemblage :

- ◆ Mauvaise alignement des bords ;
- ◆ Mauvais nettoyage ;

C- Défauts aux phases de soudage :

- ◆ Mauvaise protection ;
- ◆ Variation du courant de soudage, vitesse de soudure, ...

#### **IV-5- Caractérisation des défauts de soudures :**

Les défauts de soudures peuvent être caractérisés par [2], [12] :

##### **1- La position :**

◆ Interne ou externe : interne quand il se trouve à l'intérieur du cordon de soudure, et externe lorsqu'il se trouve dans le métal de base ;

◆ Débouchant: lorsqu'il se trouve sur la surface externe ;

◆ Aligné : plusieurs défauts de même types peuvent se présenter de façon alignée dans la soudure ;

##### **2- La forme :**

◆ Plan ;

◆ Volumique.

##### **3- Les dimensions :**

Les dimensions d'un défaut représentent un indice très important dans son acceptation ou son rejet.

##### **4- Le nombre (l'occurrence) :**

Un défaut de soudure peut être isolé (une fissure unique) ou groupé (un ensemble de petites porosités localisées dans un certain endroit).

#### **IV-6- Défauts de soudures :**

On distingue deux types de défauts, les défauts plans et les défauts volumiques [11], [12] :

##### **IV-6-1- Défaut plan :**

Ce sont des défauts plus ou moins rectilignes, ils présentent soit un manque de liaison inter-matières ou une rupture du métal. Ces défauts sont les plus nocifs.

##### **A- Fissure :**

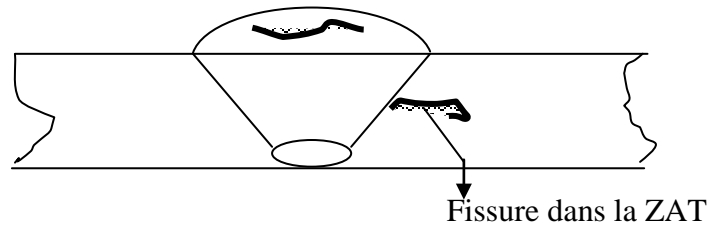
C'est un manque de continuité à deux dimensions qui peut se produire en cours de refroidissement ou sous l'effet de contrainte à l'état solide. Les différentes formes de fissuration sont les suivantes :

##### **➤ Fissure transversale :**

Fissure dont la direction est sensiblement perpendiculaire à l'axe de la soudure, elle peut se situer dans le métal fondu, dans le métal de base ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT).

### ➤ Fissure longitudinale :

Fissure dont la direction principale est voisine de celle de l'axe de la soudure, elle peut se situer dans le métal fondu, dans la zone de liaison ou dans le métal de base.

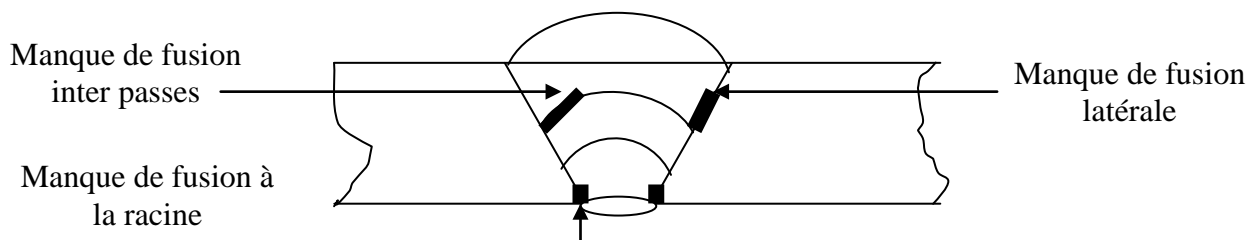


**Fig(I.7) : Cordon de soudure présentant des fissures.**

### B- Manque de fusion :

C'est le manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base ou entre deux couches contiguës de métal déposé, il y 'a lieu de distinguer :

- Le manque de fusion latéral qui intéresse les bords à souder.
- Le manque de fusion entre passes.
- Le manque de fusion à la racine de la soudure.



**Fig(I.8) : Cordon de soudure présentant un manque de fusion.**

### C- Manque de pénétration :

C'est l'absence partielle de fusion des bords à souder, liaisons subsistées à un interstice entre ces bords.

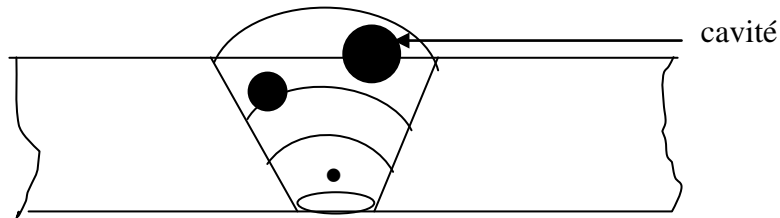
### IV-6-2- Défaut volumique :

Ce sont des défauts occupant dans le joint un volume, ce dernier se manifeste sur le radiogramme par une tache à deux dimensions de densité différente de celle du métal du joint. Les défauts volumiques se définissent donc par la présence de corps étrangers de forme quelconque dans le joint soudé

**A- Cavité (soufflure) :**

Cavité formée par un (ou des ) gaz, nous distinguons :

soufflure sphéroïdale ; soufflure de forme sensiblement sphérique.



**Fig(I.9) : Cordon de soudure présentant des cavités.**

**B- Inclusion :**

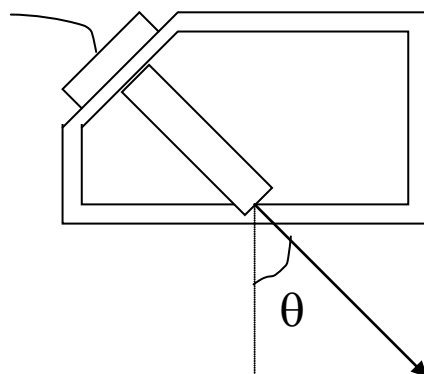
➤ **Inclusion solide** : corps solide étranger emprisonné dans la masse du métal fondu.

➤ **Inclusion du laitier** : résidu de laitier emprisonné dans la masse fondue. On peut rencontrer, suivant leurs répartitions, des inclusions de laitier alignées (ou en chapelets), isolées ou autres.

➤ **Inclusion de flux** : résidu de flux emprisonné dans la masse de métal fondu.

**IV-7- Choix du palpeur dans le contrôle des soudures : [1], [29]**

Tous les défauts listés précédemment sont très bien détectés par les ultrasons. Dans l'inspection des soudures par ultrasons un transducteur à champ angulaire ( $\theta$ ) est utilisé. Ce qui évitera toute ambiguïté quant à la localisation des défauts.

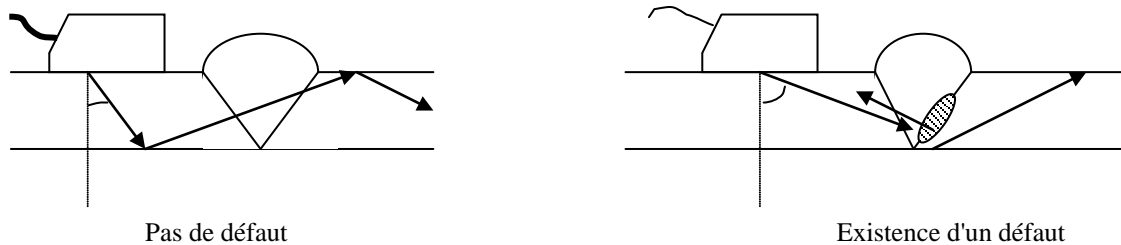
**IV-7-1-Palpeur d'angle :**

**Fig (I.10) : Palpeur d'angle.**

#### IV-7-2- Principe de contrôle :

Le faisceau acoustique traverse le cordon de soudure, si celui-ci ne comporte pas de défaut, aucun écho ne sera renvoyé, à l'inverse si le faisceau apparaîtra sur l'oscilloscope.

Il faut déplacer le palpeur afin d'explorer tout le cordon de soudure.



**Fig (I.11) : Contrôle des soudures.**

#### V- Conclusion :

Dans ce chapitre on a d'abord donner un bref passage en revue des techniques du contrôle non destructif, et plus particulièrement : la méthode ultrasonore ; grâce à ses nombreux avantages, cette méthode tient actuellement, dans la recherche et l'industrie, une place importante au sein des essais non destructifs. L'étude détaillée de cette méthode fera l'objet du chapitre suivant ; elle présente par rapport aux autres techniques les avantages suivants :

- ◆ Pouvoir de pénétration important.
- ◆ Précision dans la localisation des défauts.
- ◆ Rapidité.
- ◆ Possibilité d'utiliser une seule face de l'objet contrôlé.
- ◆ Aucune précaution particulière sur le plan hygiène et sécurité.
- ◆ Aucun danger à signaler.

Le contrôle ultrasonore des soudures, constitue une partie extrêmement importante du C.N.D. Ce contrôle nécessite plusieurs passages avec des positions différentes du palpeur pour examiner l'ensemble de la soudure et il nécessite une importante interprétation des signaux qui ne peut être faite que par des spécialistes.

## Chapitre 2 : Généralités sur les ultrasons.

### I- Introduction :

Le terme " ultrason", par analogie aux micro-ondes (électromagnétisme), est utilisé pour définir une vibration mécanique, dont la propagation n'est possible que dans un milieu matériel fluide ou solide [15].

Depuis de nombreuses années, les ondes ultrasonores de faibles amplitudes et de fréquences appartenant au domaine du Méga-Hertz sont largement utilisées dans l'industrie et en médecine. Le développement des diverses applications faisant appel aux ultrasons se confirme de plus en plus.

Le rayonnement ultrasonore est d'un usage très répandu, car ses propriétés sont très intéressantes : son amortissement dans les métaux est généralement faible ce qui implique une bonne pénétration, sa longueur d'onde est liée au pouvoir séparateur de la détection qui est de l'ordre de grandeur des hétérogénéités à découvrir. De plus, la technologie des appareils bénéficie pour une grande part de l'électronique, mise au point pour les techniques voisines fort développées, du radar et de traitement de l'information [13], [16].

La suite de ce chapitre est consacrée d'abord à la nature des ondes acoustiques, ensuite au lois régissant leur propagation, leur atténuation, l'impédance acoustiques, production et détection des ultrasons...

### II- Le signal ultrasonore :

#### II-1- Définition :

On appelle ultrasons les vibrations mécaniques de même nature que le son, mais de fréquence très élevée (20 Khz à plusieurs centaines de Mhz) pour qu'une oreille humaine ne puisse la percevoir.

Les ultrasons peuvent se propager dans les gaz, les liquides ou les solides, c'est-à-dire dans toute substance possédant des propriétés élastiques. Pour cela, la physique des ondes élastiques de fréquences supérieures à 20 Khz est appelée : science des ultrasons [13], [14].

La propagation des ultrasons est rectiligne, les discontinuités brusques sur le trajet de l'onde ne sont pratiquement pas contournées. Toute frontière ou écran s'il est bien orienté, empêche l'onde de passer et la renvoie partiellement vers sa source, exactement comme le son est quelquefois renvoyé sous forme d'échos (exemple d'échos en montagne).

En contrôle non destructif par ultrasons, la plage de fréquence utilisée est généralement de 1 Mhz à 15 Mhz, cette plage n'est pas du tout exhaustive, car pour certains détails il faut augmenter la fréquence [1].

## **II- 2 - Spectre des ultrasons :**

Comme pour le spectre électromagnétique, celui des ultrasons est décomposé en termes [15] :

- 1- d'acoustique sous-marines traditionnelle qui occupe la bande de 20 à 40 Khz environ;
- 2- d'application médicale et de contrôle non destructif (C.N.D) qui occupent quant à eux la bande allant de 1 à 10 Mhz ;
- 3- d'acousto-optique et de traitement du signal (filtre, lignes à retard, ...) qui occupent la bande de 100 Mhz à quelques Ghz ;
- 4- des fréquences au-delà de 10 Ghz appelés hyperfréquences sont encore au stade de la recherche.

En deçà de 20 Khz, on a affaire à des sons ou des infrasons, et au-delà des 500 Mhz, on a affaire à des hypersons [17], [18].

Notons que les fréquences utilisées en C.N.D par ultrasons conduit à des longueurs d'onde de l'ordre du millimètre, ceci constitue un avantage, car la longueur d'onde est suffisamment petite devant les dimensions de la source et lui confère un comportement voisin de celui de la lumière en optique géométrique [15]. Dès lors, on pourra observer les phénomènes de propagation rectiligne, de réflexion et de réfraction. De plus, la longueur d'onde est compatible avec les dimensions des défauts que l'on recherche et reste toutefois plus grand que les dimensions du grain.

## **III- Propagation des ultrasons :**

### **III-1- Lois de propagation :**

Les milieux de propagation sont naturellement anisotropes, exemple le quartz, mais certains matériaux peuvent être considérés comme isotrope, comme par exemple dans notre cas les aciers ferriques.

Une déformation produite en un point d'un milieu élastique, homogène, linéaire et isotrope, se transmet de proche en proche dans ce milieu à une vitesse finie. Ce mouvement ondulatoire est régi par une équation aux dérivées partielles qui s'écrit dans le cas d'une onde plane se propageant suivant l'axe des X sous la forme [19] :

$$\frac{\delta^2 F}{\delta^2 t} = V^2 \frac{\delta^2 F}{\delta^2 x} \quad (\text{II.1})$$

Où :  $V$  représente la vitesse de propagation de l'onde.

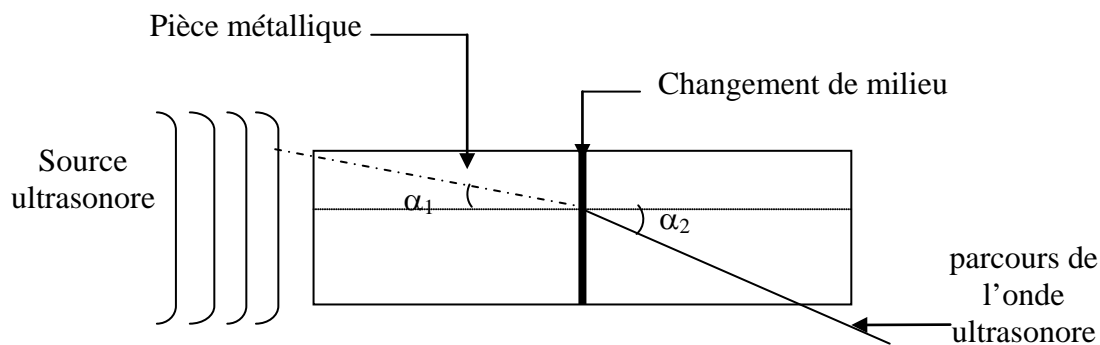
la solution de l'équation est de forme :

$$F(x, t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (\text{II.2})$$

La solution générale de l'équation (II.1) s'exprime comme la superposition de deux mouvements ondulatoires se propageant dans les sens opposés [14], [19], [20].

La propagation d'ultrasons dans les gaz et les liquides se limite à celle d'ondes longitudinales. Le point essentiel de la propagation ultrasonore dans les solides massifs est l'existence de deux modes de vibrations (longitudinale et transversale) qui se propagent à des vitesses différentes. Dans le mode longitudinal, les atomes métalliques vibrent parallèlement à la direction de propagation, alors que dans le mode transversal, la vibration est perpendiculaire à la direction de propagation [21].

Les vitesses de propagation dépendent du mode de vibration des particules du milieu, ainsi que des constantes élastiques des matériaux, elles sont différentes d'un matériau à un autre, ce qui implique une conséquence importante lorsqu'un faisceau ultrasonore frappe obliquement une surface de séparation entre deux matériaux différents : quatre faisceaux sont créés, deux réfractés et deux réfléchis (longitudinal et transversal) ; pour chacun d'eux, les angles de réflexion et de réfraction suivent la loi de **Descarte** (figure : II.1 ).



**Fig (II.1) : Onde ultrasonore lors d'un changement de milieu.**

La loi de Descarte est donnée par [14], [19] :

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2} \quad (\text{II.3})$$

avec :  $\alpha_1$  : Angle d'incidence.

$\alpha_2$  : Angle de réflexion.

$V_1$  : Vitesse de l'onde ultrasonore dans le milieu d'incidence.

$V_2$  : Vitesse de l'onde ultrasonore dans le milieu de réflexion.

### III-2- Types d'ondes :

Rappelons que pour des milieux solides isotropes et illimités, il n'existe que deux classes fondamentales d'ondes, à savoir les ondes longitudinales ou ondes de types L, et les ondes transversales ou de type T [15].

Ainsi les ondes L sont des ondes de compression caractérisées par un déplacement des particules parallèlement à la direction de propagation de vitesse de phase notée  $V_L$ . On parle dans ce cas de polarisation colinéaire au vecteur d'onde  $\vec{K}$  tel que :  $|\vec{K}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Par ailleurs, lors de passage d'une onde plane longitudinale une variation de volume occupé par un nombre donnée de particule est observée.

On démontre en théorie des milieux élastiques que la vitesse de propagation de ces ondes  $V_L$  est liée aux caractéristiques élastiques du matériau, par exemple le module de **Young** et le coefficient de **Poisson** [7] :

$$V_L = \sqrt{\frac{e(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-\sigma)}} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $e$  : module de **Young** ;

$\sigma$  : coefficient de **Poisson** ;

$\rho$  : masse volumique.

Les ondes T sont des ondes de cisaillement caractérisées par un déplacement des particules orthogonal à la direction de propagation de vitesse de phase notée  $V_T$  telle que :

$$V_T < \frac{V_L}{\sqrt{2}}.$$

Dans le cas pareil, on dit que la polarisation est orthogonale au vecteur d'onde :  $\vec{K}$ . Contrairement aux ondes de type L, lors du passage d'une onde plane transversale, le glissement des plans parallèles ne donne lieu à aucune variation de volume [15]. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides, car leur existence est liée à une résistance au cisaillement, que ne possèdent ni les liquides ni les gaz [7].

De la même façon, on montre que la vitesse des ondes sonores transversales  $V_T$  est liée aux caractéristiques des matériaux par la relation :

$$V_T = \sqrt{\frac{e}{2\rho(1 + \sigma)}} \quad (\text{II.5})$$

A titre indicatif, on donne au tableau (II-1) les vitesses de propagation (de phase) des ondes longitudinales et transversales dans quelques milieux [7], [22] :

Matériau	Vitesse des ondes longitudinale (m/s) (*)	Vitesse des ondes transversales (m/s) (*)
Aluminium	6200	3100
Laiton	4700	2140
Cuivre	4600	2140
Plomb	1960	630
Acier	5920	3250
Verre	5650	3280
Plexiglas	2670	1090
Air	330	---
Eau	1470	---
Mercure	1450	---

(\*) : Valeurs variables suivant la composition et la structure du matériau.

**Tableau (II.1) : Vitesse de propagation des ondes longitudinales et transversales dans certains matériaux.**

En dehors de ces deux types d'ondes, il existe des ondes ultrasonores qui se propagent à la surface des matériaux [7], [15] :

Dans le cas de matériaux épais devant la longueur d'onde, les ondes de surface, dites ondes de **Rayleigh**, intéressent une faible épaisseur du matériau au voisinage de la surface libre, le mouvement des particules est simultanément parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation. Ce double mouvement explique la très grande sensibilité de ce type d'onde à toute discontinuité, quelle que soit son orientation.

Les ondes de plaques, dites ondes de **Lamb**, correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque, ces ondes contrairement aux précédentes, sont dispersives, c'est-à-dire que la vitesse de propagation dépend de la fréquence ; l'interprétation des signaux obtenus s'en trouve considérablement compliquée.

### III-3- Champ ultrasonore :

Le trajet des ondes ultrasonores est caractérisé par deux zones, la zone proche (près du transducteur) où le champ est dirigeant, l'énergie est maximale, et la zone lointaine où le faisceau est divergent et l'énergie est minimale [17], [18].

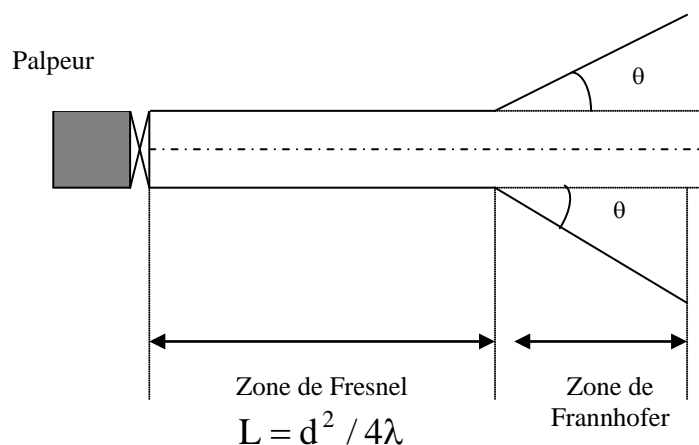
La première zone porte le nom de zone de **Fresnel**, et la deuxième zone est appelée : zone de **Frannhofer** ; le faisceau est quasiment cylindrique dans la zone de **Fresnel** et il est divergent dans la zone de **Frannhofer**, selon un demi-angle au sommet  $\theta$  [7] :

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

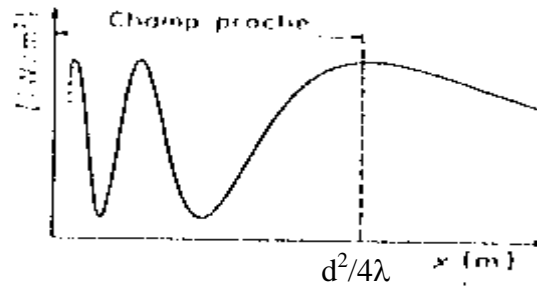
Avec D : diamètre initial du faisceau.

$\lambda$  : longueur d'onde.

On limite notre étude à une distance :  $L = \frac{D^2}{4\lambda}$ , en deçà de cette distance, le champ subit des fluctuations brusques.



**Fig (II.2) : Divergence des faisceaux.**



**Fig (II.3) : Intensité acoustique sur l'axe en fonction de la distance à l'émetteur.**

On remarque que la meilleure distance entre l'émetteur et la pièce à contrôler est  $L=d^2 / 4\lambda$  , car elle correspond à la distance où l'intensité  $I$  du champ est presque constante.

### III-4- Atténuation des ondes ultrasonores :

L'amplitude d'une vibration, qui se propage dans un milieu, n'est pas constante durant sa progression. Jusqu'à présent nous n'avons pris en compte que l'atténuation due à la divergence du faisceau ; en plus, dans un milieu matériel, les chocs entre atomes, notamment d'un atome au suivant, ne sont pas purement élastiques. Aussi, la propagation d'ondes acoustiques s'accompagne d'une perte d'énergie mécanique sous forme de chaleur qui se traduit par une atténuation.

Cependant, cette dernière est d'autant plus faible que le milieu de propagation est ordonné. En effet, un milieu liquide donne lieu à des pertes plus importantes que celle dans un solide [15].

#### Causes de l'atténuation [1] :

- La perte d'énergie par effet thermique. En effet, toute vibration entraîne perte de chaleur.
- La densité du matériau facilite plus ou moins le passage de l'énergie.
- La taille des grains va créer une dispersion.
- La fréquence de la vibration.

Donc l'atténuation est fonction de la fréquence de l'onde, du matériau et de la distance parcourue par l'onde.

L'expérience montre que les ondes ultrasonores sont amorties selon une loi exponentielle ( $e^{-\alpha r}$ ) [15], [23], [28]. Ainsi, quatre situations en rapport avec le coefficient

d'atténuation  $\alpha$ , et fonction du diamètre moyen ( $d$ ) des grains constituant le matériau, peuvent être expérimentalement dégagées et sont illustrées dans le tableau (II.2) :

Cas	$\lambda$	$\alpha a$	$\alpha s$
1	$\lambda \gg 2\pi d$	$A_1 f$	$A_2 d^3 f^4$
2	$d \ll \lambda \ll 2\pi d$	$B_1 f$	$B_2 d f^2$
3	$\lambda \ll d$	$C_1 f$	$C_2 / d$
4	$\lambda \ll d$	$D_1 f + D_2 f^2$	$D_3 / d$

**Tableau (II.2) : Coefficient d'atténuation de l'onde ultrasonore.**

Où :  $\alpha a$  est le coefficient d'absorption dû à l'absorption de l'énergie sous forme de chaleur,  $\alpha s$  est le coefficient d'atténuation dû à la diffusion, résultat de l'anisotropie, et  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ , sont des constantes typiques du matériau considéré.

On peut résumer cette atténuation par :

**A- L'absorption** : Dans ce cas l'énergie ultrasonore est directement convertie en chaleur elle est prédominante dans les matériaux plastiques et synthétiques.

**B- La diffusion** : Se traduit par une dissipation d'énergie sous forme de rayonnement dans toutes les directions de l'espace. La diffusion est d'autant plus importante que les hétérogénéités sont grandes et elle augmente aussi avec la fréquence.

### III-5- Impédance acoustique :

L'action du matériau sur la propagation des ondes ultrasonores est caractérisée par son impédance acoustique  $Z$ , qui est définie par [1], [14], [19] :

$$Z = \rho \cdot V \quad (\text{II.6})$$

Où:  $\rho$  est la masse volumique spécifique du matériau en ( $\text{Kg/m}^3$ ).

$V$  est la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau ( $\text{m/s}$ ).

$Z$  est l'impédance acoustique en ( $\text{Kg/m}^2 \text{ s}$ )

C'est une propriété acoustique importante des milieux matériels car elle conditionne le comportement des ondes à l'interface séparant deux milieux de propriétés différentes [15].

Plus il est important de transmettre une grande énergie, plus il est important que les impédances acoustiques des deux milieux soient voisines. En détection de défaut, les fissures

qui sont des interfaces métal-gaz, ont un très bon coefficient de réflexion, puisque simultanément les masses volumiques et les vitesses des ultrasons sont très différentes [7].

L'impédance acoustique de l'air est 100 000 fois plus petite que celle de l'acier, dans le C.N.D ces résultats expliquent qu'il est obligatoire de coupler, acoustiquement, le transducteur à une pièce à contrôler par un milieu autre que de l'air.

**Exemple:**

- L'eau : principe de l'immersion.
- Couplant (huile, glycérine, gel, ...) : En cas de contrôle par contact.

#### **IV- Génération des ultrasons :**

On ne peut parler d'ultrasons et de leur propagation sans évoquer les dispositifs leur donnant naissance : "les transducteurs" ou " les palpeurs". Ces derniers sont des dispositifs destinés à convertir l'énergie électrique, qu'on lui envoie, en énergie acoustique et inversement, l'énergie mécanique qui lui parvient de la pièce en énergie électrique ; donc c'est un convertisseur d'énergie [24].

On peut citer certains types de transducteurs :

- Transducteurs électromagnétiques.
- Transducteurs électroacoustiques.
- Transducteurs piézo-électriques.

Seuls les capteurs piézo-électriques couvrent tout le spectre ultrasonore ; actuellement, avec les semi-conducteurs piézo-électriques déposés sous forme d'une couche mince dans des cavités électromagnétiques, il est possible de produire des oscillations de l'ordre du gigahertz [25].

#### **IV-1- Piézo-électricité :**

La Piézo-électricité vient du mot grec "piezen" ou "pression", elle signifie donc électricité par pression [24]. C'est une propriété réversible, à des degrés divers selon le matériau [7].

##### **A- Effet direct :**

Il a été mis en évidence par **Pierre curie** en 1881, si on applique à un échantillon de corps piézo-électrique une contrainte (pression) T, il apparaît sur la matière une densité de charge Q proportionnelle à la contrainte appliquée [7] avec :

$$Q = e \cdot T$$

Q: densité de charge ;  
T: pression appliquée ;  
e : module de **Young**.

### **B- Effet inverse :**

Il a été mis en évidence par **Lippman** ; si on soumet à un champ électrique un échantillon piézo-électrique, celui-ci subit une déformation S proportionnelle au champ électrique E [7], [24] avec :

$$S = e \cdot E$$

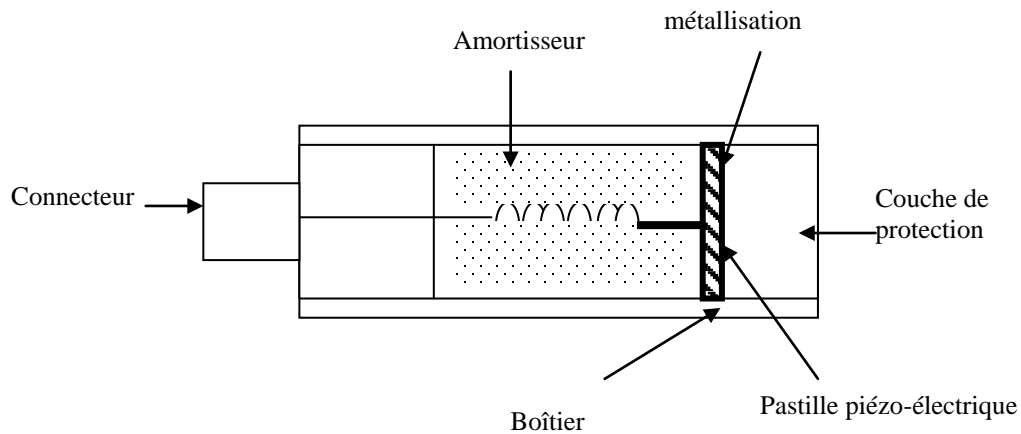
E: module du champ appliqué ;  
S: déformation ;  
e: module de **Young**.

Cette relation est fondamentale pour la production d'ultrasons. En effet, si on applique une tension alternative, la lame se contracte et se dilate à la même fréquence que la tension, cependant l'effet piézo-électrique est faible. Pour obtenir des amplitudes de variations plus grandes, on choisit l'épaisseur de la lame en fonction de la fréquence d'excitation de manière à provoquer la résonance du cristal.

### **IV-2- Transducteur piézo-électrique :**

Dans un tel transducteur, l'élément sensible est généralement un disque ou une pastille taillée dans un matériau piézo-électrique (céramiques, piézo-électriques) circulaire ou rectangulaire [7], dont les faces parallèles sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion, reliées au dispositif électronique d'excitation ou de détection par l'intermédiaire d'un câble coaxial [25].

Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur, la pastille est posée sur un bloc amortisseur, réalisé en matériau dense et très absorbant, il réduit l'importance du phénomène de résonance mécanique du disque. La face antérieure du disque n'est pas directement en contact avec le milieu de propagation mais elle est généralement protégée par une couche mince qui joue le rôle d'adaptateur d'impédance acoustique, l'ensemble est entouré d'un boîtier généralement métallique qui sert à la fois de blindage électrique et de protection mécanique [24] : figure (II.4).

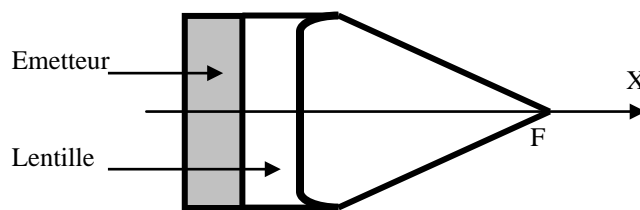


**Fig(II.4) : Schéma d'un transducteur piézo-électrique.**

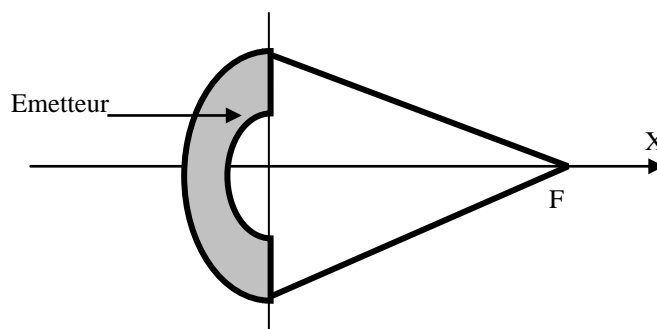
#### IV-3- Focalisation des ondes ultrasonores : [7]

Une gamme importante de palpeurs est constituée par les palpeurs focalisés. Ce sont des palpeurs piézo-électriques classique qui, au lieu de posséder une couche avant de protection constituée par une lame à face parallèle, possèdent en face avant une lentille acoustique. La géométrie des faisceaux s'en trouve considérablement modifiée : il est ainsi possible de concentrer l'énergie ultrasonore dans une très petite zone (petit cylindre), et on n'est plus gêné par les réflexions parasites provenant des points situés de part et d'autre de la zone choisie, et donc augmenter simultanément la sensibilité globale et la résolution du contrôle. On rencontre deux types d'émetteurs focalisés :

- Les émetteurs plans associés à une lentille acoustique, figure (II.5).
- Les émetteurs en forme d'auges ou de coupelles hémisphériques, figures (II.6).



**Fig(II.5) : Focalisation par une lentille acoustique**



**Fig (II.6) : Focalisation par coupelles hémisphériques.**

## V- Choix de la technique de contrôle :

Pour le contrôle non destructif des matériaux par ultrasons, on peut citer deux principales méthodes d'examen : la méthode par transmission et la méthode par écho. La dernière méthode citée a été retenue pour les avantages qu'elle présente tels que [1] :

- Localisation précise des défauts.
- Possibilité de n'utiliser qu'un seul transducteur en émission-réception.
- L'accès, à une seule surface du matériau à contrôler, est suffisant pour effectuer le contrôle.

### V-1- Méthode par transmission :

Cette méthode consiste à placer deux transducteurs de part et d'autre de la pièce à étudier, le transducteur émetteur émet une onde ultrasonore dans la pièce à étudier, si un défaut existe au sein du matériau, l'onde ultrasonore est y réfléchi sélectivement. Si on place un second transducteur en regard de l'émetteur sur l'autre face de la pièce, et qui sert uniquement de récepteur, on recueillera une énergie plus faible en présence de défaut.

Cette perte d'énergie est d'autant plus importante que la dimension de l'hétérogénéité soit grande, quand un défaut intercepte le signal, une partie de l'énergie ultrasonore est arrêtée et par conséquent l'énergie parvenant au capteur récepteur est diminuée [1], [11].

La répartition ponctuelle de la pression acoustique sur la surface du récepteur sera fonction en quelque sorte de "l'opacité" du défaut aux ultrasons, par analogie aux ondes lumineuses, on dit que l'on a l'ombre du défaut projetée sur la surface du récepteur, d'où son appellation : méthode de l'ombre, figure (II.7).

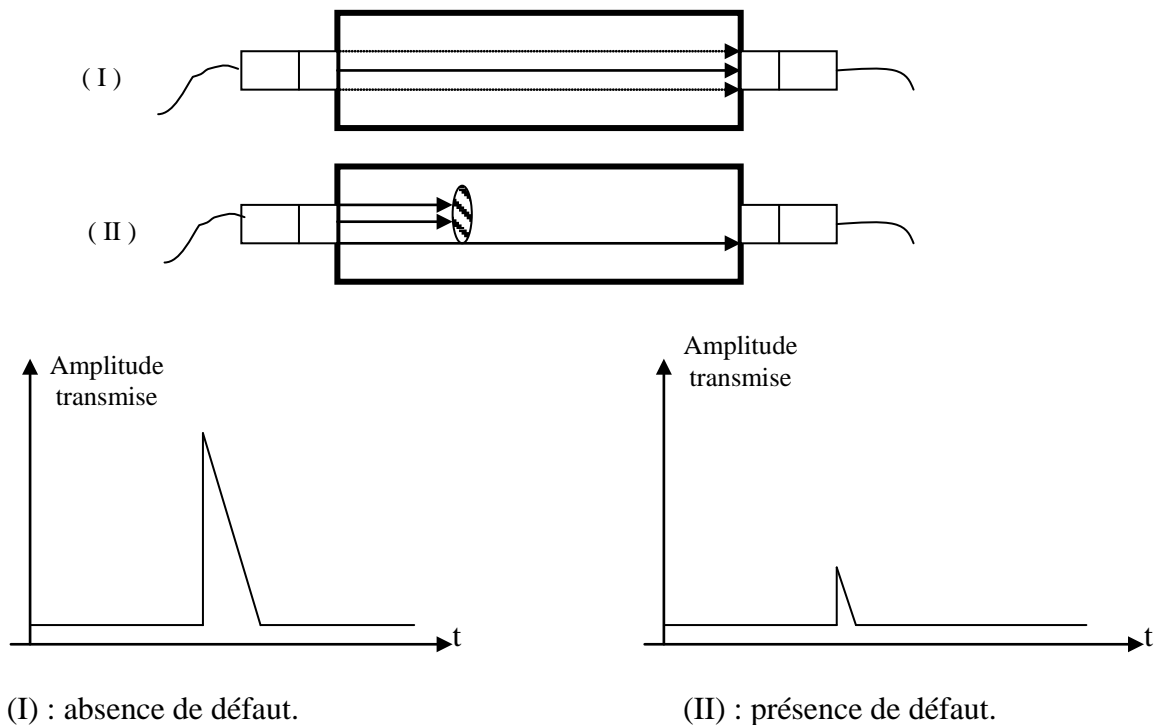
En déplaçant un récepteur de petites dimensions, on peut évaluer les dimensions du défaut. Cette technique est très ancienne (**Sokolov 1930**).

Le contrôle par transmission a été largement utilisé dans les années 50, et a pratiquement disparu dans les années 70 au profit du contrôle par échographie [13].

Cette technique présente les inconvénients suivants :

- Elle nécessite l'emploi de deux transducteurs.
- La pièce doit être exploitée sur les deux faces parallèles opposées, ce qui est rarement le cas dans la pratique.
- L'utilisation d'une émission continue crée dans la pièce des ondes stationnaires qui peuvent perturber les essais, on peut pallier cette difficulté, en utilisant une émission pulsée.
- Elle ne permet pas une automatisation simple des contrôles.

La diminution du signal peut être la conséquence de nombreux autres phénomènes que des défauts proprement dits [7] : mauvais couplage dans le cas de contrôle par contact, changement d'état de surface du métal, désalignement des palpeurs émetteur et récepteur, changement de la structure de la pièce,... . De plus quand un défaut est détecté, aucune information sur sa position ne peut être obtenue immédiatement, ce qui, est extrêmement gênant dans le cas de l'analyse de nocivité des défauts,.



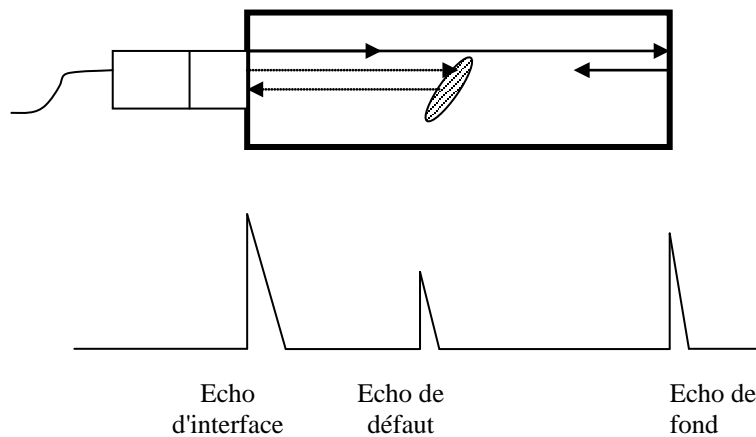
**Fig(II.7) : Contrôle par transmission.**

## V-2- Méthode par écho :

Cette méthode est la plus employée et la plus utilisée dans le contrôle ultrasonore, elle est appelée : l'échographie ; elle consiste à utiliser un seul transducteur en émetteur-récepteur, dans le cas où le palpeur est appliqué au contact de la pièce par l'intermédiaire d'un film de couplage, l'échogramme correspond au type obtenu en figure (II.8). On excite le palpeur au moyen d'une brève impulsion électrique, à cela correspond un premier écho appelé écho d'émission, ce train d'onde progresse dans la pièce et en l'absence de défaut, vient frapper la face arrière de la pièce contrôlée, sur laquelle il est réfléchi, il refait alors la progression inverse, jusqu'au palpeur où il génère un signal électrique correspondant à l'écho de fond.

En cas de présence d'un défaut dans l'épaisseur de la pièce, celui-ci, quand il est frappé par la bouffée d'ondes ultrasonores, en réfléchit une partie, et pendant que le train d'ondes

principal poursuit sa progression vers le fond, l'onde réfléchi sur le défaut revient vers le palpeur où elle génère un écho de défaut [7], [30].



**Fig (II.8) : contrôle par échographie**

Cette représentation est appelée représentation de type : A-Scan [26].

De point de vue de l'interprétation, tout se passe comme si les faces avant et arrière de la pièce étaient indiquées par les échos d'émission et de fond et la présence d'un défaut signalée par un écho dont la position sur l'écran entre les deux autres est proportionnelle à sa profondeur, il faut garder à l'esprit que ces distances sur l'écran correspondent à des temps de vol, aller retour de chaque impulsion ultrasonore.

En résumé, au lieu de détecter, comme dans le cas précédent l'énergie transmise, on cherche l'énergie réfléchi et on utilise généralement une émission pulsée. Toute variation de cette énergie correspond à la présence d'un défaut.

## **VI- Les différentes techniques de mise en œuvre :**

Les ultrasons aux fréquences utilisées (1 à 10 Mhz), ne se propagent pas dans l'air, sachant que  $V_{eau} \approx 1500$  m/s et que  $V_{air} \approx 340$  m/s, il y a une très mauvaise transmission des ondes en présence d'une interface air /solide, et les ultrasons sont très fortement atténués [13], [16]. Pour assurer le passage des ultrasons entre le transducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre les deux un milieu dit de *couplage*, qui consiste à diminuer le phénomène de rupture d'impédance acoustique et pour garder la proportion d'énergie transmise sensiblement constante lorsque le transducteur se déplace. Deux techniques existent pour assurer ce couplage : le contrôle par contact et le contrôle par immersion [1], [7].

### **VI-1- Contrôle par contact :**

Le transducteur est directement placé sur la pièce à contrôler, la liaison acoustique est assurée par un film d'agent de couplage qui est généralement soit une graisse ou une huile. Cette technique est surtout employée lors de contrôles manuels, c'est-à-dire lorsque le déplacement du traducteur est assuré par un opérateur.

Cette méthode est très simple pour la mise en œuvre, puisqu'elle ne nécessite qu'un traducteur et un appareil de contrôle, en plus, si on déplace fréquemment le transducteur sur une pièce rugueuse, il peut en résulter une légère usure de la face externe du transducteur ; le film de couplage contribue également à diminuer cette usure. Mais elle présente deux inconvénients : premièrement elle nécessite l'intervention d'un opérateur pour le déplacement du traducteur ; deuxièmement la constante du couplage n'est pas bonne.

### **VI-2- Contrôle en immersion :**

Cette méthode se développe pour pallier aux deux inconvénients de la méthode de contrôle par contact. Le traducteur est situé à une certaine distance de la pièce, le couplage est assuré par un liquide, habituellement de l'eau. Cette technique est d'une mise en œuvre délicate lorsque les pièces sont lourdes et encombrantes. Mais elle se prête facilement à l'automatisation.

L'utilisation de cuves dans lesquelles les pièces sont immergées permet de résoudre de nombreux problèmes : le couplage étant bien assuré par l'eau, les palpeurs ne sont plus situés au contact de la pièce mais sont fixés à l'extrémité d'un bras manipulateur permettant, des rotations suivant plusieurs axes et sa translation verticale. Ce bras est lui-même déplacé dans un plan horizontal. Il est ainsi possible de positionner le capteur comme on le désire.

Les progrès des systèmes de commandes ont rendu possible, dès le début des années 80 le contrôle à grande vitesse de pièces de géométrie complexe.

### **VII- Chaîne ultrasonore avec module d'acquisition sur micro-ordinateur :**

L'opération est réalisée par un dispositif de génération des ultrasons, d'enregistrement des signaux et le pilotage informatique de l'ensemble.

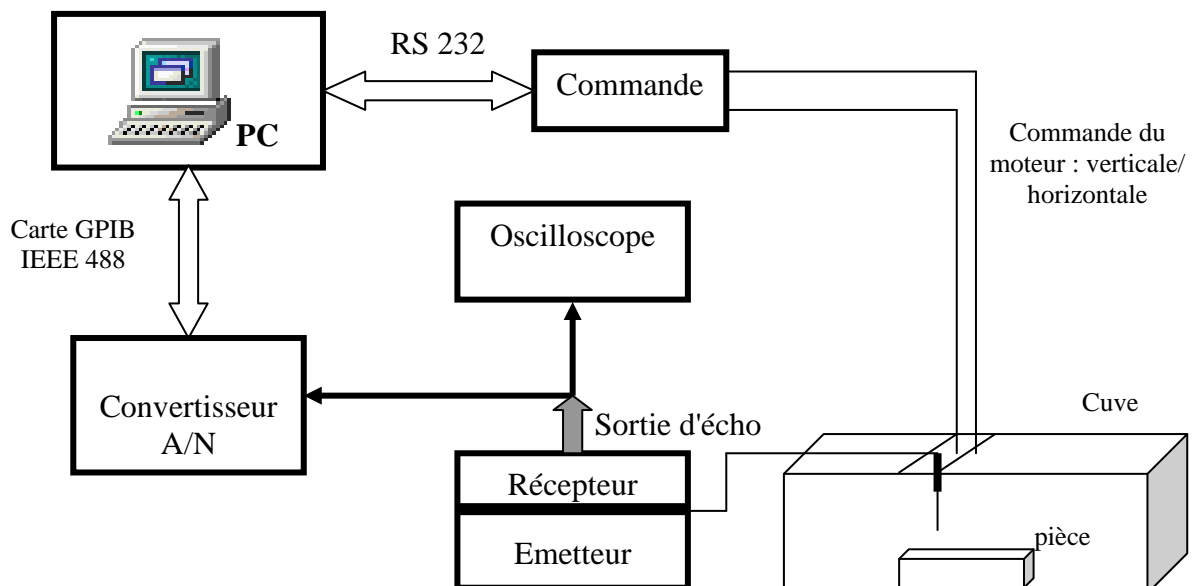
Le dispositif électronique d'excitation du palpeur est capable de fournir une brève impulsion, de tension importante ; cette excitation doit pouvoir être répétée à intervalles

réguliers. Dans la plupart des cas le palpeur est relié à l'excitation par un câble, compte tenu des fréquences élevées de quelques Méga-hertz, ces câbles et leurs connexions ont une véritable importance, on utilise en générale des câbles coaxiaux d'impédance adaptés [27].

La réception des signaux transmis à travers la pièce est visualisée sur un oscilloscope, le signal fourni par un capteur piézo-électrique est de très bas niveau, quelques millivolts seulement, et pour le rendre exploitable il est donc nécessaire de l'amplifier.

La chaîne de contrôle : figure (II.9), est constituée :

- D'un micro-ordinateur numérique équipé d'une carte d'acquisition IEEE 488 et d'une carte RS 232 (port série).
- D'un oscilloscope numérique équipé du bus IEEE 488.
- D'une cuve d'immersion équipée de 2 moteurs pas à pas et d'une commande électronique.
- D'un émetteur-récepteur d'ultrason relié à une sonde ultrasonore.



**Fig(II.9) : Chaîne de contrôle ultrasonore.**

Le déplacement de la sonde ultrasonore suivant un plan X-Y est effectué par les deux moteurs pas à pas commandés automatiquement par le micro-ordinateur à travers l'interface RS 232.

Le signal, en sortie du transducteur, est envoyé de l'oscilloscope numérique vers le calculateur pour un éventuel traitement, soit en temps réel, soit en temps différé.

### **VIII- Qualité des contrôles :**

L'appareillage utilisé en contrôle non destructif par ultrason demande un certain nombre de précautions pour augmenter la fiabilité et la reproductibilité des essais. Le fait que de nombreux contrôles aient lieu sur chantier ou en atelier, avec du matériel mobile, soumis à des variations de température ou d'humidité importantes, impose encore plus de précautions. Dans ce but des vérifications périodiques des appareils doivent être effectuées dans la mesure du possible selon les méthodes normalisées. Il en va de même des palpeurs, dont un possible vieillissement doit toujours être suspecté en cas de doute lors d'un contrôle.

### **IX- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons donné quelques notions sur le contrôle non destructif par ultrasons. La connaissance de ce procédé implique une connaissance de certaines notions sur les ultrasons, qu'il a été nécessaire de rappeler telles que : la production et la détection, la propagation, l'atténuation, ainsi que les différentes techniques utilisées par ce contrôle.

Par la suite on s'intéressera seulement à la détection des non-stationnarités de ces signaux, qui sont due à l'existence d'hétérogénéités dans les pièces inspectées et ceci en utilisant des outils de traitement du signal, qu'on va exposer en détail dans la partie suivante.

## Chapitre 1 : Analyse temps-fréquence.

### I- Introduction :

L'analyse du signal porte sur un vaste ensemble de phénomènes et sur des réalités physiques diverses. Les signaux réels présentent, en général, de nombreuses caractéristiques non-stationnaires qui constituent une part importante de l'information contenue dans la série : rupture, tendance, phénomène transitoire,...

La plupart des approches mathématiques utilisées, entre autres, la transformée de Fourier, sont adéquates pour l'étude des processus stationnaires. De nouvelles méthodes mises au point ces dernières années permettent d'analyser des signaux non-stationnaires. Parmi ces méthodes, nous citons la transformée de **WIGNER-VILLE** et la transformée en **Ondelettes**.

L'objectif de ce chapitre est de présenter, dans un premier temps, de façon simple les méthodes classiques d'analyse, par la suite nous exposerons d'autres méthodes du temps-fréquence, plus sophistiquées, pour le traitement du signal et qui sont applicables dans le domaine de contrôle non destructif.

### II- Notions préliminaires sur la représentation des signaux :

#### II-1- Représentation temporelle :

Le traitement du signal consiste à extraire certaines informations qui se déroulent au cours du temps ; la représentation temporelle renseigne sur son commencement, sa fin et la durée de ses éléments caractéristiques, ainsi que les discontinuités, des changements de rythme, caractéristiques statistiques, ... mais elle renseigne peu sur ses périodicités, donc sur ses fréquences [31].

#### II-2- Représentation fréquentielle :

L'information essentielle contenue dans un signal est présentée dans son spectre fréquentiel, dès lors on a cherché à développer des outils à même d'offrir cette représentation. En 1819 **Joseph Fourier** proposa sa transformée ; appliquée à un signal temporel, permettait d'avoir son spectre fréquentiel (une décomposition en sinusôides de fréquences différentes).

Une analyse spectrale classique fournit une information moyennée sur la durée d'observation et donc peu caractéristique de la structure instantanée du signal étudié [32].

Une description fréquentielle des signaux est souvent un complément essentiel à une description temporelle. Cependant une représentation temporelle ou fréquentielle d'un signal

offre une description limitée. Ainsi, certaines informations (fréquence instantanée et retard de groupe) ne sont pas accessibles directement à partir de ces représentations. De même de nombreuses contributions ont montré que les deux méthodes sont complémentaires mais insuffisantes prises séparément.

Le souci de dépasser ces limites et de pouvoir traduire la réalité physique des signaux naturels a conduit les chercheurs à développer d'autres méthodes d'analyse conjointes en temps et en fréquence.

### III- L'analyse classique :

#### III-1-Transformée de Fourier :

Les séries de Fourier ne permettent d'analyser que les phénomènes périodiques, pour les phénomènes non périodiques, on a recours à une intégrale de Fourier dont les coefficients  $X(f)$  donnent une information globale du signal à analyser  $x(t)$  [31], [34] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi f_0 t) dt. \quad (\text{I.3})$$

Cette intégrale est très générale, car on peut l'appliquer sans faire d'hypothèses sur l'origine physique du signal. Elle s'est révélée fructueuse depuis que l'on a mis au point, pour la calculer, un algorithme extrêmement économique : la transformée de Fourier rapide **FFT** (Fast Fourier Transform) qui exploite la parité de la transformée de Fourier et la périodicité des exponentielles imaginaires [35]. Cette approche présente un inconvénient : c'est que plus un signal est court dans le temps, plus il contient des composantes sinusoidales d'amplitudes significatives. Inversement un signal sinusoidal infini correspond à une seule fréquence.

La TF se résume en une décomposition du signal sur une famille d'exponentielle, ce qui permet d'avoir les différentes composantes fréquentielles du signal, par contre elle effectue un moyennage sur la durée du signal et, de ce fait, élimine toute information (temporelle) sur la chronologie des événements (date d'apparition d'une fréquence donnée) [36]. Ceci peut être mis en évidence en appliquant la TF sur un signal modulé linéairement en fréquence.

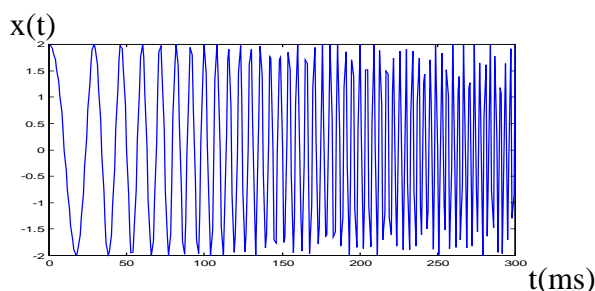


Fig (I.1a) :  $x(t)$  modulation linéaire

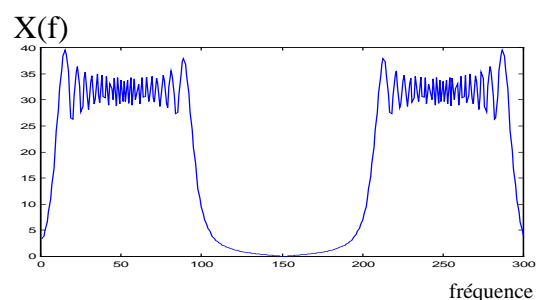


Fig (I.1b) : la TF de  $x(t)$

Comme il apparaît dans la (fig.I.1b) du spectre du signal modulé linéairement en fréquence, il n'y a aucun moyen de localiser les fréquences dans le temps, ceci constitue un inconvénient majeur à l'utilisation de la TF pour l'étude des signaux évoluant dans le temps, et pour lesquels l'information sur la chronologie des événements est cruciale ; de ce fait, la TF est dédiée au traitement de signaux stationnaires.

### III-2- Position du problème :

La transformée de Fourier est une idéalisation ; en effet, l'évaluation de  $X(f)$  à une fréquence  $f=f_1$  nécessite la connaissance des valeurs prises par  $x(t)$  à tout instant  $]-\infty, +\infty[$ , soit une infinité de valeurs dans le domaine temporel, de même la détermination de  $x(t)$  à  $t=t_1$  est réalisée à partir des valeurs de  $X(f) \forall f \in ]-\infty, +\infty[$  c'est-à-dire : la totalité des composantes spectrales. Une bonne illustration des limites d'une analyse spectrale classique est la possibilité de trouver deux signaux totalement différents  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$  présentant une même représentation spectrale [33].

Ainsi, on ne peut se contenter d'une représentation purement fréquentielle ou temporelle. L'idéal serait de définir une représentation conjointe du temps et de la fréquence qui décrira alors l'énergie ou l'amplitude du signal simultanément, en temps et en fréquence. Une telle représentation devra nous permettre de pallier aux problèmes cités précédemment et nous apporter de plus amples renseignements sur le signal à traiter.

### IV- Transformée de Fourier à court terme :

Pour traduire la réalité physique des signaux naturels (parole, sismique, E.C.G, ...), dont les caractéristiques fréquentielles sont variables au cours du temps, les chercheurs ont d'abord essayé de modifier la TF pour l'adapter à l'analyse de signaux non-stationnaires. Ainsi, le signal est découpé en segments, pouvant se recouvrir partiellement, au moyen d'une fenêtre de pondération glissante sur les données. On évalue en suite la TF de chaque tranche du signal, ce qui permet de suivre les variations du spectre du signal sur chaque intervalle d'analyse. L'hypothèse, a priori, est que le spectre du signal évolue peu pendant la durée de la fenêtre. On parle alors de la transformée de Fourier à court terme (TFCT) ou d'une manière équivalente du module carré de la TFCT appelé : *spectrogramme* [32].

Jusqu'en 1932 la transformée de Fourier à court terme (TFCT) constitua l'essentiel des outils d'analyse des signaux, et elle permet d'avoir une représentation conjointe en temps et en

fréquence (R.C.T.F), cette dernière mettrait en évidence les caractéristiques évolutives du signal en décrivant l'évolution temporelle de son spectre[36].

Bien qu'elle connut un grand succès en traitement de la parole, cette méthode est néanmoins conditionnée par l'inévitable compromis entre les résolutions temporelles et fréquentielles.

Une bonne résolution fréquentielle exige une grande durée d'observation, cependant, un tel intervalle réalise un moyennage sur le contenu spectral du signal, et perd par conséquent toute information sur son caractère instantanée. Inversement, une fenêtre d'observation courte, réalise une bonne résolution temporelle, bien que la résolution fréquentielle soit dégradée [38], [39].

De même, comme la TFCT suppose la stationnarité du signal sur la fenêtre d'analyse, la nature de ce signal nous impose la taille de la fenêtre à utiliser, ce qui fixe aussi la résolution spectrale du fait qu'une seule fenêtre est utilisée pour toutes les fréquences, la résolution de l'analyse est la même en tout lieu de l'espace. Cet inconvénient trouve toute sa signification quand il s'agit de séparer deux fréquences voisines.

Ainsi, les chercheurs se sont orientés vers des méthodes qui permettent de s'affranchir de l'hypothèse de quasi-stationnarité et de dépasser les limites d'une analyse purement temporelle ou fréquentielle. Ceci conduit au développement de méthodes d'analyse conjointe temps-fréquence. Le spectrogramme est défini par :

$$\rho_x(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t + \tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \right|^2 \quad (I.4)$$

Et sa définition à temps discret est donnée par :

$$\rho_x(n, f) = \left| \sum_{k=-N+1}^{N-1} h[k] x[n + k] e^{-i2\pi f k} \right|^2 \quad (I.5)$$

Avec N : taille de la fenêtre d'analyse.

## V- Représentations temps-fréquence :

L'idée d'une description de signaux par la distribution de leur énergie dans le plan temps-fréquence est déjà très ancienne. L'objectif d'une représentation temps-fréquence est de mettre en évidence les caractéristiques évolutives d'un signal en décrivant l'évolution temporelle de son contenu spectral. Une telle analyse présentera donc son intérêt dès qu'il s'agit de considérer un signal non-stationnaire. Les représentations temps-fréquence peuvent se diviser en deux grandes classes [37], [41] :

- Représentations temps-fréquence linéaires, exemple : la transformée de Fourier à court terme.

- Représentations temps-fréquence bilinéaires, les plus connues sont les transformées de **Wigner, Page, Rihaczek, ...**

Historiquement, les chercheurs ont rencontré beaucoup de difficultés à donner à ce concept "temps-fréquence" une formulation unique. En 1966 L.Cohen [41] proposa une formulation générale à partir de laquelle toutes les R.C.T.F bilinéaires peuvent être obtenues par le choix d'une fonction de pondération. L'expression de cette classe des représentations temps-fréquence bilinéaire est donnée par :

$$C_x(t, w, \phi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \phi(\xi, \tau) \exp[j(\xi t - \tau w - \xi u)] du d\tau d\xi \quad (I.6)$$

Avec  $x(u)$  le signal temporel analysé,  $x^*(u)$  son complexe conjugué ;

$\phi(\xi, \tau)$ : fonction arbitraire de pondération ou noyau représentatif d'une RCTF particulière.

## VI- La transformée de Wigner-Ville :

La distribution de **Wigner-Ville (DWV)**, pour laquelle le noyau  $\phi(\xi, \tau) = 1$ , est le prototype de toutes les RCTF de la classe de **Cohen**. Originellement, elle fut proposée par : **E.P.Wigner** en 1932 en mécanique quantique [42].

En 1948, **J.Ville**, développa la notion de signal analytique et par suite, étendit le champ des applications de la distribution de **Wigner** vers l'analyse des signaux [43]. Depuis, on parle de la distribution de Wigner-Ville pour faire référence à la distribution de **Wigner** utilisant le signal analytique associé au signal réel.

C'est une méthode d'analyse qui permet de représenter l'énergie du signal simultanément en temps et en fréquence et qui possède des avantages significatifs sur d'autres méthodes voisines d'analyse temps-fréquence (cf. spectrogramme).

### VI-1- Définition :

La transformée de Wigner-Ville, associée à un signal temporel représenté par la fonction  $x(t)$ , la fonction des deux variables  $t$  et  $f$ ,  $W_x(t, f)$  [36],[41], [44], [45], [51], est

$$\text{définie par : } w_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (I.7)$$

Où  $t$  : représente la variable temporelle ;

$f$  : représente la variable fréquentielle ;

$x^*(t)$  représente le signal temporel conjugué.

La DWV peut être aussi définie, dans le domaine fréquentiel, à partir du spectre  $X(f)$  du signal  $x(t)$  [32], [37] par :

$$w_x(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X\left(f + \frac{\eta}{2}\right) X^*\left(f - \frac{\eta}{2}\right) \exp(+j2\pi t\eta) d\eta \quad (I.8)$$

Nous avons par définition :  $W_x(t, f) = W_x(f, t)$ .

Une telle intégrale existe pour tous les signaux physiques d'énergie finie (ou de carré sommable). Sous une forme plus compacte l'équation (I.7) peut s'écrire :

$$w_x(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t, \tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (I.9)$$

$$\text{avec : } R(t, \tau) = x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)$$

Qui est appelé noyau de la DWV.

La DWV croisée est définie pour deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  par :

$$w_{xy}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) y^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (I.10)$$

Sa définition à temps discret est donnée par :

$$\rho_x(n, f) = 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[n+k] x^*[n-k] e^{-j4\pi f k} \quad (I.11)$$

### Remarque:

Dans ce qui suit, on donne quelques propriétés de la distribution de Wigner-Ville, pour plus de démonstration voir [33], [36], [37], ...

### VI-2- Propriétés :

La distribution de Wigner-Ville (DWV) possède beaucoup de propriétés souhaitables pour une analyse pertinente dans le plan temps-fréquence. Elle représente d'ailleurs le prototype à partir duquel toutes les autres représentations temps-fréquence de la classe de Cohen peuvent se déduire.

Les principales propriétés de la DWV sont :

a) La DWV d'un signal réel ou complexe est toujours réelle :

$$W_x(t, f) = W_x^*(t, f)$$

- b) La DWV d'un signal limité en temps est aussi limitée en temps et admet le même support :

$$\text{Si } x(t) = 0 \text{ pour } |t| > T, \text{ alors } W_x(t, f) = 0.$$

- c) La DWV d'un signal à bande limitée est aussi limitée et admet le même support :

$$\text{Si } X(f) = 0 \text{ pour } |f| > F, \text{ alors } W_x(t, f) = 0.$$

- d) Un décalage en temps de  $x(t)$  causera le même décalage en temps de sa DWV :

$$\text{Si } y(t) = x(t - \tau) \text{ alors } W_y(t, f) = W_x(t - \tau, f).$$

- e) Une modulation de  $x(t)$  par  $\exp(j\xi t)$  ou bien un décalage en fréquence de  $X(f)$  causera le même décalage en fréquence de sa DWV :

$$\text{Si } Y(f) = X(f - \xi) \text{ alors } W_y(t, f) = W_x(t, f - \xi)$$

- f) Le produit de deux signaux en temps se traduit par la convolution de leurs DWV respectives, dans le domaine fréquentiel :

$$\text{Si } z(t) = x(t)y(t) \text{ alors } W_z(t, f) = W_x(t, f) *_f W_y(t, f).$$

$(*_f)$  : dénote l'opération de convolution par rapport à la variable fréquentielle  $f$ .

- g) La convolution de deux signaux en temps se traduit par la convolution de leurs DWV respectives suivant la variable temporelle :

$$\text{Si } z(t) = x(t) *_t y(t) \text{ alors } W_z(t, f) = W_x(t, f) *_t W_y(t, f)$$

$(*_t)$  : dénote l'opération de convolution par rapport à la variable temporelle  $t$ .

- h) L'intégrale de la DWV d'un signal  $x(t)$  par rapport à la variable fréquentielle conduit à l'énergie instantanée de ce signal.

$$|x(t)|^2 = \frac{1}{2\pi} \int W_x(t, w) dw \quad \text{ou} \quad |x(t)|^2 = \int W_x(t, f) df$$

Dans la littérature cette propriété est appelée "marginale en fréquence".

- i) L'intégrale de la DWV d'un signal  $x(t)$  par rapport à la variable temporelle ou marginale en temps conduit à la densité spectrale de puissance de ce signal :

$$|X(w)|^2 = \int W_x(t, w) dt \quad \text{ou} \quad |X(f)|^2 = \int W_x(t, f) dt$$

- j) L'intégrale de la DWV d'un signal  $x(t)$  sur tout le plan temps-fréquence donne l'énergie totale  $E_T$  du signal :

$$\iint W_x(t, f) dt df = \int |x(t)|^2 dt = E_T.$$

- k) Le moment local d'ordre un, suivant la variable fréquentielle  $w$ , à un instant  $t$  fixé, fournit la fréquence instantanée :

$$w_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{\int w \cdot W_x(t, w) dw}{\int W_x(t, w) dw} .$$

Cette propriété s'apparente à un "centre de gravité" de la DWV suivant la variable fréquentielle.

- 1) Le moment local d'ordre un, suivant la variable temporelle  $t$  à une fréquence  $w$  fixée, fournit le retard de groupe :

$$\tau_g(w) = \frac{\int t W_x(t, w) dt}{\int W_x(t, w) dt} .$$

**NB:** Dans toutes ces propriétés, si aucune précision n'est donnée, les bornes de l'intégrales sont de :  $(-\infty)$  à  $(+\infty)$ .

### VI-3- Caractéristiques de la transformée de Wigner-Ville :

La distribution de Wigner-Ville possède un grand nombre de propriétés de covariance (translations, changement d'échelle, filtrage, modulations,...) ; localisation parfaite sur les "chirps" idéaux (modulation de fréquence linéaire) [37], [46].

Dans l'autre côté, on remarque l'existence de valeurs négatives, qui interdit de l'interpréter localement comme une densité d'énergie, et de même les termes d'interférences, d'où une lisibilité réduite dans le cas de signaux à grand nombre de composantes. Les interférences portant néanmoins une information utile sur les relations de phase entre les composantes d'un signal [39].

### VI-4- Importance du signal analytique :

Nous allons présenter dans ce paragraphe la notion de signal analytique et les avantages que procure son utilisation pour l'évaluation de la distribution de Wigner-Ville.

La notion de signal analytique fût développée, dans le cadre de la théorie de communication, par **J.Ville** en 1948 [43]. Le signal analytique  $Z(t)$  associé au signal réel  $x(t)$  est le signal complexe ( $\in \mathbb{C}$ ) défini par :

$$z(t) = x(t) + j \hat{x}(t) = x_a(t). \quad (I.12)$$

Avec  $\hat{x}(t)$  est la transformée de **Hilbert** du signal  $x(t)$ , en quadrature de phase avec le signal original  $x(t)$ .

Si  $X(f)$  représente la transformée de Fourier de  $x(t)$ , nous avons alors :

$$X_a(f) = 2 X(f) \cdot U(f)$$

Avec  $U(f)$  est la transformée de Fourier de l'échelon unité de Heaviside.

$$\text{Et } \hat{x}(t) \leftrightarrow \hat{X}(f) = -j \operatorname{sgn}(f) \cdot X(f).$$

$$\text{Soit : } X_a(f) = \begin{cases} 2X(f) & \text{pour } f > 0. \\ X(f) & \text{pour } f = 0. \\ 0 & \text{pour } f < 0. \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Le spectre du signal analytique est nul pour les fréquences négatives, par conséquent, la bande du signal est réduite de moitié, permettant ainsi d'éliminer la redondance présente dans le spectre d'un signal réel.

L'autre avantage de l'utilisation du signal analytique est d'éviter toute perte d'informations, que le signal effectif (c'est-à-dire le produit  $x(t+\tau/2) \cdot x^*(t-\tau/2)$ ) admettra  $2f_{\max}$  comme fréquence maximale de son spectre, par conséquent, le théorème exige que la fréquence d'échantillonnage de  $x(t)$  soit de  $4f_{\max}$ , soit le double de celle de **Shanon** ( $2f_{\max}$ ). Or, si l'on dispose déjà d'un signal échantillonné à la fréquence de **Shanon**, il n'est pas toujours possible d'augmenter la fréquence d'échantillonnage, car le signal analogique n'est pas disponible en permanence. L'utilisation du signal analytique permet d'éviter cet suréchantillonnage du fait que la bande du signal analytique est réduite de moitié par rapport à celle du signal réel [37].

Un dernier avantage que procure l'utilisation du signal analytique est la réduction des interférences dues au repliement des fréquences négatives du spectre et leur interaction avec la partie positive de celui-ci [36].

### VI-5- Termes d'interférences :

La TWV est une représentation temps-fréquence dont les propriétés semblent en faire un outil excellent pour une analyse dans le plan temps-fréquence. Cependant, malgré sa compatibilité avec les opérateurs classiques du traitement du signal, elle présente l'inconvénient de ne pas être un opérateur linéaire. C'est-à-dire que la TWV n'est pas compatible avec la somme des deux signaux  $x_1$  et  $x_2$ , monocomposants, qui est égale à la somme de leurs TWV respectives, plus une contribution liée à l'interaction entre les deux signaux. Le produit de cette interaction est appelé terme d'interférence [36].

$$\text{Soit : } x(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (\text{I.14})$$

$$W_x(t, \omega) = W_{x_1}(t, \omega) + W_{x_2}(t, \omega) + 2\text{Re}(W_{x_1 x_2}(t, \omega)) \quad (\text{I.15})$$

Par définition la TWV de  $x(t)$  :

$$W_{x_1+x_2}(t, \omega) = \int \left[ x_1\left(t + \frac{\tau}{2}\right) + x_2\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \right] \left[ x_1^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) + x_2^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right] e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (\text{I.16})$$

La partie de droite nous donne :

$$W_{x_1+x_2}(t, \omega) = W_{x_1}(t, \omega) + W_{x_2}(t, \omega) + W_{x_1 x_2}(t, \omega) + W_{x_2 x_1}(t, \omega)$$

or on a :

$$W_{x_1 x_2}(t, \omega) = W_{x_2 x_1}^*(t, \omega) \quad (\text{I.17})$$

d'où :

$$W_{x_1+x_2}(t, \omega) = W_{x_1}(t, \omega) + W_{x_2}(t, \omega) + 2\text{Re}(W_{x_1 x_2}(t, \omega))$$

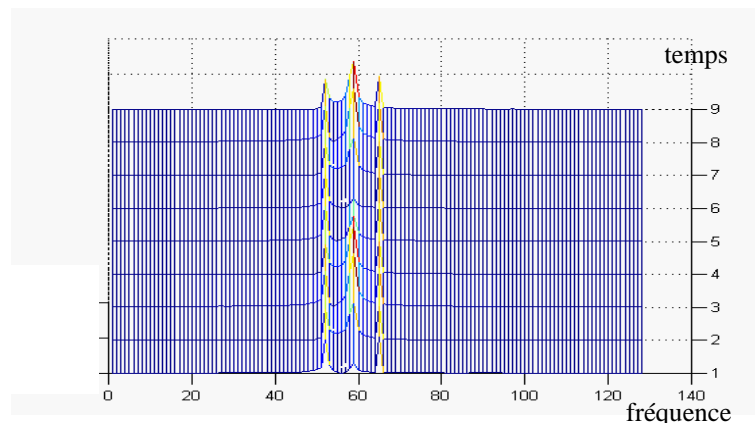
Avec:  $W_{x_1 x_2}(t, \omega)$  est l'interdistribution de *Wigner- Ville* des signaux  $x_1(t)$  et  $x_2(t)$ .

Pour un signal bicomposante, tel l'exemple précédant, on peut arriver à localiser le terme d'interférence parmi les composantes propres du signal, et par conséquent l'interprétation en est relativement aisée. Cependant, pour des signaux multicomposantes (signal présentant plusieurs composantes à un instant donné), cette transformée fournit des résultats pouvant être difficilement interprétables [36], [37].

Pour un signal de  $N$  composantes, la TWV est composée de  $N$  termes propres correspondants au nombre de termes du signal et  $N \cdot \frac{(N-1)}{2}$  termes additionnels d'interférences qui perturbent l'image temps-fréquence du signal analysé.

La structure bilinéaire en  $x(t)$  dans la TWV (équation (I.8)) est à l'origine de la création des termes d'interférences. Une étude détaillée a montré que ces termes apparaissent à mi-chemin entre chaque deux composantes du signal, et sont caractérisés par une structure oscillatoire en temps [33].

La figure (I.2) nous montre la TWV de la somme des sinus en utilisant une fenêtre rectangulaire de 128 échantillons ; et un décalage de 8 échantillons, comme on le remarque sur la figure, des termes d'interférences sont visibles entre les deux composantes



Fig(I.2) : TWV de la somme de 2 sinus.

Pour réduire ces dernières, nous distinguons deux approches, l'une consiste à modifier la structure bilinéaire : la structure du noyau, et on note dans cette catégorie la Pseudo Wigner-Ville (PWV), la Pseudo Wigner-Ville lissée (PWVL). L'autre approche est de concevoir un autre noyau, c'est-à-dire une nouvelle représentation temps-fréquence qui conserve les avantages de la TWV et permet d'éliminer les termes d'interférences, et on peut citer dans cette catégorie les représentations de *Choi-Williams* et *Zhao-Atlas-Marks* [47].

## VII- Différentes versions de la DWV et méthodes de lissages :

### VII-1- DWV simple :

On appelle DWV simple, la transformée telle qu'elle a été définie par les relations (I.7) et (I.8), c'est-à-dire qu'on applique directement la formule sur le signal à traiter sans lui subir un traitement préalable. Cette version présente l'avantage d'une simplicité de mise en œuvre et de préserver les propriétés originales de la DWV, et de la réversibilité qui est immédiate. Cependant, pour les signaux multicomposantes, l'apparition de termes d'interférences inhérentes à la méthode, rendent l'interprétation des résultats difficile [36], [37].

### VII-2- La Pseudo Wigner-Ville :

On applique la relation (I.7) sur une tranche du signal  $x(t)$  découpée par une fenêtre d'observation  $g(t)$  [36],[37],[38] :

- **Définition en temps continu :**

$$PWV(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u - t) x\left(u + \frac{t}{2}\right) x^*\left(u - \frac{t}{2}\right) e^{-j2\pi fu} du \quad (I.18)$$

- **Définition en temps discret :**

$$PWV(n, f) = 2 \sum_{k=-N+1}^{k=N-1} x(n+k) x^*(n-k) g(k) e^{-j4\pi fk} \quad (I.19)$$

Où :  $g$  est une fenêtre de lissage temporelle (Hamming, Hanning, Bartlett, Parzen, Blackman...). Le lissage dépend de la fenêtre choisie  $g(t)$ , ainsi que de sa largeur.

Le résultat de cette opération montre un effet de lissage suivant la direction des fréquences, cependant le terme d'interférence subsiste, le lissage en fréquence n'est donc pas suffisant vu la nature oscillatoire (en temps) des termes d'interférences, un autre lissage suivant la variable temporelle est nécessaire [36].

### VII-3- La Pseudo Wigner-Ville lissée :

Nous avons vu, dans les paragraphes précédents, que la structure bilinéaire de la TWV introduit des termes d'interaction entre toutes composantes du plan temps-fréquence. Nous avons également vu que l'utilisation du signal analytique permet de supprimer ceux qui résultent de l'interaction entre fréquences positives et négatives du spectre d'un signal réel, mais le signal analytique ne résout pas tout, puisque nous avons encore toutes les interactions entre composantes distinctes de l'axe des fréquences positives qui persistent.

L'étude des termes d'interférence a montré que ceux-ci possèdent une structure fortement oscillatoire, à l'inverse des composantes propres du signal qui, elles possèdent une structure beaucoup plus régulière.

Un moyen simple de réduire leur influence est d'opérer un lissage temps-fréquence. On est ainsi amené à introduire une version modifiée de la DWV dite Pseudo distribution de Wigner-Ville lissée [36], [37], [39] :

• **Définition en temps continu :**

$$PWVL(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| h\left(\frac{\tau}{2}\right) \right|^2 \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) x\left(u - \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u + \frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (I.20)$$

• **Définition en temps discret :**

$$PWVL(n, f) = 2 \sum_{k=-N+1}^{k=N-1} |h(k)|^2 \left[ \sum_{m=-M+1}^{m=M-1} g(m) x(n+m+k) x^*(n+m-k) \right] e^{-j4\pi f k} \quad (I.21)$$

Tels que  $h$  : fenêtre de lissage fréquentiel.

$g$  : fenêtre de lissage temporel.

**Remarque :**

La fenêtre à court terme de la PWV permet de réduire les interférences entre des composantes décalées en temps. D'une manière duale, l'introduction d'un lissage supplémentaire en temps permet de réduire les interférences entre des composantes décalées en fréquence [36].

### VIII- Autres méthodes de lissage temps-fréquence :

#### VIII-1- Méthode de Choi-Williams :

L'idée générale de cette méthode est la réduction des termes d'interférences de la distribution de Wigner-Ville en effectuant un lissage dans le plan temps-fréquence, tout en préservant les distributions marginales temporelle et fréquentielle.

Le principe de la méthode consiste à utiliser une fonction de pondération (dans la classe de Cohen), un choix effectif est une gaussienne paramétrée par son " écart-type " :  $\sigma$  [39], [48].

• **Définition en temps continu :** [49]

$$CW(t, f) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\sigma}} e^{-\frac{(u-t)^2}{4\tau^2/\sigma}} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (I.22)$$

• **Définition en temps discret :** [49]

$$CW(n, f) = 2|h(0)|^2 |x(n)|^2 + 2 \sum_{\substack{k=-N+1 \\ k \neq 0}}^{k=N-1} |h(k)|^2 K(n, k) e^{-j4\pi f k} \quad (I.23)$$

$$\text{avec: } K(n, k) = \sum_{m=-M+1}^{M-1} g(m) \frac{e^{-\frac{m^2}{16k^2/\sigma}}}{\sqrt{16\pi k^2/\sigma}} x(n+m+k) x^*(n+m-k) \quad (I.24)$$

Tels que :

- h : fenêtre d'observation à court terme de  $2N-1$  points.
- g : fenêtre de lissage temporel de  $2M-1$  points.

Il est à noter que la TWV est la limite de la transformée de Choi-Williams quand l'écart type  $\sigma$  tend vers l'infini, ce qui entraîne que le terme d'interférence tend vers un dirac [36]. Si par contre  $\sigma$  tend vers 0, le terme d'interférence tend vers une fonction à décroissance très lente. Il est donc nécessaire de trouver la valeur de  $\sigma$  qui réalise un compromis acceptable entre la réduction de l'amplitude et la concentration de la localisation des termes d'interférence, mais aussi, certains termes propres, ainsi que leurs recouvrements mutuels.

Pour un bon résultat, on choisira :  $1 < \sigma < 80$  (constatation empirique) [36].

**Remarque:**

La diminution de  $\sigma$  assure bien une diminution de niveau maximal du terme interférentiel, mais en même temps élargit ce dernier puisque sa largeur équivalente (définie comme l'écart type de la gaussienne) a pour valeur  $(|f_1 - f_2|/2\sigma)$  : Plus  $\sigma$  est petit plus le terme interférentiel est diminué en niveau, mais il se trouve aussi plus dilué, selon la direction fréquentielle, de telle sorte que le résultat de son intégration en fréquence demeure inchangé.

Donc la transformée de CW opère une délocalisation des interférences lors de la réduction de l'amplitude des interférences (de façon à conserver les distributions marginales correctes) [39].

Comme le font remarquer les auteurs, une des caractéristiques intéressantes de cette représentation est que l'amplitude de ce terme d'interférence est inversement proportionnelle à la distance entre les deux fréquences.

### Propriétés de la représentation de Choi-Williams : [48]

✓ La CW effectue un lissage inversement proportionnel à la variance et, il est à noter aussi que, la CW est très sensible à la largeur des fenêtres de lissage.

✓ La CW est compatible avec : les translations temporelles et fréquentielles, le changement d'échelle, l'inversion temporelle et la conjugaison complexe.

✓ La CW possède un caractère réel.

✓ La CW conserve l'énergie : l'énergie instantanée, le spectre, la fréquence instantanée, le retard de groupe.

✓ En plus, elle est réversible.

### VIII-2- Méthode de Zhao-Atlas-Marks :

Le principal objectif de cette méthode est de réduire les interférences de la méthode de Wigner-Ville de façon plus précise. Le respect de la condition de conservation du support du signal conduit les auteurs à proposer une famille de représentation temps-fréquence, paramétrée par une fonction mono-variable  $h$  [50].

On effectue un lissage dans le plan fréquentiel par une fonction de pondération  $h$  qui soit nulle en dehors d'un cône [48].

Le paramètre :  $(a)$  qui ajuste la pente du cône est compris entre :  $2 \leq a < \infty$ , en général on prend  $a = 2$ .

• **Définition en temps continu :** [50]

$$\text{ZAM}(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| h\left(\frac{\tau}{2}\right) \right|^2 \left[ \int_{t-|\tau|/2}^{t+|\tau|/2} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) du \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (\text{I.25})$$

• **Définition en temps discret :** [50]

$$\text{ZAM}(n, f) = 2 \sum_{k=-N+1}^{k=N-1} |h(k)|^2 \left[ \sum_{m=-|k|}^{m=|k|} x(n+m+k) x^*(n+m-k) e^{-j4\pi f k} \right] \quad (\text{I.26})$$

$h$  : est la fenêtre de pondération fréquentielle (Hamming, Hanning, Bartlett...).

Pour un coût en calcul moindre que celui nécessaire à la Choi-Williams, la transformée de Zhao-Atlas-Marks offre un bon compromis entre souplesse d'utilisation et efficacité de lissage [36].

### Propriétés de la méthode Zhao-Atlas-Marks : [48]

La représentation de Zhao-Atlas-Marks vérifie beaucoup de propriétés d'une représentation temps-fréquence telles que :

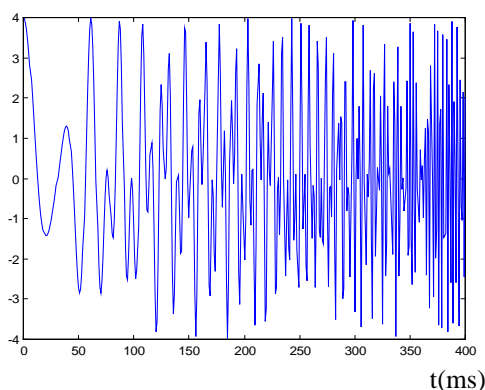
- ✓ La compatibilité avec les translations temporelles et fréquentielles ;
- ✓ La compatibilité avec l'inversion temporelle ;
- ✓ Le caractère réel de cette représentation ;
- ✓ La conservation du support du signal.

Mais ne vérifie aucune des propriétés sur les moments et les marginales en temps et en fréquence (conservation de l'énergie, de l'énergie instantanée, de la fréquence instantanée, du retard de groupe).

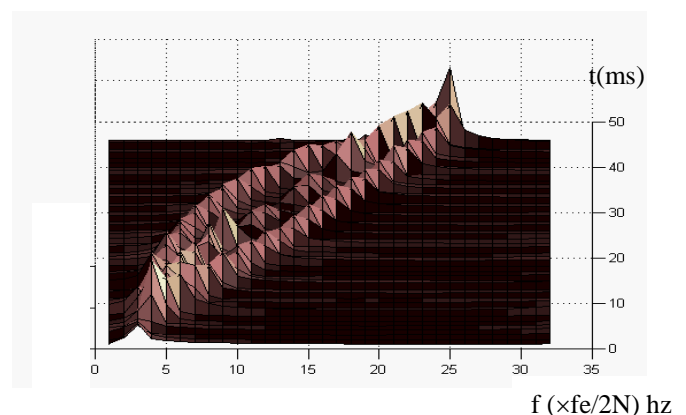
Il semble donc que bien que ses qualités visuelles de représentation des signaux semblent très intéressantes, l'absence de ces propriétés sur les marginales empêche son utilisation pour estimer les grandeurs locales (amplitudes et fréquences instantanées) des composantes d'un signal.

### IX- Exemple d'application de ces méthodes sur un signal simulé :

Dans ce paragraphe on va appliquer les méthodes citées ci-dessus sur un signal simulé, qui est la somme de deux modulations de fréquence linéaire et hyperbolique : figure (I.3), dans le but de vérifier ce qui a été exposé dans la partie théorique.



**Fig(I.3) :**  
Somme d'une modulation linéaire et hyperbolique



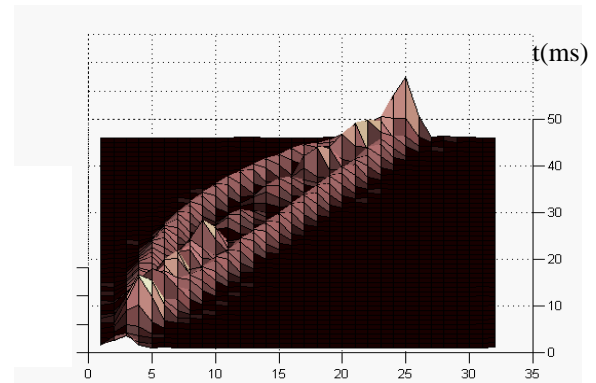
**Fig(I.4) :**  
TWV de la somme des 2 modulations

En appliquant la TWV, et en utilisant une fenêtre de Bartlett de largeur  $N=32$  échantillons, on remarque qu'il y a détection des deux modulations mais la séparation n'est pas aussi nette ( Figure : (I.4) ).

En appliquant la PWV :

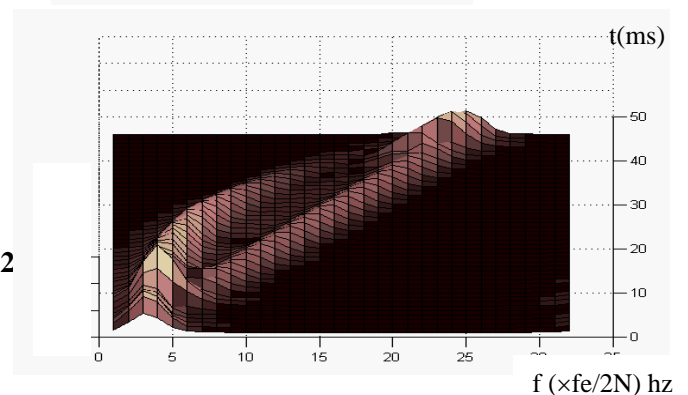
On remarque un léger Lissage, ce qui n'est pas suffisant pour éliminer les interactions.

**Fig (I.5):**  
PWV de la somme des 2  
modulations

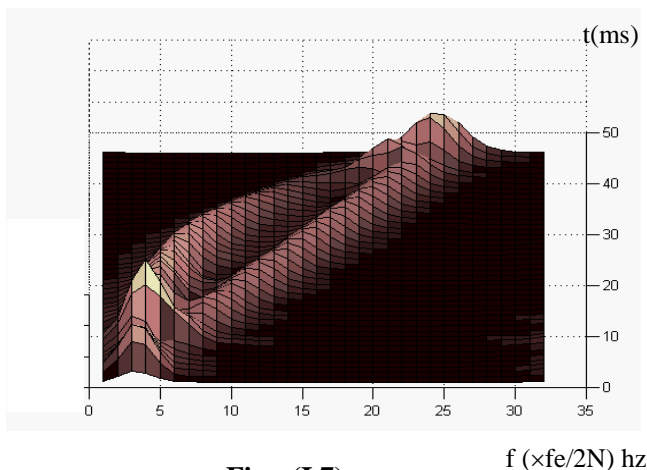


On applique la PWVL, et on obtient :

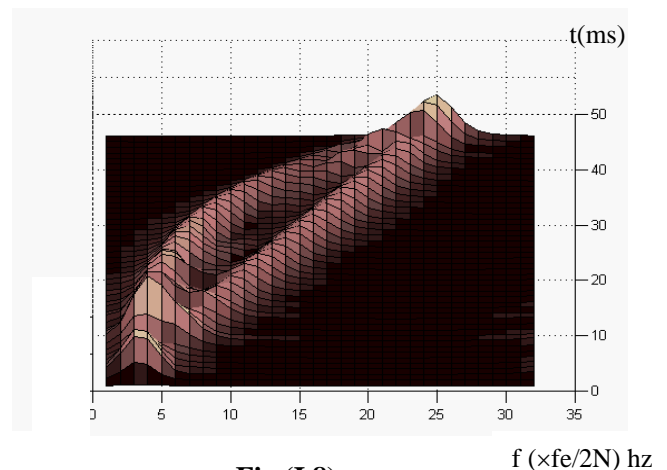
**Fig.(I.6):**  
PWVL de la somme des 2  
modulations



Il est apparent que la PWVL effectue un meilleur lissage que la PWV, ceci est dû au fait qu'elle effectue un lissage dans le plan fréquentiel.



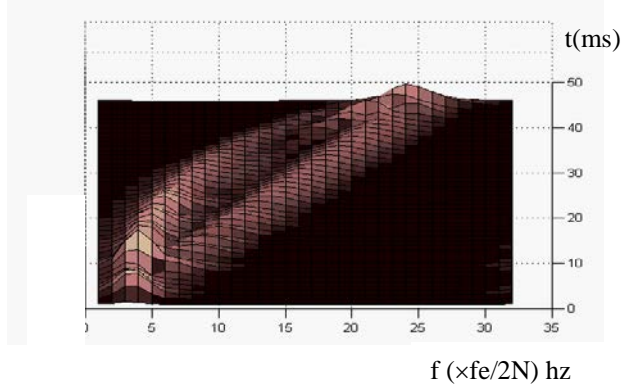
**Fig : (I.7)**  
CW de la somme des 2  
modulations ( $\sigma=20$ )



**Fig (I.8):**  
CW de la somme des 2  
modulations ( $\sigma=60$ )

On remarque que la transformée de Choi-Williams effectue un lissage inversement proportionnel à la variance.

De même la méthode de Zhao-Atlas-Marks offre un lissage très efficace : figure (I.9)



**Fig (I.9):**  
**ZAM de la somme des 2**  
**modulations**

### **X- Conclusion :**

Nous venons d'exposer dans ce chapitre les problèmes liés à l'analyse des signaux non-stationnaires, aux limites des méthodes classiques et à la nécessité d'introduire des représentations conjointes temps-fréquence.

L'analyse spectrale a pour longtemps été essentiellement réduite à la transformée de Fourier, mais vues les contraintes imposées par sa définition, son implication pour les signaux non-stationnaires par le biais de la TFCT, impose des compromis au niveau de la résolution fréquentielle d'où la nécessité d'introduire les méthodes temps-fréquence.

Nous avons passé en revue l'étude de la DWV, prototype de toutes les RCTF de la classe de Cohen, qui apporte des solutions à l'essentiel des inconvénients du spectrogramme. Il est également démontré qu'elle présente certains avantages par rapport à d'autres méthodes voisines (spectrogramme) ; cependant, elle présente le grave inconvénient de n'être pas compatible avec la somme des signaux, générant ainsi des termes d'interférences, qui perturbent l'image temps-fréquence du signal analysé.

Nous avons initié une comparaison entre les trois versions de la DWV, à savoir la DWV simple et ses deux variantes : la Pseudo WV et la Pseudo VW lissée.

Enfin nous avons exposé deux autres méthodes de lissage, à savoir la méthode de Choi-Williams et Zhao-Atlas-Marks, ces dernières étaient toutes les deux motivées par le souhait de réduire les termes d'interférences.

## Chapitre 2 : Analyse temps-échelle.

### I- Introduction :

La transformée de Wigner-Ville et ses variantes constituent un outil important de l'analyse temps-fréquence, d'autres méthodes d'analyse des signaux, plus robustes, sont élaborées afin de lever les inconvénients des signaux non-stationnaires, elles consistent à chercher directement un autre outil adapté à ce type de problème, sans référence directe aux méthodes issues du cas stationnaire, on trouve ainsi des méthodes dites affinées, d'autres dérivées de la définition du signal analytique (méthode de la fréquence instantanée) ou encore celles basées sur le temps-échelle.

Afin d'avoir une information, tant spatiale que fréquentielle, sur un signal, il faut décomposer ce signal sur des fonctions bien localisées à la fois en temps et en fréquence. Ces fonctions sont appelées ondelettes analysantes.

Dans notre travail, l'analyse temps-échelle est utilisée pour améliorer la détection des non-stationnarités dans les signaux ultrasonores et, pour cela, nous présenterons quelques notions de base de la théorie mathématique sur les ondelettes qui seront importantes pour la suite.

### II- Historique et l'état de l'art :

La transformée en ondelette est une technique récente de traitement de signal introduite par **J.Morlet** au début des années 80. En effet, en 1983 il proposa l'analyse et la synthèse par ondelette, qui permet d'analyser efficacement des signaux où se combinent des phénomènes d'échelle très différents [38].

En 1984 **Grossman** a démontré la formule de reconstruction, puis **Daubechies** (1985) a analysé les problèmes liés à la discretisation, **Meyer** a ensuite introduit le concept d'ondelettes orthogonales, ce qui a permis à **Mallat** de développer l'analyse en multirésolution (1989) [40], [52].

Depuis, cette approche fut l'objet de nombreux travaux d'ordre technique qui ont permis de fournir un cadre mathématique solide à cette analyse, en particulier avec la découverte d'autres formes d'ondelettes possédant des propriétés d'orthogonalités que ne possèdent pas celles de **J.Morlet**.

### III- Temps-échelle :

La méthode temps-échelle représente le signal comme une somme de fonction déduite par contractions temporelle d'une fonction prototype. Si un phénomène a une bande passante importante, alors il sera observé à plusieurs échelles d'analyse et donc à la fois finement en temps et en fréquences à des échelles différentes.

L'analyse temps-échelle constitue une extension logique de l'analyse de Fourier, en ce sens qu'elle effectue non plus une analyse sur une fenêtre de taille fixe, mais sur une fenêtre de taille variable, ceci nous permet d'utiliser une fenêtre adaptée au problème à traiter (une fenêtre large en basse fréquence pour avoir une meilleure résolution fréquentielle, et une fenêtre étroite en haute fréquence pour avoir une meilleure résolution temporelle). Ce concept de fenêtre à taille variable introduit la notion d'analyse en banc de filtres à facteur de qualité  $Q$  constant [53].

### IV- La transformée en ondelettes continue (TOC) :

#### IV-1- Définition :

Le paramètre fréquence est remplacé par un paramètre d'échelle. Ce qui conduit à une analyse temps-échelle ou espace-échelle.

Soit  $x \in L^2(\mathcal{R})$  et  $(a, b) \in \mathcal{R}_+^* \times \mathcal{R}$ , l'analyse par ondelettes de la fonction  $x(t)$  telle qu'elle a été définie par **J.Morlet** est un produit scalaire [53], [54], [55], [56] :

$$C_x(a, b) = K \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{II.1})$$

Avec :  $C_x(a, b)$  est le coefficient d'ondelette de la fonction  $x(t)$  ;

$\psi^*$  est le complexe conjugué de l'ondelette analysante  $\psi$  ;

$a$  est le facteur d'échelle ou de dilatation, joue le rôle inverse de la fréquence ;

$b$  est un paramètre de translation (homogène à un temps) ;

$K$  est un coefficient de normalisation, en général,  $K = \frac{1}{\sqrt{a}}$  (normalisation de

l'énergie), mais on peut prendre  $K=1$  ou  $K = \frac{1}{a}$ .

Les coefficients réels  $C_x(a, b)$  calculés par (II.1), représentent les contributions locales du signal à des instants et échelles diverses qui dépendent du choix des paramètres :  $a$  et  $b$ .

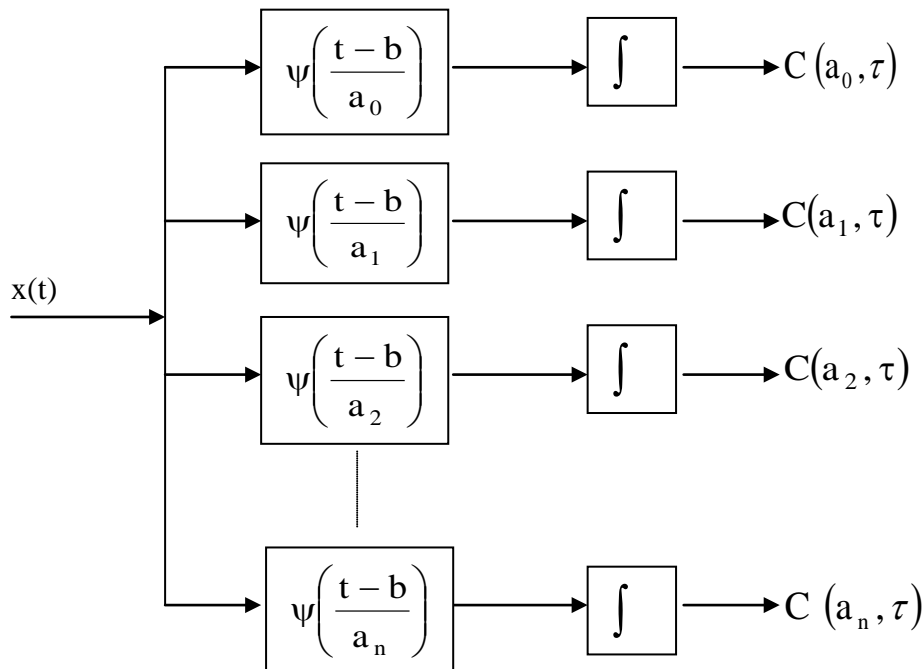
On peut interpréter cette expression comme une projection du signal sur une famille de fonction analysantes  $\psi_{a,b}(t)$  telle que :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.2})$$

$\psi_{a,b}(t)$  Représente les fonctions ondelettes de base, ou parfois appelées ondelettes "filles", elles sont générées à partir de l'ondelette "mère"  $\psi(t)$  par des opérations de dilatation ou de compression 'a' et de décalage 'b'.

L'intégrale (II.1) peut être aussi vue comme un calcul d'intercorrélation entre  $x(t)$  et  $\psi\left(\frac{-t}{a}\right)$  (avec un retard  $b/a$ ) ou comme la sortie de filtres passe bande de réponse impulsionnelle  $\psi\left(\frac{-t}{a}\right)$  d'entrée  $x(t)$ .

Le filtre construit par la version dilatée de l'ondelette mère, traite les informations de basse fréquence. Le filtre relatif à la version comprimée de l'ondelette mère traite les informations de haute fréquence : figure (II.1).



**Fig(II.1) : Banc de filtres de la transformée en ondelettes.**

**IV-2- Propriétés de la transformée en ondelettes continue: [40],[53],[57]****• Linéarité:**

Si  $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$  alors  $C_x(a,b) = C_{x_1}(a,b) + C_{x_2}(a,b)$ .

Si  $x(t) = k x(t)$  alors  $C_x(a,b) = k C_x(a,b)$ .

**• Invariance par translation :**

Si  $x_0(t) = x(t-t_0)$  alors  $C_{x_0}(a,b) = C_x(a, b-t_0)$

Ou  $t_0$  est le paramètre de translation.

**• Invariance par dilatation :**

Si  $x_s(t) = x(s.t)$  alors  $C_{x_s}(a,b) = s^{-1} C_x(s.a, s.b)$  pour  $K = \frac{1}{\sqrt{a}}$ .

Le changement d'échelle conduit alors à la même fonction, à une constante près. L'invariance par dilatation est une propriété fondamentale des ondelettes. Quelle que soit l'échelle et quel que soit l'endroit, l'analyse du signal se fera avec la même fonction.

De plus cette transformation est munie des deux propriétés fondamentales suivantes :

- La transformation en ondelettes conserve l'énergie à une constante multiplicative près indépendante du signal.

- Le signal original peut être recomposé à partir de l'ensemble des coefficients d'ondelettes, par transformée en ondelettes inverse :

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C_x(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^2} db \quad (\text{II.3})$$

Ou  $C_\psi$  est une constante donnée par :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\xi)|^2}{|\xi|} d\xi \quad (\text{II.4})$$

La transformée inverse ne peut être effectuée que si la condition dite d'admissibilité est satisfaite c'est-à-dire :  $C_\psi < \infty$ .

**IV-3- Choix de l'ondelette d'analyse  $\psi$  : [57], [58]**

Si  $\psi$  remplit les conditions suivantes :

- $\psi$  Localisée en temps et en fréquence, c'est-à-dire à support temporel et fréquentiel borné.

- $\psi$  Oscille, c'est-à-dire, l'ondelette analysante sera d'autant plus sensible aux discontinuités qu'elle oscillera beaucoup et ressemblera à une onde amortie.

- $\psi$  Continue, absolument intégrables et de carrée intégrable (énergie finie).
- $\psi$  Analytique c'est-à-dire, sa transformée de Fourier doit être nulle pour  $f < 0$ .
- $\psi$  Admissible, ce qui se traduit par le fait que  $\psi$  est une fonction de moyenne nulle ; permettant à la transformée d'ondelettes de conserver l'énergie.

Alors elle pourra jouer le rôle de l'ondelette analysante.

Le choix de l'ondelette est en principe ouvert, il faut cependant noter la convergence de l'algorithme de reconstruction qui est très dépendant du choix de l'ondelette (formule: II.4).

#### IV-4- Exemple d'ondelettes : [53], [59]

##### A- Ondelette de Morlet (ou ondelette Gaussienne modulée) :

Parmi les ondelettes les plus connues et les plus usitées : l'ondelette de **Morlet** définie par :

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot e^{jw_0 t} \quad (\text{II.5})$$

c'est une ondelette complexe qui peut être décomposée en deux ondelettes, l'une correspondant à la partie réelle et l'autre à la partie imaginaire :

$$\psi_r(t) = c e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(w_0 t) \quad , \quad \psi_i(t) = c e^{-\frac{t^2}{2}} \sin(w_0 t)$$

Avec : C est une constante.

La figure (II.2) montre certaines caractéristiques de cette ondelette telles que l'échelle et le décalage.

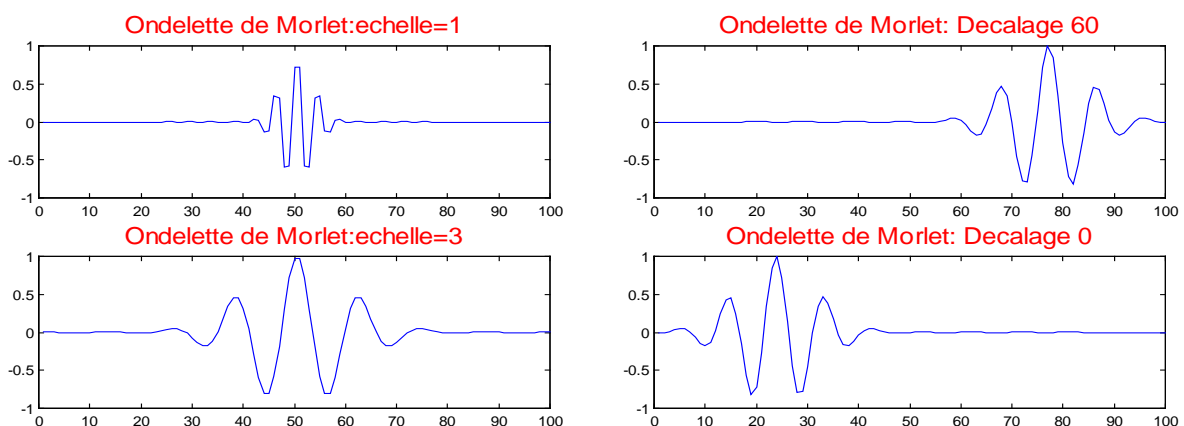


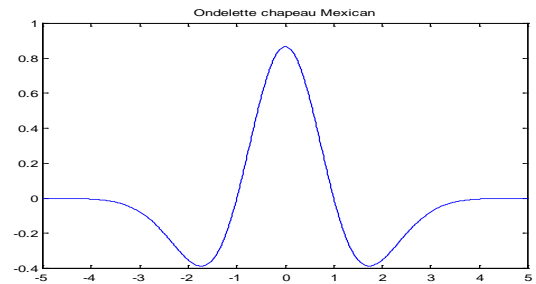
Fig (II.2): Ondelette de Morlet.

**B- Ondelette chapeau mexicain ou la dérivée seconde de la Gaussienne :**

Définie par :

$$\psi(t) = (1 - t^2)e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (\text{II.6})$$

et  $\psi(w) = \sqrt{2\pi} w^2 e^{-\frac{w^2}{2}}$



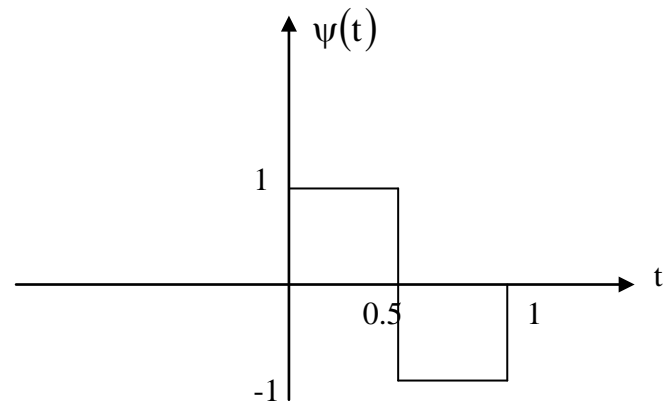
**Fig (II.3) : Ondelette de chapeau mexicain.**

**C- Ondelette de Haar :**

Elle est définie par :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1 & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\psi(w) = j e^{-\frac{jw}{2}} \frac{\sin c\left(\frac{w}{4}\right)}{\frac{w}{4}}$$



**Fig(II.4) : Ondelette de Haar.**

**IV-5- Scalogramme : [39]**

Le Scalogramme représente le carré du module de la transformée en ondelette continue :

$$\rho_x(t, f) = |C_x(a, b)|^2 \quad (\text{II.8})$$

La séparation des fréquences est plus nette avec ce type d'analyse, et c'est ce qui explique sa vaste utilisation dans des domaines variés, à savoir : l'acoustique, le biomédical, la parole, la détection, l'estimation radar,...

**V- Discrétisation :****V-1- Introduction :**

Il y a plusieurs manières d'introduire une analyse en ondelettes discrètes. Pour cela, on a eu recours à la discrétisation du réseau (a, b) qui nécessite d'être sûre que les coefficients de la nouvelle transformation discrète puissent transmettre toute l'information contenue dans le signal.

### V-2- Discrétisation de demi-plan (a, b) :

Nous cherchons à remplacer la famille redondante des fonctions de base  $\Psi_{a,b}$  par une famille dénombrable, en choisissant convenablement "a" et "b".

Nous choisissons "a" et "b" comme suit [38] :

$$(a, b) = (a_0^m, n.b_0.a_0^m) \quad (\text{II.9})$$

Avec :  $a_0 > 1, b_0 \neq 0$  et  $(m, n) \in \mathbb{Z}^2$

La famille d'ondelette sera définie par :

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi(a_0^{-m} \cdot t - n.b_0) \quad (\text{II.10})$$

Sachant que la constante K de l'équation (II.1) est prise  $K = \frac{1}{\sqrt{a}}$ .

En pratique, le choix de  $a_0$  et  $b_0$  est guidé par la minimisation de nombre de points d'analyse dans le but de limiter les redondances d'informations extraites du signal, mais aussi, afin de diminuer le temps du calcul conformément aux deux exigences citées ci-dessus,  $a_0$  fut choisi égal à 2 pour réduire le nombre de points de moitié et  $b_0$  égal à 1 pour que l'indice de translation soit en accord avec la longueur b de translation [38], [58]

Ainsi la nouvelle expression des ondelettes sera :

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \Psi(2^{-m} t - n) \quad (\text{II.11})$$

Ainsi ; les coefficients d'ondelettes doivent être indépendants, d'où l'absence d'information redondante après l'analyse.

Et la reconstruction exacte du signal échantillonné se fait à partir de :

$$x(i) = \sum_{m \in \mathbb{Z}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} C_{m,n} \cdot \Psi_{m,n}(i) \quad (\text{II.12})$$

avec :  $C_{m,n} = \langle x, \Psi_{m,n} \rangle$  sachant que :  $\langle \cdot \rangle$  est le produit scalaire.

### V-3 - Transformée en Ondelettes discrète : [53]

a et b sont discrétisés :  $a = a_0^m$  et  $b = n.b_0.a_0^m$ ,  $a_0$  et  $b_0$  sont des intervalles d'échantillonnage et m, n des entiers, et pour une efficacité du calcul on pose  $a_0=2, b_0=1$ . L'expression de la TOD est donnée par :

$$C_x(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_i x(i) \Psi(2^{-m} i - n) \quad (\text{II.13})$$

## VI- L'analyse en Multirésolution :

### VI-1- Définition :

L'approche multirésolution vise à présenter un signal quelconque à différentes échelles ou niveaux de résolution [60].

On considère l'espace vectoriel  $L^2$  de fonction carré intégrable dans  $\mathfrak{R}$  :

$$L^2 = \left\{ x : \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt < \infty \right\}$$

Et on cherche à écrire une fonction  $x(t)$  de  $L^2$  comme une suite d'approximations successives, chacune d'elle étant la fonction  $x(t)$  lissée avec des fonctions de plus en plus concentrées, ces approximations n'ont pas la même résolution. L'analyse en multirésolution est donc une suite croissante de sous espaces linéaires  $V_j$  ( $j \in \mathbb{Z}$ ) de  $L^2(\mathfrak{R})$  ayant les propriétés suivantes [40], [53] :

#### ✓ Emboîtement des sous-espaces :

$$V_{j+1} \subset V_j \quad \text{ou : } \dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \subset \dots$$

Si  $x(t) \in V_j$  alors  $x(t) \in V_{j-1}$ . Tel que le passage d'un espace à l'espace suivant se fait par changement d'échelle, par exemple dans le cas dyadique :

$$\text{Si } x(t) \in V_j \Leftrightarrow x(2t) \in V_{j-1}.$$

#### ✓ Densité de l'espace engendré :

$\cup V_j = L^2$ , autrement dit, si  $x(t) \in L^2$ , sa projection  $\overline{x_j}(t)$  dans  $V_j$  tend vers  $x(t)$  lorsque  $j \rightarrow +\infty$ .

#### ✓ Racine de l'analyse nulle :

$\cap V_j = 0$ ; La projection  $\overline{x_j}(t)$  de toute fonction  $x(t) \in L^2$ , converge vers la fonction constante nulle lorsque  $j \rightarrow -\infty$ .

#### ✓ Propriété d'invariance par translation :

$$\text{Si } x_j(t) \in V_j \text{ alors } \forall k \in \mathbb{Z}, x_j(t - k) \in V_j$$

#### ✓ Propriété d'invariance par dilatation :

$$\text{Si } x_j(t) \in V_j \text{ alors } x_j(2t) \in V_{j-1}$$

Le choix du facteur 2 correspond à celui de l'analyse dyadique. Celui-ci est plus simple à mettre en œuvre. Il existe cependant d'autres analyses, telle que l'analyse en quinconce où le facteur est de  $\sqrt{2}$ .

## VI- 2- Décomposition :

Dans les conditions ci-dessus, on peut montrer qu'il existe une fonction dite : fonction d'échelle, qui par dilatation et translation, constitue une base pour les espaces  $V_j$  [53] :

$$\exists \varphi(t) \in V_0 : \varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k) \quad k \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.14})$$

$\varphi$  est appelée la fonction mère.

La base sera orthonormée si :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) \varphi(t+n) dt = \delta(n) \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.15})$$

L'action de projeter  $x$  fournit sa décomposition sur la base des fonctions d'échelles et les coefficients de cette décomposition constituent l'approximation à l'échelle  $j$  ( $A_j$ ) de  $x$ .

$$A_j = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle x, \varphi_{j,n} \rangle \varphi_{j,n} \quad (\text{II.16})$$

Les espaces  $V_j$  sont appelés espaces d'approximation.

Comme  $V_j \subset V_{j-1}$ , il y a des fonctions dans  $V_{j-1}$  qui n'appartiennent pas à  $V_j$ . Pour générer tous les éléments dans  $V_{j-1}$  à partir de  $V_j$ , on a besoin d'un espace supplémentaire. On définit pour chaque espaces  $V_j$  son complément orthogonal  $W_j$  dans  $V_{j-1}$ , comme  $W_{j-1}$  est orthogonale à  $V_{j-1}$ , alors  $W_{j-1}$  sera orthogonal à  $W_j$  ( $W_j \subset W_{j-1}$ )  $\forall j \neq k \quad W_j \perp W_k$ .

Les sous-espaces  $W_j$  ne forment pas une famille d'espaces emboîtés mais les propriétés d'échelle et d'invariance par translation sont conservées.

$V_{j-1}$  peut être décomposé dans l'union des bases de  $V_j$  et  $W_j$

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j$$

$$L^2(\mathfrak{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j$$

avec  $\oplus$  : désigne la somme des sous espaces.

Dans ces conditions, on peut montrer qu'il existe une fonction  $\psi$ , appelée fonction d'ondelette, qui par dilatation et translation, engendre une base orthonormée des  $W_j$  et donc de  $L^2$ . En plus, elle serait l'ondelette mère car pour tous les autres sous espaces  $W_j$  la fonction de base est construite par la relation :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad (\text{II.17})$$

l'approximation à l'échelle  $j-1$  sera reconstruite à partir de l'approximation à l'échelle  $j$ , et en utilisant les détails du signal fournis par sa projection sur la base  $W_j$  suivant la relation :

$$A_{j-1}(x) = A_j(x) + \sum_n \langle x, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n} \quad (\text{II.18})$$

On notera  $D_j(x)$  la projection de  $x$  dans  $W_j$  et le signal de détail sera décrit par :

$$D_j(x) = \sum_n \langle x, \psi_{j,n} \rangle \psi_{j,n} \quad (\text{II.19})$$

Le signal de détail est constitué d'une suite dont les éléments sont les coefficients en ondelette. La formule de reconstruction s'écrit :

$$A_{j-1}(x) = A_j(x) + D_j(x) \quad (\text{II.20})$$

$D_j$  : contient la différence d'information entre  $A_{j-1}$  et  $A_j$ .

Le problème posé est de trouver un algorithme qui permet, à partir d'une approximation donnée, de trouver l'approximation et les détails à la résolution immédiatement inférieure, ce qui, par itération successive, conduit à l'analyse du signal pour toutes les résolutions inférieures à celle de départ. Deux algorithmes principaux ont été mis en évidence, "l'algorithme à trous" et "l'algorithme de S.Mallat" [40], [57] ; dans notre cas on s'intéressera à ce dernier.

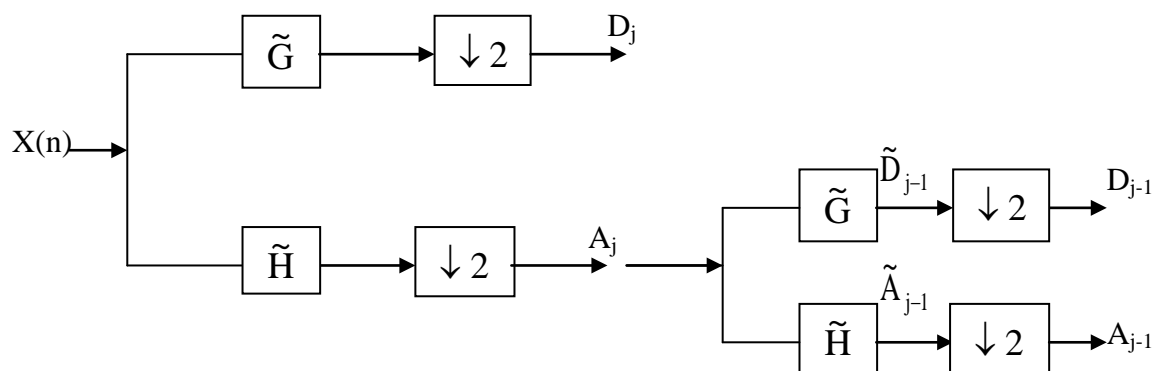
### VI-3- Algorithme de S.Mallat :

L'algorithme de S.Mallat permet d'effectuer les décompositions données en (II.18) et (II.19) d'un signal  $x(t)$ , ainsi que sa synthèse [38], [55], [60].

#### VI-3-1- Décomposition :

Elle s'effectue par un algorithme en cascade : figure (II.5) ; procédant, respectivement par filtrages successifs puis sous-échantillonnage à une cadence de 2, conformément au théorème de **Shannon**, par l'introduction du filtre numérique  $h$  dont la réponse impulsionnelle est donnée par [38], [53] :

$$h(n) = 1/2 \langle \varphi^{-1}(u), \varphi(u-n) \rangle \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (\text{II.21})$$



$\downarrow 2$  : Signifie enlever un échantillon sur deux.

Fig(II.5) : Schéma bloc de l'algorithme de décomposition de S.Mallat.

Si on note  $\tilde{h}(n) = h(-n)$  et  $\tilde{g}(n) = g(-n)$  : les séquences retournées ou les filtres symétriques ou miroirs de  $h$  et  $g$  respectivement, on obtient, après la convolution de  $\tilde{h}$  et le signal d'entrée, le signal d'approximation  $A_{j-1}$  :

$$\tilde{A}_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-n) \cdot A_j x(k) \quad (\text{II.22})$$

Et après décimation par 2, cette même équation s'écrira :

$$A_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-2n) A_j x(k) \quad (\text{II.23})$$

De même la convolution du signal à analyser avec le filtre numérique  $g$ , dont la réponse impulsionnelle est donnée par :

$$g(n) = \frac{1}{2} \langle \psi^{-1}(u), \varphi(u-n) \rangle \quad \forall n \in \mathbb{Z}$$

Donne l'équation de détail suivante :

$$\tilde{D}_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-n) A_j x(k) \quad (\text{II.24})$$

L'équation de décomposition du signal de détail après l'opération de décimation s'écrit:

$$D_{j-1}x(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-2n) A_j x(k) \quad (\text{II.25})$$

**NB:**  $h$  est un filtre passe-bas associé à la base d'interpolation (ou fonction d'échelle  $\varphi(t)$ ) ;  $g$  est un filtre passe-haut associé à l'ondelette analysante  $\psi(t)$ .

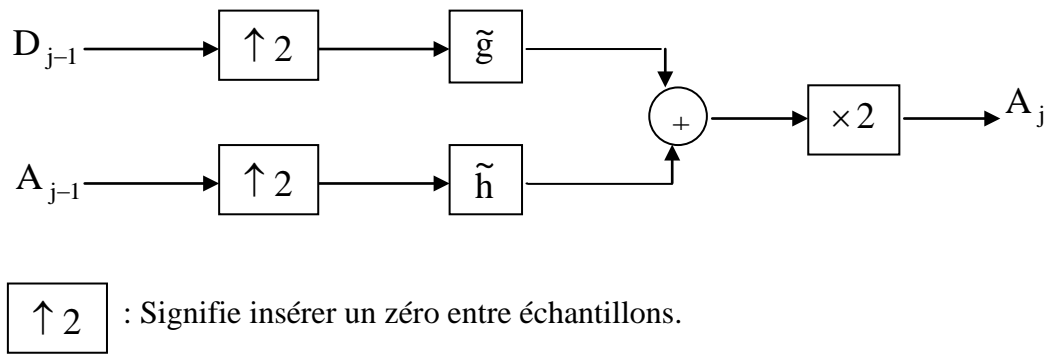
Dans notre cas (analyse dyadique), le passage d'une échelle à une autre s'accompagne d'une diminution de résolution d'un facteur de deux. Si un signal est constitué de  $2^P$  points, alors le nombre maximum d'itérations est  $P$ . En effet, à chaque approximation le nombre de point est divisé par 2 et, par conséquent, après  $P$  itérations, notre signal se réduit à un point, d'où la fin de la décomposition.

### VI-3-2- La reconstruction :

La reconstruction du signal original est aussi aisée [38], [53] :

$$A_j x(n) = 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(k-2n) A_{j-1} x(k) + 2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \tilde{g}(k-2n) D_{j-1} x(k) \quad (\text{II.26})$$

Ainsi, l'approximation discrète du signal à la résolution  $2^j$  peut être reconstituée en ajoutant l'approximation discrète à la résolution  $2^{j-1}$  aux détails correspondants. Une interpolation par 2 est réalisée avant l'addition, cette opération consiste à insérer un zéro entre chaque 2 points successifs et afin de restituer parfaitement le signal de départ, il ne faut pas oublier le terme multiplicatif 2. Tout ceci est illustré par la figure (II.6) :



**Fig (II.6) : Schéma bloc de l'algorithme de reconstruction de S.Mallat.**

## VII- Ondelettes et moments :

Une des principales caractéristiques de la transformation en ondelettes est de révéler l'aspect irrégulier des signaux. Pour cela, elle exhibe aux petites échelles des coefficients de grande amplitude là où le signal est irrégulier, et des coefficients nuls ou quasi nuls là où il est régulier. L'insensibilité de la T.O au comportement régulier est obtenue en imposant la condition des moments nuls ou d'oscillation. On note le moment d'ordre  $k$  de l'ondelette  $\psi$  par :  $M_{\psi}^k$ , il est défini comme suit [57] :

$$M_{\psi}^k = \langle x^k, \psi \rangle = \int_{\mathbb{R}} \psi(t) \cdot x^k(t) dt \quad (\text{II.27})$$

On dit que l'ondelette  $\psi$  à  $p$  moments nuls si :  $M_{\psi}^k = 0$ , pour  $k = 0, 1, \dots, p-1$ . Ce nombre est relié à la douceur de l'ondelette.

## VIII- Conclusion :

Ce chapitre avait pour but de présenter d'autres outils supplémentaires et essentiels pour le traitement des signaux non-stationnaires. Pour cela, on a d'abord donné une idée générale sur la notion de temps-échelle, qui étend le champ d'action du temps-fréquence par l'introduction de l'analyse en ondelette continue (Scalogramme) qui constitue ainsi une *version affine de la TWV* ; puis on a passé à l'analyse multirésolution qui permet de décomposer un signal en différente échelle de résolution dont le but de détecter les irrégularités et les informations pertinentes dans chaque échelle d'analyse.

Enfin, nous avons vu que, grâce à l'algorithme de Stéphane Mallat, l'analyse-synthèse de toute sorte de signal est devenue aisée, par la suite, nous nous intéresserons à l'application de ces méthodes aux signaux ultrasonores et qui fera le but de la partie suivante.

## Chapitre 1 : Résultats de l'analyse.

### I- Introduction :

Dans ce chapitre nous présenterons le résultat de l'application des méthodes d'analyses : fréquentielle, temps-fréquence et temps-échelle, et leurs différentes versions, sur les échos ultrasonores provenant des pièces contenant divers types de défauts.

Nous présenterons également une étude comparative entre les résultats des différentes méthodes implémentées.

### II- Description des signaux :

Dans ce paragraphe, on va donner un aperçu sur la partie expérimentale, qui nous a permis d'enregistrer ces échos, ainsi que, la description de ces même signaux ; on limitera notre étude aux pièces contenant des défauts de types volumique et plan, des trous artificiels et sur des joints soudés.

#### II-1- Données expérimentales :

Les essais ont été réalisés au laboratoire de traitement du signal de CSC (Centre de Soudage de Chéraga) :

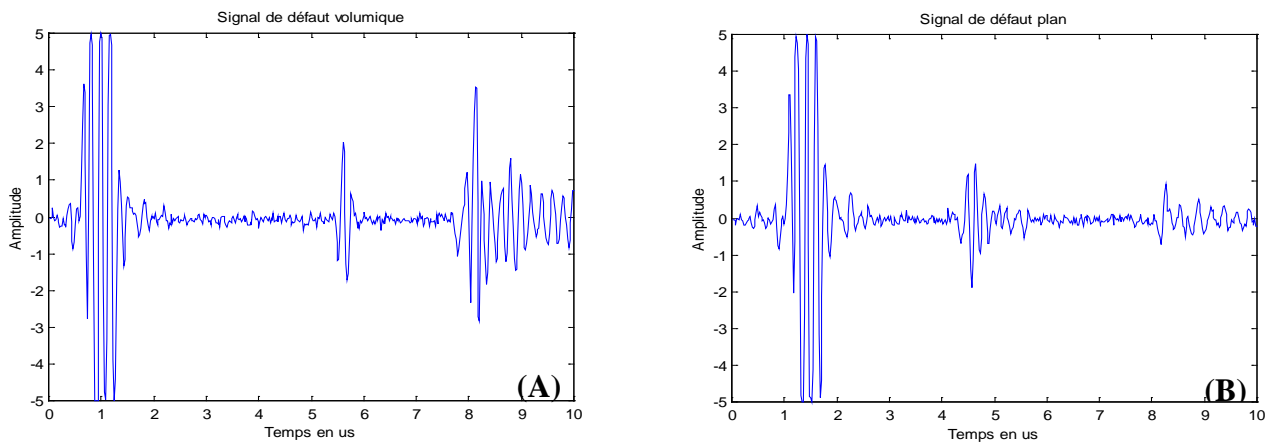
- Sur des pièces en acier, en Plexiglas et sur les joints soudés ;
- Avec des transducteurs piézo-électriques ;
- En utilisant des ondes longitudinales ;
- La vitesse de ces ondes dans l'acier est :  $V_{\text{Acier}} \approx 5900$  m/s et dans le Plexiglas

$V_{\text{Plexiglas}} \approx 2670$  m/s ;

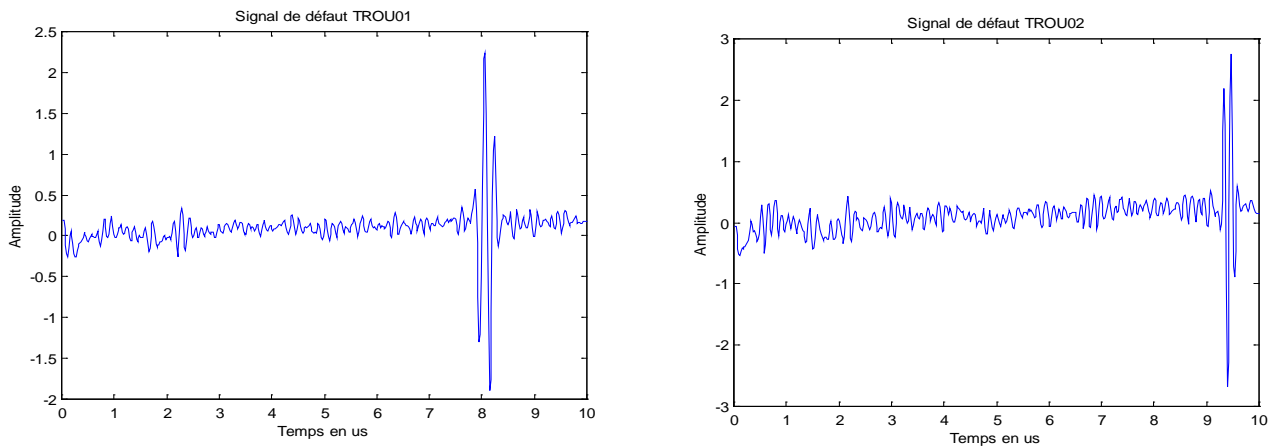
- La technique de contrôle est par échos ;
- Sa mise en œuvre est en immersion ;
- En utilisant un transducteur non focalisé ;
- Le mode d'excitation est impulsionnel ;
- Avec un angle d'incidence de :  $0^0$ , sauf dans le cas du contrôle des joints soudés ;

#### II-2- Exemple des échos obtenus :

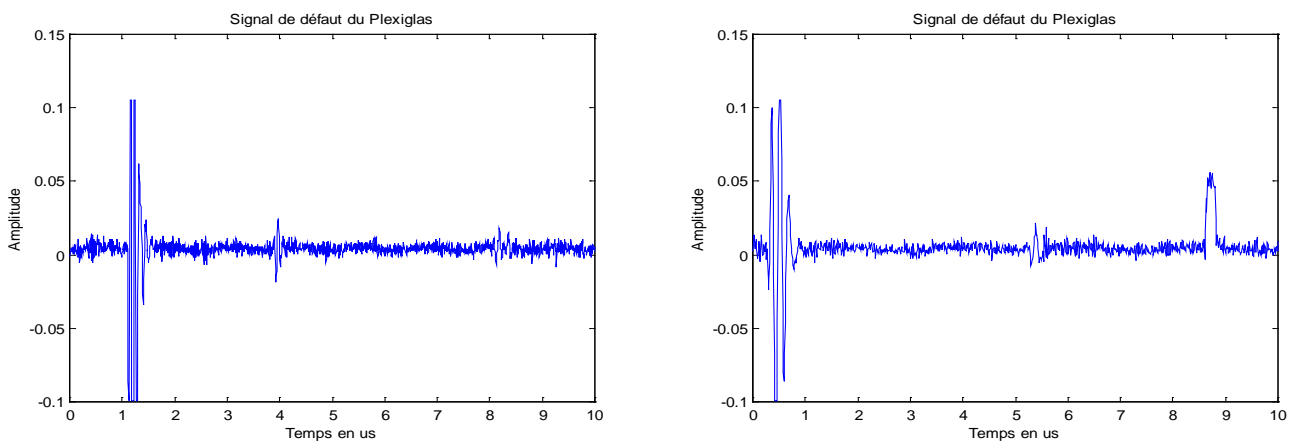
Dans ce qui suit, on donnera la représentation graphique de certains échos ultrasonores obtenus :



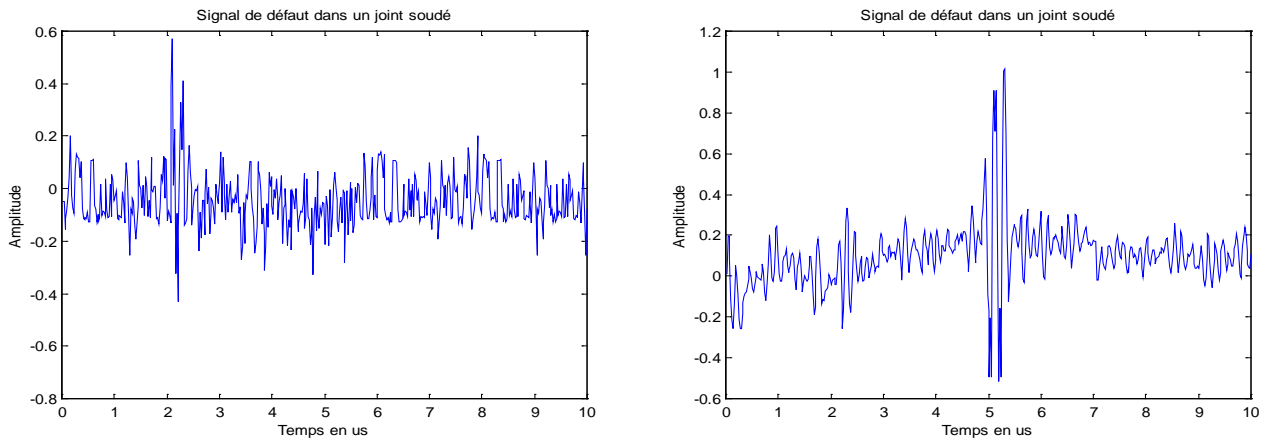
**Fig (I.1) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en acier contenant un défaut. (A) : volumique VL 110 - (B) : plan PL 2.**



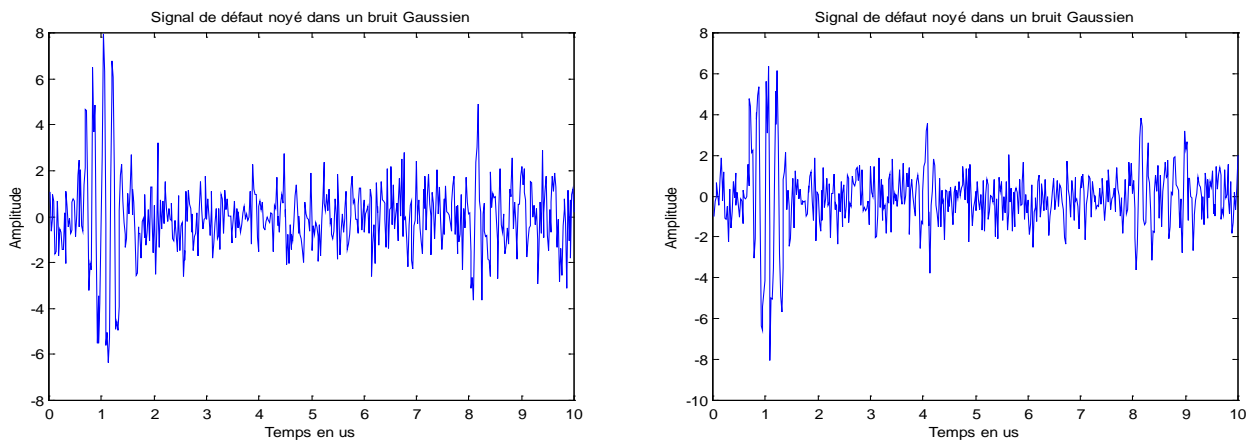
**Fig (I.2) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en acier, contenant un trou, avec les échos des faces avant et arrière non représentés.**



**Fig (I.3) : Exemples de signaux d'écho provenant d'une pièce en plexiglas contenant un défaut.**



**Fig (I.4) : Exemples de signaux d'écho provenant d'un joint soudé contenant un défaut.**



**Fig (I.5) : Exemples de signaux d'écho noyés dans un bruit Gaussien.**

### Remarque :

Nous remarquons que les échos obtenus présentent des structures similaires ceci est dû à la physique de propagation des ultrasons dans les matériaux (P I- chapitre : 2), le premier écho est appelé écho de *face* dû à la variation de l'impédance acoustique entre la face avant du matériau et celle du milieu de propagation ; de même pour l'écho de *fond* (troisième écho sur les figures). L'écho du milieu représente l'écho du défaut ce dernier est dû aussi à la variation d'impédance, mais cette fois-ci à l'intérieur du matériau.

### III- Résultats de l'analyse :

Dans le but de vérifier l'efficacité de la méthode de détection des non-stationnarités (ou des défauts), décrite dans les paragraphes précédents, nous avons effectué des essais sur les signaux réels ; or comme on remarque une ressemblance très grande entre certains signaux, on a pris seulement quatre exemples qui sont le signal : VL 110 fig (I.1), le signal TROU01 fig (I.2), celui du joint soudé fig (I.4) et enfin celui du signal noyé dans du bruit gaussien dont le rapport signal sur bruit (RSB) dépasse dans certains cas (- 7 db) : fig (I.5). Notre objectif, à travers ces expérimentations, est de détecter l'écho du défaut sans éliminer le bruit, ceci pour démontrer la robustesse de l'approche utilisée.

Les figures suivantes montrent les résultats obtenus selon les trois approches d'analyse fréquentielle, temps-fréquence et temps-échelle.

#### III-1-Résultat de l'analyse fréquentielle :

Avec une fenêtre de Hanning de largeur 32 échantillons on calcul le spectre fréquentiel de ces signaux le résultat est illustré ci dessous :

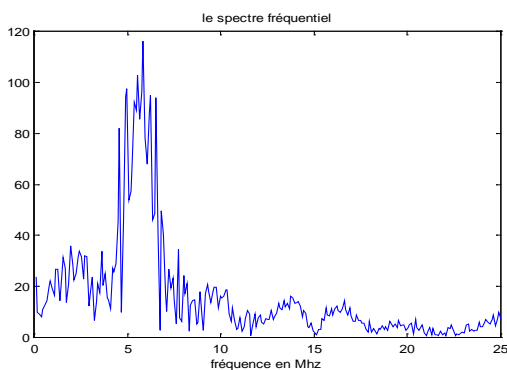


Fig (I.6) : Spectre fréquentiel du signal VL110

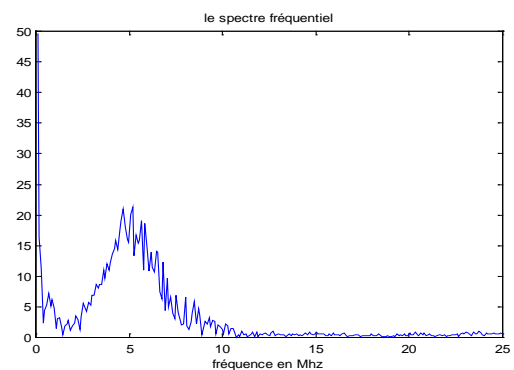


Fig (I.7) : Spectre fréquentiel du signal TROU01.

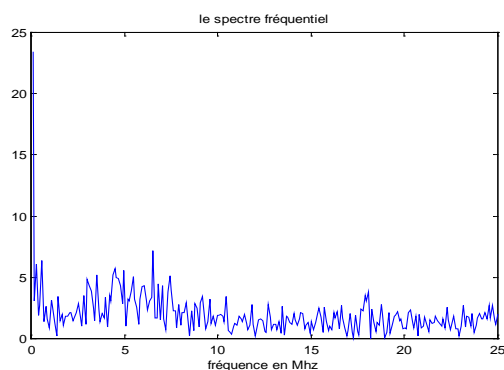


Fig (I.8) : Spectre fréquentiel du signal provenant d'un joint soudé.

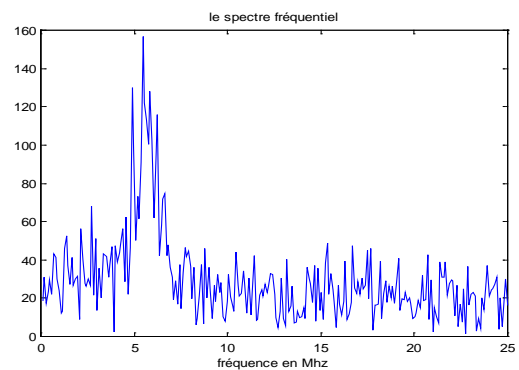


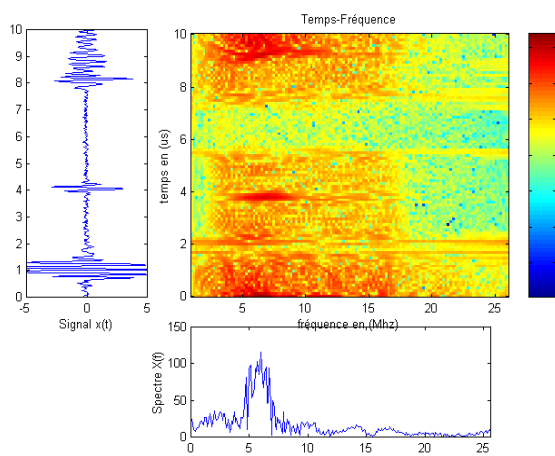
Fig (I.9) : Spectre fréquentiel du signal noyé dans un bruit gaussien.

D'après les figures précédentes, on remarque que le spectre fréquentiel présente un étalement du spectre sur une plage de 0 à 25 Mhz, et admet des amplitudes élevées autour de 5 Mhz, qui correspond à la fréquence du palpeur. Mais, il ne donne aucune informations sur la présence ou l'absence du défaut, ni sur sa position.

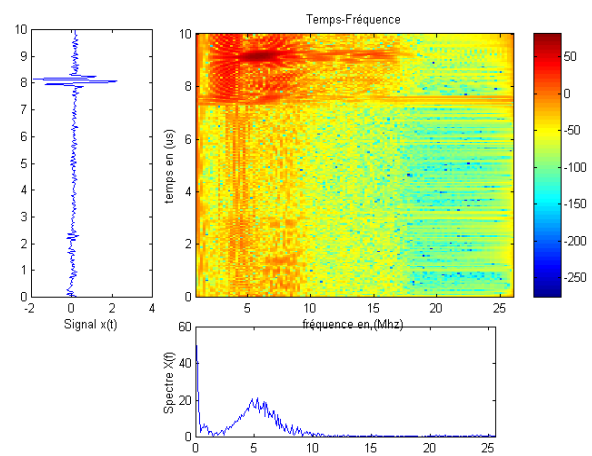
### III-2- Résultat de l'analyse Temps-fréquence :

#### III -2-1- Spectrogramme :

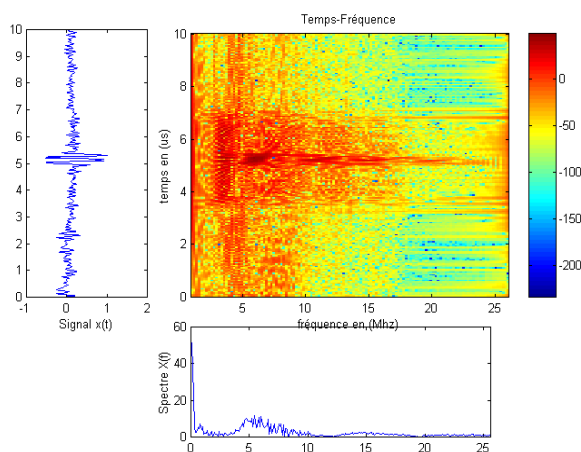
Pour représenter le spectrogramme de ces signaux, on a choisi les paramètres suivants : une fenêtre temporelle de Hanning de largeur 32 échantillons qui est inférieure à la largeur de défaut, et un décalage de 4 échantillons. Le résultat est présenté en figure (I.10) à (I.13).



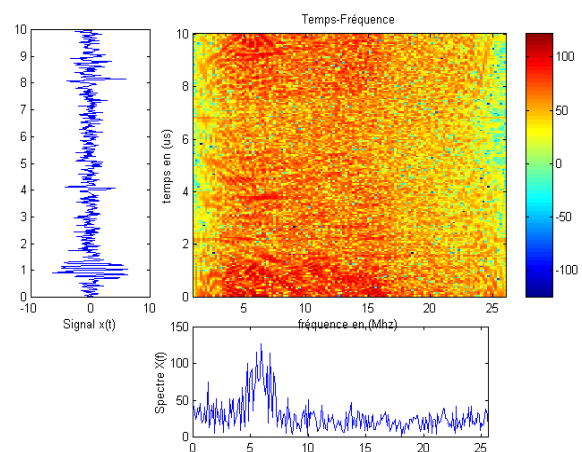
**Fig (I.10) : Spectrogramme du signal VL110.**



**Fig (I.11) : Spectrogramme du signal TROU01.**



**Fig (I.12) : Spectrogramme du signal provenant du joint soudé.**



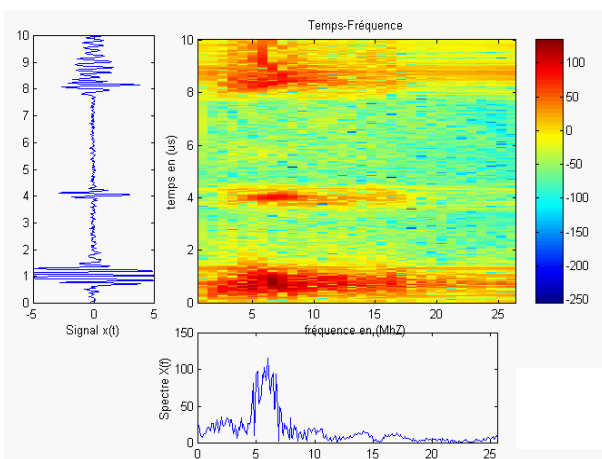
**Fig (I.13) : Spectrogramme du signal bruité.**

Les résultats de l'analyse par Spectrogramme montrent un avantage par rapport au spectre fréquentiel en ce qui concerne la détection du défaut, mais il présente des inconvénients, comme la résolution temporelle, où on remarque un étalement considérable des composantes du signal, d'où la mauvaise localisation des termes recherchés, et en plus il laisse apparaître des termes d'interférences qui peuvent masquer les composantes du signal surtout en présence du bruit (exemple du signal bruité : Fig (I.13)).

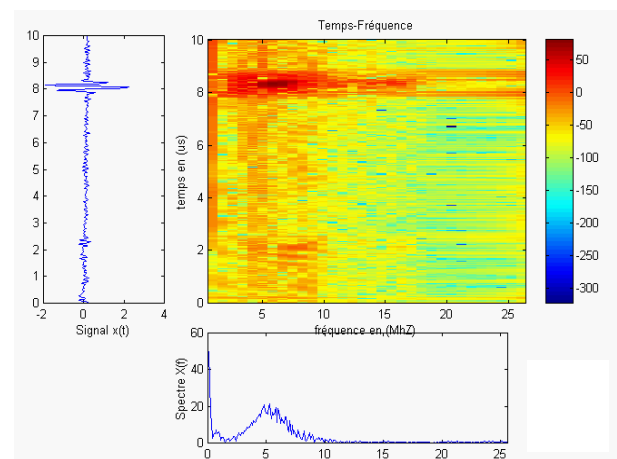
Ceci est dû à la résolution du Spectrogramme, qui s'obtient à partir de l'observation du signal pendant une durée déterminée, à l'aide d'une fenêtre glissante choisie afin d'éviter les non-stationnarités, donc il ne permet pas d'avoir une bonne résolution temporelle et fréquentielle simultanément.

### III-2-2- Transformée de Wigner-Ville :

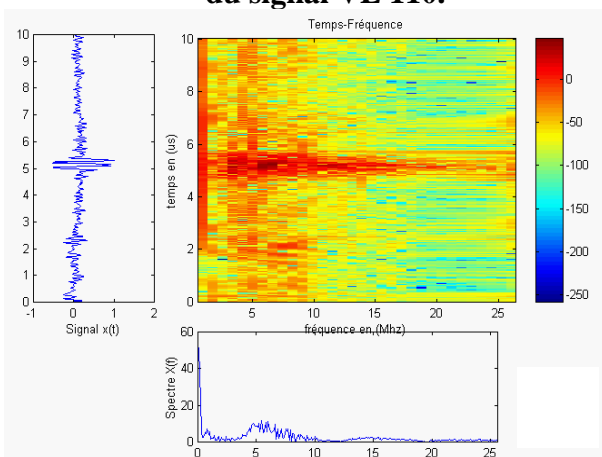
On applique la formule de la TWV sur ces signaux, et on obtient les résultats ci-dessous :



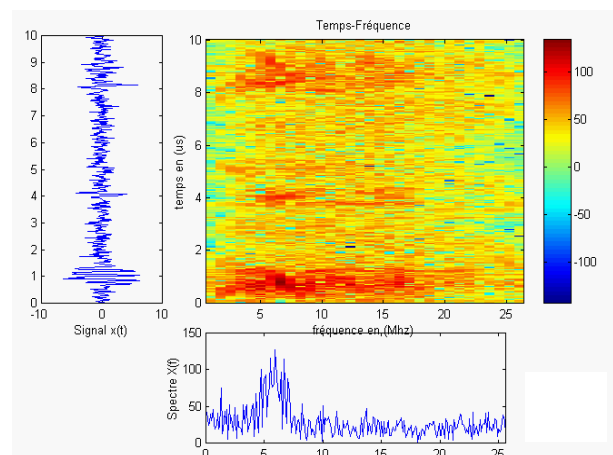
**Fig (I.14) : Distribution de Wigner-Ville du signal VL 110.**



**Fig (I.15) : Distribution de Wigner-Ville du signal TROU01.**



**Fig (I.16) : Distribution de Wigner-Ville du signal provenant du joint soudé.**

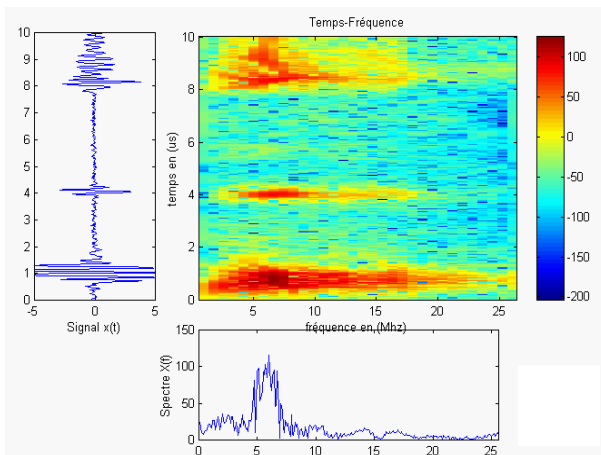


**Fig (I.17) : Distribution de Wigner-Ville du signal bruité.**

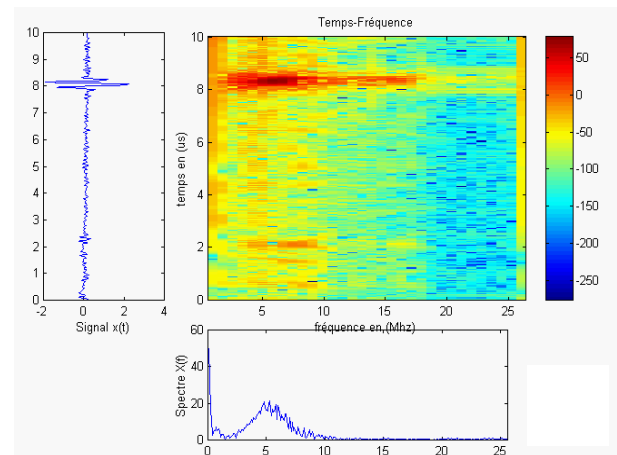
La transformée de Wigner-Ville de ces signaux a permis, d'une part, une analyse plus fine, en temps et en fréquence par rapport au Spectrogramme, et d'autre part, une concentration d'énergie plus élevée autour des composantes du signal. Mais elle présente l'inconvénient de faire apparaître des termes d'interférences qui peuvent masquer les composantes du signal (défauts) surtout en présence du bruit Fig (I.17). Ces termes d'interférence s'étalent dans les deux directions : sur toute la bande fréquentielle du signal et sur toute la durée du signal, d'où l'obligation de réaliser un lissage temporel et fréquentiel pour l'amélioration de l'image temps-fréquence.

### III-2-3- La Pseudo Wigner-Ville :

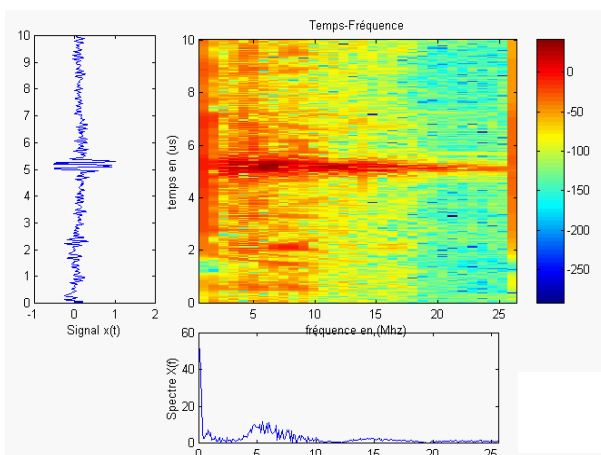
On choisit pour cela une fenêtre temporelle de Bartlett de largeur 32 échantillons, et avec un décalage de 4 échantillons et on obtient les résultats suivants :



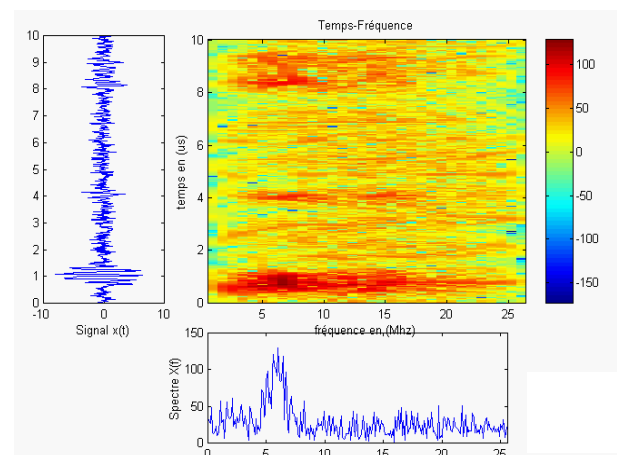
**Fig (I.18) : La Pseudo Wigner-Ville du signal VL110.**



**Fig (I.19) : La Pseudo Wigner-Ville du signal TROU01.**



**Fig (I.20) : La Pseudo Wigner-Ville du signal provenant d'un joint soudé.**



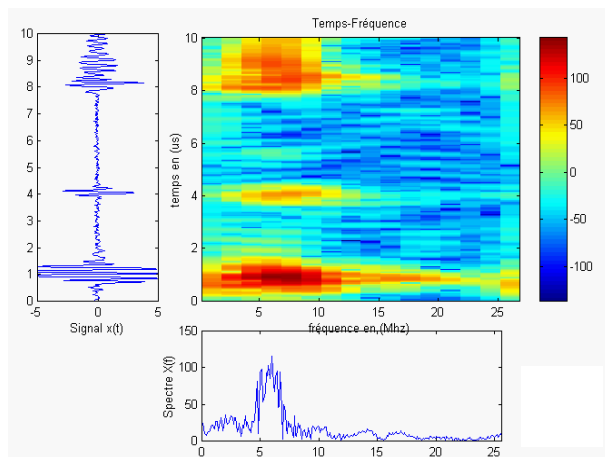
**Fig (I.21) : La Pseudo Wigner-Ville du signal bruité.**

La Pseudo Wigner-Ville appliquée à ces signaux met en évidence un effet de lissage selon la direction fréquentielle, par rapport à la DWV et au Spectrogramme, ce qui a réduit l'étalement en fréquence, de même l'amplitude du terme d'interférence est réduite et les termes propres du signal sont plus apparents, par rapport aux cas précédents ; mais ce terme parasite existe toujours, ce qui nous mène à effectuer un autre lissage mais cette fois-ci selon la direction temporelle.

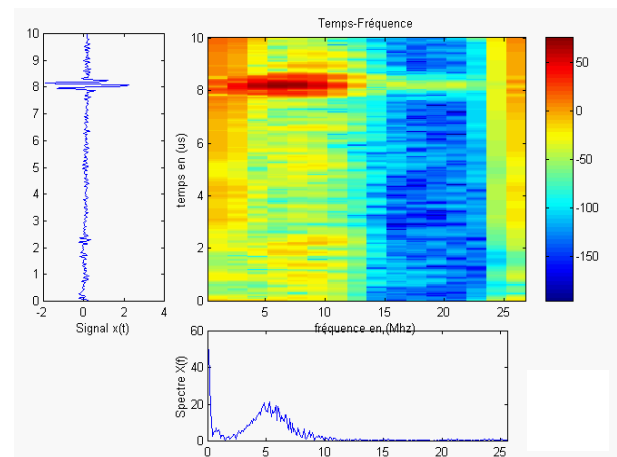
La Pseudo Wigner-Ville de ces signaux permet de déterminer avec précision l'instant d'apparition des composantes du signal, et leur structure fréquentielle, même en présence du bruit, ce qui constitue la première solution du problème.

### III-2-4 - La Pseudo Wigner-Ville Lissée :

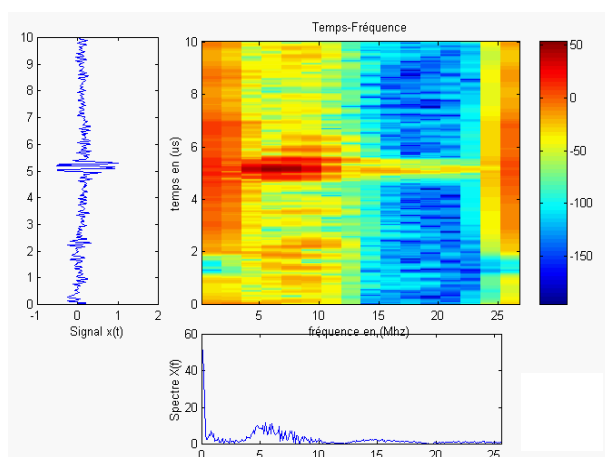
On choisit pour cela une fenêtre de lissage temporelle de Hamming de largeur 16 échantillons, et une fenêtre de lissage fréquentielle de Hanning de même largeur, avec un décalage de 2, les résultats obtenus sont illustrés dans les figures (22 à 25).



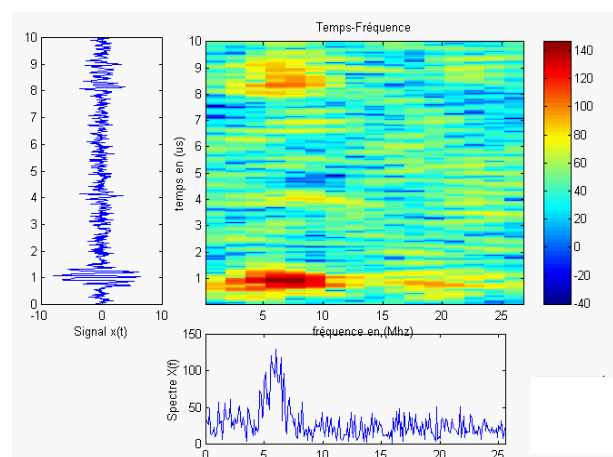
**Fig (I.22) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal VL110.**



**Fig (I.23) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal TROU 01.**



**Fig (I.24) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du provenant d'un joint soudé.**



**Fig (I.25) : La Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal bruité.**

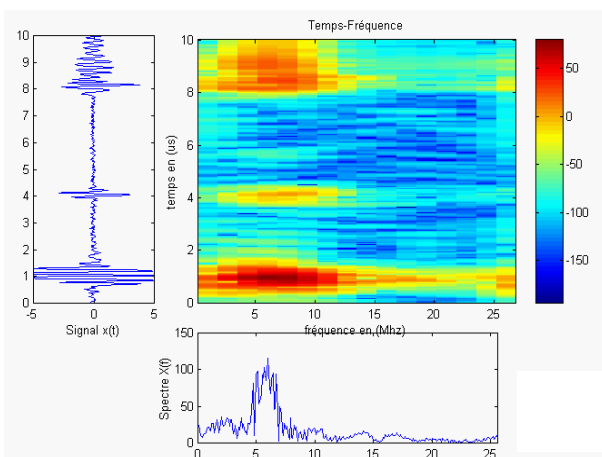
Les mêmes remarques que la PWV restent valides pour la Pseudo Distribution de Wigner-Ville Lissée PWVL, figures : (I.22) à (I.25) ; mais avec un lissage en plus selon la direction temporelle, ceci est très visible, et en comparant par rapport à la DWV et la PWV, on remarque une réduction très nette de l'amplitude et de l'étalement des termes d'interférences, selon l'axe des fréquences, et selon l'axe des temps, ce qui facilite d'avantage la visualisation du défaut, ainsi que sa position et sa nature (par la signature spectrale du défaut, devenue plus nette).

Les images temps-fréquence obtenues avec un lissage plus important permettent néanmoins de visualiser les composantes de niveau plus faible masquées par des interférences, voir l'exemple du signal noyé dans le bruit Fig (I.25). D'où l'obligation de réaliser plusieurs analyses d'un même signal avec des paramètres d'analyses différents, c'est-à-dire en faisant varier les largeurs des fenêtres d'analyses temporelles et fréquentielles et la nature de ces fenêtres (Hamming, Hanning, Kaiser, Blackman, ...) de même le pas du décalage.

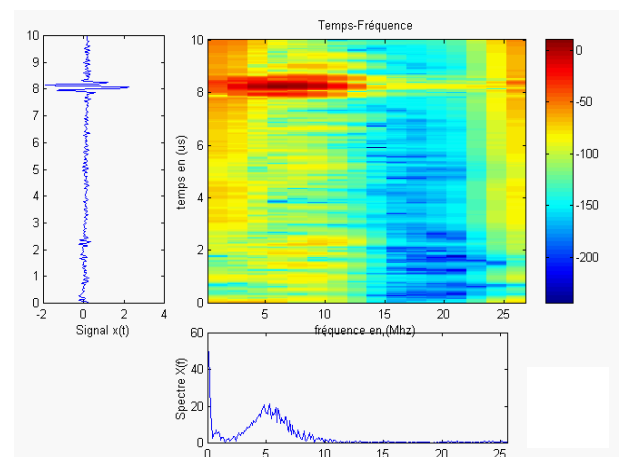
L'autre alternative choisie pour l'amélioration des résultats est l'utilisation d'autres méthodes de lissage temps-fréquence, par construction d'un autre noyau, c'est-à-dire, une nouvelle représentation temps-fréquence qui conserve les avantages de la TWV, et permet d'éliminer les termes d'interférences, pour cela on a considéré les représentations de *Choi-Williams* et *Zhao-Atlas-Marks*.

### III-2-5- Méthode de Choi-Williams :

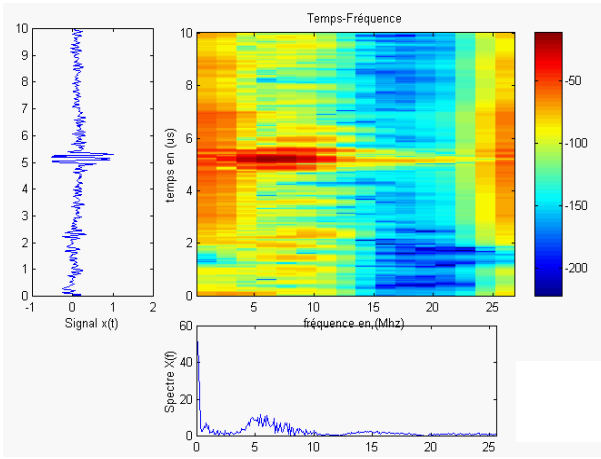
On choisit pour cette représentation une fenêtre de lissage temporelle de Hamming de largeur 16 échantillons, et la même fenêtre de lissage fréquentielle dont la largeur est de 16 échantillons et une variance de 2, avec un décalage de 4 échantillons, figure (I.26) à (I.29).



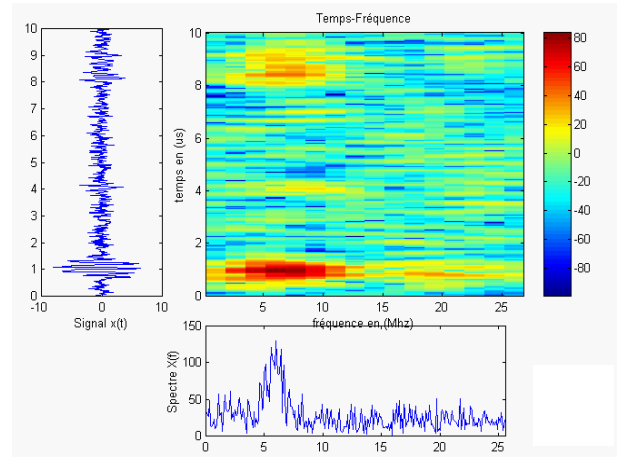
**Fig (I.26) : Distribution de Choi-Williams du signal VL110.**



**Fig (I.27) : Distribution de Choi-Williams du signal TROU01.**



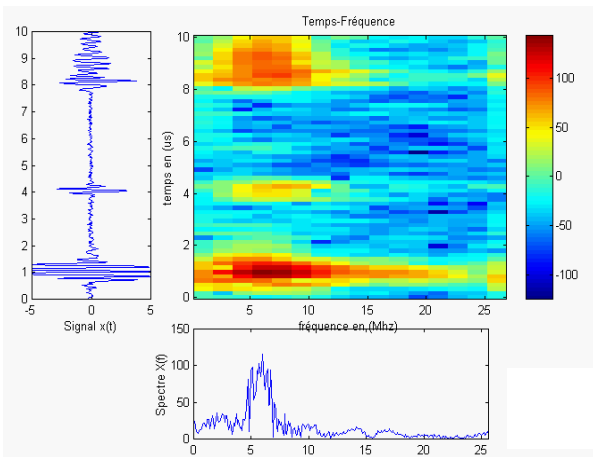
**Fig (I.28) : Distribution de Choi-Williams du signal provenant du joint soudé.**



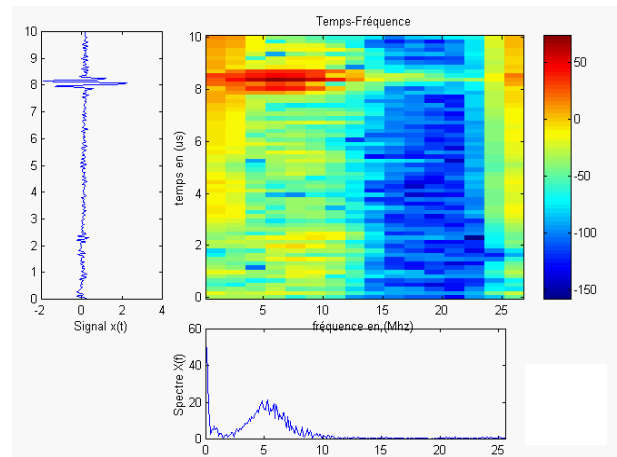
**Fig (I.29) : Distribution de Choi-Williams du signal bruité.**

**III-2-6- Méthode de Zhao-Atlas-Marks :**

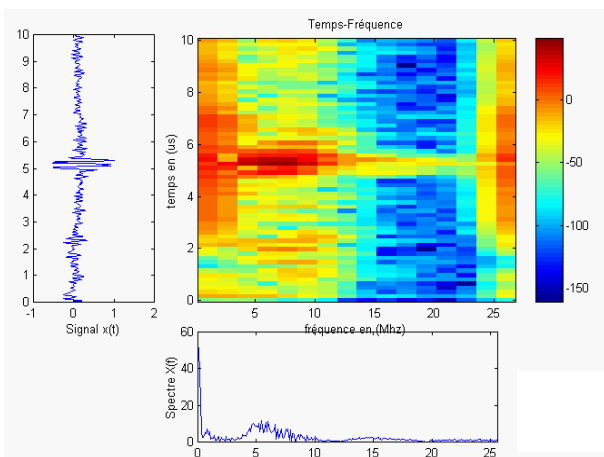
On a opté pour cette représentation, une fenêtre de lissage fréquentielle de Kaiser de largeur 16 échantillons, avec un décalage de 4 échantillons et on obtient les résultats présentes en figures (I.30)- (I.33).



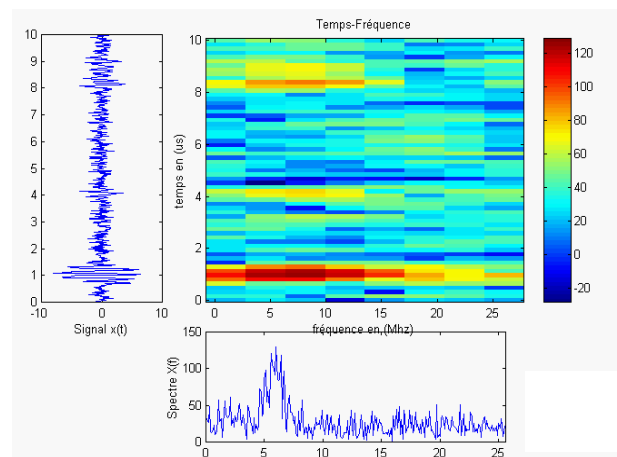
**Fig (I.30) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal VL110.**



**Fig (I.31) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal TROU01.**



**Fig (I.32) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal provenant du joint soudé.**



**Fig (I.33) : Distribution de Zhao-Atlas-Marks du signal bruité.**

D'après les résultats obtenus ci-dessus, on remarque que ces deux méthodes (CW, ZAM), offrent une meilleure résolution par rapport à la DWV et le spectrogramme, et elles donnent des résultats très comparables à ceux de la PWVL. Ces dernières donnent de meilleurs résultats pour des signaux plus complexes, exemple du signal bruité Fig (I.29), et Fig (I.33).

### Remarques sur les résultats temps-fréquence obtenus :

Nous remarquons, que toutes les représentations temps-fréquence implémentées, illustrent le défaut recherché, plus au moins lisiblement selon la version utilisée ; contrairement aux résultats donnés par le spectre fréquentiel.

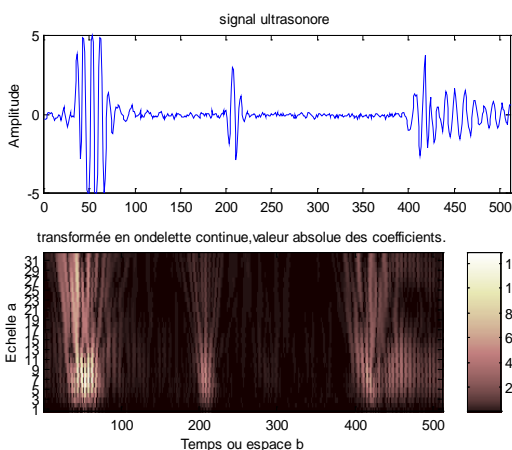
Ces résultats, confirment, encore une fois, que la DWV est celle qui présente la plus importante concentration d'énergie, mais l'apparition des termes d'interférences rend nécessaire l'utilisation de la PWVL, la CW et la méthode ZAM, qui, malgré une perte de résolution (concentration d'énergie), ont l'avantage de clarifier la représentation de Wigner-Ville en conséquence une meilleure caractérisation de la réponse du défaut en temps et en fréquence, d'où une meilleure caractérisation du matériau.

Notons que toutes ces représentations ont été calculées sur le signal analytique associé au signal réel, notons également que le pas de calcul temporel est un paramètre réglable par l'utilisateur, permettant de ce fait de fixer le nombre de spectres instantanés désirés, il permet aussi de réduire le temps de calcul.

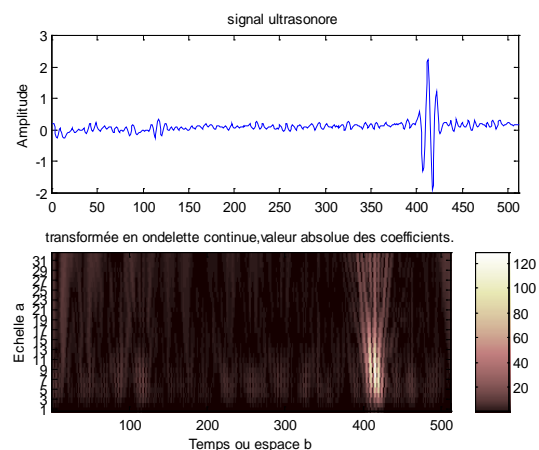
## III-3- Résultats de l'analyse Temps-échelle :

### III -3-1- Transformée en ondelette continue :

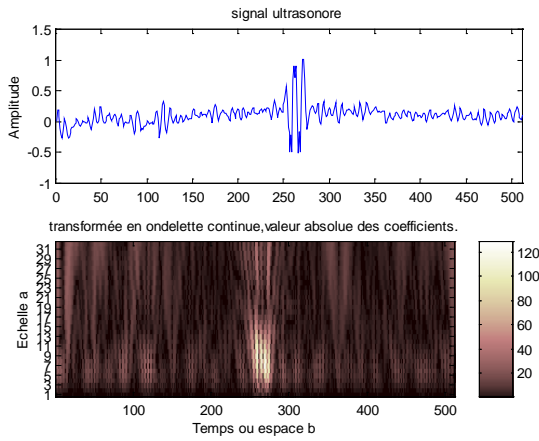
On calcule la transformée en ondelette continue de ces quatre signaux, en utilisant l'ondelette de Morlet, à l'ordre 4, les résultats obtenus sont illustrés en figure I.34 à I.37 :



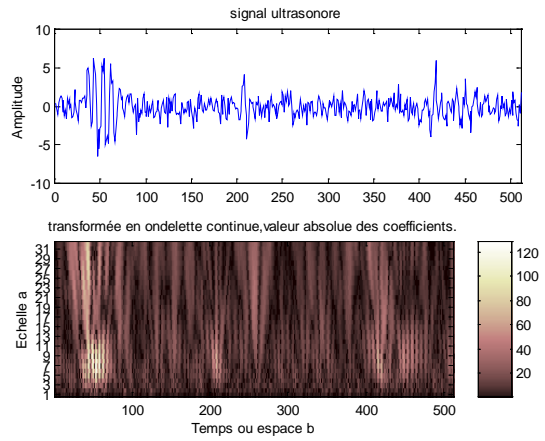
**Fig (I.34) : Transformée en ondelette continue du signal VL 110.**



**Fig (I.35) : Transformée en ondelette continue du TROU01.**



**Fig (I.36) : Transformée en ondelette continue du signal provenant du joint soudé.**



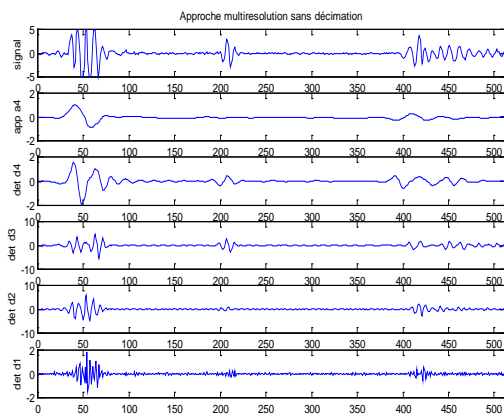
**Fig (I.37) : Transformée en ondelette continue du signal bruité.**

Les résultats obtenus par la transformée en ondelettes continue illustrent convenablement les termes propres de ces signaux (écho de face, écho de fond et écho de défauts) de même les petites irrégularités des matériaux, qu'on peut expliquer par la disparition des termes d'interférences, par rapport à la Distribution de Wigner-Ville (DWV), ceci est dû à la nature de la transformée en ondelettes, qui est une transformation linéaire.

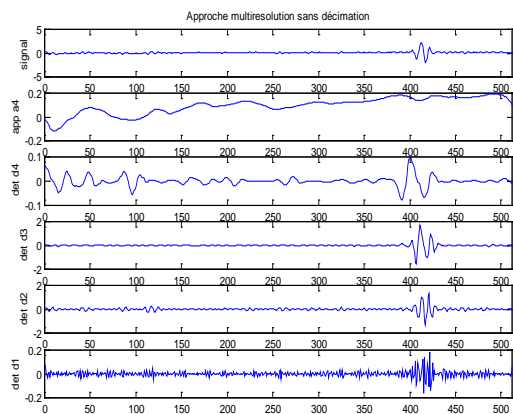
Ce qui permet une très bonne localisation des irrégularités (défauts), même si elles sont de très faible dimension ou noyée dans un bruit.

**III-3-2- Analyse en multirésolution sans décimation :**

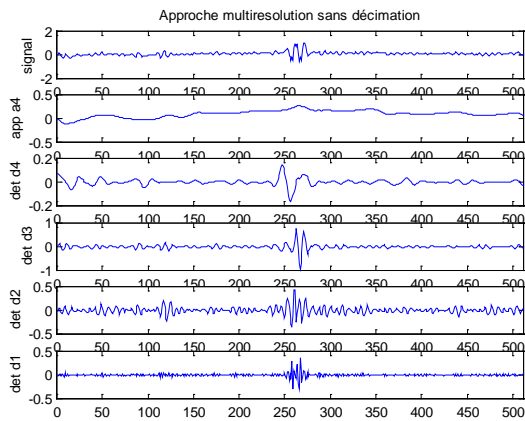
On représente dans ce qui suit les coefficients de détail et d'approximation, résultat de la décomposition de ces signaux en ondelette, à 4 niveaux en utilisant l'ondelette de **Daubechies** à l'ordre 4.



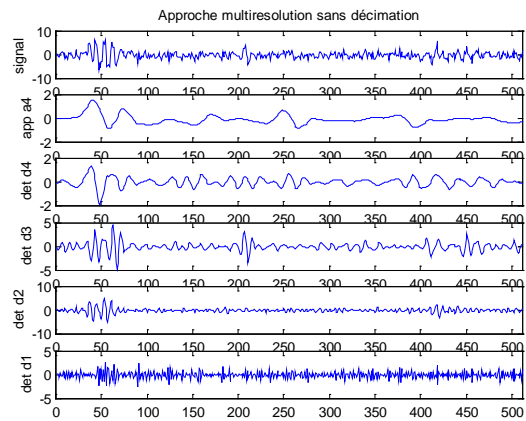
**Fig (I.38) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal VL 110.**



**Fig (I.39) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal TROU 01.**



**Fig (I.40) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal provenant d'un joint soudé.**



**Fig (I.41) : Analyse en multirésolution sans décimation du signal bruité.**

Les résultats donnés ci-dessus montrent que l'approche multirésolution donne une meilleure représentation du signal analysé. Les petits coefficients sont dominés par le bruit, alors que, les coefficients avec une grande valeur détiennent plus d'information sur le signal que sur le bruit (écho de face, de fond et même celui du défaut). En outre, cette approche permet de décorrélérer le signal du bruit. Ce dernier affecte tous les coefficients de plus, il est montré que son niveau n'est pas élevé. Ce résultat nous ouvre la voie à traiter ce type de signaux pour d'autres applications ultérieures (exemple identification des défauts), après avoir éliminer le bruit affectant le signal.

D'autre par, selon le théorème des moments (Partie : 2, chapitre : 2), la transformation en ondelettes permet de révéler l'aspect irrégulier des signaux. Pour cela, elle exhibe aux petites échelles, des coefficients de grande amplitude là où le signal est irrégulier, et des coefficients nuls ou quasi nuls là où il est régulier. En exploitant ce principe, on remarque bien sur les figures précédentes, que les pics des échos, dus à l'interface et au fond de la pièce inspectée, apparaissent bien à chaque échelle, de même que le pic de l'écho de défaut. On détermine par la suite l'échelle où l'amplitude de ce pic est maximale, c'est dans cette échelle que la probabilité de détecter le défaut est maximale. Comme cette échelle correspond à une certaine bande de fréquence dans le plan temps-fréquence, on peut facilement localiser ce défaut simultanément en fréquence et en temps ou en espace. Les coefficients obtenus par ces résultats, sont exploités dans certains cas pour la caractérisation des défauts et l'identification de leur nature, ceci après utilisation d'une base de données type.

#### **IV- Conclusion :**

Dans cette étude, nous avons simulé deux cas de détection de défauts : dans le premier cas, l'opérateur peut visualiser les échos des deux faces, avant et arrière de la pièce, et surveille l'apparition d'un autre écho (celui de défaut), quant au deuxième cas, l'opérateur peut éliminer tous les échos et ne garde que la plage susceptible de contenir un défaut. Nous constatons que ces échos apparaissent clairement dans la représentation temps-fréquence et temps-échelle, contrairement à l'analyse fréquentielle.

Les résultats obtenus montrent très bien l'efficacité des méthodes proposées, ainsi on peut dire qu'elle apporte une solution au problème de détection de *défauts noyés dans du bruit*. Nous avons constaté aussi que les plus petits défauts et les défauts réels de soudures sont très bien détectés. Et à travers ces résultats, nous avons montré la faisabilité de la méthode, en illustrant les problèmes réels de détection.

## Chapitre 2 : Applications en CND.

### I- Introduction :

Les méthodes de contrôle non destructif ont classiquement pour but deux objectifs : la recherche de défauts, et la caractérisation globale de matériaux ou de pièces. Dans le premier cas, on garantit la qualité de la pièce par la preuve de l'absence de défauts, micro-structuraux ou non. On peut être amené, après détection, à les identifier (volumique ou plan) pour en déduire leur degré de nocivité, ce qui constitue le premier but de ce chapitre. L'autre but de ce même chapitre est l'application des outils de traitement du signal pour la mesure des fines épaisseurs, cette application présente une réponse à certains problèmes posés dans le CND par ultrasons à savoir la résolution.

### II- Caractérisation des défauts :

Les analyses effectuées sur plusieurs échos de défauts détectés dans des pièces métalliques ont montré clairement que l'on peut bien faire la discrimination entre un défaut plan et un défaut volumique, ceci par l'analyse de l'image temps-fréquence du signal.

#### II-1- Image temps-fréquence des défauts :

On applique la méthode de **Zhao-Atlas-Marks**, pour l'ensemble de ces signaux, avec une fenêtre de Hamming de longueur 16 échantillons, et un décalage de 2 échantillons, et on obtient les représentations temps-fréquence illustrées dans les figures (II.1) à (II.4).

##### II-1-1- Image temps-fréquence des défauts plans :

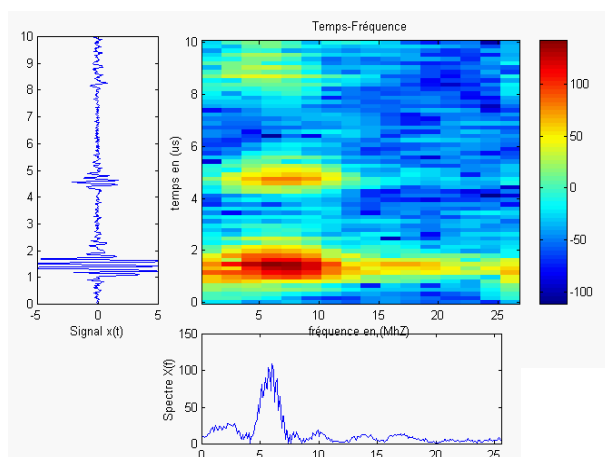


Fig (II.1) : L'image temps-fréquence du défaut plan 1.

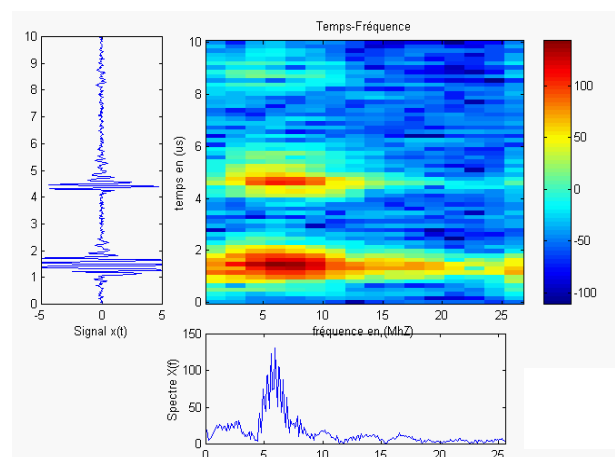
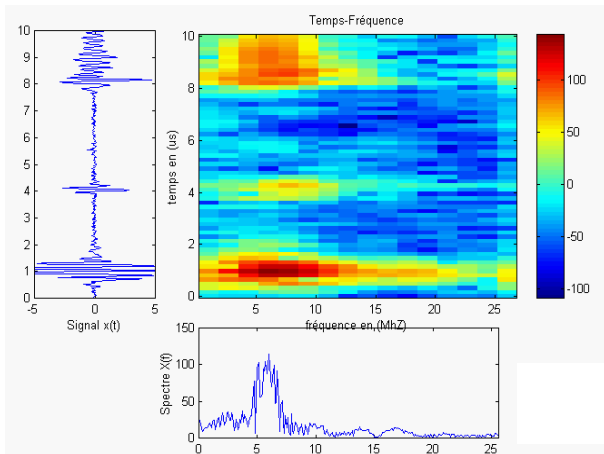
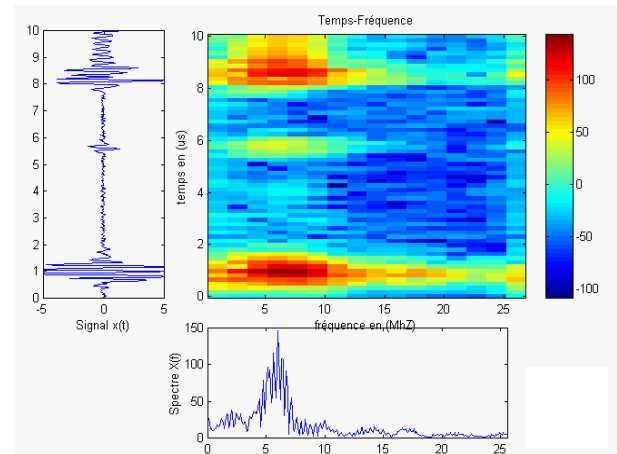


Fig (II.2) : L'image temps-fréquence du défaut plan 2.

### II-1-2- Image temps-fréquence des défauts volumiques :



**Fig (II.3) : L'image temps-fréquence du défaut volumique 1.**



**Fig (II.4) : L'image temps-fréquence du défaut volumique 2.**

### II-2-Remarques et classifications :

D'après les représentations ci-dessus, et les résultats obtenus sur d'autres signaux, on constate que pour les défauts plans : l'écho de défaut se caractérise par un niveau d'énergie très élevé par rapport au niveau d'énergie de l'écho du fond (qui est négligeable), ceci est dû à la réflexion de la majorité de l'énergie ultrasonore lors de sa rencontre avec un défaut plan, par conséquent il y a moins d'énergie qui atteint le fond de la pièce.

Part contre, dans les défauts volumiques, l'écho de défaut présente un niveau d'énergie très faible, devant celui de l'écho de fond, donc seul une très faible quantité d'énergie ultrasonore qui sera réfléchiée par le défaut volumique, par conséquent une grande partie de l'énergie ultrasonore arrive au fond de la pièce avant d'être réfléchiée vers le transducteur.

Les expériences que nous avons menées, sur plusieurs exemples de défauts montrent que :

- ❖ Si le rapport de :  $\frac{\text{l'énergie de l'écho de défaut}}{\text{l'énergie de l'écho de fond}} > 1$ , le défaut est considéré comme un défaut plan.
- ❖ Si le rapport de :  $\frac{\text{l'énergie de l'écho de défaut}}{\text{l'énergie de l'écho de fond}} \leq 1$ , le défaut est de type Volumique.

### II-3-Explication :

La seule explication de ces deux résultats, constatés lors des expériences, effectuées sur plusieurs échantillons d'échos ultrasonores provenant des défauts volumiques et défauts plans, est reliée à la physique des ultrasons, qui sont plus sensibles aux problèmes de continuité (c'est-à-dire aux défauts plans), qu'à l'absence de matière donc aux défauts

volumiques. Ces derniers sont bien décelés par la radiographie qui est très sensible à ce genre de défaut (l'absence de matière).

### III- Mesures des fines épaisseurs :

Les méthodes classiques telles que : la détection de l'enveloppe (par la transformée de Hilbert), ou la mesure de temps de vol sur le signal temporel, posent beaucoup de problèmes de résolution, puisque la mesure n'est possible que si les échos ne se superposent pas dans le temps. Et grâce aux méthodes d'analyse temps-fréquence, nous pouvons mesurer une épaisseur très fine avec une bonne précision.

Pour cela, on va exploiter les méthodes temps-fréquence implémentées précédemment, (pour la détection de défauts), et on compare les résultats donnés par chacune de ces méthodes. Et à travers les différents tests, nous montrons la fiabilité de l'approche temps-fréquence dans les problèmes de résolution.

Les représentations temps-fréquence ont été appliquées à des signaux simulant des signaux ultrasonores selon l'expression [69], [70] :

$$s(t) = s_m \cdot \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} t^2\right) \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{II.1})$$

$\sigma^2$  : définissant l'amortissement du transducteur ultrasonore.

$f_0$  : définissant la fréquence de résonance du transducteur ultrasonore.

$s_m$  : amplitude désirée.

La distance entre deux pics est déduite de la formule :

$$x = \frac{1}{2} v \cdot t \quad (\text{II.2})$$

avec :  $v$  est la vitesse des ultrasons dans ce matériau.

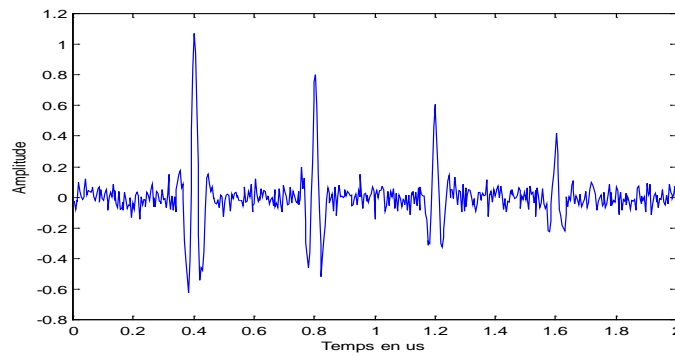
$t$  est le temps écoulé entre les deux pics.

Par exemple pour l'aluminium, la vitesse de propagation de l'onde est  $V_L \approx 6320$  m/s, donc pour une durée de 0.4 microsecondes, nous avons l'équivalent en épaisseur égal à  $e \approx 1.3$  mm.

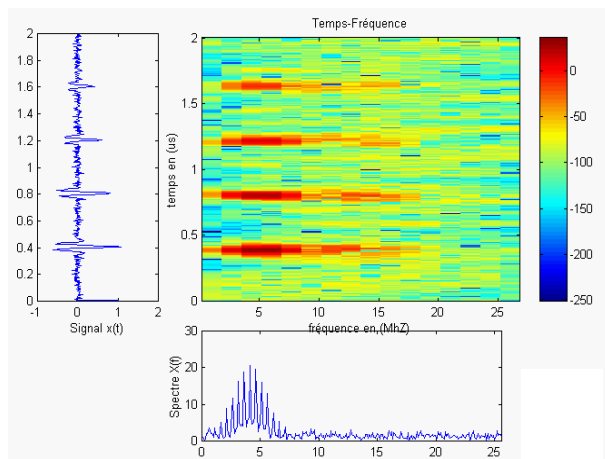
#### III-1- Cas de signaux avec trajets multiples :

Le premier test porte sur quatre échos ultrasonores, équidistants de fréquence 15 Mhz, sur une fenêtre de 2 microsecondes à différentes énergies, et positionnés à : 0.4, 0.8, 1.2, et 1.6 microsecondes, ce signal simule la mesure d'une épaisseur de 1.3 mm d'un matériau en aluminium, figure (II.5).

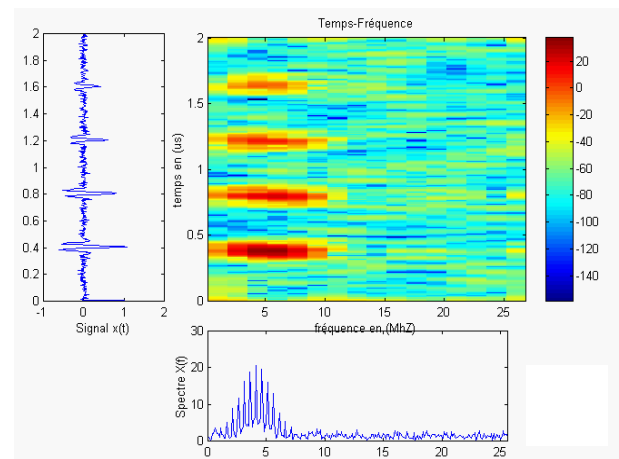
Le résultat obtenu par les méthodes implémentées, est donné par les figures ci-dessous :



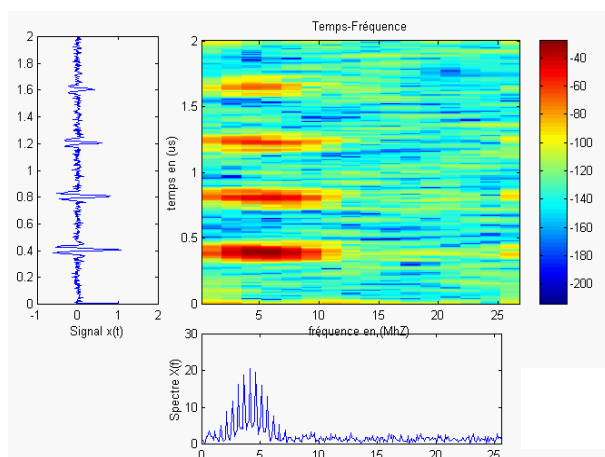
**Fig (II.5) : Signal provenant de la plaque d'aluminium d'épaisseur 1.3 mm**



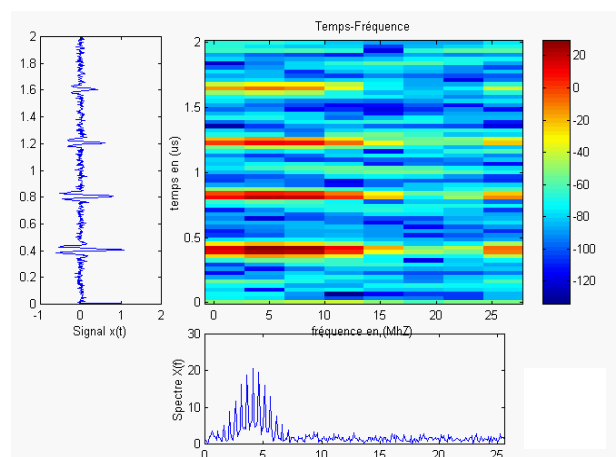
**Fig (II.6) : Représentation de Wigner-Ville du signal simulé.**



**Fig (II.7) : Représentation de Pseudo Wigner-Ville Lissée du signal simulé.**



**Fig (II.8) : Représentation de Choi-Williams du signal simulé.**



**Fig (II.9) : Représentation de Zhao-Atlas Marks du signal simulé.**

Le tableau (II.1) donne pour les quatre représentations, les résultats de mesure, ainsi que la précision.

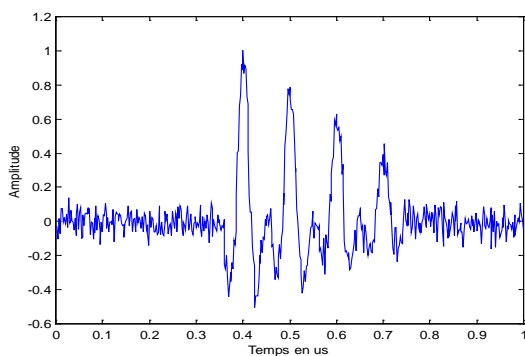
Temps (us)	0.4	0.8	1.2	1.6
<b>WV</b>	0.3994 0.15%	0.7975 0.3%	1.2040 0.3%	1.6020 0.2%
<b>PWVL</b>	0.3980 0.5%	0.7988 0.15%	1.1960 0.3%	1.5980 0.12%
<b>CW</b>	0.4008 0.2%	0.7980 0.25%	1.1950 0.4%	1.6030 0.18%
<b>ZAM</b>	0.3980 0.5%	0.7980 0.25%	1.2070 0.5%	1.6050 0.3%

**Tableau (II.1) : Résultats des représentations avec le pourcentage d'erreur de localisation**

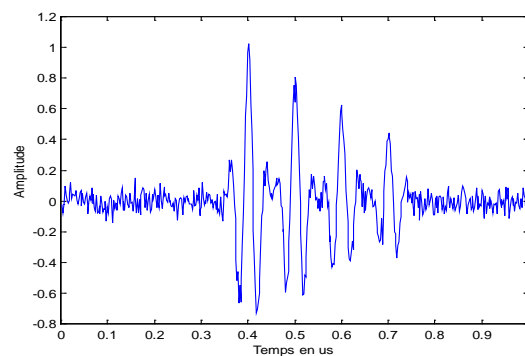
D'après ce tableau ; on remarque que toutes les représentations donnent pratiquement le même résultat, avec le même ordre de grandeur de l'épaisseur mesurée, et avec une précision de localisation acceptable.

### III-2- Autres mesures :

Dans ce qui suit, on va tester les mêmes représentations sur le signal précédent (équation : II.1), avec une fréquence 15 Mhz et de 25 Mhz, mais sur des épaisseurs différentes, et sur une fenêtre de 1 microseconde : figure (II.10) et (II.11).



**Fig ( II.10) : Signal provenant d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.3 mm avec une fréquence  $f = 15$  Mhz.**



**Fig ( II.11) : Signal provenant d'une plaque d'aluminium d'épaisseur 0.3mm avec une fréquence  $f = 25$  Mhz.**

Fréquence	f = 15 Mhz			f = 25 Mhz		
	0.1 us 0.3 mm	0.16 us 0.5 mm	0.32 us 1 mm	0.1 us 0.3 mm	0.16 us 0.5 mm	0.32 us 1mm
WV	0.309 mm	0.518 mm	1.035 mm	0.312 mm	0.513 mm	1.033 mm
PWVL	0.315 mm	0.523 mm	1.038 mm	0.314 mm	0.517 mm	1.035 mm
CW	0.320 mm	0.524 mm	1.039 mm	0.318 mm	0.526 mm	1.042 mm
ZAM	0.332 mm	0.525 mm	1.050 mm	0.325 mm	0.518 mm	1.050 mm

**Tableau (II.2) : Résultats de la mesure des épaisseurs par les différentes représentations.**

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que le résultat de la mesure donné par les méthodes implémentées, est très voisin de l'épaisseur réelle de la pièce, avec l'introduction d'une erreur très faible (voir acceptable).

Ces méthodes permettent la mesure des épaisseurs très fines (0.3, 0.5 mm, ...), ce qui reste difficile à obtenir par l'analyse temporelle de ces signaux.

Une autre remarque peut être tirée de ces résultats : lorsqu'on effectue un lissage sur la représentation temps-fréquence, l'erreur sur l'épaisseur mesurée augmente, ceci est dû à la délocalisation des composantes du signal lors du lissage.

#### **IV- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté deux applications des outils de traitement du signal dans le CND. D'une part, la caractérisation des défauts, par l'analyse temps-fréquence des échos ultrasonores. Ainsi, les analyses effectuées sur plusieurs échantillons, ont montré clairement que l'on peut faire la discrimination entre un défaut plan et un défaut volumique.

D'autre part, l'application des représentations temps-fréquence, constitue un outil pour la mesure des fines épaisseurs, et a donné de bons résultats. Ainsi, nous avons pu mesurer une épaisseur d'Aluminium de l'ordre d'un (1/10) de mm, avec une précision très élevée.

Ces applications montrent que les représentations de CW et ZAM suppriment les interférences, mais conduisent à une légère détérioration en termes de localisation. Leur utilité apparaîtrait mieux dans le cas où les échos seraient plus riches en fréquence ou que les structures des défauts plus complexes.

## Chapitre 3 : Description du logiciel élaboré.

### I- Introduction :

Pour la réalisation d'une interface graphique de l'analyse des signaux ultrasonores deux solutions s'offraient à nous :

- Utiliser un langage de programmation qui offre une richesse graphique conséquente.
- Utiliser un langage dédié au calcul scientifique et qui offre un interprète évolué.

Cette ouverture permet l'ajout de fonctions à ce même interprète, qui sont assemblées sous forme de boîte à outils, ce qui étend le champ d'action à des domaines aussi variés que le contrôle, l'optimisation, le traitement d'images et bien évidemment le traitement du signal.

Notre choix s'est porté sur la deuxième catégorie qui inclue des logiciels tels que : Mathematica, Maple, Mathcad et Matlab. Du fait qu'il correspond exactement à nos besoins logiciels, nous nous sommes fixés finalement sur Matlab.

### II- Caractéristiques du Matlab :

Le MATLAB est une abréviation de **MATrix LABORatory**, il est devenu un standard pour la recherche scientifique, spécifiquement dédié au calcul numérique. Il dispose d'ailleurs de remarquables capacités de visualisation graphique. C'est un système interactif et convivial de haut niveau dans lequel on trouve la majorité des concepts des langages de programmation moderne (types : **PASCAL** et **C**).

Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation ; il peut être utilisé de façon interactive ou en mode de programmation.

Il faut souligner aussi que l'utilisateur peut créer, pour ses applications, ses propres interfaces graphiques (GUI : Graphical User Interface) dont l'élément de base d'une interface est la fenêtre. Cette dernière permet de grouper les outils graphiques dans un même cadre dans un but de clarté et de manipulation facile.

La possibilité de programmation **Orientée Objets** dans cette nouvelle version, autorise la création d'applications encore plus complexes, sachant que les langages à objets commencent à s'imposer depuis quelques années comme un nouveau mode de programmation permettant une approche générale de la programmation et offrant de nombreux avantages. Voici quelques autres caractéristiques de ce logiciel :

### ***1. Langage ouvert et évolutif :***

Matlab, par sa construction même, offre l'énorme avantage d'avoir un langage évolutif, en effet, à chaque fois que l'utilisateur ajoute des fonctions à Matlab ce dernier les considère comme étant une partie intégrante de son langage, ce qui permet de faire évoluer le langage pour l'adapter au domaine à traiter. Matlab est aussi ouvert sur les autres logiciels qui peuvent être ses Clients ou ses Serveurs, c'est-à-dire qu'il peut offrir ses fonctionnalités et sa puissance de calcul à d'autres logiciels et applications clientes, comme il peut importer ou utiliser les bibliothèques d'autres logiciels [71].

### ***2. Indépendance vis à vis du matériel :***

Comme Matlab interprète ses programmes au lieu de les compiler, le résultat est indépendant de la plate forme sur laquelle ils ont été développés. Cette indépendance se paye par la lenteur de ces applications par rapport aux résultats des autres compilateurs [71].

### ***3. Outils de création visuels :***

L'environnement de Matlab offre une panoplie d'outils qui permettent la création d'application bénéficiant de l'interface graphique de Windows<sup>®</sup> (multi-fenêtrage, gestion de la souris, menus déroulants...). Ces outils permettent d'accélérer le développement d'applications graphiques.

## **III- Aperçu sur le logiciel réalisé :**

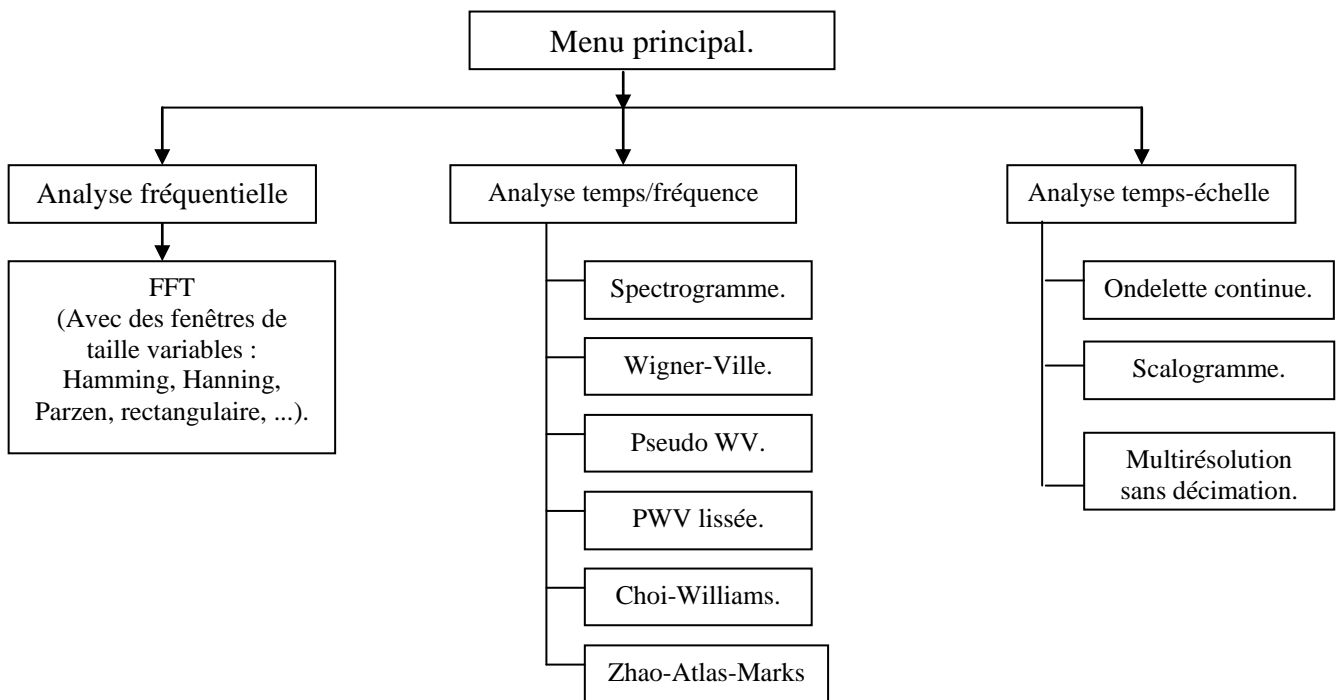
Le logiciel que nous avons implémenté est d'une mise en œuvre facile : pas de mots clés à connaître ni de programmes à écrire, l'utilisateur est constamment guidé par des menus. La qualité de notre logiciel s'apprécie au niveau de critères externes : convivialité (multi-fenêtrage), souplesse, capacité graphique, disponibilité (actualisation des paramètres, actualisation des opérations, ...), qualité d'écriture du logiciel (portabilité, documentation, structuration), robustesse et stabilité numérique des algorithmes implémentés.

Sous cette interface graphique, la communication avec l'utilisateur est établie à l'aide des «contrôles », tels que les groupes d'options, cases à cocher, boutons de commande, ... pour une meilleure convivialité.

La fenêtre principale possède les différentes fonctions de l'interface. La sélection d'un élément fait apparaître un menu déroulant, présentant une liste d'options, pour conduire enfin à un élément terminal ; les menus présentent ainsi une structure arborescente.

### ➤ Hiérarchie :

Notre interface présente une structure arborescente qui offre à l'utilisateur un bon suivi des applications effectuées et une meilleure représentation de ses données. Toutes les applications sont visualisées automatiquement à la fin de chaque session.



**Fig (III.1) : Structure du logiciel élaboré.**

### ➤ Lancement de l'application :

De l'éditeur du Matlab on lance le programme avec la commande :

» Analyse

Le menu principal apparaît :

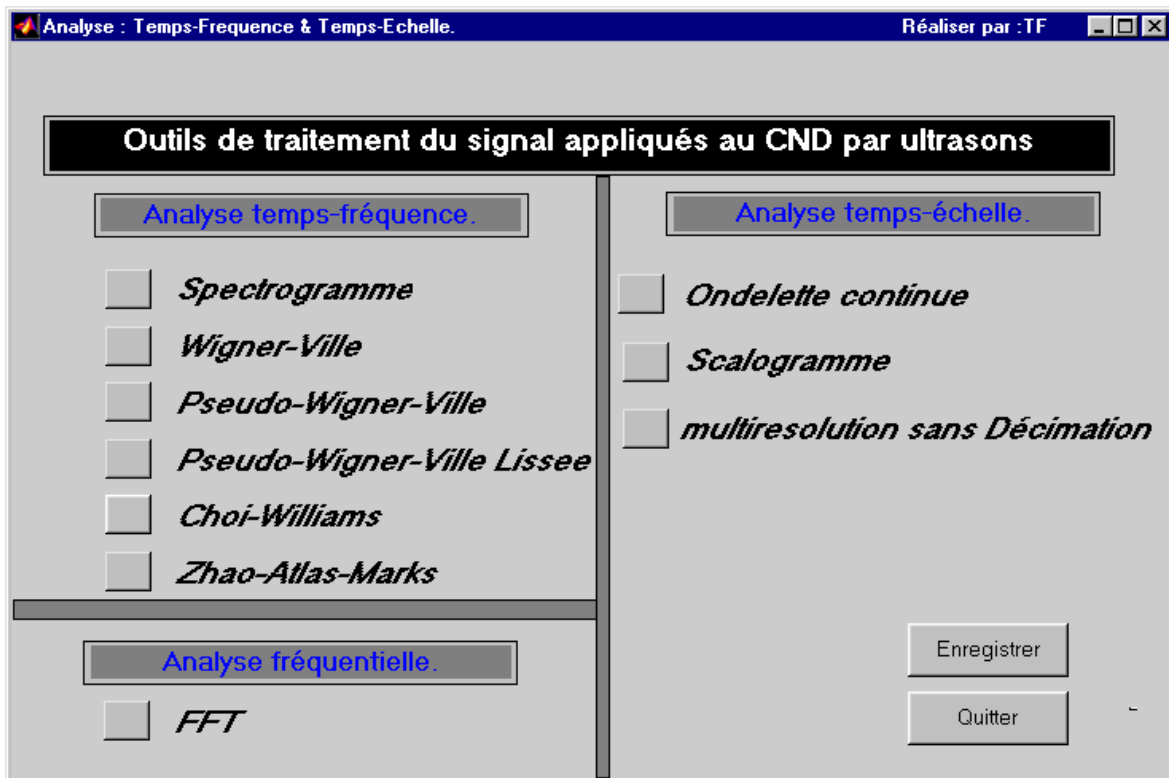


Fig (III.2) : Menu principal du logiciel.

Ce menu offre l'accès aux principales fonctions présentes dans le Toolbox, chaque fonction est actionnée en cliquant sur le bouton associé.

#### ❑ Analyse fréquentielle :

Cette option offre l'outil d'analyse fréquentielle, à savoir la FFT. En actionnant le bouton une fenêtre d'ouverture des fichiers type : \*.dat apparaît pour ouvrir le fichier à traiter. La visualisation des résultats se fait automatiquement.

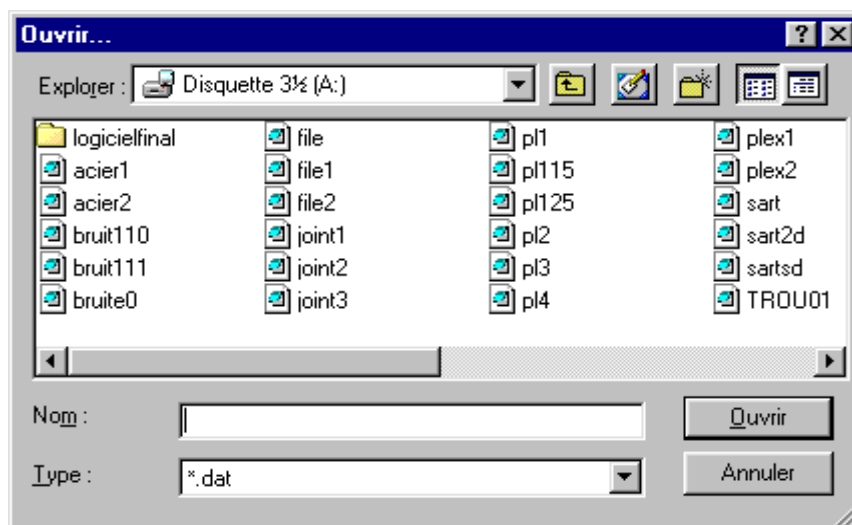
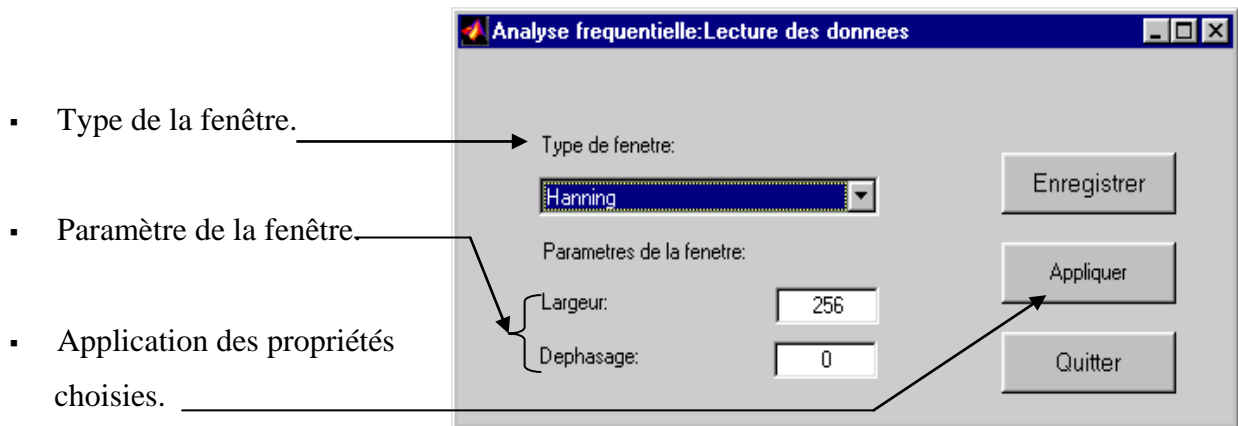


Fig (III.3) : Fenêtre d'ouverture d'un signal à traiter.

Après la sélection du signal, le choix d'une fenêtre de pondération se fait à l'aide de la fenêtre ci dessous.



**Fig (III.4) : Paramètre d'analyse fréquentielle.**

Les différentes analyses peuvent être enregistrées en utilisant le bouton **Enregistrer**, le résultat sera sauvegardé autant que fichier : \*.dat.

#### □ Analyse temps/fréquence :

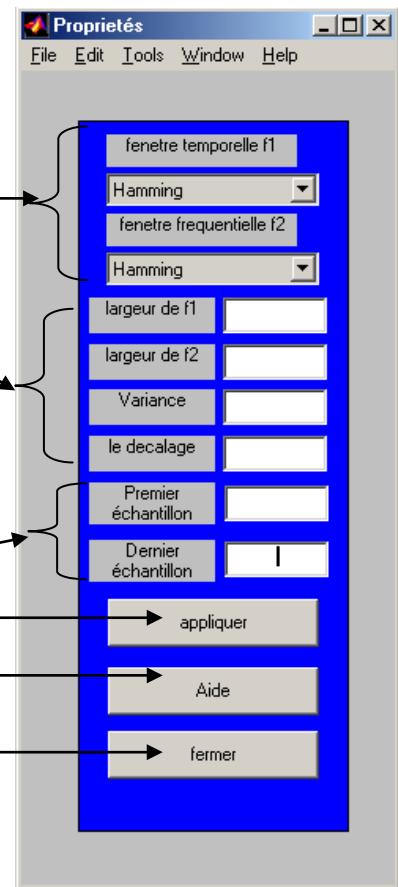
Cette option offre les outils d'analyse temps-fréquence étudiés.

Chaque analyse peut être invoquée en cliquant sur le bouton correspondant, une fenêtre d'ouverture du signal à traiter apparaît, après le choix d'un signal, une fenêtre des propriétés du traitement à effectuer est actionnée, mais avec les propriétés qui correspondent à la fonction choisie. Pour les boutons **Spectrogramme**, **Wigner-Ville**, **Pseudo WV**, **PWV Lissée**, **Choi-Williams** et **Zhao-Atlas-Marks** une même fenêtre apparaît mais avec les propriétés qui correspondent à la fonction choisie.

La fenêtre ci-contre présente l'ensemble des propriétés d'analyse des fonctions :

Spectrogramme, WV, PWV, PWVL, CW, ZAT.

- Choix des fenêtres (fréquentielle, temporelle).
- Propriétés d'analyse et résolution.
- Largeur du tronçon à traiter.
- Application des paramètres.
- Aide.
- Quitter.



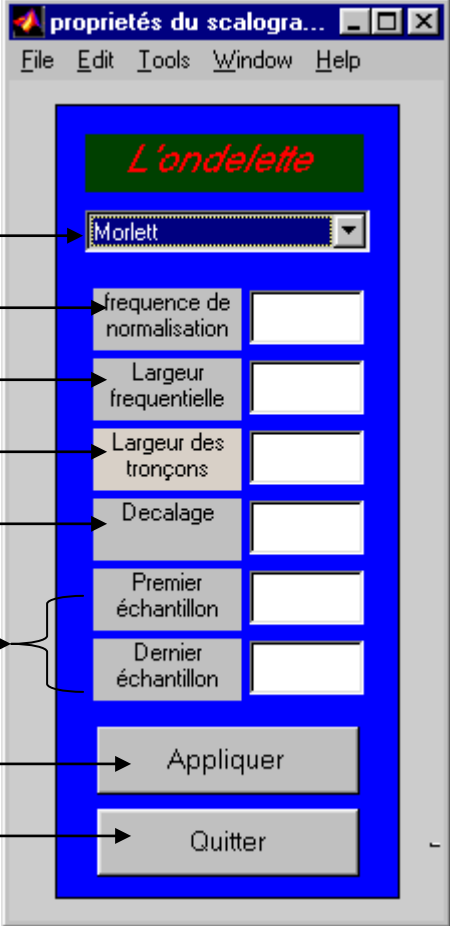
**Fig (III.5) : Exemple d'une fenêtre de paramètres pour l'analyse temps-fréquence.**

#### □ Analyse Temps-Echelle :

Cette partie est presque identique à celle d'analyse temps-fréquence, et chaque analyse peut être faite en cliquant sur le bouton correspondant ; une fenêtre d'ouverture du signal à traité apparaît, après le choix d'un signal, le résultat de l'opération sera observé dans une nouvelle fenêtre graphique.

La figure ci-dessous montre un exemple correspondant au bouton de la fonction Scalogramme :

La fenêtre ci contre présente les propriétés de l'analyse en utilisant la fonction **Scalogramme**.

- Choix de l'ondelette. —————→
  - La fréquence de normalisation —————→
  - Largeur fréquentielle. —————→
  - Largeur des tronçons —————→
  - Le décalage entre les tronçons. —————→
  - Largeur du signal à traiter —————→
  - Application des paramètres —————→
  - Quitter. —————→
- 

**Fig (III.6) : Exemple d'une fenêtre de paramètres pour l'analyse temps-échelle.**

#### IV- Conclusion :

L'interface présentée ci-dessus offre une simplicité d'utilisation et oriente l'utilisateur vers une meilleure représentation de ses traitements. L'utilisateur est guidé dans sa navigation par une présentation intuitive des méthodes d'analyses offertes. Il peut solliciter, à tout moment, l'aide en ligne pour de plus amples informations.

Cette interface, nous l'avons voulue évolutive c'est-à-dire qu'elle a été développée d'une manière à permettre l'ajout d'autres méthodes d'analyse ou de composants graphiques à l'interface utilisateur.

## *Conclusion générale :*

L'objectif principal de ce travail est d'expérimenter des outils de traitement numérique des signaux pour la caractérisation d'un contrôle ultrasonore des matériaux, pour cela, nous avons utilisé des méthodes basées sur des algorithmes mathématiques très puissants selon trois approches : analyse fréquentielle, analyse temps-fréquence et analyse temps-échelle.

Nous avons commencé par un bref exposé sur le contrôle non destructif et ses différentes techniques, en mettant plus l'accent sur la technique ultrasonore.

Nous avons considéré différentes techniques d'analyse des signaux non-stationnaires, une analyse de ces méthodes a été faite pour mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune.

Nous avons appliqué ces méthodes sur les échos provenant des pièces et joints soudés présentant des défauts. Les résultats obtenus donnent satisfaction, au vu de l'avis des experts en CND. Les expérimentations, que nous avons menées sur plusieurs échantillons de défauts, ont démontré l'utilité de logiciel conçu pour la détection et la caractérisation des défauts.

Nous avons axé nos efforts pour développer une méthode de détection de défaut basée sur l'observation de l'image temps-fréquence ou temps-échelle du signal analysé. En effet, l'opérateur pourra très facilement estimer la présence ou l'absence du défaut, même s'il est noyé dans du bruit, contrairement à l'analyse fréquentielle où on ne dispose d'aucune idée sur la présence ou l'absence de défauts. Par ailleurs, nous avons développé une technique pour la classification des défauts (volumique et plan) après leur détection, basée sur le calcul du rapport de l'énergie de l'écho de défaut à l'écho de fond. Le résultat de la classification sur l'ensemble des signaux, nous encourage à mener d'autres expériences sur une base de données plus riche, afin d'intégrer cette procédure dans le contrôle industriel. Nous avons vu aussi, que l'application des représentations temps-fréquence, dans la mesure des fines épaisseurs, donne de bons résultats, ainsi nous avons pu mesurer une épaisseur d'Aluminium de l'ordre d'un dixième de millimètre.

La détection des non-stationnarités des échos ultrasonores, n'est pas une fin en soi, mais une étape importante pour la caractérisation d'un matériau, l'identification de la nature du défaut, et à son dimensionnement. Le dimensionnement des défauts est très important dans le CND, pour cela on a besoin d'une base de donnée très riche et de techniques complémentaires d'analyse. Ceci constitue une perspective de notre travail.

Ainsi, notre étude peut trouver les utilisateurs potentiels locaux, entre autres ceux spécialisés dans la fabrication de systèmes mécaniques simples ou complexes ou leurs utilisateurs. Une relation de partenariat entre l'université et ces entreprises ne peut qu'être bénéficiaire pour tous.

## *Bibliographie :*

- [1] : J.L.Pellier, Y.Le tohic, J.C.Caron : " La pratique du contrôle industriel par ultrasons." Edition communication actives, Paris 1979.
- [2] : Y.Kabir : " Segmentation d'images de film radiographie dédiée au contrôle non destructif (CND). ", Thèse de Magister en électronique université de BLIDA, juillet 1999.
- [3] : A.Lambert, J.Rivenez, G.Wache : " Les contrôles non destructifs, généralités. " CETIM, 3ème édition 1994.
- [4] : " Contrôle et essais, soudages et techniques connexes.", tome 3 édition AFNOR 1991.
- [5] : B.Laveyssière : " CND par radiographie et traitement de l'information. " 15 ème colloque GRETSI, Juan les pins 1995.
- [6] : S.Darbane, R.Drai, Y.Cherfa, Y.Kabir : " Détection de défauts de soudures dans les images de radiographie par la segmentation." COMAEI ; Telemcen décembre 1996, vol : 2, P30 - P 36.
- [7] : M.Lacroix : " Essais non destructifs." Techniques de l'ingénieur volume M1 métallurgie 1986. PM 110-1- PM 110-21.
- [8] : S.Femmam, N.K.M'SIRDI : " Analyse spectrale en contrôle non destructif par ultrason. " COMAEI ; Telemcen décembre 1996 vol : 2, P 48 - P 54.
- [9] : B.Lebourgeois : " Soudage à l'arc. " publication de la soudure autogène Paris 1986.
- [10] : P.A.Ruault : " Radiographie industrielle. " Tome 1, édition publication de la soudure autogène Paris 1991.
- [11] : N.Bouchelaghem, S.Atek : " Elaboration d'un logiciel de traitement de signal appliqué au contrôle ultrasonore des matériaux. " Mémoire d'ingénieur d'état en électronique USTHB 1998.
- [12] : J.Perdijon : " Que faut-il entendre par le matériau de cette pièce est défectueux. " Revue de métallurgie CIT/ Science et génie des matériaux février 1996. P 237 - P 243.
- [13] : B.Brown, J.E.Goodman : " Ultrason de haute intensité. " édition Dunod 1971.
- [14] : M.Alainso, E.J.Finn : " Physique générale Tome 2 : champs et ondes. " inter-Edition Paris 1977.
- [15] : S.Tazibt : "Caractérisation de défauts volumiques dans les métaux par voie acoustique." Thèse de Magister en électronique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 1992.
- [16] : O.I.Babiko : " ultrasonic and its applications. " New York 1960.

- [17] : O.Nedjah : " Echographie ultrasonore médicale." ICSS' 94 USTHB Alger, P II.16 - P II.19
- [18] : O.Nedjah : " Ultrasonic imaging system for non destructive testing. " ICSS' 94 USTHB Alger, P II.30 - P II.33.
- [19] : M.Bendaoud : " Vibrations et ondes. " Edition OPU, Alger 1993.
- [20] : H.J.Pain : " The physics of vibrations and waves. " wit press, USA 1999.
- [21] : M.Morse, K.Uno Ingard : " Theoretical acoustics. " Mc Graw Hill, USA 1968.
- [22] : H.Djellouah : " Contribution à l'étude du rayonnement des champs ultrasonores impulsionnelles dans les liquides et les solides. " Thèse de docteur d'état en physique, USTHB Alger 1992.
- [23] : V.Garnier, G.Corneloup : " Non-Destructive evaluation of concrete damage by ultrasounds. " 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [24] : S.Aliouane : " conception, réalisation et expérimentation d'un capteur ultrasonore sans contact de type EMAT. " Thèse de Magister en électronique, ITS de L'USTHB 2000.
- [25] : F.Lakestani : " Etude théorique et expérimentale des transducteurs ultrasonores piézo-électriques fonctionnant dans le domaine du Mégahertz. " Thèse docteur d'état Es-science INSA (Lyon) 1986.
- [26] : M.Fink : " L'imagerie ultrasonore." Revue physique appliquée septembre 1983. P 527- P 554.
- [27] : B.Badidi, R.Alem, A.Matoug, A.Benchaala : " Ultrasonic chain influence on the materials non destructif testing. " 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [28] : C.Cudel, M.Grevillot, J.Meyer, S.Jacquey : " Split spectrum modifiée pour la détection d'échos ultrasonores multiples." 17<sup>ème</sup> colloque GRETSI, Vannes septembre 1999, P 135- P 138.
- [29] : T.Stepinski, F.Lingvall : " Automatic defect characterisation in Ultrasonic NDT." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [30] : A.Boudinar, A.Ouamri, M.Keche : " Détection de défauts proche de l'interface par échographie ultrasonore. " COMAEI Tlemecen décembre 1996 ; vol : 2, P 1-P 7.
- [31] : F.de Coulon : " Théorie et traitement des signaux. " Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, Edition Dunod 1984.
- [32] : Y.M.Zhu, F.Peyrin, R.Goutte : " Transformation de Wigner-Ville : Description d'un nouvel outil de traitement du signal et des images." ANN.Télécommun, 42, No3-4, 1987.
- [33] : P.Flandrin : " Représentation temps-fréquence des signaux non stationnaires." Revue de traitement du signal volume 6, No 2 1989, P 89 - P 101.

- [34] : R.Elhadi Bekka : " Fondements du traitement du signal." Edition OPU, Alger1998.
- [35] : M.Kunt : " Traitement numérique des signaux." Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique, Edition Dunod 1987.
- [36] : P.Flandrin : " Temps-Fréquence." Edition Hermès, Paris 1993.
- [37] : B.Fergani : " Application de la distribution de Wigner-Ville à l'analyse de signaux non-stationnaires." Thèse de Magister en électronique USTHB 1992.
- [38] : L.Fergani : " Représentation Temps-Fréquence et Temps-Echelle de signaux non-stationnaires." Thèse de Magister en électronique USTHB 1992.
- [39] : M.Basseville, P.Flandrin, N.Martin : " Méthodes Temps-Fréquence. " Revue de traitement du signal volume 9, N01, 1992 P 79 - P 100.
- [40] : J.P.Djamdj : " Analyse en Ondelettes et mises en correspondance en Télédétection." Thèse de doctorat, université de Nice 1993.
- [41] : L.Cohen : " Time-Frequency distributions - A review." Proceeding of IEEE Vol 77, No 7. July 1989, P 941- P 979.
- [42] : E.P.Wigner : " On the quantum correction for thermodynamic equilibrium." Phys. Rev. 40, 1932. P 749 - P 759.
- [43] : J.Ville : " Théorie et applications de la notion de signal analytique." Câbles et transmission, 2A, (1), 1948. P 61- P 74.
- [44] : E.Dorken, S.H.Nawab : " Time-Frequency analysis of non stationary harmonic sounds." IEEE 1993, ICASSP USA. P III.249 - P III.252.
- [45] : P.Flandrin, W.Martin : " Wigner-Ville spectral analysis of non stationary processes." IEEE Transactions on ASSP, Vol -33, No 6, December 1985. P 1461- P 1469.
- [46] : C.H.Chen, G.G.Lee : " Neural Networks for ultrasonic NDE signal classification using Time -Frequency analysis." IEEE 1993, ICASSP, USA. P I.493- P I.496.
- [47] : B.Escudie : " Analyse des signaux non-stationnaires : représentation énergétique conjointe en temps et fréquence." Onde électrique, Vol 67, No 4 -5 juillet - septembre 1987.
- [48] : F.Auger, C.Doncarli : " Quelques commentaires sur des représentations Temps-Fréquence proposées récemment." Revue de traitement du signal Vol 9- No 1, 1992. P 3 - P 25.
- [49] : H.Choi, W.J.Williams : " Improved Time-Frequency representation of multi - components signals using exponential Kernels." IEEE Transactions on ASSP Vol : 37, No.6. June 1989. P 862 - P 871.

- [50] : Y.Zhao, L.E.Atlas, R.J.Marks : " The use of cone-shaped kernels for generalized Time-Frequency representation of non stationary signals. " IEEE Transactions on ASSP Vol.38, No.7, july 1990, P 1084 - P 1091.
- [51] : I.Djurovie, L.J.Stankovie : " A virtual instrument for Time-Frequency analysis." IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, Vol 48, No.6, December 1999. P1086 - P 1091.
- [52] : Y.Meyer, S.Jaffard, O.Rioul : " L'analyse par ondelettes." Revue : Pour la science, septembre 1987. P 27- P 32.
- [53] : Y.T.Chan : " Wavelet basics." Edition, Kluwer academic publishers, USA 1996.
- [54] : O.Rioul, P.Flandrin : " Time-Scale Energy distributions : A general class extending wavelet transforms." IEEE Transactions on signal processing, Vol.40, No7, july 1992. P 1746- P 1757.
- [55] : M.Missiti, Y.Missiti, G.Oppenheim : " Wavelet Toolbox." Documentation Matlab 5.3.
- [56] : R.Drai, M.Khelil, A.Benchaala : " Flaw detection in ultrasonics using wavelets transform and Split spectrum processing." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [57] : A.Boudouani : " Elimination du bruit dans les images par décomposition en Ondelettes." Thèse de Magister en électronique USTHB mars 2001.
- [58] : M.Barrat, O.Leptit : " Calcul Rapide de la transformée en Ondelettes." Revue de traitement du signal Vol 8, No 1, 1990. P 43 - P 49.
- [59] : " Function reference : language & graphics." Documentation en ligne MathWorks, 1998.
- [60] : S.Mallat: " A theory for multiresolution signal decomposition : The Wavelet representation." IEEE Transactions on pattern analysis machine intelligence, Vol.11, No.7, july 1989. P 674 - P 693.
- [61] : A.Abbate, J.Koay, J.Frankel, S.Schroeder : " Signal Detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor : Application to ultrasonic Flaw detection." IEEE Transactions on ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, vol.44, No.1 january 1997. P 14 - P 25.
- [62] : P.Lasaygues, J.P.Lefebvre : " Applications de l'analyse en Ondelettes en tomographie ultrasonore." Revue de traitement du signal, volume 12, No 4, 1995. P 373 - P 388.
- [63] : I.Park, H.Keun Ahn : " Experimental wavelet analysis and application to ultrasonic non-destructive evaluation." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [64] : L.Zhenqing : " Flaw echo location based on the wavelet transform and artificial Neural Network." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.

- [65] : Y.Ma, H.Gao, J.R.Zhao, X.Yan : " Application of wavelet analysis for processing the arrival time of AE waves." 15<sup>th</sup> WCNDT Roma, octobre 2000.
- [66] : T.Stepinski, B.Vagnhammar : " Automatic detecting disbonds in layered structures using ultrasonic pulse-echo inspection." 7<sup>th</sup> ECNDT Suède, septembre 1998.
- [67] : B.Georgel : " Traitement des signaux courants de Foucault pour le contrôle des tubes de générateurs de vapeurs dans les centrales nucléaires REP." Revue de traitement du signal Vol 8, No 5, 1991. P 373 - P 381.
- [68] : B.Baligand, M.Grozeellier : " Analyse spectrale en contrôle non destructif." Revue de traitement du signal Vol 3, No 1, 1986. P 35 - P 43.
- [69] : C.H.Chen : " Application of wavelet transforms to ultrasonic NDE and remote-sensing signal analysis." IEEE 1994, P 472 - P 475.
- [70] : M.Khelil : " Analyse tridimensionnelle des signaux ultrasonores, application au contrôle non destructif des matériaux." Thèse de Magister en électronique USTHB janvier 2002.
- [71] : M.Mokhtari, A.Mesbah : " Apprendre et maîtriser Matlab<sup>®</sup> version 4 & 5 et Simulink." Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Allemagne 1997.