

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole Nationale Polytechnique.



DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**THESE DE DOCTORAT
EN SCIENCES**

Présentée par :

DRIS El yamine

Magister en Electronique (ENP)
Option : Traitement du signal & Communication

**Algorithmes Adaptatifs Appliqués à la Localisation et
au Suivi de l'Evolution des Sources d'Emission
Acoustique (EA)**

Soutenue publiquement le 13 / 11 / 2021 devant le jury composé de :

Mr. Cherif LARBES	Professeur à l'ENP	Algérie	Président
Mme. Latifa HAMAMI	Professeur à l'ENP	Algérie	Examineur
Mr. Tarek BOUTKEDJIRT	Professeur à l'USTHB	Algérie	Examineur
Mr. Abderrezak GUESSOUM	Professeur à l'Université de BLIDA	Algérie	Examineur
Mr. Mohamed DJENDI	Professeur à l'Université de BLIDA	Algérie	Examineur
Mr. Redouane DRAI	Directeur de recherche (CRTI)	Algérie	Invité
Mr. Mourad BENTAHAR	Maitre de conférences (HDR), LAUM.	France	Invité
Mr. Daoud BERKANI	Professeur à l'ENP	Algérie	Directeur de thèse

ENP 2021

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Ecole Nationale Polytechnique.



DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**THESE DE DOCTORAT
EN SCIENCES**

Présentée par :

DRIS El yamine

Magister en Electronique (ENP)
Option : Traitement du signal & Communication

**Algorithmes Adaptatifs Appliqués à la Localisation et
au Suivi de l'Evolution des Sources d'Emission
Acoustique (EA)**

Soutenue publiquement le 13 / 11 / 2021 devant le jury composé de :

Mr. Cherif LARBES	Professeur à l'ENP	Algérie	Président
Mme. Latifa HAMAMI	Professeur à l'ENP	Algérie	Examineur
Mr. Tarek BOUTKEDJIRT	Professeur à l'USTHB	Algérie	Examineur
Mr. Abderrezak GUESSOUM	Professeur à l'Université de BLIDA	Algérie	Examineur
Mr. Mohamed DJENDI	Professeur à l'Université de BLIDA	Algérie	Examineur
Mr. Redouane DRAI	Directeur de recherche (CRTI)	Algérie	Invité
Mr. Mourad BENTAHAR	Maitre de conférences (HDR), LAUM.	France	Invité
Mr. Daoud BERKANI	Professeur à l'ENP	Algérie	Directeur de thèse

ENP 2021

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER

DEDICACES

A la mémoire de mes défunts père et frère Nadir que dieu les accueillent en son vaste paradis,

A ma mère, que dieu lui porte longue vie,

A mes sœurs et frères qui ont su tous me rappeler l'importance de ma tâche.

A ma tendre épouse qui m'a toujours encouragé et supporté tout au long de ce travail et elle m'a de plus offert le plus beau cadeau du monde : deux merveilleux petit lutins, Mayas et Hiba.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes premiers remerciements à Mr. DRAI Redouane, directeur de Recherche au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI), qui a pris le temps d'examiner avec attention ma démarche de préparation d'une thèse et qui m'a donné les moyens de m'y engager. Il a su reconnaître ma motivation dans ce travail et je le remercie très vivement de m'avoir encouragé dans ma démarche et de m'avoir fourni les moyens de rendre possible l'aboutissement de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent ensuite à Mr. BERKANI Daoud, mon directeur de thèse, vers qui j'ai cru bon de me tourner pour cette direction de thèse car j'ai senti en lui le profil d'un passionné de recherche. Qu'il soit remercié pour avoir volontiers accepté cette tâche d'encadrement.

Je me tourne maintenant vers Mr. BENTAHAR Mourad qui a accepté avec une grande gentillesse et une grande patience d'encadrer une partie de mon travail de thèse au sein du Laboratoire d'Acoustique à l'Université du Mans (LAUM). Il m'a permis de réaliser la partie expérimentale, la réalisation des tests d'impacts et des tests de traction sur des structures en forme de plaques. Toujours disponible, il m'a fait partager sa rigueur scientifique et son goût de la perfection. Je le remercie ici chaleureusement pour sa disponibilité, sa passion et son dévouement dans cet encadrement qui m'ont permis de progresser scientifiquement.

D'autre part je tiens à remercier sincèrement Mme. DAHOU Zohra pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire pour la réalisation des essais de flexion 3 points sur des éprouvettes en béton et pour avoir montré beaucoup de disponibilité et de passion pour répondre à mes questions.

Je remercie vivement Mr. LARBES Cherif, professeur à l'Ecole polytechnique d'Alger (ENP), pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de mon jury de thèse et Mme. HAMAMI Latifa, professeur à l'ENP, pour avoir acceptée d'examiner cette thèse. J'adresse aussi d'exceptionnels remerciements à Mr. GUESSOUM Abderrezak et à Mr. DJENDI Mohamed, professeurs à l'Université de Blida et à Mr. BOUTKEDJIRT Tarek, professeur à l'USTHB, pour leurs extrêmes gentillesse d'accepter d'être membres de mon jury de thèse.

Un grand merci à tous mes amis et collègues qui m'ont encouragé et aidé. Je suis très reconnaissant de leurs compréhensions et de leurs marques de sympathie.

Merci à tous.

الخلاصة : الاختبار غير المتلف بالانبعاث الصوتي يسمح باكتشاف التكوين الموقع و/أو تطور العيوب. يعتمد على استخدام واحد أو أكثر من أجهزة الاستشعار التي يمكن ربطها بشكل دائم بهيكل صغير أو كبير للاستماع الى أحداث التي يمكن أن تحدث. تعتمد دقة أدوات تحديد الموقع بشكل كبير على طرق تحليل إشارات الانبعاث الصوتي المسجلة. يشكل هذا الاعتماد قفلا مهما يجب رفعه لضمان المتابعة المكانية للانتشار الأكثر موثوقية. تقترح هذه الأطروحة خوارزميات تكيفية تعتمد على تقنية ترشيح غير خطية لتحديد موقع مصدر الانبعاث الصوتي و تتبعه. تتكون خوارزمية التقدير من مرحلتين رئيسيتين. تسمح المرحلة الاولى بقياس وقت وصول موجات عن طريق التحول الموجي المستمر، مع الأخذ في الاعتبار الاخطاء المنهجية بسبب عدم يقين هزنبيرق. تستخدم المرحلة الثانية مرشح كالمان الممتد او مرشح كالمان الغير المعطر لتقدير موقع مصدر الانبعاث الصوتي وسرعة انتشاره بشكل متكرر و متسلسل، مع دمج بيانات أجهزة الاستشعار المتعددة بكفاءة. تم اختبار النهج المقترح : أظهرت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها بوضوح مساهمة هذه الاساليب من حيث الاداء و الدقة و المتانة. الاختبارات التي تم اجراؤها في المختبر هي : فواصل بالقلم الرصاص على لوح من النحاس، اختبارات الشد على لوح من الالومنيوم، واختبارات الانحناء بثلاث نقاط على عينة خرسانية.

الكلمات الرئيسية : الاختبار غير المدمر، الانبعاث الصوتي، التحويل المويجي المستمر، التصفية غير الخطية ، مرشح كالمان الممتد، مرشح كالمان غير المعطر، توطين الانبعاثات الصوتية، تتبع انتشار الانبعاث الصوتي، احتمالات.

Abstract : Non-destructive testing (NDT) by acoustic emission (AE) allows the detection of the formation, the localization and / or the evolution of defects. It relies on the use of one or several sensors that can be permanently attached to a small or a large structure to listen to AE events that can happen. The accuracy of the location tools is highly dependent on the methods of analyzing the recorded EA signals. This dependence constitutes an important lock that must be lifted in order to ensure the spatial follow-up of the most reliable default propagation possible. This thesis proposes adaptive algorithms based on a nonlinear filtering technique for the localization and tracking of acoustic emission source. The estimation algorithm consists of two main stages. The first stage follows to measure the time-of-Arrival (TOA) by a continuous wavelet transform (CWT), accounting for systematic errors due to the Heisenberg uncertainty. The second stage uses an extended Kalman filter (EKF) or an unscented Kalman filter (UKF) to iteratively and sequentially estimate the AE source location and their propagation velocities, while efficiently fusing multi-sensor data. The proposed approach has been tested : the experimental results obtained clearly demonstrated the contribution of this approaches in terms of performance, precision and robustness. The tests carried out in the laboratory are : pencil-lead breaks on a copper plate, tensile tests on an aluminum plate and 3-point bending tests on a concrete specimen.

Keywords : Non-destructive testing (NDT), Acoustic emission (AE), Continuous wavelet Transform (CWT), non-linear filtering, extended Kalman filter (EKF), unscented Kalman filter (UKF), AE localization, AE propagation tracking, probability.

Résumé : Le contrôle non-destructif (CND) par émission acoustique (EA) permet la détection de la création, de la localisation et / ou de l'évolution de défauts. Il repose sur l'utilisation d'un ou plusieurs capteurs pouvant être installés de façon permanente à l'écoute d'événements pouvant se dérouler au sein de structures de petites ou de grandes dimensions. Cependant, la précision des outils de localisation est fortement dépendante des méthodes d'analyse des signaux d'EA

enregistrés. Cette dépendance constitue un verrou important qu'il est nécessaire de lever afin d'assurer le suivi spatial de la propagation de défauts le plus fiable possible. Cette thèse propose des algorithmes adaptatifs à base d'une technique de filtrage non linéaires pour la localisation et le suivi de source d'émission acoustique. L'algorithme d'estimation se compose de deux étapes principales. La première étape permet de mesurer le temps d'arrivée (TOA) des ondes d'EA par une analyse temps-fréquence basée sur la transformée en ondelettes continue (CWT), tenant compte des erreurs systématiques dues à l'incertitude de Heisenberg. La deuxième étape utilise le filtre de Kalman étendu (EKF) ou le filtre de Kalman non parfumé (UKF) pour estimer itérativement et d'une façon séquentielle l'emplacement des sources d'EA et leurs vitesses de propagation, tout en fusionnant efficacement les données multi-capteurs. L'approche proposée a été testée : les résultats expérimentaux obtenus sur banc d'essai ont clairement mis en évidence l'apport de ces approches en termes de performances, de précision et de robustesse. Les essais menés en laboratoire sont : des ruptures de mine sur une plaque de cuivre, des essais de traction sur une plaque d'aluminium et des essais de flexion 3 points sur une éprouvette en béton.

Mots-clés : Contrôle non destructif (CND), Emission acoustique (EA), Transformée en ondelette continue, filtrage non-linéaire, filtre de Kalman étendu (EKF), filtre de Kalman non parfumé (UKF), localisation d'EA, Suivi de propagation d'EA, probabilité.

TABLES DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des principales notations

Introduction générale	18
Chapitre 1. Base théorique de l'Emission Acoustique (EA)	24
I. Etat de l'art de l'Emission Acoustique	24
II. Emission Acoustique : définition et généralités	25
II.1 Définition	25
II.2 Brève histoire de l'Emission Acoustique	26
II.3 Principes généraux d'un contrôle par Emission Acoustique	27
II.3.1 Facteur engendrant de l'EA dans un matériau	28
II.3.2 Description et analyse des signaux d'EA	28
II.3.3 Paramètres des signaux (salve) d'Emission Acoustique	31
II.4 Mécanismes sources d'Emission Acoustique	32
II.4.1 Sources d'origines mécaniques	33
II.4.2 Sources artificielles	34
II.5 Effet Kaiser et rapport Felicity	35
II.6 Propagation des ondes dans un solide	35
II.6.1 Propagation dans un milieu infini	35
II.6.2 propagation dans un milieu semi-infini	36
II.6.3 Propagation dans une plaque	38
II.7 Les Capteurs en Emission Acoustique	43
II.8 Paramétrage du logiciel d'acquisition	44
II.9 Formation des évènements Acoustiques	46
II.10 Détection des évènements et traitement des signaux Acoustiques	47
II.10.1 Traitement des signaux d'EA	48
II.10.2 Localisation des sources d'EA	49
III. Conclusion	53
Chapitre 2. Méthodes de détermination de temps d'arrivée des ondes d'EA	56

I.	Introduction	56
II.	Le seuil fixe	56
III.	Analyse temps-fréquence à l'aide des ondelettes	57
III.1	Rappels sur la Transformée de Fourier et ses limitations	59
III.2	Principe d'incertitude d'Heisenberg	60
III.3	Transformée de Fourier à court terme	61
III.4	Transformée par Ondelette 1D	64
III.4.1	Transformée en Ondelette Continue (CWT)	65
III.4.2	Condition d'admissibilité	67
III.4.3	Algorithme pour calculer les coefficients d'Ondelette	67
III.4.4	Choix de l'Ondelette mère	68
III.4.5	Ondelette de Morlet complexe	70
III.5	Application de la CWT aux signaux d'EA	72
IV.	Conclusion	74
Chapitre 3. Méthode d'estimation de l'emplacement des sources d'EA		76
I.	Introduction	76
II.	Méthode géométrique	76
III.	Méthode probabiliste	78
III.1	Description du problème de filtrage	78
III.1.1	Estimation Bayésienne	79
III.1.2	Le filtre optimal	80
III.2	Structure générale des techniques d'estimation de type Prédiction/Correction	81
III.3	Méthode de résolution	82
III.3.1	Le filtre de Kalman (KF)	82
III.3.2	Le filtre de Kalman étendu (EKF)	84
III.3.3	Le filtre de Kalman non parfumé ou sans biais (UKF)	86
III.4	Formulation d'espace d'état pour la localisation et le suivi des sources d'Emission Acoustique (EA)	89
IV.	Conclusion	91
Chapitre 4. Validations expérimentales		93
I.	Introduction	93
II.	Présentation des sources artificielles et réelles, utilisées lors des validations expérimentales	94

II.1	Sources d'EA artificielles utilisée	94
II.2	Sources d'EA générées par des sollicitations mécaniques	94
III.	Validation des approches proposées pour la localisation des sources d'EA générées par des ruptures de mines	95
III.1	Dispositif expérimental	97
III.2	Résultats expérimentaux	98
III.2.1	Représentation temporelle des signaux d'EA	98
III.2.2	Analyse temps-fréquence des signaux d'EA	101
III.2.3	Localisation des sources d'EA par la méthode EKF	106
III.2.4	Comparaison des résultats d'estimation de l'emplacement des sources d'EA entre la méthode géométrique et la méthode EKF	109
Conclusion	112
IV.	Validation expérimentale des performances des méthodes proposées pour la localisation des sources d'EA	113
IV.1	Essais de traction sur une plaque en aluminium à entaille unique couplée à l'EA	114
IV.1.1	Caractéristique de l'Aluminium (Al)	115
IV.1.2	Description du dispositif expérimental	115
IV.1.3	Résultats de l'expérience	119
IV.1.3.1	Représentation temporelle d'un signal d'EA	120
IV.1.3.2	Analyse temps-fréquence pour calculer les temps d'arrivées des signaux d'EA	120
IV.1.3.3	Localisation de l'activité acoustique	123
IV.1.3.4	Comportement mécanique de l'aluminium	127
IV.1.4	Conclusion	130
IV.2	Essais de flexion en trois points sur un échantillon en béton à entaille unique couplée à l'EA	130
IV.2.1	Caractéristiques du béton	131
IV.2.2	Description du dispositif expérimental	134
IV.2.3	Résultats de l'expérience	138
IV.2.3.1	Représentation d'un signal d'EA	138
IV.2.3.2	Comportement mécanique et activités acoustiques acquises..	140
IV.2.3.3	Localisation d'évènements d'EA	142
IV.2.4	Conclusion	146
Conclusion générale	148

Bibliographie	152
Liste des travaux en relation avec la thèse	161
Annexe 1 : méthode de calcul de la vitesse de groupe d'un signal d'EA à la fréquence dominante	163
Annexe 2 : Fenêtrage des signaux par le système d'acquisition AEWIN	165

LISTE DES FIGURES

1.1. Représentation simplifiée de la chaîne de l'Emission Acoustique	25
1.2. Chaîne classique d'acquisition des signaux d'EA, de la génération de l'onde acoustique lors d'un test mécanique à la visualisation du signal d'EA	29
1.3. Signaux type d'une émission continue (en haut) et d'une émission discrète (en bas)	30
1.4. (a) Salve typique d'EA et principaux paramètres temporels. (b) Descripteurs fréquentiels	32
1.5. Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites [51]	33
1.6. Schéma explicatif de la rupture d'une mine de crayon à la surface d'un échantillon. (http://www.ndt.net/)	34
1.7. (a) onde longitudinale : le déplacement des particules se fait dans la direction de propagation, les plans se déplacent l'un par rapport à l'autre en modifiant leur distance. (b) onde transversale : le déplacement des particules se fait perpendiculairement à la direction de propagation, les plans glissent l'un par rapport à l'autre en conservant leur distance	36
1.8. Réflexion d'une onde longitudinale à la frontière d'un espace semi-infini [55]..	37
1.9. (a) Evolution des ondes de Rayleigh avec la profondeur. (b) Déplacements dus aux ondes de Rayleigh [56]	37
1.10. Ondes de Lamb dans un matériau isotrope. (a) Mode symétrique. (b) Mode antisymétrique	39
1.11. Nombres d'ondes réels des modes de Lamb propagatifs dans une plaque d'aluminium, modes symétriques (rouge) et antisymétriques (bleu))	40
1.12. Courbes de dispersion des vitesses de phase (modes symétriques (rouge) et antisymétriques (bleu)) dans une plaque d'aluminium	41
1.13. Courbes de dispersion des vitesses de groupe (modes symétriques (bleu) et antisymétriques (rouge)) dans une plaque d'aluminium	42
1.14. Courbes de calibration constructeur d'un capteur R15 α (http://www.physicalacoustics.com/). La courbe bleue a été obtenue par la méthode standard pour la calibration primaire des capteurs d'EA (norme ASTM E1106-86). La courbe rouge a été obtenue par la méthode du bruit blanc (norme ASTM E976-84) [46]	44
1.15. Paramètres d'acquisition des salves d'EA : PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time) [69]	45

1.16. Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs	46
1.17. Détermination de la fenêtre temporelle de formation des événements " T "	47
1.18. Principe de la localisation des dommages par la triangulation basée sur TOA. (a) Sans incertitude et (b) avec incertitude	50
1.19. Schéma d'une maille et différences de temps d'arrivée	52
2.1. Représentation schématique des erreurs potentielles liées à l'utilisation du seuil fixe [97]	57
2.2. Région étudiée dans le plan temps-fréquence par (a) la transformée de Fourier et (b) l'analyse temps-fréquence	59
2.3. Principe de la transformée de Fourier à court terme, découpage de signal en fenêtres d'analyse de même taille	61
2.4. Pavage temps-fréquence pour la transformée à fenêtre glissante	62
2.5. Illustration du problème de résolution de la STFT	63
2.6. Pavage temps-fréquence et temps-échelle pour la transformée en ondelettes. a représente le facteur d'échelle. Les petites échelles correspondent à des hautes fréquences et inversement les grandes échelles correspondent à des basses fréquences	64
2.7. Etapes de calcul des Coefficients d'ondelette	68
2.8. Chapeau mexicain et ondelette de Morlet	70
2.9. Ondelettes de Daubechies avec 4 et 10 moments s'annulant : db4 et db10	70
2.10. (a)-(d) Ondelette de Morlet complexe avec différentes valeurs de f_b (1.5 en bleu continue, 0.5 en rouge discontinue)	71
3.1. Localisation de source d'EA avec la méthode géométrique	78
3.2. Représentation simplifiée du filtre optimal	81
3.3. Structure générale des estimateurs d'états	82
3.4. Principe général de la transformée non-parfumée	88
4.1. Représentation schématique du protocole expérimental utilisé pour valider les signaux simulés associés à une rupture de mine	95
4.2. Dispositif de mesure EA	98

4.3. Formes d'onde des signaux d'EA générés par une rupture de mine sur la plaque de Cuivre	99
4.4. Comparaison des signaux expérimentaux du même impact I2 dans l'éprouvette de Cuivre. Le signal d'excitation est une rupture de mine. (a) signal complet. (b) zoom sur l'intervalle [0 - 400] μ s	100
4.5. Comparaison des signaux expérimentaux du même impact I7 dans l'éprouvette de Cuivre. Le signal d'excitation est une rupture de mine. (a) signal complet. (b) zoom sur l'intervalle [0 - 400] μ s	101
4.6. Incertitude dans la résolution (a) en temps et (b) en fréquence de l'ondelette de Morlet Complexe ($f_c = 1.6$ Hz, $f_b = 0.8$ Hz)	102
4.7. Représentation temps-fréquence issue d'une TOC des signaux générés par une rupture de mine au point I2 sur l'éprouvette. L'échelle des couleurs représente la vitesse particulaire en mm/s	103
4.8. Tracé de contour du Scalogramme de la CWT des signaux générés par une rupture de mine au point I2 sur l'éprouvette	105
4.9. Tracé des Coefficients de la CWT à la fréquence f_m pour trouver le temps d'arrivée pour le point d'impact I2	105
4.10. Simulation de Monte Carlo pour le calcul de la vitesse de groupe V_{gA_0} de l'Impact I2	106
4.11. Estimation de l'emplacement et suivi de l'évolution des sources d'EA, obtenues par la méthode à base du filtre EKF	108
4.12. Estimation de l'emplacement des sources d'EA, obtenues par la méthode géométrique (vert) et par la méthode à base du filtre EKF (rouge)	111
4.13. Représentation temporelle et Analyse temps-fréquence issue par CWT des signaux générés par le point d'impact I4 sur les quatre capteurs	112
4.14. Dispositif expérimental	116
4.15. Plaque d'aluminium avec une encoche pour l'essai de traction : Schéma de principe (dimensions en mm), et son cliché	117
4.16. Différentes formes d'ondes répertoriées comme de l'EA discrète	120
4.17. Représentation temps-fréquence issue d'une CWT des signaux générés par un événement acoustique	121
4.18. Exemple de la méthode de traitement du signal. Haut : signal AE d'origine. En bas : tracé de transformation en ondelettes avec des courbes de dispersion superposées indiquant les modes d'onde symétriques (S_0) et antisymétriques (A_0), avec les pics S_0 et A_0 marqués	122

4.19. (a) Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à la charge maximale (pic)	124
(b) Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à 80 % du pic, après la charge maximale	125
(c) Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à la fin de l'essai de traction	126
4.20. Capture photographique de l'éprouvette en aluminium à la fin de teste de rupture	127
4.21. Contrainte en fonction du temps pour un essai de traction simple sur un aluminium	128
4.22. Energie d'EA cumulée en fonction du temps avec la contrainte	129
4.23. Béton : matériau composite [154]	132
4.24. Dimension de l'éprouvette et détails sur la fixation du couteau qui mesurent le déplacement de l'ouverture de la bouche de fissure (1. détail de l'encoche, 2. déplacement de l'ouverture de la bouche de fissure (CMOD) 3. bords du couteau collés sur le béton)	134
4.25. Synoptique d'un système d'EA	135
4.26. Configuration expérimentale complète d'un essai de flexion 3 points	137
4.27. Un exemple des signaux d'EA détectés - AE hits -	139
4.28. Une partie de la méthode de traitement du signal utilisée. (a) : signal d'EA d'origine. (b) : Spectre de puissance. (c) : tracé de la transformation en ondelettes de signal d'EA	140
4.29. Courbes de charge-CMOD pour l'échantillon testé	141
4.30. Evolution du nombre d'évènements cumulés pour l'échantillon testé	141
4.31. Corrélation entre les courbes de temps de chargement et les Hits cumulé	142
4.32. Corrélation entre les courbes charge-temps et les événements cumulés	142
4.33. Énergie absolue cumulée selon la courbe charge-CMOD	143
4.34. Cartes de localisation des événements EA la fin du test de rupture. (a) : Par la méthode à base du filtre UKF. (b) : par la méthode à base du filtre EKF. (c) : Capture photographique de trajet de la fissure	144
4.35. Distribution de fréquence des événements d'EA le long de l'axe X	145
A.1. Transformation non parfumée	164
A.2. Détermination du début du signal à l'aide d'un seuil	165
A.3. Détermination de l'amplitude maximale du signal à l'aide d'une fenêtre glissante	166

LISTE DES TABLEAUX

1.1. Ordre de grandeur de la sensibilité des capteurs d'EA	43
4.1. Coordonnées des capteurs sur la plaque en cuivre	97
4.2. Coordonnées des sept impacts sur la plaque en cuivre	97
4.3. Données des TDOA calculés par CWT	104
4.4. Valeur de l'emplacement initial	106
4.5. Emplacement estimé des sept points d'impact source d'EA	107
4.6. Erreur relative des sept points d'impacts source d'EA	108
4.7. Erreur d'estimation de l'emplacement de la source d'EA dans les directions x et y en fonction de nombre d'itération	108
4.8. Coordonnées des sept impacts sur la plaque en cuivre	110
4.9. Données des TDOA calculés par CWT	110
4.10. Comparaison des résultats de l'estimation des emplacements des sources d'EA entre les approches EKF et géométriques	110
4.11. Propriétés du matériau d'Aluminium	114
4.12. Coordonnées des capteurs sur la plaque en aluminium	117
4.13. Formulation d'un béton	133
4.14. Coordonnées des capteurs sur l'échantillon en Béton	136
4.15. Quelques valeurs des fonctionnalités d'EA et temps pour les Hits AE (CNT: Counts, PCNT: Counts to Pic, DUR: Duration)	139

LISTE DES PRINCIPALES ABREVIATIONS & NOTATIONS

CND	:	Contrôle non destructif
EA	:	Emission Acoustique
SHM	:	Structural Health Monitoring (Surveillance de la Santé des Structures)
TOF	:	Temps de vol
TOA	:	Temps d'arrivée
FFT	:	Transformée de Fourier rapide
TFCT	:	Transformée de Fourier à court terme
WT	:	Wavelet Transform (Transformée en Ondelette (TO))
CWT	:	Continuous Wavelet Transform
TDOA	:	Différence de Temps d'Arrivée
PLB	:	Pencil Lead Break (Rupture d'une Mine de Crayon)
PDT	:	Peak Definition Time
HDT	:	Hits Definition Time
HLT	:	Hits Lockout Time
v.a.	:	Variable Aléatoire
PDF	:	Fonction de Densité de Probabilité
KF	:	Kalman Filter
EKF	:	Extended Kalman Filter (Filtre de Kalman Etendu)
UKF	:	Unscented Kalman Filter (Filtre de Kalman sans biais)
UT	:	Unscented Transform
FO	:	formes d'ondes
CMOD	:	Déplacement d'Ouverture de la Fissure en Boucle Fermée
FPZ	:	Largeur de la Zone Endommagée
V_L	:	Vitesse des ondes longitudinales dans les solides
V_T	:	Vitesse des ondes transversales dans les solides
V_R	:	Vitesse des ondes de Rayleigh
R_f	:	Rapport Felicity
V_p	:	Vitesse de Phase
V_g	:	Vitesse de groupe

A_0	:	Mode fondamental Antisymétrique
S_0	:	Mode fondamental Symétrique,
t_i	:	Temps d'arrivée,
ψ	:	Ondelette mère.
$\psi_{a,b}$:	Ondelette analysante (ou ondelette fille).
a	:	Coefficient de dilatation de ψ
b	:	Coefficient de translation de ψ ,
ψ^*	:	Complexe conjugué de l'ondelette mère.
$C_\psi(a, b)$:	Coefficients d'ondelettes
$\sigma_{t,\psi}$:	Durée de l'ondelette mère,
$\sigma_{\omega,\psi}$:	Largeur de bande de l'ondelette mère,
$(x_k)_{k \geq 0}$:	Système dynamique d'Etat,
$(y_k)_{k \geq 0}$:	Processus d'observation,
$p_k = p(x_k y_{0:k})$:	Densité conditionnelle de x_k sachant les observations passées $y_{0:n} = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$.
$(p_k)_{k \geq 0}$:	Filtre optimal,
$\mathbb{P}(y_k x_k) = g_k(x_k)$:	Fonction de vraisemblance,
w_k	:	Bruit d'état,
v_k	:	Bruit d'observation,
P_k	:	Matrice de covariance de l'erreur d'estimation,
\hat{x}_k	:	Variable d'état estimée actuelle,
\hat{x}_{k-1}	:	Etat corrigé,
$\hat{x}_{k k-1}$:	Etat prédit,
K_k	:	Matrice des gains de Kalman.
Q_k	:	Matrice de covariance de bruit dans le modèle dynamique,
R_k	:	Matrice de covariance de bruit de mesure,
\mathcal{X}_i	:	Sigma point,
w_i	:	Poids de pondération de la méthode UT,

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La recherche de défauts dans les matériaux constitue une des préoccupations majeures des industries de pointe comme l'aéronautique, l'aérospatiale ou le domaine automobile. En effet, la mise au point de matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont adaptées à une utilisation spécifique nécessite certains procédés de fabrication (laminage à chaud ou à froid des aciers, assemblages de plis dans les structures multicouches, ...etc.) qui risquent de générer des imperfections, dès la conception. De plus, le matériau subit, au cours de sa vie, des contraintes mécaniques ou thermiques qui le fragilisent et peuvent faire apparaître des défauts. Des techniques fiables doivent alors être mises en œuvre pour établir le diagnostic d'un matériau et détecter les inhomogénéités qui pourraient compromettre son utilisation.

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) permettent de tester une structure sans provoquer de modification irréversible. Elles représentent donc un enjeu industriel important du point de vue économique puisque les pièces testées peuvent être de nouveau utilisées lorsqu'aucun défaut n'a été révélé. Certaines méthodes de CND sont basées sur les rayons X, la magnétoscopie, la microscopie ultrasonore ou l'holographie laser, et sont utilisées pour localiser les défauts internes ou de surfaces. Ces techniques sont cependant lourdes à mettre en œuvre et peuvent nécessiter des précautions d'emploi très contraignantes. En plus, la plupart de ces techniques sont chronophages, coûteuses et nécessitent un traitement particulier de la structure, tel que le démontage de certaines pièces. En général, ils ne sont pas utilisés pour identifier les dommages en temps réel.

Le diagnostic doit donc être capable de détecter précocement le dommage, de le localiser, de l'identifier et d'évaluer sa gravité avant qu'il n'entraîne une catastrophe [1] [2]. L'émission acoustique (EA) permet d'atteindre cet objectif, car cette technique permet de surveiller la santé d'une structure entière quelle que soit sa taille tout en réduisant les coûts de maintenance. Un large éventail d'études théoriques, numériques et expérimentales a été réalisé pour évaluer l'efficacité et l'applicabilité de la détection et de l'identification des dommages à l'aide des techniques de l'EA [3-9]. Elle a l'avantage d'être totalement passive et donc de n'avoir aucune influence sur les dommages observés.

L'émission acoustique désigne la manifestation d'une onde acoustique générée par une source située au sein d'un matériau subissant des modifications structurales. L'EA est aussi la technique de contrôle/caractérisation non destructive consistant à mesurer et interpréter la signature acoustique des sources d'endommagements. Cette technique a un fort potentiel et présente de nombreux avantages. Elle permet le contrôle volumique d'une structure en temps réel quelle que soit sa taille et dans des conditions de service. En effet, lors d'un essai instrumenté en EA, le signal généré par la source d'endommagement se propage au sein du matériau, est mesuré par un capteur piézoélectrique, puis enregistré et exploité par le système d'acquisition. Ainsi, entre sa création et sa visualisation par l'utilisateur, le signal subit de nombreuses transformations. De même, le type de capteur utilisé et son positionnement à la surface du matériau modifient la forme du signal mesuré. Toutes ces transformations rendent délicate la localisation et l'identification des sources d'EA.

CONTEXTE DE LA THESE

Le contexte général de cette thèse de doctorat porte sur la proposition et l'évaluation de nouveaux outils de traitement et d'analyse des signaux non-stationnaires pour l'estimation de l'emplacement et le suivi de l'évolution des sources d'émission acoustique (EA) au sein d'un matériau sous contrainte (mécanique, chimique, etc.). L'objectif final est l'étude de l'applicabilité et de l'efficacité des méthodes probabilistes proposées pour détecter et localiser les dommages sources d'EA dans des structures soumises à une sollicitation mécanique, tout en considérant les incertitudes liés à la modélisation et à la mesure. L'approche probabiliste est, depuis quelques années, de plus en plus utilisée dans le domaine de la surveillance de la santé des structures (SHM) et offre une alternative aux techniques traditionnelles [10-12]. Le cadre bayésien se prête bien à ce domaine d'application. En effet, les données sont peu nombreuses et très souvent bruitées. Il est donc nécessaire, d'une part, de proposer des systèmes dynamiques modélisant l'évolution des phénomènes considérés et d'autre part, d'apporter de l'information sur les paramètres inconnus du modèle sous forme de loi a priori. Ce travail s'appuie principalement sur des études expérimentales.

Les ondes d'EA reçues par un réseau de capteurs piézoélectriques collés en surface du matériau contiennent des informations caractéristiques sur les dommages sources d'EA. Intuitivement, le temps d'arrivée (TOA) de ces ondes est lié à l'emplacement des dommages. La première partie de ce travail portera sur le développement de nouvelles techniques d'extraction de TOA à partir des signaux d'EA reçus qui constitue donc un domaine de recherche crucial. Une

variété de méthodes pour augmenter la précision des mesures des TOA des ondes acoustiques ont été développées, y compris la transformée de Fourier à court temps (TFCT) [13], la distribution de Wigner-Ville (WVD) [14], la transformée en ondelette continue (CWT) [9] [11] [14-16], la transformée de Hilbert-Huang (VRL) [17], etc. Dans ce travail, Nous avons proposé une analyse temps-fréquence basée sur la CWT. Cette dernière a été choisie pour sa bonne résolution à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel et pour sa propriété multi-résolution [18].

La deuxième partie de ce travail traitera du problème de localisation et de suivi temporel de l'évolution des sources d'EA à partir des différences de temps d'arrivée (TDOA). Nous proposerons dans cette deuxième partie de formuler le problème de localisation et de suivi de l'évolution des sources d'EA comme un problème de filtrage bayésien. Cette approche permettra d'introduire un modèle sur la dynamique des sources d'EA dans le processus d'estimation. La représentation proposée du modèle d'état réduit et du modèle d'observation construit à partir de l'équation de TDOA sera alors cruciale pour construire le modèle de filtrage. La méthode de localisation et de suivi qui en découlera permettra de prédire et d'estimer les sources d'EA sur toute la durée de l'expérience, en garantissant la cohérence temporelle des estimations.

Cette démarche suppose la disponibilité, a priori, d'une caractérisation de l'ensemble des sources d'incertitudes affectant le modèle du système, généralement sous forme stochastique. Typiquement, dans le cas d'une modélisation d'état, il s'agit de caractériser le bruit d'état (connaissance imparfaite du modèle) et le bruit de mesure (imperfections des chaînes d'instrumentation/capteurs). Sur la base de cette description, la famille des techniques bien connues à base de filtre de Kalman (dans ses variantes linéaires ou non linéaires) a été proposée pour concevoir des méthodes de localisation et de suivi de l'évolution des sources d'EA. Ces méthodes ont été à l'origine développées pour des problèmes où de nombreuses observations sont à traiter en temps réel, comme par exemple le domaine de la poursuite de cible. Ces méthodes doivent être adaptées à des modèles d'évolution des sources d'EA.

Les algorithmes d'estimation de la position des sources d'EA proposés fonctionnent de façon récursive en mettant à jour l'estimation de la position à chaque mesure reçue. Ils reposent sur l'utilisation d'un filtre de Kalman étendu ou d'un filtre de Kalman non parfumé. Ces derniers sont utilisés comme cadre d'estimation séquentiel d'état qui convient au problème de suivi. Les performances des algorithmes proposés sont vérifiées en utilisant à la fois des simulations et des expériences réelles.

Un des objectifs fixés dans le cadre de cette thèse est de mettre au point une méthode permettant d'améliorer la qualité du modèle non linéaire pour qu'il représente mieux le comportement de la chaîne d'EA (asservissement) même lors de manœuvres très dynamiques. La méthodologie retenue doit respecter les diverses contraintes que le milieu industriel impose.

Dans cette thèse, les problèmes de localisation et de suivi se distinguent en faisant spécifiquement référence à la localisation comme étant une estimation de la position en utilisant le signal indépendamment à chaque pas de temps, tandis que le suivi se réfère à l'estimation de la position séquentiellement sur plusieurs pas de temps consécutifs. Par conséquent, le suivi de la source d'EA peut être considéré comme une fusion de mesures de localisation à partir de délais indépendants en considérant la cohérence de ces mesures. Bien que les deux termes puissent être utilisés pour une source stationnaire ou mobile, la différence réside essentiellement dans la prise en compte de la cohérence du mouvement de la source.

ORGANISATION DE LA THESE

La thèse est organisée en 4 chapitres de la façon suivante :

Le Chapitre 1 de cette thèse a pour objet de présenter un aperçu général des notions fondamentales de l'émission acoustique et des différents modes de propagation de ces ondes dans les matériaux. Leurs origines et leurs natures, ainsi que les étapes de transformation du signal de la source à la visualisation par l'utilisateur sont explicitées. Nous décrivons ensuite la problématique de la détection et de la localisation des sources d'EA.

Le chapitre 2 est dédié à un tour d'horizon des principales techniques d'extraction de temps d'arrivée (TOA) des signaux d'EA sur les capteurs piézoélectriques. L'analyse des signaux d'EA est réalisée à l'aide d'outils tels que la transformée de Fourier, la transformée de Fourier à court temps (TFCT) et la transformée en ondelette continue (CWT). L'analyse temps-fréquence issue de la CWT a été appliquée sur les signaux non stationnaires d'EA afin d'extraire le temps d'arrivée. Cette méthode a été choisie pour sa bonne résolution à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel.

Le Chapitre 3 décrit les méthodes proposées pour l'estimation de l'emplacement des sources d'émission acoustique (EA), informations utiles, et le suivi de leurs évolutions. Dans un premier temps la méthode basée sur la technique géométrique est évoquée. Ensuite, dans un second temps l'accent est mis sur la présentation du problème de filtrage, en exposant le filtre

optimal bayésien et les différentes techniques d'approximation dites classique. En combinant les informations antérieures et les données TOA mesurées, le théorème de Bayes est utilisé pour mettre à jour les distributions de probabilité des paramètres concernant l'emplacement des dommages sources d'EA et la vitesse des ondes. Les algorithmes d'estimation proposés fonctionnent de façon récursive en mettant à jour l'estimation de la position à chaque mesure reçue. Ils reposent sur l'utilisation d'un filtre de Kalman étendu (EKF) ou d'un filtre de Kalman non parfumé (UKF). Le filtre de Kalman étendu permet une estimation itérative de la position de la source d'EA et donne de très bons résultats lors de système à espace d'état peu dynamiques. Lorsque les systèmes sont fortement non-linéaires, les performances du filtre EKF sont mauvaises. Le filtre de Kalman sans biais permet de s'affranchir de problème de mal initialisation et évite la linéarisation du premier ordre de la série de Taylor, qui cause la principale limitation du filtre EKF. Nous discutons des algorithmes de base et des améliorations possibles. Ces des méthodes basées sur des algorithmes d'optimisation qui permettent une estimation itérative des positions des sources d'EA et un suivi en continue de leurs évolutions. Les avantages des deux algorithmes proposés par rapport aux méthodes traditionnelles incluent la capacité de prendre en compte les incertitudes dans les mesures TOA et la vitesse des ondes et de fusionner efficacement les données multi-capteurs pour effectuer la localisation de la source d'EA.

Le Chapitre 4 aborde le cœur de ce travail en s'intéressant à la validation expérimentale des méthodes d'estimation proposées sur différentes corps d'épreuve pour la localisation et le suivi de la propagation, de l'évolution des sources d'EA. Pour répondre à ces objectifs, 3 types d'essais en laboratoire ont été menés : une rupture de mine sur une plaque de cuivre, un essai de traction sur une plaque d'aluminium et un essai en flexion 3 points sur une éprouvette en béton. La première partie présente le protocole expérimental relatif aux essais mécaniques et aux systèmes d'acquisition de l'EA. La seconde partie présente une étude des performances statistiques des méthodes d'estimation proposées menée sur des signaux artificiels, puis sur des signaux réels et le comportement mécanique observé au cours des différents types d'essais.

Finalement, une conclusion générale vient clôturer le manuscrit avec les perspectives en vue à l'issue de l'étude établie.

BASE THEORIQUE DE
L'EMISSION ACOUSTIQUE (EA)

CHAPITRE 1 : BASE THEORIQUE DE L'EMISSION ACOUSTIQUE (EA)

Les techniques acoustiques jouent un rôle essentiel dans l'étude des phénomènes impliqués dans l'évolution des endommagements des matériaux et des systèmes en général. Elles ont été très largement mises en œuvre en tant que méthodes d'investigation non destructives, ceci soit pour évaluer les propriétés mécaniques des systèmes étudiés, soit pour détecter les défauts internes du matériau. Cette technique est très utilisée au sein de nombreux domaines d'application : les infrastructures de transport (secteurs automobiles, ferroviaire, aérien) et d'habitat, les matériaux aéronautiques, pour ne citer que les principaux.

I. ETAT DE L'ART DE L'EMISSION ACOUSTIQUE

De nombreux travaux ont porté sur l'étude du comportement des matériaux sous sollicitations mécaniques, visant à comprendre les mécanismes microstructuraux à l'aide de plusieurs méthodes expérimentales. Certains auteurs ont suivi les microstructures obtenues à l'issue de sollicitations mécanique à travers l'analyse des courbes contrainte-déformation, par exemple, la nature du matériau (ductile/ fragile) au cours des chargements. De nombreuses études du comportement sous chargement mécaniques ont été menées, à titre d'exemples, sur le cuivre [19-21] ou sur l'aluminium [22-26]. Ces études ont été complétées par des observations par Microscopie Electronique à Transmission (MET) afin d'étudier l'évolution des structures de dislocations établies. Toutefois, si les travaux au MET ont été nécessaires pour comprendre les mécanismes microscopiques élémentaires, des analyses additionnelles se sont avérées essentielles à la compréhension du comportement global des défauts. Certains auteurs ont en effet choisi d'explorer de nouvelles techniques pour contribuer aux connaissances du comportement des matériaux, tel que les techniques de contrôle non destructif.

Des études du comportement sous chargement mécanique sur les matériaux couplée à l'émission acoustique ont permis d'observer de plus près les mécanismes fondamentaux mis en jeu ainsi que leurs comportements dynamiques. Dans le cas de l'aluminium, il a été établi que les variations de l'énergie relative dissipée et de l'atténuation ultrasonore étaient fortement reliées aux différents changements internes que subissait le matériau au cours de sa sollicitation [15].

Le suivi de l'EA a permis d'étudier la dynamique des phénomènes microstructuraux, tels que les dislocations, induite lors du chargement mécanique de certains matériaux purs. Ce type

de suivi a permis également d'associer une signature acoustique aux transformations de phase induites par la déformation plastique du matériau. Des analyses statistiques des données obtenues lors du suivi des transformations de phase ont été effectuées en vue d'étudier les phénomènes précurseurs à la dégradation de ce type de matériaux [27].

II. EMISSION ACOUSTIQUE : DEFINITION ET GENERALITES

II.1 DEFINITION

L'émission acoustique (EA) [28] [29] est le phénomène de libération d'énergie, sous forme d'ondes élastiques transitoires, résultant de micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau (fissure, corrosion, délaminage, etc.) soumis à une sollicitation statique ou dynamique. Une partie de l'énergie est libérée sous la forme d'une onde élastique qui se propage dans toutes les directions jusqu'aux frontières du matériau. En analysant les vibrations de la surface du matériau dues à l'arrivée de l'onde, il est possible de collecter des informations sur l'évènement à l'origine de ces vibrations (figure 1.1). Toutes les fréquences des ondes concernées sont dans la gamme ultrasonore entre 20 kHz et 10 MHz.

Il s'agit aussi d'une méthode passive qui permet de suivre la progression de l'endommagement, ou d'une fissure, en temps réel, classant ainsi l'EA parmi les techniques de contrôle de santé des structures (on l'appelle en anglais Structural Health Monitoring (SHM)) [30]. Elle est adaptée à l'inspection des grandes structures tout en minimisant les temps d'intervention et les arrêts de production coûteux. Son emploi est maintenant courant dans des structures où la moindre défaillance (rupture) peut avoir des conséquences humaines et financières dramatiques. L'EA permet d'enregistrer beaucoup d'informations. Les informations obtenues ont à la fois un caractère local (grâce à la localisation) et un caractère global (suivi de l'ensemble de la structure). L'usage de ces informations se fera en fonction du but recherché.

Dans cette deuxième définition il n'est plus seulement question d'un phénomène mais d'une "méthode passive et globale". L'EA fait donc référence à la fois au phénomène de libération d'énergie dans un matériau et à la technique qui permet de mesurer ce phénomène.



Figure 1.1 : Représentation simplifiée de la chaîne de l'Emission Acoustique.

II.2 BREVE HISTOIRE DE L'EMISSION ACOUSTIQUE

L'émission acoustique (EA) est un phénomène naturel courant (craquement des roches, des os, des couches inférieures de neige, ...) et son utilisation pour le contrôle non-destructif est probablement aussi vieille que la poterie. Vers le VIIe millénaire av. J.-C., les potiers utilisaient déjà le phénomène d'émission acoustique dans le domaine des fréquences audibles pour déterminer la qualité de leur production en écoutant les craquements des céramiques refroidissant dans le four [31]. Dans les métaux, l'un des premiers exemples d'émission acoustique est le "cri" de l'étain, ce petit craquement audible lorsque ce matériau est plié. Cette manifestation de l'EA est connue depuis l'antiquité mais sa première observation documentée n'apparaît qu'au huitième siècle avec l'ouvrage *summa perfectionis magisterii*. Toutefois, ce n'est qu'en 1916 que Czochralski relie le cri de l'étain au phénomène de maclage c'est-à-dire à la déformation plastique qui se crée lors du refroidissement de certains matériaux cristallisés [32]. En 1923, Portevin et Le Chatelier observent « un petit bruit sec, parfois perceptible à plusieurs mètres de distance » qui accompagne une déformation hétérogène [33]. Par la suite, de nombreux travaux sont menés dans le domaine de l'audible jusqu'aux travaux sur l'émission acoustique dans le domaine ultrasonore réalisés par Joseph Kaiser [34] en 1950, marquant ainsi les débuts de l'émission acoustique moderne.

Lors d'essais hydrostatiques menés sur l'enveloppe des propulseurs des fusées Polaris en 1961, Allen T. Green, Charles S. Lockman et Richard K. Steele remarquent que des sons audibles accompagnent systématiquement les essais. Ils décident donc d'instrumenter la structure en utilisant des microphones pour détecter, enregistrer et analyser les signaux acoustiques. En 1965, en collaboration avec la NASA, ils instrumentent un réservoir Thiokol SL-1 de 6.6 m de diamètre qui échoue lors d'un test hydraulique. Lors de l'analyse des enregistrements d'émission acoustique, ils déterminent précisément le début du phénomène de fissuration ainsi que sa propagation et, avec l'aide d'algorithmes de triangulation, déterminent à 0.3 m près le lieu de l'événement [35]. La prédiction de l'apparition d'un défaut critique ainsi que sa localisation marquent le début des contrôles industriels par émission acoustique.

A partir des années 80, la technique de l'EA a été appliquée aux matériaux métalliques et aux matériaux composites. Cette technique s'est ensuite étendue à d'autres domaines :

- Investigation physique des matériaux ;
- La surveillance en service [36] : contrôle des appareils sous pression (application industrielle la plus importante), contrôle de structures telles que les ponts ;

- La surveillance en fabrication (usinage) [37] : contrôle de la qualité de l'emboutissage par exemple ;
- Surveillance de machines tournantes ;
- La caractérisation de l'endommagement de matériaux lors d'essais mécaniques ou physicochimiques (corrosion) ;
- Contrôle et évaluation de matériaux composites [38].
- Le contrôle des structures aéronautiques en aluminium ou composites : voilure, dérive, réservoirs haute pression en composite.
- La surveillance des chaufferies de sous-marins nucléaires et des réacteurs nucléaires (étanchéité des tuyauteries sous pression).
- Le contrôle des bâtiments navals : contrôle des embarcations en composite.
- La surveillance de structures offshore : détection de la corrosion dans les pétroliers ou méthaniers.
- Le suivi de la fissuration dans le béton, la détection de la rupture des câbles dans les ponts à haubans, ... etc.

II.3 PRINCIPES GÉNÉRAUX D'UN CONTRÔLE PAR ÉMISSION ACOUSTIQUE

L'émission acoustique présente certaines particularités par rapport aux techniques ultrasonores classiques. En effet, la source d'EA n'est pas contrôlée par l'opérateur et survient par de nombreux phénomènes physiques et mécanismes d'endommagement de matériaux évolutifs dans le temps. L'endommagement va se développer en fonction des sollicitations imposées. Les principales caractéristiques de l'EA sont les suivantes [39] :

- La source provient d'une libération d'énergie à l'intérieur ou à la surface du matériau ou de la structure contrôlée. Cette libération d'énergie est créée par exemple par un mécanisme d'endommagement tel que la propagation d'une fissure. Ceci à l'avantage de faire de l'EA une technique passive permettant d'utiliser un appareillage assez simple consistant en un réseau de capteurs récepteurs. Cette technique à aussi l'avantage de pouvoir être utilisée pour des suivis de structures en fonctionnement.
- Les évènements générant une émission acoustique, même de faible amplitude, sont détectés en temps réel ce qui permet de retracer chronologiquement leur apparition. Cependant, l'EA ne détecte que des mécanismes évolutifs dans le temps (par exemple, l'apparition ou la propagation d'une fissure) et ignore les défauts non évolutifs.

- Le matériau ou la structure étudiés doivent forcément être soumis à des sollicitations (mécaniques ou physico-chimiques) pour voir l'apparition d'évènements détectables par EA.
- Dans un essai, plusieurs types d'endommagement sont présents sous forme de salves d'EA. On se place dans l'hypothèse où chaque salve d'EA correspond à un évènement physique dans le matériau et où la forme de la salve est directement liée aux caractéristiques de cet évènement [40].

L'EA présente donc de nombreux avantages par rapport aux autres techniques de contrôle non destructif (CND). En effet, grâce à l'EA, il est idéalement possible de détecter la présence d'un défaut au moment de sa création, de le localiser et de déterminer sa nature et sa gravité.

II.3.1 Facteurs engendrant de l'EA dans un matériau

L'EA résulte de l'action d'une sollicitation sur un matériau. Par suite, différents facteurs influencent l'émissivité d'une structure. Certains facteurs sont dus aux propriétés intrinsèques du matériau lui-même telle que sa structure cristallographique, la taille des grains, l'isotropie, la pureté etc. D'autres facteurs sont associés aux conditions de sollicitation telles que la vitesse de chargement, la température de l'essai, l'histoire antérieure du matériau (s'il est pré-fatigué, écroui ou recuit, par exemple). [41].

Les mécanismes induits lors du chargement peuvent engendrer également de l'activité acoustique dans un matériau sous sollicitation. Ainsi, certains mécanismes tels que les macles, le clivage, les transformations de phases et la propagation de fissures sont des sources potentielles de l'activité acoustique [42].

II.3.2 Description et analyse des signaux d'EA

Une source d'EA peut donner naissance à des ondes longitudinales, à des ondes transversales, à des ondes de surface, dites de Rayleigh, ainsi qu'à des ondes de plaque, dites de Lamb [28] [42-43]. La propagation de ces ondes se fait à des vitesses différentes et dépend du matériau étudié. Un signal d'EA est en général un signal de forme complexe résultant du produit de convolution des quatre fonctions de transfert tel que [44] ;

$$Z(t) = S(t) * G(t) * R(t) * H(t) \quad (1.1)$$

où $S(t)$ est la réponse acoustique étudiée, $G(t)$ représente la fonction de Green ou la réponse impulsionnelle du milieu de propagation, $R(t)$ est une fonction propre au capteur qui peut avoir une très grande influence sur le signal final et $H(t)$ est une fonction propre au système d'acquisition (filtrage, amplificateurs, échantillonnage, ...etc.).

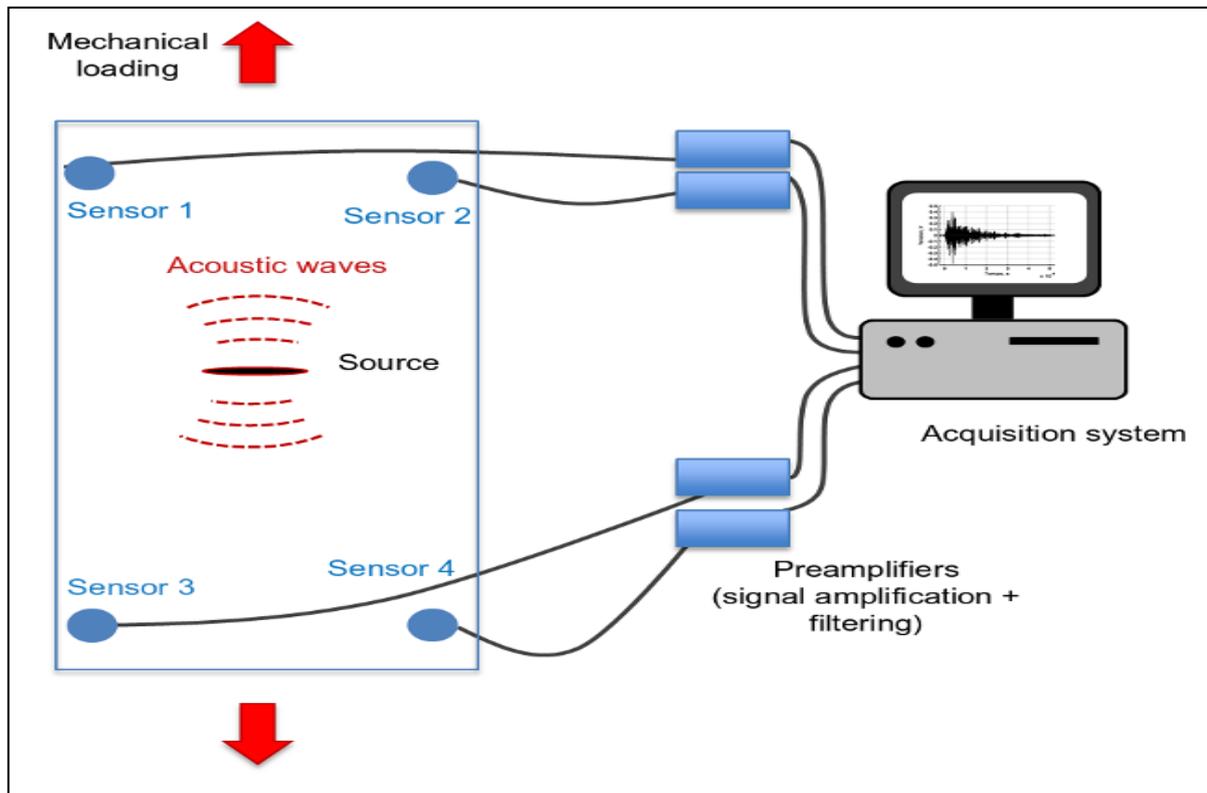


Figure 1.2 : Chaîne classique d'acquisition des signaux d'EA, de la génération de l'onde acoustique lors d'un test mécanique à la visualisation du signal d'EA.

La figure 1.2 décrit les composantes d'une chaîne classique d'acquisition d'EA. Un matériau est sollicité par une contrainte mécanique qui va créer des défauts. L'évolution de ces défauts s'accompagne d'une libération d'énergie élastique qui se propage dans le milieu sous forme d'ondes mécaniques transitoires. Ces ondes sont recueillies et enregistrées après amplification. Ces ondes constituent alors les signaux d'EA. On distingue généralement deux types d'EA (figure 1.3) : l'EA discrète et l'EA continue.

- L'émission continue se traduit par une augmentation apparente du bruit de fond due à des salves trop fréquentes pour être discernables. Dans les matériaux métalliques, ce type d'émission intervient généralement en présence de mouvements de dislocation.

- L'émission discrète quant à elle, est constituée d'événements transitoires d'énergie importante et se traduit généralement sous la forme d'ondes sinusoïdales amorties (pour les capteurs résonants utilisés dans la pratique industrielle). Par exemple, les phénomènes de propagation de fissure conduisant à la rupture.

Parmi ces deux formes d'émission ([figure 1.3](#)), la plus exploitée dans les contrôles industriels est l'émission discrète. En effet, l'émission continue est faiblement énergétique et son utilisation dans un milieu industriel bruyant est délicate.

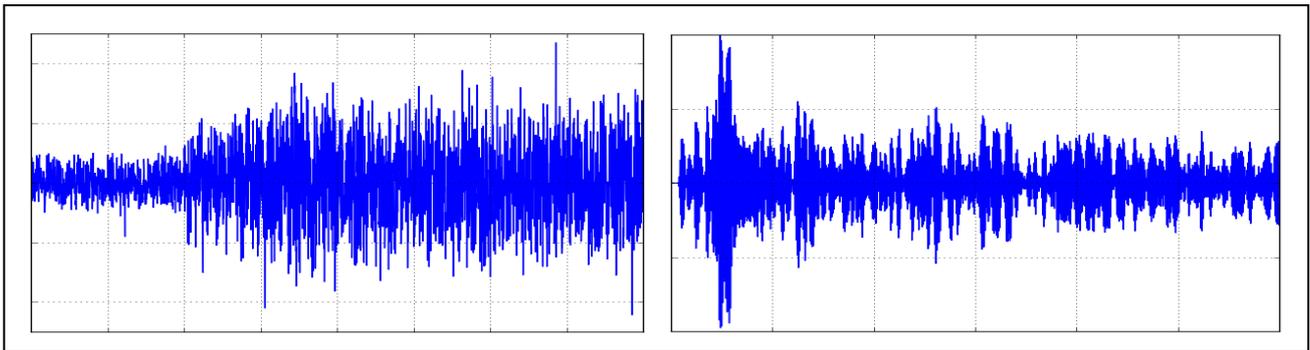


Figure 1.3 : Signaux type d'une émission continue (à gauche) et d'une émission discrète (à droite).

Les signaux d'EA détectés par les capteurs sont transformés en ondes électriques, puis transmis au système d'acquisition par le biais d'un préamplificateur. Les capteurs utilisés pour l'EA sont souvent de type piézoélectrique. Ils ont la propriété de convertir des ondes mécaniques qui les excitent en ondes électriques. Selon le domaine de fréquences ultrasonores, l'utilisateur peut choisir un capteur de type résonant ou de type large bande [45].

- Large bande : ce sont des capteurs qui possèdent une bande étendue et large pouvant aller jusqu'au MHz. Leur avantage principal est de ne pas modifier ou peu la forme réelle du signal.
- Résonnants : ils ont une bande passante moins large et un pic de la fonction de transfert aux alentours d'une certaine fréquence. Ce pic de réponse entraîne une modification de l'allure des signaux et de leur contenu fréquentiel. Ces capteurs sont cependant les plus utilisés car ils présentent une meilleure sensibilité et permettent de détecter des signaux de plus faible amplitude.

L'utilisation de plusieurs capteurs permet de localiser les sources d'EA au sein du matériau.

II.3.3 Paramètres des signaux (salves) d'émission acoustique

Les signaux successifs enregistrés lors des différentes expériences sont appelés salves (figure 1.4). Pour être enregistrée, une salve doit dépasser un seuil de déclenchement défini par l'opérateur permettant de s'affranchir le plus possible du bruit du fond tout en conservant le maximum d'information provenant du système étudié.

La figure 1.4 présente les quelques uns des paramètres d'un signal d'EA exploitables par le système d'acquisition [46][47]. Parmi ces paramètres on retrouve :

- l'amplitude maximale exprimée en décibel : c'est l'amplitude maximale du signal sur toute la durée d'une salve. La distribution d'amplitude couvre la plage 0 - 100 dB telle que $A(dB) = 20\log(V_s/V_{ref}) - \text{gain du préamplificateur}$ avec $V_{ref} = 1\mu V$;
- le temps de montée (μs) : c'est le temps qui sépare le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale du signal ;
- la durée (μs) : c'est le temps qui sépare le premier et le dernier dépassement du seuil dans chaque salve ;
- le nombre de coups : c'est le nombre de fois où le signal dépasse le seuil sur toute sa durée ;
- la fréquence moyenne : rapport du nombre de coup sur la durée du signal ;
- l'énergie : elle correspond à l'aire située sous la courbe (intégrale du carré de l'amplitude de la salve sur sa durée, $E = \int V^2(t) dt$, où $V(t)$ est la tension de sortie du capteur en fonction du temps) ;
- la tension efficace moyenne (notée RMS), exprimée en volts. Il s'agit d'une forme de l'expression de l'énergie d'un signal, $RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} V^2(t) dt}$;
- l'activité d'EA, caractérisée par le nombre de salves cumulés durant le temps d'enregistrement.
- etc.

Selon le système d'acquisition utilisé, d'autres paramètres acoustiques peuvent également être calculés. Les plus courants sont, par exemple, la fréquence de pic, la fréquence centroïde, etc.

Les différents paramètres de l'EA continue que l'on étudie sont généralement l'énergie et la RMS (on ne parle plus d'amplitude ni de durée pour ce type d'EA). Ils sont calculés de la même façon que ceux de l'EA discrète. Toutefois, la fenêtre temporelle utilisée pour calculer les paramètres de l'EA discrète est la durée de la salve, tandis que pour l'EA continue, cette fenêtre

temporelle est préalablement fixée par l'utilisateur (selon une fréquence d'échantillonnage) et est glissante sur le temps de l'essai.

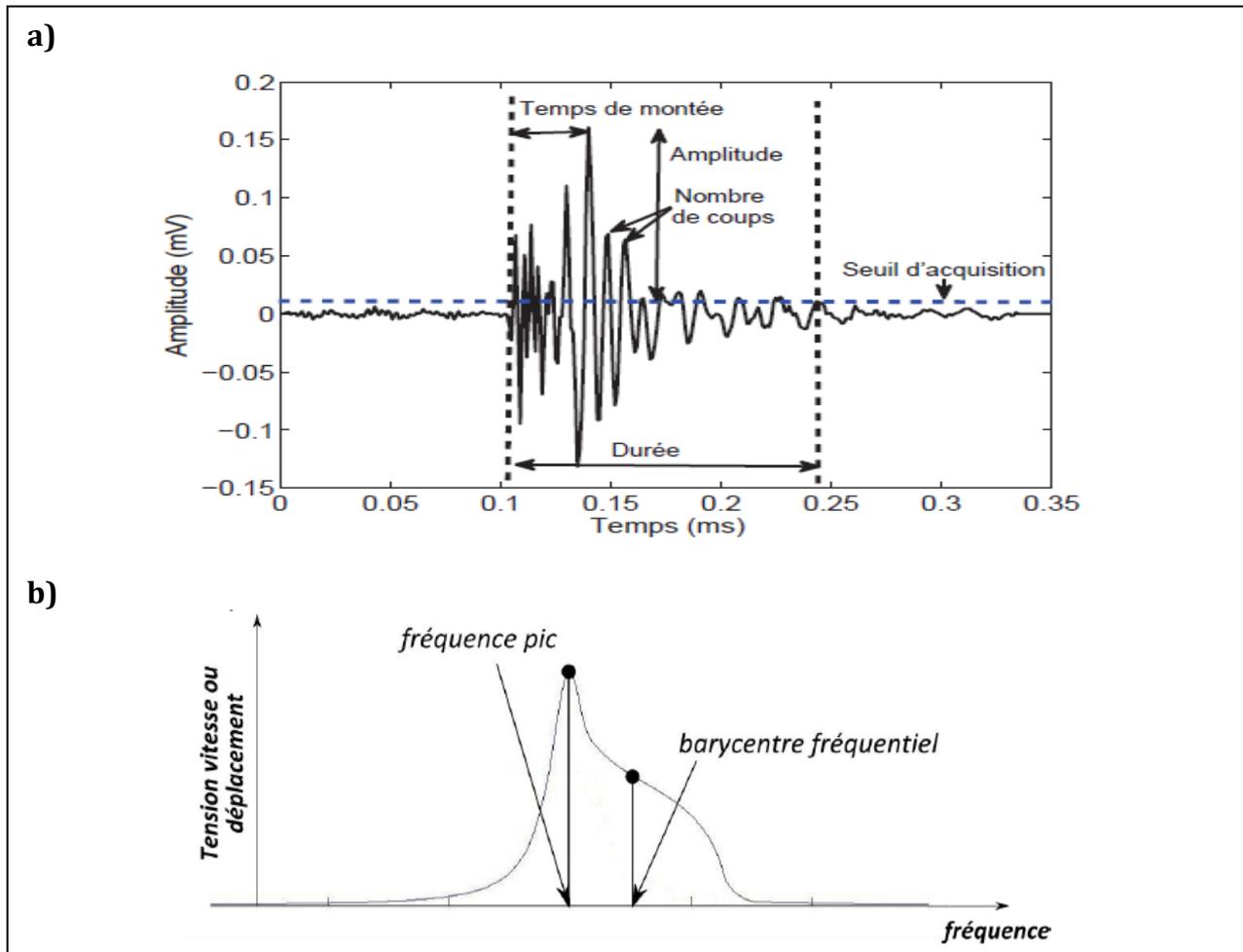


Figure 1.4 : (a) Salve typique d'EA et principaux paramètres temporels. (b) Descripteurs fréquentiels.

Le signal mesuré est relié au mécanisme source en se basant sur la valeur des descripteurs calculés sur le signal.

II.4 MECANISMES SOURCES D'EMISSION ACOUSTIQUE

Selon le matériau et la nature de la sollicitation qui lui est appliquée, plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu ce qui peut engendrer de l'activité acoustique. Les ondes élastiques peuvent être créées par différents mécanismes appelés sources d'EA. Ces dernières sont liées à des phénomènes irréversibles. De nombreux phénomènes physiques et mécanismes d'endommagement des matériaux sont susceptibles d'être à l'origine de l'EA. Toutefois, nous pouvons distinguer trois grandes catégories [46] [48] : les sources d'origines mécaniques, c'est-

à-dire les systèmes évoluant sous une sollicitation mécanique, les sources dues à des processus physico-chimiques et les sources artificielles.

II.4.1 Sources d'origines mécaniques

Lorsqu'un matériau est sollicité mécaniquement, les mécanismes d'endommagement induits par cette sollicitation génèrent de l'EA. Ces mécanismes diffèrent d'un matériau à l'autre et sont généralement répartis en trois catégories. Les mécanismes à l'origine d'une EA dans les métaux sont :

- les mouvements coopératifs de dislocation [49]. Le mouvement d'une seule dislocation ne génère pas une onde détectable en revanche le mouvement coordonné de plusieurs dislocations est détectable
- la création et la propagation de fissures
- la rupture ou décohésion d'inclusions
- les transformations de phase, la transformation martensitique
- les phénomènes de clivage et glissement

Dans les bétons, les principaux mécanismes d'endommagement sont la microfissuration et la croissance de fissures déjà existantes. Les fissures peuvent être localisées dans les grains (gravier par exemple), dans la matrice (ciment) ou encore à l'interface grains/matrice, une région plus poreuse [50].

Enfin, dans les matériaux composites (à matrice organique ou à matrice céramique) on trouve d'autres mécanismes d'endommagement [51], tels que (figure 1.5) :

- La fissuration matricielle
- La rupture ou l'arrachement de fibres
- La décohésion, le délaminage

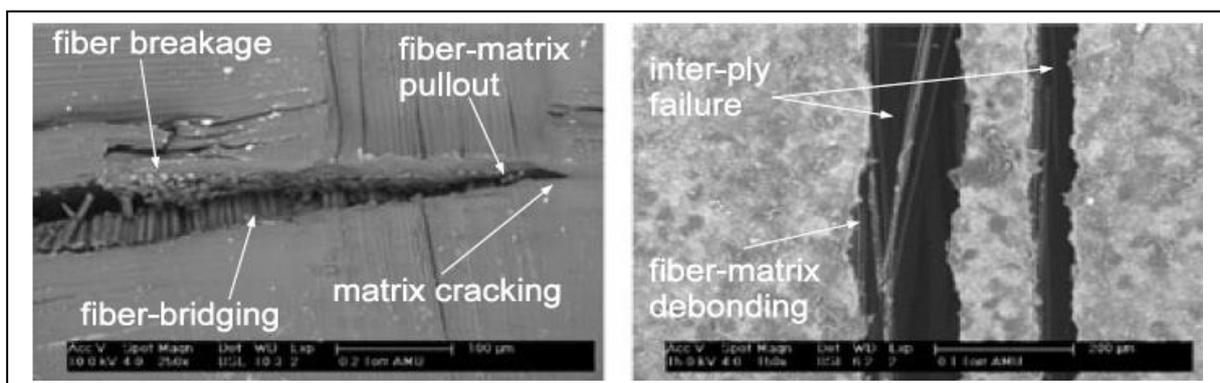


Figure 1.5 : Mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites. [51]

II.4.2 Sources artificielles

Cette source est très utilisée de par sa simplicité de mise en œuvre et sa reproductibilité pour la calibration des capteurs ou la vérification du montage lors d'expérimentations ou pour des expériences en laboratoire. Parmi les sources artificielles on trouve :

- la rupture d'une mine de crayon
- la rupture d'un capillaire en verre
- le jet de gaz
- le lâcher de bille
- le signal généré par un émetteur

La rupture d'une mine de crayon, aussi appelé *Pencil Lead Break* (PLB), est la plus utilisée [52]. La génération de cette source consiste à casser, à la surface d'un échantillon, une mine 2H dont le diamètre et la longueur sont normalisés (figure 1.6). Cela a pour effet de générer un signal très énergétique pouvant être apparenté à un signal d'EA. Le but de cet essai est double. Premièrement, l'essai de rupture de mine est utilisé pour vérifier le bon fonctionnement des capteurs d'EA ainsi que leur couplage avec le matériau. Deuxièmement, ce test permet de vérifier la bonne localisation des sources lorsque plusieurs capteurs sont présents.

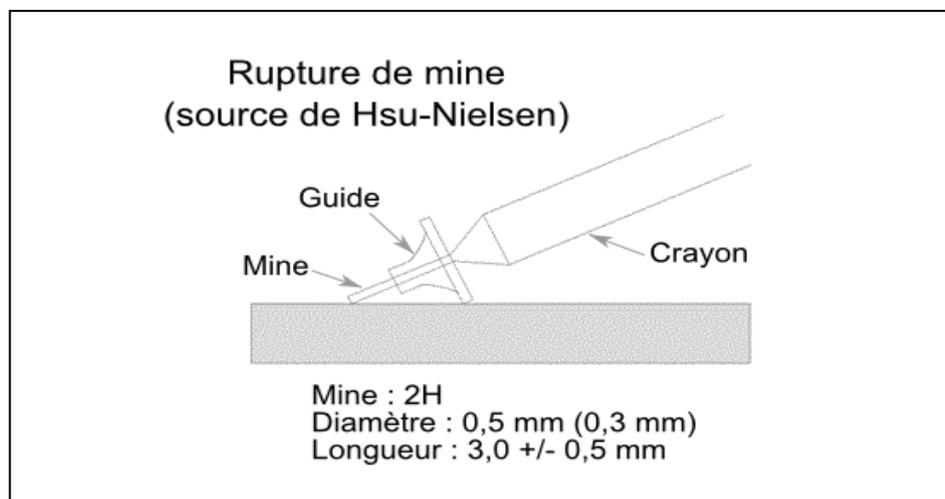


Figure 1.6 : Schéma explicatif de la rupture d'une mine de crayon à la surface d'un échantillon.
(<http://www.ndt.net/>)

Dans les matériaux, les mécanismes d'endommagement présentés précédemment constituent les principales sources d'EA. L'évolution et l'apparition de chacun de ces modes d'endommagement dépendent de plusieurs paramètres : la vitesse de chargement, la direction

de chargement, le mode de sollicitation, le processus de fabrication, etc. Ces sources sont liées à des phénomènes irréversibles, elles sont définies par l'effet Kaiser que nous allons détailler ci-après.

II.5 EFFET KAISER ET RAPPORT FELICITY

L'effet Kaiser [34] traduit l'irréversibilité du phénomène de génération d'EA. Cette irréversibilité se traduit par : pour une structure déjà sollicitée, aucune activité acoustique ne sera détectée tant que le niveau de contrainte ne dépasse pas le niveau maximal de contrainte atteint précédemment. Ainsi, lorsqu'un matériau subit une charge notée P_1 puis est déchargé, l'émission acoustique ne reprend que si la nouvelle charge notée P_2 est plus grande que P_1 ($P_2 > P_1$). Le rapport Felicity (R_f) est défini par :

$$R_f = P_2/P_1$$

Tant que $R_f < 1$, l'émission acoustique ne reprend pas [40] [53].

II.6 PROPAGATION DES ONDES DANS UN SOLIDE

Le milieu de propagation, c'est-à-dire la pièce ou la structure instrumentée par EA, influe sur le signal enregistré de différentes façons suivant sa complexité. Le solide homogène isotrope élastique infini est le solide le plus simple. Ses propriétés sont les mêmes en tout point de sa géométrie (il ne présente pas d'hétérogénéités, ex : inclusions) et elles sont les mêmes dans toutes les directions (ex : la vitesse de propagation des ondes est la même quel que soit la direction). Nous discuterons ensuite le cas du milieu homogène isotrope semi-infini et enfin nous présenterons le cas des plaques.

II.6.1 Propagation dans un milieu infini

Lorsque les dimensions du solide sont très supérieures à la longueur d'onde λ des ondes propagées, on peut considérer que le milieu est infini et donc négliger l'effet des réflexions. Dans un solide isotrope, l'excitation du milieu par une source entraîne la propagation de deux types d'ondes mécaniques transitoires qui se propagent en sphères (volume) concentriques centrées sur la source (figure 1.7) [41]. Tout d'abord, une onde longitudinale polarisée dans la direction de propagation, se déplace à la vitesse :

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.1)$$

Ensuite, une onde transversale polarisée perpendiculairement à la direction de propagation, se déplaçant à la vitesse :

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (1.2)$$

avec :

- λ : le coefficient de Lamé
- μ : le module de cisaillement
- E : le module d'Young du matériau
- ν : le coefficient de poisson
- ρ : la masse volumique

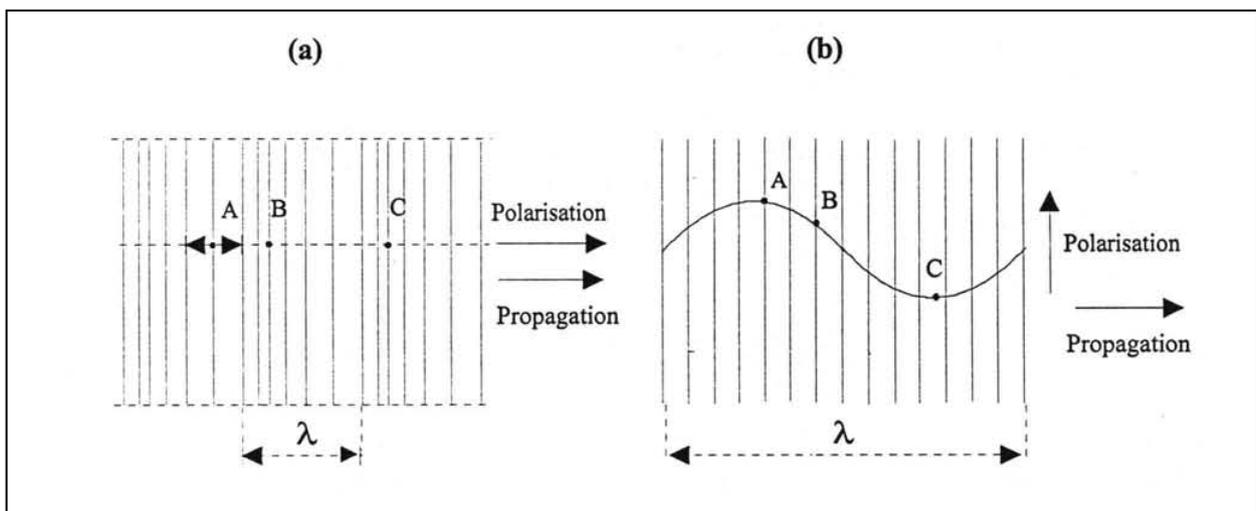


Figure 1.7 : (a) onde longitudinale : le déplacement des particules se fait dans la direction de propagation, les plans se déplacent l'un par rapport à l'autre en modifiant leur distance. (b) onde transversale : le déplacement des particules se fait perpendiculairement à la direction de propagation, les plans glissent l'un par rapport à l'autres en conservant leur distance.

II.6.2 Propagation dans un milieu semi-infini

Un espace semi-infini est un milieu de propagation plus représentatif d'un cas réel que le milieu infini (il peut représenter l'EA dans des gros blocs par exemple) puisque l'on calcule non seulement les ondes qui se propagent à l'intérieur du milieu mais aussi les effets qui se produisent lorsque les ondes de volume atteignent la surface libre. Dans ce cas, plusieurs phénomènes se produisent :

- Les ondes longitudinale et transversale se réfléchissent à la surface. Chaque réflexion donne lieu à la création d'une nouvelle onde longitudinale et d'une nouvelle onde transversale, ce qui fait donc au total quatre ondes réfléchies (figure 1.8).
- Si la source d'EA est située à proximité de la surface, une onde de surface appelée onde de Rayleigh peut également être créée [41] [45] [54]. Le déplacement des particules est elliptique et est situé sur un plan perpendiculaire à la surface de propagation (plan sagittal). Il résulte de la composition d'une onde longitudinale de polarisation parallèle à la surface et d'une onde transversale perpendiculaire à celle-ci (figure 1.9).

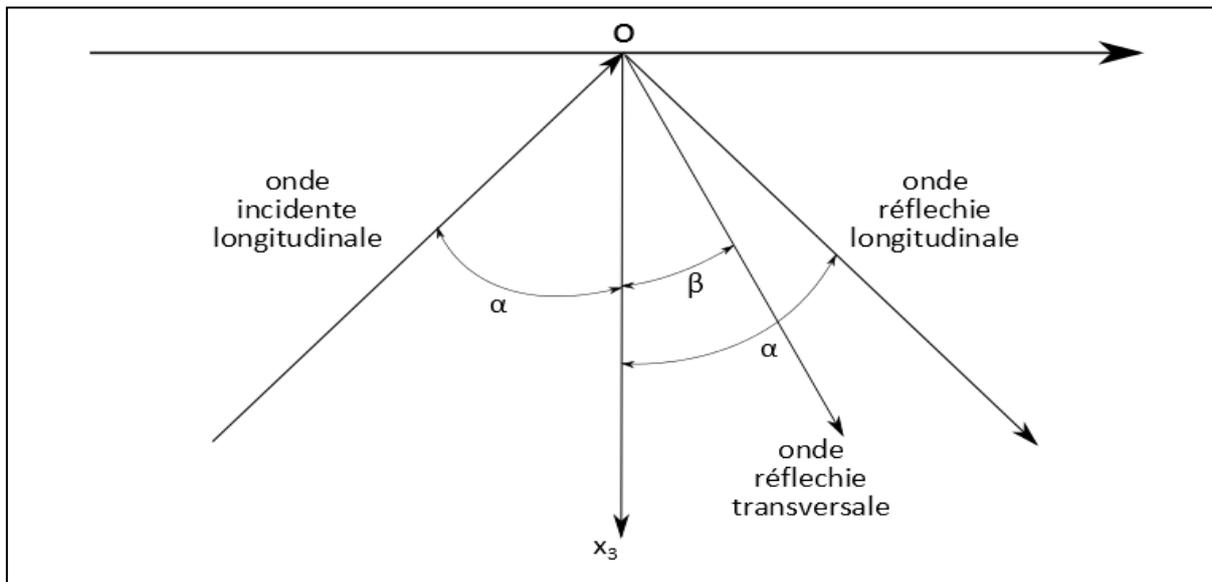


Figure 1.8 : Réflexion d'une onde longitudinale à la frontière d'un espace semi-infini. [55]

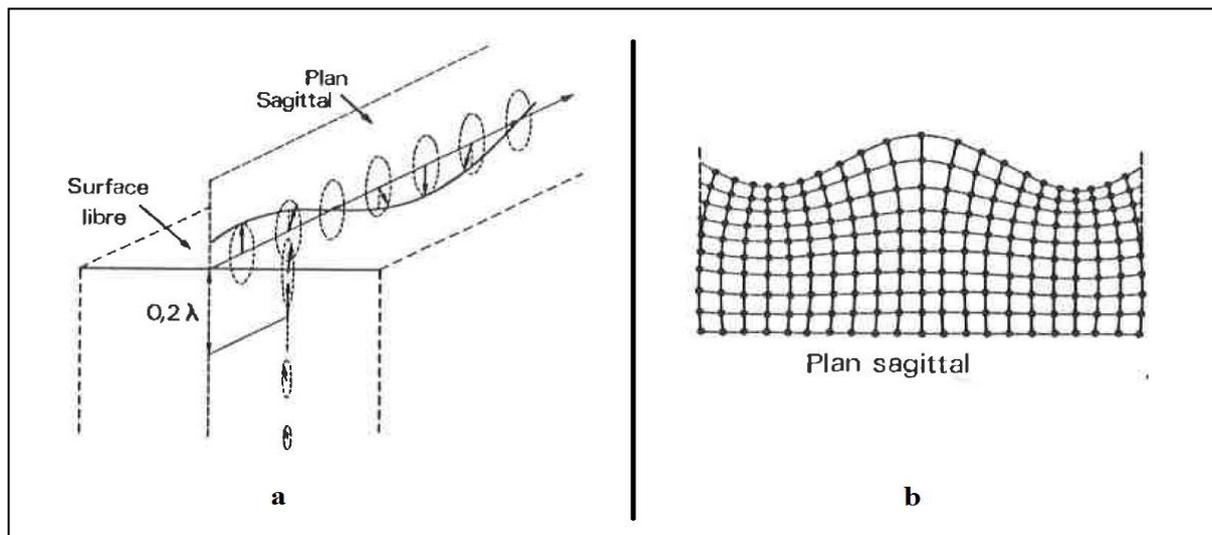


Figure 1.9 : (a) Evolution des ondes de Rayleigh avec la profondeur. (b) Déplacements dus aux ondes de Rayleigh. [56]

L'onde de Rayleigh se propage à une vitesse moins importante que les ondes de volume, sa vitesse est donnée par la formule [54] :

$$V_R = \frac{V_T(0.87+1.12\nu)}{(1+\nu)} \quad (1.3)$$

Avec :

- V_T : la vitesse de l'onde transversale
- ν : le coefficient de poisson

Elle est la somme d'une composante longitudinale et d'une composante transversale déphasée de $\frac{\pi}{2}$. Ces composantes décroissent jusqu'à une profondeur, égale à 2λ , à laquelle leur amplitude devient négligeable. Son atténuation géométrique en fonction de la distance de propagation (en 3 dimensions) est proportionnelle à $\frac{1}{\sqrt{r}}$.

II.6.3 Propagation dans une plaque

La propagation des ondes dans une plaque (ou guide d'onde 1D) est différente de celle dans les matériaux massifs. En effet, lorsque la plaque est suffisamment mince (épaisseur de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde), des ondes résultant du couplage d'ondes montantes et descendantes provenant des réflexions sur les faces supérieure et inférieure de la plaque se propagent. Ces ondes dites ondes de Lamb ont la particularité de mettre en mouvement la totalité de l'épaisseur de la plaque [57-60]. Elles sont guidées par les faces de la plaque et cela leur procure deux propriétés : elles sont dispersives, c'est-à-dire que leur vitesse (vitesse de phase et de groupe) dépend de la fréquence et elles se propagent sous la forme de modes symétriques (figure 1.10 (a)) et antisymétriques (figure 1.10 (b)), selon que la section de la plaque se déforme de manière symétrique ou pas. Cette appellation se base donc sur la symétrie ou non des déplacements normaux observés à la surface. Les modes antisymétriques et symétriques sont aussi appelés respectivement modes de flexion et modes de compression.

Les modes symétriques sont des modes qui sollicitent la plaque de façon symétrique par rapport au plan médian (le plan qui coupe la plaque en deux dans son épaisseur). Les modes antisymétriques sont des modes qui sollicitent la plaque de façon antisymétrique par rapport au plan médian. Ainsi, lors de la propagation d'un signal source dans une plaque, le signal se décompose et laisse apparaître des modes se déplaçant à des vitesses différentes (figure 1.12 & figure 1.13).

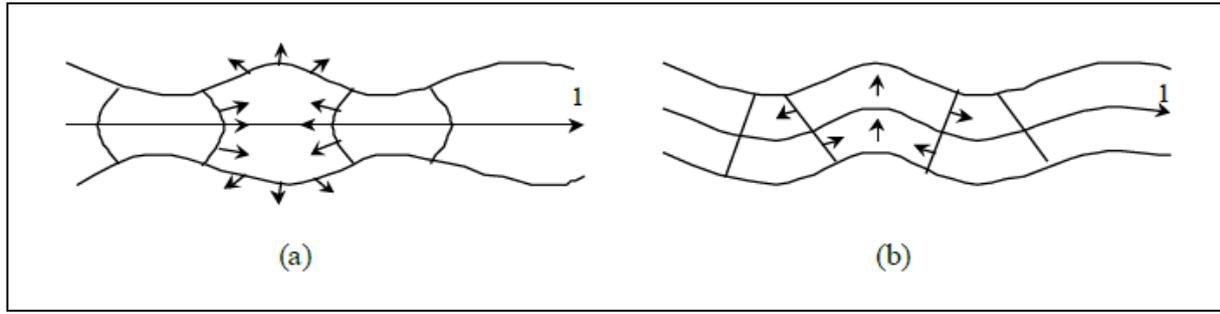


Figure 1.10 : Ondes de Lamb dans un matériau isotrope. (a) Mode symétrique. (b) Mode antisymétrique. [54]

La résolution des équations de dispersion permet d'obtenir les nombres d'ondes noté k , fonction du produit fréquence-épaisseur, des différents modes de Lamb pouvant exister dans la plaque (figure 1.11). Elle permet de caractériser parfaitement une onde de Lamb donnée. Ces équations sont assez répandues dans la littérature [61-64] et sont rappelées ici dans les équations (1.4) et (1.5) :

Pour les modes symétriques :

$$\frac{\tan\left(\frac{q.e}{2}\right)}{\tan\left(\frac{p.e}{2}\right)} + \frac{4k^2 p.q}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (1.4)$$

Pour les modes antisymétriques :

$$\frac{\tan\left(\frac{p.e}{2}\right)}{\tan\left(\frac{q.e}{2}\right)} + \frac{4k^2 p.q}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (1.5)$$

avec e l'épaisseur de la plaque, $p^2 = k_L^2 - k^2$ et $q^2 = k_T^2 - k^2$, $k_L = \frac{2\pi f}{V_L}$ et $k_T = \frac{2\pi f}{V_T}$ les nombres d'onde respectifs des ondes longitudinales et transverses dans la plaque, f la fréquence considérée, V_L et V_T les vitesses respectives des ondes longitudinales et transverses dans le matériau qui compose la plaque.

Ces équations sont invariantes pour le produit fréquence-épaisseur. Les résultats seront donc affichés en fonction du produit $f.e$ en MHz.mm, ce qui permet d'utiliser les mêmes courbes même si l'épaisseur de la plaque change. Les racines des équations (1.4) et (1.5) sont directement reliées aux vitesses de phases et aux vitesses de groupe des modes de Lamb.

Les modes de Lamb propagatifs correspondent aux solutions réelles des équations de dispersion (I.4) et (I.5). Les lenteurs de phase connues, il est possible de reconstruire les courbes de dispersion correspondant à l'évolution d'une caractéristique de l'onde (nombre d'onde, vitesse de phase, vitesse de groupe, ... etc.) en fonction du produit fréquence-épaisseur. Sauf indication contraire, les courbes de dispersion présentées dans le document correspondront à des ondes de Lamb existant dans une plaque d'aluminium.

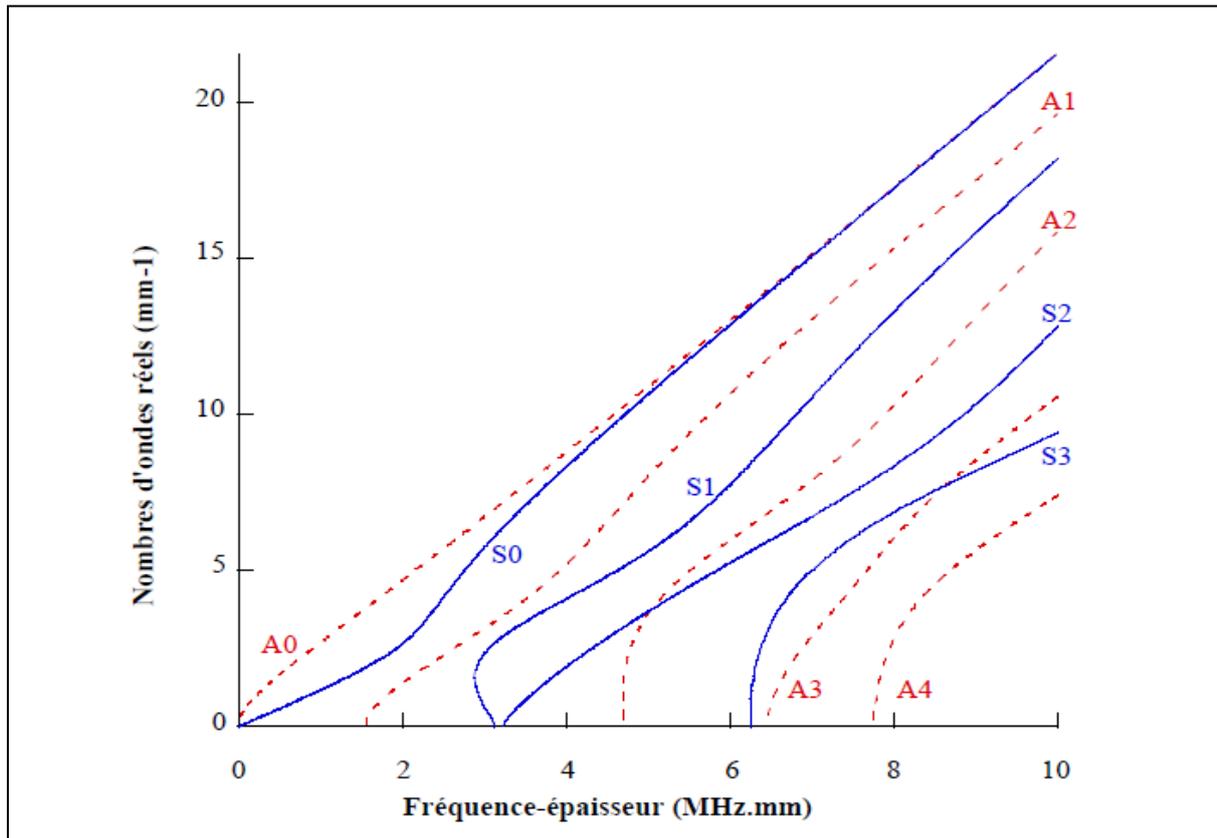


Figure 1.11 : Nombres d'ondes réels des modes de Lamb propagatifs dans une plaque d'aluminium, modes symétriques (rouge) et antisymétriques (bleu).

La courbe ci-dessus (figure 1.11) donne l'évolution en fonction du produit fréquence-épaisseur des nombres d'ondes des modes propagatifs dans une plaque d'aluminium : $k = F(fh)$. Une courbe représente l'évolution, en fonction du produit fréquence-épaisseur, du nombre d'onde d'un mode de Lamb particulier. Il est important de noter que certains modes n'apparaissent qu'à partir d'un certain produit $f.h$, appelée produit fréquence-épaisseur de coupure. En dessous de ce produit, ces ondes n'existent plus en tant que mode propagatif.

Connaître la vitesse de propagation des ondes ultrasonores est un pré-requis indispensable pour faire du CND. En mesurant le temps d'arrivée des différents signaux, on peut localiser les potentiels défauts (sources d'EA). Une fois les nombres d'onde k calculés, la vitesse de phase V_p est accessible par l'équation (1.6) :

$$V_p = \frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{k} \quad (1.6)$$

Elle correspond à la vitesse de propagation des fronts d'ondes de fréquence donnée, à l'intérieur d'un paquet d'ondes.

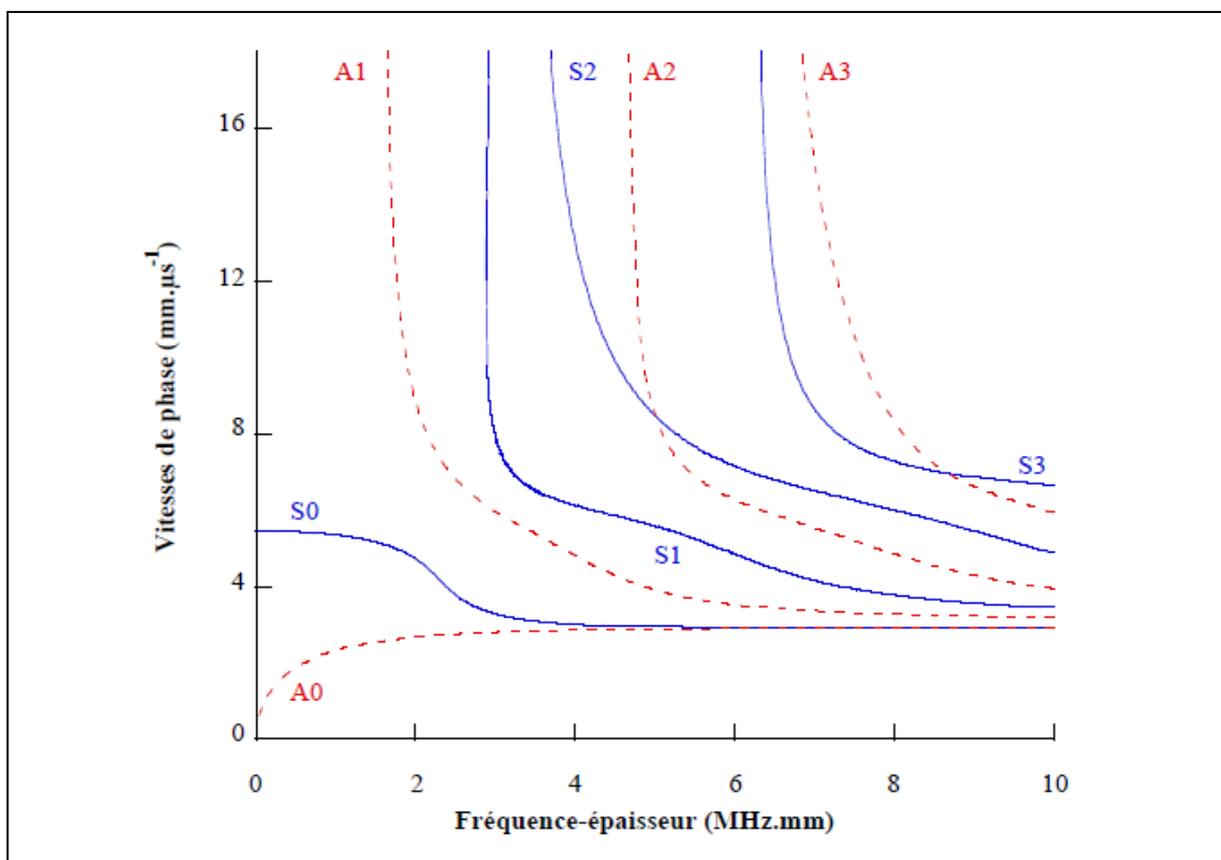


Figure 1.12 : Courbes de dispersion des vitesses de phase (modes symétriques (rouge) et antisymétriques (bleu)) dans une plaque d'aluminium.

Les courbes résultantes pour chacun des modes calculés sont présentées à la figure 1.12. On s'aperçoit que la vitesse de phase est extrêmement dépendante de la fréquence. Elle prend même des valeurs très élevées lorsqu'on tend vers la fréquence de coupure (à l'exception des modes A_0 et S_0). Mais ces grandes valeurs de vitesse n'ont qu'une réalité physique limitée : la vitesse d'un paquet d'onde sera donnée par la vitesse de groupe.

La vitesse de groupe est la vitesse à laquelle se propage, le long de la plaque, un paquet d'ondes de pulsation centrale ω . Elle correspond aussi à la vitesse de propagation de l'énergie transportée par l'onde le long de la plaque. La vitesse de groupe V_g dépend de la vitesse de phase et de sa dérivée par rapport à la fréquence. Elle est calculée par l'équation (1.7) donnée par [63] :

$$V_g(\omega) = V_p(\omega)^2 \left[V_p(\omega) - \omega \frac{dV_p(\omega)}{d\omega} \right]^{-1} \quad (1.7)$$

avec V_p et V_g respectivement les vitesses de phase et de groupe, et $\omega = 2\pi f$ la pulsation.

Le résultat pour une plaque d'aluminium est présenté à la [figure 1.12](#) et à la [figure 1.13](#).

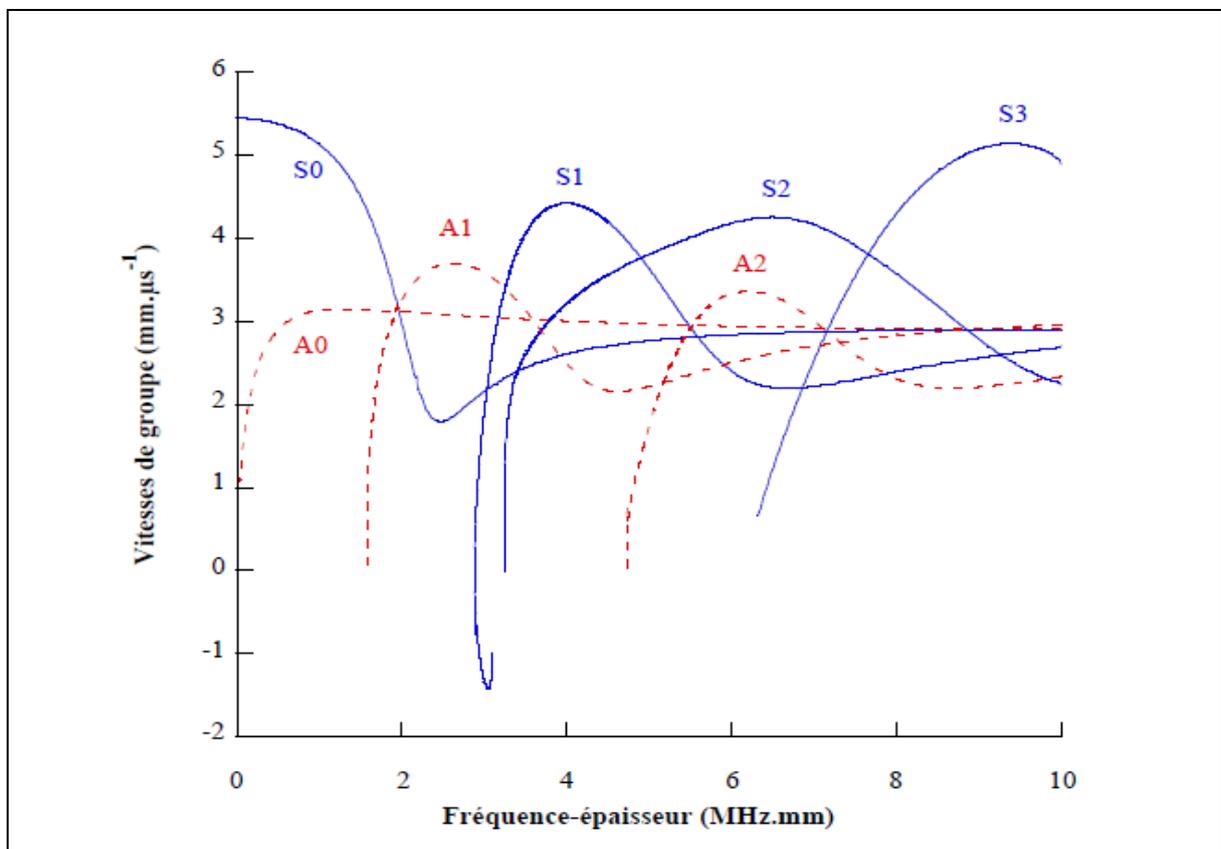


Figure 1.13 : Courbes de dispersion des vitesses de groupe (modes symétriques (bleu) et antisymétriques (rouge)) dans une plaque d'aluminium.

Enfin la vitesse de propagation de l'énergie est identifiée dans la littérature comme étant la vitesse de groupe [62] [65].

II.7 LES CAPTEURS EN EMISSION ACOUSTIQUE

Les capteurs utilisent différents principes physiques pour transformer les vibrations en tension [66] [67]. Il existe des capteurs piézoélectriques. Ces capteurs sont faciles à mettre en œuvre lors d'essais et ont une grande sensibilité. Cependant, ils sont en général résonnants avec une bande passante étroite en fréquence; ils sont donc moins fidèles. Le capteur R15 α est un capteur piézoélectrique couramment utilisé en EA pour les matériaux métalliques (figure 1.14). La bande passante de ce capteur est étroite [0 – 400] kHz. De plus, il montre de larges variations de sensibilité en fonction de la fréquence. D'autres capteurs sont capacitifs, ils ont une bande passante plus large et sont moins résonnants. Ils sont donc plus fidèles. Cependant, ils sont aussi moins sensibles. Enfin, il existe des capteurs optiques, tels que les interféromètres qui reproduisent très fidèlement les vibrations (la mesure se fait sans contact), cependant ils sont aussi moins sensibles et plus difficiles à mettre en œuvre lors d'essais.

Du fait de leur grande sensibilité et de leur facilité de mise en œuvre, les capteurs les plus utilisés en EA sont des capteurs piézoélectriques, mais comme il l'a été dit précédemment ces capteurs sont résonnants et leur réponse en fréquence n'est pas plate. Lors de la mesure, le signal est donc fortement altéré. En effet, la mesure effectuée par le capteur sous la forme d'une tension électrique est différente du signal récupéré directement en surface du matériau. Malheureusement, il est difficile d'obtenir un capteur à la fois sensible et fidèle. Le [Tableau 1.1](#) montre les ordres de grandeur de la sensibilité et la largeur de bande des différentes familles de capteurs. Un gain en fidélité du capteur se fait souvent au détriment de sa sensibilité, or les signaux d'EA étant peu énergétiques, leur détection nécessite des capteurs sensibles.

Type de Capteur	Sensibilité [m]	Largeur de la Bande [MHz]
Piézoélectrique résonnant	10^{-13}	0.1 à 0.3
Piézoélectrique large bande	10^{-12}	0.1 à 2
Capacitif	10^{-11}	DC à 50
Interféromètres laser	10^{-10}	0.05 à 100

Tableau 1.1 : Ordre de grandeur de la sensibilité des capteurs d'EA. [46].

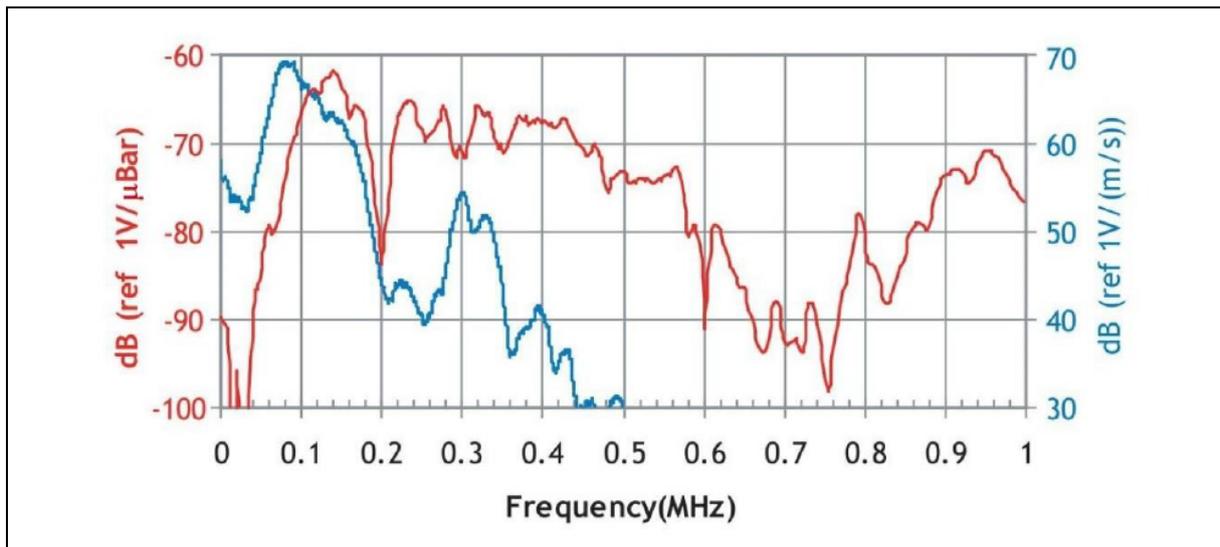


Figure 1.14 : Courbes de calibration constructeur d'un capteur R15 α (<http://www.physicalacoustics.com/>). La courbe bleue a été obtenue par la méthode standard pour la calibration primaire des capteurs d'EA (norme ASTM E1106-86). La courbe rouge a été obtenue par la méthode du bruit blanc (norme ASTM E976-84) [46].

Par ailleurs, lors de la mesure, le capteur n'est pas le seul élément ayant un effet sur le signal. Ce dernier est d'abord amplifié en sortie du capteur par un préamplificateur qui, en plus de son rôle d'amplification, filtre le signal. Ensuite, le système d'acquisition filtre lui aussi le signal.

II.8 PARAMETRAGE DU LOGICIEL D'ACQUISITION

L'ordinateur de stockage des signaux d'EA est muni du système MISTRAS développé par European Physical Acoustic (EPA) qui permet l'acquisition et le traitement de l'ensemble des données d'EA. Ce logiciel nécessite un réglage des paramètres d'acquisition des salves (signaux discrets d'EA). Le seuil d'acquisition, les PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time) sont les paramètres essentiels à régler et qui permettent de définir, lors de l'acquisition d'un signal, le pic de plus forte amplitude, la durée totale et le temps d'aveuglement du système (figure 1.15).

Ces paramètres sont présentés sur la figure 1.15 et sont les suivants [68] :

- le **seuil** de référence (dB) : c'est la tension électrique, réglable et prédéfinie (légèrement supérieure au bruit de fond), devant être dépassée pour qu'il y ait détection d'une salve. Le choix du seuil est primordial pour une acquisition. Il dépend essentiellement de l'environnement de la manipulation et a une influence de premier plan vis-à-vis de la quantité d'information retenue. En effet un seuil trop faible permet l'acquisition d'un

grand nombre de signaux mais déclenche aussi l'acquisition de signaux pour lesquels le rapport signal sur bruit est faible. En revanche un seuil trop important permet d'acquérir uniquement les salves de plus forte intensité qui sont en moins grand nombre;

- Le **PDT** est un intervalle de temps. Ce paramètre débute exactement lorsque le signal dépasse pour la première fois un certain seuil. La fin du PDT est définie par le temps correspondant à l'amplitude maximale. Ainsi, il permet de détecter le temps de montée de la salve d'EA. Il est utilisé pour séparer les salves les unes des autres ;
- Le **HDT** est le paramètre qui détecte la fin de la salve et permet donc d'en déduire sa durée. Le HDT se déclenche à chaque dépassement de seuil et déclare la fin de la salve s'il n'y a pas un autre dépassement avant la fin du HDT. Le HDT doit être à la fois assez long pour assurer la mesure d'une salve entière et assez court que possible afin d'éviter que deux salves ne soient considérées comme une seule ;
- Le **HLT** permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT. Lorsque la fin d'une salve est décrétée par le HDT, le capteur devient aveugle à toute activité acoustique pendant la durée du HLT. Ce paramètre permet d'éviter l'enregistrement d'échos.

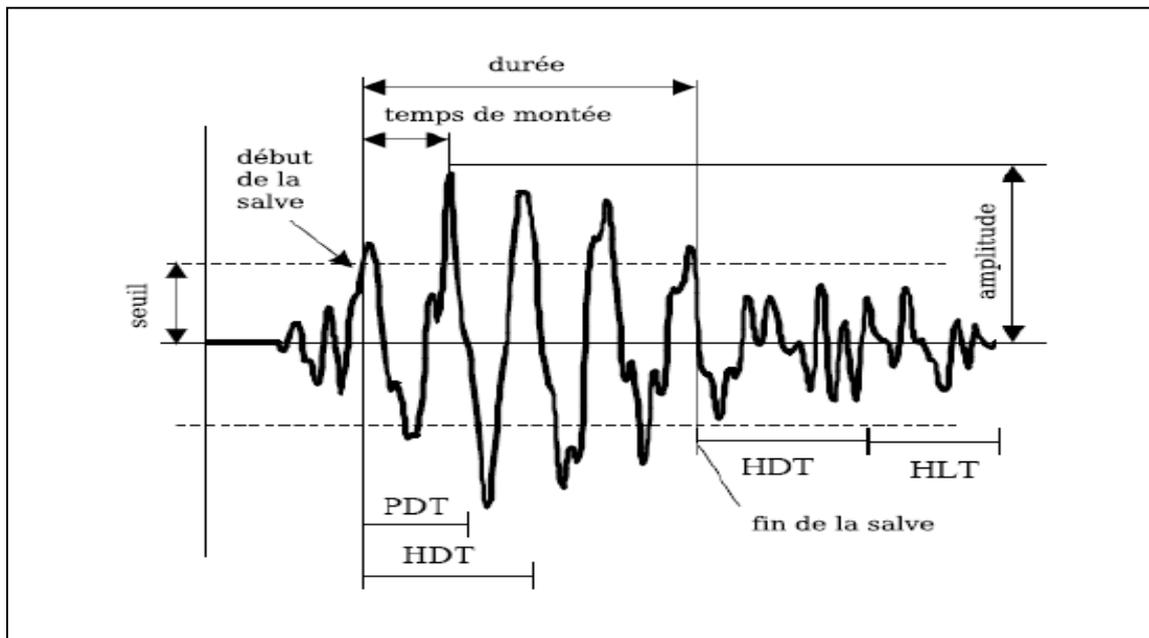


Figure 1.15 : Paramètres d'acquisition des salves d'EA : PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time) [69].

II.9 FORMATION DES EVENEMENTS ACOUSTIQUES

Lorsqu'une source d'EA est activée, elle émet une onde mécanique qui se propage dans le matériau jusqu'aux capteurs posés en surface. La réunion des signaux enregistrés à cette occasion forme un événement acoustique. L'expression " événement acoustique " désigne donc une source d'EA inconnue. Le critère de rassemblement des signaux pour former un événement est temporel et dépend de la vitesse de propagation des ondes ainsi que de la taille du réseau de capteurs utilisé.

La [figure 1.16](#) illustre la méthodologie employée pour former ces événements [68]. Sur cette figure chaque flèche bleue symbolise le temps pour un capteur. Les points orange symbolisent le début d'une salve enregistrée. Le regroupement de salves en événement consiste à faire glisser une fenêtre temporelle de largeur " T " et à compter le nombre de salves à l'intérieur de celle-ci. Si le nombre de salves est supérieur à 3 (dans le cas de la 2D) alors les salves sont regroupées et forment un événement. Lorsqu'un événement est formé, la fenêtre est directement déplacée après la dernière salve incluse dans le dernier événement et ce afin de ne pas comptabiliser plusieurs fois une salve dans plusieurs événements.

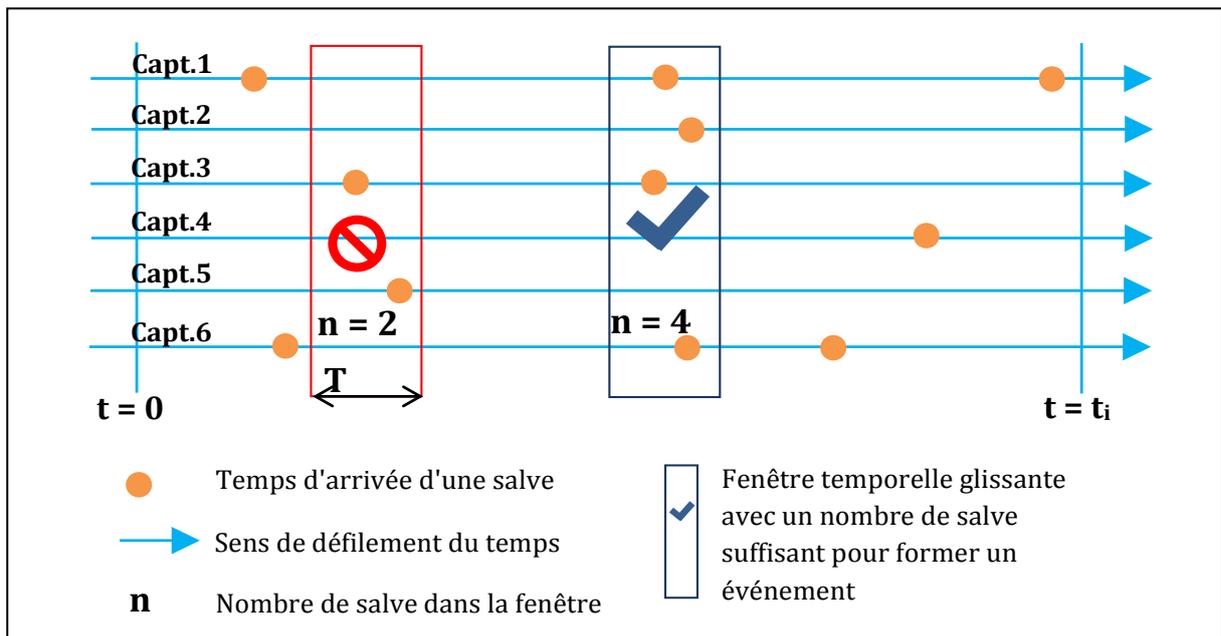


Figure 1.16 : Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs.

Le choix de la largeur de la fenêtre temporelle est crucial. Cette largeur est liée au temps nécessaire à une onde pour parcourir la distance maximale entre deux capteurs. La [figure 1.17](#) donne un aperçu de ce que représente la largeur de la fenêtre par rapport à la disposition des

capteurs. Sur cette figure, on se place dans le cas d'un événement acoustique survenu en dehors de la zone de couverture des capteurs. Les temps d'arrivée des ondes sur les capteurs sont t_1 , t_2 , t_3 et t_4 avec $t_3 > t_4 > t_2 > t_1$. Pour regrouper les salves issues de ces temps d'arrivée en un événement, la largeur " T " de la fenêtre doit être supérieure à $t_3 - t_1$ soit d_{3-1}/v c'est à dire la distance entre les capteurs 1 et 3 divisée par la vitesse de propagation des ondes.

On comprend ici que la largeur de la fenêtre temporelle est directement liée à la distance maximale entre deux capteurs. Si la fenêtre est trop petite, il est possible d'exclure une salve d'un événement. En revanche si la fenêtre est trop grande, des salves provenant de différents événements peuvent être regroupées au sein d'un même événement. Dans la pratique, la largeur de cette fenêtre est fixée à un temps correspondant au temps de propagation des ondes sur une distance d'environ 120 % de la distance maximale entre deux capteurs. Une conséquence de cette manière de procéder est que le retard maximum entre deux salves d'un même événement est au maximum de la taille de la fenêtre d'observation.

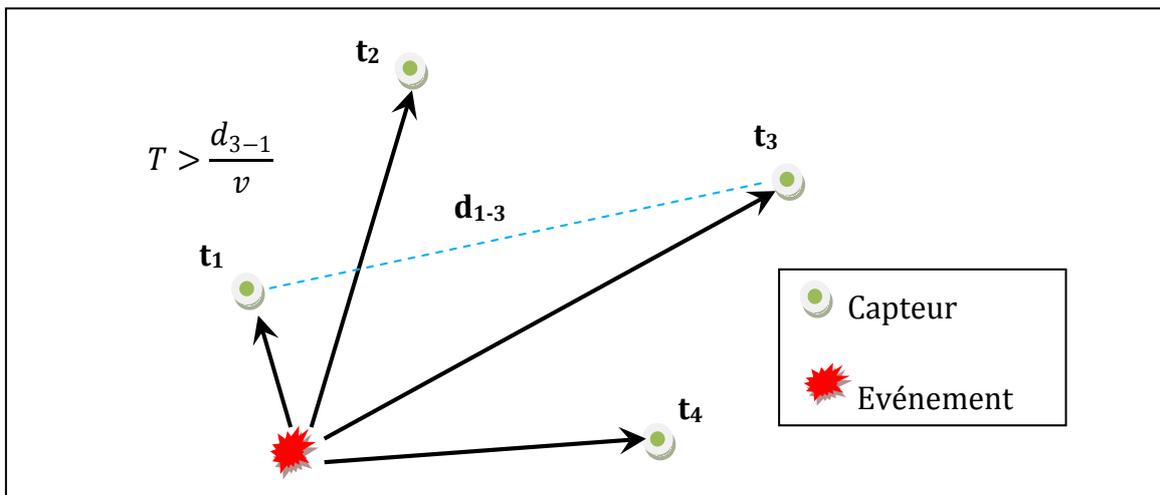


Figure 1.17 : Détermination de la fenêtre temporelle de formation des événements " T ".

II.10 DETECTION DES EVENEMENTS ET TRAITEMENT DES SIGNAUX ACOUSTIQUE

Une voie d'émission acoustique assure trois fonctions essentielles : la détection des ondes émises, le conditionnement et le traitement des signaux créés par leur réception par le capteur. Ainsi, la détection est assurée par un capteur transformant l'énergie mécanique en un signal électrique, généralement de très faible amplitude du fait de la très faible amplitude des ondes émises. Le conditionnement du signal est assuré par un préamplificateur placé à proximité

immédiate du capteur permettant d'acheminer le signal sur de longues distances. En pratique, il ne doit pas y avoir plus d'un mètre de câble entre le capteur et le préamplificateur. Un amplificateur vient ensuite porter le signal au niveau désiré pour le traitement. Ce traitement est généralement effectué par la carte d'acquisition multivoies et par ordinateur.

II.10.1 Traitement des signaux d'EA

Le traitement des signaux d'EA fait intervenir plusieurs paramètres. Le premier de ces paramètres est le seuil d'acquisition utilisé pour marquer le début d'une salve (figure 1.4 (a)). La durée entre le premier franchissement de seuil et l'instant où le signal atteint son amplitude maximale correspond au temps de montée.

La technique d'analyse la plus simple consiste à compter le nombre de dépassements de seuil d'une salve. Bien entendu, le nombre de coups dépend du seuil fixé. Toutefois, à partir d'essais répétés sur des échantillons identiques, des déductions empiriques peuvent être faites concernant l'endommagement de la structure ou encore le mécanisme à l'origine de cette émission. Malgré sa simplicité, cette technique d'analyse n'a que peu d'application industrielle. Nous pourrions toutefois citer les travaux de J. P. Favre et J. C. Laizet [70] ainsi que ceux de Y. A. Dzenis et J. Qian [11] qui montrent l'intérêt qu'elle peut avoir. Une autre technique consiste à compter, non-plus les dépassements de seuil, mais les salves. Bien que très utilisées dans les débuts de l'EA en tant que méthodes de contrôle, ces techniques d'analyse ne permettent pas une interprétation physique simple et quantitative. À la place, les opérateurs leurs préfèrent les techniques permettant d'obtenir les grandeurs comme la valeur moyenne du signal, sa valeur efficace (valeur RMS) ou encore l'énergie délivrée par le capteur depuis le début de l'essai. En effet, ces grandeurs permettent de mettre en évidence les modifications globales du comportement de la structure et permettent également de déterminer l'apparition de nouveaux phénomènes en cours d'essai.

Une fois les signaux de chaque capteur traités et caractérisés par les paramètres précédemment cités, il est possible de mener des analyses plus détaillées. Par exemple, un suivi chronologique des paramètres des salves permet d'observer finement l'évolution de l'émission acoustique au cours de l'essai. Un autre exemple concerne l'analyse statistique de la distribution d'amplitude crête qui permet de distinguer des mécanismes physiques générant des signaux d'EA d'énergies différentes. On peut également citer les analyses de corrélation permettant de discriminer des populations de signaux d'origines différentes comme par exemple des signaux provenant d'une émission acoustique et des signaux ne provenant que de parasites électriques.

Enfin, les dernières techniques d'analyses concernent l'analyse multi-variables, telles que les méthodes de classifications automatiques [45].

II.10.2 Localisation des sources d'EA

L'un des avantages principaux des contrôles par EA réside dans la possibilité de surveiller une structure complète, de déterminer l'instant d'apparition d'un défaut mais également de pouvoir le localiser. Traditionnellement, la localisation des dommages ou des impacts sources d'EA est basée sur la triangulation du temps de vol (TOF) des mesures d'onde prises à plusieurs points de réception. Elle a été appliquée en EA pour la première fois en 1976 [72]. Cette technique fonctionne très bien lorsque la vitesse de l'onde (V_g) dans le matériau testé et le temps d'arrivée (t_i) du signal aux capteurs sont connues. L'endommagement ou l'emplacement de l'impact est identifié en dessinant des cercles de rayons (R_i), dont les centres coïncident avec les emplacements du capteur. Le rayon (R_i) est obtenu en multipliant le temps d'arrivée du signal (t_i) par la vitesse de l'onde (V_g). Le point auquel les cercles se croisent est considéré comme l'emplacement possible des dommages. La [figure 1.18](#) (a) montre une illustration de cette méthode de localisation d'endommagement.

Cependant, il existe une condition préalable à ces approches traditionnelles de localisation des endommagements basées sur le TOA. Autrement dit, toutes les valeurs de TOA mesurées et les vitesses d'onde théoriques correspondantes sont exactes. En réalité, les erreurs et les incertitudes sont toujours inévitables dans le processus de mesure et d'identification de l'emplacement des sources d'EA. Par exemple, la taille et l'étendue des dommages sont inconnues avant l'identification, et son effet sur la diffusion des ondes est incertain, ce qui affecte à son tour la précision de la mesure des TOA. Les valeurs de TOA mesurées peuvent être différentes selon la méthode de mesure. En outre, des incertitudes peuvent découler des vitesses théoriques des ondes, car elles dépendent des valeurs des propriétés matérielles d'une structure spécifique, qui peuvent présenter des variations par rapport à ces valeurs nominales et être influencées par plusieurs facteurs, tels que les changements de température ambiante [73]. Par conséquent, le TOA et la vitesse de l'onde sont deux paramètres incertains. En général, les incertitudes peuvent être causées par des erreurs aléatoires et systématiques. Les erreurs aléatoires sont causées par des changements inconnus et imprévisibles dans les mesures TOF, y compris le bruit de l'instrumentation, les changements de température, etc. [74–79]. Les erreurs systématiques sont principalement causées par la technique de traitement du signal numérique utilisée pour analyser les formes d'onde temporelles [80]. En conséquence, plutôt que les

dommages étant localisés en un seul point, ils peuvent être localisés n'importe où dans la région sombre chevauchée comme le montre la [figure 1.18 \(b\)](#) [81] [82].

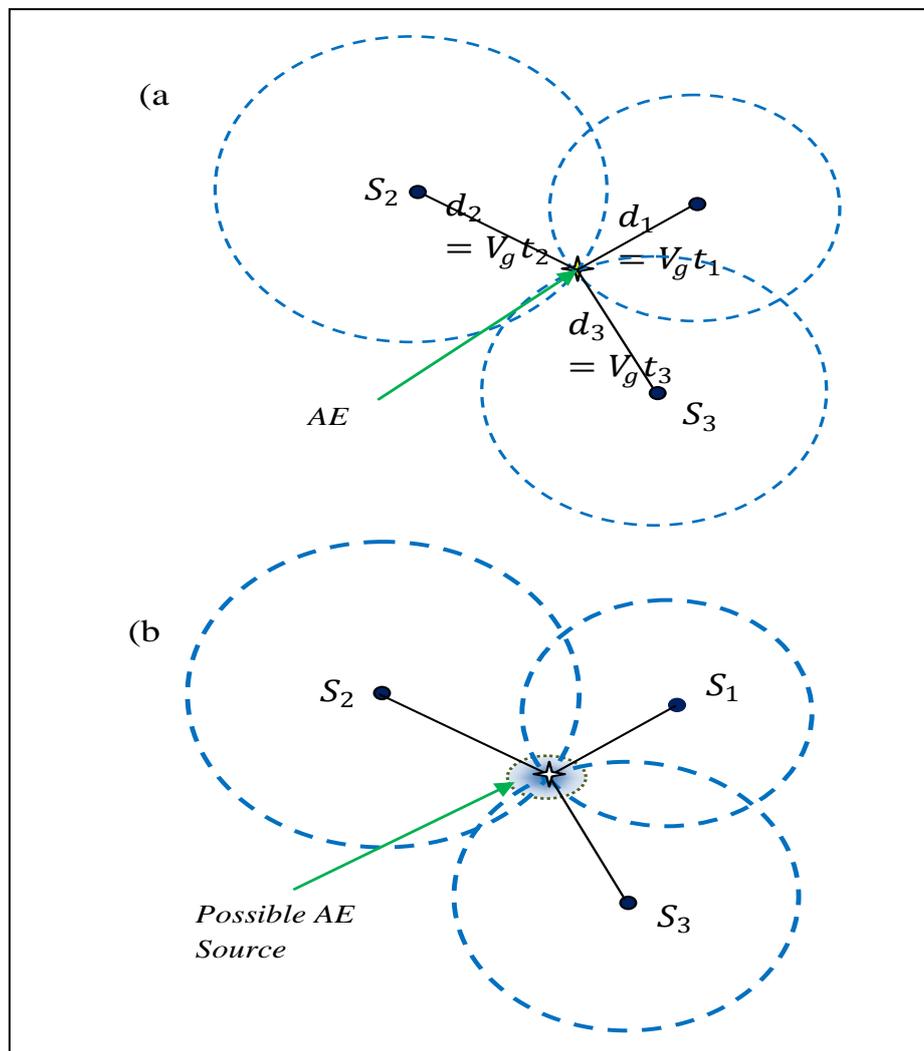


Figure 1.18 : Principe de la localisation des dommages par la triangulation basée sur TOA. (a) Sans incertitude et (b) avec incertitude.

Lemistre et al [83] et Su et al [84] ont identifié l'emplacement des dommages en résolvant un ensemble d'équations non linéaires décrivant les relations entre l'emplacement des dommages, les vitesses des ondes et la TOA. La [figure 1.19](#) est une illustration d'un modèle simple pour calculer le TOA. Ce modèle est largement utilisé dans la localisation des dommages basée sur le TOA. Soit un système de coordonnées cartésien arbitraire, la source d'EA est à des coordonnées inconnues (x_s, y_s) dans le plan de la surface du matériau et les capteurs sont situés en (x_i, y_i) , des coordonnées connues. Il est bien connu que dans une localisation planaire, trois

capteurs au minimum suffisent. Les équations résultantes pour le problème de localisation de la source et l'identification de la vitesse de l'onde sont données comme suit :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (1.8)$$

$$t_i = \frac{d_i}{V_{gi}} \quad (1.9)$$

Dans la pratique ce ne sont pas les temps d'arrivées mais les retards des ondes sur les capteurs qui sont utilisés. Si t_m est le temps de trajet ou le TOF pour atteindre le premier capteur (capteur maître), et Δt_{mi} est la différence de temps entre le capteur maître et le $i^{\text{ème}}$ capteur, les équations suivantes peuvent être obtenues :

$$(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 = (t_m \cdot V_g)^2 \quad (1.10)$$

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 = [(t_m + \Delta t_{mi})V_g]^2 \quad (1.11)$$

Dans les équations (1.10) et (1.11), les tailles du capteur et la zone endommagée ne sont pas prises en compte. Étant donné que les incertitudes liées aux propriétés des matériaux peuvent influencer la précision de la valeur théorique de la vitesse de l'onde, dans la présente étude, la vitesse de l'onde V_g est définie comme un paramètre inconnu supplémentaire à identifier en plus de la coordonnée de l'emplacement du centre de dommage (x_s, y_s) , plutôt que calculé à l'aide des valeurs nominales des propriétés du matériau au préalable. Ainsi, le vecteur de paramètre inconnu dans cette approche de localisation des dommages est $X = (x_s, y_s, t_i, V_g)$.

En combinant les équations (1.10) et (1.11), l'équation suivante peut être dérivée :

$$\Delta t_{mi} = \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} - \sqrt{(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2}}{V_g} \quad (1.12)$$

En général, les différences entre le TOA du capteur maître et les différents capteurs (Δt_{mi}) sont utilisées pour résoudre cet ensemble d'équations non linéaires avec comme inconnues $X = (x_s, y_s, t_i, V_g)$. Cependant, comme mentionné précédemment, plusieurs sources d'erreur dans les mesures de TOF (c'est-à-dire la dispersion, le bruit, la température, etc.) peuvent affecter la précision de cette solution. Dans ce travail de thèse, pour prendre en compte les incertitudes, le temps d'arrivée t_i et les inconnues x_s, y_s, V_g sont traités comme des variables

aléatoires gaussiennes mutuellement indépendantes. Sur la base de cette hypothèse, la fonction de densité de probabilité de la différence de temps Δt_{mi} peut également être définie comme une variable aléatoire gaussienne [85] avec une moyenne et une variance définies comme :

$$\Delta t_{mi} = t_i - t_m, \quad \sigma_{\Delta t_{mi}}^2 = \sigma_{t_i}^2 + \sigma_{t_m}^2 \quad (1.13)$$

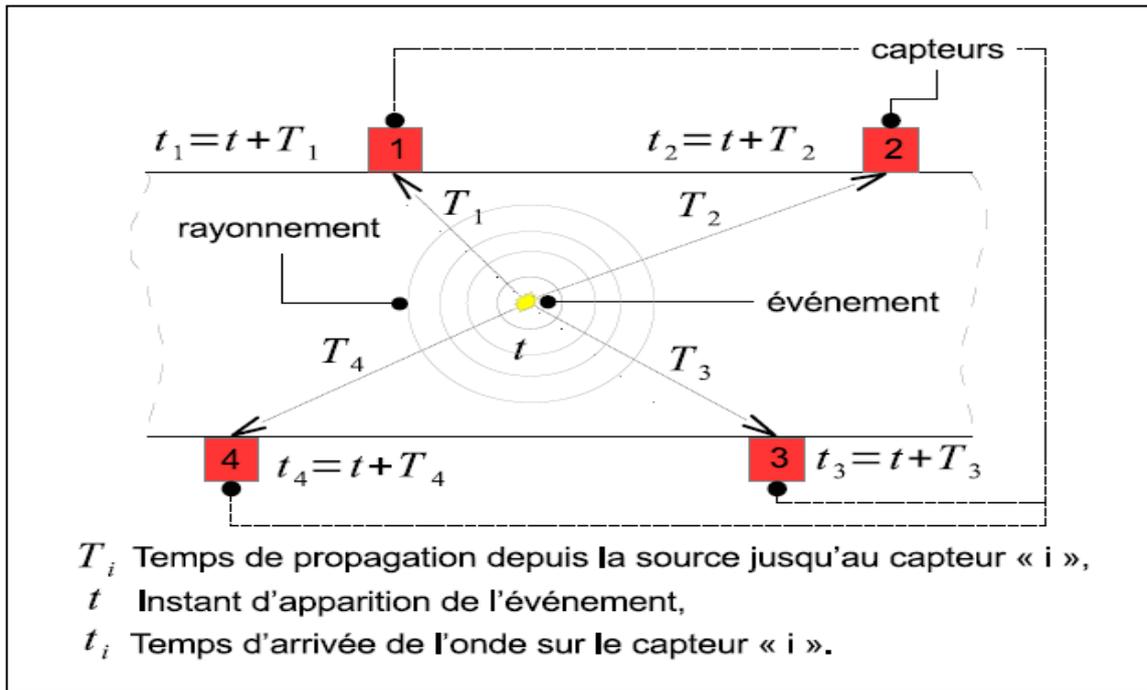


Figure 1.19 : Schéma d'une maille et différences de temps d'arrivée.

Diverses méthodes ont été développées dans la littérature pour augmenter la précision de la mesure TOA des ondes d'EA, notamment la transformée de Fourier à court terme (STFT), la distribution de Wigner – Ville (WVD), la transformée en ondelettes continue (CWT), la transformée de Hilbert – Huang (HHT) et l'algorithme de poursuite d'appariement (MP) [10] [11] [14] [17] [86–88]. Dans notre travail, les temps d'arrivées sont déterminés par une analyse temps-fréquence en employant la CWT, et sera détaillée dans le prochain chapitre. Cet outil possède une bonne résolution à la fois dans les domaines temporels et fréquentiels. Néanmoins, une incertitude systématique pourrait exister en raison du principe d'incertitude de Heisenberg.

Outre la précision sur la mesure des temps d'arrivée, l'autre aspect de la localisation susceptible d'influencer le résultat est l'algorithme déterministe. Ce problème mathématique représenté par l'équation (1.12) ne peut être résolu analytiquement. Dans une telle situation, les

approches probabilistes peuvent être plus appropriées pour la localisation des dommages dans la mesure où les distributions de probabilité peuvent être utilisées pour quantifier les diverses incertitudes. Zhao et al [89] ont introduit une analyse probabiliste dans une méthode d'imagerie des dommages basée sur la tomographie pour améliorer les performances de localisation des dommages de la méthode basée sur les ondes de Lamb. Cette méthode d'imagerie probabiliste a été étendue à des structures complexes et des structures avec de multiples zones endommagées [90] [91]. Flynn et al [92] ont proposé une méthode d'estimation de la probabilité a posteriori maximum (MAP) pour augmenter la probabilité de détection et de localisation des dommages. Su et al [93–95] ont introduit une fonction de densité de probabilité (PDF) pour réajuster la méthode traditionnelle de localisation des dommages dans la méthode basée sur la TOA. Pour chaque cercle, une carte de distribution de probabilité peut être donnée pour la détection cible dans la structure d'installation basée sur le PDF de l'occurrence des dommages. La combinaison de toutes les cartes de distribution de probabilité peut donner le résultat final de la détection des dommages. Récemment, Niri et Salamone ont proposé une approche pour la localisation des dommages par émission acoustique dans des structures en forme de plaque basée sur un filtre de Kalman étendu (EKF). Le principal avantage de l'algorithme à base du filtre EKF par rapport aux méthodes traditionnelles est qu'il peut prendre en compte les incertitudes dans la mesure de TOA et de la vitesse des ondes de mode de Lamb [96].

III. CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons exposé la méthode de contrôle non-destructif par émission acoustique et nous nous sommes attachés particulièrement à décrire le principe général de cette méthode. Le contrôle par émission acoustique présente un intérêt certain pour la surveillance des structures en fonctionnement en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son faible coût. La technique de l'EA, à l'opposé d'autres techniques plus conventionnelles, a l'avantage du suivi continu et non destructif de la dynamique des manifestations microstructurales qu'un matériau sollicité pourrait exhiber. Cette technique apporte des informations précieuses sur des détails microstructuraux sensibles dans les métaux, par exemple, les transformations de phases, les mouvements de dislocations, la microfissuration, etc....

Une caractéristique forte de l'EA est sa capacité à localiser les sources d'EA en travaillant sur les temps de vol des ondes reçus sur un réseau de capteurs. Dans le cadre de cette thèse nous avons choisi de retenir la localisation par une approche probabiliste. Cette méthode nécessite

l'utilisation d'algorithmes basés sur le filtre de Kalman et ses dérivés pour estimer la position des sources d'EA. D'autre part les données d'entrée des algorithmes sont liées à la définition du temps d'arrivée des salves enregistrées par les capteurs. Différentes techniques de détermination de temps d'arrivée des salves coexistent dans la littérature. L'analyse temps-fréquence semble être la plus adaptée à cette problématique.

Dans le chapitre suivant, nous nous proposons donc de développer une méthode de mesure de temps d'arrivée en nous basant sur la transformée en ondelette continue.

**METHODES DE
DETERMINATION DE TEMPS
D'ARRIVEE DES ONDES D'EA**

CHAPITRE 2 : METHODES DE DETERMINATION DE TEMPS D'ARRIVEE DES ONDES D'EMISSION ACOUSTIQUE (EA)

I. INTRODUCTION

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, que l'une des inconnues dans un contrôle par émission acoustique (EA) est le temps d'arrivée des signaux d'EA sur les capteurs. Ainsi, nous nous proposons donc dans ce chapitre d'établir de façon théorique cette méthode efficace qui va permettre d'extraire le temps d'arrivée. Ce dernier correspond à une transition entre deux phases dans le signal qu'un capteur enregistre. Cette transition se situe entre une phase où le capteur enregistre le bruit naturel (vibrations dues à la machine d'essai, perturbations électromagnétiques, etc.), et une phase où le capteur enregistre à la fois le bruit et l'activité acoustique résultante d'un événement [97][98].

Différentes méthodes de détermination du temps d'arrivée des ondes d'EA ont été proposées dans la littérature [10] [11] [14] [17] [86–88]. Les paragraphes suivants détaillent le fonctionnement du seuil fixe qui est une méthode largement utilisée et le fonctionnement de l'analyse temps-fréquence utilisant la transformée en ondelette continue.

II. LE SEUIL FIXE

Le seuil fixe est le critère le plus communément employé dans la littérature. Le temps d'arrivée d'une onde d'EA est défini au moment auquel l'amplitude reçue par le capteur dépasse un seuil préalablement établi. La [figure 2.1](#) illustre le problème rencontré lorsque le seuil fixe défini est trop important. On observe un décalage entre le début réel du signal et celui défini par la technique du seuil fixe. Un seuil trop haut peut induire des retards dans les temps d'arrivées. En revanche un seuil trop bas peut déclencher des acquisitions de signaux au niveau du bruit. La méthode du seuil fixe induit naturellement des erreurs.

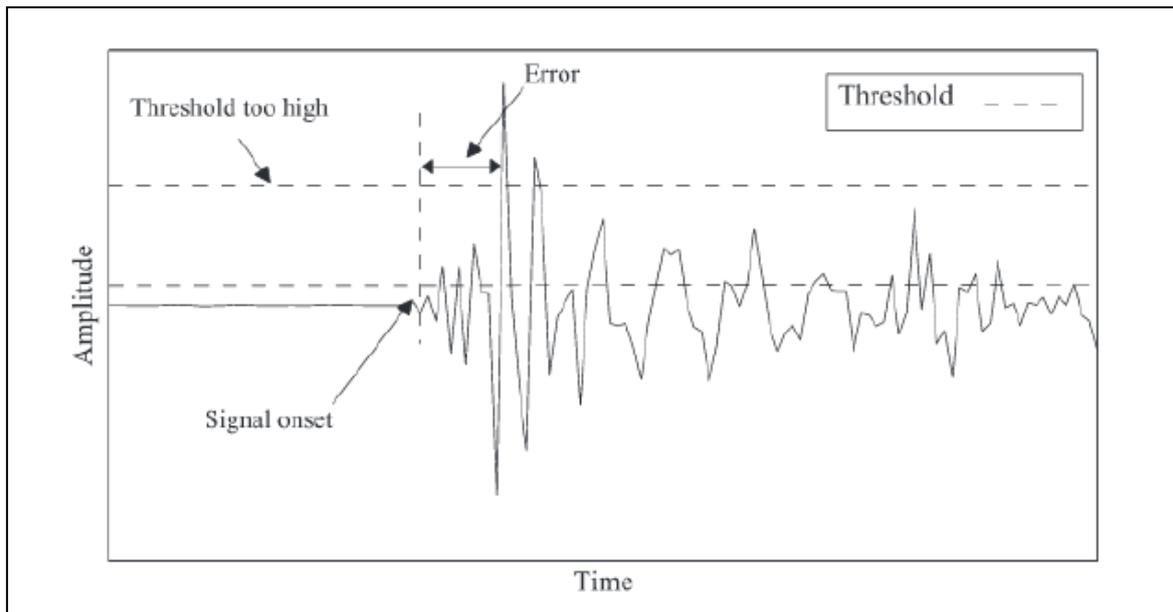


Figure 2.1 : Représentation schématique des erreurs potentielles liées à l'utilisation du seuil fixe [97].

III. ANALYSE TEMPS-FREQUENCE A L'AIDE DES ONDELETTES

Le CND par émission acoustique a connu récemment un développement rapide grâce aux progrès apportés dans le domaine du traitement du signal et de l'informatique. Un signal est un support de l'information, il représente une grandeur liée à un phénomène physique. En particulier, un signal ultrasonore capté à l'aide d'un transducteur piézoélectrique disposé sur un matériau est décrit par une fonction discrète variant en fonction du temps, traduit la propagation d'une onde ultrasonore dans ce dernier. Le traitement du signal consiste à extraire des informations utiles contenues dans le signal. Il permet de décrire l'interaction de l'onde ultrasonore avec le matériau à contrôler. L'observation de l'évolution d'un signal au cours du temps permet de repérer son commencement, sa fin et sa durée, des discontinuités, des changements de rythme, etc. En revanche, la représentation temporelle renseigne peu sur ses périodicités donc sur ses fréquences [99]. Dans le traitement du signal, les transformations sont souvent utilisées pour extraire certaines caractéristiques du signal qui peuvent être difficiles à observer dans sa forme originale. Le type d'informations pouvant être extraites dépend des caractéristiques des fonctions de base utilisées dans la transformation. La méthode la plus ancienne et la plus connue est la transformée de Fourier (TF) développée en 1807 par Joseph Fourier. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de fonctions de base qui sont les cosinus, les sinus ou l'exponentiel imaginaire. En effet la transformée de Fourier

permet de calculer le spectre d'un signal sans donner de précision sur la position des éléments spectraux dans le signal. Ainsi, elle s'adapte aux signaux de type stationnaires dont les caractéristiques fréquentielles ne varient pas au cours du temps. Les signaux d'EA que nous allons traiter dans le Chapitre 4 ne sont pas stationnaires et l'essentiel de l'information existe dans leurs caractéristiques fréquentielles et temporelles simultanément. L'analyse des signaux d'EA nécessite une méthode de décomposition qui fournit une information directe sur les propriétés temporelles et fréquentielles du signal. Dans les années 1940, le physicien Dennis Gabor a découvert la première forme de représentation temps-fréquence, il s'agit de la transformée de Fourier à fenêtre glissante ou transformée de Fourier à court terme (STFT ou *Short Term Fourier Transform*). Cette dernière permet de découper le signal à l'aide d'une fenêtre glissante et de calculer la transformée de Fourier de chaque partie du signal. L'inconvénient de ce procédé est que la longueur de la fenêtre est fixe pour toutes les fréquences ce qui rend difficile l'analyse des phénomènes dont les échelles de temps sont différentes, ainsi, la localisation en temps n'est pas parfaite [99]. La transformée en ondelette (TO) proposée par Jean Morlet en 1983 va permettre de s'affranchir de cet inconvénient. En effet, cette méthode sophistiquée possède la capacité d'adapter la résolution temporelle à la taille de l'objet analysé. La transformée en ondelette présente, par rapport à la STFT, l'intérêt d'un aspect multi-échelles de la fenêtre d'analyse grâce à l'utilisation d'atomes temps-fréquences réduits à une "petite onde" au lieu d'une fonction continue comme les bases en cosinus et en sinus utilisées pour la décomposition de Fourier et sa version à fenêtre. A l'origine, la TO est construite comme une transformée qui "projette" un signal sur une famille de fonctions qui sont de "petites ondes" car leur support est limité, contrairement à la TF. Les coefficients qui résultent de cette projection représentent le degré de similitude de cette petite onde que l'on translate le long du signal et que l'on dilate. Pour chaque valeur de translation et pour chaque valeur de dilatation (ou "échelle") on crée un nouveau jeu de coefficients. La représentation résultante de l'ensemble des coefficients dans un plan position (ou temps) et échelle s'appelle le "scalogramme". Cette représentation imagée vaut bien sûr pour un signal que l'on a échantillonné.

Dans la section suivante, un bref historique sur les bases théoriques mathématiques de la transformée en ondelette d'un signal et de leur propriété permettra de mieux comprendre les fondements de cette méthode d'analyse. Afin, de comprendre les concepts des transformations par ondelettes, il est nécessaire de rappeler la formulation de la transformée de Fourier classique et celle de la transformée de Fourier à court terme.

III.1 RAPPELS SUR LA TRANSFORMÉE DE FOURIER ET SES LIMITATIONS

La transformée de Fourier est un outil fondamental pour le traitement des signaux [100]. Elle permet d'associer à la représentation temporelle d'un signal, une autre représentation complémentaire dans le domaine fréquentiel. L'expression analytique de la transformée de Fourier d'une fonction continue $x(t)$ est définie de façon générale par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

$X(f)$ est continue, bornée et nulle à l'infini. On peut reconstruire le signal $x(t)$ à partir de sa représentation fréquentielle $X(f)$ à l'aide de la transformée de Fourier inverse définie par la formule :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2.2)$$

$x(t)$ doit satisfaire les conditions de Dirichlet :

- $x(t)$ possède un nombre fini de discontinuité sur tout intervalle fini.
- $x(t)$ possède un nombre fini de maxima et minima sur tout intervalle fini.
- $x(t)$ est absolument intégrable, c'est-à-dire. $\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) dt < \infty$

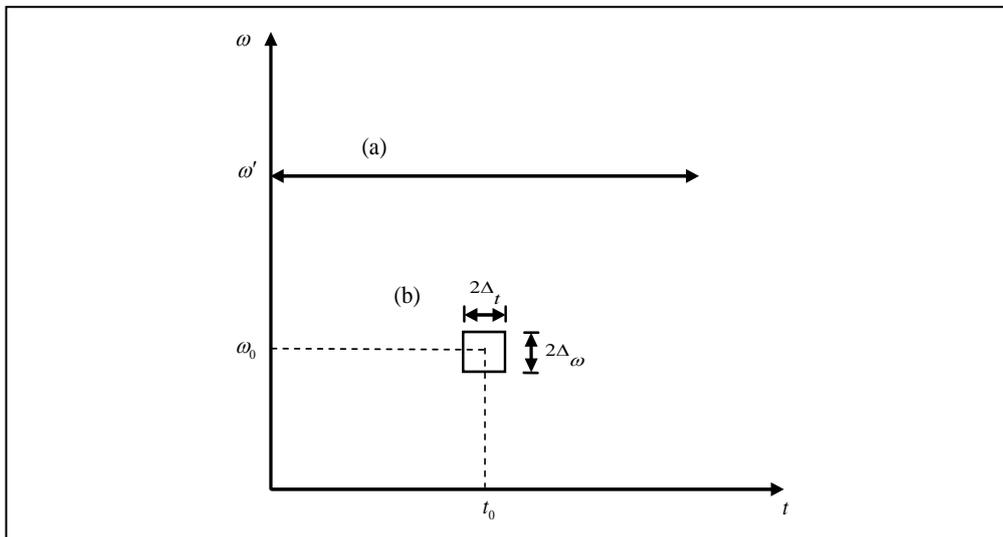


Figure 2.2 : Région étudiée dans le plan temps-fréquence par (a) la transformée de Fourier et (b) l'analyse temps-fréquence.

La transformation de Fourier repose sur la décomposition d'une fonction comme une superposition de sinus et de cosinus qui ont une durée infinie, donc elle perd la notion

temporelle. Dans le plan temps-fréquence, la TF représente des informations le long de la ligne $\omega = \hat{\omega}$, comme le montre la [figure 2.2 \(a\)](#). Cette analyse convient pour les signaux stationnaires où chaque composante de fréquence existe à tout instant, mais ne convient pas aux signaux non stationnaires. En fait, la TF ne permet pas de concilier la description fréquentielle et la localisation dans le temps. Cette lacune nous a poussés vers l'analyse temps-fréquence.

Il existe dans la littérature, beaucoup de transformations mathématiques qui permettent ce type d'analyse. On se restreint dans la thèse à l'analyse linéaire temps-fréquence et les transformées présentées seront la STFT et la transformation en ondelettes continue (CWT ou *Continuous Wavelet Transform*), que nous considérons ici comme une analyse de type temps-fréquence à largeur de bande relative constante. Cette approche, qui fera l'objet des paragraphes suivants, consiste à utiliser certaines transformées temps-fréquence capables de donner une représentation conjointe en temps et en fréquence d'un signal non-stationnaire. Elle nous permet, à quelques hypothèses près, de voir la répartition de l'énergie du signal dans le plan temps-fréquence. On obtient ainsi, simultanément, les informations concernant les structures temporelles et fréquentielles, quelque soit le degré de non stationnarité du signal ([figure 2.2 \(b\)](#)).

La justification de l'utilisation de cette approche dans le contexte non-stationnaire est d'éviter les limitations des méthodes classiques de traitement et notamment la transformée de Fourier qui est un des outils de base des approches classiques utilisées en traitement du signal.

III.2 PRINCIPE D'INCERTITUDE D'HEISENBERG

La transformée de Fourier à court terme et l'analyse en ondelette sont obtenues par la projection d'un signal sur des fonctions analysantes (atomes). La résolution locale de ces transformées dans les domaines temporels et fréquentiels, dépendra du paramètre d'échelle et des propriétés de l'ondelette mère, est limitée en fonction de l'inégalité de Heisenberg [101] qui est défini comme :

$$\sigma_t^2 \sigma_f^2 \geq \frac{1}{16\pi^2} \quad (2.3)$$

où σ_t et σ_f représentent respectivement la largeur temporelle et la largeur de bande fréquentielle associées à la fonction analysante, définis comme :

$$\sigma_t^2 = \frac{\int t^2 |\psi(t)|^2 dt}{\int |\psi(t)|^2 dt}, \quad \sigma_f^2 = \frac{\int f^2 |\Psi(f)|^2 df}{\int |\Psi(f)|^2 df} \quad (2.4)$$

où $\Psi(f)$ représente le spectre de la fonction analysante $\psi(t)$.

III.3 TRANSFORMÉE DE FOURIER A COURT TERME (STFT)

Un signal peut être visualisé sous sa forme temporelle ou sous sa forme fréquentielle. La première représentation donne sur le signal une information en temps et la deuxième une information en fréquence. Cependant, aucune de ces deux représentations ne permet d'avoir les deux informations en même temps.

La méthode la plus simple pour visualiser le contenu temps-fréquence d'un signal est d'utiliser une Transformée de Fourier à Court Terme (STFT). La STFT est une transformée de Fourier appliquée à un morceau du signal supposée stationnaire, extrait à l'aide d'une fenêtre glissante (figure 2.3) [102] [103]. Les composantes fréquentielles d'un signal non-stationnaire sont donc extraites par une décomposition pas à pas de signaux supposés stationnaires. Le résultat de cette transformée est une fonction qui dépend de deux variables, le temps et la fréquence. La STFT est définie analytiquement par :

$$X(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) \cdot h^*(t - \tau)] e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.5)$$

Avec $x(t)$ est le signal analysé, $h(t)$ est une fenêtre de largeur T et centrée en τ qui permet d'extraire une portion du signal. Cette fenêtre est décalée le long du signal au fur et à mesure de l'analyse. $h^*(t)$ est le complexe conjugué de $h(t)$ et la fonction $h(t - \tau)e^{-j2\pi f t}$ est appelée atome de Fourier à fenêtre.

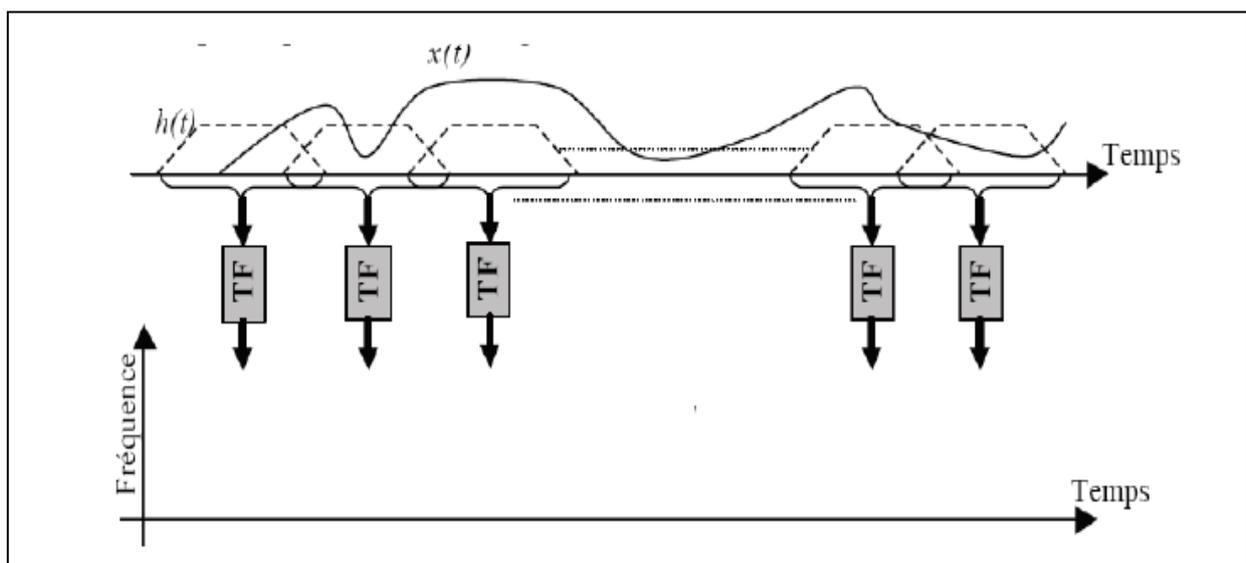


Figure 2.3 : Principe de la transformée de Fourier à court terme, découpage de signal en fenêtres d'analyse de même taille.

La largeur de la fenêtre d'analyse $h(t)$ sur laquelle le signal est supposé stationnaire est donc choisie afin de vérifier l'hypothèse de stationnarités. Ce choix est étroitement lié à la qualité de résolution de la STFT. Celle-ci est cependant limitée car elle ne peut pas à la fois présenter une résolution maximale en temps et en fréquence. Ce problème est en fait lié au principe d'incertitude d'Heisenberg exprimant que les résolutions en temps et en fréquence ne peuvent être toutes deux petites en même temps. En effet, si la fenêtre temporelle est grande, la résolution en temps est faible mais présente une bonne résolution fréquentielle, et inversement. De manière générale, si une meilleure résolution fréquentielle est nécessaire, alors il faut utiliser une large fenêtre d'analyse. Dans ces conditions, il est difficile de respecter l'hypothèse de stationnarité, d'autant plus que le type, la longueur et le pas de déplacement de la fenêtre d'analyse doivent être fixes au début de l'analyse. Un choix judicieux de ces paramètres nécessite une bonne connaissance a priori du signal à analyser. La limite majeure de cette méthode, pour l'analyse des signaux non-stationnaires, est atteinte essentiellement quand la taille de la fenêtre d'analyse choisie ne correspond pas à la nature variable de ces signaux [104]. Le pavage temps-fréquence correspondant à cette transformée est représenté à la [figure 2.4](#). On remarque bien que la taille de la fenêtre est constante, il s'agit d'un pavage régulier.

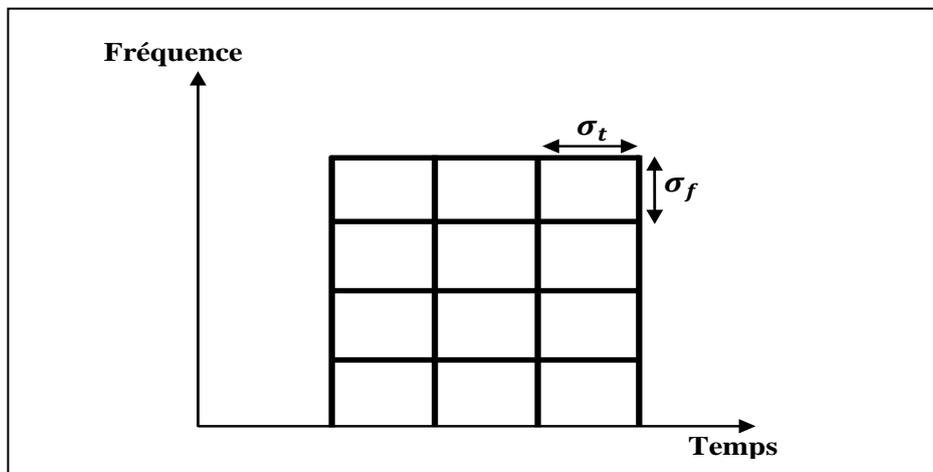


Figure 2.4 : Pavage temps-fréquence pour la transformée à fenêtre glissante.

Nous présentons ici quelques exemples des fonctions fenêtres. Nous avons un signal A constitué de 4 sinusoides qu'on multiplie par une fenêtre rectangulaire :

$$A = [\sin(2\pi \cdot 70 \cdot t_1) \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t_2) \sin(2\pi \cdot 30 \cdot t_3) \sin(2\pi \cdot 10 \cdot t_4)]$$

On prend la même fenêtre et on change sa largeur, puis on analyse le résultat.

D'après les résultats représentés par la [figure 2.5](#), on constate que la largeur de la fenêtre d'analyse influence directement la résolution. Il y a là un réel problème car chaque personne désirant utiliser la STFT doit choisir une et une seule fenêtre qui sera utilisée tout au long de l'analyse.

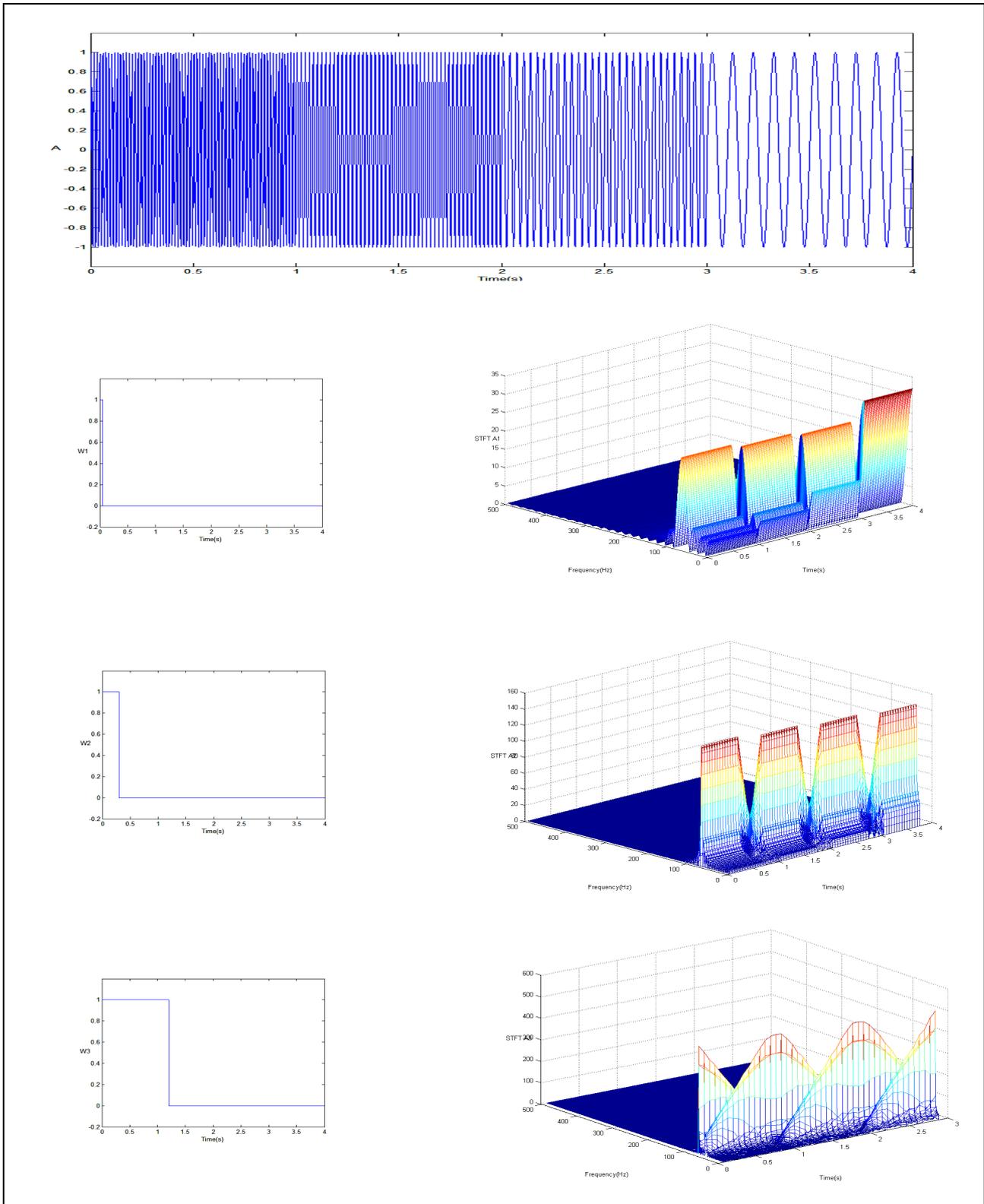


Figure 2.5 : Illustration du problème de résolution de la STFT avec les différentes valeurs de la largeur de la fenêtre d'analyse.

III.4 TRANSFORMÉE PAR ONDELETTE 1D

Pour pallier au problème de résolution lié à la largeur de fenêtre, une transformée par ondelettes (WT pour Wavelet Transform) est utilisée [105]. Elle est basée sur le même principe que la STFT mais utilise une fenêtre de largeur variable qui s'adapte en fonction des irrégularités du signal.

La transformée en ondelettes a suscité beaucoup d'intérêt pour l'analyse des signaux non-stationnaires. L'ondelette la plus basique, ondelette de Haar, a été inventée en 1910 [106] [107]. Le développement de l'analyse des ondelettes a été dirigé par Meyer, Morlet et Grossman, mais ce n'est que grâce aux innovations de Daubechies et Mallat qu'une explosion d'intérêt et d'activité dans la théorie et les applications des ondelettes s'est produite [103]. Depuis, les ondelettes ont trouvées des applications dans le traitement du signal, la compression de données d'analyse d'images et de nombreux autres domaines. Le principe de cette méthode repose sur une représentation temps-échelle (ou temps-fréquence) de l'évolution temporelle d'un signal relativement à une échelle (ou fréquence) d'observation donnée [108] [109] (figure 2.6). L'analyse par WT est effectuée selon une base de projection $\psi(t)$ appelée ondelette mère (ou ondelette de base). La décomposition d'un signal par la fonction $\psi(t)$ consiste à considérer, dans le domaine temporel, une fraction du signal à traiter. L'ondelette mère est ensuite dilatée ou contractée à l'aide d'un facteur d'échelle a . Ceci permet de canaliser la décomposition sur une concentration donnée d'oscillations. La dilatation de fonction $\psi(t)$ permet une analyse des composantes lentes du signal. Inversement, l'analyse des oscillations rapides du signal est effectuée par une ondelette mère contractée. Cette dilatation et contraction de la fonction d'analyse constitue le facteur d'échelle, permettant ainsi une décomposition temporelle du signal.

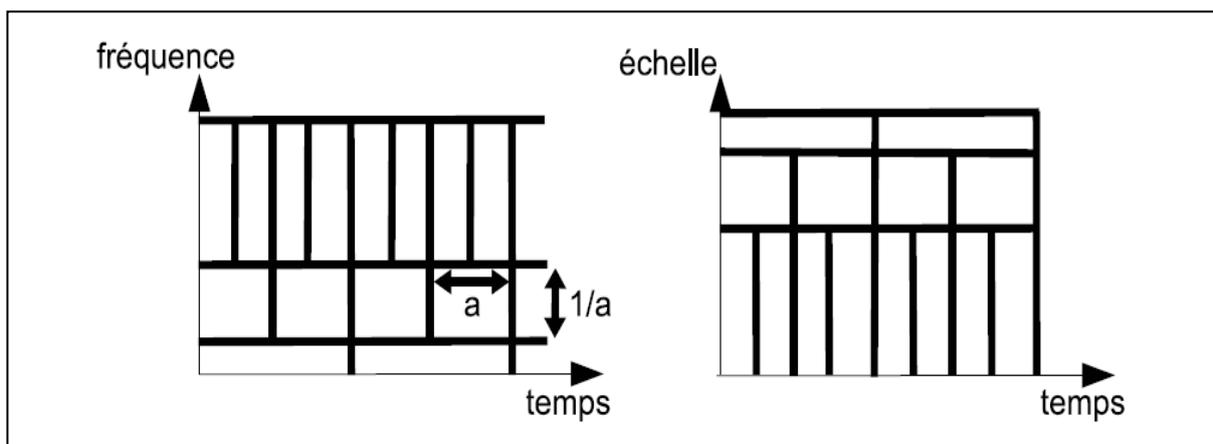


Figure 2.6 : Pavage temps-fréquence et temps-échelle pour la transformée en ondelettes. a représente le facteur d'échelle. Les petites échelles correspondent à des hautes fréquences et inversement les grandes échelles correspondent à des basses fréquences.

L'énergie d'un signal ne change pas quand on lui applique une transformée en ondelettes. On peut donc transformer un signal en combinaison d'ondelettes, puis reconstruire le même signal à partir de ces combinaisons. De plus, cette transformation est robuste au sens où un changement de la représentation en ondelettes induit un changement de taille comparable dans le signal.

III.4.1 Transformée en Ondelette Continue (CWT)

Au début des années 1980, Morlet a introduit une 'Ondelette' qui a été dilatée et décalée pour former une famille de fonctions d'analyse. Ces fonctions sont normalisées comme [110] :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.6)$$

Où :

- ψ est l'ondelette mère.
- $\psi_{a,b}$ est l'ondelette analysante (ou ondelette fille). C'est la fonction de fenêtrage.
- a est le facteur d'échelle ou coefficient de dilatation de ψ ($a \neq 0$)
- b est le paramètre de position ou le coefficient de translation qui permet de retarder ou d'avancer l'instant d'application de l'ondelette sur le signal $x(t)$. Il s'agit d'un nombre réel.

Cette fonction joue le rôle de la fenêtre utilisée dans la STFT. Mais contrairement à cette dernière, sa largeur s'adapte en fonction de la fréquence. La valeur de a permet de dilater ($a > 1$) ou de contracter ($a < 1$) l'ondelette analysante $\psi_{a,b}(t)$ (propriété d'analyse multi-échelle) et joue le rôle inverse de la fréquence (équation (2.5)). Changer b autorise l'analyse de la fonction $x(t)$ au voisinage de différents points b (propriété d'analyse locale). Lorsque a croît, la fréquence est basse et l'ondelette couvre une plus grande fraction du signal permettant d'extraire le comportement à long terme du signal. Inversement, lorsque la valeur du paramètre d'échelle a diminue, la fraction du signal analysée diminue permettant ainsi l'étude des variations locales à hautes fréquences [69]. Ces coefficients contiennent les informations nécessaires à une analyse multi-échelles. L'ondelette peut être interprétée comme un filtre passe bande de fréquence centrale f_c . Plus la fréquence du signal analysé s'approche de celle de l'ondelette analysante, plus la fréquence du signal analysé coïncide avec celle de l'ondelette. En effet, l'analyse par la transformée en ondelettes décompose le signal des plus basses fréquences

vers les plus hautes. La variation du paramètre a permet de déterminer les composantes du signal qui correspond à la fréquence f_a :

$$f_a = \frac{T_e \cdot f_c}{a} \quad (2.7)$$

où T_e est la période d'échantillonnage [111].

Les transformées en ondelettes continues (TOC ou CWT pour Continuous Wavelet Transform, en anglais) sont des outils très utiles pour l'analyse de signaux non stationnaires [101] [112–116]. Elles convertissent une fonction à une variable en une fonction à deux variables. La transformée en ondelettes continue est définie analytiquement par :

$$C_\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.8)$$

Où :

- ψ^* est le complexe conjugué de l'ondelette mère.
- $C_\psi(a, b)$ sont les coefficients d'ondelettes (nombre à valeur généralement complexe).

Le principe d'incertitude d'Heisenberg doit toujours être respecté. Dès lors, l'analyse des signaux non-stationnaires par la CWT est conçue pour donner une bonne résolution fréquentielle lors de l'analyse des composantes basses fréquences et une bonne résolution temporelle dans le cas de l'analyse des composantes hautes fréquences [108] [109]. Les coefficients sont donc une mesure de la similitude entre l'ondelette $\psi(t)$ et la fonction $x(t)$.

La résolution temps-fréquence de la transformée en ondelette peut être exprimée en fonction du paramètre d'échelle a à travers les relations suivantes [117] :

$$\sigma_t = a\sigma_{t_\psi}, \quad \sigma_\omega = \frac{\sigma_{\omega_\psi}}{a} \quad (2.9)$$

où σ_{t_ψ} et σ_{ω_ψ} sont la durée et la largeur de bande de l'ondelette mère, respectivement.

Selon le principe d'incertitude [117], le domaine de localisation temps-fréquence pour tout point temps-fréquence est un rectangle de largeur σ_t et de hauteur σ_ω avec une aire constante $\sigma_t \cdot \sigma_\omega$ de valeur qui peut s'approcher ou évaluer à $1/4\pi$ selon le choix de l'ondelette. Cette propriété de multi-résolution fait de la transformée en ondelettes continue un outil de choix pour l'analyse de signaux non stationnaires au contenu fréquentiel riche.

III.4.2 Condition d'admissibilité

L'ondelette mère est une ondelette qui doit satisfaire les critères mathématiques suivants :

- Elle vérifie la condition d'admissibilité :

$$C_{\psi}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{|f|} df < \infty \quad (2.9)$$

alors la transformée inverse peut être calculée avec la formule de reconstruction

$$x(t) = \frac{1}{C_{\psi}(a, b)} \iint X(a, b) \frac{\psi_{a, b}(t)}{a^2} da db \quad (2.10)$$

- Elle est d'intégrale, cette condition implique que l'ondelette est de moyenne nulle [106] [107]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a, b}(t) dt = 0 \quad (2.11)$$

- Elle est de carré intégrale et sa norme est égale à 1 :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{a, b}(t)|^2 dt = 1 \quad (2.12)$$

- Les ondelettes complexes doivent satisfaire un critère supplémentaire : elles doivent être des fonctions analytiques, c'est à dire que leur transformée de Fourier doit être réelle et nulle pour les fréquences négatives.

III.4.3 Algorithme pour calculer les Coefficients d'Ondelette

La procédure de calcul des coefficients $C_{\psi}(a, b)$ se déroule en cinq étapes et s'effectue comme suit (figure 2.7) [118] [119] :

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

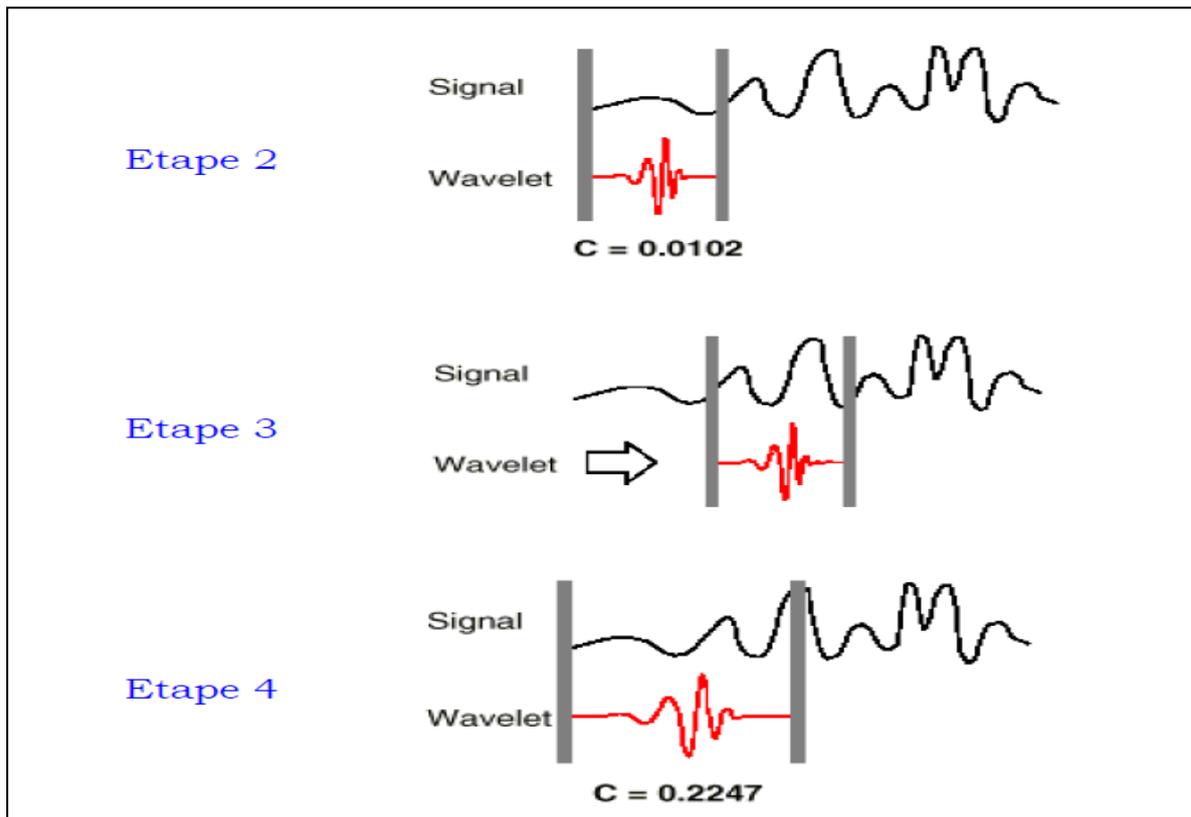


Figure 2.7 : Etapes de calcul des Coefficients d'ondelette.

III.4.4 Choix de l'Ondelette mère

Différentes fonctions peuvent être utilisées comme ondelette mère disponibles pour la transformée en ondelette. Chacune de ces ondelettes possède des propriétés spécifiques (localisation, régularité, symétrie). Le choix de l'ondelette mère dépend de l'application envisagée. Ces ondelettes mères sont classées en deux catégories :

- les ondelettes associées à des analyses multi-résolution orthogonale (Transformée en ondelette discrète) telle que l'ondelette de Haar (la plus simple), l'ondelette de Daubechie et l'ondelette de Meyer.
- Les ondelettes utiles pour la transformée en ondelette continue tel que : l'ondelette gaussienne, le chapeau mexicain et l'ondelette de Morlet, l'ondelette gaussienne complexe, l'ondelette de Shannon complexe, l'ondelette B-spline fréquentielle complexe ainsi que l'ondelette de Morlet complexe.

Quelques exemples de ces ondelettes sont montrées, citons par exemple :

- Ondelette de Morlet [120] (figure 2.8) : c'est une gaussienne modulée par une exponentielle complexe d'expression :

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} e^{-i\omega_0 t} \quad (2.11)$$

où le nombre d'oscillations reste constant et la taille de la fenêtre varie (grâce au facteur d'échelle a). Cette ondelette est régulière, symétrique, de support infini mais a une décroissance rapide. Elle peut être utilisée pour les transformées en ondelettes continues. Un des avantages de l'ondelette de Morlet est qu'elle est bien adaptée à l'analyse de signaux expérimentaux et elle est optimalement localisée dans le plan temps-fréquence (elle minimise l'inégalité de Heisenberg (équation (2.3))).

- Chapeau mexicain (figure 2.8) : cette ondelette correspond à la dérivée seconde d'une fonction gaussienne et a pour expression :

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - t^2) e^{-t^2/2} \quad (2.12)$$

Cette ondelette est régulière, symétrique et de support infini. Elle est utilisée pour les transformées en ondelettes continues.

- Ondelettes de Daubechies [121] (figure 2.9) : ces ondelettes n'ont pas d'expression analytique. Une ondelette de Daubechies à N moments nuls vérifie l'équation de dilatation :

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h_{k+1} \varphi(2t - k), \\ \psi(t) &= \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g_{k+1} \varphi(2t - k), \\ g_k &= (-1)^k h_{-k+1} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ces ondelettes constituent une base orthonormée ayant les propriétés suivantes :

- Elles peuvent avoir N moments qui s'annulent.
- Le support de ces ondelettes est compact ($2N - 1$ points).
- Leur régularité croît avec le nombre de moments s'annulant N .
- La plupart de ces ondelettes sont antisymétriques.
- Elles sont orthogonales.
- Elles peuvent être utilisées pour les transformées en ondelettes continues et discrètes.

On peut aussi noter que l'ondelette à 1 seul moment nul est en fait l'ondelette de Haar (qui vaut -1 entre -1 et 0, 1 entre 0 et 1, et 0 ailleurs).

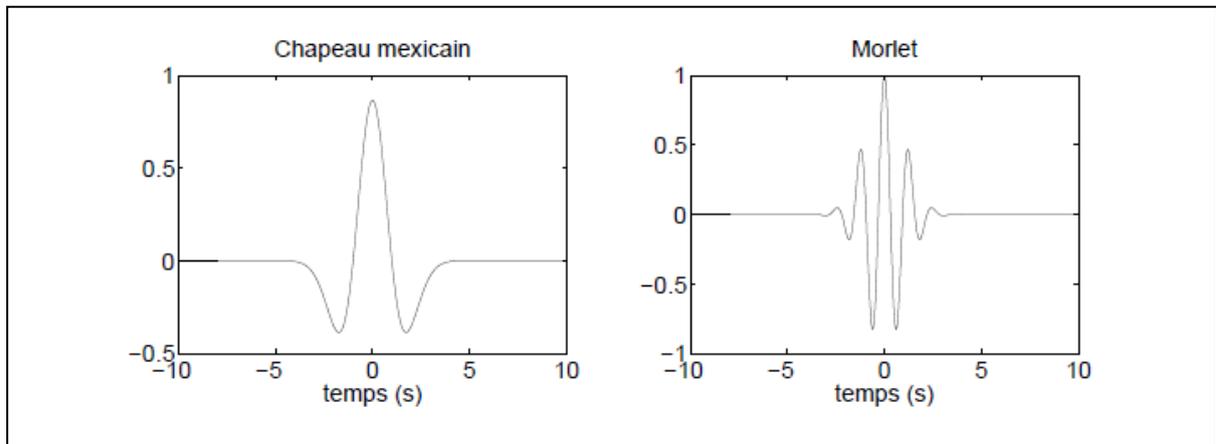


Figure 2.8 : Chapeau mexicain et ondelette de Morlet.

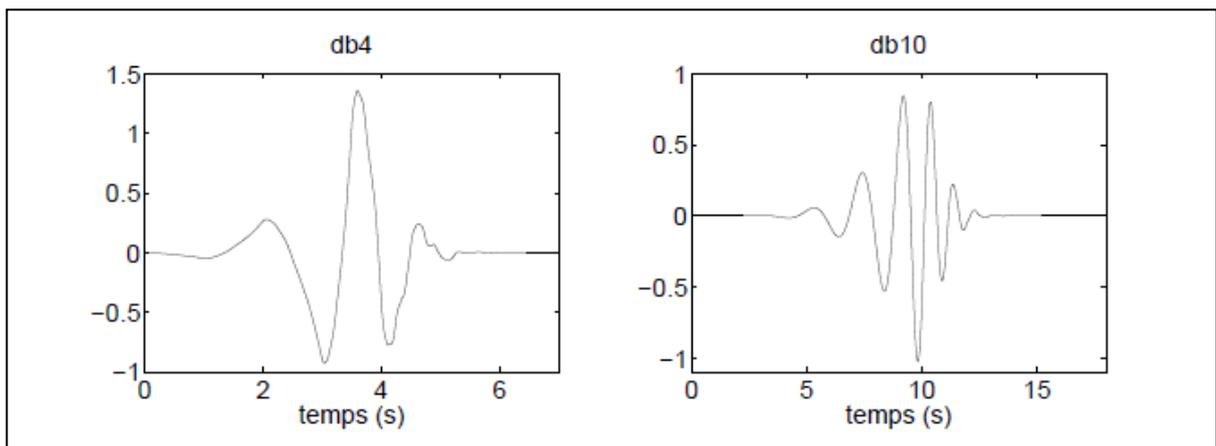


Figure 2.9 : Ondelettes de Daubechies avec 4 et 10 moments s'annulant : db4 et db10.

III.4.5 Ondelette de Morlet Complexe

Nous avons choisi pour notre étude l'ondelette de Morlet complexe. Elle permet d'effectuer une analyse du signal avec un bon compromis en termes de résolution temps-fréquence. De plus, cette ondelette a souvent été choisie pour l'étude des signaux ultrasonores ; elle s'adapte à la forme des signaux acquis et elle présente l'avantage d'être plus simple à calculer [8] [122] [123]. Cette ondelette possède une décroissance exponentielle en temps et en distance qui lui permet de séparer les informations d'amplitude et de phase, mais aussi il lui assure une précision optimale de la localisation en temps et en fréquence (limite d'Heisenberg égale à 0.5) [101]. C'est une ondelette régulière et symétrique.

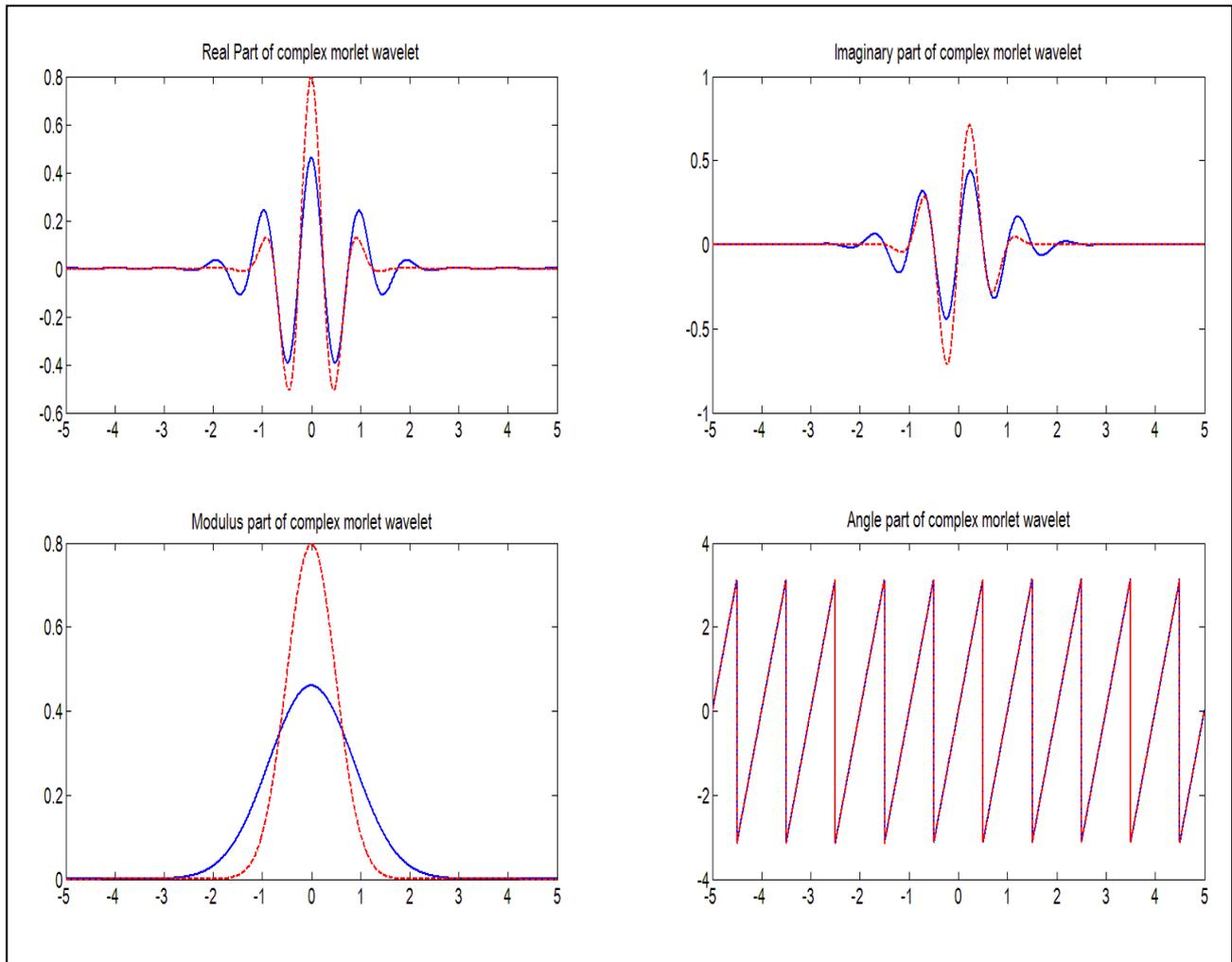


Figure 2.10 : (a)-(d) Ondelette de Morlet complexe avec différentes valeurs de f_b (1.5 en bleu continue, 0.5 en rouge discontinue).

L'ondelette mère de Morlet complexe est définie comme suit :

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-t^2/f_b} \cdot e^{2i\pi f_c t} \quad (2.14)$$

où $f_c = \omega_c/2\pi$ et f_b représentent respectivement la fréquence centrale et la largeur de bande de fréquence. f_b contrôle la forme de l'ondelette mère et, pour un paramètre d'échelle a donné, détermine la résolution dans le domaine temporel et fréquentiel. D'après l'équation (2.14), la fonction de Morlet complexe peut être considérée comme une fonction gaussienne modulée centrée sur $t = 0$. Dans ce cas la transformée de Fourier de l'ondelette est une gaussienne centrée sur la fréquence de la porteuse. La valeur de la pulsation de l'ondelette de Morlet doit

être $\omega_c \geq 5 \text{ rad.s}^{-1}$ [101] pour remplir la condition d'admissibilité. Les équations suivantes montrent les σ_t et σ_ω dans l'équation (2.4) pour le Morlet complexe [124] :

$$\sigma_t = \frac{a\sqrt{f_b}}{2}, \quad \sigma_\omega = \frac{1}{a\sqrt{f_b}} \quad (2.15)$$

La figure 2.10 montre la partie réelle et imaginaire des ondelettes de Morlet complexe.

III.5 APPLICATION DE LA CWT AUX SIGNAUX D'EA

En raison de la complexité des signaux d'EA et de l'incertitude du niveau de bruit du signal mesuré, un choix approprié d'analyse temps-fréquence pour l'identification de TOA est nécessaire. La CWT est plus adaptée que la STFT pour visualiser le contenu temps-fréquence des signaux d'EA. En effet, la STFT est bien adaptée si les signaux étudiés sont stationnaires « par morceaux », ce qui n'est pas le cas des signaux d'EA qui sont non-stationnaires. La transformée en ondelette offre un compromis très intéressant entre résolution temporelle et fréquentielle et permet d'analyser les fréquences basses et hautes en même temps, toute en respectant le principe d'incertitude (également appelé inégalité de Heisenberg) [125] [126].

Pour obtenir le TOA des signaux d'EA issus de source d'endommagement ou d'impacts, des descripteurs temps-échelle sont extraits des représentations obtenues par CWT [127-128].

- Le premier descripteur correspond au module au carré des coefficients de CWT (Scalogramme). Il représente la densité d'énergie de signal dans le domaine temps-fréquence [101]. Le scalogramme est défini par :

$$Sc(a, b) = |C_\psi(a, b)|^2 = C_\psi(a, b) \cdot C_\psi(a, b)^* \quad (2.15)$$

où $C_\psi(a, b)^*$ représente le conjugué de la transformée de l'ondelette.

- Le second descripteur est le maximum des modules au carré des coefficients des CWT.

Ces deux descripteurs sont calculés pour chaque échelle a .

- Un autres descripteur caractérise la localisation temporelle relative du pic d'énergie d'une salve d'EA. Il dépend de l'instant t_i correspondant au plus fort coefficient d'ondelette d'une salve d'EA tel que :

$$t_i = \text{Arg}(\max |C(a, b)|^2) \quad (2.16)$$

La valeur maximale des coefficients du scalogramme est obtenue à la fréquence instantanée [8] [130] [131], ce qui correspond à la fréquence dominante dans le signal analysé à chaque instant dans le temps. Ces coefficients, prises à la fréquence instantanée dans un domaine temps-fréquence, détermine les pics [101]. La projection du pic correspondant à la fréquence dominante f_i représente le temps d'arrivée du paquet d'ondes. Puisque dans ce travail, la fréquence dominante peut être différente à chaque capteur, la fréquence moyenne est utilisée pour calculer le temps d'arrivée t_i .

$$\bar{f} = \frac{\sum_1^n f_i}{n} \quad (2.17)$$

L'échelle correspondant est définie comme suit :

$$\bar{a} = \frac{f_c}{\bar{f}} \quad (2.18)$$

Pour effectuer l'analyse des signaux d'EA par CWT, une ondelette mère de Morlet Complexe a été utilisée. Cette ondelette a été choisie car sa forme d'onde est similaire aux signaux transitoires d'EA étudiés. En substituant l'équation (2.18) dans (1.6) (voir Chapitre 1), σ_t et σ_ω pour l'ondelette de Morlet complexe peut être défini par :

$$\sigma_t = \frac{f_c \sqrt{f_b}}{2\bar{f}} \quad (2.19)$$

$$\sigma_\omega = \frac{\bar{f}}{f_c \sqrt{f_b}}, \quad \sigma_f = \frac{\bar{f}}{2\pi f_c \sqrt{f_b}} \quad (2.20)$$

Une fois le TOA connu, on peut calculer les différences de temps Δt_{mi} par rapport au capteur maître. En substituant l'équation (2.19) dans (1.13) (voir Chapitre 1), la variance de la différence de temps d'arrivée $\sigma_{\Delta t_{mi}}^2$ est définie comme :

$$\sigma_{\Delta t_{mi}}^2 = 2 \left(\frac{f_c \sqrt{f_b}}{2\bar{f}} \right)^2 \quad (2.21)$$

Cette valeur est utilisée pour modéliser l'incertitude du vecteur de mesure qui est donnée en entrée de l'algorithme probabiliste proposé (EKF ou UKF).

IV. CONCLUSION

Ce chapitre a présenté un tour d'horizon rapide des techniques temps-fréquences. Nous avons choisi la CWT utilisant l'ondelette de Morlet complexe au lieu de STFT pour déterminer le temps d'arrivée des signaux spécifiques aux mécanismes d'endommagement ou aux impacts source d'EA sur les palpeurs. La transformée en ondelettes continue permet, en plus de l'extraction de temps d'arrivée des signaux d'EA tout en tenant compte des incertitudes de mesures, de visualiser le contenu fréquentiel des signaux au cours du temps. Cependant, dans la réalité des erreurs et des incertitudes sont toujours inévitables dans le processus de mesure et d'identification. Même en employant la CWT, l'incertitude systématique pourrait exister en raison du principe d'incertitude Heisenberg.

METHODES D'ESTIMATION DE
L'EMPLACEMENT DES
SOURCES D'EA

CHAPITRE 3 : METHODES D'ESTIMATION DE L'EMPLACEMENT DES SOURCES D'EA

I. INTRODUCTION

Ce chapitre présente un état de l'art des techniques d'estimation d'état pour un système non-linéaire. Les travaux de recherche décrits dans cette thèse ont pour objectif d'utiliser ces techniques d'estimation non-linéaire pour déterminer la position des sources d'EA et le suivi de leur évolution dans le temps. D'une façon générale, la fonction de filtrage consiste à estimer une information (signal) utile qui est polluée par un bruit. La théorie du filtre bayésien introduite dans la section suivante constitue le fondement de la formulation du problème d'estimation séquentielle d'état. Le filtre de Kalman qui appartient à la famille des filtres bayésiens, vise à estimer de façon "optimale" l'état du système linéaire (cet état correspond donc à l'information utile). Entre autres filtres, le filtre de Kalman étendu, (référé avec le sigle EKF pour sa version anglaise dite *Extended Kalman Filter*) a démontré son efficacité à déterminer les états d'un système non-linéaire en combinant des techniques linéaires et non-linéaires. Depuis 1994, un nouveau type de filtre de Kalman, le filtre de Kalman non-parfumé (référé avec le sigle UKF pour sa version anglaise dite *Unscented Kalman Filter*), a été développé en utilisant une approche complètement non-linéaire.

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps évoquer la méthode basée sur la technique géométrique. L'accent sera ensuite mis sur la structure générale des techniques d'estimations en guise d'introduction. Puis, les sections III.3.2 et III.3.3 exposent respectivement les méthodes utilisées, à savoir ; le filtre de Kalman étendu (EKF) et de filtre de Kalman sans biais (UKF).

II. METHODE GEOMETRIQUE

Cette technique repose sur le calcul géométrique de l'emplacement de la source d'EA [72] [128]. Ce principe de base est illustré à la [figure 3.1](#). Il est bien connu que pour une localisation bidimensionnelle, au moins trois (03) capteurs sont nécessaires pour localiser une source d'EA. L'origine du système de coordonnées est définie pour coïncider avec le capteur S_0 . Le problème de la localisation est alors de calculer R qui est la distance de l'origine à la source, et θ , l'angle de

la source par rapport à l'axe des abscisses. Les temps d'arrivée aux trois capteurs sont donnés par :

$$t_0 = \frac{R}{v} \quad t_1 = \frac{r_1}{v} \quad t_2 = \frac{r_2}{v} \quad (3.1)$$

Les différences de temps d'arrivée sont définis par rapport au capteur à l'origine par :

$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 \quad \Delta t_2 = t_2 - t_0 \quad (3.2)$$

En substituant (3.1) dans (3.2), on aura les résultats de la paire d'équations ci-après,

$$\Delta t_1 v = r_1 - R \quad \Delta t_2 v = r_2 - R \quad (3.3)$$

Il est maintenant noté que

$$Z_1 = R \sin(\theta - \theta_1) \quad (3.4)$$

Et

$$Z_1^2 = r_1^2 - (D_1 - R \cos(\theta - \theta_1))^2 \quad (3.5)$$

En combinant (3.4) avec (3.5) et en réduisant les termes des rendements

$$R^2 = r_1^2 - D_1^2 + 2D_1 R \cos(\theta - \theta_1) \quad (3.6)$$

$$r_1 = \Delta t_1 v + R \quad (3.7)$$

En insérant (3.7) dans (3.6), on aura :

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 v^2}{\Delta t_1 v + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (3.8)$$

De même,

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 v^2}{\Delta t_2 v + D_2 \cos(\theta - \theta_2)} \quad (3.9)$$

Ces deux dernières équations peuvent être résolues simultanément pour R et θ afin de déterminer l'emplacement de la source d'EA. La localisation de la source d'EA est donnée par :

$$\begin{cases} x_s = x_0 + R \cos \theta \\ y_s = y_0 + R \sin \theta \end{cases} \quad (3.10)$$

La précision de la localisation de la source d'EA est affectée par un certain nombre de facteurs liés à la fois aux phénomènes de propagation et aux caractéristiques du système de

mesure. Dans une telle situation, les approches probabilistes pourraient être plus appropriées que les approches déterministes pour la localisation des sources d'EA.

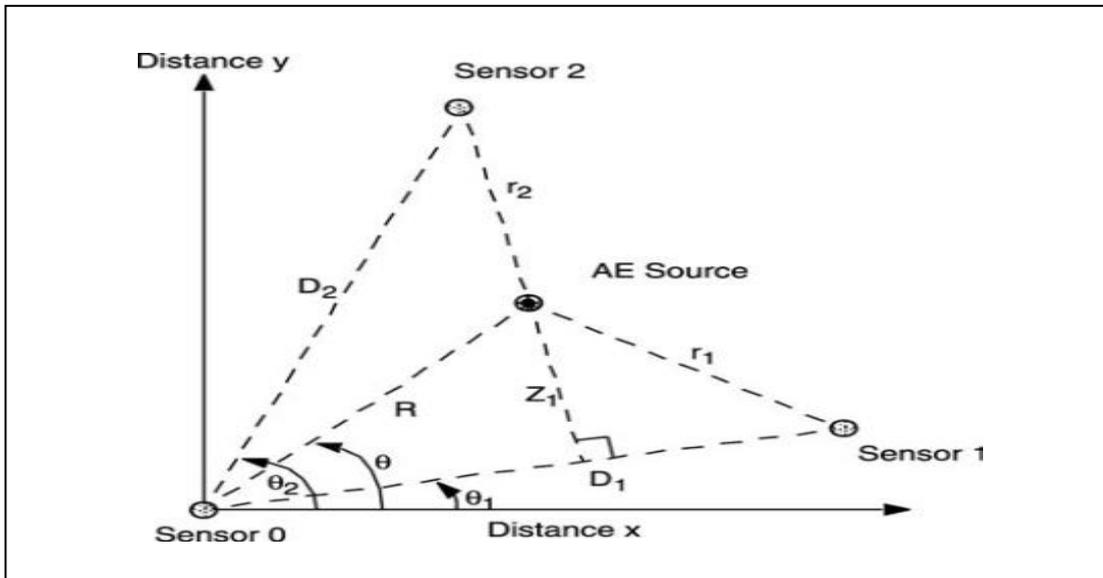


Figure 3.1 : Localisation de source d'EA avec la méthode géométrique.

III. METHODE PROBABILISTE

Dans cette partie, nous commençons par introduire la notion de filtrage d'un point de vue général. Après avoir exposé le filtre optimal comme solution au problème de filtrage, nous nous décrivons les méthodes permettant de calculer de manière exacte ou approchée le filtre optimal. Deux méthodes sont présentées : le filtre de Kalman étendu (EKF) et le filtre de Kalman non-parfumé (UKF).

En 1949, N. Wiener pose explicitement le problème du filtrage d'un signal stochastique. Il propose une méthode originale, qui se base sur des filtres linéaires minimisant une intégrale du carré de l'erreur entre le signal utile et le signal estimée [142]. A. N. Kolmogorov obtient indépendamment les mêmes résultats.

III.1 DESCRIPTION DU PROBLEME DE FILTRAGE

La recherche en filtrage est motivée par de nombreuses applications dans des domaines variés. Ce problème est en effet assez général puisqu'il consiste à estimer les variables d'états d'un système dynamique que l'on observe partiellement à travers une série de mesures. Les états $(x_k)_{k \geq 0}$ du système sont soumis à une évolution dans le temps décrite par une équation de dynamique du type :

$$x_k = f_k(x_{k-1}, w_k) \quad (3.11)$$

Où le vecteur des états x_k prend ses valeurs dans \mathbb{R}^d , $d \geq 1$ étant un entier désignant le nombre d'états. La suite de variables aléatoires (v.a.) $(w_k)_{k \geq 0}$ à valeurs dans \mathbb{R}^s , $s \geq 1$, modélise les perturbations aléatoires de la dynamique et l'imperfection du modèle. f_k est une fonction à valeurs dans \mathbb{R}^d .

Ce système est partiellement observé à travers une série de mesures y_k fournies par un instrument. Ce processus d'observation est modélisé par l'équation suivante :

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (3.12)$$

h est une fonction d'observation connue à valeurs dans \mathbb{R}^m , $m \geq 1$, et $(v_k)_{k \geq 0}$ une suite de v.a. décrivant les erreurs de mesures dont l'intensité est fonction des imperfections des capteurs et du rapport signal à bruit. Étant donné la série d'observations bruitées $\{y_0, y_1, y_2, \dots, y_k\}$, on souhaite estimer l'état du système x_k .

III.1.1 Estimation bayésienne

Le problème consistant à déterminer l'état du système grâce aux mesures $(y_k)_{k \geq 0}$ s'appelle estimation. Le choix du critère qualifiant la précision de l'estimée n'est pas unique. L'estimation de x_k se fait souvent selon un critère de minimisation d'un risque. Par exemple, l'estimateur \hat{x}_k minimisant l'erreur quadratique moyenne (ou estimateur MMSE pour *Minimum Mean Squared Error*),

$$\mathbb{E}(\|x_k - \hat{x}_k\|^2)$$

est l'espérance conditionnelle [132].

$$\hat{x}_k^{MMSE} = \mathbb{E}(x_k | y_0, \dots, y_k) \quad (3.13)$$

Cependant, cet estimateur n'est pas toujours approprié. Un deuxième estimateur, utilisé notamment lorsque la loi de densité conditionnelle $p(x_k | y_0, \dots, y_k)$ est multimodale, est le maximum a posteriori [133], que nous notons ici \hat{x}_k^{MAP} et qui est défini par :

$$\hat{x}_k^{MAP} = \arg \text{Max}_{x_k} [p(x_k | y_0, \dots, y_k)] \quad (3.14)$$

Dans tous les cas, la formulation de ces estimateurs nécessite de déterminer la loi de probabilité conditionnelle de x_k sachant les mesures passées $\{y_0, y_1, y_2, \dots, y_k\}$: c'est la problématique du filtrage. De façon plus générale, l'estimation de la loi de x_k sachant $y_{0:n} = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_n\}$ s'appelle :

- ✓ prédiction si $i < k$,
- ✓ filtrage si $n = k$,
- ✓ lissage si $n > k$

Pour résoudre le problème du filtrage non-linéaire en temps discret, on se place dans le cadre des modèles à espace d'état :

- $(w_k)_{k \geq 0}$ est une suite de v.a. mutuellement indépendantes et indépendante de x_0 . x_k est donc markovien, sa loi est entièrement définie par sa loi initiale $p_0(dx) = \mathbb{P}(x_0 \in dx)$ et le noyau de transition Q_k tel que

$$\mathbb{P}(x_k \in A | x_{k-1} = \hat{x}) = \int_A Q_k(\hat{x}, dx) \quad (3.15)$$

- Le bruit v_k est une suite de v.a. mutuellement indépendantes et indépendante du processus x_k .
- L'état initial x_0 est indépendant de v_k et du bruit de dynamique w_k .

Dans toute la suite, on supposera que la loi conditionnelle de x_k sachant $y_{0:k}$ admet une densité par rapport à la mesure de Lebesgue. Par abus de langage, on confondra parfois la loi conditionnelle de x_k avec sa densité.

III.1.2 Le filtre optimal

On note $p_k = p(x_k | y_{0:k})$ la densité conditionnelle de x_k sachant les observations passées $y_{0:n} = \{y_0, y_1, \dots, y_n\}$. La suite de densités de probabilité $(p_k)_{k \geq 0}$ est appelée filtre optimal. Une remarque importante pour la résolution du problème du filtrage est la suivante : le calcul de p_k peut se faire de manière récursive. En effet, p_k est entièrement déterminé par la donnée de p_{k-1} et de la mesure y_k sous réserve que l'on puisse évaluer la densité de probabilité $\mathbb{P}(y_k | x_k) = g_k(x_k)$ appelée fonction de vraisemblance.

Le calcul récursif de p_k peut alors se décomposer en une étape dite de prédiction et une étape de correction.

Prédiction L'étape de prédiction calcule la loi prédite définie par $p_{k|k-1}(dx) = \mathbb{P}(x_k \in dx | y_{0:k-1})$ à partir de p_{k-1} et de la dynamique du système, caractérisée par le noyau de transition Q_k .

$$p_{k|k-1}(dx) = \int_{\mathbb{R}^d} p_{k-1}(d\hat{x}) Q_k(\hat{x}, dx) \quad (3.16)$$

où \mathbb{R}^d désigne l'espace d'état.

Correction Cette étape permet d'obtenir le filtre p_k en utilisant la mesure y_k pour corriger la loi prédite $p_{k|k-1}$ grâce à la formule de Bayes.

$$p_k = \frac{g_k(x_k) p_{k|k-1}}{\int_{\mathbb{R}^d} g_k(\hat{x}) p_{k|k-1}(d\hat{x})} \quad (3.17)$$

Finalement, l'évolution du filtre optimal se résume par le schéma suivant ;

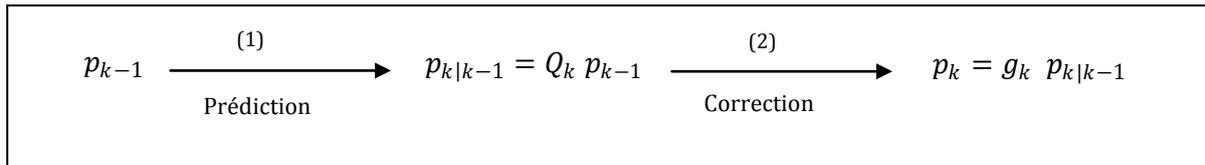


Figure 3.2 : Représentation simplifiée du filtre optimal.

La réalisation des étapes de prédiction et de correction nécessite le calcul d'intégrales multidimensionnelles dont le calcul analytique n'est possible que sous certaines conditions. Par exemple dans le cas d'un modèle linéaire gaussien, on dispose d'expressions exactes grâce à l'algorithme du filtre de Kalman présenté ci-après. De manière générale, il est nécessaire de recourir à des approximations faisant intervenir une simplification du modèle.

III.2 STRUCTURE GENERALE DES TECHNIQUES D'ESTIMATION DE TYPE PREDICTION/CORRECTION

La structure générale des techniques d'estimation présentées dans les sous-sections à venir se divise ainsi : (1) phase d'initialisation, (2) phase d'incrément, (3) phase de propagation (prédiction) et (4) phase de correction. Ces phases sont discutées en détail pour chacune des techniques d'estimation. La [figure 3.3](#) suivante montre cette structure générale

d'estimation ainsi que les différentes versions (*a priori*, *a posteriori*, etc.) des vecteurs d'état et des matrices de covariance.

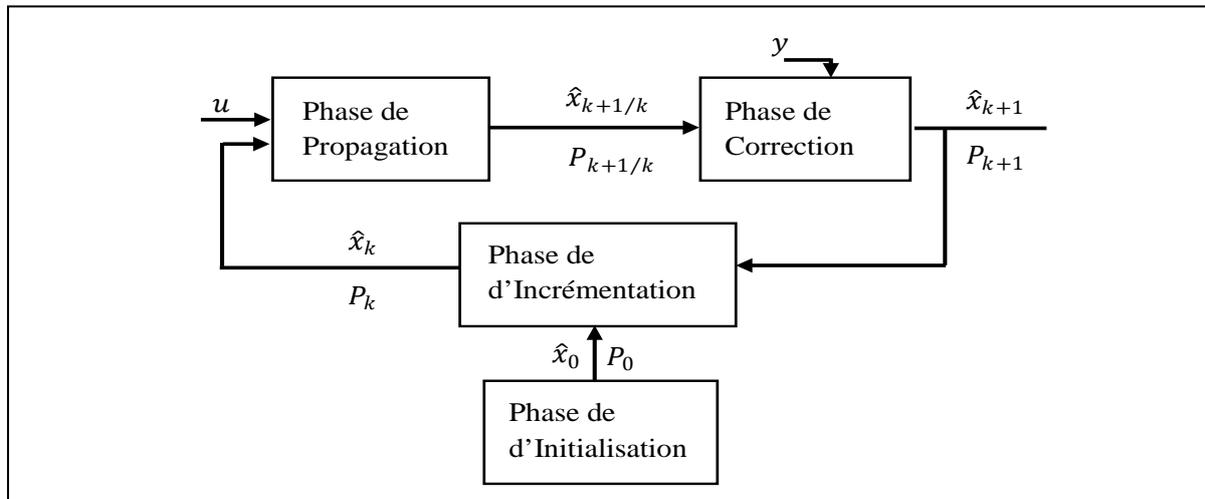


Figure 3.3 : Structure générale des estimateurs d'états.

III.3 METHODES DE RESOLUTION

Dans cette section, nous présentons les principales méthodes proposées pour résoudre le problème de filtrage bayésien. On s'intéresse particulièrement aux filtres de Kalman_Bucy, de Kalman étendu et de Kalman non parfumé. Ce sont les outils les plus communément utilisés par les scientifiques pour résoudre les problèmes de filtrage linéaire et non-linéaire. La présentation se veut précise car nous retrouvons ces méthodes au Chapitre 4.

III.3.1 Le filtre de Kalman (KF)

Le filtre de Kalman (KF) est un outil essentiel pour résoudre les problèmes de filtrage. Version moderne et probabiliste de la méthode des moindres carrés, le filtre de Kalman concerne essentiellement les systèmes linéaires. Le filtre fut développé par Kalman [134] en 1960 pour le cas discret et repris en 1961 par Kalman et Bucy [135] pour le cas continu. On considère que le modèle est linéaire, avec un bruit additif Gaussien et l'observation est une fonction linéaire de l'état entachée d'un bruit additif Gaussien,

$$\begin{cases} x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \\ y_k = H_k x_k + v_k \end{cases}$$

Où

- les matrices F_k , B_k et H_k respectivement de dimension $(dx \times dx)$, $(dx \times 1)$ et $(m \times dx)$ sont des matrices déterministes et connues.

- les bruits d'état et d'observation w_k et v_k à valeurs dans \mathbb{R}^d et \mathbb{R}^m sont des bruits blancs Gaussiens de matrices de covariance respectives Q_k et R_k . Ces bruits sont mutuellement indépendants et indépendants de la condition initiale x_0 .
- la loi initiale x_0 est Gaussienne de moyenne $\mathbb{E}[x_0] = \bar{x}_0$ et de matrice de covariance P_0 .

On montre dans ce cas que le processus $(x_k, y_k)_{k \geq 1}$ est gaussien et que par conséquent les lois conditionnelles p_k sont elles aussi gaussiennes. Le problème est alors de dimension finie. Deux paramètres suffisent à caractériser la densité p_k : sa moyenne \hat{x}_k et sa matrice de covariance P_k . Ces deux quantités sont calculées récursivement et exactement suivant les étapes de prédiction et de correction du filtre de Kalman-Bucy, un algorithme d'estimation de type récursif. La matrice P_k permet de mesurer le degré de fiabilité de l'estimation produit par le filtre, alors que le vecteur \hat{x}_k contient l'estimation. La matrice P_k représente en fait l'espérance mathématique de l'erreur quadratique entre états estimés et états réels du système, alors que le vecteur des états estimés \hat{x}_k représente l'espérance mathématique des états réels du système x_k . Cela est exprimé à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \mathbb{E}[x_k] \\ P_k &= \mathbb{E}[(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Les conditions initiales du filtre sont données par :

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = \bar{x}_0 \\ P_0 = Q_0 \end{cases}$$

Puis \hat{x}_k et P_k sont calculés par les étapes de prédiction et correction suivant les équations :

Equations de prédiction

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1} + B_k \\ P_{k|k-1} = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \end{cases} \quad (3.19)$$

Equations de correction

$$\begin{cases} \hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [y_k - (H_k \hat{x}_{k|k-1})] \\ P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} \\ K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \end{cases} \quad (3.20)$$

Le vecteur y_k contient les mesures prises par les capteurs, alors que le vecteur $\hat{y}_k = (H_k \hat{x}_{k|k-1})$ contient les mesures estimées par le modèle d'observation. Les matrices Q_k et R_k , respectivement de dimension $(d \times d)$ et $(m \times m)$, représentent l'incertitude dans le modèle dynamique et l'incertitude dans le modèle de mesures.

Le terme K_k désigne la matrice des gains de Kalman. La matrice K_k sert à produire une estimation optimale, puisque les gains de Kalman sont calculés de façon à minimiser la covariance de l'erreur d'estimation, soit la matrice P_k . Elle permet d'obtenir la moyenne a posteriori \hat{x}_k et la covariance a posteriori P_k en faisant intervenir la mesure y_k via le terme dit d'innovation $\varepsilon_k = y_k - (H_k \hat{x}_{k|k-1})$. Notons que les matrices $(K_k)_{k \geq 0}$, $(P_k)_{k \geq 0}$ et $(P_{k|k-1})_{k \geq 0}$ ne dépendent pas des mesures $(y_k)_{k \geq 1}$ et peuvent être calculées hors ligne afin de diminuer sensiblement la quantité de calculs à effectuer en temps réel.

Finalement, le filtre KF a l'avantage d'être stable et d'avoir de bonnes performances dynamiques (*i.e.* estimation sans biais, convergence optimal, stabilité, robuste) pour les systèmes linéaires. Il est relativement simple à réaliser et il est possible de démontrer analytiquement sa stabilité, son optimalité et ses performances. Par contre, sa robustesse aux incertitudes et aux bruits est directement dépendante des matrices Q_k et R_k et, en pratique, il est difficile de bien ajuster ces deux matrices de façon à ce qu'elles reflètent bien la réalité. L'inconvénient majeur du filtre KF est qu'il ne s'applique qu'aux systèmes dynamiques linéaires. Dans la réalité, peu de systèmes sont naturellement linéaires, et c'est pourquoi la communauté scientifique travaille encore à développer des techniques d'estimation non-linéaires. L'une des premières techniques d'estimation non-linéaires qui fut développées par les chercheurs est le filtre de Kalman étendu (EKF). Son développement est donc directement issu du filtre KF.

III.3.2 Le filtre de Kalman étendu (EKF)

La version étendue du filtre de Kalman (EKF) [136], [137] est largement appliquée et acceptée par la communauté scientifique comme technique non-linéaire d'estimation d'état. Cette fois ci, le système dynamique est non-linéaire avec des bruits blancs Gaussiens additifs, indépendants entre eux et indépendants de la loi initiale.

$$\begin{cases} x_k = f_k(x_{k-1}) + w_k \\ y_k = h_k(x_k) + v_k \end{cases}$$

Dans le cas où les fonctions matrice f_k et h_k sont dérivables, on peut linéariser les équations de prédictions et de corrections respectivement autour de l'état corrigé \hat{x}_{k-1} et autour de l'état prédit $\hat{x}_{k|k-1}$:

$$\begin{cases} x_k \approx f_k(\hat{x}_{k-1}) + \nabla f_k(\hat{x}_{k-1})(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + w_k \\ y_k \approx h_k(\hat{x}_{k|k-1}) + \nabla h_k(\hat{x}_{k|k-1})(x_k - \hat{x}_{k|k-1}) + v_k \end{cases}$$

où ∇f_k et ∇h_k représentent les matrices jacobiniennes de f_k et h_k . Soit $F_{k-1} = \nabla f_k(\hat{x}_{k-1})$ appelé aussi matrice de transition d'état et $H_k = \nabla h_k(\hat{x}_{k|k-1})$. Le modèle linéarisé est alors le suivant :

$$\begin{cases} x_k = F_k x_{k-1} + f_k(\hat{x}_{k-1}) - \nabla f_k(\hat{x}_{k-1}) \hat{x}_{k-1} + w_k \\ y_k = H_k x_k + h_k(\hat{x}_{k|k-1}) - \nabla h_k(\hat{x}_{k|k-1}) \hat{x}_{k|k-1} + v_k \end{cases} \quad (3.21)$$

On reconnaît ici un problème (localement) conditionnellement gaussien, auquel on applique les deux étapes du filtre de Kalman (3.19) et (3.20). On note qu'ici les matrices de covariance et les gains ne peuvent plus être pré calculés (calculés hors ligne) puisque H_k et F_{k+1} sont fonctions de \hat{x}_k .

L'algorithme du filtre de Kalman étendu est alors le suivant :

Equations de prédiction

$$\begin{cases} F_{k-1} = \nabla f_k(\hat{x}_{k-1}) \\ \hat{x}_{k|k-1} = f_k(\hat{x}_{k-1}) \\ P_{k|k-1} = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_k \end{cases} \quad (3.22)$$

Equations de correction

$$\begin{cases} H_k = \nabla h_k(\hat{x}_{k|k-1}) \\ K_k = P_{k|k-1} H_k^T [H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k [y_k - h_k(\hat{x}_{k|k-1})] \\ P_k = [I - K_k H_k] P_{k|k-1} \end{cases} \quad (3.23)$$

Le filtre EKF est extrêmement populaire en estimation de systèmes dynamiques. Il est avantageux par la simplicité de sa mise en œuvre, sa rapidité en temps de calcul, sa faible

complexité algorithmique et sa performance pour beaucoup de problème non-linéaire. Cependant, dès que les non-linéarités deviennent trop fortes ou si le problème est mal initialisé, le filtre EKF peut fournir des résultats mauvais.

Pour la première fois en 1994, une méthode novatrice a été proposée pour calculer la moyenne et la covariance d'une distribution gaussienne et plus tard, pour n'importe quel type de distribution. Cette nouvelle méthode a été développée par JULIER et ULHMANN [138] [139]. Cette méthode évite la linéarisation du premier ordre de la série de Taylor, qui cause la principale limitation du filtre EKF. Le nouveau filtre lié à cette méthode s'est avéré plus précis, à un niveau au moins égal de complexité que le filtre EKF. Cette méthode novatrice est nommée transformée non-parfumée (UT pour Unscented Transform). Le nouveau filtre qui en découle de cette technique est présenté dans la section suivant.

III.3.3 Le filtre de Kalman non parfumé ou sans biais (UKF)

Dans les activités de recherche de JULIER [138-140], une nouvelle technique d'estimation qui est basée sur les équations de Kalman, le filtre de Kalman non-parfumé (UKF), a été développée. C'est une autre extension du filtre de Kalman aux systèmes non-linéaires. Cette méthode, qui utilise les transformées non-parfumées (UT), est issue du domaine des statistiques qui manipulent des variables aléatoires qui ont subi une transformation non-linéaire. Les UT sont employés seulement pour la phase de prédiction du filtre UKF.

Comme pour le filtre EKF la densité conditionnelle est supposée être une gaussienne qui sera maintenant caractérisée par un ensemble de $(2n + 1)$ points soigneusement choisis (*sigma points*). Ils sont alors propagés grâce à la vraie équation dynamique non-linéaire du système. Ils permettent d'évaluer précisément la moyenne et la matrice de covariance de l'état prédit (avec une précision d'ordre 3 de Taylor) [140] [141]. Contrairement au filtre EKF, l'algorithme du filtre UKF n'utilise pas explicitement le calcul du gradient des équations du système. Les approximations sont basées sur les interpolations des équations du système avec les *sigma-points*.

Principe de la Transformation Unscented (UT)

La transformée non-parfumée (UT) a été développée à partir de l'hypothèse qu'il est plus facile d'approximer une distribution gaussienne que d'approximer une fonction non-linéaire arbitraire [138][139]. La motivation principale pour développer cette méthode était d'améliorer

les principales limitations du filtre EKF, causées par la linéarisation et les difficultés d'implémentation.

Soit \mathcal{X} une variable aléatoire de dimension n ayant pour moyenne $\bar{\mathcal{X}}$ et matrice de covariance $P_{\mathcal{X}}$. Soit \mathcal{Y} une variable aléatoire fonction non-linéaire de ($\mathcal{Y} = \mathcal{G}(\mathcal{X})$). L'objectif de l'UT est de calculer précisément la moyenne et la matrice de covariance de \mathcal{Y} . On construit $(2n + 1)$ vecteurs \mathcal{X}_i (*sigma points*) de poids w_i de manière déterministe suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{X}_0 = \bar{\mathcal{X}} \\ \mathcal{X}_i = \bar{\mathcal{X}} + (\sqrt{(n + \lambda)P_{\mathcal{X}}})_i, \quad i = 1, \dots, n \\ \mathcal{X}_i = \bar{\mathcal{X}} - (\sqrt{(n + \lambda)P_{\mathcal{X}}})_i, \quad n + 1, \dots, 2n \\ w_0^{(m)} = \lambda / (n + \lambda) \\ w_0^{(c)} = \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ w_i^{(m)} = w_i^{(c)} = 1/2(n + \lambda) \quad i = 1, \dots, 2n \end{array} \right. \quad (3.24)$$

avec $\lambda = (\alpha^2(n + \kappa) - n)$ un facteur d'échelle qui est fonction du paramètre α . Celui-ci contrôle la répartition des points \mathcal{X}_i autour de la moyenne $\bar{\mathcal{X}}$. α prend en général des petites valeurs. κ est un second facteur d'échelle, qui est pris égal à 0 habituellement. β est un paramètre qui est lié au type de distribution de \mathcal{X} (pour une distribution Gaussienne, $\beta = 2$).

$\sqrt{(n + \lambda)P_{\mathcal{X}}}^i$ est la $i^{\text{ème}}$ colonne de la décomposition de Cholesky de la matrice $(n + \lambda)P_{\mathcal{X}}$.

Les vecteurs \mathcal{X}_i sont propagés selon la fonction non-linéaire \mathcal{G} :

$$\mathcal{Y}_i = \mathcal{G}(\mathcal{X}_i) \quad i = 0, \dots, 2n \quad (3.25)$$

La moyenne et la matrice de covariance de la variable aléatoire \mathcal{Y} sont donnés par :

$$\bar{\mathcal{Y}} \approx \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(m)} \mathcal{Y}_i \quad (3.26)$$

$$P_{\mathcal{Y}} \approx \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\mathcal{Y}_i - \bar{\mathcal{Y}})(\mathcal{Y}_i - \bar{\mathcal{Y}})^T \quad (3.27)$$

La [figure 3.4](#) montre le principe général de la transformée UT.

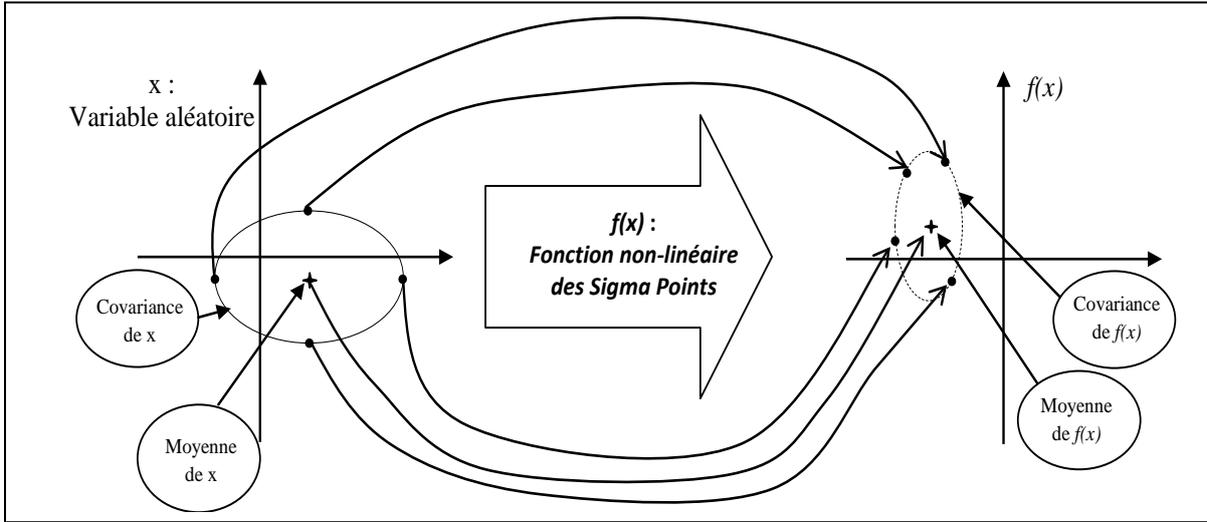


Figure 3.4 : Principe général de la transformée non-parfumée.

L'algorithme du Filtre UKF :

Le filtre de Kalman sans biais est un filtre de Kalman étendu (EKF) dans lequel la phase de prédiction linéaire a été remplacée par la transformation UT. La variable aléatoire x_k^a de dimension ($d_a = 2n + 1$) est définie comme la concaténation de la variable d'état x_k , et des variables du bruit d'état et de mesure w_k et v_k respectivement. $x_k^a = (x_k, w_k, v_k)^T$. Le filtre UKF calcule donc à chaque instant la moyenne conditionnelle \bar{x}_k et la variance a posteriori P_k .

$$\text{On pose } P_k^a = \text{Cov}(x_k^a | y_{0:k}) = \begin{pmatrix} P_k & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix}.$$

Initialisation

$$\begin{cases} \bar{x}_0 = \mathbb{E}[x_0] \\ P_0 = \mathbb{E}[(x_0 - \bar{x}_0)(x_0 - \bar{x}_0)^T] \\ \bar{x}_0^a = \mathbb{E}[x_0^a] = [\bar{x}_0 \ 0 \ 0]^T \\ P_0^a = \mathbb{E}[(x_0^a - \bar{x}_0^a)(x_0^a - \bar{x}_0^a)^T] \end{cases} \quad (3.28)$$

Pour $k = 1 \dots n$

Calcul des sigma-points

$$x_{k-1}^{a,i} = \left[\bar{x}_{k-1}^a \quad \bar{x}_{k-1}^a \pm \sqrt{(d_a + \lambda) P_{k-1}^{a,i}} \right], \quad i = 1, \dots, 2d_a \quad (3.29)$$

Où $\sqrt{(d_a + \lambda) P_{k-1}^{a,i}}$ représente la $i^{\text{ème}}$ de la décomposition de Cholesky de $(d_a + \lambda) P_{k-1}^{a,i}$.

Equations de prédiction

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i} = f_k(\mathcal{X}_{k-1}^{x,i}, \mathcal{X}_{k-1}^{w,i}) \\ \bar{\mathcal{X}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2d_a} w_i^{(m)} \mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i} \\ P_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2d_a} w_i^{(c)} (\mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i} - \bar{\mathcal{X}}_{k|k-1})(\mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i} - \bar{\mathcal{X}}_{k|k-1})^T \\ \mathcal{Y}_{k|k-1}^i = h_k(\mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i}, \mathcal{X}_{k|k-1}^{v,i}) \\ \bar{\mathcal{Y}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2d_a} w_i^{(m)} \mathcal{Y}_{k|k-1}^i \end{array} \right. \quad (3.30)$$

Equations de correction

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{k|k-1}^{yy} = \sum_{i=0}^{2d_a} w_i^{(c)} (\mathcal{Y}_{k|k-1}^i - \bar{\mathcal{Y}}_{k|k-1})(\mathcal{Y}_{k|k-1}^i - \bar{\mathcal{Y}}_{k|k-1})^T \\ P_{k|k-1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2d_a} w_i^{(c)} (\mathcal{X}_{k|k-1}^{x,i} - \bar{\mathcal{X}}_{k|k-1})(\mathcal{Y}_{k|k-1}^i - \bar{\mathcal{Y}}_{k|k-1})^T \\ K_k = P_{k|k-1}^{xy} P_{k|k-1}^{yy}{}^{-1} \\ \bar{\mathcal{X}}_k = \bar{\mathcal{X}}_{k|k-1} + K_k (\mathcal{Y}_k - \bar{\mathcal{Y}}_{k|k-1}) \\ P_k = P_{k|k-1} - K_k P_{k|k-1}^{yy} K_k^{-1} \end{array} \right. \quad (3.31)$$

Le filtre UKF est plus robuste aux non-linéarités que le filtre EKF, et il ne demande aucune linéarisation de modèle, ce qui ne demande aucun calcul explicite de gradient. De plus, le coût de calcul du filtre UKF est quasiment identique à celui du filtre EKF. Dans les applications où la dynamique est fortement non-linéaire, ce filtre donne de meilleurs résultats que le filtre EKF. Les seules limitations du filtre EKF que le filtre UKF n'améliore pas sont la charge de calcul et la taille du modèle. Cependant, pour la taille du modèle, le filtre UKF se situe au moins au même niveau que le filtre EKF.

III.4 FORMULATION D'ESPACE D'ETAT POUR LA LOCALISATION ET LE SUIVI DES SOURCES D'EA

En localisation et suivi des sources d'EA, la variable d'état x_k est formulée en tant que paramètres d'emplacement d'intérêt. La fonction $f_k(\cdot)$ dans l'équation (3.11) définit donc le

modèle supposé du mouvement de la source d'EA. La variable de mesure y_k , en revanche, peut être formulée comme une mesure TDOA présentée à la section I.3.5.2. du Chapitre 1. La fonction de mesure $h_k(\cdot)$ dans l'équation (3.12) définit la relation entre y_k et x_k . Etant donné qu'il existe un modèle pour formuler $f_k(\cdot)$ et un modèle pour formuler $h_k(\cdot)$, Une combinaison au total peut être dérivée.

Dans notre travail, l'état du système x_k se compose de trois paramètres, l'emplacement de la source d'EA (x_s, y_s) et la vitesse de groupe de l'onde de Lamb (V_g). La différence de temps d'arrivée Δt_{mi} représente le vecteur de mesure $y_k = [(\Delta t_{mi})_k]_{n-1}$, $n \geq 3$. L'idée clé sous-jacente à l'approche proposée est que l'emplacement de la source d'EA peut être considéré comme un point à fluctuation lente. En plus, comme l'état x_k n'a pas de bruit superposé, Q_k est considéré comme nul. Il est à noter que lors de l'itération d'estimation du vecteur d'état x_k le vecteur de mesure reste inchangé parce que ses $(n - 1)$ composantes (différence des temps d'arrivée) peuvent être considérées comme constantes une fois que les signaux d'EA ont été acquis. L'incertitude du vecteur de mesure y_k est modélisée comme un bruit gaussien blanc de moyen nul avec une matrice de covariance R avec des termes diagonaux définis dans l'équation (2.21).

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta t_{m*1}}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_{\Delta t_{m(n-1)}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Le filtre EKF ou UKF corrigera itérativement la connaissance *a priori* du vecteur d'état \hat{x}_k et de la matrice de covariance P_k , par rapport aux y_k et R .

Le processus d'itération démarre par l'initialisation de l'estimation vectorielle d'état \hat{x}_0 et de sa matrice de covariance P_0 .

$$\hat{x}_0 = [\hat{x}_{s0} \quad \hat{y}_{s0} \quad \hat{V}_{g0}] \quad P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x_{s0}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_{s0}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{V_{g0}}^2 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Les estimations de départ de l'emplacement de la source d'EA, \hat{x}_{s0} et \hat{y}_{s0} peuvent être calculés par des considérations géométriques. À partir de cette supposition, la moyenne et la variance pour une distribution uniforme non corrélée peuvent être exprimées comme suit :

$$\hat{x}_{s_0} = \frac{(x_{sU} + x_{sL})}{2}, \quad \hat{y}_{s_0} = \frac{(y_{sU} + y_{sL})}{2} \quad (3.34)$$

$$\sigma_{x_{s_0}}^2 = \frac{1}{12} (x_{sU} - x_{sL})^2, \quad \sigma_{y_{s_0}}^2 = \frac{1}{12} (y_{sU} - y_{sL})^2 \quad (3.35)$$

Avec x_{sL} , y_{sL} sont respectivement les valeurs minimales de l'abscisse et de l'ordonnée des positions des capteurs et x_{sU} , y_{sU} les valeurs maximales de l'abscisse et de l'ordonnée des positions des capteurs [96].

Dans l'ensemble, les approches proposées pour estimer l'emplacement et suivre le mouvement séquentiel des sources d'EA se compose de deux étapes; la première étape fournit des informations sur les TOA, la fréquence et leurs incertitudes ; la deuxième étape utilise des informations *a priori* sur le vecteur d'état et corrige itérativement le vecteur d'état en fonction des informations mesurées obtenues à partir de la première étape.

IV. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons introduit et défini le problème du filtrage et son application à l'estimation de l'état d'un système. Nous avons décrit les deux principales méthodes d'estimation d'état non-linéaire utilisées dans notre thèse ; à savoir, le filtre de Kalman étendu (EKF) et le filtre de Kalman sans biais (UKF). Ces techniques présentées dans ce chapitre sont utilisés dans le cadre de validation expérimentale qui fait l'objet du Chapitre 4. En effet, la phase expérimentale de ce travail va maintenant permettre d'observer la performance de ces méthodes probabilistes pour l'analyse de signaux réels issus d'un milieu de propagation homogène puis d'un milieu complexe.

Le filtre de Kalman étendu est le filtre par excellence des scientifiques, il donne de très bons résultats dans le cadre des systèmes à espace d'état faiblement non-linéaires. Mais lorsque les systèmes sont fortement non-linéaires, les performances du filtre EKF sont mauvaises. Le filtre de Kalman sans biais améliore la précision de l'estimation de l'état par rapport au filtre EKF tout en se montrant plus robuste.

VALIDATIONS
EXPERIMENTALES

CHAPITRE 4 : VALIDATIONS EXPERIMENTALES

I. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de valider expérimentalement les performances des approches proposées sur différents corps d'épreuve pour la localisation et le suivi de la propagation, de l'évolution des mécanismes d'endommagement source d'émission acoustique (EA). Pour répondre à ces objectifs, 3 types d'essais en laboratoire ont été menés : une rupture de mine sur une plaque de cuivre, un essai de traction sur une plaque d'aluminium et un essai de flexion 3 points sur une éprouvette en béton. Ce chapitre décrit les différents matériaux étudiés, il présente les protocoles expérimentaux relatifs aux essais mécaniques effectués et les géométries des éprouvettes adoptées. Par la suite, il présente le comportement mécanique observé au cours des différents types d'essais. Enfin, une étude des performances statistiques des estimateurs est menée sur des signaux artificiels, puis sur des signaux réels. Les essais expérimentaux concernent des pièces de géométrie type éprouvette. La géométrie des éprouvettes utilisées expérimentalement peut s'apparenter à des plaques ou à des poutres. Le choix des paramètres d'acquisition utilisés est justifié.

Les outils de traitement du signal (transformée de Fourier, transformée d'ondelette continue, filtre de Kalman étendu, etc.) utilisés pour analyser les résultats permettent d'estimer itérativement l'emplacement des signaux expérimentaux de source d'EA.

D'un côté, la transformée d'ondelette continue à base de l'ondelette de Morlet complexe est utilisée pour calculer les temps d'arrivées des ondes de propagation mécaniques dans les pièces de géométries différentes. D'un autre côté, la localisation et le suivi des sources d'EA est réalisée à l'aide des méthodes à base du filtre EKF ou à base du filtre UKF. L'objectif ici est de valider expérimentalement l'utilisation de ces deux méthodes probabilistes. Cependant, dans un premier temps, un protocole est mis en place pour valider les performances de ces méthodes par des signaux simulés à l'aide d'une rupture de mine de crayon (PLB), à la surface d'une éprouvette en forme de plaque.

Compte tenu des mesures de différences de temps d'arrivées (TDOA), l'estimation de l'emplacement des sources d'EA sont obtenues pour un ensemble de périodes de temps indépendantes sans considérer aucune relation entre des périodes adjacentes. Par contre, le

problème de suivi des sources d'EA peut être considéré comme un problème de fusion de mesures. Il prend en compte la cohérence temporelle des mesures TDOA sur des périodes successives, de sorte que les mesures non fiables peuvent être filtrées, conduisant à une estimation de position plus précise.

II. PRESENTATION DES SOURCES ARTIFICIELLES ET REELLES, UTILISEES LORS DES VALIDATIONS EXPERIMENTALES

Dans un but de validation, des sources artificielles sont générées. Une source artificielle est une source générée par l'expérimentateur pour simuler une source d'EA. Contrairement à une source réelle, elle est générée en surface ou à l'intérieure du matériau. Cela permet à l'expérimentateur de maîtriser parfaitement le moment auquel il génère la source et sa localisation. C'est un avantage pour une validation expérimentale puisque cela permet d'utiliser les mêmes paramètres lors de la simulation et de la validation. Ces sources sont présentées dans un premier temps.

Une fois la validation effectuée, des sources réelles d'EA ayant différentes caractéristiques sont générées au sein d'un matériau par une sollicitation mécanique. Ces sources sont présentées dans un second temps.

II.1 SOURCES D'EA ARTIFICIELLES UTILISÉE

La source d'EA artificielle est produite par la rupture d'une mine de crayon (PLB) en graphite (figure 1.6, Chapitre 1). Cette rupture engendre un signal très énergétique. C'est une source intéressante pour effectuer une validation expérimentale puisqu'elle a déjà été largement étudiée [143-146]. On en connaît donc suffisamment bien les paramètres temporels et spatiaux. La rupture de mine est une source artificielle en surface du matériau, et peu étendue. Elle peut être modélisée par une source ponctuelle.

II.2. SOURCES D'EA GÉNÉRÉES PAR DES SOLLICITATIONS MECANIQUES

Des sources « réelles » sont générées en utilisant des dipôles de force sur le matériau. Ce type d'endommagement étant moins contrôlable par l'expérimentateur. On considérera les sources comme ponctuelles (voir Chapitre 1). Bien que les sources réelles d'EA soient en réalité plus complexes, cette réduction des sources à des sources ponctuelles peut s'avérer suffisante dans certains cas [147]. De plus, dans ce travail l'accent est mis sur la détection et la localisation plus que sur la modélisation de la source en elle-même.

III. VALIDATION DES APPROCHES PROPOSEES POUR LA LOCALISATION DES SOURECS D'EA GÉNÉRÉES PAR DES RUPTURES DE MINES DE CRAYON

Cette première phase a pour but de valider expérimentalement les méthodes de traitement du signal proposées, permettant l'estimation de l'emplacement et la propagation des impacts sources d'EA dans une plaque en cuivre [164]. Le choix du cuivre comme milieu de propagation est basé sur le fait qu'on dispose d'une connaissance a priori de ses propriétés physiques. Cet échantillon a été instrumenté avec quatre capteurs piézoélectriques collés en surface.

Expérimentalement, pour limiter au maximum l'influence des conditions aux limites, les éprouvettes en cuivre reposent sur des supports en polystyrène au niveau de leurs extrémités. Les mines de crayon utilisées pour les ruptures sont des mines 2H de diamètre 0,5 mm. La longueur de mine est de 4 mm et fait un angle de 45° avec la surface de l'éprouvette. La mine est cassée dans plusieurs endroits choisis arbitrairement à la surface de l'éprouvette en cuivre (figure 4.1).

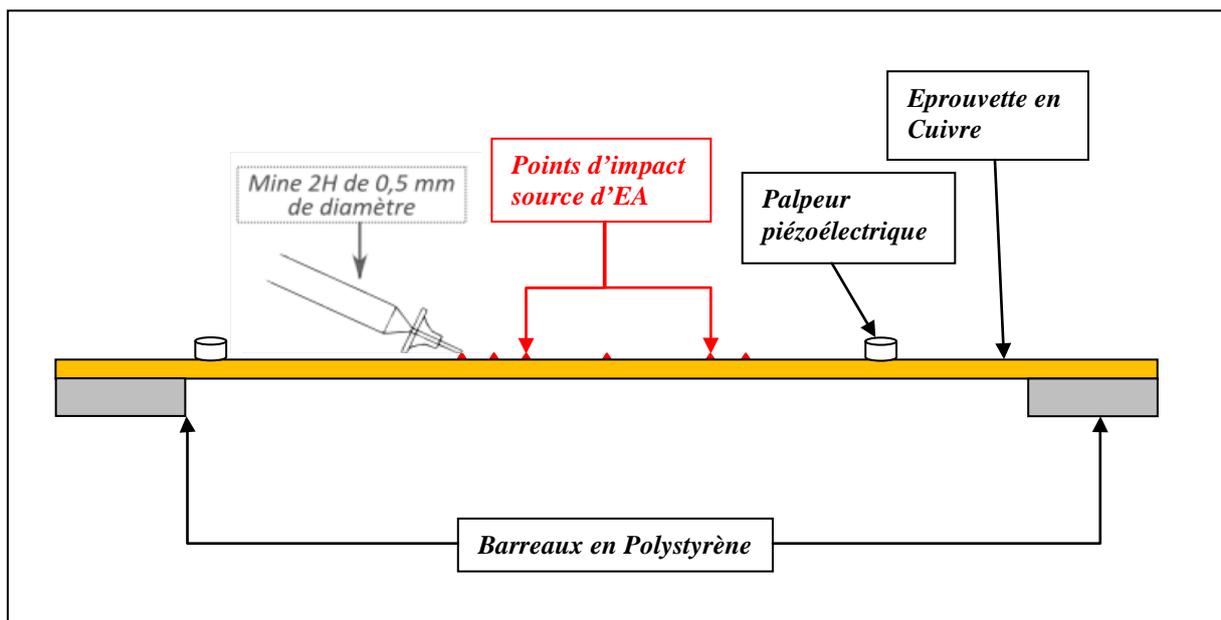


Figure 4.1 : Représentation schématique du protocole expérimental utilisé pour valider les signaux simulés associés à une rupture de mine.

La propagation des ondes dans une plaque est différente de celle dans les matériaux massifs. Etant donné la plaque de cuivre utilisée est suffisamment mince, des ondes résultantes dites ondes de Lamb ont la particularité de mettre en mouvement la totalité de l'épaisseur de la

plaque et elles se propagent sous la forme de modes symétriques et antisymétriques avec des vitesses différentes. Par ailleurs, la position de la source dans l'épaisseur a elle aussi une influence. Lorsqu'elle est située dans le plan médian de la plaque seuls les modes symétriques sont sollicités, en revanche lorsqu'elle est située près de la surface seuls les modes antisymétriques sont sollicités, enfin lorsqu'elle n'est ni située à la surface ni dans le plan médian, les deux types de modes (A et S) sont sollicités. A partir de la théorie classique des plaques élastiques mince [148], la vitesse de l'onde de mode symétrique S_0 est $V_{S_0}(\omega) = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$

et la vitesse de l'onde de mode antisymétrique A_0 est $V_{A_0}(\omega) = 2 \left[\frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)} \omega^2 \right]^{1/4}$.

où ρ , E et ν sont la densité, le module de Young et le coefficient de poisson, respectivement.

L'estimation de la vitesse de groupe d'onde \hat{V}_{g_0} du départ et de sa variance $\sigma_{V_{g_0}}^2$ peuvent être calculés soit par la simulation de Monté Carlo, soit par la transformation non parfumée (UT) ou par une méthode analytique. Dans notre cas, elle a été calculée par la simulation de Monté Carlo, une méthode de calcul des statistiques d'une variable aléatoire qui subit une transformation non-linéaire. La fréquence f_i a été considérée comme une variable aléatoire gaussienne de moyenne et de variance définie par les équations (2.20) et (2.22), respectivement. Nous sommes intéressés à déterminer la densité de probabilité de V_{g_0} étant donné la densité de probabilité de fd (l'épaisseur de la plaque d est déterministe).

Puisque la rupture d'une mine de plomb (source d'EA) est effectuée à la surface du matériau, le mode antisymétrique est le mode de l'onde de Lamb le plus sollicité et le plus dominant. La vitesse de groupe de cette plaque est $V_{g_{A_0}}$ et elle est obtenue numériquement. La simulation de Monte Carlo a été effectuée en générant de façon aléatoire 200 000 échantillons de la variable aléatoire fd , ensuite la vitesse de groupe d'onde spécifiée \hat{V}_{g_0} et sa variance $\sigma_{V_{g_0}}^2$ correspondante initiales sont déterminées.

L'acquisition des signaux d'EA est effectuée à l'aide de la chaîne d'acquisition EA. Une fois l'acquisition terminée, les signaux sont importés dans MATLAB. Dans l'ensemble, l'objectif de notre travail de recherche dans cette partie comprend deux étapes ; la première étape fournit des informations sur le temps d'arrivée, la fréquence dominante et leurs incertitudes. La seconde étape utilise des informations *a priori* sur les états et estime de manière itérative et en continu le vecteur d'état en fonction des informations mesurées obtenues à partir de la première étape.

Les impacts séquentiels générés par les ruptures de mines de crayon représentent l'évolution d'un défaut (ex. fissure) qui est choisie de forme arbitraire. Le temps entre deux impacts successifs est suffisant, de telle sorte que l'énergie de l'onde réfléchiée par l'impact précédent est bien inférieure à celle de l'onde actuelle, ce qui minimise l'effet de chevauchement entre les événements d'impact successifs.

III.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les expériences ont été réalisées sur une chaîne d'acquisition d'émission acoustique, type Mistras au sein de l'équipe Ultrasons du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM). Les multiples impacts (sources d'EA artificielles) sont appliqués à l'aide d'une rupture d'un crayon en plomb 0,5 mm sur une plaque de cuivre de dimensions latérales 570 x 470 mm² et 3 mm d'épaisseur et leurs coordonnées sont listées dans le [Tableau 4.1](#). Quatre capteurs piézoélectriques sont fixés sur la plaque pour mesurer les ondes générées par les ruptures de mine, notées par S1 à S4. L'origine du système de coordonnées est définie pour coïncider avec le capteur S1 et les coordonnées des capteurs sont répertoriées dans le [Tableau 4.2](#).

Pour l'acquisition des données, différents réglages du système sont effectués grâce au test Hsu-Nielsen [146]. Parmi ces paramètres de réglage, nous trouvons les fenêtres d'acquisition temporelles glissantes (PDT, HDT et HLT), le seuil d'acquisition qui est ajusté en fonction du bruit environnant. Une fréquence d'échantillonnage de 5 MHz a été utilisée et les signaux ont été amplifiés de 40 dB avant d'être numérisés par le système d'acquisition de données (Mistras). La photographie du dispositif de mesure est présentée sur la [figure 4.2](#). Le traitement des signaux reçus a été effectué avec un PC exécutant le code logiciel MATLAB que nous avons généré.

Impacts	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Coordonnées (mm)	(75, 80)	(85, 80)	(95, 80)	(80, 100)	(80, 75)	(80, 43)	(80, 24)

Tableau 4.1 : Coordonnées des sept impacts sur la plaque en cuivre.

Capteurs	S1	S2	S3	S4
Coordonnées (mm)	(0, 0)	(0, 140)	(200, 140)	(200, 0)

Tableau 4.2 : Coordonnées des capteurs sur la plaque en cuivre.

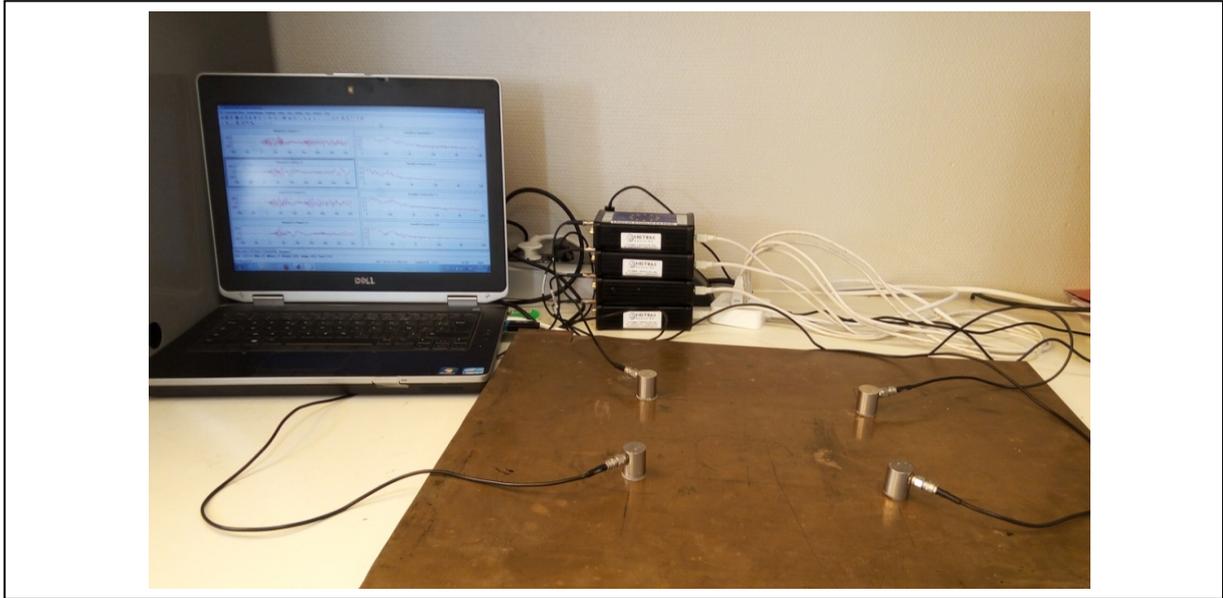


Figure 4.2 : Dispositif de mesure EA.

Pour générer préférentiellement le mode de l'onde de Lamb antisymétrique (A_0), la mine de plomb a été fracturée à la surface de la plaque [126] [149]. La vitesse de groupe des ondes dispersives est obtenue numériquement avec des valeurs de $\rho = 8920 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.33$ et $E = 128 \text{ GPa}$. Les paramètres de l'ondelette de Morlet Complexe qui donnent une bonne transformation dans notre cas ont été fixés par essais à ($f_c = 1.6 \text{ Hz}$, $f_b = 0.8 \text{ Hz}$).

L'emplacement initial gaussien a été calculé sur la base des équations (3.34) et (3.35) où la borne inférieure x_{sL} , y_{sL} est l'emplacement du capteur maître (S1) situé à l'origine du système de coordonnées et la borne supérieure x_{sU} , y_{sU} est l'emplacement du Capteur 3 (S3). L'emplacement initial gaussien est uniquement utilisé pour effectuer la localisation de la source du premier point d'impact.

III.2 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans cette section, nous montrons les résultats de l'application du filtre EKF pour localiser et suivre en continu le mouvement séquentiel des multiples impacts (sources d'EA).

III.2.1 Représentation temporelle des signaux d'EA

Nous avons réalisé sept (07) points d'impacts en succession sur la surface de la plaque qui ont générés à leurs tours sept ondes dispersives. En suppose que les points d'impacts générés d'une façon successive par des ruptures des mines de plomb représentent l'évolution d'un défaut

(i.e. une fissure) et qui est de forme arbitraire. Le temps d'arrêt marqué entre deux impacts consécutif est grand de telle sorte que l'énergie de l'onde réfléchie de l'impact précédent est bien inférieure à celle de l'onde présente, ce qui minimise ou supprime l'effet de chevauchement entre les événements d'impacts successifs. La [figure 4.3](#) montre les formes d'onde des signaux d'EA émises par l'impact I2 et reçus par les quatre capteurs (le point d'impact I2 est choisi au hasard). Les signaux obtenus sont de type résonnant et caractérisés par un temps de montée rapide et une longue durée.

Le choix de la représentation est un paramètre décisif dans toute stratégie basée sur l'analyse des signaux non stationnaires. Un tel choix vise à fixer un espace de variance permettant une représentation adéquate de l'information significative portée par le signal, facilitant ainsi son extraction. Pour un traiteur du signal, le rôle d'une représentation est de trouver le meilleur moyen de mettre en avant certaines informations. Ainsi, il devient évident que la manière dont l'information est représentée peut fortement influencer la facilité de son extraction. Les techniques de la transformée en ondelette, présentées aux Sections III.4 et III.5. du Chapitre 2, sont alors appliquées afin de calculer le TOA des signaux d'EA mesurés. Pour calculer les coefficients CWT, on a sélectionné un vecteur de fréquence sur la bande de fréquence sensible du capteur d'EA.

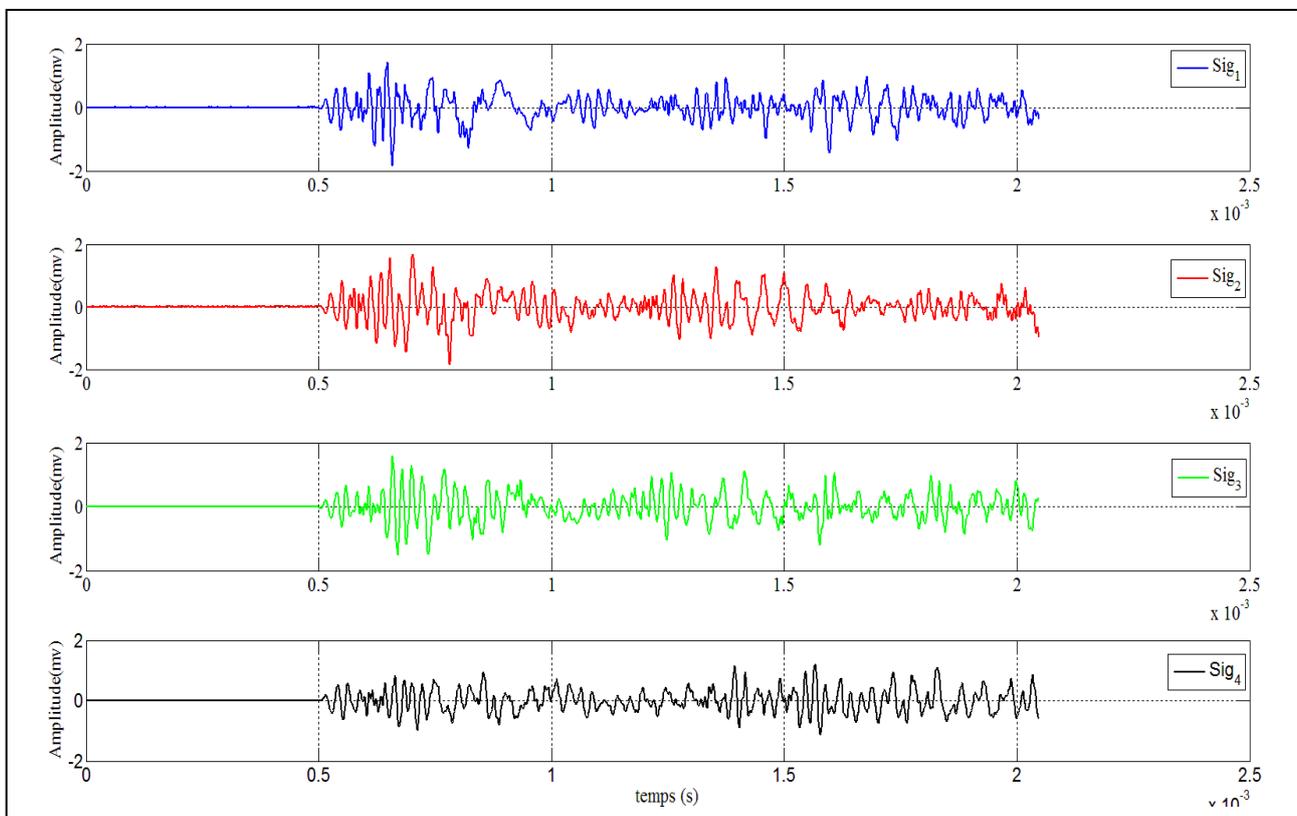


Figure 4.3 : Formes d'onde des signaux d'EA générés par une rupture de mine sur la plaque de Cuivre.

Les figures 4.4 (a) et 4.5 (a) montrent l'évolution des signaux expérimentaux générés par une rupture de mine (choix de deux points d'impact I2 et I7). On constate que les signaux sont affectés par des réflexions des extrémités de l'éprouvette et des bords latéraux. Cela est vrai sur l'intervalle $[0 - 400] \mu\text{s}$ sur lequel le signal est moins affecté par les réflexions (figures 4.4 (b) et 4.5 (b)).

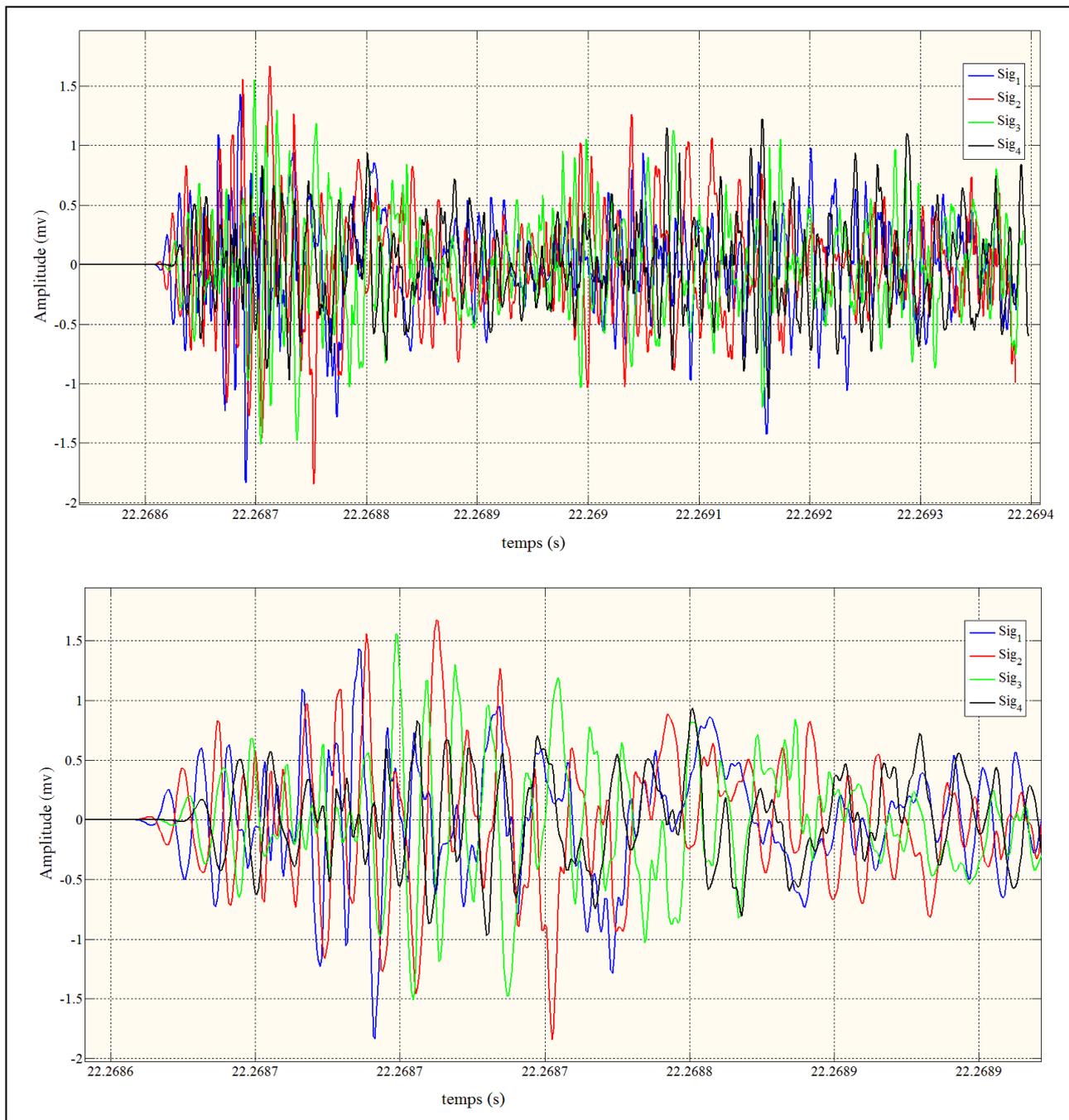


Figure 4.4 : Comparaison des signaux expérimentaux du même impact I2 dans l'éprouvette de Cuivre. Le signal d'excitation est une rupture de mine. (a) signal complet. (b) zoom sur l'intervalle $[0 - 400] \mu\text{s}$.

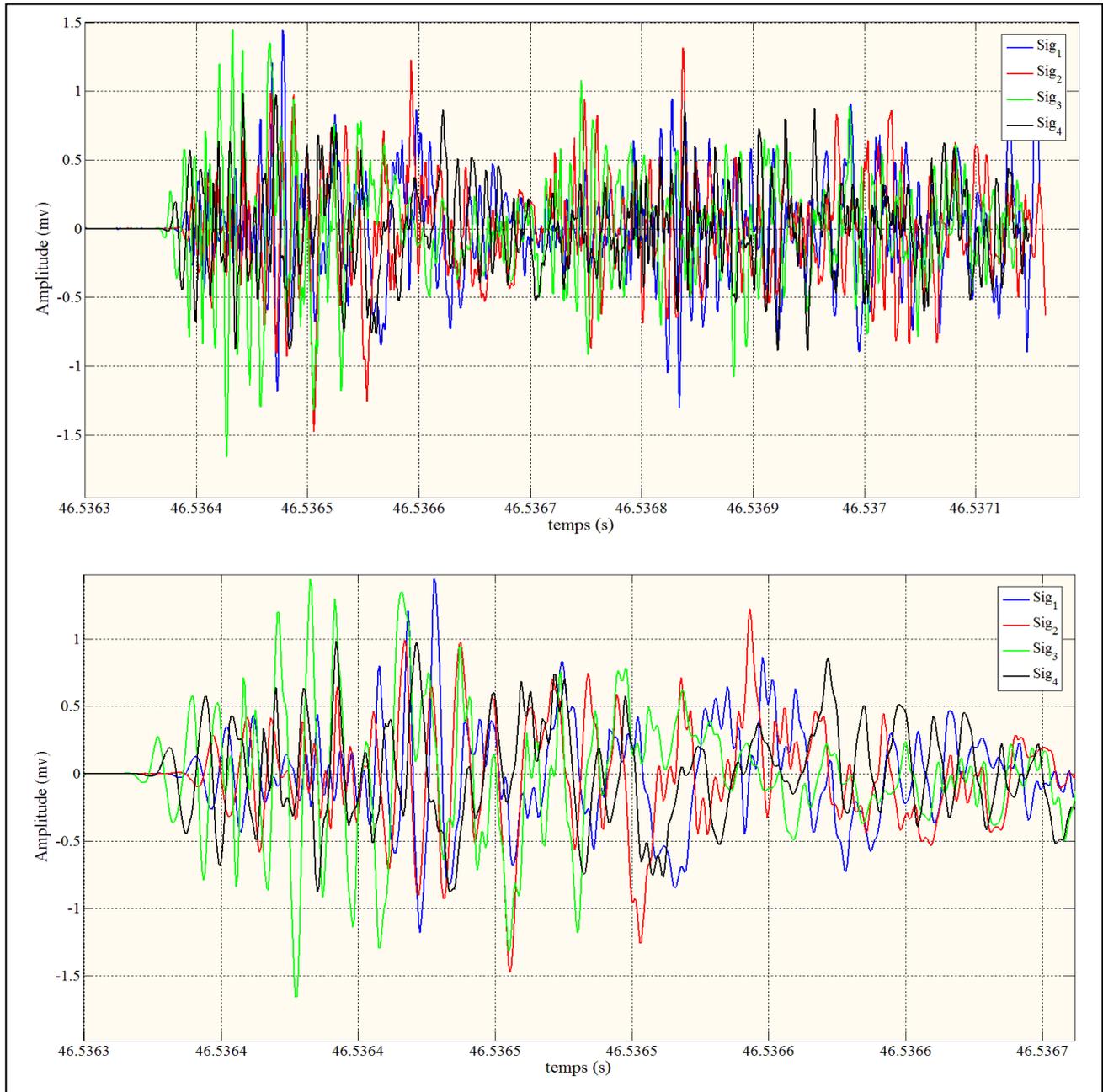


Figure 4.5 : Comparaison des signaux expérimentaux du même impact 17 dans l'éprouvette de Cuivre. Le signal d'excitation est une rupture de mine. (a) signal complet. (b) zoom sur l'intervalle [0 - 400] μ s.

III.2.2 Analyse temps-fréquence des signaux d'EA

L'analyse temps-fréquence utilisant une CWT a des incertitudes inhérentes dans la localisation du temps et de la fréquence causée par l'inégalité de Heisenberg. La figure 4.6 montre les incertitudes en temps et en fréquence de l'ondelette de Morlet Complexe utilisée dans cette étude ($f_c = 1.6 \text{ Hz}$, $f_b = 0.8 \text{ Hz}$). Les équations (2.19) et (2.20) sont utilisées pour calculer ces incertitudes. Comme on peut le voir sur la figure, l'incertitude sur la résolution en

fréquence augmente aux fréquences plus élevées, tandis que l'incertitude sur la résolution en temps diminue.

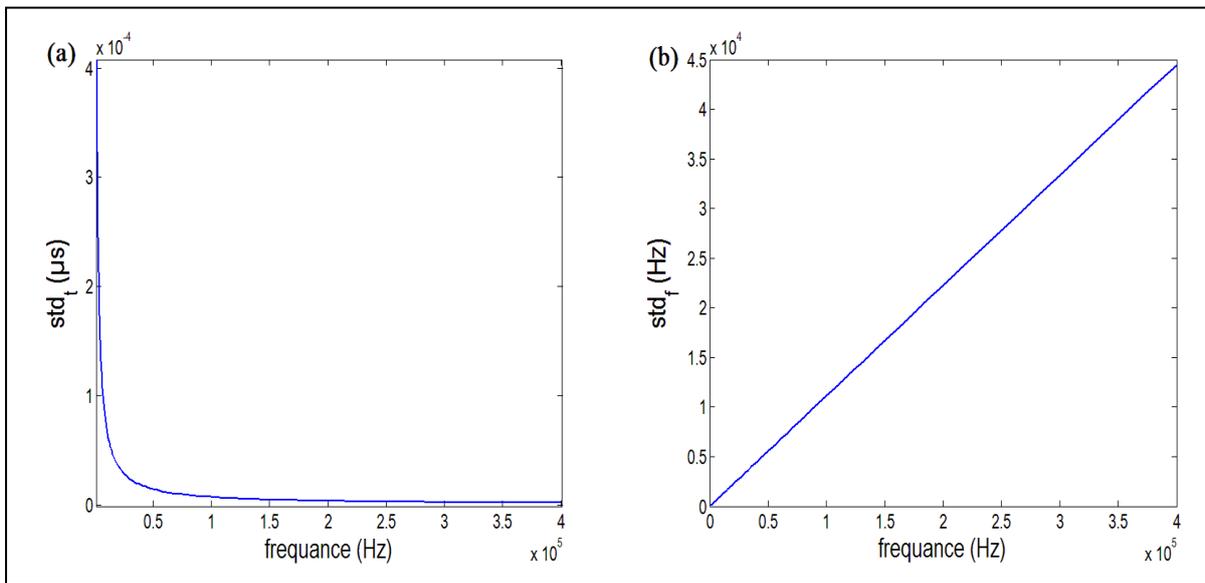


Figure 4.6 : Incertitude dans la résolution (a) en temps et (b) en fréquence de l'ondelette de Morlet Complexe ($f_c = 1.6 \text{ Hz}$, $f_b = 0.8 \text{ Hz}$).

D'une manière générale, l'analyse en ondelettes offre une plus grande souplesse d'utilisation puisque le choix des facteurs d'échelle, déduits de l'ondelette analysante, est laissé au soin de l'opérateur.

La [figure 4.7](#) montre la représentation temps-fréquence issue des CWT des signaux d'une source d'EA ([figure 4.4](#)) générées en un point donné (*i.e.* le point d'impact 2) en utilisant l'ondelette de Morlet complexe. L'amplitude des coefficients de l'ondelette est codée par une variation de couleur.

Les Transformées en Ondelettes Continues (CWT) présentent, sur toutes les géométries d'éprouvette, une forme significative en virgule inversée correspondant à la propagation du mode fondamental de flexion ([figure 4.7](#)). Il est à noter que les distributions fréquentielles des signaux sont étalées sur des bandes plus larges. La bande de fréquence qui s'étend de 0 à 800 kHz est sollicitée, cependant, les amplitudes les plus élevées se trouvent en deçà de 350 kHz environ. Cette observation peut être mise en relation avec le spectre fréquentiel de la source d'EA (Sause [145] a obtenu, par la méthode des éléments finis (MEF), l'évolution temporelle de la force exercée par une rupture de mine à la surface d'un matériau). Celui-ci se concentre principalement entre 0 et 600 kHz avec les amplitudes les plus élevées aux basses fréquences.

La forme des CWT est caractéristique de la propagation du mode A_0 pour des fréquences comprises entre 0 et 800 kHz. Les fréquences élevées (supérieures à 350 kHz), se déplacent plus rapidement. Les fréquences inférieures à 350 kHz se déplacent plus lentement (voir Chapitre 1, [figure 1.12](#) (figure de la vitesse en fonction de la fréquence*épaisseur)).

Les CWT calculées pour les signaux de l'éprouvette en cuivre peuvent se diviser en trois sections. Les CWT calculées pour les signaux reçus par les capteurs 3 et 4 sont constitués de seulement deux sections et présentent aussi plus de différences aux temps longs.

On peut supposer que le début des sections 2 et 3 correspond à l'arrivée d'une réflexion du mode A_0 sur le point de mesure (choisir le capteur récepteur). D'après cette hypothèse, la section n°1 correspond au signal direct, la section n°3 correspond aux réflexions sur les extrémités de l'éprouvette et la section n°2 correspond aux réflexions sur les bords latéraux. Dans ce dernier cas, les réflexions latérales sont séparées du signal direct car l'éprouvette est suffisamment large pour que la différence de chemin parcourue, entre le signal direct et les réflexions latérales, permette une séparation des deux signaux. Le calcul des temps d'arrivées des signaux est effectué dans la suite de ce travail.

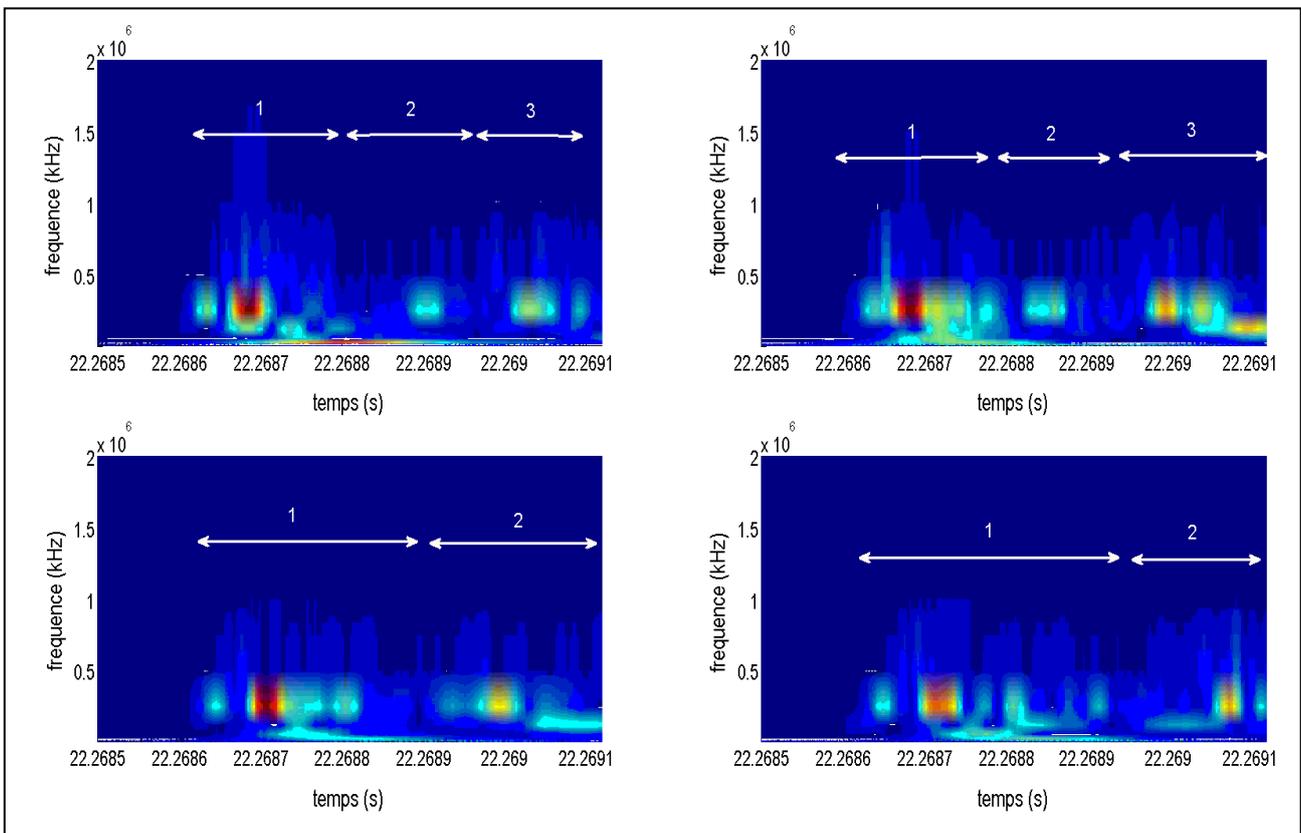


Figure 4.7 : Représentation temps-fréquence issue d'une CWT des signaux générés par une rupture de mine au point I2 sur l'éprouvette. L'échelle des couleurs représente la vitesse particulière en mm/s.

Calcul du temps d'arrivée (TOA)

Afin de calculer le temps d'arrivée (TOA) des signaux directement propagés à partir des impacts (sources d'EA), il est nécessaire de connaître la fréquence dominante extraite des représentations obtenues par la transformée en ondelette continue (CWT). La valeur maximale des coefficients du scalogramme est obtenue à la fréquence instantanée, ce qui correspond à la fréquence dominante dans le signal analysé. Ces coefficients, pris à la fréquence instantanée dans un domaine temps-fréquence, déterminent les pics d'énergie. La projection du pic correspondant à la fréquence dominante f_i représente le temps d'arrivée t_i du paquet d'ondes.

Une fois les TOA connus, on peut calculer les différences de temps Δt_{mi} par rapport au capteur maître. Ensuite, le CWT est appliqué aux signaux d'EA reçus du prochain impact afin de calculer ses temps d'arrivées et ainsi de suite jusqu'au dernier impact.

Après avoir calculé la TDOA, on doit calculer la vitesse de propagation des ondes. Or, on sait que lorsque les éprouvettes sont sollicitées par une rupture d'une mine sur la surface de la plaque, seuls les modes fondamentaux antisymétriques (ou de flexion) se propagent avec une grande amplitude et principalement les basse fréquences sont excitées. Cette vitesse varie avec la fréquence, et les CWT montrent que le contenu fréquentiel des signaux enregistrés de chaque impact se situe principalement dans l'intervalle [50 - 400] kHz et les fréquences dominantes est entre [200 à 300] kHz. Pour calculer la vitesse de groupe, il suffit donc de connaître la fréquence dominante de ces modes. Dans un but de simplification des calculs, la vitesse utilisée est la vitesse à la fréquence dominante de chaque point d'impact. L'équation $V_{g_{A_0}}(f) = 2 \left[\frac{E(2\pi fh)^2}{12\rho(1-\nu^2)} \right]^{1/4}$ est utilisée pour calculer la vitesse de groupe du mode A_0 .

Les résultats des données TDOA sont listés dans le [Tableau 4.3](#). Les [figures 4.8](#), [4.9](#) et [4.10](#) montrent respectivement la représentation temps-fréquence, le tracé des Coefficients de la CWT à la fréquence moyenne et la vitesse de groupe échantillonnée du point d'impact I2.

Impacts	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
$\Delta t_{21}(\mu s)$	-5.7	-5.8	-2.4	-4.8	-5	-8.5	-3.2
$\Delta t_{31}(\mu s)$	9	7.2	5.8	-1	-5.5	-12.5	-13.7
$\Delta t_{41}(\mu s)$	11.7	10.2	7.3	1.8	0.3	-4	-10.7

Tableau 4.3 : Données des TDOA calculés par CWT.

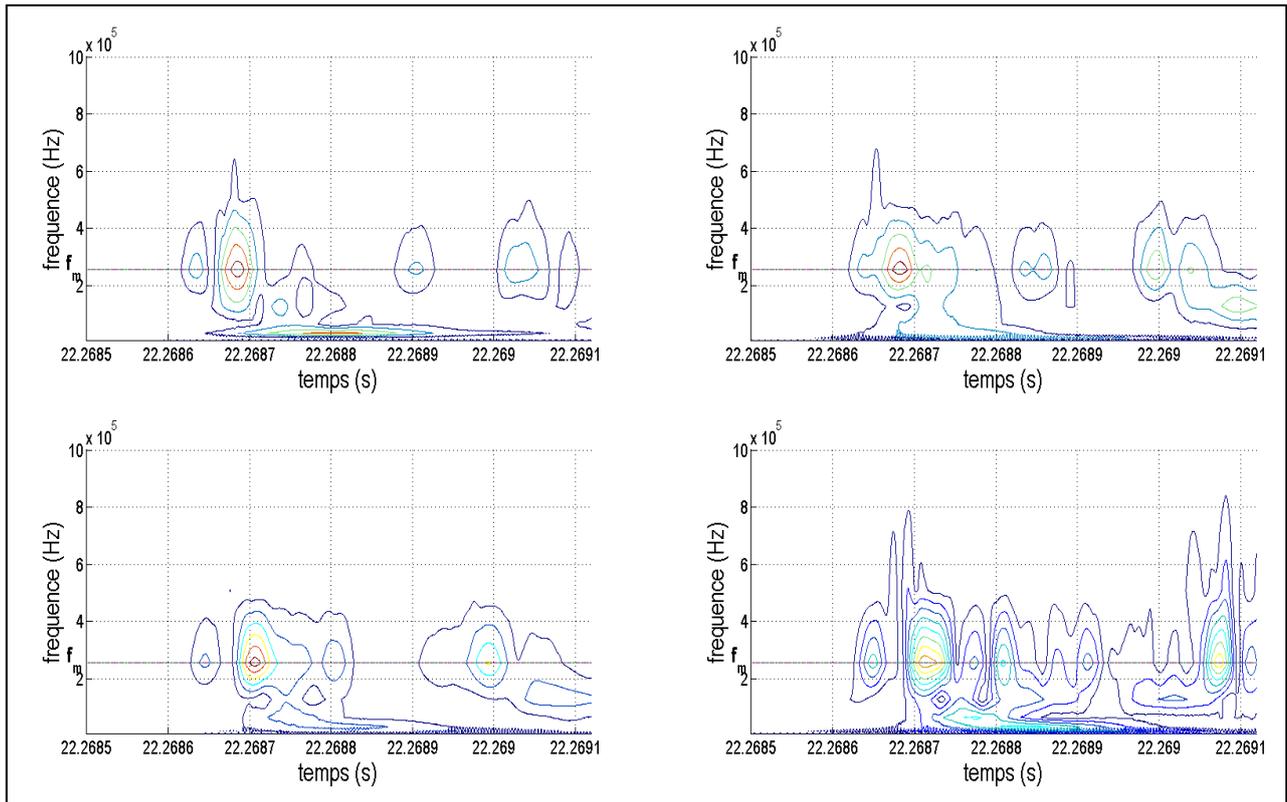


Figure 4.8 : Tracé de contour du Scalogramme de la CWT des signaux générés par une rupture de mine au point I2 sur l'éprouvette.

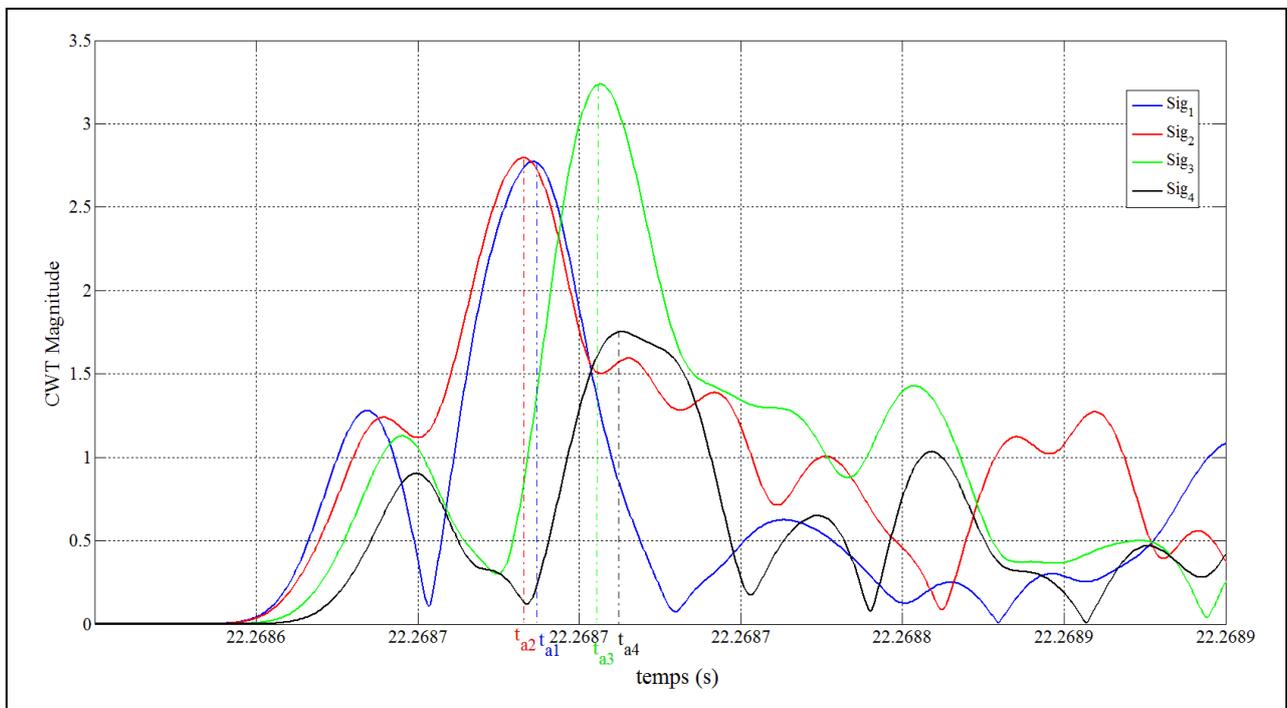


Figure 4.9 : Tracé des Coefficients de la CWT à la fréquence f_m pour trouver le temps d'arrivée pour le point d'impact I2.

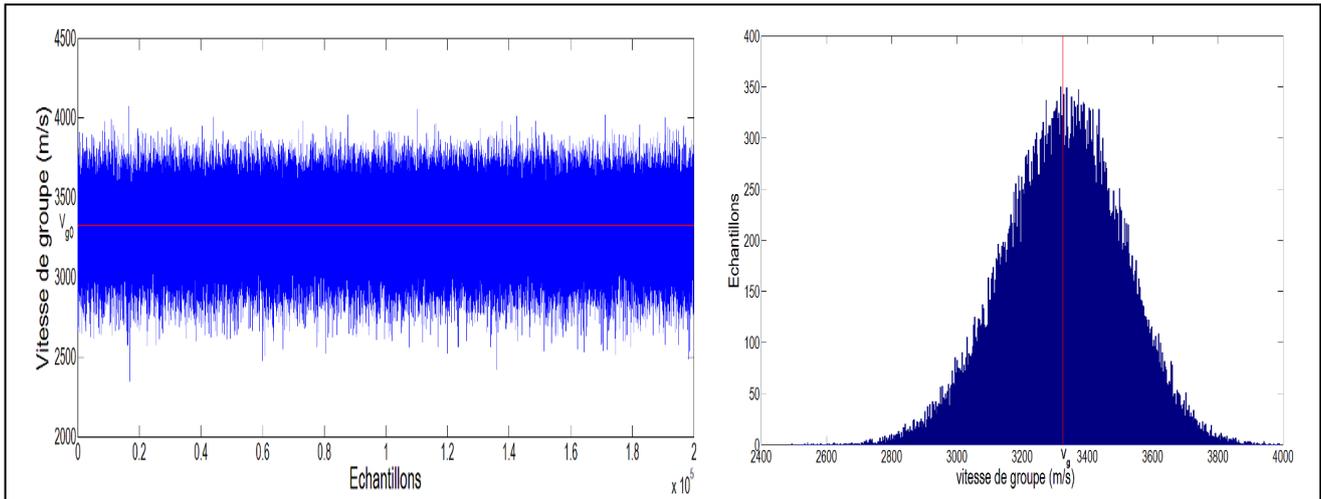


Figure 4.10 : Simulation de Monte Carlo pour le calcul de la vitesse de groupe V_{gA0} de l'Impact I2.

III.2.3 Localisation des sources d'EA par la méthode à base du filtre EKF

Dans ce qui suit, la performance de la méthode à base du filtre EKF est analysée à partir des signaux enregistrés dans différents endroits à la surface de la plaque de cuivre. Cette méthode nécessite une initialisation des paramètres à estimer. Le [Tableau 4.4](#) résume la valeur initiale de l'emplacement de la source d'EA calculée sur la base des équations (3.34) et (3.35) et elle n'est utilisée que pour estimer l'emplacement du premier point d'impact I1. Cette valeur initiale de localisation de la source d'EA n'est pas utilisée pour estimer la localisation des six autres points d'impact. La limite inférieure est l'emplacement du capteur maître situé à l'origine du système de coordonnées et la limite supérieure est l'emplacement du Capteur 3. Il convient de noter que le mauvais choix du premier emplacement initial peut être fatal pour l'algorithme à base du filtre EKF.

x_{sL} (mm)	y_{sL} (mm)	x_{sU} (mm)	y_{sU} (mm)	\hat{x}_{s_0} (mm)	\hat{y}_{s_0} (mm)	$\sigma_{x_{s_0}}^2$ (mm ²)	$\sigma_{y_{s_0}}^2$ (mm ²)
0	0	200	140	100	70	3333.3	1633.3

Tableau 4.4 : Valeur de l'emplacement initial.

Le filtre EKF est une méthode de traitement de données récursive qui évolue dans le temps par une alternance d'étape de prédiction et de correction. Elle requiert une connaissance de l'estimée de l'emplacement de la source d'EA précédente et de la mesure courante (TDOA, fréquence moyenne et incertitudes).

On peut voir sur le [Tableau 4.5](#) les résultats d'estimation de l'emplacement, de la vitesse de propagation et de la fréquence moyenne de chaque point d'impact. Cependant, des écarts apparaissent dans cette méthode. D'ailleurs, dans ce travail un paramètre numérique a été choisi dans le but d'évaluer les performances, précision et robustesse, de la méthode proposée en leur attribuant une erreur relative calculée à partir de l'ensemble des mesures de l'emplacement. L'erreur de l'emplacement estimé de la source d'EA (\hat{x}_s, \hat{y}_s) à la $k^{\text{ème}}$ étape peut être définie par :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x_s} &= 100 \frac{|x_s - \hat{x}_s|}{|x_s|} \% \\ \varepsilon_{y_s} &= 100 \frac{|y_s - \hat{y}_s|}{|y_s|} \%\end{aligned}\quad (4.1)$$

où $(\varepsilon_{x_s}, \varepsilon_{y_s})$, est utilisé dans le reste de ce travail comme un indicateur d'erreurs relatives d'estimation de l'emplacement des sources d'EA. Les écarts entre les valeurs réelles et les valeurs estimées de l'emplacement des sources d'EA sont résumés dans le [Tableau 4.6](#). En fait, pour la méthode à base du filtre EKF, les écarts observés pour l'estimation de l'emplacement de la source d'EA dans les directions x et y selon l'équation (4.1) sont respectivement inférieurs à 2.35 % et 2.45 %. Ils présentent des valeurs d'erreur moyennes après cinq itérations, dans les directions x et y , égale à 1.23 % et 1.28 % respectivement. Les erreurs ici pourraient être attribuées à des erreurs de mesure dans le placement des capteurs et l'emplacement des ruptures des mines. De plus, les écarts de localisation pourraient être attribués aux propriétés des matériaux supposées dans la procédure de calcul. À partir des résultats rapportés au [Tableau 4.7](#), on peut voir que l'approche proposée est capable de converger juste à partir des premières itérations (*i.e.* point d'impact I1), ce qui démontre sa robustesse.

Impacts	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
\hat{x}_s (mm)	73.686	76.587	84.310	94.767	99.979	108.364	121.950
\hat{y}_s (mm)	82.845	83.531	76.057	81.944	85.265	95.238	79.485
\hat{V}_{g_A} (m/s)	3319.0	3327.0	3326.0	3325.0	3324.5	3321.8	3323.8
\bar{f} (KHz)	253.91	253.91	242.51	255.81	212.87	219.32	253.91

Tableau 4.5 : Emplacement estimé des sept points d'impact source d'EA.

Impacts	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
ε_x (%)	2.342	2.116	0.812	0.245	0.021	1.488	0.853
ε_y (%)	2.278	1.867	1.409	2.430	0.312	0.251	0.644

Tableau 4.6 : Erreur relative des sept points d'impacts source d'EA.

Itération N°	1	2	3	4	5
\hat{x}_{I1} (mm)	74.8173	74.1407	73.8945	73.7661	73.6865
\hat{y}_{I1} (mm)	82.6703	82.7572	82.8020	82.8280	82.8452
\hat{V}_{gA} (m/s)	3324.9	3320.9	3319.6	3319.1	3319.0

Tableau 4.7 : Erreur d'estimation de l'emplacement de la source d'EA dans les directions x et y en fonction de nombre d'itération.

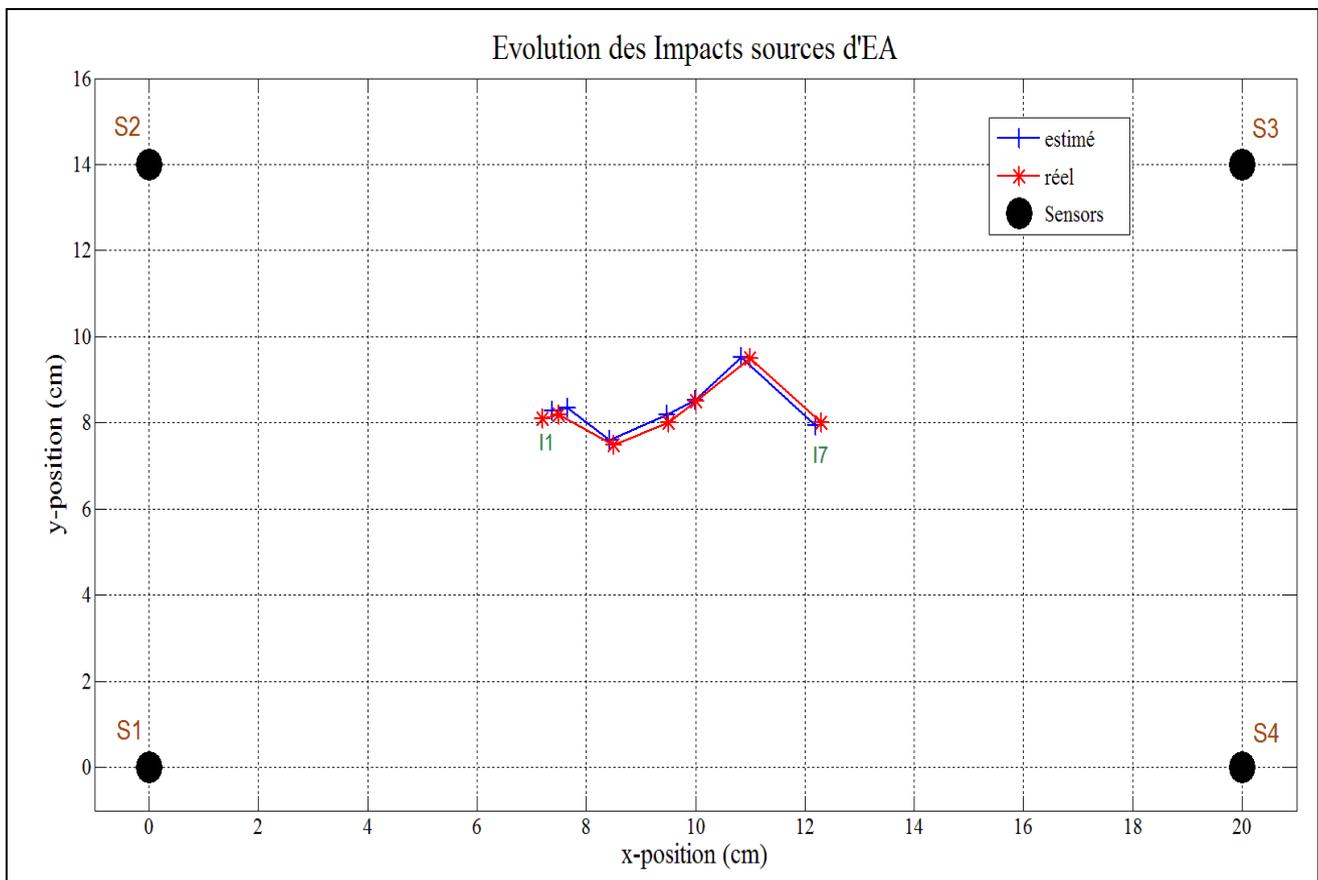


Figure 4.11 : Estimation de l'emplacement et suivi de l'évolution des sources d'EA, obtenues par la méthode à base du filtre EKF.

La [figure 4.11](#) présente l'évolution des différentes sources d'EA réelles et estimées. L'évolution des sources d'EA estimées est en parfait accord avec l'évolution des sources d'EA réelles. L'emplacement de la source réelle est représenté par le symbole étoile en rouge (*) et l'emplacement estimé est représenté par le symbole croix en bleu (+).

Enfin, tous ces résultats ci-dessus démontrent l'efficacité, la précision et la robustesse de l'approche probabiliste basée sur EKF proposée. Elle permet de suivre en continu l'évolution des sources d'EA. La méthode proposée est très flexible pour ajouter ou supprimer les informations d'un réseau de capteurs au stade du traitement des données.

III.2.4 Comparaison des résultats d'estimation de l'emplacement des sources d'EA entre la méthode géométrique et la méthode à base du filtre EKF

Dans cette partie, une comparaison entre la performance des méthodes de traitement du signal proposées pour l'estimation de l'emplacement des sources d'EA est présentée [[161](#)][[162](#)]. Par ailleurs, les estimations de l'emplacement des sources d'EA sont conduites ici dans un matériau dont les propriétés sont bien connues (cuivre), ce qui permet de valider le modèle théorique proposé.

L'emplacement des sources d'EA dans une plaque de cuivre est listé dans le [Tableau 4.8](#) et leurs estimations obtenues par la méthode géométrique et la méthode EKF sont représentés dans la [figure 4.12](#). Les résultats montrent que l'estimation de l'emplacement des sources d'EA par les deux méthodes offre des résultats comparables. En effet, d'après la [figure 4.12](#), les valeurs estimées suivent les valeurs réelles avec un faible écart global.

Afin d'obtenir le TDOA entre les capteurs, nous avons appliqué la CWT sur les signaux d'EA résultant des sept impacts dans chaque canal de capteur pour déterminer le TOA. Le [Tableau 4.9](#) donne les valeurs de TDOA entre les capteurs et le capteur maître S₁. La [figure 4.13](#) illustre les signaux générés par l'impact I4 et reçus par chaque capteur, et leur analyse temps-fréquence. Les CWT montrent que le contenu fréquentiel des signaux enregistrés de chaque impact se situe principalement dans l'intervalle [50 - 350] kHz et les fréquences dominantes est entre [200 - 300] kHz.

Impacts	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7
Coordonnée (mm)	(75, 80)	(85, 80)	(95, 80)	(80, 100)	(80, 75)	(80, 43)	(80, 24)

Tableau 4.8 : Coordonnées des sept impacts sur la plaque en cuivre.

Impacts	$\Delta t_{21}(\mu s)$	$\Delta t_{31}(\mu s)$	$\Delta t_{41}(\mu s)$
I1	-5.5	9.7	12.0
I2	-4.7	3.5	6.0
I3	-4.8	-1.0	1.8
I4	-13.0	-2.2	7.0
I5	-2.5	7.2	8.9
I6	10.8	18.8	11.1
I7	17.0	24.7	10.9

Tableau 4.9 : Données des TDOA calculés par CWT.

$x_{actual} (mm)$	75	85	95	80	80	80	80
$x_{EKF} (mm)$	75.994	86.017	94.836	82.266	81.203	80.129	80.979
$x_{Geom} (mm)$	77.043	87.042	96.099	83.103	81.306	79.917	81.334
$y_{actual} (mm)$	80	80	80	100	75	43	24
$y_{EKF} (mm)$	80.866	81.261	81.934	103.324	76.157	42.688	24.271
$y_{Geom} (mm)$	82.062	82.515	83.611	104.565	76.376	42.213	24.316

Tableau 4.10 : Comparaison des résultats de l'estimation des emplacements des sources d'EA entre les approches EKF et géométriques.

Le [Tableau 4.10](#) et la [figure 4.12](#) montrent que malgré des écarts très faibles entre les valeurs estimées de chacune des deux méthodes, l'approche géométrique présente un taux relatif d'erreurs le plus élevé, alors que la méthode à base du filtre EKF présente une erreur faible, au moins pour les cas d'un matériau homogène isotrope. En effet, les erreurs moyennes pour l'approche à base du filtre EKF dans les directions x et y selon l'équation (4.1) sont inférieures à 2,83 % et à 3,32 %, respectivement.

Ces résultats illustrent l'avantage des méthodes d'estimation à base du filtre EKF par rapport aux méthodes d'estimation géométriques dans le cadre de l'estimation de l'emplacement des sources d'EA dans les matériaux homogènes.

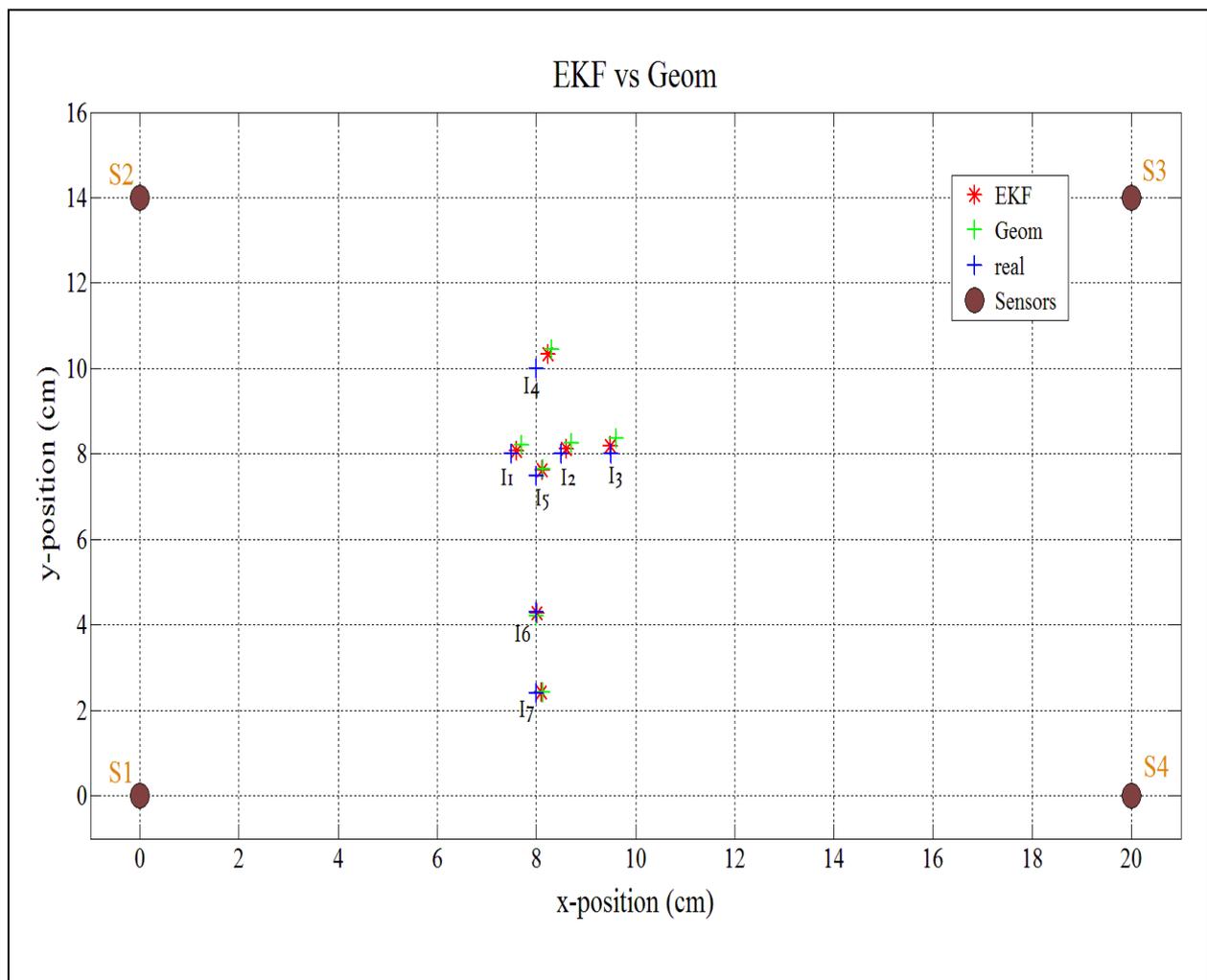


Figure 4.12 : Estimation de l'emplacement des sources d'EA, obtenues par la méthode géométrique (vert) et par la méthode à base du filtre EKF (rouge).

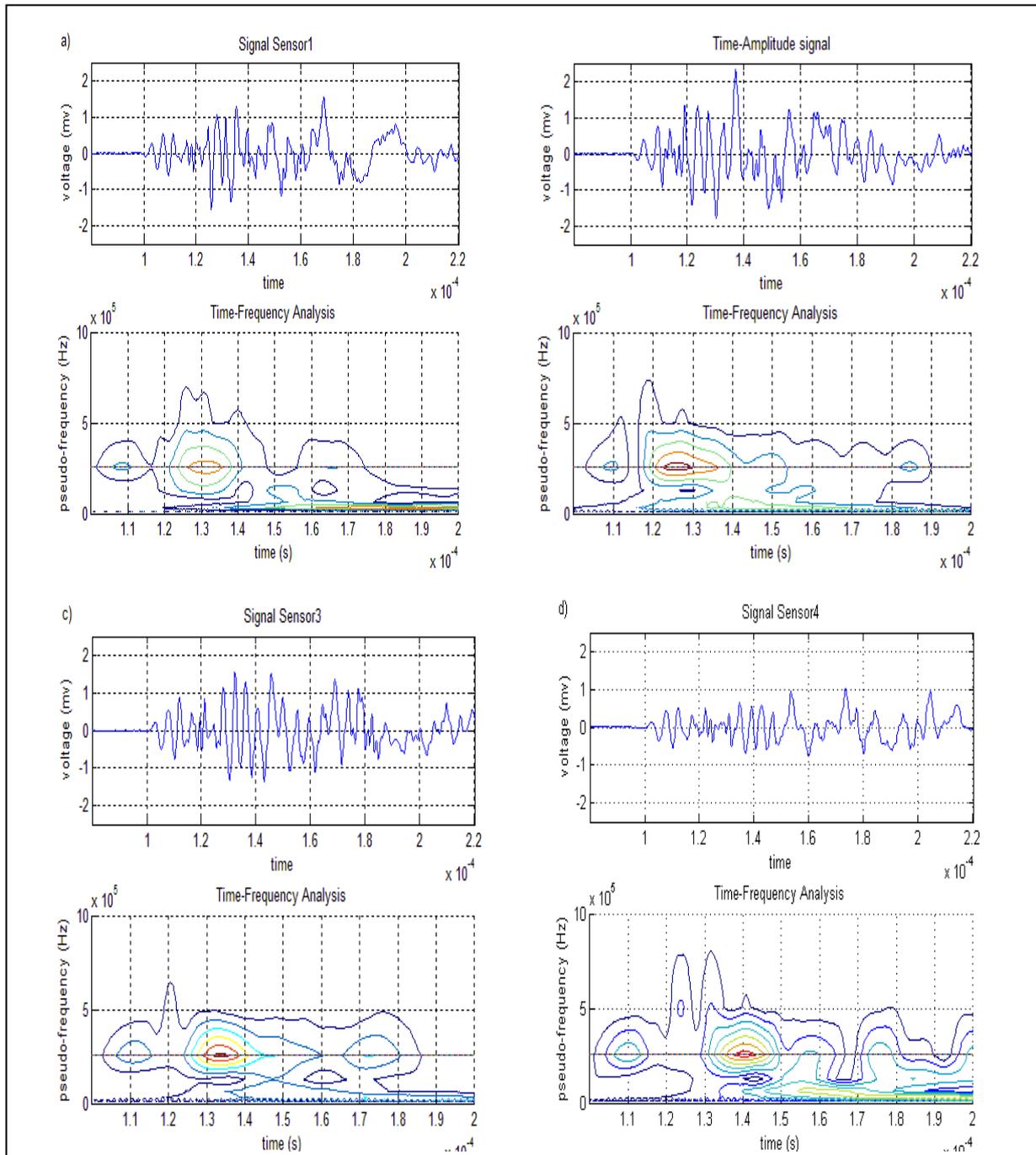


Figure 4.13 : Représentation temporelle et Analyse temps-fréquence issue par CWT des signaux générés par le point d'impact I4 sur les quatre capteurs.

III.3 CONCLUSION

La validation expérimentale des performances des méthodes probabilistes choisies, a été réalisée par des sources artificielles générées en surface d'une éprouvette, une plaque de cuivre. Nous avons étudié des sources d'EA, multiples impacts, ayant différentes localisations par

rapport au capteur et constaté que l'application des méthodes probabilistes proposées pour l'estimation de l'emplacement et le suivi en continu du mouvement séquentiel de ces sources, tout en tenant compte des incertitudes de la modélisation et de la mesure, fournit toujours des résultats excellents. Ceci a permis, dans un premier temps, de valider la fiabilité de la chaîne de mesure, et dans un second de valider les outils de traitement du signal (i.e. approche géométrique et approche à base du filtre EKF) dans un matériau homogène connu. Par conséquent, les objectifs de la première expérience du protocole expérimental sont atteints. Par ailleurs, une comparaison en termes de performance d'estimation a montré que la méthode à base du filtre EKF présente un taux d'erreurs d'estimation relativement faible par rapport à la méthode déterministe (géométrique). Les avantages de l'algorithme à base du filtre EKF résident dans la prise en compte des incertitudes dans les mesures de TOA, de la vitesse de groupe des ondes et de la fusion efficace des données multi-capteurs pour estimer et suivre en continu les emplacements des points d'impact source d'EA. En dépit des résultats significatifs présentés dans cette étude, quelques limites sont identifiées. Tout d'abord, nous avons mené les expériences dans un laboratoire avec des conditions environnementales contrôlées. Par conséquent, les recherches futures devraient tenir compte des incertitudes sur les variations de température. De plus, dans le cas où il y a différents modes dans le vecteur de mesure par exemple, en plus de mode antisymétrique A_0 , le mode symétrique S_0 est excité, le nombre de mesures passe de $(n - 1)$ à $2(n - 1)$, avec juste une inconnue de plus ajoutée au vecteur d'état X , soit, la vitesse d'onde du groupe S_0 .

Il est maintenant possible d'envisager l'étude de la performance de ces méthodes dans le cas des sources d'EA réelles générées par des sollicitations mécaniques. Dans ce qui suit, nous allons valider expérimentalement les performances des approches proposées sur deux types de matériaux.

IV. VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES PERFORMANCES DES METHODES PROPOSEES POUR LA LOCALISATION ET LE SUIVI DES SOURCES D'EA

Dans un matériau, les ondes d'EA, générées par une sollicitation mécanique, sont porteuses d'informations liées aux différents phénomènes : les fissurations, les mouvements de dislocations, les transformations de phases, les interfaces matériau-inclusions, etc.... La section précédente a mis en évidence la capacité des approches proposées à localiser et à suivre l'activité acoustique générée par des ruptures des mines de plomb (PLB). Dans cette section, deux types d'expériences sont conduites. La première expérience propose l'étude du

comportement des méthodes de traitement du signal proposées pour l'estimation de l'emplacement et le suivi de l'évolution des sources d'EA dans une plaque en aluminium. La seconde expérience reprend le protocole de mesure de la première expérience afin de les appliquer sur une éprouvette en béton. Dans cette expérience, les méthodes de traitement du signal, décrites préalablement, sont utilisées pour estimer l'emplacement et la propagation des sources d'EA.

IV.1 ESSAIS DE TRACTION SUR UNE PLAQUE EN ALUMINIUM A ENTAILLE UNIQUE COUPLEE A L'EMISSION ACOUSTIQUE

Un matériau peut se déformer d'une façon réversible ou irréversible (élastique ou plastique) en réponse à la sollicitation qu'il subit. L'essai de traction permet de caractériser l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement et définir des propriétés fondamentales telles que la limite d'élasticité, la charge à la rupture, l'allongement à la rupture, etc. Cet essai, consiste à réaliser, dans une éprouvette en aluminium, un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant à travers les signaux d'EA.

Le choix s'est donc porté sur un matériau simple (c'est-à-dire homogène et isotrope par rapport aux fréquences considérées) : l'aluminium. Les constantes élastiques de l'aluminium, utilisées dans les calculs, sont listées dans le [Tableau 4.11](#).

Module d'Young E (GPa)	69
Coefficient de poisson ν	0,34
Masse volumique ρ (kg/m^3)	2700
Vitesse de l'onde longitudinale (m/s)	6270
Vitesse de l'onde de cisaillement (m/s)	3080

Tableau 4.11 : Propriétés du matériau d'Aluminium.

L'analyse qui va suivre a pour objectif, dans un premier temps, de décrire le dispositif expérimental de mesure de signaux d'EA. Les essais sont réalisés sur une plaque d'aluminium avec une encoche de 30 mm de largeur. Le protocole expérimental se compose d'une partie mécanique, et d'une partie regroupant l'ensemble des outils électroniques, et de traitement du

signal. L'analyse a aussi pour objectif, dans un second temps, de valider expérimentalement les différents outils de traitement du signal proposés pour l'estimation de l'emplacement et le suivi de l'évolution des sources d'EA.

IV.1.1 Caractéristiques de l'Aluminium (Al)

L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières qu'il présente :

- Légèreté et bonne résistance, ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne conductivité de chaleur et d'électricité.
- Bonne tenue à la corrosion grâce à la formation en surface d'une pellicule très fine, $\approx 0,7 \mu\text{m}$, et très résistante de Al_2O_3 , (plus l'aluminium est pur plus sa tenue à la corrosion est élevée). L'aluminium, en contact avec l'oxygène de l'air, forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 qui protège le métal contre les attaques chimiques. Cette pellicule est non soluble dans l'eau, donc l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et il est très utilisé surtout dans l'industrie chimique et alimentaire.
- Possibilité facile de déformation et de soudage.

L'aluminium est souvent considéré comme un matériau élastique, cela signifie que lorsqu'une onde se propage dans une pièce en aluminium, celle-ci ne devrait perdre aucune énergie sous forme de chaleur. Seule l'atténuation géométrique devrait être responsable de la diminution d'amplitude. En réalité l'aluminium n'est pas parfaitement élastique et une partie de l'énergie de l'onde propagée est perdue sous forme de chaleur. Un deuxième facteur affecte donc la perte d'amplitude du signal au cours de la propagation : l'amortissement.

IV.1.2 Description du dispositif expérimental

La [figure 4.14](#) présente l'organisation du dispositif pour la génération, la mesure et l'analyse des signaux d'EA. Celui-ci peut se décomposer essentiellement en deux parties principales :

1. une partie mécanique regroupant le dispositif de contrôle et de mesure de la charge mécanique (machine de tests mécaniques, micro-ordinateur de commande, etc.) et le corps d'épreuve (plaque en aluminium avec une entaille) ;

2. une partie électronique intégrant un étage d'amplification et de filtrage, un système d'acquisition et d'enregistrement des signaux, l'ensemble des dispositifs d'instrumentation (capteurs piézoélectriques, un amplificateur, etc.) ainsi qu'un micro-ordinateur de type PC accueillant les différents codes des algorithmes de traitement du signal implémentés.

Ces différents composants sont détaillés dans les paragraphes suivants. Les essais ont été conduits d'une façon non interrompue jusqu'à la rupture globale de l'échantillon. L'activité acoustique et les caractéristiques mécaniques du matériau sont simultanément enregistrées tout le long de l'essai.

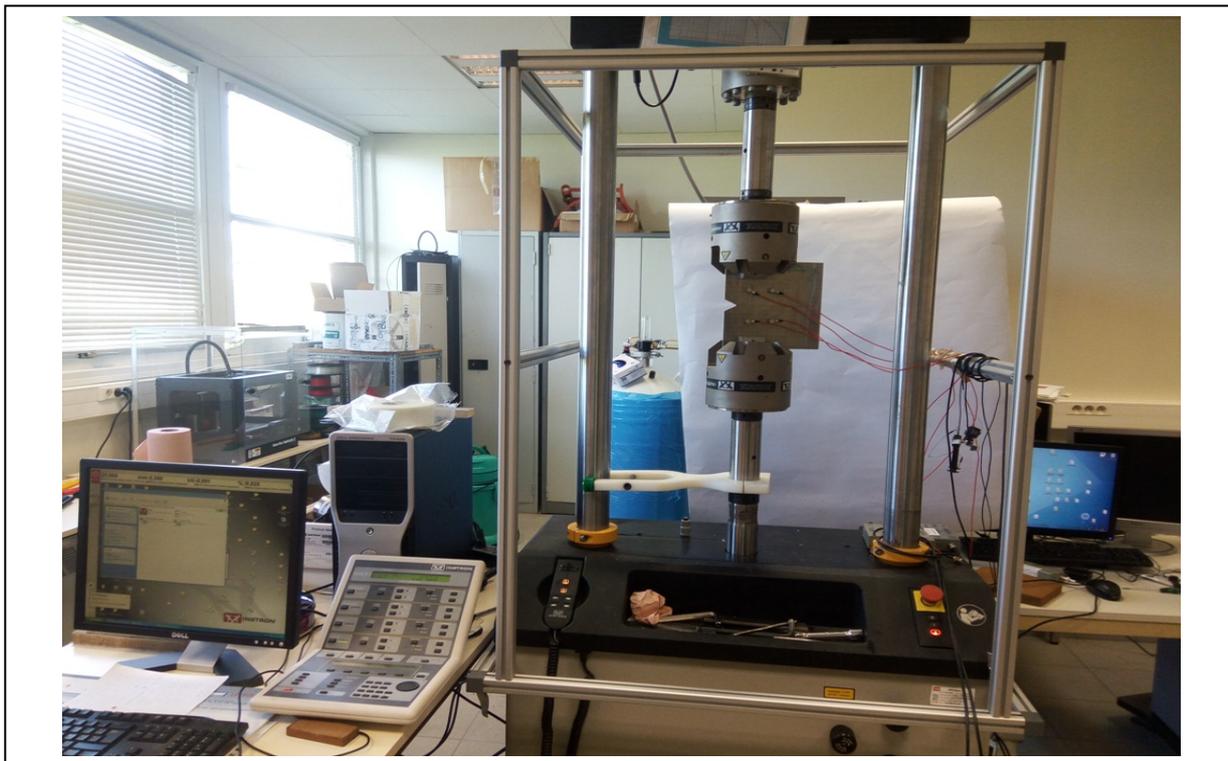


Figure 4.14 : Dispositif expérimental.

Dispositif mécanique

Le banc de mesure mécanique est configuré dans le but de générer des signaux d'EA dans la plaque de test. La mise sous charge statique est assurée par une machine d'essai hydraulique universelle de type INSTRON modèle 8516 de capacité 100 kN (figure 4.14). Celle-ci est munie de mors auto-serrant, d'une traverse supérieure fixe et d'une traverse inférieure mobile, permettant une bonne tenue des échantillons même à charges très élevées. Le pilotage de la machine et le contrôle du niveau du chargement sont assurés par micro-ordinateur industriel fournie par INSTRON. Cette machine est capable, entre autre, d'effectuer tous les types d'essais

mécaniques, aussi bien en dynamique qu'en statique. Dans ce travail, un type d'essai quasi-statique a été effectué : l'essai de traction uni-axiale. Durant ces essais, la vitesse de déplacement de la cellule de force (0,5 mm/min) reste constante jusqu'à la fin de l'essai (*i.e.* jusqu'à la rupture de l'échantillon mis en évidence par une chute de la contrainte appliquée). Afin de vérifier la reproductibilité de la réponse aux sollicitations, nous avons réalisé au moins 3 essais. Les essais se sont déroulés à l'IUT du Mans et au sein de l'équipe Ultrasons du laboratoire **LAUM**, France.

Géométrie des éprouvettes

Les mesures effectuées dans cette partie de travail portent sur un seul type de matériau largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles. Les échantillons élaborés au cours de cette étude, sont de forme carrée et de dimensions presque identiques. Ces échantillons sont des plaques en aluminium avec une encoche d'une largeur de 30 mm et d'une hauteur de 35 mm. Sa mise en œuvre est réalisée au sein du Laboratoire. Les dimensions des échantillons sont 250 x 230 mm² et une épaisseur de 2 mm. La [figure 4.15](#) et le [Tableau 4.12](#) montrent et donnent l'emplacement des capteurs piézoélectriques, la géométrie et la dimension des échantillons retenues dans le cas de cette étude.

Capteurs	S1	S2	S3	S4
Coordonnées (mm)	(0, 0)	(0, 60)	(40, 60)	(40, 0)

Tableau 4.12 : Coordonnées des capteurs sur la plaque en aluminium.

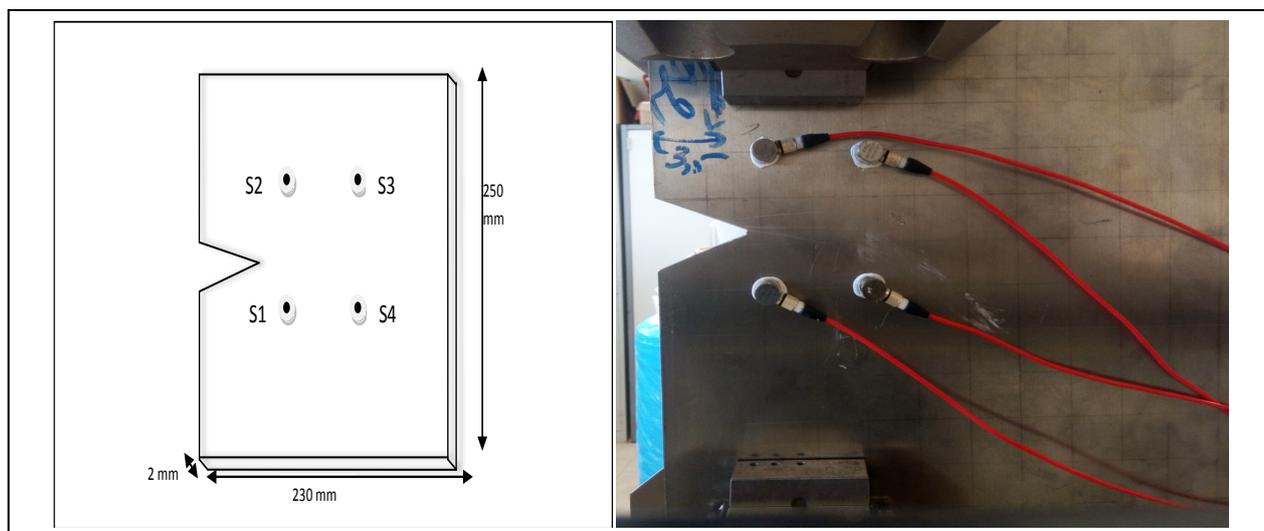


Figure 4.15 : Plaque d'aluminium avec une encoche pour l'essai de traction : Schéma de principe (dimensions en mm), et sa photographie.

Dispositif électronique et de traitement du signal

L'acquisition des signaux d'EA est prise en charge par un dispositif électronique composé d'un étage amplificateur et de filtrage, d'un système d'acquisition et d'enregistrement des signaux ainsi que d'un micro-ordinateur de type PC accueillant les algorithmes de traitement du signal. Quatre capteurs piézoélectriques large bande (Nano30) sont fixés, par un couplant acoustique, sur les échantillons. La qualité du couplant est validée en réalisant plusieurs cassés de mines (test Hsu-Nielsen) sur l'éprouvette. De plus, le test Hsu-Nielsen permet également de valider le fonctionnement des capteurs et la transmission de salves acoustiques entre la surface de l'échantillon et le capteur. Les signaux acquis sont d'abord pré-amplifiés à l'aide des préamplificateurs de gain de 40 dB, puis filtrés par un filtre passe-haut avant d'être reçus par un système d'acquisition MISTRAS (Euro Physical Acoustics) comportant 8 voies analogiques chacune étant équipée d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) 32 bits autorisant des fréquences d'échantillonnage allant jusqu'à 25 MHz. Ce système est composé d'une carte d'acquisition PCI. Les signaux sont donc convertis par cette carte pour les numériser et extraire les différents descripteurs acoustiques. Ces données d'EA sont transmises à l'ordinateur qui permet de visualiser les descripteurs en temps réel, les stocker et faire le post-traitement. Cette dernière étape permet de connaître l'intensité de l'émission acoustique ainsi que de connaître le contenu des signaux et donc de déterminer et différencier les mécanismes d'endommagement. Parmi les nombreuses fonctionnalités, l'enregistreur est équipé d'une fonction de pré-déclenchement permettant de conserver en mémoire les signaux qui ont précédés le phénomène ayant déclenché l'acquisition.

Préalablement aux essais, différents réglages du système sont effectués grâce au test Hsu-Nielsen [146]. Parmi ces paramètres de réglage, nous trouvons les fenêtres d'acquisition temporelles glissantes nommées PDT, HDT et HLT. Ces valeurs permettent d'individualiser les salves d'EA. Elles dépendent des propriétés du matériau. Les valeurs retenues évaluées expérimentalement sont : PDT = 300 μ s, HDT = 600 μ s et HLT = 1000 μ s. Des couples PDT-HDT trop courts pourraient conduire à l'acquisition tronquée des formes d'ondes (FO). Dans le cas contraire où l'on considère des HDT trop longs, les échos risquent d'être enregistrés en plus de la salve d'EA. Un temps d'aveuglement adéquat (HLT) permet également de ne pas déclencher l'acquisition sur des échos. La vitesse de propagation et l'atténuation des signaux acoustiques sont déterminées en simulant des sources d'EA à l'aide de rupture d'une mine de graphite 2H considérée comme source d'EA sur les éprouvettes testées.

Une fois que l'éprouvette et les capteurs sont mis en place, le seuil d'acquisition, correspondant à l'amplitude minimale pour laquelle un signal sera enregistré, est ajusté en fonction du bruit environnant (extérieur et machine) de manière à ce qu'une salve ne soit pas enregistrée lorsque l'échantillon n'est pas sollicité, dans les conditions normales d'essais (placement des capteurs, couplage, bruit de fond généré par la machine...). Dans notre cas, du fait du bruit important de la machine, un seuil de 50 dB a été appliqué et est gardé constant tout au long de l'essai. Lorsque l'amplitude des signaux dépasse le seuil d'acquisition, le système enregistre les données sur les quatre canaux. Plus précisément, 2048 points par canal sont enregistrés à une fréquence d'échantillonnage (F_e) de 2 MHz. L'acquisition des signaux d'EA s'arrête lorsque la rupture finale du matériau a lieu.

Les filtres analogiques appliqués aux signaux permettent d'éliminer les bruits mécaniques parasites. En fonction de la machine de sollicitation mécanique utilisée, différents filtres ont dû être sélectionnés. La carte d'acquisition comporte une gamme de filtrage maximale entre 20 et 400 KHz. Cette gamme a été retenue pour les essais quasi-statiques.

La partie suivante consiste, dans un premier temps, à la détermination des temps d'arrivées des signaux d'EA par une analyse temps-fréquence à base de la CWT. Le principe est de déterminer, à chaque instant, le contenu fréquentiel de chaque événement d'EA (source d'EA). Dans un second temps, les méthodes de traitement du signal présentées dans le Chapitre 3 sont appliquées pour localiser et suivre l'évolution des sources d'EA acquises expérimentalement. Enfin, l'évolution des sources d'EA a été comparée à la croissance de la fissure dans la plaque. Les algorithmes décrivant les méthodes proposées ont été programmés en langage MATLAB.

IV.1.3 Résultats de l'expérience

Cette partie a pour but de d'analyser les résultats des méthodes de traitement du signal proposées, permettant l'estimation de l'emplacement et l'évolution des sources d'EA dans une plaque d'aluminium sous une sollicitation mécanique.

Dans ce travail, la plupart de ces essais a nécessité le prétraitement afin de filtrer les signaux d'EA avant de procéder à l'analyse (Chapitre 1, section II.9). Nous nous assurons ainsi d'analyser uniquement des signaux d'EA qui doivent provenir du matériau car des signaux issus du frottement de l'éprouvette avec les mors sont aussi enregistrés. Les méthodes de traitement du signal présentées dans les Chapitres 2 et 3, *i.e.* la transformée en ondelette continue, le filtre de Kalman étendu, l'approche géométrique, sont appliquées tout au long de cette section sur ces signaux acquis dans la même plaque d'aluminium sous les mêmes conditions expérimentales.

IV.1.3.1 Représentation temporelle d'un signal d'EA

La figure 4.16 montre les formes d'ondes (FO) de quelques exemples choisis de signaux d'EA enregistrés à des endroits différents. En observant les FO de ces signaux, nous notons qu'elles s'apparentent plutôt à de l'EA de type discrète.

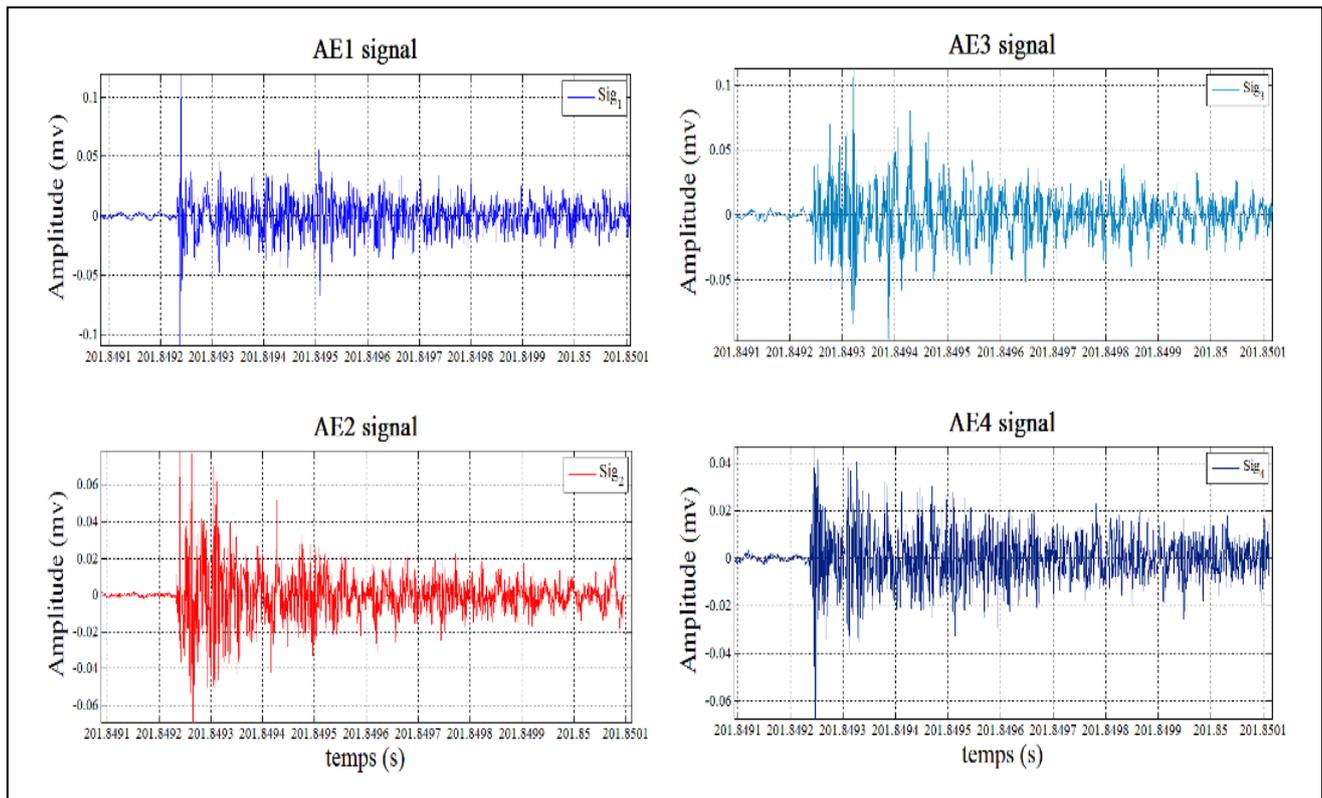


Figure 4.16 : Différentes formes d'ondes répertoriées comme de l'EA discrète.

IV.1.3.2 Analyse temps-fréquence pour calculer les temps d'arrivées des signaux d'EA

Nous savons qu'afin de calculer le temps d'arrivée des signaux directement propagés à partir des sources d'EA, il est nécessaire de connaître la fréquence dominante extraite des représentations obtenues par CWT. Dans notre cas, l'ondelette mère utilisée est l'ondelette de Morlet complexe avec des paramètres fixés à ($f_c = 1.2 \text{ Hz}$, $f_b = 0.7 \text{ Hz}$).

La figure 4.17 donne un exemple d'une représentation temps-fréquence issue d'une CWT d'un événement acoustique pris au hasard. L'amplitude des coefficients de l'ondelette est codée par une variation de couleur. Il est à noter que les distributions fréquentielles des signaux sont étalées sur des bandes plus larges. Cependant, les amplitudes les plus élevées se trouvent en deçà de 400 KHz environ. Par conséquent, la valeur maximale des coefficients de module au

carré (crêtes) de la CWT est accomplie à la fréquence dominante. La projection du pic d'énergie correspondant à la fréquence dominante f_i représente le temps d'arrivée t_i du signal au capteur. La CWT est appliquée aux signaux d'EA reçus du prochain événement acoustique afin de calculer leurs temps d'arrivées et ainsi de suite jusqu'au dernier événement acoustique.

Une fois les TOA connus, on peut calculer les différences de temps Δt_{mi} par rapport au capteur maître de tous les événements acoustiques.

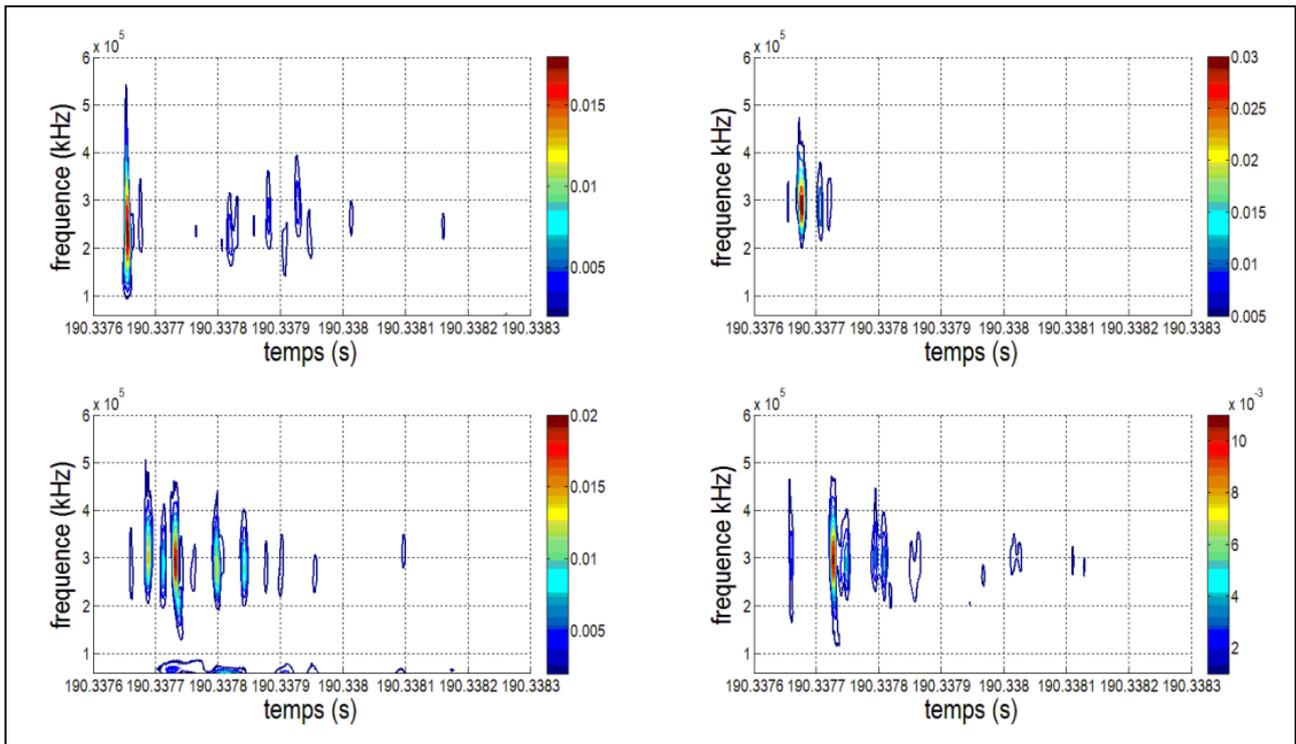


Figure 4. 17 : Représentation temps-fréquence issue d'une CWT des signaux générés par un événement acoustique.

Après avoir calculé la TDOA, on doit calculer la vitesse des ondes. Cette vitesse varie avec la fréquence, et les CWT montrent que le contenu fréquentiel des signaux enregistrés de chaque événement acoustique se situe principalement dans l'intervalle [50 - 400] KHz et les fréquences dominantes sont entre [180 à 350] kHz (*i.e.* figure 4.17). Pour calculer la vitesse de groupe, il suffit donc de connaître la fréquence dominante de ces modes. Les valeurs des vitesses de groupe du mode d'onde de Lamb et sa variance $\sigma_{V_{g0}}^2$ peuvent être déterminées à partir de la courbe de dispersion fréquence-vitesse de groupe (Voir Chapitre 1, figure 1.13). L'annexe 1 détaille la méthode utilisée pour calculer la vitesse de groupe à la fréquence dominante de chaque événement acoustique.

La [figure 4.18](#) montre les deux modes fondamentaux ; symétrique S_0 et antisymétrique A_0 , superposés sur le diagramme de la CWT. Cette superposition est facilitée par une option qui convertit l'échelle de vitesse du groupe en une échelle de temps utilisant la distance de propagation exacte connue. Les courbes des vitesses de groupe ont été calculées par une vitesse longitudinale apparente de 6320 ms^{-1} et une vitesse de cisaillement apparente de 3100 ms^{-1} . Clairement, la [figure 4.18](#) montre la présence d'énergie du signal d'EA dans des parties du mode fondamental antisymétrique A_0 . La CWT montre comment l'énergie du signal est distribuée en fonction de la fréquence, du temps (ou de la vitesse du groupe) et du mode. Ainsi, la [figure 4.18](#) montre que cette source d'EA a la plus grande concentration d'énergie (couleur rouge) dans le mode fondamental antisymétrique dans un intervalle de fréquences d'environ $[180 - 300] \text{ kHz}$ sur une gamme de vitesses de groupe de 2650 à $3365 \text{ mm}/\mu\text{s}$. Enfin, la [figure 4.18](#) nous permet de déterminer la fréquence dominante, le temps d'arrivée, et la vitesse de groupe du signal sur un capteur généré par une source d'EA et ainsi de suite pour tous les signaux de tous les événements acoustiques.

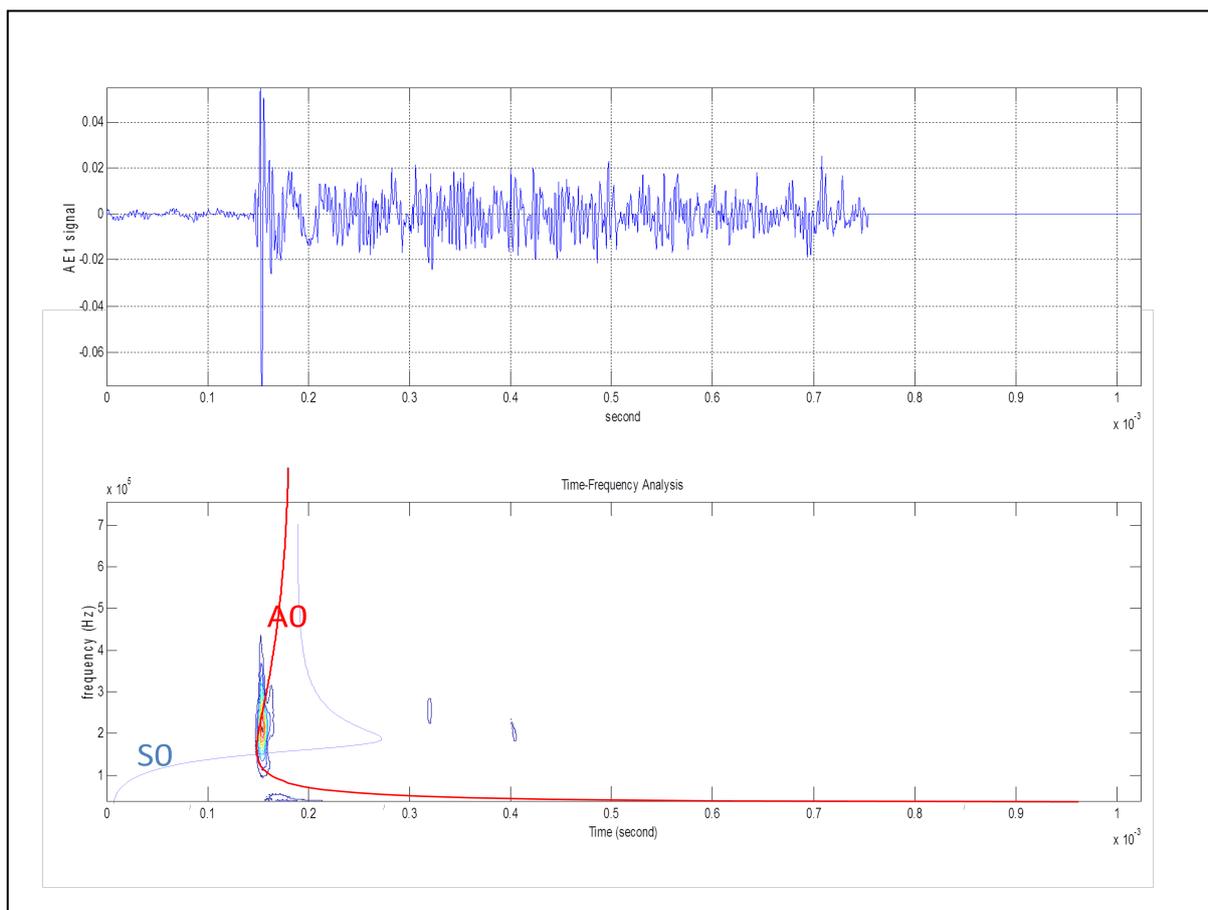


Figure 4.18 : Exemple de la méthode de traitement du signal. Haut: signal AE d'origine. En bas: tracé de transformation en ondelettes avec des courbes de dispersion superposées indiquant les modes d'onde symétriques (S_0) et antisymétriques (A_0), avec les pics S_0 et A_0 marqués.

H. Jeong et al [8] ont considéré que lorsque les deux modes fondamentaux sont présents, la dominance du mode de flexion sur un capteur et la dominance des modes d'extension et de flexion sur les autres capteurs, il est important d'utiliser le même mode dans l'emplacement de source d'EA pour avoir une localisation correcte de la source d'EA. Ici, la localisation expérimentale a été réalisée en utilisant le mode de flexion commun.

La vitesse et l'emplacement des sources d'EA ont été mesurés simultanément. L'emplacement initial gaussien a été calculé sur la base des équations (3.34) et (3.35) où la borne inférieure x_{sL} , y_{sL} est l'emplacement du capteur maître (Capteur 1) situé à l'origine du système de coordonnées et la borne supérieure x_{sU} , y_{sU} est l'emplacement du Capteur 3. L'emplacement initial gaussien est utilisé pour effectuer la localisation du premier événement d'EA.

IV.1.3.3 Localisation de l'activité acoustique

L'emplacement des sources d'EA à l'origine des signaux enregistrés peut être estimé le long de l'éprouvette. Dans notre cas, une localisation planaire est réalisée : uniquement quatre capteurs piézoélectriques sont utilisés. La position de la source d'EA liée à un signal reçu est calculée en fonction des différences de temps d'arrivée des signaux aux capteurs et de la vitesse de propagation des ondes. Par ailleurs, seul un certain nombre d'événements peut être repéré sur l'éprouvette. Uniquement les événements d'amplitude plus élevée ont pu atteindre les quatre capteurs, c'est à dire ceux qui donnent un signal sur les quatre capteurs au-dessus du seuil de détection et dans un intervalle de temps défini.

Les signaux enregistrés générés par la même source forment un événement acoustique. Le regroupement des hits (signaux d'EA) dans un événement consiste à faire glisser une fenêtre de temps de largeur " T " et à compter le nombre de hits à l'intérieur (Chapitre 1, Section II.9). Ainsi, un ensemble de signaux reçus par les capteurs (quatre dans notre cas), durant une période de 232 μ s, forme un événement. Cette fenêtre temporelle correspond à une distance de propagation de 72,1 mm, distance entre deux capteurs les plus éloignés par la vitesse de propagation des ondes mesurée. Cette vitesse est d'environ 3100 ms^{-1} et a été mesurée en utilisant la procédure normalisée de rupture de mine de crayon.

Les figures 4.19 (a), (b) et (c) montrent une représentation de l'emplacement des sources d'EA estimés obtenus par l'algorithme à base du filtre EKF et l'évolution de la fissure au cours du temps. Une première constatation est que l'activité acoustique est très faible du début de l'essai jusqu'à la charge maximale (figure 4.19 (a)). Ensuite, le nombre d'événements augmente

sensiblement dans la région entre la charge maximale et 80 % de la charge maximale (figures 4.19 (b)). Enfin, l'EA est plus importante à l'approche de la rupture du matériau (figures 4.19 (c)). Chaque point bleu (.) représente un événement acoustique. La majorité des événements acoustiques se situe autour du trajet de la fissure, ce qui démontre l'efficacité, la précision et la robustesse de l'approche proposée.

Les captures photographiques présentées sur les figures 4.19 (a), (b) et (c) ont été prises au cours de l'essai de traction sur la zone utile avec une Camera. Nous avons pris soin à ce que le déclenchement de la caméra soit synchronisé avec le début de l'essai de traction. Nous avons pu observer toute la longueur utile et la rupture finale.

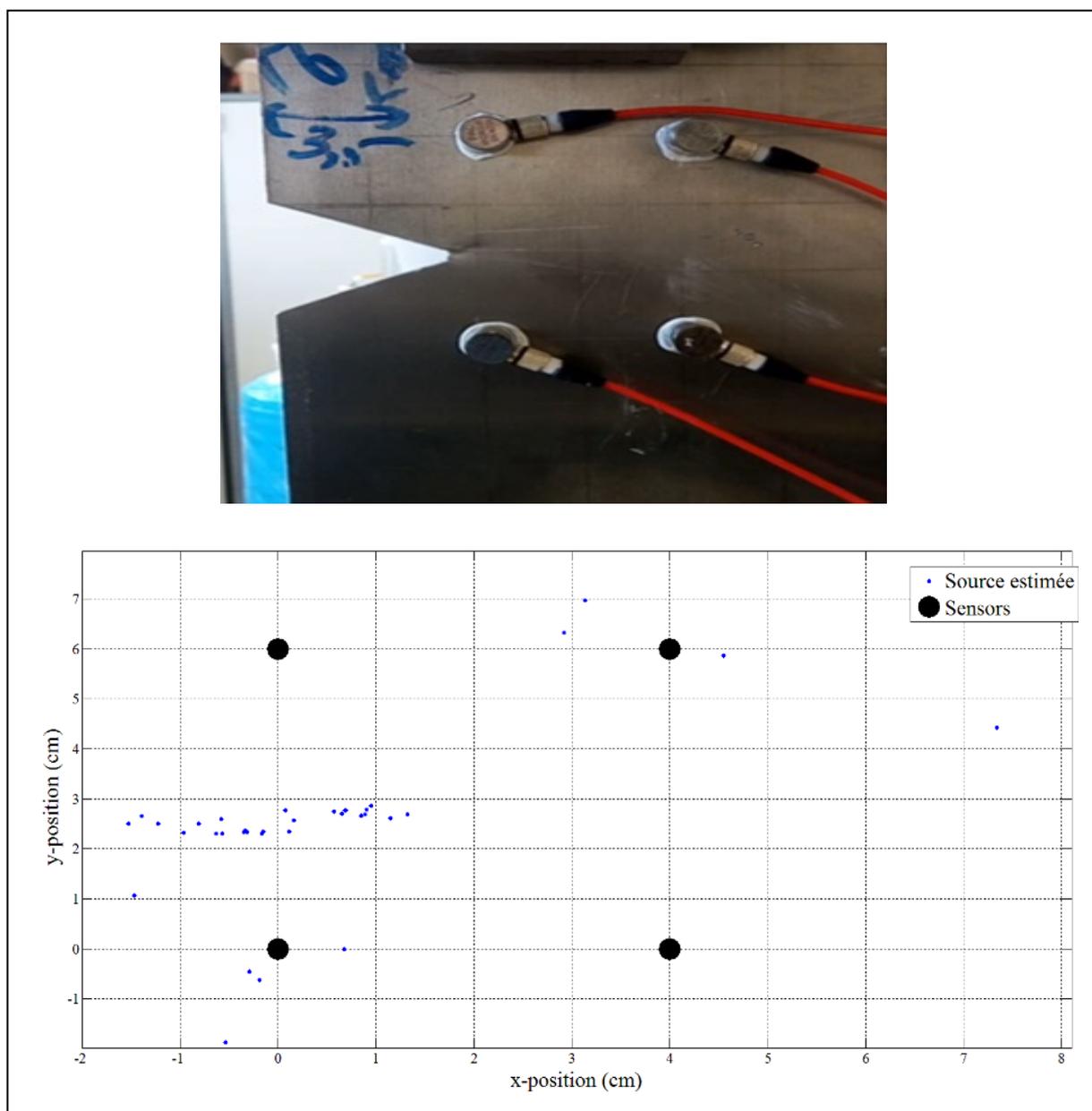


Figure 4.19 (a) : Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à la charge maximale (pic).

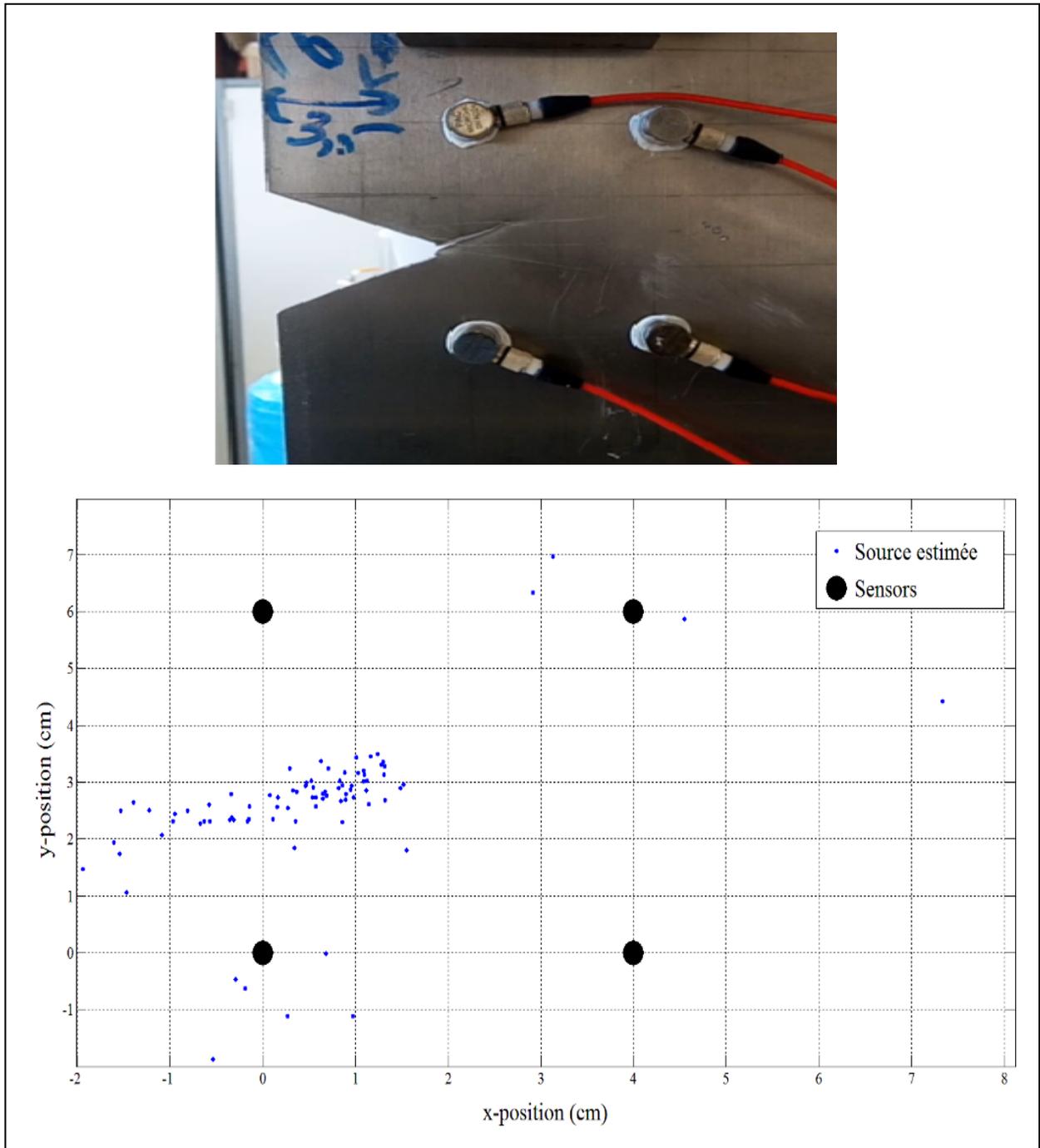


Figure 4.19 (b) : Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à 80 % du pic, après la charge maximale.

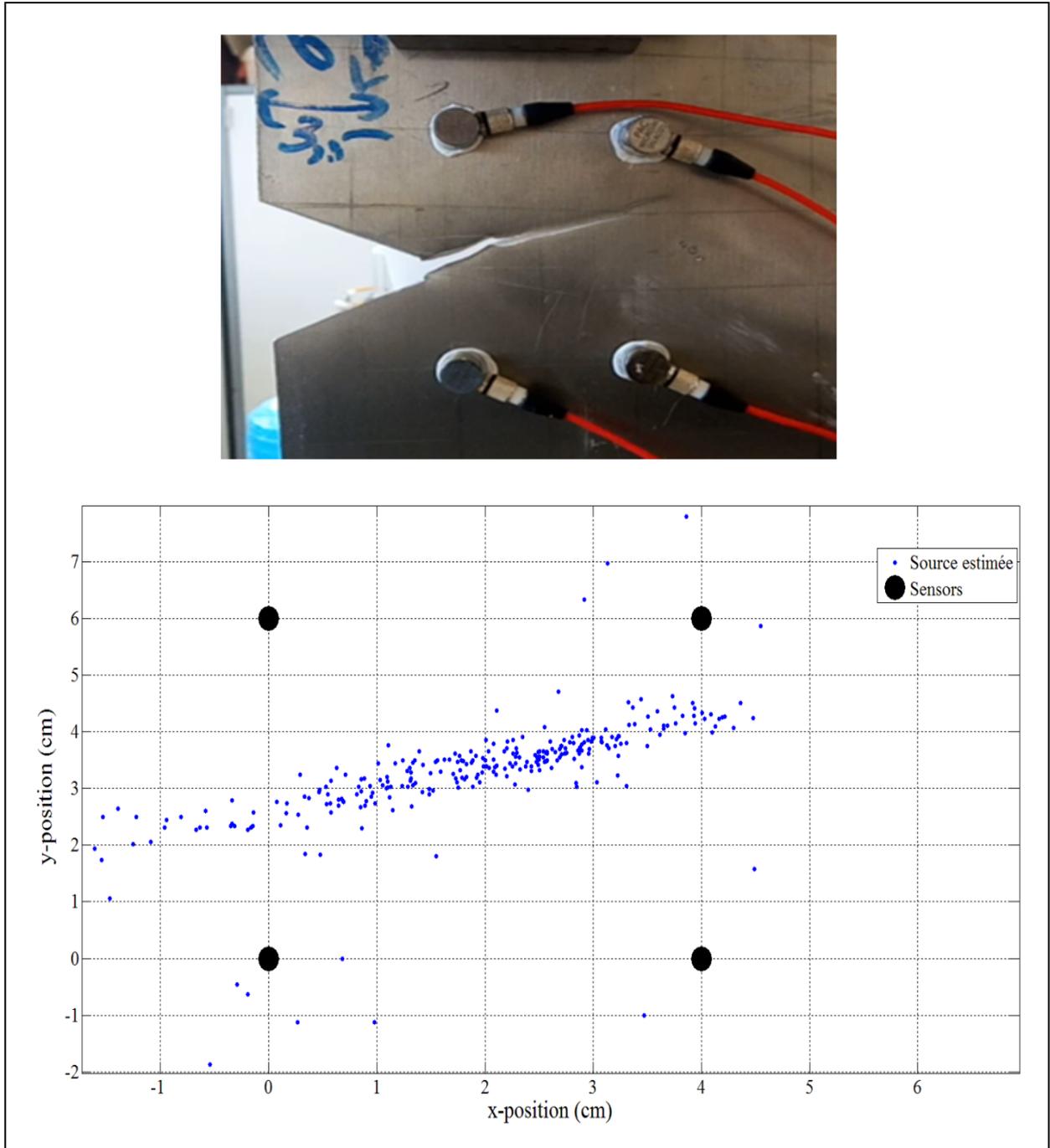


Figure 4.19 (c) : Cartes de localisation des événements d'EA et une capture photographique de la zone utile à la fin de l'essai de traction.

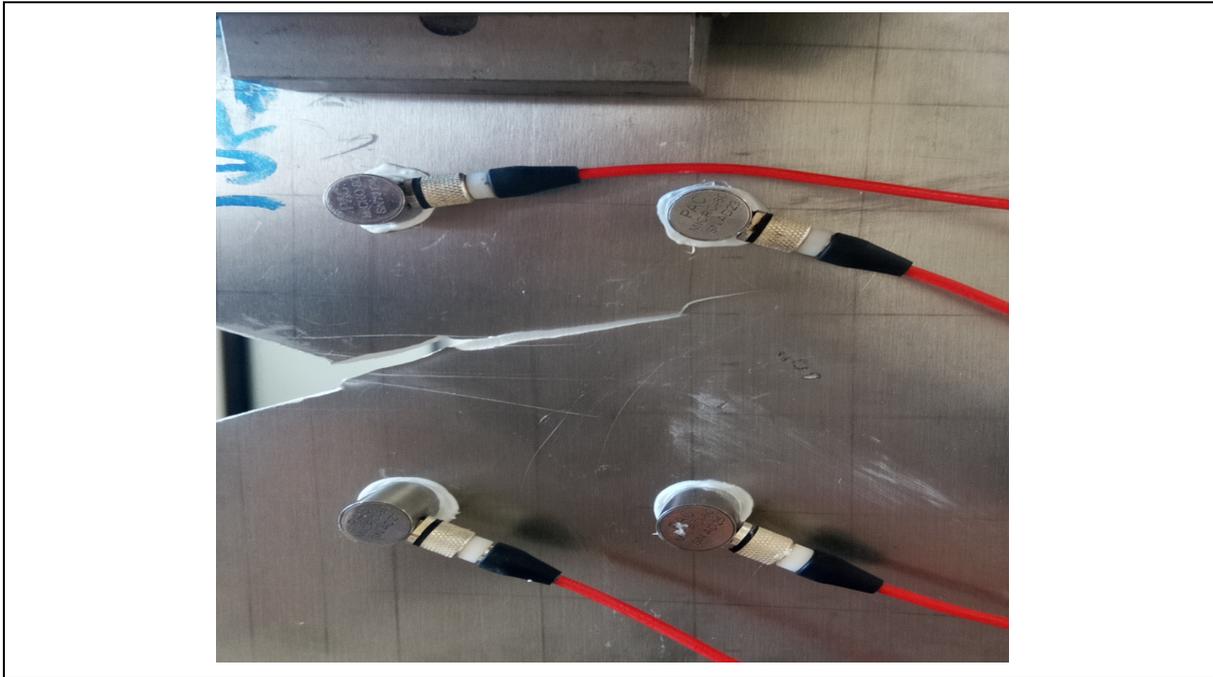


Figure 4.20 : Capture photographique de l'éprouvette en aluminium à la fin de teste de rupture.

IV.1.3.4 Comportement mécanique de l'aluminium

Dans cette partie, nous étudions le comportement mécanique de l'aluminium sous chargement monotone. La [figure 4.21](#) illustre le comportement d'un échantillon d'aluminium sous traction monotone à vitesse de déplacement constante (0.5 mm/min).

Il est intéressant de repérer à quel moment du chargement mécanique le signal acoustique apparaît. En effet, une salve d'EA peut être repérée par ses coordonnées force, déformation, temps auxquelles elle a été enregistrée. De la sorte, on peut représenter un essai mécanique à travers son activité acoustique en plus de sa réponse mécanique usuellement utilisée. La [figure 4.22](#) représente la contrainte (unité : kN, tracée en vert), ainsi que l'énergie (Unité : attaj, tracée en bleu), correspondant à l'EA émise par le matériau afin de visualiser le moment où ces événements sont survenus au cours du chargement. On observe sur le tracé de l'énergie de l'EA une augmentation initiale au cours de la transition élastique-plastique du matériau. Par la suite, le niveau d'énergie ne cesse de diminuer sur le domaine de déformation plastique jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. A travers cet essai, nous constatons que la majorité des événements sont enregistrées dès que la contrainte commence à chuter jusqu'à la

rupture finale de l'éprouvette, à l'exception de quelques hits qui apparaissent à la limite d'élasticité. Sur cette Figure nous distinguons 3 domaines principaux :

- Un domaine linéaire qui correspond à la déformation élastique du matériau. La contrainte à l'extrémité de ce domaine élastique est dite limite d'élasticité : $\sigma_e \approx 31$ kN.
- Un domaine de déformation plastique uniforme qui s'étend entre la contrainte de limite élastique et un maximum correspondant à la contrainte maximale de traction $\sigma_{\max} \approx 34.5$ kN. Le long de ce domaine, l'effort appliqué sur l'éprouvette pour poursuivre la déformation croît de façon continue.
- Le domaine de rupture de l'échantillon commence dès que la contrainte commence à chuter, jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.

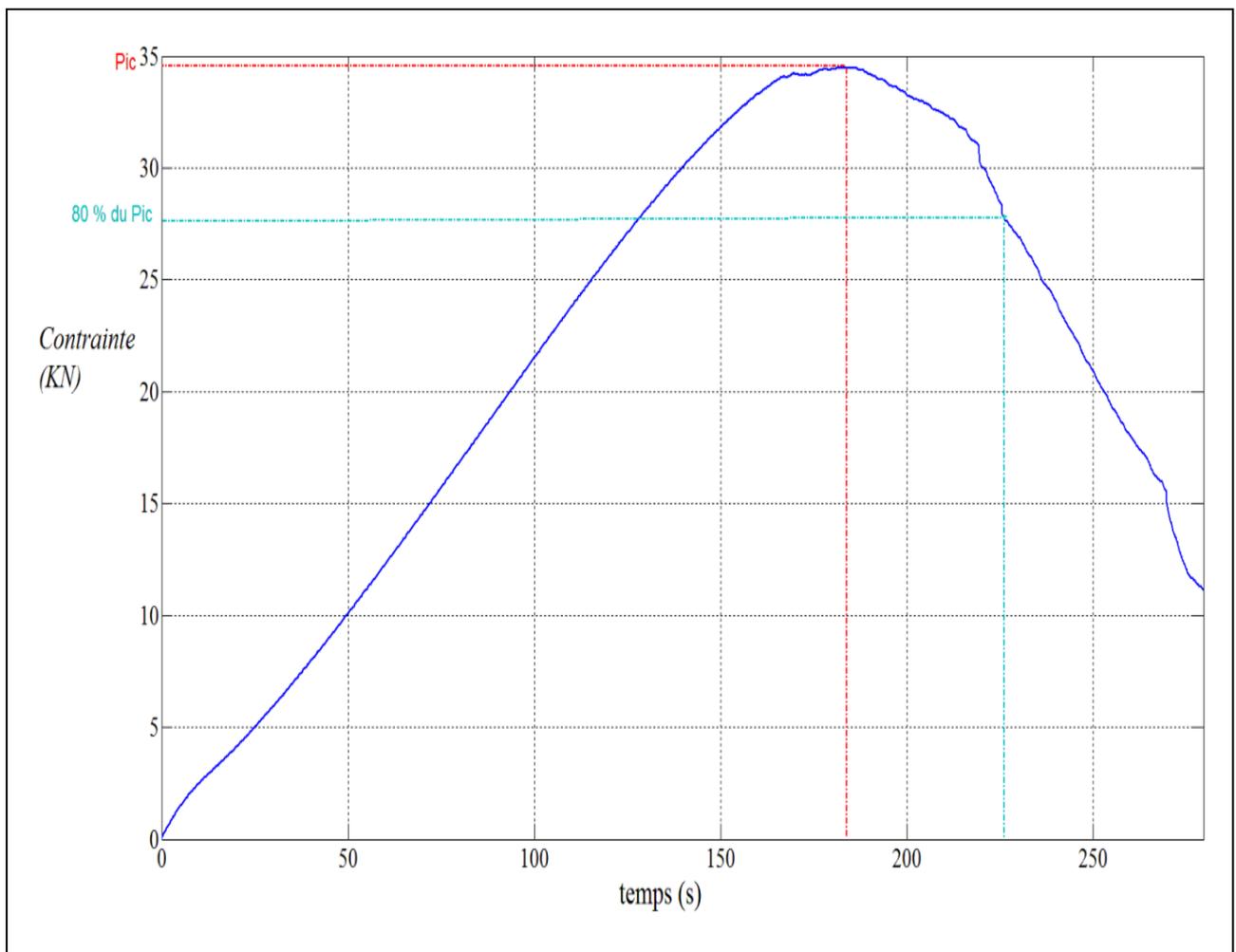


Figure 4.21 : Contrainte en fonction du temps pour un essai de traction simple sur un aluminium.

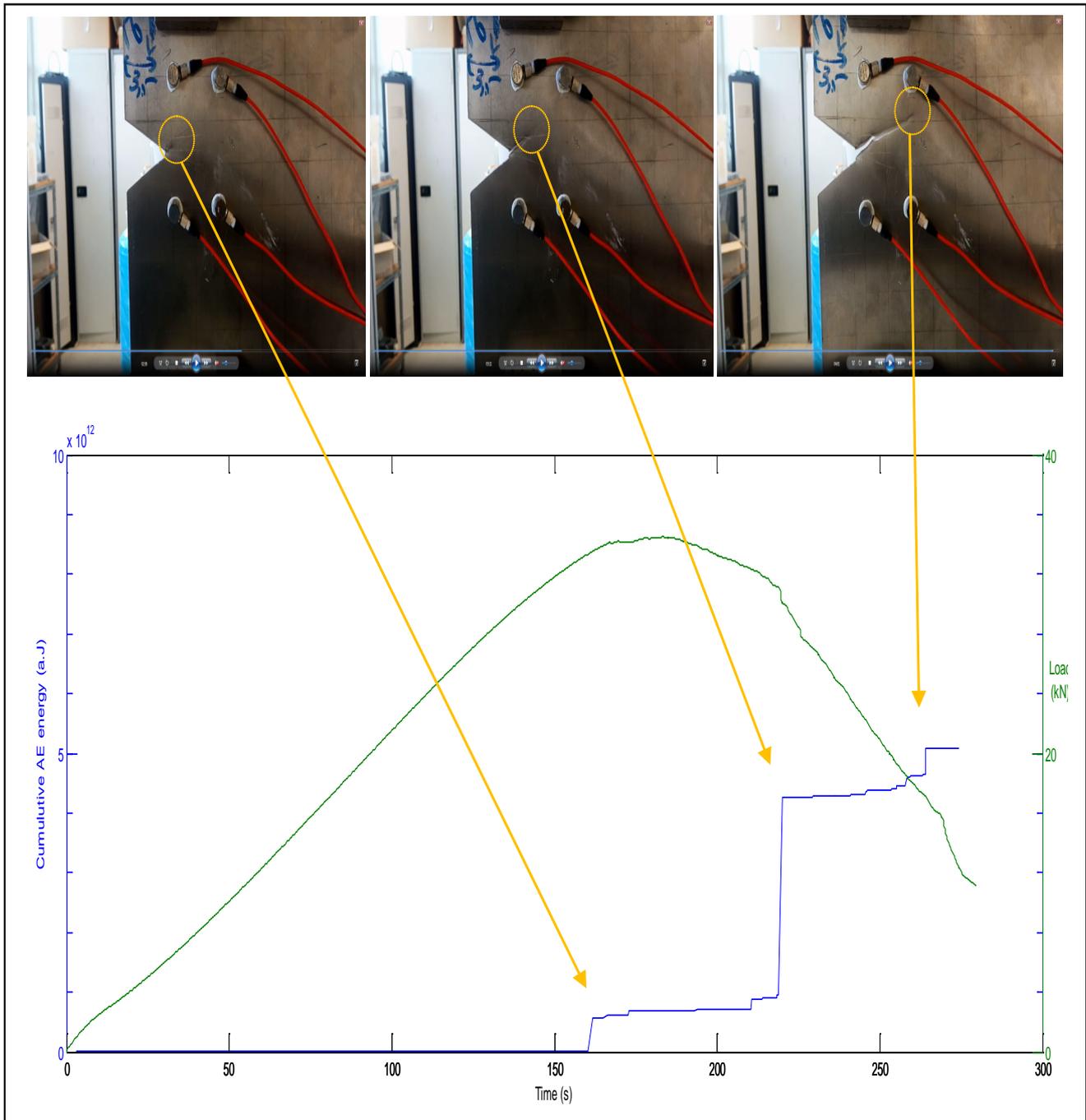


Figure 4.22 : Energie d'EA cumulée en fonction du temps avec la contrainte.

Enfin, les méthodes de traitement du signal, ainsi que la chaîne de mesure, ont été validées dans le cas d'un matériau homogène connu. Par conséquent, les objectifs de la première expérience du protocole expérimental sont atteints. Il est maintenant possible d'envisager l'étude de la performance de ces estimateurs dans le cas d'un matériau hétérogène et anisotrope, comme le béton.

IV.1.4 Conclusion

Différents essais de traction ont été effectués sur des échantillons d'aluminium comme matériau modèle afin d'étudier son comportement sous chargement monotone uni-axial et valider les méthodes de traitement du signal proposées pour l'estimation de l'emplacement et le suivi de l'évolution des sources d'EA générées. Nous avons constaté à travers les résultats, que la majorité des d'événements acoustiques se situe autour du trajet de la fissure, ce qui démontre l'efficacité, la précision et la robustesse de l'approche proposée.

L'EA est étroitement liée à la contrainte appliquée dans le matériau. En sollicitation monotone et d'une manière générale, nous notons une émissivité plus importante en nombre à l'approche de la rupture du matériau (aux alentours du seuil de plasticité). Toutefois, l'énergie de l'EA augmente fortement au cours de la transition élastique-plastique du matériau. Nous suggérons qu'en effet, l'EA résulte de l'effet cumulé de plusieurs petits mouvements non corrélés, correspondant à des sources de dislocations.

IV.2 ESSAIS DE FLEXION EN TROIS POINTS SUR UN ECHANTILLON EN BETON A ENTAILLE UNIQUE COUPLEE A L'EA

Dans cette partie, nous introduisons le matériau béton qui se trouve au cœur des problématiques dans le génie civil. Nous détaillons le protocole expérimental relatif à l'acquisition des données d'émission acoustique (EA) et nous présentons le traitement des données préalablement effectué dans le cas des essais de traction pour l'estimation de l'emplacement et le suivi de l'évolution des sources d'EA.

Durant la vie d'un ouvrage, le vieillissement du béton se traduit de différentes manières : perte de performance, perte de durabilité et perte de sûreté. L'inspection du béton vient répondre au besoin de suivi de la structure pour estimer sa durée de vie, d'autant plus que le coût de maintenance d'un ouvrage augmente exponentiellement avec le niveau de dégradation du béton [150]. Les inspections ont pour but de détecter de manière précoce une dégradation du matériau et d'en évaluer les changements de propriétés induits. Ceci permet de s'assurer de la bonne tenue de la structure et de rationaliser les coûts de maintenance.

Les méthodes de contrôle non destructives par EA se trouvent dans quasiment toutes les problématiques de caractérisation des structures en béton grâce à ses nombreux avantages. Elles disposent de très bonnes aptitudes à la mesure d'épaisseur, incluant les fortes épaisseurs, et une facilité de mise en œuvre. Elles présentent également un lien direct avec des caractéristiques mécaniques du matériau. En revanche, elles présentent des inconvénients : la nécessité de

coupler le transducteur à la pièce, une grande sensibilité à la forte hétérogénéité du matériau et aux conditions de mesure (température, taux d'humidité, etc.).

Des essais de flexion en trois points sur un échantillon en béton à entaille unique ont été conduits d'une façon non interrompue jusqu'à rupture globale de l'échantillon [163]. Les essais se sont déroulés au Laboratoire Mécanique des Structures 'LMS', département génie civil, Université Tahri Mohamed de Béchar.

IV.2.1 Caractéristiques du béton

Le béton est un matériau composite fabriqué à partir d'inclusions inertes (sables, granulats, etc.) et d'un liant (à base de ciment, de bitume ou d'argile). Le terme « béton » désigne couramment le béton classique à base de ciment. Par la suite, nous ne considérons que ce type de béton dans le cadre de notre étude. Il est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde, surtout dans le domaine du génie civil, grâce à ses nombreux avantages techniques et économiques : bonne résistance mécanique, haute durabilité, bonne adaptation aux environnements, facilité de mise en œuvre, coût faible et disponibilité des matières premières [151].

Formulation du béton

Le béton est composé du ciment, de l'eau, des sables et des granulats (figure 4.23).

- Le **ciment**, se présentant sous la forme d'une poudre très fine, est constitué essentiellement de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3), et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Il désigne un liant hydraulique qui se forme et durcit progressivement par la réaction chimique d'hydratation avec de l'eau et permet d'agglomérer les sables et les granulats en durcissant.
- L'**eau**, qui permet d'activer l'hydratation du ciment, joue un rôle important par le rapport de quantité eau sur ciment (E/C). Ce rapport est un facteur critique du béton et il est en général compris entre 0,3 et 0,6 selon les caractéristiques mécaniques souhaitées ou l'environnement des ouvrages [152] : une valeur faible va couramment réduire la porosité et augmenter la résistance du béton, tandis qu'une valeur élevée apporte une bonne facilité de mise en œuvre du béton frais.
- Les **sables** et les **granulats** constituent le squelette du béton et représentent généralement de 60 % à 80 % en volume du béton. Ils sont classés suivant leurs tailles : nous appelons, par convention, les grains de dimensions inférieures à 4 mm, les sables et

les grains supérieurs à 4 mm les granulats. La distribution des tailles pour l'ensemble de ces grains et granulats, appelée granularité, est exprimée en pourcentage de masse des grains passant dans des tamis à mailles carrées et normalisées. Elle doit être déterminée de façon à être la plus continue possible afin d'optimiser les organisations des grains dans l'espace et d'améliorer la compacité du béton. Ceci va contribuer à une meilleure performance mécanique.

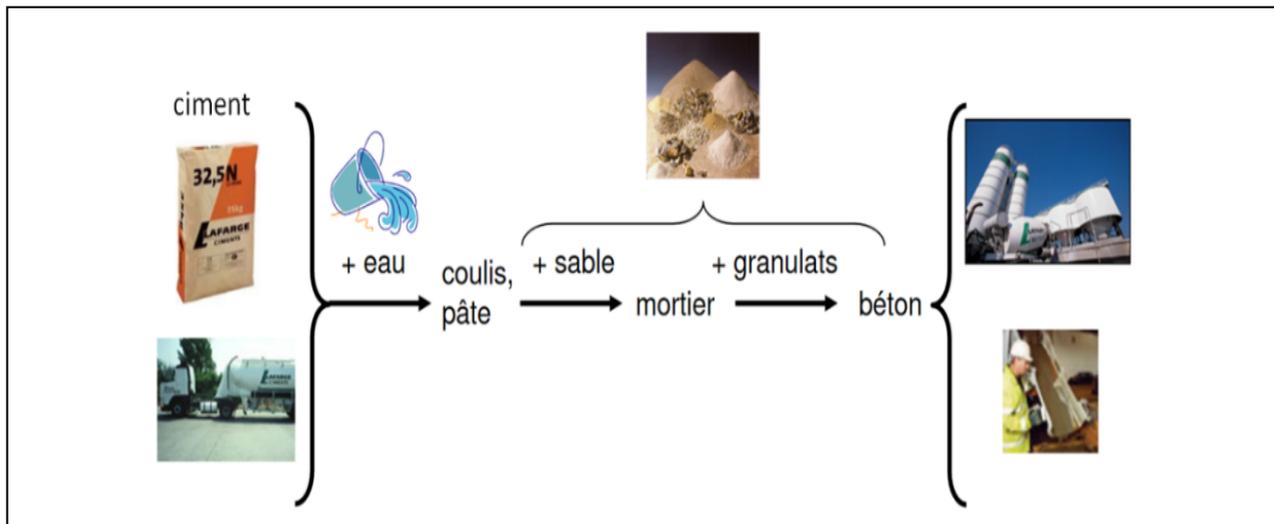


Figure 4.23 : Béton : matériau composite [154].

Le choix des quantités de chacun des constituants d'un béton, appelé la formulation, détermine la microstructure et puis les propriétés mécaniques. Elle est techniquement établie selon les caractéristiques mécaniques requises sur des éprouvettes standards du béton durci dont les dimensions sont spécifiées dans les normes de la construction [154] [155]. Pour le mélange de béton, nous avons utilisé du ciment Portland ordinaire, du sable siliceux naturel et deux types d'agrégats grossiers d'une taille maximale de granulats de 15 mm. La proportion de mélange utilisée en laboratoire est indiquée dans le [Tableau 4.13](#). Des cubes de 150 mm³ de dimensions ont été utilisés pour évaluer la résistance à la compression. À 28 jours, la résistance moyenne à la compression était de 34,8 MPa.

Composants	Poids (kg)
CEM II/B 42.5 N NA, Lafarge	437
sable 0/3	577
gravier 3/8	125
gravier 8/16	994
eau	218

Tableau 4.13 : Formulation d'un béton pour 1 m³.

Dégradation du béton

Tout au long de la vie des ouvrages, le béton subit différentes sollicitations provoquées par le chargement en service ou par l'interaction avec l'environnement. Ces sollicitations conduisent, avec le temps, au vieillissement du béton et à la dégradation de ses propriétés mécaniques. Le béton est un matériau évolutif.

La dégradation du béton se présente à l'échelle microscopique, par différents endommagements ayant plusieurs origines : mécanique, chimique et thermique. Les endommagements peuvent être causés par des contraintes mécaniques dues à un chargement statique ou cyclique (phénomène de fatigue), des chocs, des vibrations, etc. Les endommagements d'origine chimique peuvent provenir principalement de l'alcali-réaction, la réaction sulfatique interne, la pénétration des chlorures, les attaques par les sulfates et la carbonatation. Enfin, les endommagements thermiques sont liés au mouvement de l'eau dans le béton et à des réactions internes.

En général, les endommagements dans un béton résultent d'une combinaison de ces modes d'endommagement qui conduisent à une même conséquence : la génération de microfissures dans le béton, accompagnée d'une chute des caractéristiques mécaniques. A mesure que le temps avance ou que le niveau de sollicitation augmente, les microfissures se propagent et, en se connectant avec des pores présents dans le béton, forment des macrofissures. La création et la propagation des fissures se situent généralement dans des zones où les contraintes sont les plus importantes, ou bien dans des zones à faibles résistances mécaniques. Les fissures augmentent la porosité globale et les connections entre les pores. Elles conduisent à une perte immédiate de ses caractéristiques mécaniques.

IV.2.2 Description du dispositif expérimental

Dans cette partie, nous détaillons le protocole expérimental relatif à l'acquisition des données d'émission acoustique (EA) et nous présentons le traitement des données préalablement effectué. Nous présentons aussi le matériel utilisé pour la génération des sources d'EA. La configuration expérimentale se compose de machines d'essai électromécaniques universelles 3R (EMU3R) de 50 kN associées à un système d'acquisition de données et à un système de détection des dommages d'EA.

Description de corps d'épreuve

Pour les essais de flexion, les éprouvettes utilisées étaient des sections de 70 x 70 x 280 mm³ avec une portée de 210 mm. Tous les échantillons ont été coulés avec le même lot de béton. Ils ont été retirés de leurs moules 24 h après la coulée et stockés au moins 28 jours dans un environnement contrôlé. La [figure 4.24](#) montre la dimension où une encoche centrale a été coupée à la scie dans l'éprouvette avant le test. La largeur de l'entaille a été choisie selon les recommandations de RILEM [156] [157] ; la largeur de l'entaille était de 4 mm et la profondeur était de 14 mm (la profondeur est proportionnelle à la hauteur dans un rapport égal à 0,2). L'entaille a été créée au niveau du noyau provoquant ainsi une résistance à la rupture plus faible par rapport aux autres.

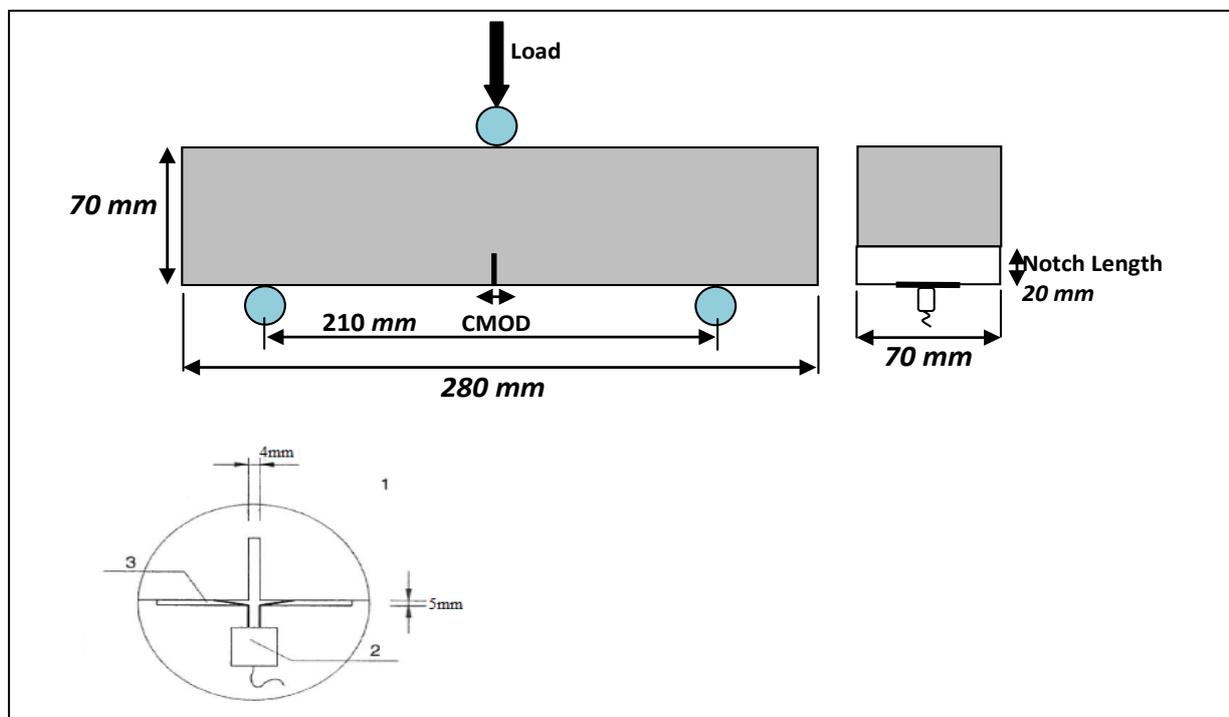


Figure 4.24 : Dimension de l'éprouvette et détails sur la fixation du couteau qui mesure le déplacement de l'ouverture de la bouche de fissure (1. détail de l'encoche, 2. déplacement de l'ouverture de la bouche de fissure (CMOD) 3. bords du couteau collés sur le béton).

Les éprouvettes ont été testées dans des conditions de flexion en trois points, conformément à la norme EN 12390-5 [158]. Les tests ont été réalisés sous contrôle de déplacement d'ouverture de la fissure en boucle fermée (CMOD) à une vitesse de $3.0 \mu\text{m}/\text{min}$. La mesure CMOD consiste à enregistrer la distance entre deux arêtes de couteau, collées sur une surface inférieure lisse de la poutre de chaque côté de l'encoche initiale (figure 4.24). Au cours de l'essai, la flèche à mi-portée a également été mesurée.

Description du Système d'EA

Le système d'acquisition d'émission acoustique MISTRAS comprend 8 voies dont 4 ont été utilisées. Ce système d'acquisition est composé de la carte PCI-DSP4 et d'un micro-ordinateur. Le diagramme suivant en présente une vue d'ensemble (figure 4.25). Les signaux d'EA sont convertis par 4 Capteurs différentiels piézoélectriques de type R15/C, résonnant à 150 kHz et de surface de contact de diamètre 10 mm. Ces signaux sont ensuite amplifiés par des préamplificateurs 2/4/6. Ils sont fournis avec un gain de 20/40/60 dB (sélectionnable par interrupteur) et fonctionnent avec un capteur asymétrique ou différentiel. Le gain du préamplificateur a été réglé à 40 dB. Les signaux sont ensuite convertis par la carte PCI-DSP4, qui les numérise et procède à l'extraction des paramètres d'EA. Les données issues des cartes sont transmises au micro-ordinateur, pour un affichage en temps réel, pour le stockage et pour un post-traitement.

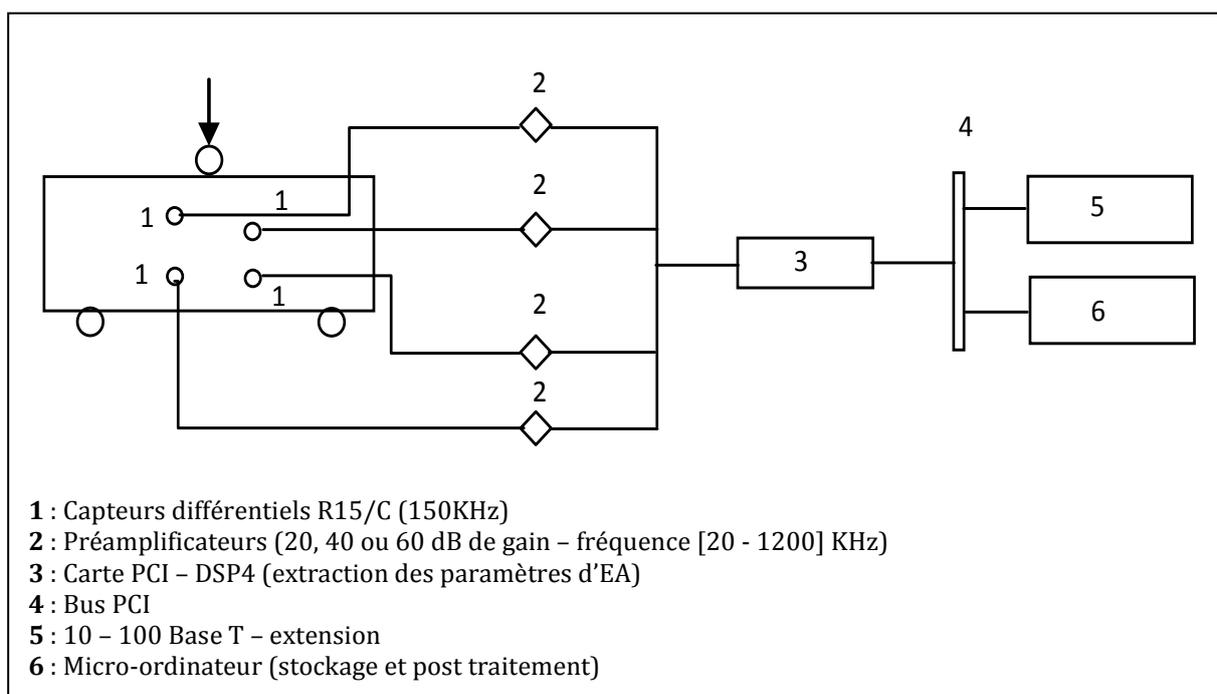


Figure 4.25 : Synoptique d'un système d'EA.

Les quatre transducteurs piézo-électriques sont placés sur une face latérale de l'échantillon. Puisque la propagation de la fissure commence à partir de la pointe de l'entaille prédéfinie, les transducteurs d'EA sont disposés symétriquement par rapport à l'encoche et placés en utilisant de la graisse de silicone comme agent de couplage. Les capteurs forment un emplacement de grille rectangulaire sur un côté de $(105 \times 26 \text{ mm}^2)$. Les transducteurs forment une maille de localisation (Tableau 4.14). Le logiciel d'acquisition MISTRAS comporte plusieurs algorithmes de localisation. Pour qu'une source soit localisée, il suffit qu'un signal soit atteint par les 4 Capteurs. Une solution adhésive est utilisée pour coller les capteurs sur les échantillons testés, afin de garantir un parfait collage physique entre les capteurs et le corps d'épreuve avec une meilleure transmission des signaux d'émission acoustique.

Capteurs	S1	S2	S3	S4
Coordonnées (mm)	(0, 0)	(105, 0)	(105, 26)	(0, 26)

Tableau 4.14 : Coordonnées des capteurs sur l'échantillon en Béton.

Pour l'acquisition, il est nécessaire de préparer un fichier de mise en page qui configurera le matériel d'EA, comme la configuration de la voie de l'acquisition et les paramètres de synchronisation d'EA. Les quatre paramètres de synchronisation d'EA (PDT, HLT, HDT, Seuil) doivent être réglés car ils ont une influence importante sur la façon dont le processeur de données de chaque canal forme les hits et / ou calcule les caractéristiques du signal. En général, le seuil d'acquisition à partir duquel les activités acoustiques sont déclenchées, doit être ajustée avant chaque essai, pour chaque voie, tout en évitant : 1- un seuil d'acquisition trop faible, qui peut entraîner dans la période de forte activité, un déclenchement continu qui implique une saturation du système d'acquisition. 2- un seuil d'acquisition trop élevé qui réduirait le nombre de signaux détectables ainsi que la précision de la localisation.

Pour éviter le bruit mécanique de la machine d'essai, des pièces rectangulaires en caoutchouc (téflon) ont été placées au niveau des appuis et sous le vérin. Le calcul de la position d'un événement peut être faussé voir rendu impossible à cause de la présence de fissures préexistantes. Les incertitudes liées à cette approximation sont éliminées en cours d'essai grâce à des corrections en utilisant le test du cassé de mine. Cet essai consiste à casser une mine à une position donnée entre les 4 Capteurs et vérifier si la localisation du point où nous avons cassé la mine est confondue avec sa position réelle. Si cela n'est pas le cas, nous vérifions le couplage des

capteurs (où nous les déplaçons) et nous répétons la même procédure jusqu'à aboutir à une meilleure localisation des mines cassées. Les amplitudes d'EA enregistrées varient de 0 à 100 dB. Afin de surmonter le bruit de fond, le seuil de détection du signal a été fixé à 40 dB.

Description de l'Essai

Les mesures d'émissions acoustiques ont été réalisées sur les éprouvettes sollicitée en flexion trois points. Les essais ont été conduits d'une façon non interrompue jusqu'à rupture globale de l'échantillon. La [figure 4.26](#) illustre bien un essai de flexion trois points. Une analyse 2D avec les algorithmes proposés a été effectuée pour la localisation et le suivi de la propagation des événements d'EA. Les ondes acoustiques doivent atteindre au moins trois capteurs pour un processus de localisation bidimensionnelle. Les hits d'EA, y compris les formes d'onde, ont été enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 1 MHz. La localisation des sources d'EA nous a permis de déterminer les régions des dommages actifs. Dans cette étude, l'emplacement est basé sur trois hypothèses principales ; la source est ponctuelle, la vitesse de propagation des ondes est constante lors d'un test et le matériau est supposé être isotrope.

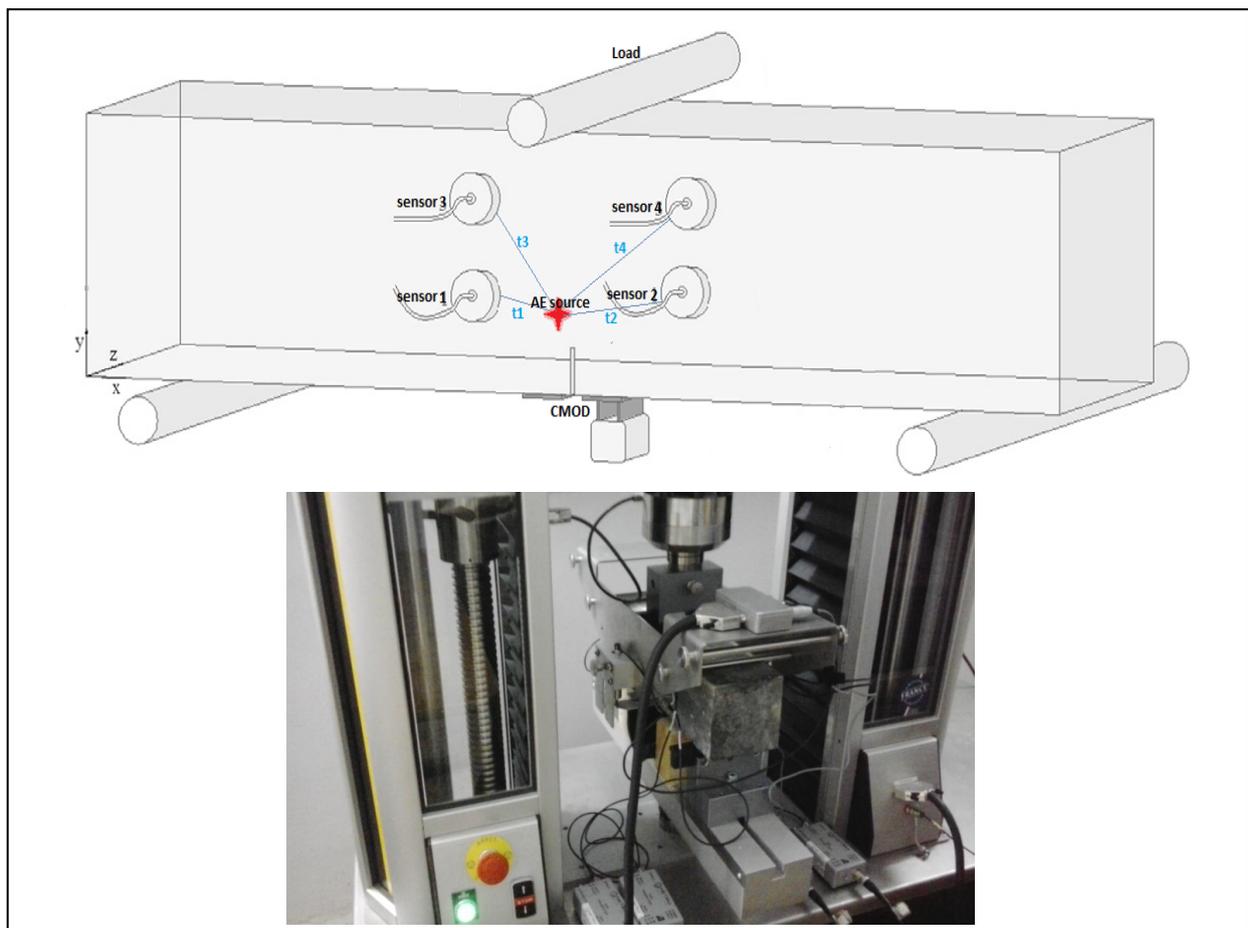


Figure 4.26 : Configuration expérimentale complète d'un essai de flexion 3 points.

IV.2.3 Résultats de l'expérience

Cette partie a pour but de présenter les résultats de l'estimation de l'emplacement et du suivi de l'évolution des sources d'EA obtenus par les méthodes de traitement du signal proposées. Le système d'acquisition EA a été lancé simultanément avec l'EMU3R. Un hit est une détection d'un signal, ayant un début et une fin identifiables, sur un canal d'émission acoustique. Les hits enregistrés à partir de la même source forment un événement acoustique. Le regroupement des hits en un événement consiste à faire glisser une fenêtre temporelle de largeur " T " et à compter le nombre de hits à l'intérieur (voir section II.9, Chapitre 1). Si le nombre de hits à l'intérieur de la fenêtre temporelle égal à 4 (nombre de capteurs égal à 4), les hits sont regroupés et forment un événement d'EA. Dans notre cas, la largeur de la fenêtre temporelle est de 51 μ s pour une vitesse de propagation égale à 2100 m/s.

IV.2.3.1 Représentation d'un signal d'EA

Un exemple de la forme temporelle d'un signal d'EA détecté est montré sur la [figure 4.27](#). Chaque salve d'EA est caractérisée par plusieurs paramètres (Section II.3.3, Chapitre 1), également appelés descripteurs. Le [Tableau 4.15](#) résume certaines caractéristiques d'EA et la synchronisation du signal d'EA ([figure 4.27](#)).

Avant d'estimer l'emplacement des événements d'EA, nous devons calculer le temps d'arrivée (TOA) de toutes les salves (hits) pour chaque capteur. La mesure des TOA des ondes d'émission acoustique a été effectuée par une transformée en ondelette continue (CWT). L'ondelette choisie est l'ondelette de Morlet complexe avec des paramètres donnant une bonne transformation sont fixés à ($f_c = 0.6$ Hz, $f_b = 0.7$ Hz).

La [figure 4.28](#) illustre un signal d'EA reçu par un capteur avec son spectre d'amplitude et son analyse temps-fréquence. Il est à noter que les distributions fréquentielles des signaux sont étalées sur des bandes plus larges. Cependant, les amplitudes les plus élevées se trouvent en deçà de 200 kHz environ. Par conséquent, la valeur maximale des coefficients de module au carré (crêtes) de la CWT est accomplie à la fréquence dominante. La projection du pic d'énergie correspondant à la fréquence dominante f_i représente le temps d'arrivée t_i du signal au capteur. La CWT est appliquée aux signaux d'EA reçus du prochain événement acoustique afin de calculer leurs temps d'arrivées et ainsi de suite jusqu'au dernier événement acoustique. Une fois les TOA connus, l'étape suivante est de calculer les différences de temps Δt_{mi} (TDOA) par rapport au capteur maître de tous les événements acoustiques.

Les CWT montrent que le contenu fréquentiel des signaux enregistrés de chaque événement acoustique se situe principalement dans l'intervalle [80 - 280] kHz et les fréquences dominantes moyenne sont entre [100 à 180] kHz (*i.e.* figure 4.28 (c)).

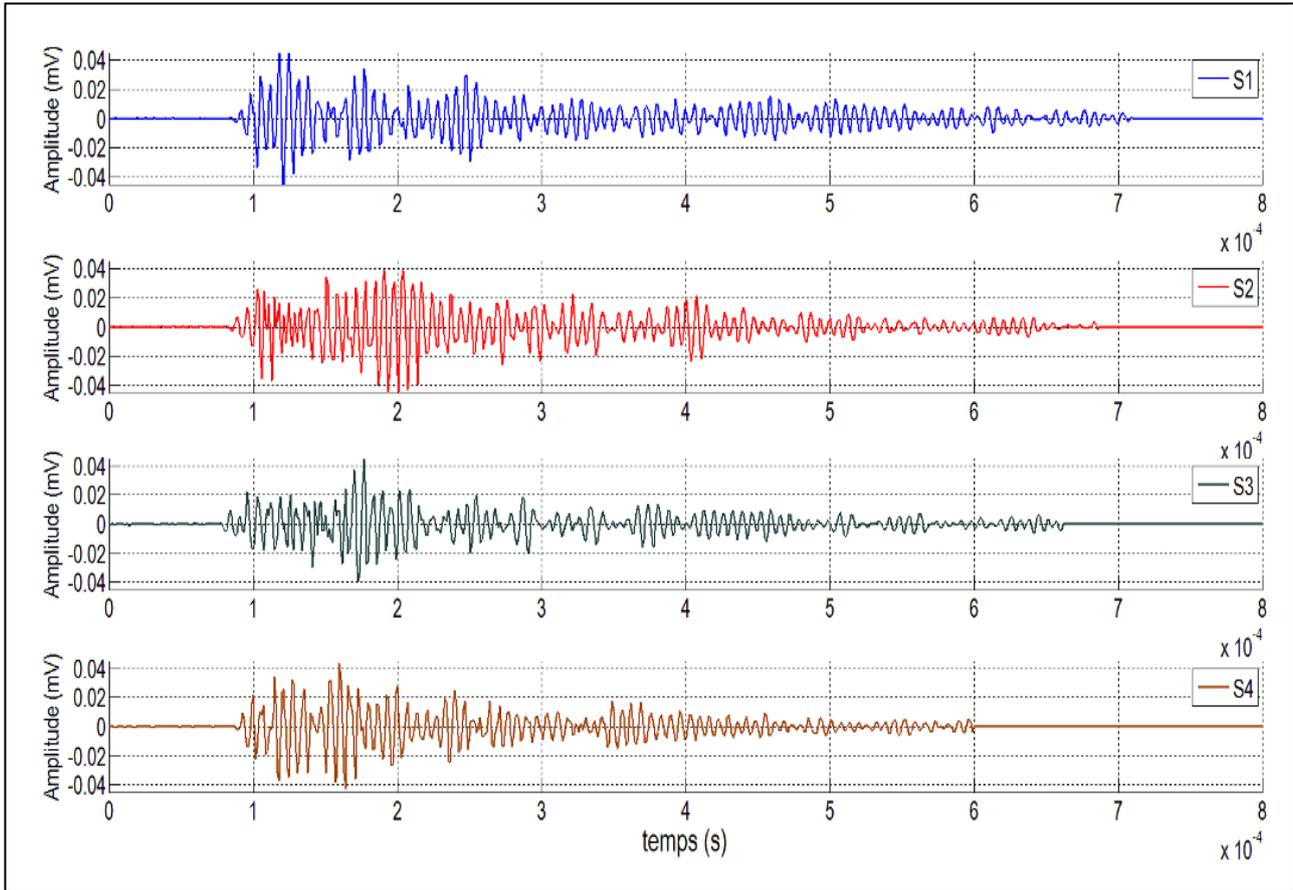


Figure 4.27 : Un exemple des signaux d'EA détectés - AE hits -

RISE TIME [μ s]	CNT	PCNT	DUR [μ s]	Amp [dB]	E _{abs} [aJ]	F _p [kHz]
97	15	11	171	45	106.827E+00	151
65	6	4	97	45	42.147E+00	153
44	39	5	420	55	551.300E+00	148
143	34	18	320	48	233.423E+00	151
107	89	18	770	65	12.834E+03	152
89	100	14	964	64	13.957E+03	151

Tableau 4.15 : Quelques valeurs des fonctionnalités d'EA et temps pour les Hits AE (CNT: Counts, PCNT: Counts to Pic, DUR: Duration).

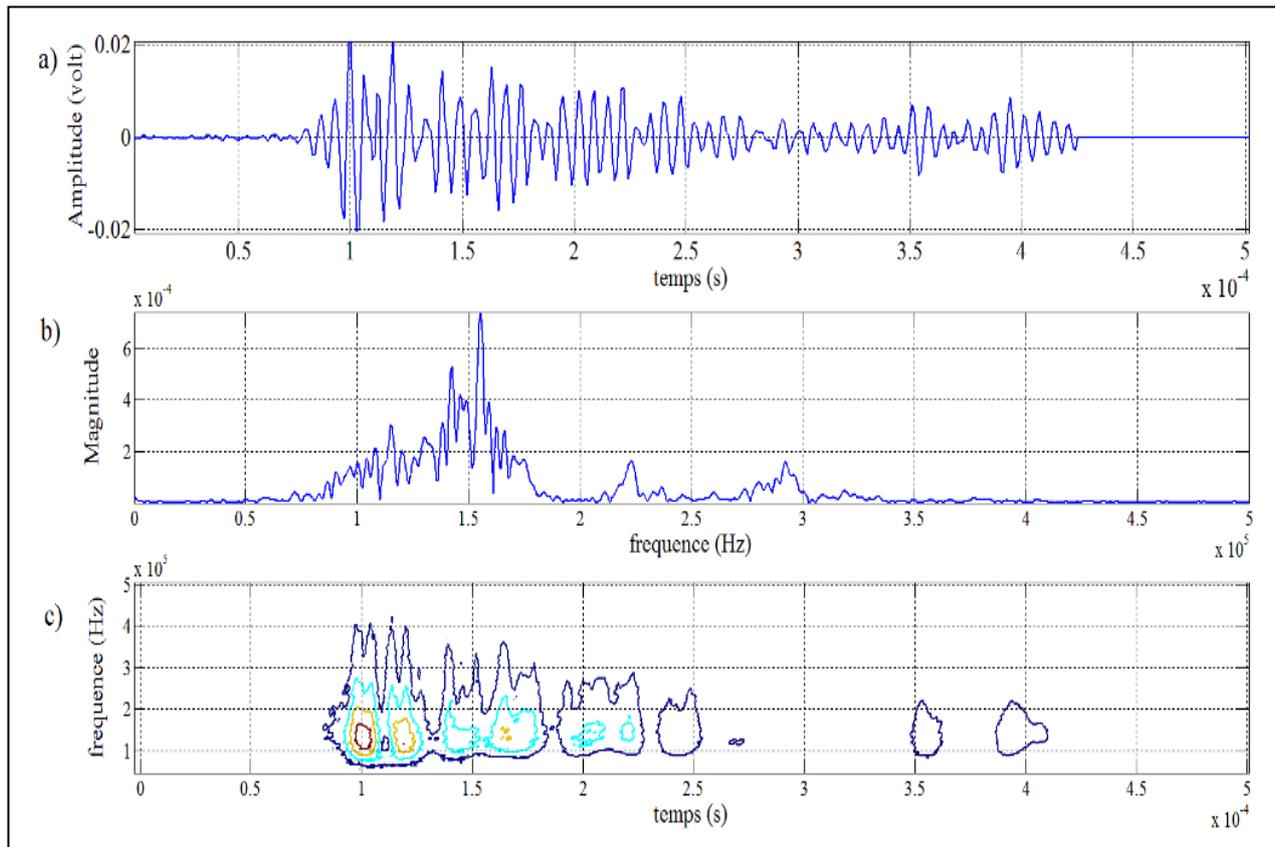


Figure 4.28 : Une partie de la méthode de traitement du signal utilisée. (a) : signal d'EA d'origine. (b) : Spectre de puissance. (c) : tracé de la transformation en ondelettes de signal d'EA.

IV.2.3.2 Comportement mécanique et activités acoustiques acquises

Il est intéressant de repérer à quel moment du chargement mécanique le signal acoustique apparaît. En effet, une salve d'EA peut être repérée par ses coordonnées force, déformation, temps auxquelles elle a été enregistrée. De la sorte, on peut représenter un essai mécanique à travers son activité acoustique en plus de sa réponse mécanique usuellement utilisée.

Les résultats mécaniques présentés correspondent à l'évolution de la charge en fonction du CMOD ou de la déformation ; cette courbe montre le comportement du béton, avant et après pic, sous charge de flexion. La [figure 4.29](#) correspond aux courbes charge-CMOD pour l'éprouvette testée.

L'activité d'EA lors des essais de flexion 3 points est définie par l'évolution du nombre de hits. Un hit est une détection d'un signal, ayant un début et une fin identifiables, sur un canal d'émission acoustique. Les évolutions, correspondant à l'éprouvette expérimentale testée est représentée

sur la figure 4.30. La figure 4.31 corrèle le comportement mécanique et le nombre de salves lors des essais de flexion 3 points sur le béton. Nous observons pour les chargements en dessous du pic de charge une faible activité acoustique. Elle évolue plus fortement dans la phase post-pic. L'activité acoustique enregistrée dans le domaine plastique et bien avant le domaine de macrofissuration est probablement due aux microfissurations dans le matériau. Le nombre maximal de salves atteint est de 1250 et représente une fracture avancée et un endommagement du béton.

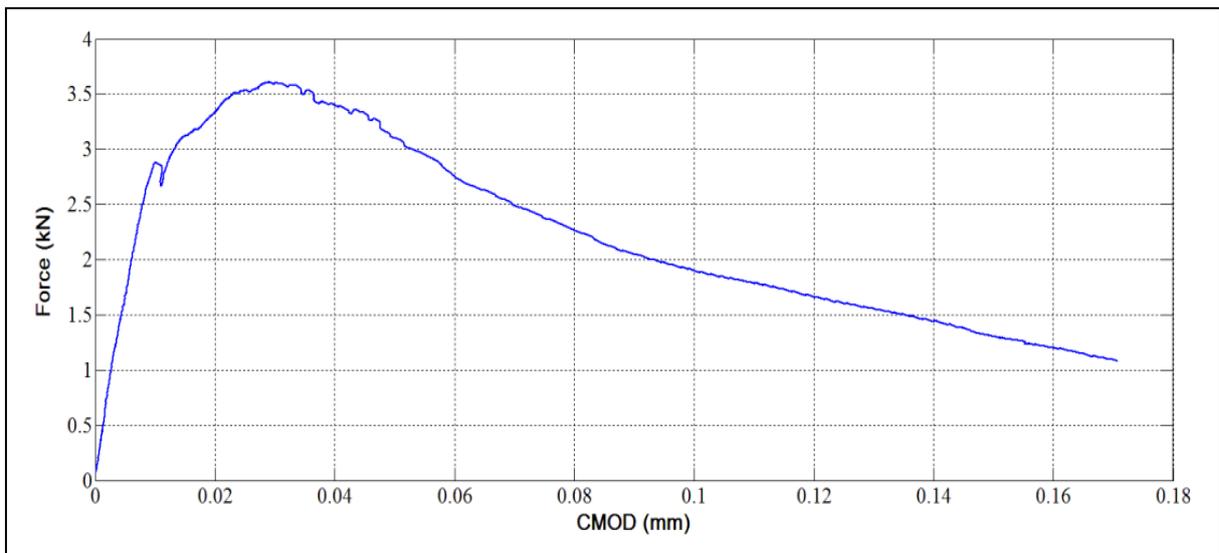


Figure 4.29 : Courbes de charge-CMOD pour l'échantillon testé.

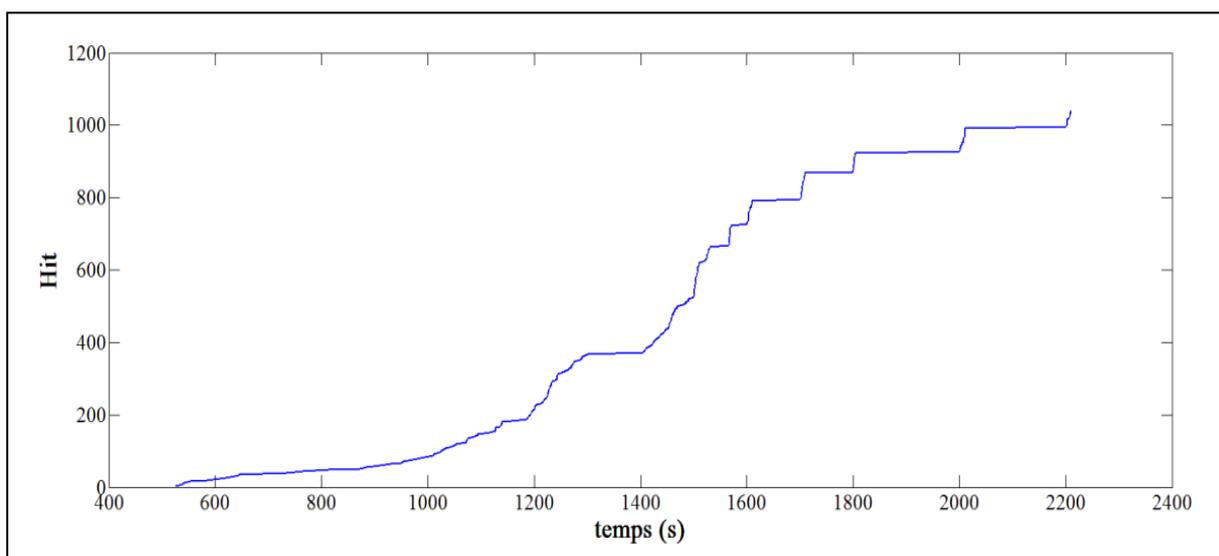


Figure 4.30 : Evolution du nombre de salves cumulés pour l'échantillon testé.

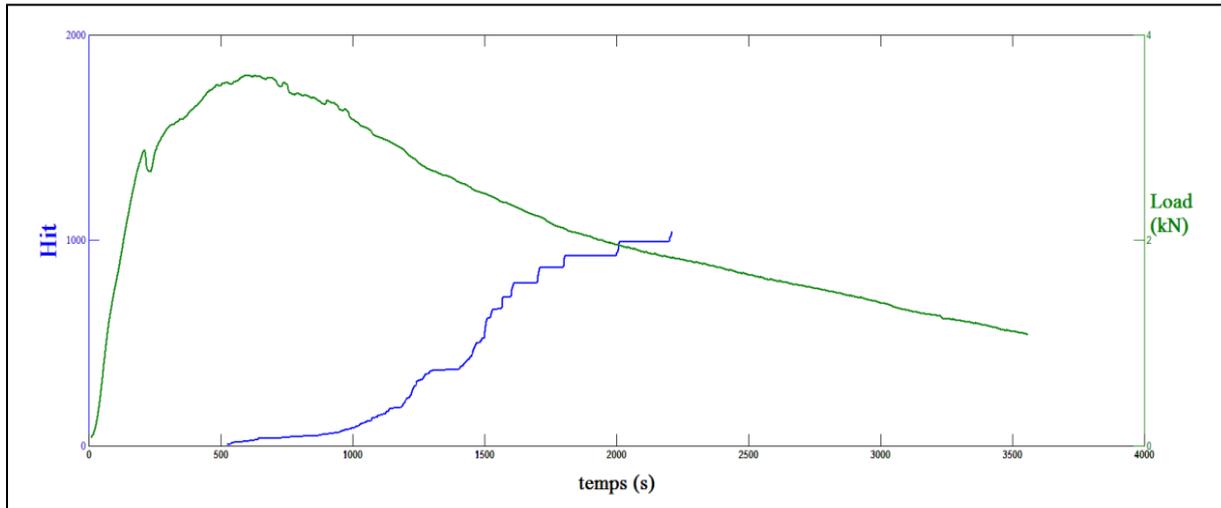


Figure 4.31 : Corrélation entre les courbes de temps de chargement et les Hits cumulé.

IV.2.3.3 Localisation d'évènements d'EA

La figure 4.32 montre la corrélation entre les courbes charge-déformation et les événements d'EA cumulés. Les pics de chargement indiquent le début des processus de fissuration et d'endommagement, qui se traduisent par un changement significatif des événements acoustiques [159][160]. La comparaison du nombre total de hits (1250) et d'événements (300) (voir figures 4.31 et 4.32) montre une nette réduction ; cette différence peut s'expliquer par le fait qu'un seul événement acoustique peut générer plusieurs hits. Au pic, l'activité acoustique représente environ 7 % du nombre total des événements. L'hétérogénéité du béton et les mécanismes de microfissuration du mouvement de dislocation ainsi que la phase de transformation irréversible peuvent être à l'origine de cette différence.

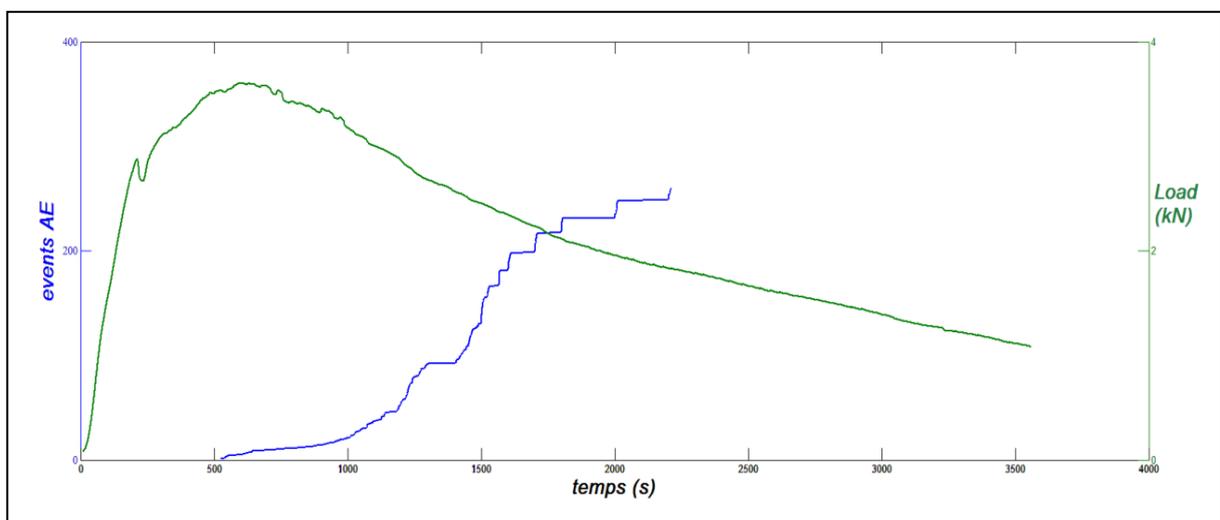


Figure 4.32 : Corrélation entre les courbes charge-temps et les événements cumulés.

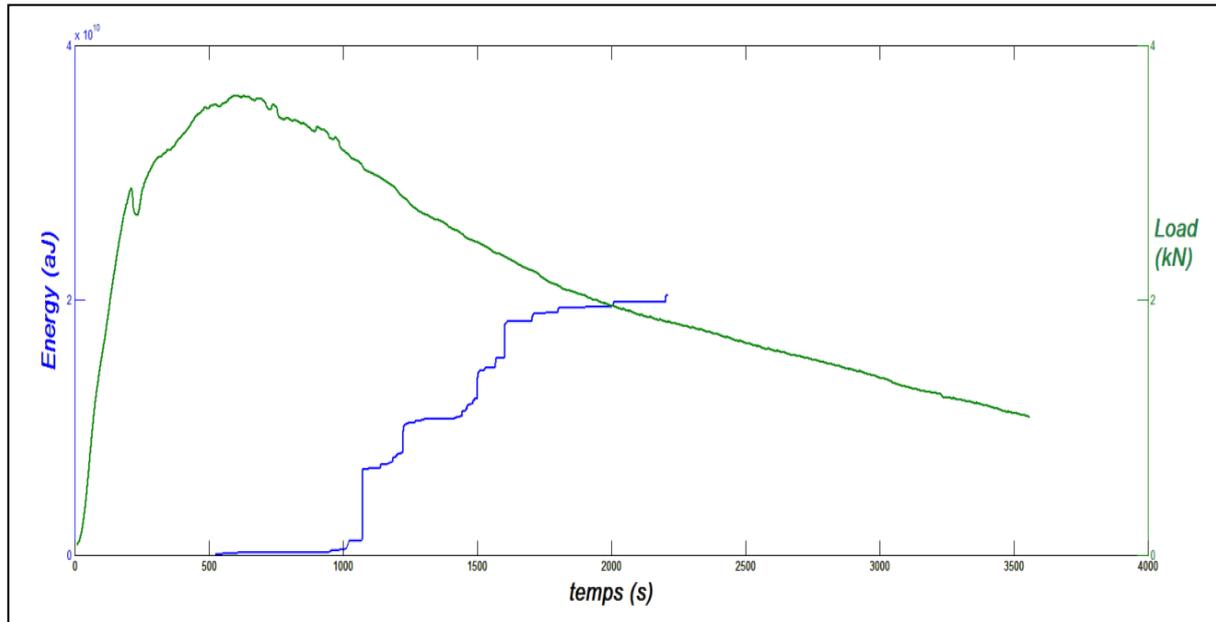


Figure 4.33 : Énergie absolue cumulée selon la courbe charge-CMOD.

L'énergie absolue cumulée pendant le test de flexion est représentée sur la [figure 4.33](#). La valeur maximale atteinte est d'environ 2,20 attoJ. Les évolutions des énergies absolues sont caractérisées par plusieurs sauts dénotant des ouvertures de fissures. Au sommet, les événements obtenus ont de faibles énergies. Dans le post-pic, l'évolution de la fissuration donne plus d'événements avec des énergies plus élevées.

La localisation des microfissures des signaux d'EA filtrés a été effectuée en utilisant les approches probabilistes proposées. La [figure 4.34](#) montre deux cartes de localisation et de l'évolution des événements d'EA obtenues à partir du même ensemble de données de l'essai en flexion trois points. Chaque point bleu représente un événement d'EA. Les événements d'EA localisés sont affichés dans le plan XY. La [figure 4.34 \(a\)](#) montre le résultat de l'estimation de l'emplacement des événements acoustique par l'algorithme à base du filtre EKF. La [figure 4.34 \(b\)](#) montre le résultat de l'estimation de l'emplacement des événements d'EA par l'algorithme à base du filtre UKF. La [figure 4.34 \(c\)](#) illustre le trajet réel de la fissure sur l'échantillon en béton à la fin du test de flexion 3 points. Nous pouvons remarquer sur les [figures 4.34 \(a\) et 4.34 \(b\)](#) qu'une concentration maximale du nombre d'événements est notée à mi-portée de l'échantillon correspondant à la position au dessus de l'encoche centrale. Cela montre la concordance entre l'évolution des événements acoustiques et la propagation de la fissure. La concentration d'événements d'EA autour de la zone de fissuration (au-dessus de l'entaille) est plus importante avec la méthode à base du filtre UKF (voir [figure 4.34 \(b\)](#)) qu'avec la méthode à base du filtre

EKF (voir [figure 4.34 \(a\)](#)). Ces résultats illustrent l'avantage des méthodes d'estimation à base d'UKF par rapport aux méthodes d'estimation à base d'EKF dans le cadre de l'estimation de l'emplacement et du suivi de l'évolution des sources d'EA dans les matériaux hétérogènes.

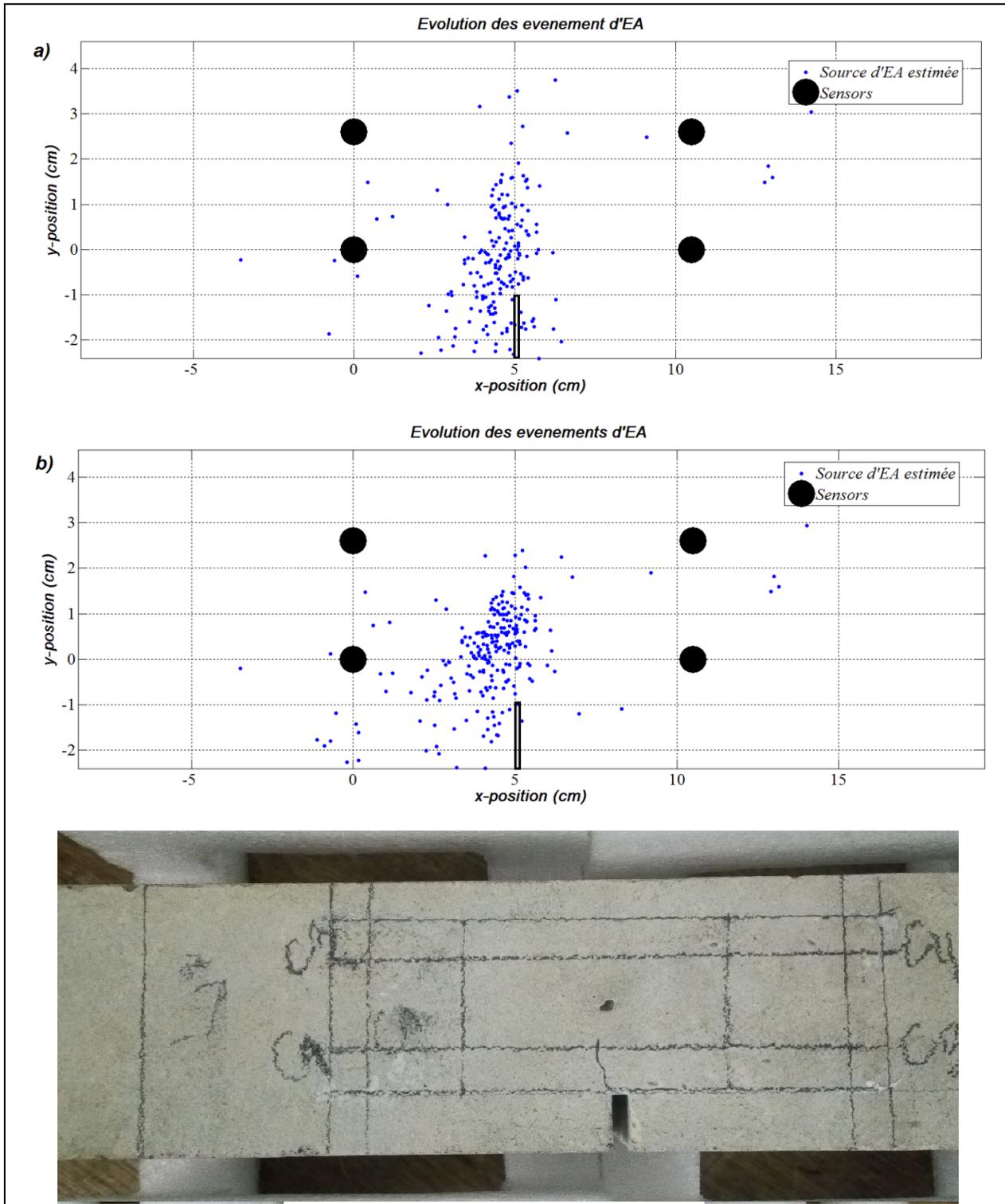


Figure 4.34 : Cartes de localisation des événements AE la fin du test de rupture. (a) : Par la méthode à base du filtre EKF. (b) : par la méthode à base du filtre UKF. (c) : Capture photographique de trajet de la fissure.

Aussi, Il a été noté que les emplacements des événements d'EA n'étaient pas seulement situés au bout de la fissure mais étaient répartis sur une zone relativement large. Cela peut être attribué au développement de la zone du processus de fracture, qui ne se limite pas à la macrofissure mais se propage également autour d'elle. La taille de la largeur de bande de fissure (FPZ) peut être importante et dépend de nombreux paramètres de la microstructure du matériau : granulométrie, taux de chargement, dimensions de l'éprouvette et d'autres paramètres tels que la profondeur des entailles [159]. L'approche utilisée pour mesurer la FPZ consiste à diviser l'éprouvette en un tableau d'éléments rectangulaires et à compter les événements d'EA situés à l'intérieur de chaque élément [150]. La finesse de la grille est choisie suffisamment grande pour donner un nombre suffisant d'événements par élément. La largeur de la zone endommagée est déterminée en traçant une ligne à 80 % de N_{max} [157].

La quantification des zones de microfissuration des différents cas expérimentés est ainsi réalisée en déterminant la zone à forte densité d'évènements. La distribution de l'évènement acoustique le long de l'axe longitudinal du test est présentée à la figure 4.35. La courbe (figure 4.35) est ainsi divisée en deux zones : 1) la première correspond à une zone de confiance dans laquelle le nombre élevé des évènements est relié à l'endommagement du matériau au front de la macrofissuration : 2) la seconde est représentée par un pourcentage plus faible d'évènement d'EA qui correspond à un niveau d'endommagement plus faible. Après application du seuillage statistique, la largeur de la zone de microfissuration calculée est de 40 mm. La largeur de la zone endommagée à 80 % de N_{max} est de 20 mm.

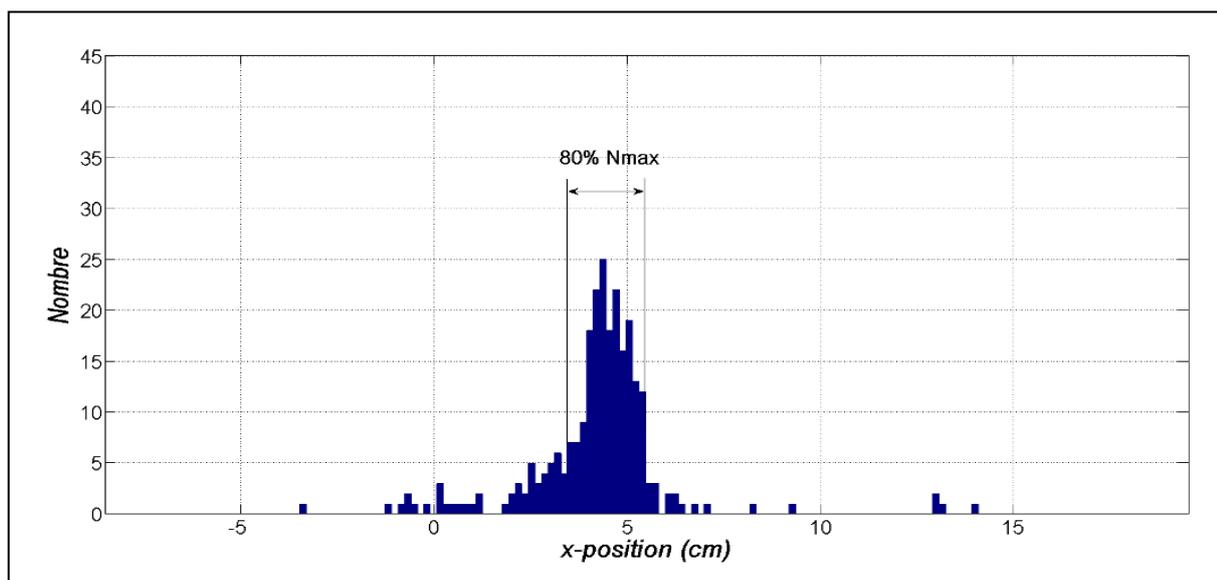


Figure 4.35 : Distribution de fréquence des événements d'EA le long de l'axe X.

IV.2.4 Conclusion

La fissuration et la déformation du béton sous chargement en flexion 3 points sont des phénomènes très énergétiques, ce qui a favorisé l'association et l'utilisation de la technique d'émission acoustique par différents travaux de chercheurs. La présente étude expérimentale s'inscrit dans cet objectif et propose le suivi de la fissuration en testant, à 28 jours de maturité d'un béton, des éprouvettes de dimension 70 x 70 x 280 mm³ avec une encoche centrale. La mécanique et l'émission acoustique montrent une répétabilité acceptable. L'activité acoustique devient de plus en plus importante avec l'augmentation du chargement et par conséquent qualifie et quantifie les dommages internes et la rupture du béton. La détection d'événements acoustiques permet la localisation des zones d'endommagement. Les résultats des approches probabilistes proposées montrent une corrélation entre la propagation des événements d'EA et la croissance de la fissure. Cependant, les résultats donnés par la méthode à base du filtre UKF ont une bonne représentation de la propagation des fissures comparativement à la méthode à base du filtre EKF. Les distributions des événements selon l'axe des abscisses montrent une concentration des événements sur une largeur de l'ordre de 20 mm.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans cette thèse avait pour objectif la mise en place des techniques de traitement du signal pour la localisation et le suivi en continue de l'évolution des sources d'EA. Pour ce faire nous avons choisi de mettre en œuvre diverses solutions. Les outils que nous avons développés dans ce travail ont fait l'objet de validations expérimentales en laboratoire pour finalement nous montrer leur capacité à aider à la détection, à la localisation et au suivi de l'évolution de différentes sources d'EA. Nous nous sommes intéressés à différents types de matériaux. Des essais en mode de traction et en mode de flexion 3 points ont été réalisés respectivement sur des éprouvettes en aluminium et en béton. En parallèle du système d'acquisition acoustique, un système d'acquisition d'images a été utilisé pour suivre l'évolution de la fissuration sur les faces principales des éprouvettes.

Notre travail a permis de proposer une adaptation des méthodes dites classiques, le filtre de Kalman étendu et le filtre de Kalman non parfumé, à des modèles d'évolution de sources d'émission acoustique (EA). Ces méthodes principalement développées dans la communauté du pistage peuvent donc se mettre en œuvre dans le domaine de la surveillance de la santé de structure (SHM). L'approche probabiliste proposée comprend deux étapes principales. Au cours de la première étape, les mesures du temps d'arrivée (TOA) des ondes d'EA sont effectuées par une transformée en ondelettes continue (CWT), tenant compte des erreurs systématiques dues à l'incertitude de Heisenberg. Une ondelette de Morlet complexe a été utilisée car il est capable de séparer les informations d'amplitude et de phase, mais elle permet également de mesurer les fréquences instantanées et leurs évolutions temporelles. La deuxième étape utilise un filtre de Kalman Étendu (EKF) ou un filtre de Kalman sans biais (UKF) adapté pour estimer itérativement l'emplacement de la source d'EA et la vitesse de l'onde ainsi que le suivi de leur évolution au cours du temps.

La première application que nous avons traitée sur un modèle d'évolution de sources d'EA générées artificiellement par des ruptures des mines de plomb (PLB) en surface d'une plaque de Cuivre (Cu), sept (07) points d'impacts ayant différentes localisations par rapport aux capteurs et réalisés séquentiellement, a permis de mettre en évidence la robustesse, l'efficacité

et la précision des méthodes probabilistes proposées pour l'estimation de la position et le suivi de l'évolution des sources d'EA. L'approche que nous avons mise en place offre ainsi des résultats satisfaisants. D'abord, Nous avons appliqué une analyse temps-fréquence issue d'une transformée en ondelette continue afin de calculer le TOA et la fréquence dominante des signaux d'EA mesurés. Nous avons noté que les distributions fréquentielles des signaux sont étalés sur des bandes plus larges, elles s'étendent de 0 à 800 kHz. Cependant, les amplitudes les plus élevées se trouvent en deçà de 350 kHz environ. Après avoir calculé TOA des signaux d'EA mesurés, nous avons appliqué le filtre de Kalman Etendu (EKF) adapté qu'est une méthode de traitement de données récursive évoluant dans le temps par une alternance d'étape de prédiction et de correction. Elle requiert une connaissance de l'estimée de l'emplacement de la source d'EA précédente et de la mesure courante (TDOA, fréquence moyenne et incertitudes). Cette méthode a permis d'estimer simultanément l'emplacement de la source d'EA, la vitesse de groupe des ondes de Lamb à la fréquence dominante et de suivre leur évolution dans le temps. La valeur de l'emplacement initiale calculé par des considérations géométriques n'a été utilisée que lors de l'estimation du premier lieu d'impact. Les résultats expérimentaux montrent que le mouvement séquentiel des multiples impacts sources d'EA qui est de forme arbitraire est bien estimé avec un pourcentage d'erreur compris entre 0,02% et 2,43%, démontrant la robustesse, l'efficacité et la grande précision de l'approche proposée. Les erreurs ici pourraient être attribuées à des erreurs de mesure dans le placement des capteurs et l'emplacement des ruptures des mines. De plus, les écarts de localisation pourraient être attribués aux propriétés des matériaux supposées dans la procédure de calcul. Cette précision obtenue a été encourageante pour l'investigation de véritables sources d'EA générées par des sollicitations mécaniques. Les avantages de l'algorithme proposé résident dans la prise en compte des incertitudes dans les mesures de TOA et de la vitesse des ondes ainsi que dans la fusion efficace des données multi-capteurs pour suivre en continu les emplacements des points d'impact et améliorer les résultats d'estimation.

La deuxième expérience a été réalisée sur une plaque d'aluminium avec une encoche de 30 mm de largeur soumise à une contrainte de traction uni-axiale. Nous avons constaté à travers les résultats, que la majorité des d'événements acoustiques se situe autour du trajet de la fissure, ce qui démontre l'efficacité, la précision et la robustesse de l'approche proposée. L'EA est étroitement liée à la contrainte appliquée dans le matériau. Nous avons noté une émissivité très faible de début de l'essai jusqu'à la charge maximale, puis plus importante en nombre à

l'approche de la rupture du matériau (aux alentours du seuil de plasticité). Toutefois, l'énergie de l'EA augmente fortement au cours de la transition élastique-plastique du matériau. Nous suggérons qu'en effet, l'EA résulte de l'effet cumulé de plusieurs petits mouvements non corrélés, correspondant à des sources de dislocations. Nous distinguons 3 domaines principaux. Au début, un domaine linéaire qui correspond à la déformation élastique du matériau. Puis un domaine de déformation plastique uniforme qui s'étend entre la contrainte de limite élastique et un maximum correspondant à la contrainte maximale de traction. Enfin, un domaine de rupture de l'échantillon commence dès que la contrainte chute, jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette.

La troisième expérience a été réalisée sur une éprouvette en béton avec une encoche à mi-portée sollicitée en mode de flexion 3 points. L'activité acoustique devient de plus en plus importante avec l'augmentation du chargement et par conséquent qualifie et quantifie les dommages internes et la rupture du béton. La détection d'événements acoustiques permet la localisation des zones d'endommagement. Les résultats des approches probabilistes proposées montrent une corrélation entre la propagation des événements d'EA et la croissance de la fissure. Par ailleurs, une comparaison en termes de performance d'estimation a montré que la méthode à base du filtre UKF présente un taux d'erreurs d'estimation relativement faible par rapport à méthode à base du filtre EKF. Les distributions des événements selon l'axe des abscisses montrent une concentration des événements sur une largeur de l'ordre de 20 mm.

Bien que l'objectif de ce travail de recherche est atteint, il nous a ouvert beaucoup de perspectives, qui, si nous nous pouvons les prospecter, nous permettent d'enrichir nos résultats et de mieux assimiler les différents phénomènes rencontrés lors de cette étude. Tout d'abord, nous avons mené les expériences dans un laboratoire avec des conditions environnementales contrôlées. Par conséquent, les recherches futures devraient tenir compte des incertitudes sur les variations de température et d'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. R. Farrar, K. Worden, "An introduction of structural health monitoring," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 365, pp. 303–15, 2007. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>
- [2] V. Giurgiutiu, A. Cuc, "embedded NDE for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention," *Shock Vib. Dig.*, vol. 37, No. 2, pp. 83–105, 2005.
- [3] A. Mal, F. Ricci, S. Banerjee, F. Shih, "A conceptual structural health monitoring system based on vibration and wave propagation," *Struct. Health Monit.*, vol. 4, pp. 283–93, 2005.
- [4] T. Kundu, S. Das, K. V. Jata, "Point of impact prediction in isotropic and anisotropic plates from the acoustic emission data," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 122, pp. 2057–66, 2007.
- [5] T. Kundu, S. Das, S. A. Martin, K. V. Jata, "Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates," *Ultrasonics*, vol. 48, pp. 193–201, 2008.
- [6] S. Salamone, I. Bartoli, P. D. Leo, F. L. D. Scalea, A. Ajovalasit, L. D. Acquisto, J. Rhymer, H. Kim, "High-velocity impact location on aircraft panels using macro-fiber composite piezoelectric rosettes," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 21, pp. 887–96, 2010.
- [7] L. D. Marchi, A. Marzani, N. Speciale, E. Viola, "A passive monitoring technique based on dispersion compensation to locate impacts in plate-like structures," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, No. 3, page 035021, 2011. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/20/3/035021>
- [8] H. Jeong, Y-S. Jang, "Fracture source location in thin plates using the wavelet transform of dispersive waves," *IEEE Trans. Ultras. Ferroelectr. and Freq. Control*, vol. 47, No. 3, pp. 612-619, 2000.
- [9] F. Ciampa, M. Meo, "Acoustic emission source localization and velocity determination of the fundamental mode A0 using wavelet analysis and a Newton-based optimization technique," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, No. 4, page 045027, 2010.
- [10] A. Raghavan and C. E. S. Cesnic, "Guided-wave signal processing using chirplet matching pursuits and mode correlation for structural health monitoring," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. 355–66, 2007.
- [11] H. Jeong, Y-S. Jang, "Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 49, pp. 443–450, 2000.
- [12] T. Kundu, H. Nakatani, N. Takeda, "Acoustic source localization in anisotropic plates," *Ultrasonics*, vol. 52, pp. 740–746, 2012.
- [13] C. S. Wang, F. Wu, F. K. Chang, "Structural health monitoring from fiber-reinforced composites to steel-reinforced concrete," *Smart Materials and Structures*, vol. 10, pp. 548–552, 2001.
- [14] M. Niethammer, L. J. Jacobs, J. Qu, "Time-frequency representations of Lamb waves," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 1841–1847, 2001.
- [15] Y. Lu, L. Ye, Z. Su, "Crack identification in aluminum plates using Lamb wave signals of a PZT sensor network," *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 839–849, 2006.
- [16] F. Ciampa, M. Meo, E. Barbieri, "Impact localization in composite structures of arbitrary cross section," *Structural Health Monitoring*, vol. 11, pp. 643–655, 2012.

- [17] P. S. Tua, S. T. Quek, Q. Wang, "Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves," *Smart Materials and Structures*, vol. 13, pp. 643-660, 2004.
- [18] K. M. Kishimoto, H. Inoue, M. Hamada, T. Shibuya, "Time frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform," *J. Appl. Mech.*, vol. 62, pp. 841-6, 1995.
- [19] M. Tayal, F. Fink, K. Mukherjee, "Acoustic emission associated with interfacial failure of copper-nickel layered," *composites Materials Evaluation*, Vol. 46, No. 2, pp. 238-240, 1988.
- [20] A. Vinogradov, Acoustic emission in ultra-fine grained copper, *Scripta Materialia*, vol. 39, No. 6, pp. 797-805, 1998.
- [21] V. Perfilyev, I. Lapsker, A. Laikhtman, L. Rapoport, *Scratching of Copper and Silicon: Acoustic Emission Analysis*, *Tribology letters*, vol. 65, No. 1, 2017
- [22] C. Scruby, G. Baldwin, and K. Stacey, "Characterisation of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission," *International Journal of Fracture*, vol. 28, pp. 201-222, 1985.
- [23] M. R. Gorman, "Plate wave acoustic emission," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 90, pp. 358-364, 1991.
- [24] J. Gary and M. A. Hamstad, "On the far-field structure of waves generated by a pencil lead break on a thin plate," *Journal of acoustic emission*, vol. 12, pp. 157-170, 1994.
- [25] W. Prosser, M. D. Seale, and B. T. Smith, "Time-frequency analysis of the dispersion of Lamb modes," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 105, pp. 2669-2676, 1999.
- [26] M. R. Gorman, "Some connections between AE testing of large structures and small samples," *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 14, pp. 89-104, 1998.
- [27] J. Roget : *Essais non destructifs, l'émission acoustique. Mise en œuvre et applications.* AFNOR, CETIM, 1988.
- [28] K. Ono, "Acoustic emission, *Encyclopedia of acoustics*," Wiley, 1997.
- [29] AG. Beattie, "Acoustic emission, principles and instrumentation," *Journal of acoustic emission*, vol. 2 (1/2), pp.95-128, 1983.
- [30] M. Kaphle, "Analysis of acoustic emission data for accurate damage assessment for structural health monitoring applications," *Thèse de doctorat Queensland University of Technology*, 2012.
- [31] R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing," *American Society for Nondestructive Testing*, 1987.
- [32] J. Czochralski, "Die Metallographie des Zinns und die Theorie des Formänderung bildsamer Metalle," *Met. Erz*, XIII (N. F. IV), no. 18, 381-393, 1916.
- [33] A. Portevin et F. Le Chatelier, "Sur un phénomène observé lors de l'essai de traction d'alliages en cours de transformation," *CR Acad. Sc.* Vol. 176, 507-510, 1923.
- [34] J. Kaiser, "Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch," *PhD thesis*, *Technisch Hochschule München, München, Allemagne*, 1950.
- [35] J. E. Srawley and J. B. Esgar, "Investigation of hydrotest failure of Thiokol Chemical Corporation 260-inch-diameter SL-1 motor case," *NASA report TM X-1194* , 1966.

- [36] G. Lackner et R. Dusek, "Semi-automatic testing of gas cylinders," In 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008.
- [37] T. Kek et J. Grum, "Laser cutting and acoustic emission signals," In 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008.
- [38] O. Skawinski, P. Hulot, C. Binétruy et C. Rasche, "Structural integrity evaluation of CNG composite cylinders by acoustic emission monitoring," In 28th European Conference on Acoustic Emission Testing, 2008.
- [39] C. Scruby, "Quantitative acoustic emission techniques," in *Nondestructive testing*, vol. 8, A. P. Inc. Ed. London, pp. 141-208, 1984.
- [40] S. HUGUET, "Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polyester," Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2002.
- [41] D. Royer and E. Dieulesaint, "Ondes élastiques dans les solides - Tome 1 Propagation libre et guidée," Ed. Masson, Paris, 1996.
- [42] B. Assouli, "Etude par émission acoustique associée aux méthodes électrochimiques de la corrosion et de la protection de l'alliage cuivre-zinc (60/40) en milieux neutre et alcalin," Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.
- [43] A. Mostafapour, S. Davoodi, and M. Ghareaghaji, "Acoustic emission source location in plates using wavelet analysis and cross time frequency spectrum," *Ultrasonics*, vol. 54, No. 8, pp. 2055-2062, 2014.
- [44] C. U. Grosse and M. Ohtsu, "Acoustic emission testing," Springer Science & Business Media, 2008.
- [45] N. Boulay, "Modélisation des capteurs d'émission acoustique en vue de la simulation d'un contrôle," Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, 2017.
- [46] T. Le Gall, "Simulation de l'émission acoustique: Aide à l'identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement," thèse de doctorat de l'Université de Lyon, 2016.
- [47] M. R. Gorman and W. H. Prosser, "AE source orientation by plate wave analysis," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 9, pp. 283-288, 1991.
- [48] W. B. Khalifa, "Modélisation de la propagation et de la réception des ondes élastiques émises par un défaut sous contrainte. Application à la simulation des contrôles non destructifs par émission acoustique," Thèse de doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2013.
- [49] P. D. Rouby, P. Fleischmann, and C. Duvergier, "Un modèle de sources d'émission acoustique pour l'analyse de l'émission continue et de l'émission par salves I. Analyse théorique," *Philosophical Magazine B*, vol. 47, pp. 671-687, 1983.
- [50] F. Thummen, "Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires," Thèse de doctorat, Matériaux, INSA de Lyon, Villeurbanne, 2004.
- [51] M. G. R. Sause and S. Horn, "Simulation of Acoustic Emission in Planar Carbon Fiber Reinforced Plastic Specimens," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 29, pp. 123-142, Jun 2010.

- [52] N. N. Hsu and F. R. Breckenridge, "Characterization and calibration of acoustic emission sensors," *Mater. Eval.* vol. 39, pp. 60-68, 1981.
- [53] A. Bovagne, "Contrôle non destructif par émission acoustique," Centre d'Actualisation Scientifique et Technique (CAST), chap. 4 et 5, 1986.
- [54] I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb waves: physical theory and applications," Plenum press, 1970.
- [55] M. Ohtsu and K. Ono, "AE source location and orientation determination of tensile cracks from surface observation," *NDT International*, vol. 21, pp. 143-150, 1988.
- [56] E. Dieulesaint and D. Royer, "Ondes élastiques dans les solides: application au traitement du signal," Paris: Masson, vol. 13, 1974.
- [57] Horace Lamb, "On the flexure of an elastic plate," *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. 21, pp. 70-90, 1889.
- [58] Horace Lamb, "On waves in an elastic plate," *Proc. Roy. Soc. of London A*, vol. 93, pp. 114-128, 1917.
- [59] J. D. Achenbach, "Wave propagation in elastic solids," North-Holland Publishing company, Amsterdam, 1973.
- [60] B. A. Auld, "Acoustic fields and waves in solids," R. E Krieger Publ. Cie, Malabar, Florida, Vol. 1, 1990.
- [61] M. Castaings, E. Le Clezio, et B. Hosten, "Modal decomposition method for modeling the interaction of Lamb waves with cracks," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 112, No. 6, pp. 2567-82, 2002. <https://doi.org/10.1121/1.1500756>.
- [62] D. Royer, and E. Dieulesaint, "Ondes élastiques dans les solides," Enseignement de la Physique. MASSON, vol. 1, 1996.
- [63] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, 1999.
- [64] I. A. Viktorov, "Rayleigh and Lamb Waves: Physical Theory and Applications," Softcover reprint of the original 1st ed. 1967 edition. Springer, 2013.
- [65] A. Bernard, M. J. S. Lowe, and M. Deschamps, "Guided Waves Energy Velocity in Absorbing and Non-Absorbing Plates," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 110, No. 1, pp. 186-96, 2001. <https://doi.org/10.1121/1.1375845>.
- [66] C. Scruby, "An introduction to acoustic emission," *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, vol. 20, pp. 946, 1987.
- [67] J. Kepert and P. Benes, "A comparison of AE sensor calibration methods," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 26, pp. 60-70, 2008.
- [68] A. Boniface, "Détection et évaluation de l'endommagement mécanique du béton par émission acoustique," Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux, 2017.
- [69] A. Marec, "Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante," Thèse de doctorat de l'Université du Maine, 2008.
- [70] J.-P. Favre and J.-C. Laizet, "Amplitude and counts per event analysis of the acoustic emission generated by the transverse cracking of cross-ply CFRP," *Compos. Sci. Technol.* vol. 36, pp. 27-43, 1989.

- [71] Y. A. Dzenis and J. Qian, "Analysis of micro-damage evolution histories in composites," *Int. J. Solids Struct.* vol. 38, pp. 1831-1854, 2001.
- [72] A. Tobias. "Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors," *Non-destructive testing*, vol. 9, No. 1, pp. 9-12, 1976.
- [73] A. Marzani and S. Salamone, "Numerical prediction and experimental verification of temperature effect on plate waves generated and received by piezoceramic sensors," *Mech. Syst. Signal Process.* vol. 30, pp. 204–17, 2012.
- [74] Y. Lu, J. E. Michaels, "A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations," *Ultrasonics*. vol. 43, pp. 717–31, 2005.
- [75] G. Konstantinidis, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems," *Smart Mater. Struct.* vol. 15, pp. 967–76, 2006.
- [76] A. J. Croxford, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater and G. Konstantinidis, "Strategies for guided-wave structural health monitoring," *Proc. R. Soc. A*, vol. 463, pp. 2961–81, 2007.
- [77] F. Lanza di Scalea and S. Salamone, "Temperature effects in ultrasonic Lamb wave structural health monitoring systems," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 124, pp. 161–74, 2008.
- [78] S. Salamone, I. Bartoli, F. Lanza di Scalea and S. Coccia, "Guided-wave health monitoring of aircraft composite panels under changing temperature," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 20, pp. 1079–90, 2009.
- [79] T. Clarke, F. Simonetti and P. Cawley, "Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: Influence of temperature changes on performance," *J. Sound Vib.* vol. 329, pp. 2306–22, 2010.
- [80] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini and A. Taroni, "Digital time of flight measurement for ultrasonic sensors IMTC-91: Instrumentation and Measurement Technology", *Conf. Conference Record. 8th IEEE (May)*, pp. 198–201, 1991.
- [81] T. Yin, H. F. Lam and H. M. Chow, "A Bayesian probabilistic approach for crack characterization in plate structures," *Comput.—Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 25 , pp. 375–86, 2010.
- [82] C. T. Ng, M. Veidt and H. F. Lam, "Guided wave damage characterisation in beams utilising probabilistic optimisation," *Eng. Struct.*, vol. 31, pp. 2842–50, 2009.
- [83] M. Lemistre and D. L. Balageas, "Structural health monitoring system based on diffracted Lamb wave analysis by multi-resolution processing," *Smart Mater. Struct.*, vol. 10, pp. 504–11, 2001.
- [84] Z. Su, L. Ye and X. Bu, "A damage identification technique for CF/EP composite laminates using distributed piezoelectric transducers," *Compos. Struct.*, vol. 57, pp. 465–71, 2002.
- [85] T. T. Soong, "Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers," New York : Wiley, 2004.
- [86] J. H Kurz, C.U. Grosse, and H.W. Reinhardt, "Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete," *Ultrasonics*, vol. 43, No. 7, pp. 538-546, 2005.

- [87] A. Carpinteri, J. Xu, G. Lacidogna, and A. Manuello, "Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures," *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, No. 4, pp. 529-537, 2012.
- [88] B. Schechinger and T. Vogel, "Acoustic emission for monitoring a reinforced concrete beam subject to four-point-bending," *Construction and Building Materials*, vol. 21, No. 3, pp. 483-490, 2007.
- [89] X. Zhao, H. Gao, G. Zhang, B. Ayhan, F. Yan, C. Kwan and J. L. Rose, "Active health monitoring of an aircraft wing with embedded piezoelectric sensor/actuator network: I. Defect detection, localization and growth monitoring," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. 1208-17, 2007.
- [90] D. Wang, L. Ye, Y. Lu, Z. Su, "Probability of the presence of damage estimated from an active sensor network in a composite panel of multiple stiffeners," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, pp. 2054-63, 2009.
- [91] D. Wang, L. Ye, Y. Lu, "A probabilistic diagnostic algorithm for identification of multiple notches using digital damage fingerprints (DDFs)," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 20, pp. 1439-50, 2009.
- [92] E. B. Flynn, M. D. Todd, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater and A. J. Croxford, "Maximum-likelihood estimation of damage location in guided-wave structural health monitoring," *Proc. R. Soc. Am.*, vol. 467, pp. 2575-96, 2011.
- [93] Z. Su, X. Wang, Z. Chen and L. Ye, "On selection of data fusion schemes for structural damage evaluation," *Struct. Health Monit.*, vol. 8, pp. 223-41, 2009.
- [94] C. Zhou, Z. Su and L. Cheng, "Probability-based diagnostic imaging using hybrid features extracted from ultrasonic Lamb wave signals," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, 125005, 2011.
- [95] L. Yu and Z. Su, "Application of kernel density estimation in Lamb wave-based damage detection," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2012, 406521, 2012.
- [96] E. D. Niri and S. Salamone, "A probabilistic framework for acoustic emission source localization in plate-like structures," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, 035009, 2012.
- [97] F. Bai, D. Gagar, P. Foote, Y. Zhao, "Comparison of alternatives to amplitude thresholding for onset detection of acoustic emission signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 84, pp. 717-730, 2017.
- [98] M. Shehadeh, J. Steel, R.L. Reuben, "Acoustic emission source location for steel pipe and pipeline applications : the role of arrival time estimation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E : Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 220, No. 2, pp. 121-133, 2006.
- [99] Y. Meyer, S. Jaffard, O. Rioul, "L'analyse par ondelettes," pour la science, 1987.
- [100] J. Le Roux, "La transformée de Fourier et ses applications," *Techniques de l'ingénieur*, 2007.
- [101] S. Mallat, "A wavelet tour of signal processing," Academic Press, 1998.
- [102] R.T. Ogden, "Essential wavelets for statistical applications and data analysis," Birkhauser, Boston, 1997.
- [103] F. Gabrielli, "Apport des techniques temps-fréquence à la caractérisation mécanique du corps humain en choc," *Thèse de doctorat Université de la Méditerranée Aix-marseille II*, 2010.

- [104] L. Cohen, "Instantaneous scale and the short-time scale transform," Proceedings of the IEEE-SP International Symposium, 1992.
- [105] C. Bernard, "Ondelettes et problèmes mal posés: la mesure du flot optique et l'interpolation irrégulière," Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, 1999.
- [106] A. Cohen, R.D. Ryan, "Wavelets and Multiscale Signal Processing," Chapman and Hall, London, 1995.
- [107] G. Strang, T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks," Wellesley-Cambridge Press, 1997.
- [108] L. Cohen, "The scale representation," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 41, No. 12, pp. 3275-3292, 1993.
- [109] G. Rilling, "Décompositions Modales Empiriques : Contributions à la théorie, l'algorithmie et l'analyse de performances," Thèse de doctorat, Université de Lyon, 2007.
- [110] R. Carmona, W-H Hwang, B. Torrèsani, "Practical time-frequency analysis," Academic Press, 1998.
- [111] P. Abry, "Ondelettes et turbulence. Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance d'échelles," Diderot Editeur, Paris, 1997.
- [112] B. Torrèsani, "Analyse continue par ondelettes," Inter. Editions/CNRS Editions, 1995.
- [113] F. Truchetet, "Ondelettes pour le signal numérique," Hermes, 1998.
- [114] A. Cohen, R.D. Ryan, "Wavelets and multiscale signal processing," Chapman-Hall, 1995.
- [115] Y. Meyer, "Les ondelettes : algorithmes et applications," A. Colin, 1992.
- [116] W.J. Staszewski, A.N. Robertson, "Time-frequency and time-scale analyses for structural health monitoring," Phil. Trans. R. Soc. A, vol. 365, pp.449-477, 2007.
- [117] T-P. Le, P. Argoul, "Continuous wavelet transform for modal identification using free decay response," J. Sound Vib., vol. 277, pp. 73-100, 2004.
- [118] Y. Bentaleb, "Analyse par Ondelettes des Signaux Sismiques : Applications Aux ondes de surface," Thèse de Doctorats Université Mohamed V, AGDAL Rabat, 2006.
- [119] R. Benzid, "Ondelettes et statistiques d'Ordre supérieur aux signaux uni et Bidimensionnels," Thèse de doctorat science en électronique Université de Batna, 2005.
- [120] A. Grossman, J. Morlet, "Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related transforms. In Mathematics and physics, 1985.
- [121] I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets," Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, 1992.
- [122] L. Gaul, S. Hurlebaus, "Determination of the impact force on a plate by piezoelectric film sensors," Arch. Appl. Mech., vol. 69, pp. 691-701, 1999.
- [123] M. Meo, G. Zumpano, M. Pigott, G. Marengo, "Impact identification on a sandwich plate from wave propagation responses," Compos. Struct., vol. 71, pp. 302-306, 2005.
- [124] N. C. F. Tse, L. L. Lai, "Wavelet-based algorithm for signal analysis," EURASIP J. Adv. Signal Process., 2007.
- [125] A. Teolis, Computational signal processing with wavelets. Birkhäuser Basel, Boston, 1998. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4142-3>

- [126] A. Sarrafi, Z. Mao, "Probabilistic uncertainty quantification of wavelet-transform-based structural health monitoring features," *Proc. Soc. Exp. Mech. Series.*, vol. 3, pp. 253–262, 2016.
- [127] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, "Damage characterization of polymer-based composite materials : Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, No. 6, pp.1441-1464, 2008.
- [128] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, R. Berbaoui, "Investigation of damage mechanisms of composite materials : Multivariable analysis based on temporal and wavelet features extracted from acoustic emission signals," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, No. 5, pp. 3082-3092, 2008.
- [129] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, "Contrôle de santé et caractérisation de l'endommagement de matériaux composites base polymère par analyse multivariable temporelle et temps-échelle de signaux d'émission acoustique," *Proc. COFREND*, Toulouse, 2008.
- [130] L. Gaul, S. Hurlebaus, "Identification of the impact location on a plate using wavelets," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 12, No. 6, pp. 783–95, 1998.
- [131] K. Kishimoto, H. Inoue, M. Hamada, T. Shibuya, "Time frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform," *J. Appl. Mech.*, vol. 62, No. 4, pp. 841–6, 1995.
- [132] E. L. Lehmann, G. Casella, "Theory of Point Estimation," *Technometrics*, August 1998.
- [133] M. H. DeGroot, "Optimal statistical decisions," Wiley, 2005.
- [134] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 34-45, 1960.
- [135] R. E. Kalman, R. Bucy, "New Results in Linear Filtering and Prediction Theory," *Journal of Basic Engineering*, vol. 83, pp. 95–108, 1961.
- [136] A. H. Jazwinski, "Stochastic processes and filtering theory," Academic Press, 1970.
- [137] B. D. Anderson, J. B. Moore, "Optimal Filtering," Prentice-Hall, 1978.
- [138] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A New Approach for Filtering Nonlinear Systems," in *Proc. American Control Conference*, pp. 1628-1632, 1995.
- [139] S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems," *Proceedings of AeroSense : The 11th International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulations and Controls*, 1997.
- [140] S. Julier, J. Uhlmann, H. F. Durrant-Whyte, "A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 45, No. 3, pp. 477–482, 2000.
- [141] E. Wan, R. Van Der Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," in *Proc. IEEE Symposium 200 (AS-SPCC)*, Lake Louise Alberta, Canada, 2000.
- [142] N. Wiener, "Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series," The M.I.T Press, Cambridge, Massachusetts, 1966.
- [143] M. A. Hamstad, J. Gary, and A. O'Gallagher, "Far-field acoustic emission waves by three-dimensional finite element modeling of pencil-lead breaks on a thick plate," *Journal of acoustic emission*, vol. 14, No. 2, pp. 103-114, 1996.

- [144] J. Gary and M. A. Hamstad, "On the far-field structure of waves generated by a pencil lead break on a thin plate," *J. Acoustic emission*, vol. 12, pp. 157-170, 1994.
- [145] M. G. Sause, "Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 29, pp. 184-196, 2011.
- [146] A. Nielsen, "Acoustic emission source based on pencil lead breaking," *Svejsecentralen*, vol. 80, 1980.
- [147] K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack classification in concrete based on acoustic emission," *Construction and Building Materials*, vol. 24, No. 12, pp. 2339-2346, 2010.
- [148] J. N. Reddy, "Theory and Analysis of Elastic Plates," London : Taylor and Francis, 1999.
- [149] W. H. Prosser, M. R. Gorman, D. H. Humes, "AE source orientation by plate wave analysis," *J. Acoust. Emiss.*, vol. 9, pp. 283-8, 1991.
- [150] P. Stephan, J. Salin, "Ageing management of concrete structure: Assessment of EDF methodology in comparison with SHM and AIEA guides," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 924-933, 2012.
- [151] L. Pliskin, "Le béton," *Culture technique*, n°126, 1992.
- [152] J.F. Chaix, "Caractérisation non destructive de l'endommagement de bétons : apport de la multidiffusion ultrasonore," Thèse, LCND, Université de la Méditerranée, Aix-en-Provence, 2003.
- [153] A. Pisch, "Cours Matériaux cimentaires," LCR-Lafarge Centre de Recherche, 2009.
- [154] AFNOR, Norme NF EN 206 : Béton - Spécification, performances, production et conformité, 2014.
- [155] AFNOR, NF EN 12390-1 : Essais pour béton durci. Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules, 2012.
- [156] RILEM, "Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams," *Materials and Structures*, vol. 18, p. 285-290, 1985.
- [157] RILEM, "Fracture Mechanics of Concrete - Test Methods," *Materials and Structures*, vol. 23, p. 457, 1990.
- [158] Afnor NF EN 12390-5, "Testing hardened concrete — Part 5: Flexural strength of test specimens," Afnor, October, 2001.
- [159] Q. Dai, K. Ng, J. Zhou, E. L. Kreiger, T. M. Ahlborn, "Damage investigation of single-edge notched beam tests with normal strength concrete and ultra high performance concrete specimens using acoustic emission techniques," *Construction and Building Materials*, Vol. 31, pp. 231-242, 2012.
- [160] D. Soulioti, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas, T. Shiotani, D.G. Aggelis, "Acoustic emission behavior of steel fiber reinforced concrete under bending," *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 12, pp. 3532-3536, 2009.

LISTE DES TRAVAUX EN RELATION AVEC LA THESE :

- [161] E.Y. Dris, R. Draï, A. Benammar, D. Berkani, "Acoustic emission source localization in plate-like structure," Proc. 2017 European Conference on Electrical Engineering and Computer Science, EECS 2017, pp. 193–197, 2018. <https://doi.org/10.1109/eecs.2017.44>
- [162] E.Y. Dris, R. Draï, M. Bentahar, D. Berkani, A. Benammar, "Comparative study between EKF and Geometrical methods for the Acoustic Emission source localization," Procedia Computer Science, Vol. 148, pp. 438–447, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.056>
- [163] E.Y. Dris, R. Draï, Z. Dahou, D. Berkani, "EKF and UKF methods for the Acoustic Emission source localization in Concrete," 2019 3rd International Conference on Intelligent Computing in Data Sciences, ICDS 2019, 2019, <https://doi.org/10.1109/icds47004.2019.8942244>
- [164] E.Y. Dris, R. Draï, M. Bentahar, D. Berkani, "Adaptive Algorithm for Estimating and Tracking the Location of Multiple Impacts on a Plate-Like Structure," Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 31, No. 1, pp. 1–23, 2020. <https://doi.org/10.1080/09349847.2019.1617913>

ANNEXES

ANNEXE 1 : METHODE DE CALCUL DE LA VITESSE DE GROUPE D'UN SIGNAL D'EA A LA FREQUENCE DOMINANTE

Dans la section IV.1.3.2, la fréquence a été supposée comme une variable aléatoire gaussienne avec une moyenne et une variance définies dans les équations (2.17) et (2.20). Les estimations de départ de la vitesse de groupe de l'onde \hat{V}_{g0} et de sa variance $\sigma_{V_{g0}}^2$ peuvent être calculées en déterminant la relation entre les distributions de probabilité des deux variables aléatoires f et V_g lorsqu'elles sont liées par $V_g = F(fd)$. En supposant que la forme fonctionnelle $F(fd)$ est donnée et déterministe, nous nous intéressons à la détermination de la fonction de densité de probabilité de V_g étant donné la fonction de densité de probabilité de f (l'épaisseur de la plaque d est déterministe). Parce qu'en général la forme fonctionnelle de F n'est pas disponible, une transformation non parfumée (UT) a été utilisée. L'UT est une méthode de calcul des statistiques d'une variable aléatoire qui subit une transformation non linéaire [141]. En supposant que la variable aléatoire fd a la moyenne $\bar{f}d$ et la variance σ_{fd}^2 , trois points sigma pondérés $\mathcal{X}1$, $\mathcal{X}2$ et $\mathcal{X}3$ sont nécessaires pour calculer les statistiques de V_g . Ces points sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{X}0 = \bar{f}d \\ \mathcal{X}1 = \bar{f}d + \left(\sqrt{(1+k)\sigma_{fd}^2} \right), \\ \mathcal{X}2 = \bar{f}d - \left(\sqrt{(1+k)\sigma_{fd}^2} \right), \\ \mathcal{W}_0 = k/(1+k) \\ \mathcal{W}_1 = k/2(1+k) \\ \mathcal{W}_2 = 1/2(1+k) \end{array} \right. \quad (\text{A.1})$$

Où \mathcal{W}_i est le poids associé au $i^{\text{ème}}$ point et k est un nombre arbitraire fournissant $1+k \neq 0$; $k=0$ est choisi dans ce travail. Compte tenu de l'ensemble des points sigma calculés par l'équation (A.1), la transformation de la fonction de densité de probabilité gaussienne de la variable aléatoire fd en la distribution gaussienne approchée de V_g est résumée dans les étapes suivantes :

(1) Calculez la vitesse de groupe correspondant à chaque point sigma en fonction de la courbure de dispersion ou des équations de Rayleigh - Lamb.

$$y_i = F(x_i) \quad i = 0,1,2 \quad (A.2)$$

(2) La moyenne de la variable aléatoire V_g peut être calculée à partir de :

$$\bar{V}_g = \sum_{i=0}^2 w_i y_i \quad (A.3)$$

(3) La variance de la variable aléatoire V_g peut être déterminée par:

$$\sigma_{V_{g_0}}^2 = \sum_{i=0}^2 w_i (y_i - \bar{V}_g)(y_i - \bar{V}_g)^T \quad (A.4)$$

Maintenant, la vitesse de groupe initiale de l'onde pour un mode spécifié est $\hat{V}_{g_0} = \bar{V}_g$ et sa variance correspondante utilisée dans l'équation (3.33) est $\sigma_{V_{g_0}}^2$. La figure A.1 montre cette transformation pour une fréquence \bar{f} donnée en supposant A_0 comme mode d'onde de Lamb dominant.

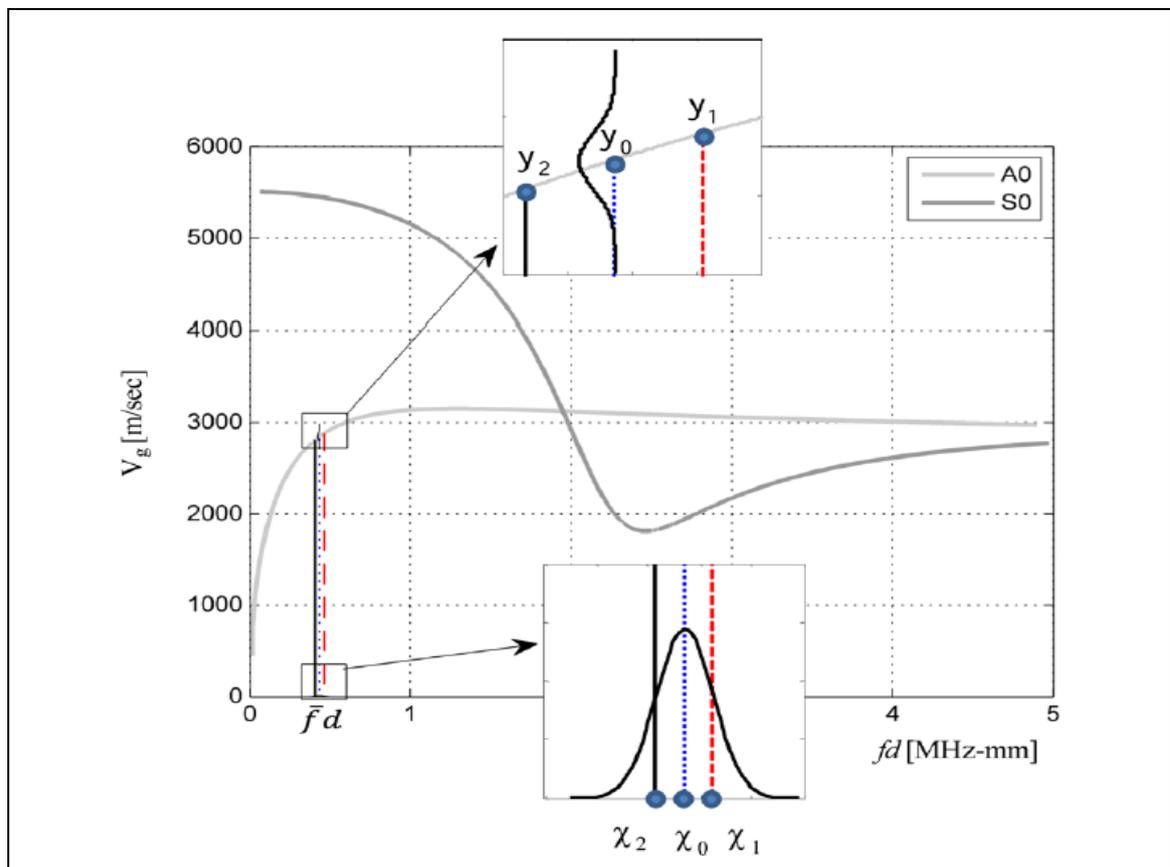


Figure A.1 : Transformation non parfumée.

ANNEXE 2 : FENETRAGE DES SIGNAUX PAR LE SYSTEME D'ACQUISITION AEWIN

Afin de montrer comment un système d'acquisition commercial détermine le début et la fin d'un signal d'EA, la méthode de fenêtrage du logiciel AEWIN (utilisé au laboratoire MATEIS) est présentée.

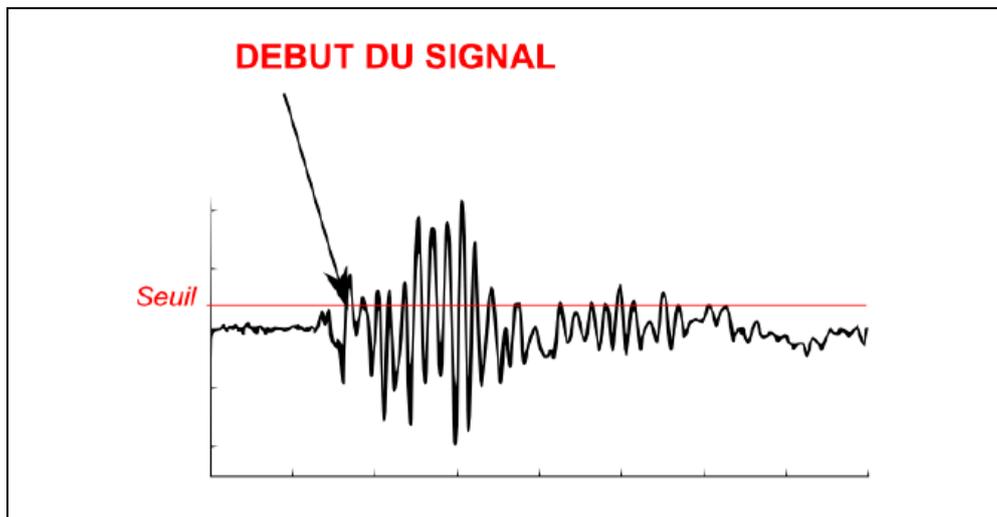


Figure A.2 : Détermination du début du signal à l'aide d'un seuil.

Le début du signal est défini à l'aide d'une valeur seuil définie préalablement. Le début est l'instant correspondant au premier dépassement de seuil (Figure A. 2).

La forme du signal est ensuite déterminée en temps réel par une méthode s'appuyant sur des fenêtres glissantes. Ces fenêtres glissantes permettent de déterminer l'amplitude maximale du signal et la fin du signal. Leur largeur est fixée par deux paramètres : le Peak Definition Time (PDT) et le Hit Definition Time (HDT).

Le PDT détermine la largeur de la fenêtre temporelle permettant de trouver le pic d'amplitude maximale du signal. Initialement, le début de la fenêtre est positionné au niveau du premier dépassement de seuil et la valeur maximale est égale à la valeur du seuil. Si au cours de l'intervalle défini par la fenêtre, le signal dépasse la valeur maximale, alors la nouvelle valeur remplace l'ancienne, la fenêtre est décalée et l'intervalle redémarre à la nouvelle valeur maximale. Si le signal ne dépasse pas l'amplitude maximale dans l'intervalle, alors la dernière valeur maximale enregistrée est le pic d'amplitude du signal (Figure A. 3).

Le HDT détermine la largeur de la fenêtre permettant de trouver la fin du signal. La détermination débute au pic d'amplitude maximale. Si au cours de l'intervalle défini par le HDT le signal dépasse le seuil d'acquisition, l'intervalle redémarre au nouveau dépassement. La fin du signal correspond à la dernière réinitialisation du HDT après laquelle aucun dépassement de seuil n'est constaté au cours de l'intervalle (Figure A. 4).

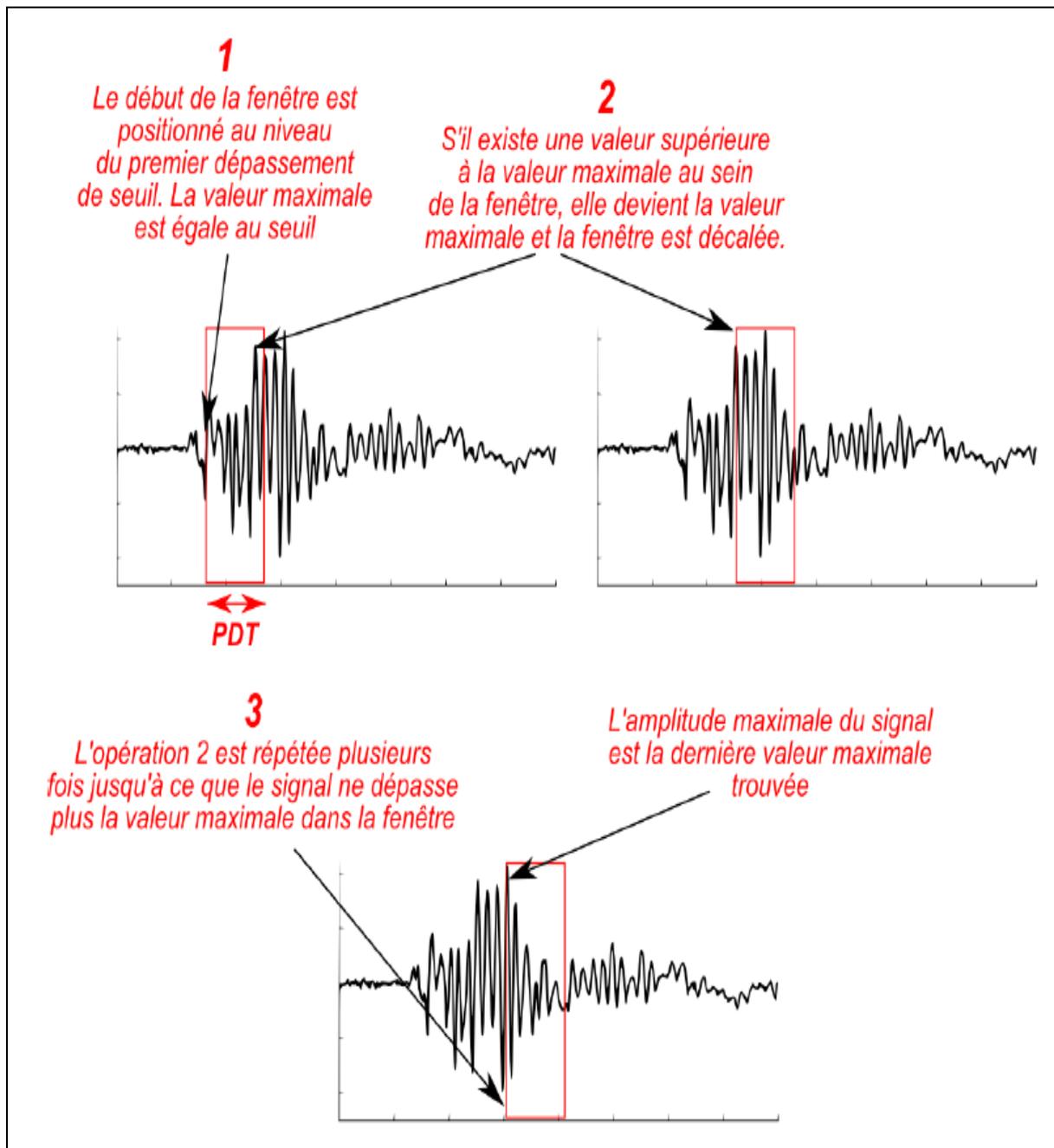


Figure A.3 : Détermination de l'amplitude maximale du signal à l'aide d'une fenêtre glissante.

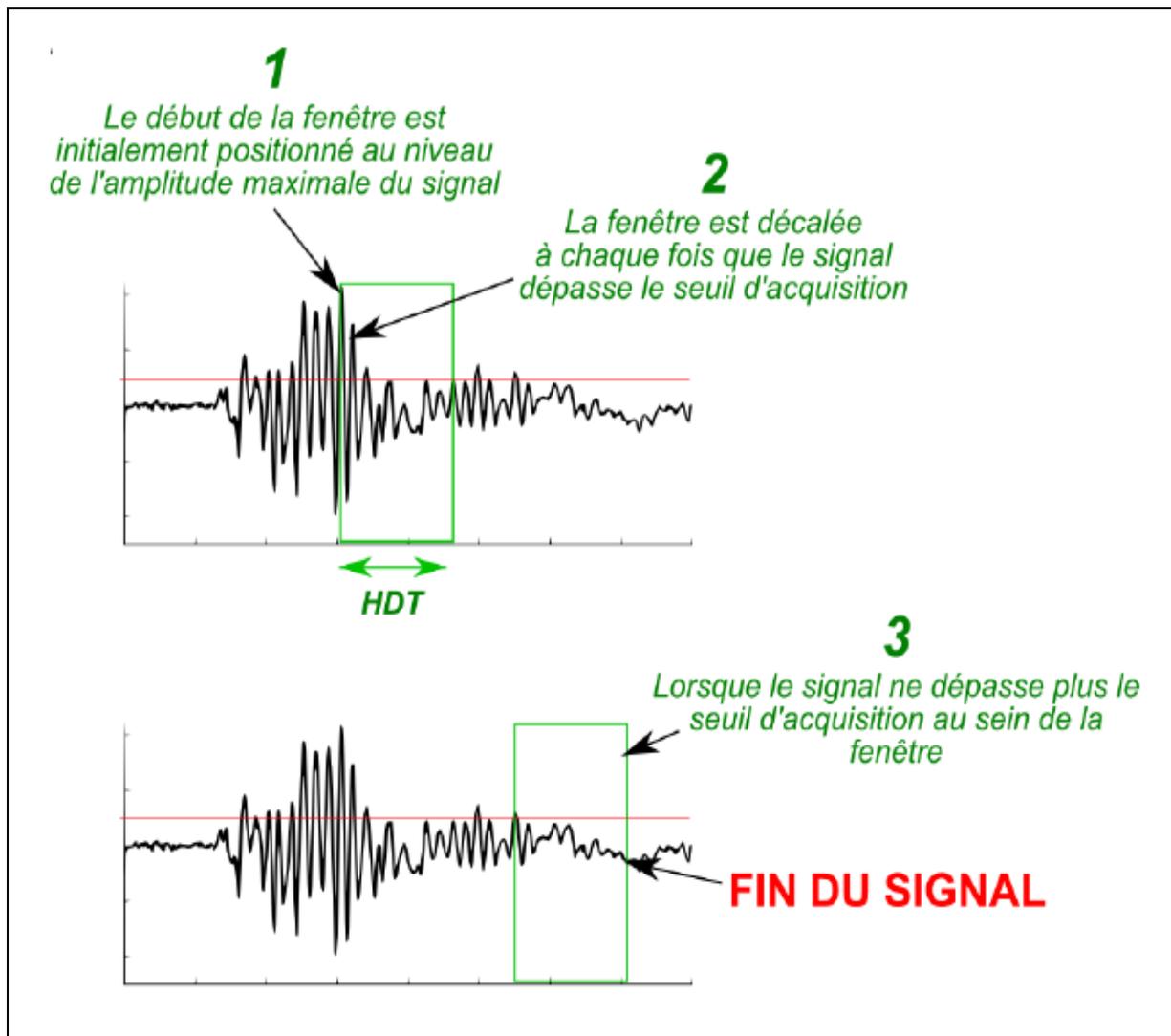


Figure A.4 : Détermination de la fin du signal à l'aide d'une fenêtre glissante.