



**HAL**  
open science

# Détection et évaluation de l'endommagement mécanique du béton par émission acoustique

Antoine Boniface

► **To cite this version:**

Antoine Boniface. Détection et évaluation de l'endommagement mécanique du béton par émission acoustique. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2017. Français. NNT : 2017BORD0954 . tel-01697863

**HAL Id: tel-01697863**

**<https://theses.hal.science/tel-01697863>**

Submitted on 31 Jan 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

École doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Spécialité "Mécanique"

*par*

**Antoine Boniface**

**DÉTECTION ET ÉVALUATION DE  
L'ENDOMMAGEMENT MÉCANIQUE DU BÉTON  
PAR ÉMISSION ACOUSTIQUE**

Sous la direction de

**Zoubir-Mehdi Sbartai**

Soutenue le 22 décembre 2017

Membres du jury :

Jean Paul Balayssac	Professeur	Université de Toulouse	Président du jury
Laurent Gaillet	Directeur de Recherches	Ifsttar	Rapporteur
Vincent Garnier	Professeur	Université Aix Marseille	Rapporteur
Zoubir-Mehdi Sbartai	Maître de Conférences (HDR)	Université de Bordeaux	Directeur de thèse
Jacqueline Saliba	Maître de Conférences	Université de Bordeaux	Examineur
Nary Ranaivomanana	Maître de Conférences	Université de Toulouse	Examineur
Jean-Marie Henault	Ingénieur R&D	EDF	Invité



# Résumé

Les problématiques de sûreté nucléaire passent par l'évaluation des installations existantes et notamment des enceintes de confinement. L'enceinte est un double sarcophage en béton armé. Elle constitue une barrière protégeant à la fois le réacteur d'une agression extérieure mais aussi protégeant l'extérieur d'une éventuelle fuite en cas d'accident. Le bon fonctionnement de l'enceinte est assuré lorsqu'elle remplit ses fonctions de résistante et d'étanchéité. L'évaluation de ces deux fonctions se fait notamment par le suivi de l'état de fissuration de l'enceinte.

La fissuration du béton est associée au développement de micro-fissures qui apparaissent lorsque les contraintes locales du matériau sont dépassées. Il résulte de ces micro-fissurations la libération d'énergie qui se propage dans le matériau sous la forme d'ondes mécaniques. La détection de ses ondes permettra de remonter à leur source et de caractériser l'état d'endommagement du matériau.

L'émission acoustique (EA) permet, à l'aide d'un réseau de capteurs piézoélectriques placés sur la surface, d'enregistrer les signaux issus de la libération d'énergie mécanique émise par les microfissures au sein du matériau. L'analyse des temps de vol de ces ondes permet entre autre de localiser les micro-fissurations au sein du matériau. Cette particularité de l'EA est donc parmi les techniques passives d'inspection pour le suivi de l'endommagement et de la fissuration du béton.

Cependant, la précision des outils de localisation existants 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 fissures le plus fiable possible. Par ailleurs l'identification des mécanismes sources d'EA est un enjeu crucial car il permet de caractériser les différents phénomènes qui interviennent lors de la propagation de fissure.

Sur la base d'essais de fissuration et d'endommagement thermique du béton nous avons montré l'effet des stratégies de localisation sur la représentation de l'endommagement. A partir de ces résultats nous avons montré qu'une analyse spatiale basée sur la densité d'événements acoustique et l'énergie libérée permettait de suivre la propagation de l'endommagement thermique mais aussi de la fissuration dans les éprouvettes. Une analyse originale des signaux par inter-corrélation est proposée afin de regrouper les signaux en classes. Enfin les méthodes développées ont été appliquées pendant les essais d'ouverture et de refermeture d'une fissure sur la soufflerie de l'Onera ainsi que sur la maquette « Vercors » d'EDF qui représente une enceinte de confinement de centrale nucléaire à l'échelle 1/3.

## Abstract

Nuclear safety issues involve the evaluation of existing installations, and in particular of containment systems. The enclosure is a double sarcophagus of reinforced concrete. It constitutes a protective barrier to both the reactor of an external aggression but also an agent of protection of the exterior of a possible leak in case of accident. The correct functioning of the enclosure is ensured in full filling of the functions of resistance and sealing. The evaluation of these two functions in particular for monitoring the state of cracking of the enclosure.

The cracking of the concrete is associated with the development of micro-cracks which appear when the local stresses of the material are exceeded. As a result of these micro-cracks, the release of energy is propagated in the material in the form of mechanical waves. This phenomenon is called "acoustic emission".

Acoustic emission (EA) is also the name of the technique used to directly measure the manifestation of these micro-cracks. The EA consists of recording, by means of a network of piezoelectric sensors placed on the surface, the ultrasonic waves emitted by the micro-cracks within the material. This particularity of the AE places it at the forefront of inspection techniques for monitoring the damage and cracking of concrete.

The accuracy of the existing 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 crack propagation possible. Moreover, the identification of the source mechanisms of EA is a crucial stake because it makes it possible to characterize the different phenomena that intervene during the propagation of crack.

On the basis of tests of cracking and thermal damage of the concrete we shown the impact of the strategies of localization on the representation of the damage. Based on our results, we proposed a spatial analysis based on the acoustic event density and the released energy allowing to follow the propagation of the thermal damage also of the cracking in the specimens. An original analysis of the signals by cross-correlation is proposed in order to group the signals into classes. Finally, the methods developed were applied during crack opening and referencing trials on the Onera wind tunnel and on a 1/3 scale model of a nuclear power plant confinement enclosure called “Vercors”.



*A l'heure ou certains de nos présidents d'universités, dirigeants de grands organismes de recherche et directeurs d'écoles d'ingénieurs bafouent leur devoir de réserve en nous intimant la direction dans laquelle voter, il convient de rappeler une définition simple mais claire du fascisme :*

*« Le fascisme, ce n'est pas d'empêcher de dire, c'est d'obliger à dire. »*

*Roland Barthes, discours au collège de France, 1977.*





# Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier l'ensemble des membres de mon encadrement. La liberté d'action qui m'a été offerte au cours de ces années a constitué pour moi un cadre d'émancipation tant sur le plan scientifique que personnel dans lequel j'ai pris du plaisir à travailler.

Je remercie mon directeur de thèse Zoubir-Mehdi Sbartai pour son implication scientifique et son engagement personnel. Les réunions formelles et improvisées sur la thèse ainsi que les nombreuses discussions sur des sujets très divers notamment lors des déplacements ont été très enrichissantes et sources de motivation. La direction à la fois scientifique et humaine qui a été menée a largement concourue à une atmosphère de travail agréable.

Je remercie ma co-encadrante Jacqueline Saliba pour ses nombreuses contributions scientifiques et techniques. Je retiens par ailleurs les nombreuses discussions en dehors du cadre scientifiques qui ont accompagnées la thèse et plus particulièrement lors des nombreux déplacements que nous avons effectués ensemble.

Je remercie Jean-Paul Balayssac et Nary Ranaivomanana pour l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail ainsi que pour leurs nombreux conseils au cours de cette thèse.

Je remercie Vincent Garnier, Laurent Gaillet et Jean Marie Henault pour leurs remarques, conseils et encouragements qui me seront bénéfiques pour la suite.

Je remercie l'ensemble des membres du département GCE de l'I2M pour leur accueil et particulièrement Bernard Solbes pour les échanges nombreux et enrichissants que nous avons eu sur un tas de sujets.

Je remercie tous les collègues et amis pour les discussions, les verres, les planches de bonne pitance, les restaurants, les soirées, les rires et les délires que nous avons partagés. Une mention spéciale pour : Vincent Glachant, le plus grand trublion que la terre n'est jamais portée ; Pierre Vignon, le mec plus « aware » que JCVD ; Alexandre Gagnant le co-pilote de bureau le plus nerfé ; Agnes Jambon pour toutes ces séances de vapotage passif que tu m'as offertes et enfin Marie Sauvequipéut, la seule Bordelaise n'ayant jamais vue la rive droite car trop au Nord.

Enfin je souhaite remercier mes amis du Nord qui se reconnaîtront ainsi que ma famille pour m'avoir toujours soutenu et ça bien avant le début de cette thèse...

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>III</b>
<b>Remerciements</b>	<b>IX</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>XIV</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>XXII</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Etat de l’art</b>	<b>5</b>
1.1 Suivi de santé des structures . . . . .	5
1.2 Endommagement et fissuration du béton . . . . .	6
1.2.1 Comportement mécanique du béton . . . . .	6
1.2.2 Caractéristiques de la FPZ . . . . .	8
1.2.3 Comportement du béton sous sollicitation thermique . . . . .	10
1.3 Suivi de la fissuration par corrélation d’image . . . . .	10
1.3.1 Principe de la méthode . . . . .	10
1.3.2 Détermination de la hauteur de fissure . . . . .	12
1.4 L’émission acoustique . . . . .	14
1.4.1 Définition . . . . .	14
1.4.2 Particularité de la technique . . . . .	15
1.4.3 Origines et sources de l’émission acoustique . . . . .	15
1.4.4 Domaines d’application de l’EA . . . . .	16
1.4.5 Principe de la mesure par émission acoustiques . . . . .	17
1.5 Localisation des événements acoustique . . . . .	25
1.5.1 Les méthodes de localisation . . . . .	27
1.5.2 Principe de la localisation par triangulation . . . . .	30

1.5.3	Critère de détermination du début des salves . . . . .	33
1.5.4	Résolution du problème de minimisation . . . . .	37
1.6	Identification des mécanismes et des sources d'EA . . . . .	38
1.6.1	Analyse paramétrique classique . . . . .	39
1.6.2	Analyse statistique multivariées . . . . .	40
1.7	Filtrage des données d'EA . . . . .	42
1.8	Conclusion . . . . .	43
<b>2</b>	<b>Étude expérimentale</b>	<b>47</b>
2.1	Matériaux et méthodes . . . . .	47
2.1.1	Composition du béton . . . . .	47
2.1.2	Essais de flexion 3 points . . . . .	49
2.1.3	Essais de refermeture de fissure . . . . .	51
2.1.4	Essais d'endommagement sous sollicitation thermique . . . . .	52
2.2	Instrumentation . . . . .	54
2.2.1	Matériel d'acquisition . . . . .	54
2.2.2	Choix des paramètres d'acquisition . . . . .	56
2.3	Traitement des données avec « bibEA » . . . . .	56
2.3.1	Types de variables . . . . .	57
2.3.2	Fonctionnement de la bibliothèque « bibEA » . . . . .	58
2.4	Bilan . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Fiabilisation de la localisation des événements acoustiques</b>	<b>61</b>
3.1	Introduction . . . . .	61
3.2	Déroulement des essais de flexion 3 points . . . . .	62
3.3	Critères de filtrage des signaux enregistrés . . . . .	65
3.3.1	Le nombre de coups et l'amplitude . . . . .	65
3.3.2	L'énergie contenue avant le début des salves . . . . .	67
3.4	Critères de filtrage des événements localisés . . . . .	69
3.4.1	Seuil d'acquisition . . . . .	71
3.4.2	Sur-représentation d'événements sur les parois des poutres . . . . .	74
3.4.3	Erreur sur la minimisation . . . . .	75
3.4.4	Conséquences du filtrage . . . . .	75
3.5	Effet du critère de détermination du début de salve . . . . .	76
3.5.1	Application du critère d'Akaike . . . . .	76

3.5.2	Cartes de localisation et distribution des événements . . . . .	76
3.5.3	Proportion cumulée d'événements en fonction de l'erreur $\xi_m$ . . . . .	79
3.5.4	Analyse . . . . .	80
3.6	Effet de l'algorithme de minimisation . . . . .	82
3.6.1	Descriptif et paramètres d'entrée des algorithmes de localisation utilisés . . . . .	83
3.6.2	Cartes de localisation et distribution des événements . . . . .	87
3.6.3	Proportion cumulée d'événements en fonction de l'erreur $\xi_m$ . . . . .	89
3.7	Conclusion . . . . .	90
<b>4</b>	<b>Suivi de l'endommagement et de la propagation de fissure</b>	<b>93</b>
4.1	Introduction . . . . .	93
4.2	Construction des cartes de densités . . . . .	94
4.2.1	Méthode de calcul des densités d'événements et d'énergies . . . . .	95
4.2.2	Calcul de l'énergie associée à un événement . . . . .	95
4.2.3	Représentation des densités d'énergie à l'aide d'une échelle logarithmique . . . . .	97
4.3	Application aux essais de flexion 3 points . . . . .	98
4.3.1	Découpage de l'essai en phases . . . . .	98
4.3.2	Activité acoustique et énergétique au cours des essais . . . . .	99
4.3.3	Résultats de la video-corrélation . . . . .	102
4.3.4	Suivi de la fissuration par analyse des densités d'événements et d'énergies . . . . .	103
4.3.5	Recherche d'un critère de position de fissure sur les distributions cumulées d'événements . . . . .	112
4.3.6	Reconstruction du profil de fissure . . . . .	117
4.4	Détection de fissures existantes . . . . .	120
4.4.1	Cycles de décharge/recharge dans les essais de flexion 3 points . . . . .	120
4.4.2	Essais de refermeture de fissure . . . . .	125
4.5	Application aux essais d'endommagement thermique . . . . .	133
4.5.1	Déroulement des essais . . . . .	133
4.5.2	Découpage de l'essai en phases . . . . .	134
4.5.3	Suivi de l'endommagement par analyse des densités d'événements et d'énergies . . . . .	134
4.6	Conclusion . . . . .	139
<b>5</b>	<b>Application sur sites</b>	<b>141</b>

5.1	Introduction . . . . .	141
5.2	Soufflerie de l'Onera . . . . .	142
5.2.1	Présentation de la structure . . . . .	142
5.2.2	Présentation de l'essai . . . . .	143
5.2.3	Suivi à l'aide de la technique d'EA . . . . .	145
5.2.4	Identification des zones d'activité acoustique . . . . .	149
5.2.5	Discussion . . . . .	149
5.3	Vercors . . . . .	151
5.3.1	Présentation de la structure . . . . .	151
5.3.2	Présentation de l'essai . . . . .	152
5.3.3	Suivi à l'aide de la technique d'EA . . . . .	154
5.3.4	Identification des zones d'activité acoustique . . . . .	159
5.3.5	Discussion . . . . .	162
5.4	Conclusion . . . . .	165
	<b>Conclusion</b>	<b>167</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>171</b>
	<b>A Bibliothèque <i>bibEA</i></b>	<b>179</b>
	<b>B Cartes de localisation, distributions et nombre d'événements cumulés en fonction de <math>\xi_m</math></b>	<b>183</b>
	<b>C Cartes des densités des événements et de l'énergie</b>	<b>197</b>

# Table des figures

1.1	Courbe contrainte/ouverture d'entaille d'un matériau quasi-fragile comme le béton et illustration de la zone située au sommet de la fissure pour différentes phases du chargement. . . . .	7
1.2	Différents mécanismes d'adoucissement à l'oeuvre dans la zone d'élaboration de la rupture. . . . .	8
1.3	Comparaison des zones de micro-fissurations à partir d'images obtenues par rayons-X dans des bétons avec une taille maximale des granulats différente. . . . .	9
1.4	Schémas de fissuration dans un milieu matrice-inclusion. $\alpha$ représente le coefficient de dilatation équivalent dû aux effets de la température. . . . .	11
1.5	Critère SSD de corrélation. . . . .	12
1.6	Exemple de résultat obtenu par VC sur la propagation d'une fissure dans le béton. . . . .	13
1.7	Container de déchets radioactifs en béton . . . . .	17
1.8	Estimation de la position de la source en utilisant uniquement les accéléromètres (a) et en tenant compte des résultats d'EA (b). . . . .	18
1.9	Schéma d'une chaîne d'acquisition d'émission acoustique classique. . . . .	18
1.10	Signal type d'émission acoustique. . . . .	20
1.11	Exemples de descripteurs temporels des signaux d'EA. . . . .	21
1.12	Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs. . . . .	23
1.13	Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs. . . . .	24
1.14	Détermination de la fenêtre temporelle de formation des événements « T » . . . . .	25
1.15	Répartition de l'énergie acoustique reçue au cours d'un essai de fissuration. . . . .	26
1.16	Événements acoustiques (points rouges) et trajet visuel des fissures (traits noirs) sur une poutre en béton pré-contraint. Tous les événements enregistrés (a), les événements filtrés au début de la fissuration (b) et les événements filtrés à la fin de l'essai (c). . . . .	27
1.17	Classification des méthodes de localisation des événements acoustiques. . . . .	28



1.18	Principe de la localisation zonale. . . . .	29
1.19	Principe de la propagation des ondes selon les hypothèses de la localisation. . . . .	30
1.20	Comparaison des retards mesurés pour un événement réel et des retards calculés pour un événement artificiel. . . . .	33
1.21	Illustration du début de salve d'EA comme la transition entre l'enregistrement de bruit (phase 1) et l'enregistrement du bruit et du signal (phase 2). . . . .	34
1.22	Représentation schématique des erreurs potentielles liées à l'utilisation du seuil fixe. . . . .	35
1.23	Vitesse de propagation des ondes calculée (abscisse) en fonction de la valeur du seuil utilisée (ordonnée) sur deux types de maçonnerie. . . . .	35
1.24	Exemple d'application du critère d'Akaike. . . . .	36
1.25	Exemple de deux simplex consécutifs en 2D. . . . .	38
1.26	Un exemple de déplacement de simplex dans l'espace sur courbe en contours représentant la fonction à minimiser. . . . .	38
1.27	Identification des modes de rupture par analyse paramétrique (a). Application sur des événements enregistrés lors d'un essai de flexion 4 points (b). . . . .	40
1.28	Principe et résultats du tenseur des moments. . . . .	41
1.29	Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par K-mean. . . . .	42
1.30	Exemple de filtrage des signaux dont le nombre de coups est inférieur à 10. . . . .	43
2.1	Poutre avant et après rupture. . . . .	49
2.2	Essai de flexion 3 points. . . . .	50
2.3	Schéma et dimension des poutres p1-x pour la flexion 3 points. . . . .	50
2.4	Essai de flexion 4 points de refermeture de fissure. . . . .	52
2.5	Schéma et dimension des poutres p2-x pour la refermeture de fissure. . . . .	52
2.6	Schéma et dimensions des poutres p1-4 et p1-5 pour les essais d'endommagement thermique. . . . .	53
2.7	Position de la résistance et des thermocouples dans la poutre. . . . .	54
2.8	Système d'acquisition. . . . .	55
2.9	Réponse fréquentielle des capteurs R15 $\alpha$ . . . . .	56
2.10	Schéma d'interaction des 4 grands types de variables de données. . . . .	58
2.11	Environnement de travail Matlab pour un jeu de données chargé en mémoire. . . . .	59
2.12	Illustration schématique de la position de <i>bibEA</i> dans la chaîne de traitement et d'analyse des données d'EA. . . . .	60

3.1	Force en fonction de CMOD des poutres p1-1 (A), p1-2 (B) et p1-3 (C). . . . .	63
3.2	Force en fonction du temps des poutres p1-1 (A), p1-2 (B) et p1-3 (C). En rouge : les phases de propagation de fissure, en bleu : les paliers de chargement, en vert : les phases de déchargement/rechargement pendant les cycles. . . . .	64
3.3	Nombre de coups en fonction de l'amplitude maximale des signaux. . . . .	65
3.4	Exemple d'un signal d'amplitude maximale de 35dB et de 2 coups. . . . .	66
3.5	Exemple d'un signal d'amplitude maximale de 52dB et de 45 coups. . . . .	67
3.6	Périodes considérées sur lesquelles l'énergie est calculée en fonction de la méthode de détermination du début des salves. . . . .	68
3.7	Proportion cumulée de signaux en fonction de l'énergie par unité de temps contenue avant le début de la salve. Début de salve déterminés par le critère d'Akaike (bleu) et début de salve déterminé par seuil fixe (rouge). . . . .	70
3.8	3 signaux d'EA dont l'énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le critère d'Akaike. La durée sur laquelle est calculée l'énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire. . . . .	71
3.9	3 signaux d'EA dont l'énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le seuil fixe. La durée sur laquelle est calculée l'énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire. . . . .	72
3.10	Distribution des signaux en fonction de leur amplitude. Tous les signaux (bleu), signaux associés à des événements (jaune) et signaux non associés à des événements (vert). . . . .	73
3.11	Exemple de carte d'événements non filtrée et des distributions d'événements dans chaque direction. . . . .	74
3.12	Application du critère d'Akaike sur 2048 points (a) et sur 386 points (b). . . . .	77
3.13	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Utilisation du seuil fixe (a), et utilisation du critère d'Akaike (b). . . . .	78
3.14	Distribution des événements dans les trois directions sur la poutre p1-1. Comparaison entre le seuil fixe en bleu et le critère d'Akaike (AIC) en jaune. . . . .	79
3.15	Proportion cumulée d'événements en fonction du résidu $\xi_m$ dans la poutre p1-1 pour deux critères de définition du début de salves. Algorithme de localisation : Gbnm . . . . .	80
3.16	Distribution des événements dans les trois directions. Comparaison entre les algorithmes Gbnm, de maillage adaptatif et génétique. . . . .	83
3.17	Exemple de 3 maillages successifs appliqués par l'algorithme AMA. . . . .	85
3.18	Distribution des événements dans les trois directions. Comparaison entre les algorithmes Gbnm, maillage adaptatif et génétique. . . . .	87

3.19	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Utilisation de AMA (a) et de l'algorithme génétique (b). . . . .	88
3.20	Proportion cumulée d'événements en fonction du résidu $\xi_m$ pour trois algorithmes de minimisation. Critère de détermination du début des salves : AIC. . . . .	89
3.21	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu $\xi_m$ et pour toutes les stratégies de localisation étudiées. . . . .	91
3.22	Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-1. . . . .	91
4.1	Principe du calcul des densités spatiales d'événements. . . . .	95
4.2	Principe du calcul des densités spatiales d'énergies. . . . .	96
4.3	Distribution des événements en fonction de leur leur énergie. Poutre p1-5. . . . .	97
4.4	Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-2 en 12 phases. . . . .	98
4.5	Proportion du chargement en fonction de la proportion cumulée d'événements au cours de l'essai. . . . .	99
4.6	Force et nombre de signaux enregistrés par seconde en fonction du temps. . . . .	100
4.7	Temps inter-salves calculé au niveau du pic de chargement pour pour le capteur 1. . . . .	101
4.8	Exemple de champ de déformation obtenu sur une poutre en flexion 3 points par video-corrélation. . . . .	102
4.9	Hauteur de la fissure déterminée en surface par la technique de video-corrélation au cours de l'essai sur la poutre p1-2. . . . .	103
4.10	Position de la phase numéro 2 au cours de l'essai. . . . .	104
4.11	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2. . . . .	105
4.12	Position de la phase numéro 3 au cours de l'essai. . . . .	105
4.13	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3. . . . .	106
4.14	Position de la phase numéro 5 au cours de l'essai. . . . .	107
4.15	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergies (b) de la phase 5. . . . .	108
4.16	Position de la phase numéro 8 au cours de l'essai. . . . .	108
4.17	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 8. . . . .	109
4.18	Position de la phase numéro 11 au cours de l'essai. . . . .	110

4.19	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 11. . . . .	111
4.20	Distribution cumulée locale des événements selon $Oy$ à chacun des points de mesure par video-corrélation. . . . .	113
4.21	Distribution cumulée globale des événements selon $Oy$ à chacun des points de mesure par video-corrélation. . . . .	115
4.22	Comparaison des hauteurs de fissure obtenues par video-corrélation (bleu) et par émission acoustique avec la distribution globale (vert) et la distribution locale (jaune). . . . .	116
4.23	Profil de fissure reconstruit à partir des densités d'événements. . . . .	118
4.24	Photo de la poutre p1-1 avec la surface $z = 12cm$ au premier plan. . . . .	119
4.25	Photo de la poutre p1-1 avec la surface $z = 0cm$ au premier plan. . . . .	119
4.26	Positions des cycles au cours de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-3. . . . .	120
4.27	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant la décharge du premier cycle. . . . .	121
4.28	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant la décharge du deuxième cycle. . . . .	122
4.29	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant le chargement du premier cycle. . . . .	123
4.30	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant le chargement du deuxième cycle. . . . .	124
4.31	Représentation schématique du déroulement des phases de changement de précontrainte dans la poutre 2-1. . . . .	125
4.32	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 20 à 0 $kN$ . . . . .	127
4.33	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 60 à 0 $kN$ . . . . .	128
4.34	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 0 à 20 $kN$ . . . . .	129
4.35	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 20 à 40 $kN$ . . . . .	130
4.36	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 40 à 60 $kN$ . . . . .	131
4.37	Température en fonction du temps sur la poutre p1-5. . . . .	133
4.38	Découpage temporel de l'essai d'endommagement thermique sur la poutre p1-5 en 4 phases. . . . .	134
4.39	Distribution des événements (a) et cartographie des densités d'événements (b) de la phase 1. . . . .	136

4.40	Distribution des énergies (a) et cartographie des densités d'énergies (b) de la phase 1. . . . .	137
4.41	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3. . . . .	138
5.1	Schémas de la soufflerie F1 de l'Onera. . . . .	142
5.2	Maquette d'un avion commercial dans une configuration d'atterrissage placé dans la chambre de test. . . . .	143
5.3	Zone de travail sur la structure. . . . .	144
5.4	Position des capteurs (points rouges) et chemin observé de la fissure (vert). . . . .	145
5.5	Pression absolue en fonction du temps pendant l'essai. . . . .	145
5.6	Amplitude maximale des salves reçues sur le capteur 1 en fonction de la distance de la source. . . . .	146
5.7	Evolution de la pression et de la proportion cumulée des signaux reçus par capteur en fonction du temps au cours de l'essai. . . . .	147
5.8	Evolution de la pression et de la proportion d'énergie reçue par capteur en fonction du temps au cours de l'essai. . . . .	147
5.9	Evolution de la pression et amplitude maximale des signaux reçus sur chaque capteur en fonction du temps. . . . .	148
5.10	Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la phase de montée en pression. Surface des mailles : $4 \text{ cm}^2$ . . . . .	150
5.11	Maquette Vercors à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire sur les sites R & D : « les Renardières » d'EDF à Écuelles. . . . .	151
5.12	Compresseurs utilisés pour la montée en pression. . . . .	153
5.13	Evolution de la pression interne en fonction du temps. . . . .	153
5.14	Zone de travail (a) et position des capteurs et des fissures observables (b). . . . .	155
5.15	Système de fixation magnétique des capteurs R15. . . . .	156
5.16	Courbes d'atténuation des ondes entre les capteurs 2 et 3 obtenues par cassé de mine. . . . .	157
5.17	Proportion de signaux reçus par capteur au cours de l'essai. . . . .	158
5.18	Pression et activité acoustique par capteur en fonction du temps. . . . .	158
5.19	Proportion d'énergie reçue au cours de l'essai par capteur. . . . .	159
5.20	Courbes d'atténuation des ondes entre les capteurs 2 et 3 obtenues par cassé de mine. . . . .	160
5.21	Proportion cumulée de signaux en fonction de l'énergie du bruit. . . . .	161

5.22	2 signaux d'EA dont l'énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le critère d'Akaike. La durée sur laquelle est calculée l'énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire. . . . .	162
5.23	Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la première phase de montée en pression. Position des capteurs (points roses) et chemins de fissures observés (pointillés blancs). . . . .	163
5.24	Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la deuxième phase de montée en pression. Position des capteurs (points roses) et chemins de fissures observés (pointillés blancs). . . . .	164
5.25	Comparaison de l'activité au cours des deux essais consécutifs sur Vercors. . . . .	165
A.1	Exemples d'utilisation de la variable des hits. Affichage des paramètres 1 à 6 calculés sur les signaux 5 à 10 (a). Affichage des amplitudes maximales des signaux 47 à 53 (b). . . . .	180
A.2	Exemples d'utilisation de la variable des événements. Affichage des paramètres associés à l'événement 42 (a). Affichage du temps d'arrivée de l'événement 42 (b). . . . .	181
A.3	Exemple de contenu de la variable de configuration. . . . .	182
B.1	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme des simplex. . . . .	184
B.2	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme par maillage adaptatif. . . . .	185
B.3	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme génétique. . . . .	186
B.4	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme des simplex. . . . .	188
B.5	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme par maillage adaptatif. . . . .	189
B.6	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme génétique. . . . .	190
B.7	Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-2. . . . .	191
B.8	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu $\xi_m$ et pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Seuil fixe en traits plein. Critère d'Akaike en pointillés. Algorithme des simplex en bleu, algorithme par maillage adaptatif en vert et algorithme génétique en rouge. Poutre p1-2. . . . .	191
B.9	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme des simplex. . . . .	193
B.10	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme par maillage adaptatif. . . . .	194

B.11	Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme génétique. . . . .	195
B.12	Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-3. . . . .	196
B.13	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu $\xi_m$ et pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Seuil fixe en traits plein. Critère d'Akaike en pointillés. Algorithme des simplex en bleu, algorithme par maillage adaptatif en vert et algorithme génétique en rouge. Poutre p1-3. . . . .	196
C.1	Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-1. .	197
C.2	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 1. . . . .	198
C.3	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2. . . . .	199
C.4	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3. . . . .	200
C.5	Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-1. .	201
C.6	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 1. . . . .	202
C.7	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2. . . . .	203
C.8	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3. . . . .	204
C.9	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 4. . . . .	205
C.10	Température en fonction du temps sur la poutre p1-4. Premier jour (A), deuxième jour (B) et troisième jour (C). . . . .	206
C.11	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du premier jour. Palier de température : 90 °C. . . . .	207
C.12	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 100 °C. . . . .	208
C.13	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 120 °C. . . . .	209
C.14	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 90 °C. . . . .	210
C.15	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 150 °C. . . . .	211
C.16	Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 190 °C. . . . .	212

# Liste des tableaux

1.1	Exemple d'indilage des $\Delta t$ pour deux événements. . . . .	31
2.1	Composition du béton. . . . .	48
2.2	Propriétés mécaniques et physiques du béton. . . . .	48
2.3	Position des capteurs en <i>cm</i> dans les poutres p1-1, p1-2 et p1-3 . . .	51
2.4	Position des capteurs en <i>cm</i> dans les poutres p2-1, p2-2 et p2-3 . . .	53
2.5	Position des capteurs en <i>cm</i> dans les poutres p1-4 et p1-5 . . . . .	55
2.6	Paramètres d'acquisition. . . . .	57
3.1	Caractéristiques des essais de flexion 3 points. . . . .	64
3.2	Paramètres d'entrée de l'algorithme GBNM. . . . .	84
3.3	Caractéristiques des maillages AMA. . . . .	84
3.4	Paramètres d'entrée de l'algorithme génétique. . . . .	86
3.5	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-1. Nombre d'événements initial : 13909. . .	92
4.1	Récapitulatif des mesures effectuées par video-corrélation. . . . .	103
4.2	Proportions d'événements localisés sous la hauteur mesurée de la fissure par video-corrélation à partir de la distribution locale. . . . .	113
4.3	Proportions d'événements localisés sous la hauteur mesurée de la fissure par video-corrélation à partir de la distribution globale. . . . .	114
4.4	Récapitulatif des positions à 96 % d'événements pour les trois poutres en fonction de la méthode employée. Distribution globale : $h_{Gea}$ et distribution locale : $h_{Lea}$ . . . . .	117
B.1	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-2. Nombre d'événements initial : 30190. . .	187
B.2	Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-3. Nombre d'événements initial : 12387. . .	192





# Introduction

## Contexte

Avec  $190\text{ m}^3$  de béton coulés par seconde, soit 6 milliards de  $\text{m}^3$  par an, le béton est le matériau de construction le plus consommé au monde [1]. La sur-représentation de ce matériau dans le génie civil est due à ses nombreux avantages : il est facile à fabriquer, les ressources nécessaires à sa fabrication existent dans de nombreux pays, il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles, il épouse les formes qui lui sont données et enfin, associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés mécaniques renforcées (béton armé et béton précontraint). La diversité des édifices construits en béton est immense : fondation d'habitations, aménagements urbains, immeubles d'habitations ou de bureaux, gratte-ciels, tunnels, ponts, barrages, structures vitales de centrales nucléaires (aero-réfrigérants et enceintes de confinement).

Les progrès réalisés au cours des dernières décennies dans l'élaboration du béton et la conception des ouvrages ont conduit à une explosion des édifices de grandes tailles. Ces structures souvent stratégiques nécessitent une attention particulière quant à leur état de santé. C'est d'autant plus vrai pour les centrales nucléaires qui représentent un risque particulier en cas d'incident.

## Gestion du parc nucléaire Français

La France a fait le choix d'une production d'électricité centrée sur le nucléaire. En 2014, elle produit 77% de son électricité via 58 réacteurs répartis sur 19 centrales [2]. Avec le plus vieux réacteur qui aura 40 ans en 2018, le parc nucléaire Français arrive dans une phase où il est nécessaire d'évaluer l'état de santé de ses structures afin de se prononcer sur leur éventuelle prolongation. Un des piliers de la sécurité sur

les centrales est l'enceinte de confinement qui entoure chaque réacteur. L'objectif de cette structure en béton armé est de protéger à la fois le réacteur d'une agression extérieure mais aussi l'environnement d'une éventuelle fuite de matériaux radioactifs en cas d'incident sur le réacteur.

L'intégrité de l'enceinte de confinement se mesure entre autre à son état de fissuration. En effet, la présence de fissures amoindri les capacités mécaniques et constitue une des sources principales de fuites.

## **Projet ENDE**

Dans ce contexte, le projet ANR ENDE (**E**valuation **N**on **D**estructive des **E**nceintes de confinement des centrales nucléaires) propose d'apporter des solutions opérationnelles à l'évaluation de l'état de santé des enceintes. Un des objectifs principaux d'ENDE est d'évaluer différentes techniques d'auscultation dans les conditions les plus proches possible d'un accident grave sur un réacteur nucléaire. Les conséquences d'un tel accident conduirait à une augmentation de la pression interne à 5 *bars* ainsi que de la température interne de l'enceinte à 190 °C en 20 secondes. De telles conditions sont susceptibles de favoriser le développement de fissures sur l'enceinte de confinement d'où la nécessité de comprendre dans quelle mesure ces conditions peuvent affecter ces installations.

## **Problématique liée à la fissuration**

La fissuration du béton est précédée par la formation d'une zone de micro-fissurations appelée FPZ (« fracture process zone »). Ces micro-fissurations apparaissent lorsque les capacités de résistances locales du béton sont dépassées. Il résulte de ces micro-fissurations la libération d'énergie qui se propage dans le matériau sous la forme d'ondes mécaniques. Ce phénomène observé dans une très large gamme de matériaux est appelé : « émission acoustique ». Le développement du réseau de micro-fissurations participe à la diminution progressive des caractéristiques mécaniques du béton menant à l'apparition de macro-fissures. Le réseau de micro-fissuration s'étend ainsi en tête de fissure au cours de sa propagation.

## **Le choix de l'émission acoustique comme méthode d'auscultation**

L'émission acoustique désigne aussi la technique qui permet de détecter les ondes émises par les micro-fissurations. Le réseau de capteurs disposé sur la surface du matériau permet entre autre de localiser les sources de ces ondes et donc les micro-endommagements. La proximité de la technique avec les phénomènes physique liés à la propagation de fissure font d'elle un choix naturel pour détecter et suivre l'endommagement du béton en temps réel. De plus le caractère passif de l'émission acoustique lui permet de s'adapter à des temps d'instrumentation très long et à un suivi constant de l'évolution du matériau surveillé.

## **Les problématiques soulevées par l'émission acoustique**

Les méthodes de localisation utilisées en émission acoustique sont nombreuses et souvent adaptées à chaque cas de figure (géométrie et matériau). Cependant on note deux invariants très fort dans la localisation : (i) la nécessité de définir le début des salves enregistrées sur les capteurs et (ii) la nécessité de résoudre un problème de minimisation à l'aide d'un algorithme. Si la littérature regorge de solutions à ces problème, l'influence des choix faits dans ces deux domaines sur les cartes d'événements acoustiques n'est que peu discutée.

Le lien entre la propagation de la fissure et la libération de fortes énergies est constaté dans la littérature. Cependant les méthodes de localisation de la fissure et de sa progression sont peu nombreuses et consistent souvent en un filtrage important des données.

Enfin l'émission acoustique est utilisée comme une méthode de suivi de l'endommagement mais peu ou pas comme une méthode de détection de fissures déjà existantes.

Pour répondre aux problématiques du projet ENDE avec l'émission acoustique, il convient de lever les différents verrous identifiés ici. Pour cela des essais de fissuration, d'endommagement thermique et de refermeture de fissures sur des poutres en béton ont été effectués dans le cadre d'une campagne expérimentale en laboratoire.

L'influence de différentes stratégies de localisation sur la représentation des zones

d'activité acoustique est montrée. Pour cela, 3 algorithmes de localisation (« global bounded nelder mead », l'algorithme génétique et un algorithme par maillage adaptatif) ainsi que sur 2 critères de détermination du début des salves (seuil fixe et critère d'Akaike) sont étudiés.

En se basant sur les résultats de fiabilisation de la localisation, une analyse basée sur les cartes de densités d'événements et d'énergies au cours de l'endommagement est proposée. Une méthode de filtrage originale basée sur l'énergie est proposée afin de renforcer la pertinence de la base de données utilisée. Les liens entre pics d'activité énergétiques et propagation de fissure sont montrés. Toujours à partir des cartes de densités, la détection et la localisation de fissures déjà existantes mais pas en propagation est proposée.

Enfin, les résultats obtenus en laboratoire sont confrontés à ceux obtenus lors d'essais sur des structures en béton à grande échelle. La première structure étudiée est la soufflerie de l'Onera et la seconde la maquette Vercors à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement de centrale nucléaire. Lors de ces essais les structures sont sollicités mécaniquement par une augmentation de la pression interne permettant l'ouverture de fissures déjà existantes.

# Chapitre 1

## Etat de l'art

### 1.1 Suivi de santé des structures

Le suivi de santé des structures (ou SHM pour « **S**tructural **H**ealth **M**onitoring ») est un domaine connexe à l'**E**valuation et aux **C**ontrôles **N**on-**D**éstructifs (ECND). La différence entre ces deux domaines tient aux objectifs qui leurs sont fixés. Plusieurs visions de la SHM coexistent dans la littérature [3, 4, 5]. Leur point commun est que la SHM est une technique permettant de détecter toute modification d'une structure susceptible d'atteindre son intégrité et ou son fonctionnement normal. Il existe différentes manières de répondre à cet objectif. La première est d'assurer la réponse constante et inchangée d'une structure à une sollicitation périodique. Les techniques fonctionnant sur ce modèle sont souvent des procédés d'ECND automatisés. Une autre manière de répondre à l'objectif de la SHM est d'utiliser un dispositif capable de détecter l'endommagement de la structure directement lorsqu'il survient. Ces deux approches doivent aussi permettre de poser un diagnostic de la structure afin d'évaluer son état d'altération. Le diagnostic doit servir à la prise de décision sur la nécessité d'une intervention plus ciblée.

L'accroissement des structures de grandes dimensions en génie civil a imposé au cours du temps une surveillance généralisée de ces infrastructures souvent vitales. Une des pathologies susceptible d'atteindre à l'intégrité de ces édifices souvent en béton est la fissuration. Les origines du phénomène de fissuration sont diverses.

Dans cette thèse nous ne nous intéresserons qu'à la fissuration d'origine mécanique ou thermique en relation avec les objectifs du projet ENDE.

Deux des objectifs du projet ENDE sont d'évaluer les capacités de résistance mécaniques et de confinement des enceintes de confinement des centrales nucléaires dans le cas d'un accident grave. Les conséquences identifiées d'un accident conduirait à une augmentation de la pression interne à 5 *bars* ainsi que de la température interne à 190 °C en 20 secondes. Dans ces conditions, l'enceinte de confinement subit des efforts en traction sur sa paroi extérieure susceptible de générer des fissures. Il faut ajouter à cette problématique la montée en température qui est susceptible d'altérer le comportement du béton.

## 1.2 Endommagement et fissuration du béton

Pour répondre aux objectifs décrits précédemment cette section détaille brièvement le comportement mécanique du béton en traction. Une attention particulière est apportée à la description de la zone de micro-fissuration associée à la propagation de fissure. Enfin le comportement du béton sous sollicitation thermique est abordé.

### 1.2.1 Comportement mécanique du béton

Le béton est un matériau composite isotrope possédant un comportement mécanique quasi-fragile. Ce comportement non-linéaire bien que différent en fonction du type de sollicitation appliquée [6] provient de sa structure hétérogène complexe (mélange de ciment, sable, graviers et eau). Cette hétérogénéité favorise le développement en amont de la fissure la « **F**racture **P**rocess **Z**one » ou « FPZ ». La courbe contrainte/ouverture d'entaille (ou « **C**MOD » pour « crack mouth opening displacement ») de la figure 1.1 illustre ce comportement complexe sur une poutre entaillée dans le cas d'une sollicitation de flexion.

Le comportement quasi-fragile se décompose en 3 parties :

- une partie linéaire (segment AB) dans laquelle le matériau est strictement élastique, la réponse du matériau est directement proportionnelle à l'effort

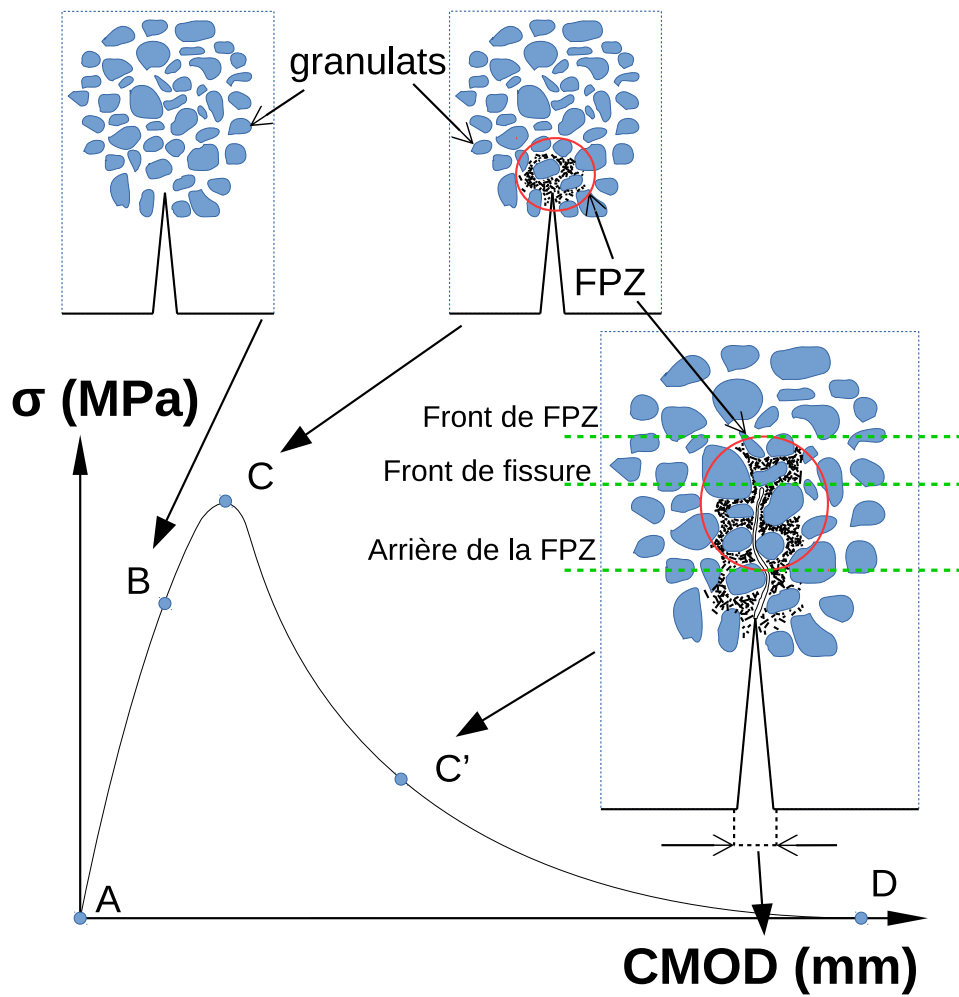


FIGURE 1.1 – Courbe contrainte/ouverture d’entaille d’un matériau quasi-fragile comme le béton et illustration de la zone située au sommet de la fissure pour différentes phases du chargement.

- appliqué. Aucun endommagement mécanique n’est mesuré dans cette partie.
- une partie non-linéaire (segment BC) qui correspond à l’apparition de microfissurations. A ce stade, un ensemble de microfissurations est formé autour de la future zone d’initiation de la fissure. La fin de cette partie (point C) correspond au pic de chargement appliqué au matériau. Ce point d’inflexion désigne l’instant d’initiation de la fissure.
- la dernière partie (segment CD) est appelée « zone d’adoucissement ». Elle est également non-linéaire et correspond à la propagation de la fissure ainsi qu’à d’autres phénomènes décrits ci-après. Comme on peut le voir pour un niveau de chargement correspondant au point C’, le front de fissure est noyé



en amont et en aval de la FPZ.

## 1.2.2 Caractéristiques de la FPZ

Les différents mécanismes conduisant au développement de la FPZ sont présentés sur la figure 1.2. La diversité de ces mécanismes illustre la difficulté à définir ce qu'est réellement une fissure et notamment son extrémité supérieure qu'on pourrait appeler le « front de fissure ». En effet, la présence de « ponts granulaires » ou de zones de frottements entre les lèvres de la fissure ne permet pas de définir clairement sa longueur. Par ailleurs, la fissure progresse par coalescence entre les micro-fissurations ce qui ne permet pas de définir efficacement une frontière entre « la fissure » et la zone micro-fissurée.

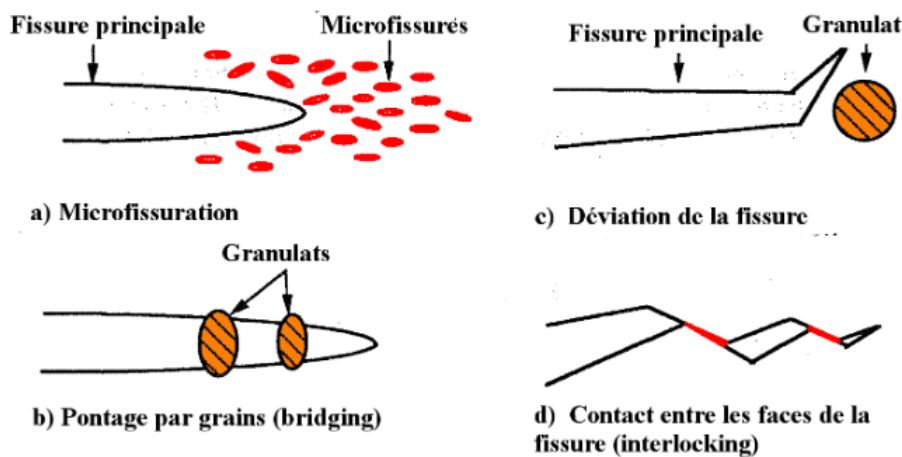


FIGURE 1.2 – Les différents mécanismes à l’oeuvre dans la zone d’élaboration de la rupture [7].

Le développement de la FPZ est central pour la compréhension du comportement du béton à la rupture. Sa caractérisation constitue un enjeu majeur dans le domaine de la mécanique de la rupture encore aujourd’hui [8, 9] puisqu’elle est responsable notamment de l’effet d’échelle et de l’énergie de fissuration. L’emploi de différentes techniques expérimentales a permis au cours du temps de caractériser la FPZ. Une instrumentation par fibre optique a permis de conclure que la largeur de la FPZ était de l’ordre de 3 fois la taille des plus gros granulats [10] confirmant ainsi les prédictions de modèles théoriques [11]. Une analyse par corrélation d’images numériques (CIN)

a montré la relation entre la taille de la FPZ et la hauteur de l'éprouvette [12]. Des mesures par rayons X effectuées à différentes étapes de la fissuration et sur des bétons dont la taille maximale des granulats est différente ont été menées [13]. Les résultats obtenus montrent que la FPZ est d'autant plus large que la taille maximale des granulats augmente (figure 1.3).

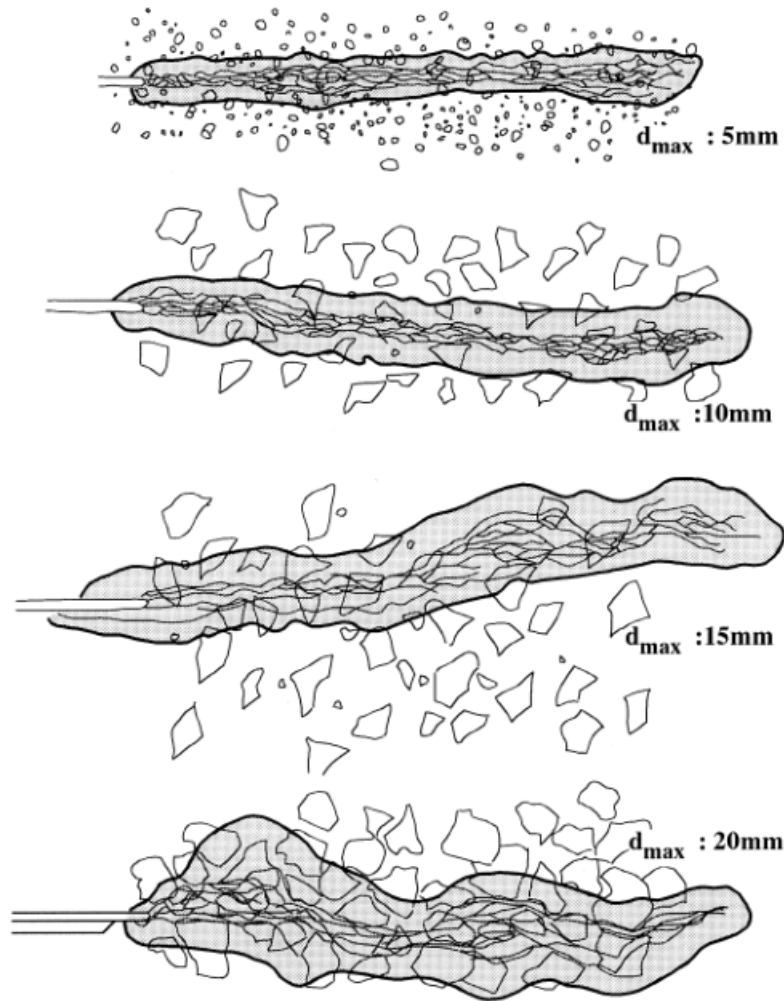


FIGURE 1.3 – Comparaison des zones de micro-fissurations à partir d'images obtenues par rayons-X dans des bétons avec une taille maximale des granulats différente [13].

Ces techniques bien qu'efficaces pour mettre en évidence et caractériser la FPZ ne sont pas systématiquement applicables en réalité car elles ne permettent pas de s'affranchir des contraintes d'une auscultation sur site. En effet les mesures par fibre optique ou par rayons X impliquent d'instrumenter le coeur du béton ce qui n'est pas possible sur les structures déjà existantes. D'autre part une méthode comme

la CIN nécessite des conditions expérimentales particulières et non adaptées à de grandes surfaces d'investigation.

Depuis quelques années, l'émission acoustique a été mise en oeuvre pour la caractérisation de l'endommagement du béton. On présentera par la suite son principe, ses avantages et inconvénients.

### **1.2.3 Comportement du béton sous sollicitation thermique**

La sollicitation thermique du béton modifie sa micro structure. En dessous de  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la première transformation concerne l'évaporation de l'eau libre. Les mouvements de l'eau dans le béton (libre ou liée) provoquent plusieurs phénomènes de retrait de dessiccation, de gonflement et de fissuration qui conduisent à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats. Cette zone tend à se dégrader et à se fissurer. La teneur en eau est importante dans les phénomènes de transformation des hydrates et de transferts hydriques [14]. Deux des conséquences importantes de ces changements sont l'augmentation de la porosité et la baisse de la résistance mécanique et du module d'élasticité. Pour exemple, la porosité peut augmenter de 20% à  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [15, 16]. L'augmentation de la température provoque une dilatation du béton (jusqu'à 2 % pour  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [17]. La différence des coefficients de dilatation entre le mortier et les granulats conduit à l'apparition de micro-fissurations (figure 1.4). Le module d'élasticité en compression chute de 10 % ou 30 % selon les auteurs en fonction de la température [18].

## **1.3 Suivi de la fissuration par corrélation d'image**

### **1.3.1 Principe de la méthode**

L'objectif de la technique de corrélation d'images numériques est de déterminer la déformation de la surface d'un objet à partir de la déformée d'une partie de la texture aléatoire de son image. Contrairement aux moyens de mesures extensométriques classiques (capteurs de déplacement, jauges de déformation, etc.) qui fournissent plutôt des valeurs moyennées locales, la corrélation d'images donne accès à un champ

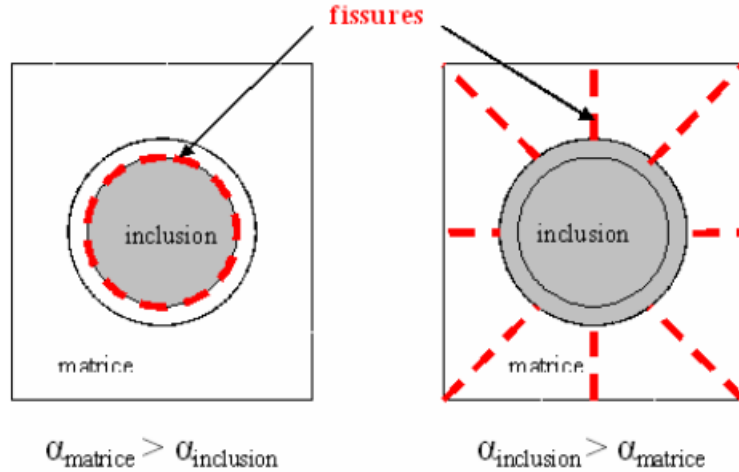


FIGURE 1.4 – Schémas de fissuration dans un milieu matrice-inclusion ([16] et adapté de [19]).  $\alpha$  représente le coefficient de dilatation équivalent dû aux effets de la température.

de valeurs. De plus, il s'agit d'une technique sans contact donc non intrusive vis-à-vis de la mesure de champ qu'on souhaite effectuer.

L'idée de la technique consiste à prendre plusieurs clichés numériques de la surface analysée sur laquelle a été préalablement réalisé un mouchetis avec une texture aléatoire pour un meilleur repérage. Chaque pixel de la photo numérique est ensuite codé (en nombre de bits) en fonction de la luminosité de l'image et de la résolution du capteur. Par exemple, un capteur de résolution 8 bits permet d'avoir  $2^8 = 256$  niveaux de couleur (ou de gris selon le type de capteur) possibles. Chaque photo est donc associée à une matrice donnant pour chaque pixel son niveau de gris ou son niveau de couleur. Si plusieurs images successives sont prises, il est alors possible de procéder à une corrélation croisée des images et donc de déduire des déplacements de pixels d'une image à une autre. Les champs de déformation ainsi que de contrainte se déduisent par application des relations classiques de la MMC (relation déplacement-déformation, loi de comportement). Par ailleurs, si l'image initiale est partitionnée en petites images (ou imagerettes) qu'on appelle également AOI (Area Of Interest c'est-à-dire la zone d'intérêt), la corrélation croisée de ces imagerettes permet d'obtenir les champs de déplacement.

La mesure du degré de similitude en différents points voisins peut se faire grâce à un estimateur qui mesure la somme des écarts quadratiques entre la valeur de pixel

de l'imagette dans la configuration initiale et la valeur de pixel d'une imagette située dans le voisinage de la précédente et prise dans la configuration déformée. La valeur la plus probable du déplacement est celle qui minimise la fonction de corrélation. C'est le critère SSD (Sum of Squared Differences) défini sur la figure 1.5.

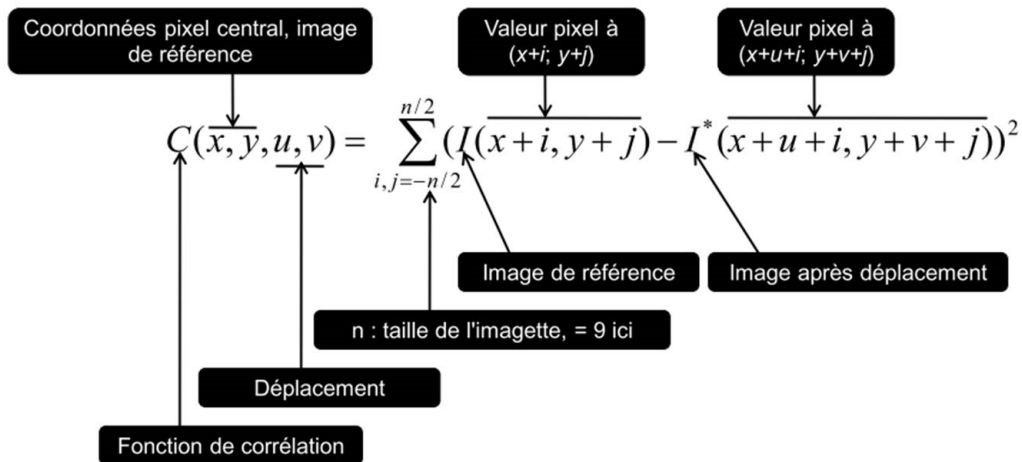


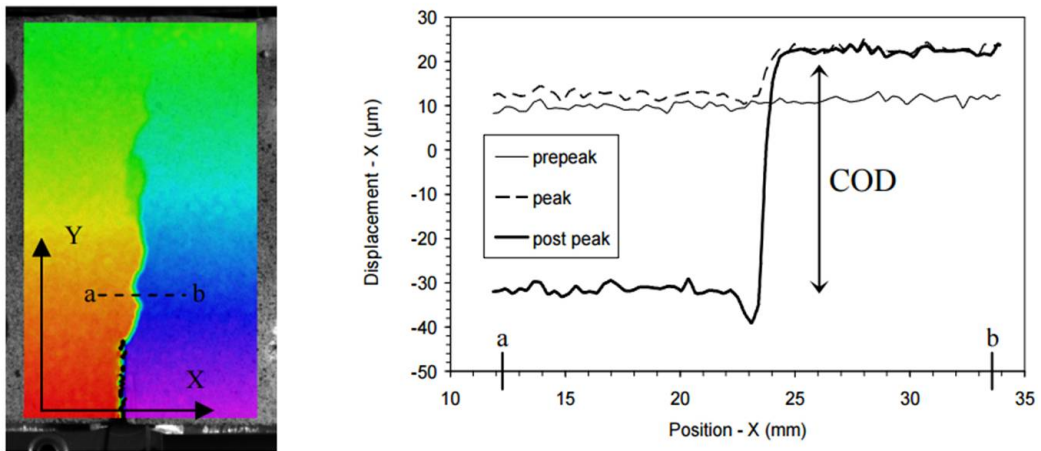
FIGURE 1.5 – Critère SSD de corrélation.

En réalité, les images sont entachées de bruit et la fonction d'intercorrélation ne sera jamais rigoureusement égale à 0. Par ailleurs, d'autres facteurs peuvent nuire à l'acquisition des images : changement des conditions d'éclairage, détérioration du mouchetis, apparition de réflexions si la pièce se déforme, etc.

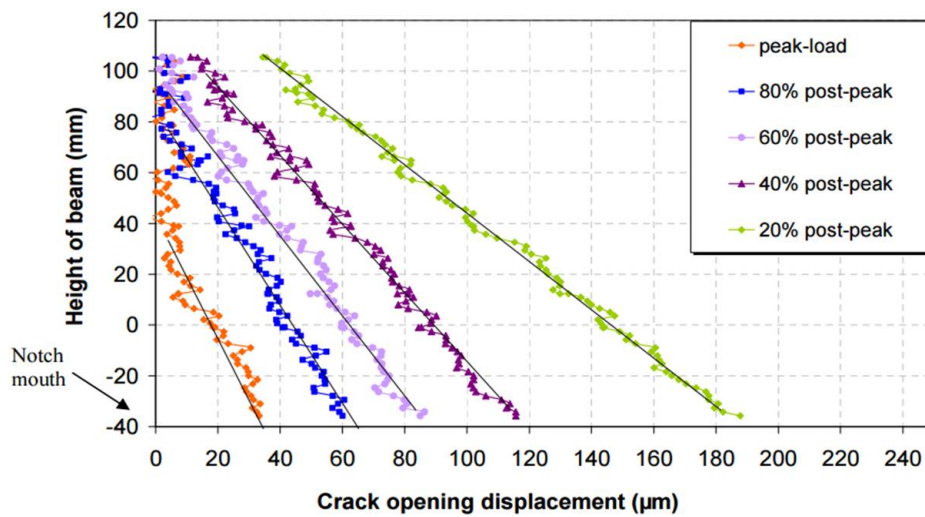
### 1.3.2 Détermination de la hauteur de fissure

Des mesures par video-corrélation sur des poutres en béton ont permis de proposer une méthode de suivi du front de fissure en surface [20]. La procédure consiste à positionner des extensomètres de part et d'autre de la fissure dans le sens de la hauteur de la poutre. Le déplacement horizontal  $Ux$  entre les deux extrémités des extensomètres est calculé (figure 1.6(a)). Les courbes représentant la position selon l'axe principal de la fissure des extensomètres sont tracées en fonction de leur déplacement (ou COD pour « crack opening displacement ») à différentes étapes du chargement de la poutre (figure 1.6(b)). Les régressions linéaires associées sont ensuite tracées à chaque étape du chargement. Seuls les valeurs de COD supérieures à  $6\mu m$  sont considérés comme correspondant à une macrofissure [21]. La position du

front de fissure correspond donc à la position de l'extensomètre le plus haut pour lequel le COD excède les  $6\mu m$ .



(a) Saut de déplacement (COD) lié à l'apparition d'une fissure. Ici la jauge ou l'extensomètre (ab) est positionnée horizontalement.



(b) Hauteur des extensomètres en fonction de leur déplacement à différentes étapes du chargement.

FIGURE 1.6 – Exemple de résultat obtenu par VC sur la propagation d'une fissure dans le béton [20].

## 1.4 L'émission acoustique

Le phénomène de micro fissuration observé lors de la propagation de fissure ou lors de sollicitation thermique du béton font de l'**Emission Acoustique** (EA) une technique particulièrement adaptée aux problématiques posées dans le projet ENDE. Cette section offre un aperçu des possibilités offertes par l'EA pour détecter l'apparition de ces micro-fissurations. Le principe de la technique est présenté afin de mieux comprendre le lien entre les phénomènes décrits dans la section précédente et cette technique d'auscultation. Les domaines d'application de l'EA ainsi que des exemples d'application concrets comme la localisation des micro-fissurations sont également présentés.

### 1.4.1 Définition

La phénomène d'émission acoustique est connu depuis longtemps dans le domaine audible avec ce qu'on appelle « le cri de l'étain » dont l'origine identifiée est le maclage qui est une déformation plastique créée lors du refroidissement de certains matériaux cristallisés. Néanmoins, les premières études scientifiques sur l'EA ont été effectuées dès les années 1950 par Kaiser [22].

Aujourd'hui, l'EA est selon la norme AFNOR NFA 09350 : « un phénomène de libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires résultant des micro-déplacements locaux internes au sein d'un matériau soumis à une sollicitation ». Cette définition considère l'EA comme un phénomène physique. La **CO**nfédération **FR**ançaise pour les **E**ssais **N**on **D**éstructifs (COFREND) complète quant à elle cette définition de l'EA comme « une méthode d'essai non destructive, globale et rapide bien adaptée aux applications de vérification de l'intégrité des grandes structures en minimisant fortement les temps d'intervention et les arrêts coûteux. C'est une méthode passive qui permet de suivre la progression de l'endommagement en temps réel d'un composant en fonctionnement. » [23]. Dans cette deuxième définition il n'est plus seulement question d'un phénomène mais d'une « méthode passive et globale ». Cette deuxième définition fait aussi état de la capacité de la technique à « suivre la progression de l'endommagement en temps réel » classant ainsi l'EA

parmi les techniques SHM [24]. 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.

L'exemple le plus connu d'émission acoustique bien qu'il ne soit pas présenté comme tel est le séisme. En effet, un tremblement de terre est la manifestation en surface d'une libération d'énergie soudaine qui intervient souvent au niveau des zones de contact entre les plaques tectoniques. Cette libération d'énergie survient soit lorsque les capacités de résistance locale des matériaux en jeu sont dépassées soit lorsque deux plaques glissent l'une contre l'autre. A une échelle plus petite, ce phénomène s'observe dans une grande variété de matériaux : les roches [25], le bois [26], les composites de type fibre/matrice [27, 28] ou le béton [29].

#### **1.4.2 Particularité de la technique**

La particularité de l'EA comme technique est son caractère strictement passif. En effet, contrairement aux autres techniques SHM souvent basées sur des protocoles de contrôle non destructif (CND) adaptés à la surveillance en continu, l'EA n'enregistre que des données émises par le matériau lorsque sa structure est modifiée. Autrement dit, l'absence de mesure a un sens puisqu'elle peut signifier que la structure n'est pas altérée. Cette passivité de l'EA peut aussi être vue comme un défaut puisqu'elle ne permet pas de rendre compte de l'évolution de la structure avant la mise en place de l'instrumentation.

#### **1.4.3 Origines et sources de l'émission acoustique**

La libération d'énergie telle que décrite précédemment est toujours le résultat d'un dépassement de contraintes limites locales dans le matériau. On peut recenser au moins 3 grands types de sollicitations menant à l'augmentation l'état de contrainte et donc au déclenchement du phénomène d'EA. La première est la sollicitation purement mécanique (Ex : un effort appliqué au matériau en vue de le fissurer [30, 31, 32]). C'est la méthode de sollicitation la plus communément employée dans les laboratoires avec des essais de flexion, traction, compression, cisaillement,



etc... La sollicitation thermique peut aussi engendrer une augmentation importante de contraintes du fait de dilatations locales [33]. Enfin, le troisième type de sollicitation est chimique. La corrosion des aciers dans le béton armé est connue comme source d'EA [34]. Les différents types de retrait observés dans le béton génèrent également des contraintes internes [35, 29, 36].

Les sources d'EA sont les hétérogénéités présentes dans les matériaux. Ces hétérogénéités constituent des points de concentration de contraintes et donc des points faibles. Parmi les sources d'EA identifiées on recense deux grandes catégories : les singularités (inclusions [37], granulats, fibres [28], etc...) et les interfaces (lèvres de fissures, mortier/granulats, matrice/fibre, etc...).

#### 1.4.4 Domaines d'application de l'EA

La première application industrielle connue de l'EA date de 1964 sur les carter de la fusée Polaris. Dans les années 1990, les applications industrielles de l'EA s'étaient déjà étendues dans des domaines très divers : pour le contrôle de réfrigérants à eau de mer, pour le contrôle d'étanchéité de reacteurs petrochimiques ou encore pour le contrôle de réfractaires pour fours industriels [38]. Toujours dans l'industrie, l'EA a montré son efficacité dans la détection et la localisation de sources acoustiques sur des moteurs diesel [39]. Dans l'aérospatiale, l'EA a montré ses aptitudes à la détection des phénomènes de fissuration et de délamination [40, 41]. Dans la surveillance de réservoirs de stockage, l'EA permet de différencier à partir d'une analyse fréquentielle des salves, les événements provenant de la corrosion de ceux issus de fuites [42, 38]. Dans le domaine du nucléaire, des essais sur un container de déchets radioactifs en béton ont été menés afin de suivre l'état d'endommagement de la structure sous contraintes thermiques [43] (figure 1.16). Parmi les trois techniques employées (corrélation d'image, émission acoustique et mesure de la vitesse de propagation des ondes acoustiques), l'EA a permis de détecter l'instant d'initiation de la fissure avant les deux autres techniques.

Outre l'application de la technique dans l'industrie, le caractère passif de l'EA la rend particulièrement adaptée aux structures de grandes dimensions puisqu'elle ne nécessite pas de présence humaine permanente. Son efficacité a d'ores et déjà

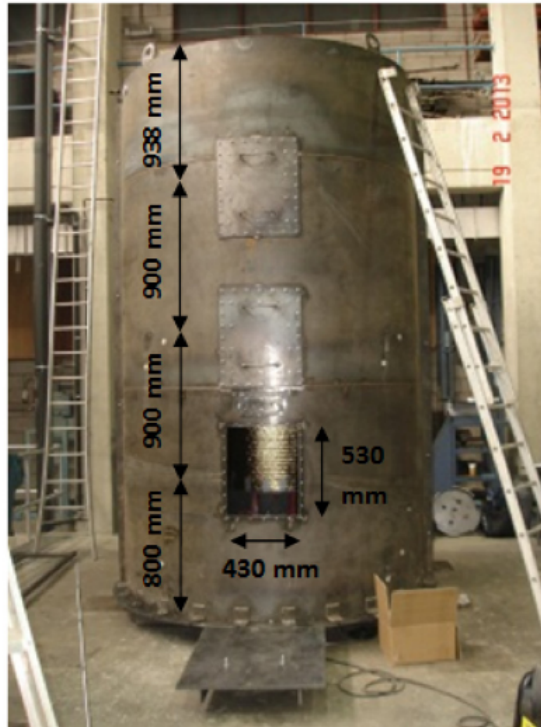


FIGURE 1.7 – Containers de déchets radioactifs en béton [43].

été prouvée dans le génie civil pour la localisation de l'endommagement sur des ponts [44], sur le suivi de la fissuration d'édifices en maçonnerie [45]. Sur des cuves de réacteur nucléaires, l'EA a été employée comme complément à une technique de localisation de l'endommagement basée sur des accéléromètres. Les résultats ont montré que l'utilisation de l'EA comme complément permettait une amélioration de la localisation des sources d'endommagement [46] (figure 1.8).

L'EA est par ailleurs utilisée comme technique d'investigation pour décrire le comportement des roches [47], du béton en fluage [29] ou l'endommagement des matériaux composites [28, 27].

### 1.4.5 Principe de la mesure par émission acoustiques

#### Chaîne d'acquisition

La mesure par EA se fait à l'aide d'un réseau de capteurs piézoélectriques placés sur la surface du matériau. La figure 1.9 représente une chaîne d'acquisition d'émis-

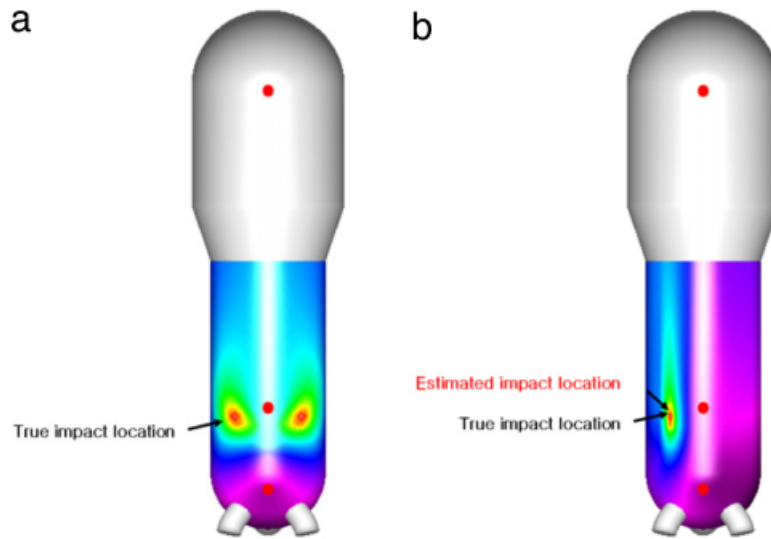


FIGURE 1.8 – Estimation de la position de la source en utilisant uniquement les accéléromètres (a) et en tenant compte des résultats d'EA (b).

sion acoustique classique. Elle se compose d'au moins un capteur piézoélectrique qui transforme l'onde mécanique en tension électrique. Par la suite nous désignerons par « salve » ou « signal » la partie de l'onde mécanique reçue par un capteur à une position donnée. La salve captée est amplifiée puis pré-traité sur la carte d'acquisition. Le pré-traitement consiste en l'application de filtres passe haut et/ou passe bas et à la numérisation (ou échantillonnage) de la salve.

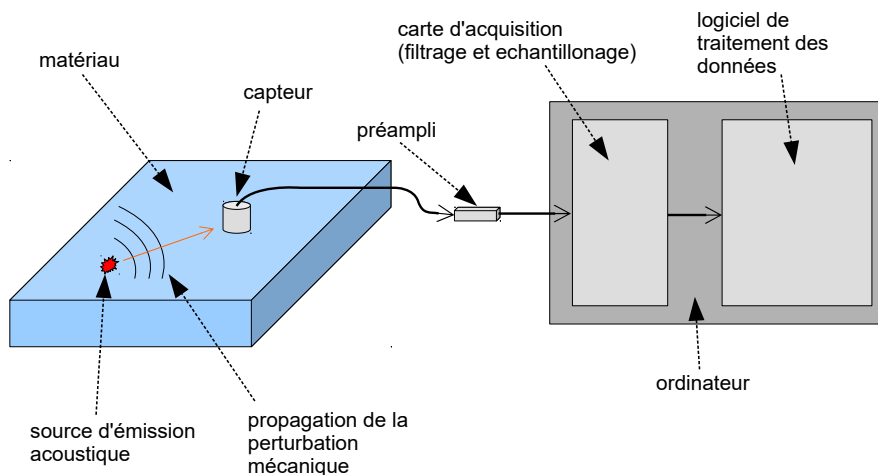


FIGURE 1.9 – Schéma d'une chaîne d'acquisition d'émission acoustique classique.

La relative complexité de l'acquisition des données en émission acoustique tient

essentiellement au fait qu'il s'agit d'une technique passive. Ce caractère passif implique que les instants auxquels les ondes parviennent aux capteurs ainsi que leurs durées sont préalablement inconnus. Pour pallier ces problèmes il est nécessaire de mettre en place une procédure d'acquisition automatique. Cette automatisation repose sur un jeu de 4 paramètres qui permettent notamment de détecter le début et la fin des salves d'EA. Ces paramètres sont le **seuil d'acquisition**, le « **peak definition time** » (**PDT**), le « **hit definition time** » (**HDT**) et le « **hit lockout time** » (**HLT**) (figure 1.12). L'établissement du jeu de paramètres d'acquisition que nous allons détailler ici repose sur l'hypothèse d'une activité acoustique qualifiée de « discrète » ce qui signifie que les activités acoustiques de deux sources consécutives ne se recouvrent pas dans le temps.

## Le signal d'EA

La figure 1.10 représente un signal type d'émission acoustique dans le béton. Ce signal se caractérise par un temps de montée très court par rapport à la durée de la décroissance en amplitude appelée aussi CODA. Ces caractéristiques sont directement liées à la structure du matériau dans laquelle l'onde se propage. En effet, lorsque la longueur d'onde des ondes est de l'ordre de grandeur des constituants du milieu, le signal d'EA est le fruit de la diffusion multiple de l'énergie sur les hétérogénéités du milieu de propagation [48]. Il faut ajouter à cela le fait qu'il existe plusieurs modes de propagation d'ondes dans un solide : les ondes longitudinales (L), transversales (T) et les ondes de surface (ou de « Rayleigh »). Les ondes de plaques (ou de Lamb) sont aussi étudiées en EA [49]. Elles apparaissent dans les structures en forme de plaque lorsque leur épaisseur est de l'ordre de grandeur des longueurs d'ondes. Chacun de ces modes possède sa propre vitesse de propagation. Cette propriété peut notamment être utilisée pour améliorer la localisation. En revanche lorsque les distances de propagations sont faibles, de l'ordre de quelques longueurs d'ondes, il n'est pas possible de distinguer ces modes.

Outre les conditions de propagation des ondes dans les solides, la chaîne d'acquisition joue également un rôle important dans l'analyse du signal. Ce rôle est symbolisé

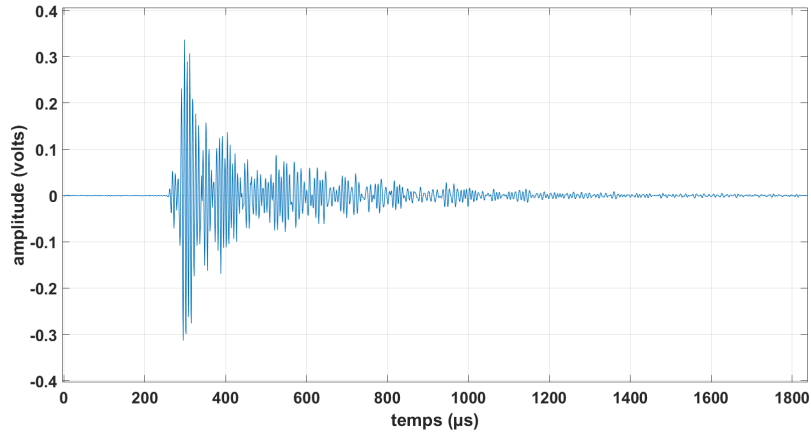


FIGURE 1.10 – Signal type d’émission acoustique.

par l’équation 1.1 [50] :

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

Cette équation représente le signal enregistré  $Z(t)$  comme la convolution du signal source  $S(t)$  émis dans le matériau avec :  $G(t)$  la fonction de Green (ou réponse impulsionnelle du matériau),  $R(t)$  la fonction propre du capteur et enfin  $H(t)$  la fonction propre de la chaîne d’acquisition (filtrage, échantillonnage, etc...). Ainsi, deux chaînes d’acquisition munies de capteurs différents avec un paramétrage différent ne fourniront pas nécessairement les mêmes informations.

## Les descripteurs des salves d’EA

Le traitement des données d’EA passe par l’analyse de paramètres aussi appelés « descripteurs » des salves enregistrées. La figure 1.11 présente quelques uns des descripteurs les plus couramment utilisés dans la littérature.

Parmi ces descripteurs on retrouve :

- L’amplitude maximale  $\mathbf{A}$  exprimée en  $dB$  à partir de l’équation 1.2.

$$A_{dB} = 20 \log \left( \frac{\max(s_{volts})}{1\mu V} \right) \quad (1.2)$$

avec  $\max(s_{volts})$  l’amplitude maximale du signal en volts.

- L’**énergie** de la salve calculée à partir de l’équation 1.3.

$$e = \int_{t_i}^{t_f} s^2(t) dt \quad (1.3)$$

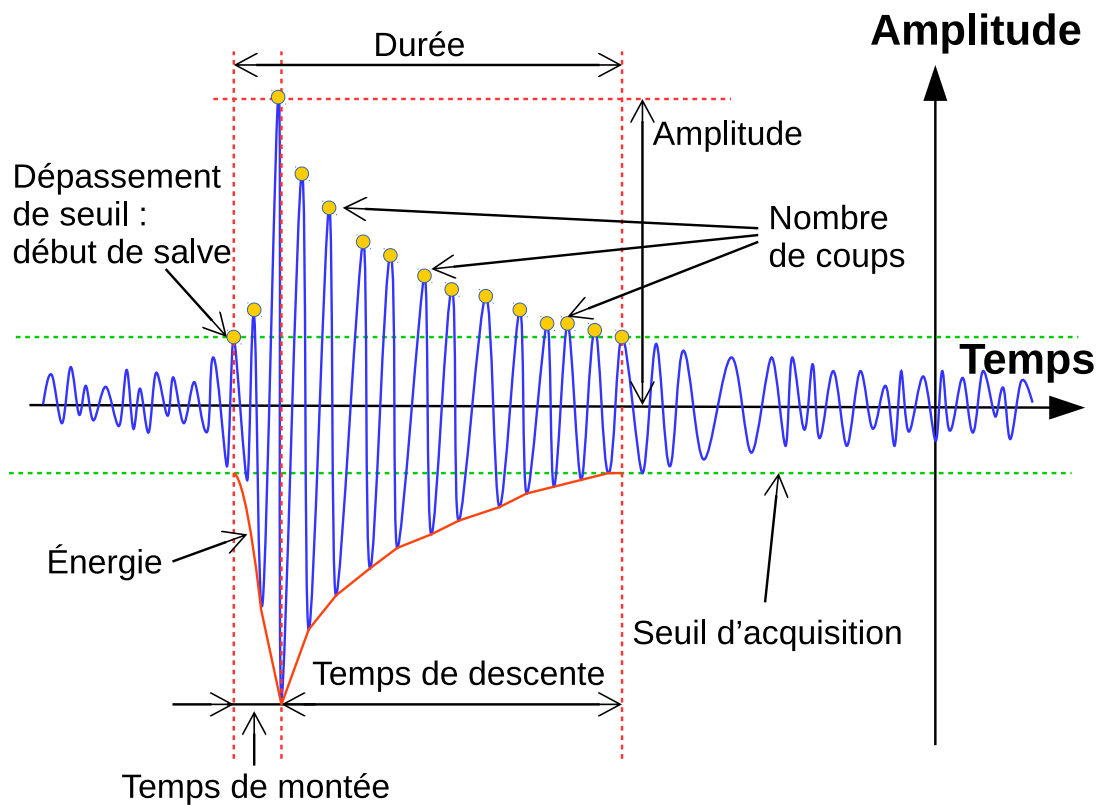


FIGURE 1.11 – Exemples de descripteurs temporels des signaux d’EA.

avec  $e$  l’énergie du signal  $s$ ,  $t_i$  le temps correspondant au début du signal et  $t_f$  le temps correspondant à la fin du signal.

- Le **nombre de coups** qui correspond au nombre de dépassements de seuil de l’amplitude enregistrée.
- La **durée** représente le temps au cours duquel l’amplitude enregistrée est supérieure au seuil d’acquisition.
- Le **temps de montée** et le **temps de descente** qui correspondent respectivement à la durée entre le début de la salve et l’instant du maximum d’amplitude et à la durée entre l’instant du maximum d’amplitude et la fin de la salve.

Les autres types de descripteurs employés sont de type fréquentiels. Ainsi les fréquences associées au pics principaux de la transformée de Fourier (TF) d’un signal constituent de nouveaux descripteurs apportant une information supplémentaire sur les signaux.

D'autres techniques d'analyse spectrale prennent en compte le caractère non-stationnaire des signaux d'EA. C'est le cas des analyses par STFT (« short time fourier transform »), par CWT (« continuous wavelet transform ») ou par THH (« transformée d'Hilbert-Huang »). Ces techniques sont principalement appliquées dans les matériaux composites pour l'identification des sources d'EA. Elles nécessitent en outre l'utilisation de capteurs large bande sensibles à une plage de fréquence plus étendue.

### Les paramètres d'acquisition des salves

L'acquisition des signaux d'EA se base sur un jeu de paramètres permettant de déterminer le début et la fin des salves dans le but d'enregistrer uniquement l'information pertinente au cours d'un essai. Les paramètres essentiels à l'acquisition des signaux sont présentés sur la figure 1.12 et sont les suivants :

- Le **seuil d'acquisition** est le déclencheur de l'enregistrement d'une salve, il est exprimé en  $dB$ . Lorsque l'amplitude enregistrée dépasse le seuil, cela correspond à l'arrivée 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** définit la période sur laquelle le maximum de la salve est déterminé. Ce paramètre est utile lorsque les signaux enregistrés présentent différents pics d'amplitudes. Ces pics peuvent être liés aux différents types d'ondes (longitudinales, transversales ou de surface) ou encore à des réflexions.
- Le **HDT** définit la fin de la salve. Ce paramètre définit la fin de la salve comme l'instant à partir duquel l'amplitude mesurée par le capteur redevient inférieure au seuil d'acquisition pendant la durée du **HDT**. Autrement dit lorsque l'amplitude enregistrée redevient inférieure au seuil d'acquisition pendant assez longtemps, on estime que la salve est terminée.

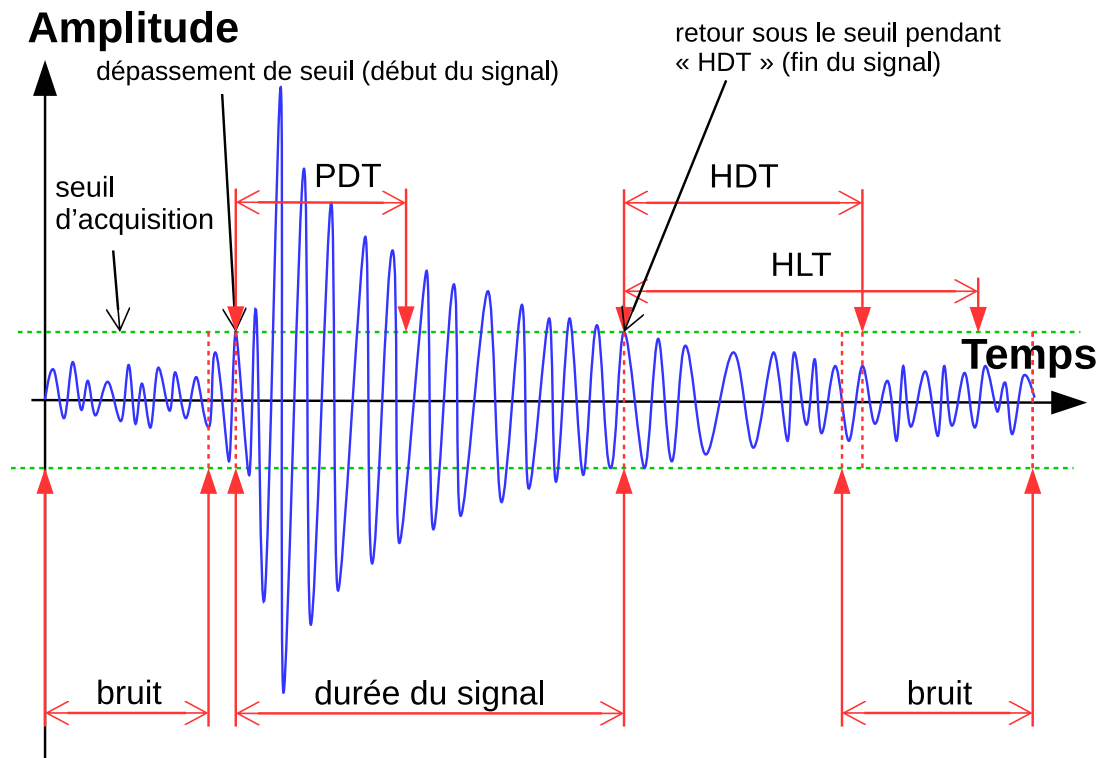


FIGURE 1.12 – Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs.

- Enfin le dernier paramètre important lors de l'acquisition est le **HLT**. Il s'agit du temps d'occultation qui s'applique à la suite de chaque salve. 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.

### Formation des événements 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 1.13 illustre la méthodologie employée pour former ces événements. 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 4 (dans le cas de la 3D) 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.

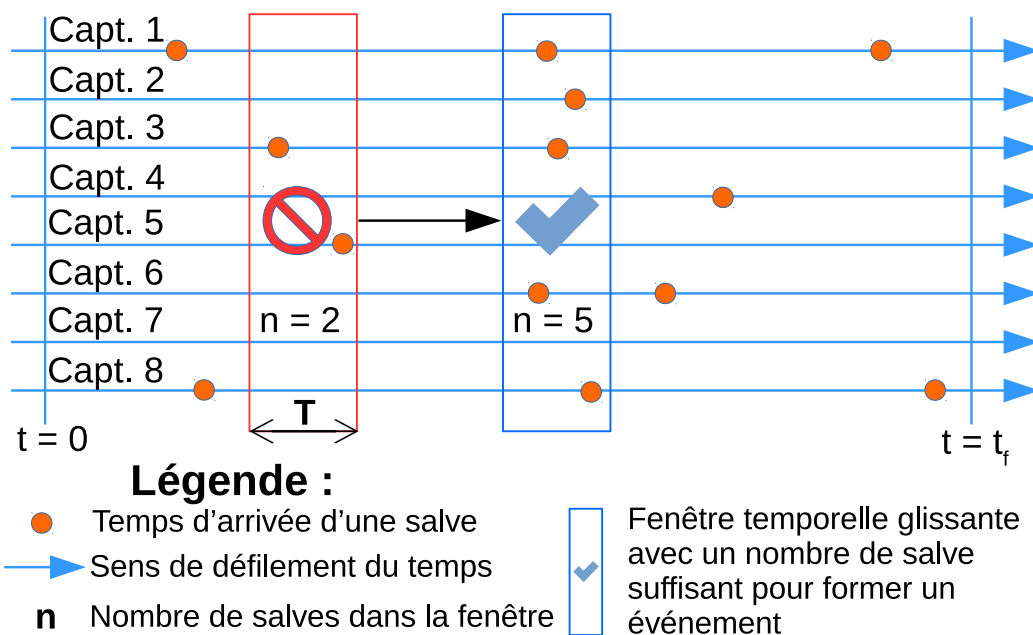


FIGURE 1.13 – Méthode de formation des événements en fonction de la chronologie d'arrivée des salves sur chacun des capteurs.

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 1.14 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  $d_{1-3}/v$  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.

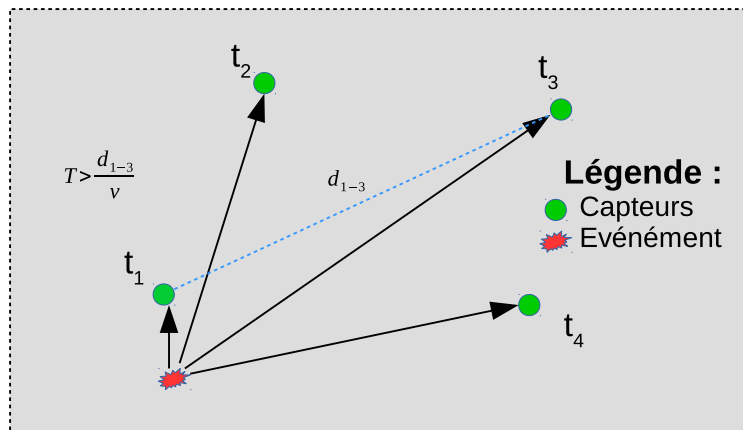


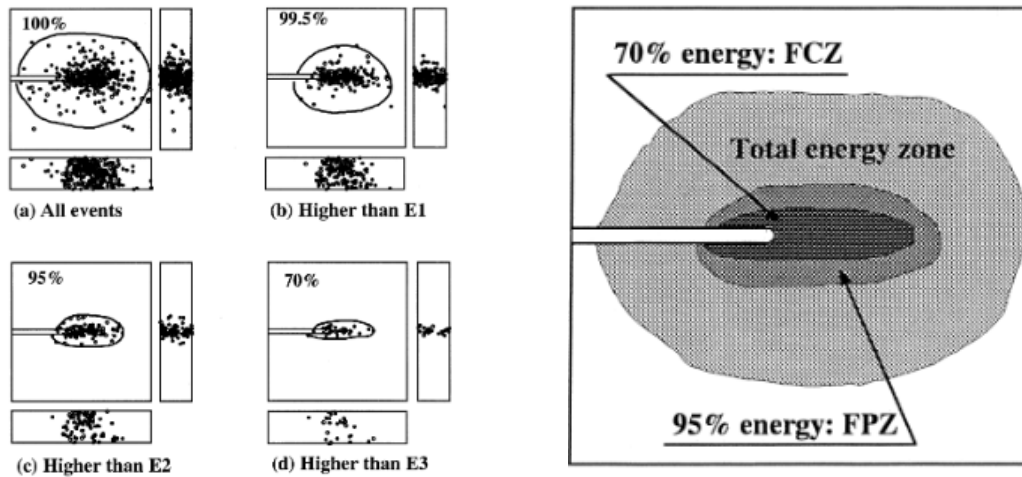
FIGURE 1.14 – Détermination de la fenêtre temporelle de formation des événements « T » .

## 1.5 Localisation des événements acoustique

La localisation des événements acoustiques constitue un enjeu majeur de l'EA. Elle permet de répondre à une problématique centrale de la SHM qui est la localisation des zones d'endommagement.

Les cartes de localisation fournissent des informations importantes sur l'état d'endommagement du béton. La comparaison entre les mesures de la taille de FPZ

par rayons X et les cartes d'activité acoustique a permis de mettre en évidence la concentration d'énergie libérée à proximité de la fissure (figure 1.15) [13]. Ainsi 70% de l'énergie localisée par EA se trouve au centre de la zone d'activité acoustique totale.



(a) Cartes d'événements acoustiques représentant différentes proportions d'énergies.

(b) Carte schématique de la concentration d'énergie dans la FPZ.

FIGURE 1.15 – Répartition de l'énergie acoustique reçue au cours d'un essai de fissuration [13].

A partir d'un filtrage des salves d'EA sur leurs amplitudes, des essais sur des poutres en béton précontraint non entaillées ont montrés la capacité de l'EA à identifier les zones de fissuration [51] (figure 1.16). Cependant les cartes d'endommagement filtrées ne rendent plus compte de la majeure partie de l'activité acoustique enregistrée. Il n'est alors plus possible d'identifier la zone réellement endommagée dans le matériau.

L'étendue des domaines d'applications de l'EA a mené au développement de nombreuses stratégies de localisation [52]. Ces différentes stratégies s'adaptent à la nature des structures étudiées et aux conditions d'acquisition. Ainsi la localisation des sources dans les plaques se fait en utilisant les propriétés des ondes de Lamb (ou de plaques) [53]. Cette approche ne peut pas être reproduite sur d'autres matériaux comme le béton où d'autres méthodes doivent être employées [54, 55].

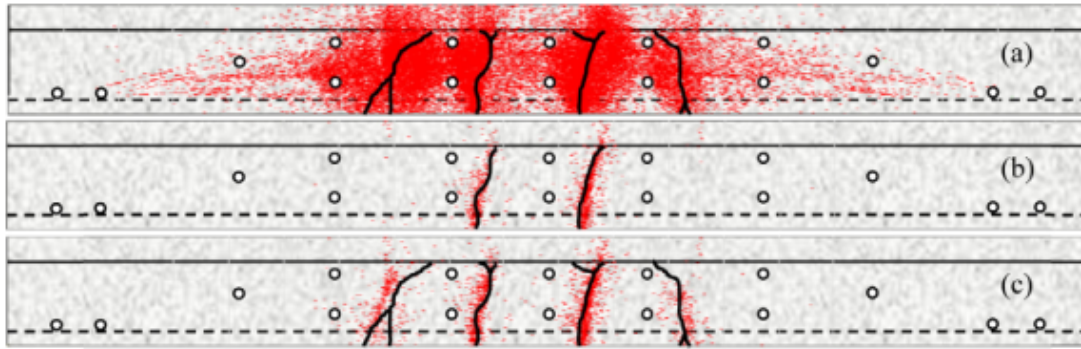


FIGURE 1.16 – Événements acoustiques (points rouges) et trajet visuel des fissures (traits noirs) sur une poutre en béton pré-contraint. Tous les événements enregistrés (a), les événements filtrés au début de la fissuration (b) et les événements filtrés à la fin de l’essai (c) [51].

Toutes les méthodes ne pourront pas être présentées ici. Néanmoins 2 approches distinctes du problème de localisation sont brièvement abordées : la localisation triaxiale et la localisation zonale. Enfin, la résolution du problème de localisation par triangulation par méthode itérative est détaillée.

### 1.5.1 Les méthodes de localisation

Il existe un très grand nombre de modèles de localisation avec leurs variantes détaillées dans la littérature [56, 57]. La figure 1.17 offre un aperçu de ces différentes méthodes.

#### Localisation triaxiale

La méthode triaxiale est proche du tenseur des moments à cette différence qu’elle ne nécessite qu’un seul capteur sensible aux vibrations dans 3 directions orthogonales. La direction de la source par rapport au capteur est obtenue à partir de l’analyse des composantes  $A_x$ ,  $A_y$  et  $A_z$  de l’amplitude mesurée. Contrairement à ce que le schéma indique la méthode triaxiale dépend aussi de la détermination du début des salves puisque la distance entre la source et le capteur est déterminée par la différence de temps d’arrivée des ondes L et T selon l’équation 1.4. Cette caractéristique implique une distance de propagation suffisante afin de pouvoir identifier les

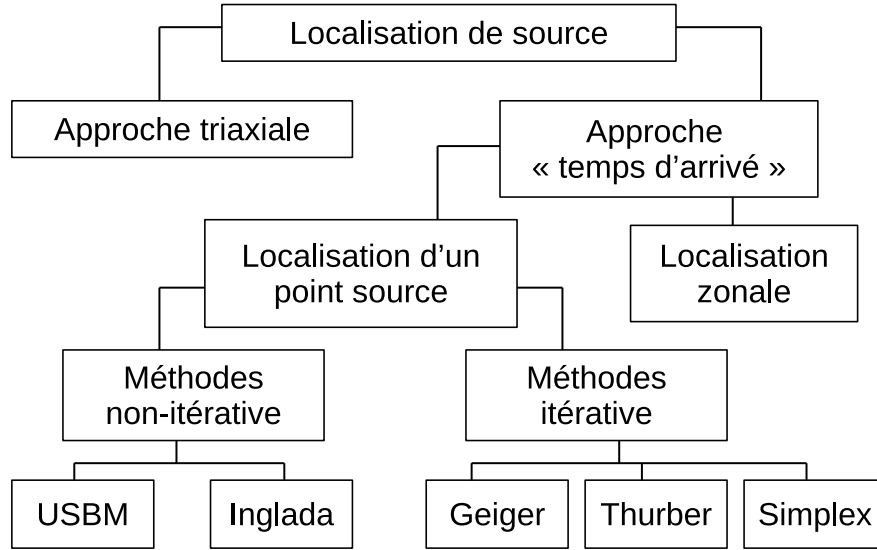


FIGURE 1.17 – Classification des méthodes de localisation des événements acoustiques [56].

différents modes de propagation sur les signaux. Par ailleurs ces contraintes rendent difficilement applicable cette technique dans un milieu de taille réduite.

$$d = \frac{v_L v_T}{v_L - v_T} (t_T - t_L) \quad (1.4)$$

où :

- $d$  est la distance entre la source et le capteur,
- $v_L$  et  $v_T$  sont respectivement la vitesse de propagation des ondes L et T.

### Localisation zonale

La méthode zonale consiste à déterminer une zone d'origine des ondes en fonction de leur ordre d'arrivée sur les capteurs. La figure 1.18 illustre ce principe. Un ensemble de capteurs symbolisés par des points noirs est disposé sur une structure. Les trois capteurs ayant enregistré une salve sont numérotés dans l'ordre d'arrivée des ondes de 1 à 3. Dans cet exemple, le capteur 1 est le premier à enregistrer une onde, une première zone (bleue) relativement large est dessinée autour de ce capteur. La seconde zone (jaune) est définie à l'intérieur de la première. Elle regroupe tous les points les plus proches du capteur 2. Enfin la dernière zone (rouge) est encore définie comme un sous-ensemble de la zone précédente. Cette fois ci elle regroupe les

points les plus proches du capteur 3. La précision de cette technique dépend essentiellement de la taille et du raffinement du réseau de capteur disposé sur une structure. Le problème devient encore plus complexe si la localisation doit être effectuée en 3D.

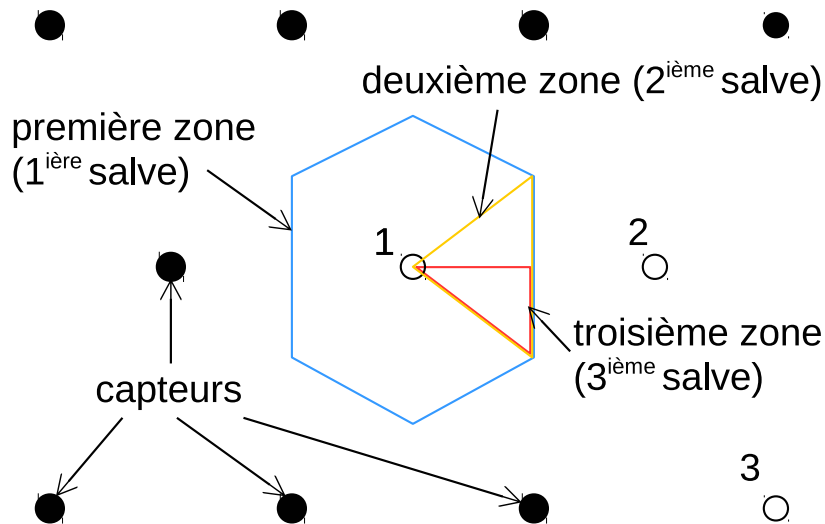


FIGURE 1.18 – Principe de la localisation zonale [56].

### Localisation analytique et itérative

La localisation des sources d'EA par méthode analytique ou itérative revient à résoudre un problème de triangulation. La section suivante détaille ce problème mathématique à résoudre ainsi que deux aspects fondamentaux de la localisation qui sont la détermination du début des salves et l'algorithme de minimisation du problème de localisation. Seule la méthode itérative sera discutée. Le fonctionnement de l'algorithme des Simplex [58] déjà utilisé en EA est détaillé. L'algorithme de localisation génétique susceptible de palier les défauts des Simplex est aussi présenté.

## 1.5.2 Principe de la localisation par triangulation

### Hypothèses de départ

La localisation par triangulation repose sur 4 hypothèses principales :

- la source est ponctuelle,
- les sources sont temporellement séparées les unes des autres de telle sorte qu'il n'y ait pas d'interférence entre l'activité acoustique de deux sources successives,
- la vitesse de propagation des ondes est constante au cours d'un essai,
- le matériau est homogène et isotrope.

Il résulte de ces hypothèses d'une part qu'un événement acoustique correspond à une seule source dont la position recherchée est un point de coordonnées  $p(x_s, y_s, z_s)$  et d'autre part que l'onde mesurée sur un capteur s'est propagée en ligne droite depuis la source vers le capteur et à une vitesse constante.

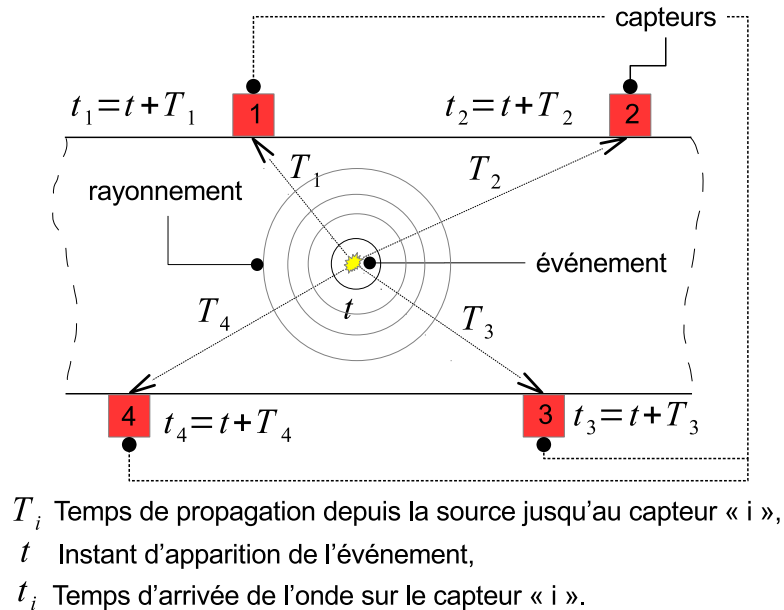


FIGURE 1.19 – Principe de la propagation des ondes selon les hypothèses de la localisation.

Le schéma de la figure 1.19 illustre le principe de la mesure par émission acoustique en prenant en considération les hypothèses ci-dessus. A un instant  $t$  une microfissuration apparaît dans le matériau et génère une onde qui se propage dans toutes

les directions. L'onde arrive sur le capteur «  $i$  » à l'instant  $t_i = T_i + t$ , ( $T_i$  étant le temps de propagation de l'onde entre la source et le capteur «  $i$  »).

## Triangulation

La triangulation consiste à retrouver la position de la source à partir des temps d'arrivée des ondes sur les capteurs. Elle a été appliquée en EA pour la première fois en 1976 [59]. Dans la pratique ce ne sont pas les temps d'arrivée mais les retards  $\Delta t_i^j$  des ondes sur les capteurs sont qui utilisés :

$$\Delta t_i^j = t_i^j - t_k^j. \quad (1.5)$$

avec :

- $j$  le  $j^{ieme}$  capteur ayant reçu un signal,
- $i$  l'indice du  $j^{ieme}$  capteur ayant reçu un signal,
- $k$  l'indice du premier capteur ayant reçu un signal. Ce capteur sert de référence pour les retards, le premier retard  $\Delta t_k^1$  vaut donc 0.

Un événement est toujours formé à partir de plusieurs signaux issus de capteurs différents. Ces capteurs ne sont pas toujours les mêmes et l'ordre chronologique de réception des signaux sur les capteurs dépend de la position de la source dans le matériau. C'est pourquoi il est nécessaire de faire apparaître un jeu de 2 indices. L'un ( $i$ ) correspond à l'indice du capteur, l'autre ( $j$ ) correspond à l'ordre d'arrivée des signaux sur les capteurs. Le tableau 1.1 donne deux exemples d'indiciage des  $\Delta t$  pour deux événements. Le premier événement est formé de 8 signaux et le second de 5. Ces deux exemples font apparaître une relation entre les indices  $j$  et  $i$  propre à chaque événement.

	ordre d'arrivée ( $j$ )	1	2	3	4	5	6	7	8
événement 1	indice des capteurs ( $i$ )	2 (k)	4	5	1	7	6	3	8
	$\Delta t_i^j$	$\Delta t_2^1$	$\Delta t_4^2$	$\Delta t_5^3$	$\Delta t_1^4$	$\Delta t_7^5$	$\Delta t_6^6$	$\Delta t_3^7$	$\Delta t_8^8$
événement 2	indice des capteurs ( $i$ )	4 (k)	5	3	2	1	/	/	/
	$\Delta t_i^j$	$\Delta t_4^1$	$\Delta t_5^2$	$\Delta t_3^3$	$\Delta t_2^4$	$\Delta t_1^5$	/	/	/

TABLE 1.1 – Exemple d'indiciage des  $\Delta t$  pour deux événements.



L'équation 1.6 présente l'expression du temps d'arrivée d'un signal  $t_i$  sur un capteur. Ici l'indice  $j$  n'apparaît pas car la position du capteur  $i$  ne dépend pas des événements.

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2}}{v} + t, \quad (1.6)$$

avec :

- $x_s, y_s$  et  $z_s$  les coordonnées recherchées de la source,
- $x_i, y_i$  et  $z_i$  les coordonnées connues du capteur  $i$ ,
- $v$  la vitesse de propagation des ondes.

Selon l'équation 1.6 chaque événement est caractérisé par un ensemble de retards  $\Delta t$ . C'est à partir de cette équation que les deux méthodes de localisation par triangulation (analytique et itérative) divergent. Les méthodes analytiques visent à résoudre le système formé des équations 1.6 associées à chaque capteur. D'un autre côté les méthodes itératives résolvent le problème de minimisation décrit ci-après.

La figure 1.20 illustre les temps d'arrivée et donc les retards différents obtenus à partir de deux positions sources. Le but des méthodes itératives est de trouver la position de l'événement artificiel pour laquelle les retards mesurés et calculés sont identiques. La flèche en pointillé rouge symbolise le travail de déplacement à effectuer sur la position de l'événement artificiel afin de faire converger les retards vers les mêmes valeurs.

La comparaison entre les deux jeux de retards se fait à l'aide de l'équation 1.7. Cette équation représente l'erreur qui quantifie la différence entre les retards liés à deux événements. Avec cette équation, le problème de localisation se réduit à un problème de minimisation du critère d'erreur. Lorsque le critère d'erreur est égal à 0, la position réelle de l'événement est définie comme celle de l'événement artificiel. La résolution du problème de minimisation se fait à l'aide d'un algorithme de minimisation.

$$\xi = \frac{\sum_{j=1}^n (\Delta t_i^{j(mesure)} - \Delta t_i^{j(artificiel)})^2}{n}. \quad (1.7)$$

avec :

- $n$  le nombre de capteurs ayant reçu un signal,

Pour comparer les résultats obtenus en fonction du critère de détermination

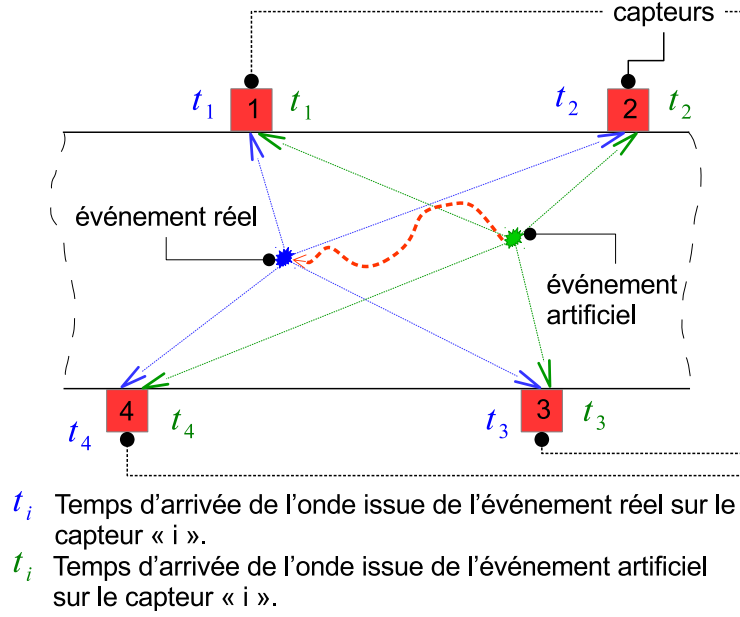


FIGURE 1.20 – Comparaison des retards mesurés pour un événement réel et des retards calculés pour un événement artificiel.

du début des salves ou de l'algorithme de minimisation, l'erreur de l'équation 1.7 homogène à des  $[s^2]$  est convertie en  $[m]$  à l'aide de l'équation suivante :

$$\xi_m = v\sqrt{\xi}. \quad (1.8)$$

avec  $v$  la vitesse de propagation des ondes.

Il faut noter ici que le critère d'erreur de l'équation 1.8 ne correspond pas à l'erreur totale sur la position d'un événement. Il s'agit de l'erreur numérique liée à la résolution du problème de minimisation. L'erreur totale dépend elle de  $\xi_m$ , de l'erreur sur la détermination du temps d'arrivée de la salve, de l'erreur sur la vitesse de propagation des ondes mais aussi du modèle de propagation qui ne prend pas en compte les phénomènes de dispersion des ondes.

### 1.5.3 Critère de détermination du début des salves

Comme nous l'avons vu dans la section 1.5.2, le calcul des retards se base sur les temps d'arrivées des ondes sur les capteurs. Ainsi la définition du début d'une salve est une étape capitale dans le processus de localisation [60, 61]. Le début d'une salve correspond à une transition entre deux phases dans le signal qu'un cap-

teur 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 résultant d'un événement. La figure 1.21 représente le début d'un signal d'EA selon la définition qui vient d'être faite.

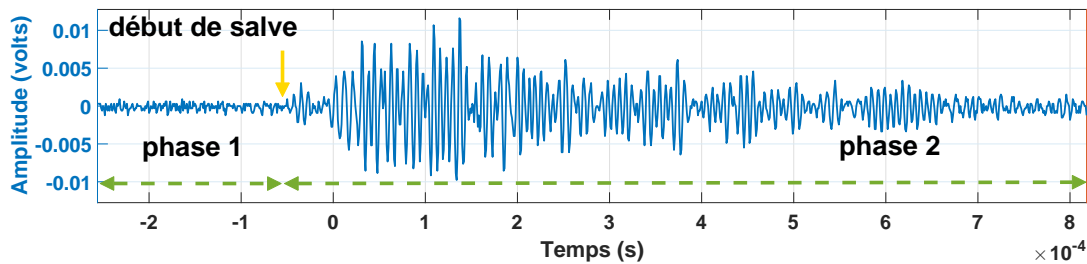


FIGURE 1.21 – Illustration du début de salve d'EA comme la transition entre l'enregistrement de bruit (phase 1) et l'enregistrement du bruit et du signal (phase 2).

Différentes méthodes de détermination du début des salves ont été proposées dans la littérature. L'inter-corrélation, le dépassement de seuil fixe, les transformées en ondelettes, le critère d'Akaike, etc... [62, 63, 64]. Les paragraphes suivants détaillent le fonctionnement du seuil fixe qui est une méthode largement utilisée et du critère d'Akaike qui ressort de la littérature comme étant le plus efficace.

## Seuil fixe

Le seuil fixe est le critère le plus communément employé dans la littérature. Le début d'une salve est défini au moment auquel l'amplitude reçue par le capteur dépasse un seuil préalablement établi. La figure 1.22 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 SF. Un seuil trop haut peut induire des retards dans les temps d'arrivée. 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 car elle ne répond pas à la définition donnée au début de cette sous-section.

Des mesures de vitesse de propagation d'ondes à partir des temps de vol ont été

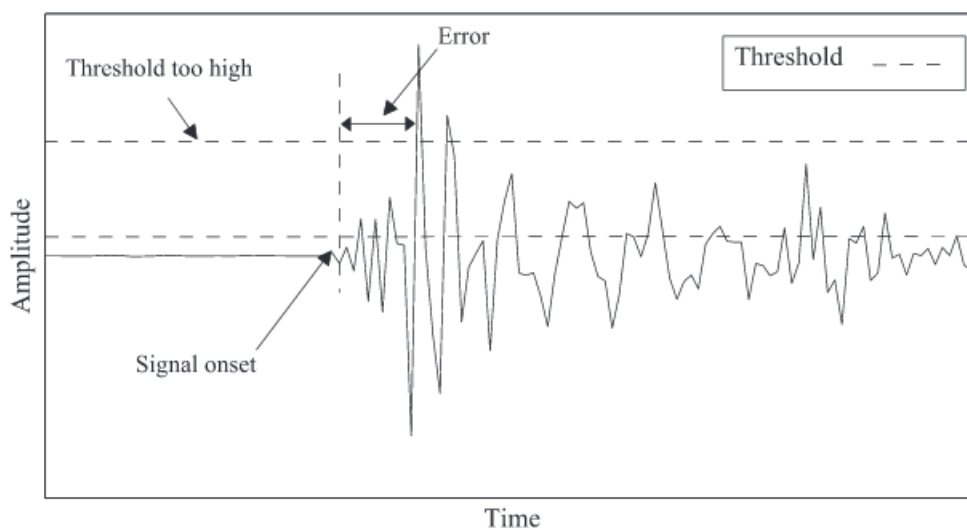


FIGURE 1.22 – Représentation schématique des erreurs potentielles liées à l'utilisation du seuil fixe [60].

menés sur des édifices en maçonnerie [65]. Les résultats de ces tests ont montré que la vitesse calculée était fortement dépendante de la valeur du seuil fixe utilisé pour déterminer le début des salves (figure 1.23).

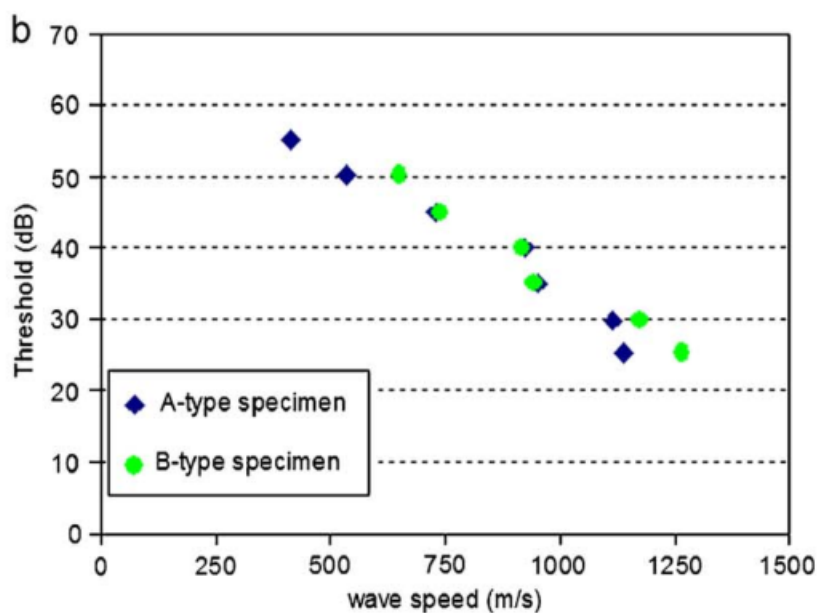


FIGURE 1.23 – Vitesse de propagation des ondes calculée (abscisse) en fonction de la valeur du seuil utilisée (ordonnée) sur deux types de maçonnerie [65].

## Critère d'Akaike

La fonction Akaike est un outil qui permet d'évaluer les variations d'état dans les signaux. De par sa forme (eq. 1.9), cette fonction est particulièrement adaptée au problème tel qu'il est posé plus haut. En effet, elle permet de comparer en chaque point du signal la variance de l'amplitude passée à la variance de l'amplitude à venir. La fonction Akaike passe par un minimum lorsqu'elle est calculée à un point de variation brutale de variance dans le signal (figure 1.24). Ce minimum correspond au début de la salve. La méthode de détermination du début de salve basée sur la fonction Akaike est appelée critère d'Akaike ou « AIC ».

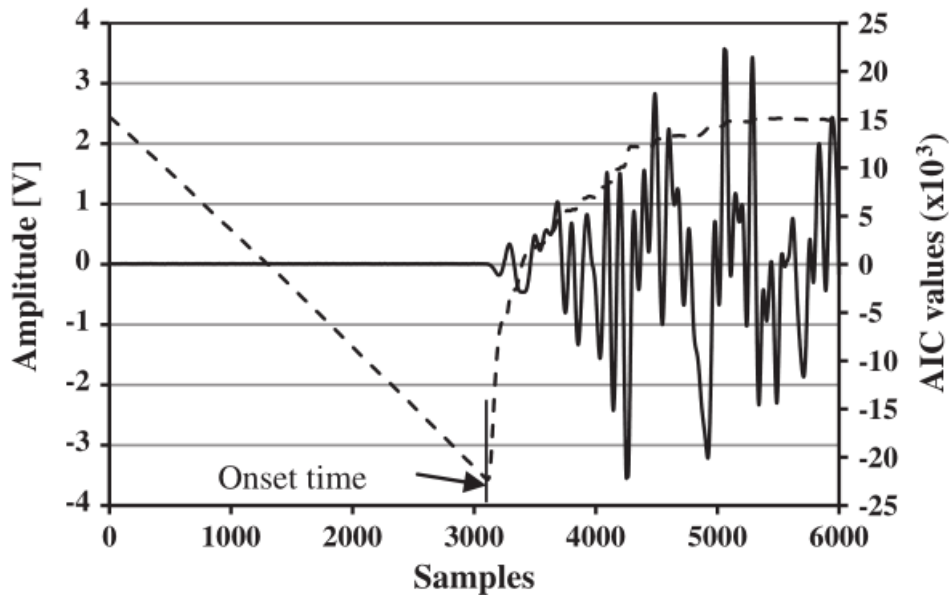


FIGURE 1.24 – Exemple d'application du critère d'Akaike [63].

$$AIC_k = k \cdot \log\{var(X[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{var(X[k, N])\} \quad (1.9)$$

avec :

- $k$  l'indice du point auquel est évaluée la fonction,
- $var(X[i, j])$  la variance du signal  $X$  entre les points  $i$  et  $j$  inclus,
- $N$  le nombre total de points sur lequel est effectuée l'opération.

## 1.5.4 Résolution du problème de minimisation

Outre la précision sur la mesure des temps d'arrivée, l'autre aspect de la localisation susceptible d'influencer le résultat est l'algorithme de minimisation [66]. Ce problème mathématique représenté par l'équation 1.7 ne peut être résolu analytiquement. La recherche de la solution passe donc par l'utilisation d'algorithmes de minimisation.

### Algorithme des simplex

L'algorithme des simplex (ou algorithme de Nelder-Mead) a été utilisé pour la première fois en EA dans les années 80 [67]. L'avantage principal de cet algorithme est sa rapidité de calcul. L'algorithme évalue la valeur de la fonction erreur ( $\xi$ ) aux sommets d'une figure appelée simplex (un segment en 1D, un triangle en 2D, une pyramide en 3D...). La figure 1.25 illustre ce mécanisme de déplacement en 2D. Dans le cas présenté ici le premier simplex est représenté par le triangle dont les sommets sont  $x_1(1)$ ,  $x_1(2)$  et  $x_1(3)$ . L'erreur  $\xi$  est calculée pour chacun de ces sommets. La position associée à l'erreur la plus forte est rejetée. ( $x_1(2)$  dans cet exemple). Un nouveau sommet est défini en « r » par réflexion du point  $x_1(2)$  sur « m ». La comparaison des erreurs  $\xi(r)$ ,  $\xi(x_1(1))$ ,  $\xi(x_1(2))$  et  $\xi(x_1(3))$  permet de choisir si le simplex initial doit être étendu au points « s », contracté à l'extérieur au point « c », contracté à l'intérieur au point « cc » ou conservé comme tel. Le second simplex (b) est un exemple de résultat d'expansion du premier simplex. Les nouveaux sommets de ce second simplex sont  $x_2(1)$ ,  $x_2(2)$  et  $x_2(3)$ . Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que l'erreur calculée en chacun des sommets des simplex successifs atteignent une erreur minimum limite. Cette propriété permet à l'algorithme de faire progresser le simplex dans l'espace jusqu'au minimum local le plus proche (figure 1.26).

En revanche l'algorithme nécessite la définition d'une position initiale qui peut influencer le résultat. En effet la méthode des simplex permet de converger de proche en proche vers le minimum de la fonction le plus proche de la position initiale. Ainsi une position initiale proche d'un minimum local ne permet pas de trouver avec certitude le minimum global de la fonction.

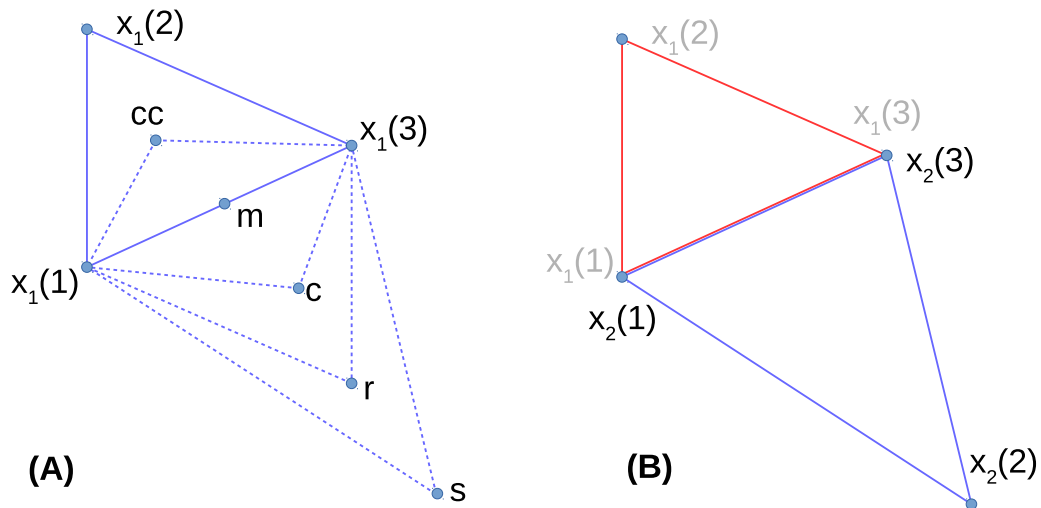


FIGURE 1.25 – Exemple de deux simplexes consécutifs en 2D.

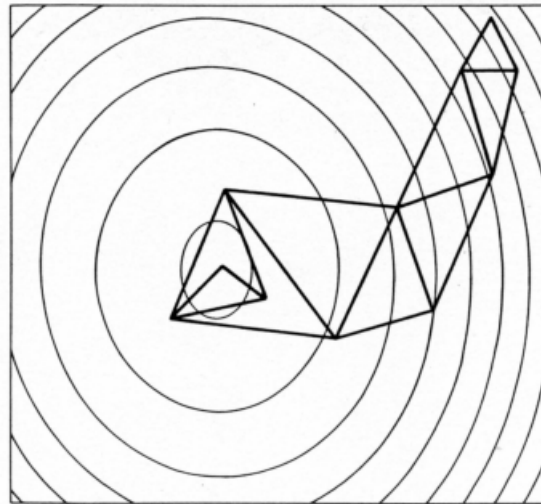


FIGURE 1.26 – Un exemple de déplacement de simplexe dans l'espace sur courbe en contours représentant la fonction à minimiser [68].

### Algorithme génétique

## 1.6 Identification des mécanismes et des sources d'EA

La littérature sur l'identification des événements acoustiques se divise en deux catégories. Il y a d'une part l'identification des mécanismes de rupture, c'est à dire les micro-fissures de mode I (traction) et les micro-fissures en mode II (cisaillement) [69, 70, 71, 72] et d'autre part l'identification des sources d'EA (rupture de

fibre, délaminage, etc...) [73, 27, 28, 74]. Il faut noter que ces deux approches dépendent du matériau étudié. En effet l'identification des modes de ruptures se fait essentiellement dans le béton. L'identification des sources d'EA se fait dans les matériaux composites de type fibres/matrice. Dans les deux cas, l'identification se base sur une analyse paramétrique des signaux. Les différents paramètres aussi appelés « descripteurs » sont présentés ci-après.

### 1.6.1 Analyse paramétrique classique

Dans le béton, l'analyse paramétrique dite « classique » prend en compte un nombre réduit de paramètres. Deux techniques visent à identifier le mode de rupture des microfissurations dans le béton [71]. La première permet de distinguer les microfissures de mode I (traction) de celles en mode II (cisaillement) à partir de deux paramètres déterminés empiriquement (figure 1.27) :

- la fréquence moyenne **AF** (pour « **A**verage **F**requency »). Il s'agit du rapport entre le nombre de coups d'une salve et sa durée.
- la valeur **RA** qui représente le rapport entre le temps de montée du signal (ou « **R**ise time ») et le maximum d'**A**mplitude.

Les résultats obtenus montrent un écart relativement important entre ce qui est attendu et la mesure. En effet on observe une distribution non homogène des individus dans le plans de projection mais elle ne permet pas de faire la distinction entre deux classes qui correspondraient aux modes I ou II.

Une des raisons qui peut expliquer ces résultats est le choix des descripteurs. Le temps de montée et l'amplitude sont des paramètres fortement dépendants de la distance de propagation en raison du caractère fortement dispersif et atténuant du béton [75, 76]. Ils ne sont donc pas uniquement sensibles aux modes de ruptures mais aussi aux conditions expérimentales

La seconde technique est celle du tenseur des moments. Elle se base sur un développement théorique [77, 78, 79] dont l'objectif est de remonter à l'orientation des microfissurations et leur mode de rupture (figure 1.28(a)). Le seul paramètre utile à extraire d'une salve d'EA est l'amplitude de la première vibration de l'onde P, celle qui suit le début de la salve (figure 1.28(b)). Cette technique nécessite en



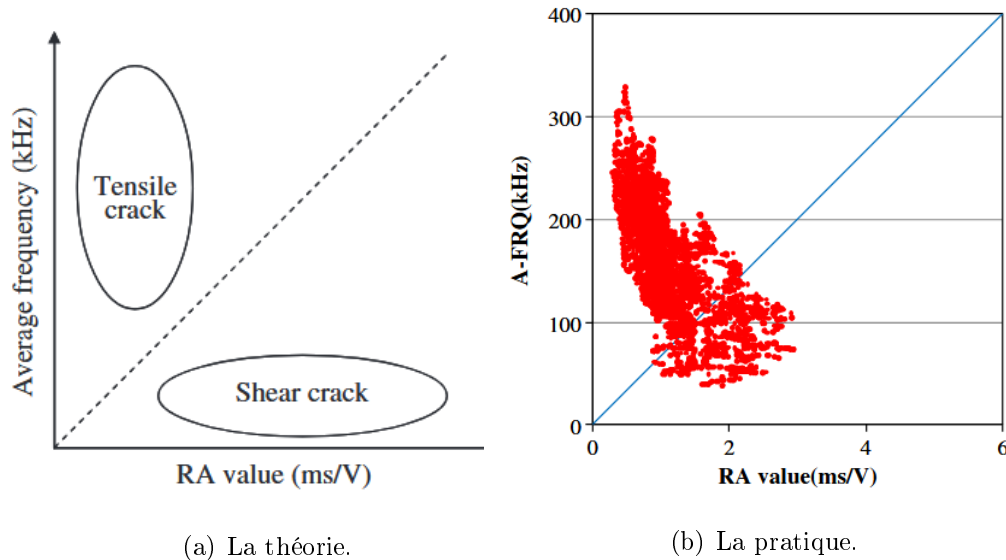
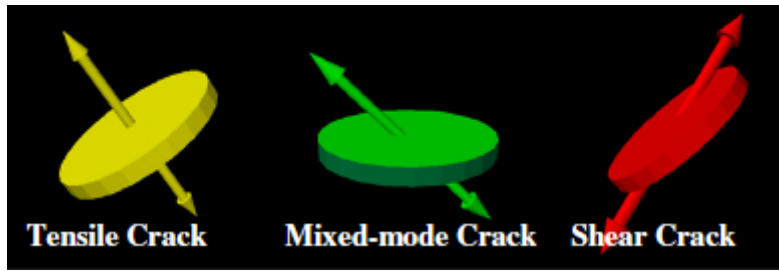


FIGURE 1.27 – Identification des modes de rupture par analyse paramétrique (a). Application sur des événements enregistrés lors d’un essai de flexion 4 points (b) [71].

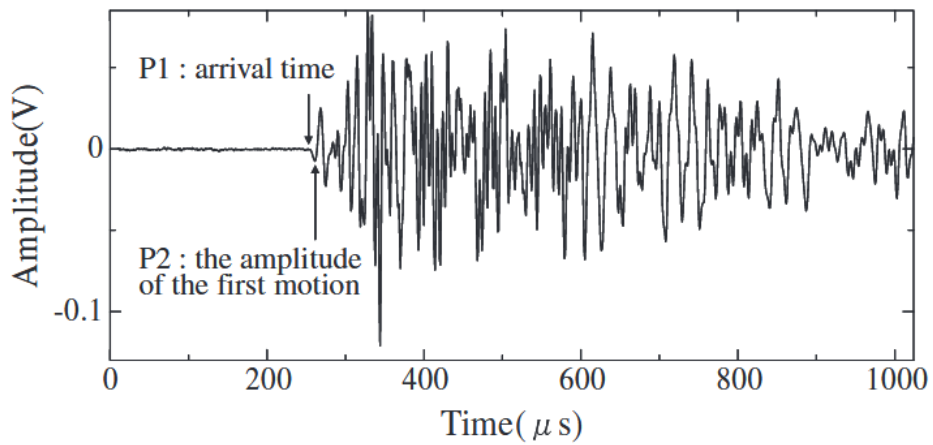
revanche que les événements soient formés d’au moins 6 salves d’EA. Les capteurs concernés doivent être situés sur des faces différentes ce qui limite les applications possibles à des essais de laboratoire et ne permet pas en ce moment une application plus large sur des structures réelles. De plus, les conditions de sélection « filtrage » des signaux sont telles que la proportion d’événements traités lors des essais ne représente qu’une faible proportion du total enregistré [80, 81, 82].

## 1.6.2 Analyse statistique multivariées

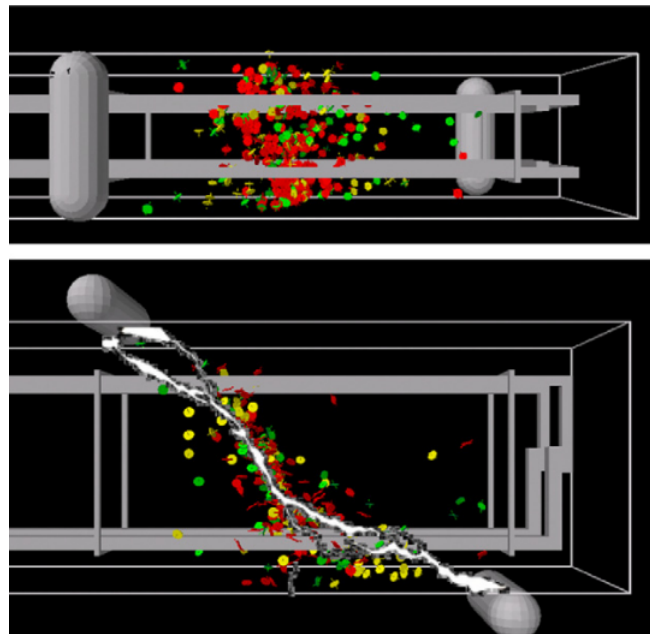
Les analyses statistiques multivariées prennent en compte un plus grand nombre de descripteurs. L’Analyse en Composantes Principales [83] (ACP) couplée à l’algorithme des K-moyennes [84] (ou « K-means ») a été utilisée pour identifier des classes de signaux d’EA [29]. La difficulté dans le cas d’une analyse couplée ACP/K-mean est de poser une étiquette sur les classes obtenues (figure 1.29). L’étiquetage des classes consiste à associer dans notre cas un phénomène physique à une classe : microfissuration matricielle, decohérence interfaciale, etc... De plus, comme pour l’analyse paramétrique vue dans la sous-section précédente, les descripteurs généralement retenus sont fortement impactés par la propagation des signaux dans le béton et ne sont donc pas uniquement dépendant des sources d’EA.



(a) Trois modes de rupture identifiés par la méthode du tenseur des moments. Mode I (jaune), mode mixte (vert) et mode II (rouge) [71].



(b) Extraction de l'amplitude de la première vibration [79].



(c) Résultat d'une analyse par tenseur des moments [71].

FIGURE 1.28 – Principe et résultats du tenseur des moments.

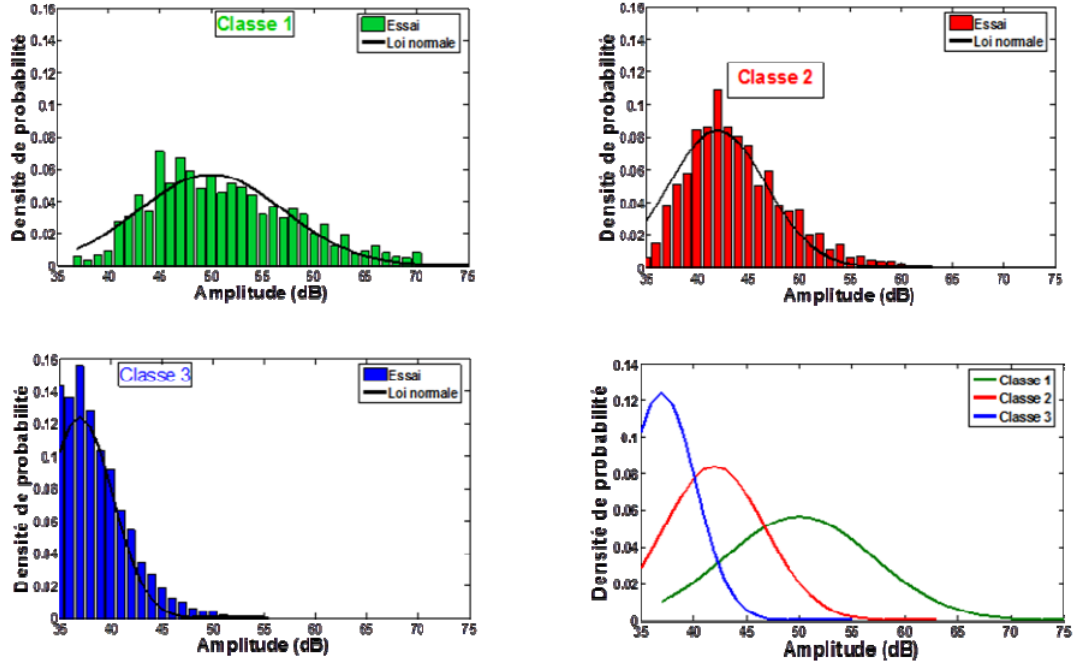


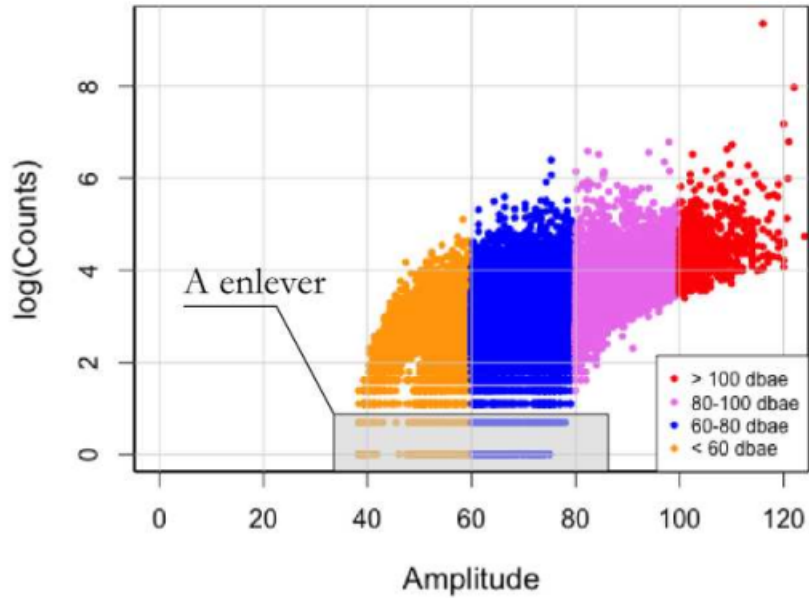
FIGURE 1.29 – Distribution d’amplitude de chacune des classes obtenues par K-mean [29].

## 1.7 Filtrage des données d’EA

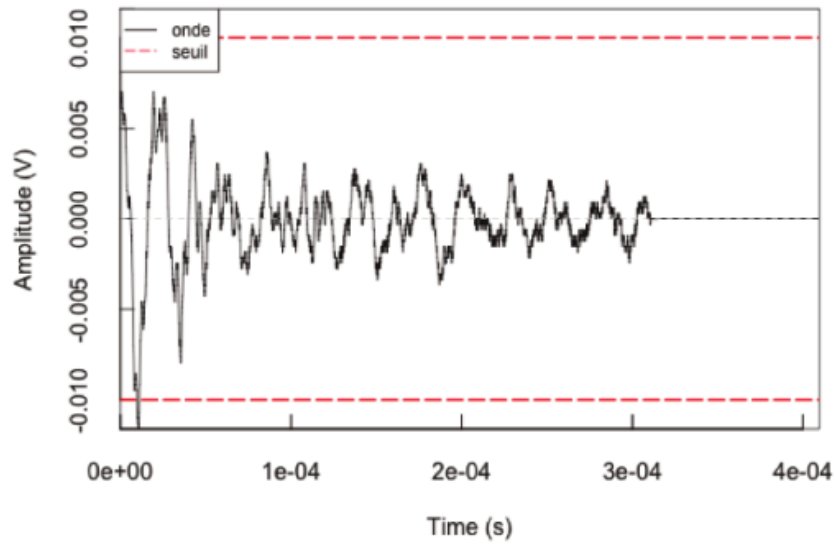
Une étape importante de l’analyse par EA est la constitution d’une base de données propre, c’est à dire ne contenant que des informations liées à de l’endommagement mécanique. Différents critères de filtrages sont proposés dans la littérature.

Un filtre sur le nombre de coups a été appliqué sur les signaux issus d’essais de fissuration sur le bois [85]. Tous les signaux ayant un nombre de coups inférieurs à 10 sont supprimés (figure 1.30). Ce seul filtre a permis de supprimer 20% des signaux enregistrés. Deux autres filtres sur les salves de faible énergie (inférieur à 10 ato-Joules) et sur l’amplitude (inférieures à 50dB) ont été appliqués. Au final ces 3 filtres ont supprimé 80% des données initialement enregistrées.

L’application de tels filtres peut s’avérer nécessaire pour assurer une certaine homogénéité des données d’entrée d’analyses multi-critères. En revanche elle pose la question de la représentativité de ces mêmes analyses et de leurs résultats vis à vis de l’ensemble des données acquises.



(a) Relation entre le nombre de coups et l'amplitude des signaux.



(b) Signal filtré pour un nombre de coups trop faible.

FIGURE 1.30 – Exemple de filtrage des signaux dont le nombre de coups est inférieur à 10 [85].

## 1.8 Conclusion

Dans sa première partie ce chapitre expose brièvement la complexité du phénomène d'endommagement du béton lié au développement de micro-fissurations. L'énergie libérée par ces micro-fissurations sous forme d'ondes mécaniques fait de

l'émission acoustique la technique la plus à même de répondre aux problématiques centrales de cette thèse à savoir : le suivi de l'endommagement et de la fissuration du béton.

Une caractéristique forte de l'EA est sa capacité à localiser les micro-fissurations 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 triangulation pour sa facilité de mise en œuvre. Cette méthode nécessite l'utilisation d'algorithmes de minimisation pour calculer la position des sources. Si différents algorithmes sont déjà présents dans la littérature, l'impact du choix de ces algorithmes sur les cartes d'activité acoustique est peu discuté. D'autre part les données d'entrée des algorithmes sont liées à la définition du début des salves enregistrées par les capteurs. Différentes techniques de détermination du début des salves coexistent dans la littérature. Si la méthode du critère d'Akaike semble être la plus adaptée à cette problématique l'influence de son utilisation sur la représentation des cartes d'activité acoustique n'est pas abordée. Dans le chapitre 3 une analyse comparative de 3 algorithmes de minimisation ainsi que de 2 critères de détermination du début des salves est proposée afin d'évaluer l'impact des stratégies de localisation sur la représentation des cartes d'activité acoustique.

Le filtrage des données d'EA dans la littérature est peu abordé. Même si le seuil de rejet des signaux sur la base du nombre de coups est issu d'une observation sur un grand nombre de signaux, cette technique reste arbitraire. Dans le chapitre 3 ce critère est confronté au problème de localisation. Une alternative plus adaptée à la problématique de détermination du début des salves est proposée.

La littérature fait état du lien entre la position de la fissure et la position des événements les plus énergétiques. La mise en évidence des chemins de fissuration s'effectue par un filtrage des événements associés aux énergies les plus faibles. Cette méthode prive toute représentation réaliste des zones réellement endommagées puisqu'elle filtre une grande partie des données. Le chapitre 4 propose une analyse du suivi de fissuration basée sur l'étude des cartes de densité d'événements acoustiques et d'énergie libérée est présentée. Les données d'EA seront confrontées à celles obtenues par video-corrélation pour tenter d'identifier le front de fissure à partir des distributions d'événements.

Enfin le chapitre 5 constitue une application des techniques éprouvées ou développées dans les chapitres précédents sur deux essais sur site : la soufflerie de l'Onera et une maquette à l'échelle  $1/3$  d'une enceinte de confinement de centrale nucléaire.



# Chapitre 2

## Étude expérimentale

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la thèse vise à répondre à plusieurs objectifs :

- détecter et suivre la propagation d'un endommagement d'origine mécanique ou thermique,
- identifier le passage de l'endommagement diffus à l'initiation de fissure,
- détecter la réouverture ou la refermeture de fissure déjà existante,
- fiabiliser la localisation.

Pour répondre à ces objectifs, 3 types d'essais en laboratoire ont été menés : flexion 3 points, refermeture de fissures existantes via un câble de précontrainte et endommagement thermique. Le but de ce chapitre est de présenter les matériaux ainsi que les différents essais et leur intérêt respectif. Dans une deuxième partie le dispositif expérimental d'EA utilisé est décrit. Le choix des paramètres d'acquisition utilisés est justifié. Enfin les outils de traitements de données développés sont présentés.

### 2.1 Matériaux et méthodes

#### 2.1.1 Composition du béton

L'ensemble des essais présentés ci-dessous ont été réalisés sur des poutres en béton dont la formulation est identique à celle utilisée sur la maquette Vercors [86]. Le



tableau 2.1 présente la composition du béton et la masse volumique de ses constituants. Le rapport ciment/eau est de 0,62. Ces poutres ont été fabriquées par l'équipe du laboratoire des matériaux et durabilité des constructions (LMDC) de Toulouse.

Constituants	Proportion massique ( $kg.m^{-3}$ )
Ciment CEM I 52,5 CE NF	320,0
Eau	197,5
Sable 0 à 4mm	830,0
Graviers fins 4 à 11mm	445,0
Graviers Balloy 8 à 16 mm	550,0

TABLE 2.1 – Composition du béton.

Les caractéristiques mécaniques du béton sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques de 11 *cm* de diamètre et 22 *cm* de hauteur. Ces mesures sont effectuées lors d'essais de compression en accord avec la norme (NF EN 12390-3, 2012). Le module d'Young est calculé à partir de la moyenne de 3 capteurs de déformation. Le protocole de chargement est en accord avec la recommandation RILEM CPC8 (RILEM TC14-CPC, 1972).

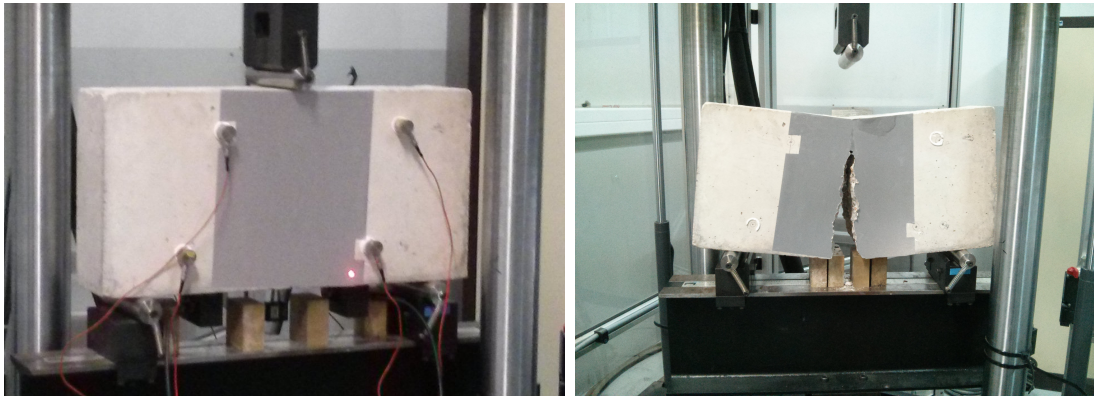
Les caractéristiques physiques sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques de 11 *cm* de diamètre et 5 *cm* de hauteur. La porosité et la densité sont mesurées conformément à la norme NF P18-459, 2010. Le tableau 2.2 regroupe les valeurs mesurées sur deux lots d'éprouvettes.

$R_c$ (Mpa)	$E$ (GPa)	Porosité (%)	Densité $\rho$ ( $kg.m^{-3}$ )
50,4	35,2	14,3	2358
52,5	35,0	14,9	2350

TABLE 2.2 – Propriétés mécaniques et physiques du béton.

## 2.1.2 Essais de flexion 3 points

L'objectif d'un essai de flexion 3 points sur une poutre entaillée est de générer une macro-fissure unique dans le matériau (figure 2.1). Le pilotage de l'essai, c'est à dire la valeur du chargement appliqué à la poutre en fonction du temps dépend de la vitesse d'ouverture de l'entaille. Ce type de pilotage permet une propagation stable de la fissure. Dans la configuration choisie pour nos essais, la fissure se propage sur un axe vertical depuis l'entaille vers le haut de la poutre.



(a) Poutre avant rupture.

(b) Poutre après rupture.

FIGURE 2.1 – Poutre avant et après rupture.

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés sur une presse hydraulique MTS de capacité 100kN (figure 2.2(a)). Au total, 3 poutres nommées p1-1, p1-2 et p1-3 de dimensions  $50 \times 25 \times 12 \text{ cm}^3$  (figure 2.3) ont été testées. Lors d'un essai de flexion 3 points, la poutre est posée sur deux appuis distants de 46 cm. La poutre est entaillée sur la surface inférieure. Cette entaille de 1 cm de haut et de 4 mm de large sur toute la l'épaisseur de la poutre permet de localiser la zone d'initiation de la fissure. Le chargement de l'éprouvette est piloté à partir de la vitesse d'ouverture de l'entaille mesurée par le capteur CMOD (« crack mouth opening displacement ») (figure 2.2(b)).

Outre l'EA qui a été la seule technique présente sur les trois poutres, d'autres mesures ont été effectuées par les partenaires du projet ENDE. Les mesures des partenaires ont été réalisées pendant des paliers de chargement au cours des essais. Les données d'EA recueillies lors de ces paliers ne sont pas présentées dans cette

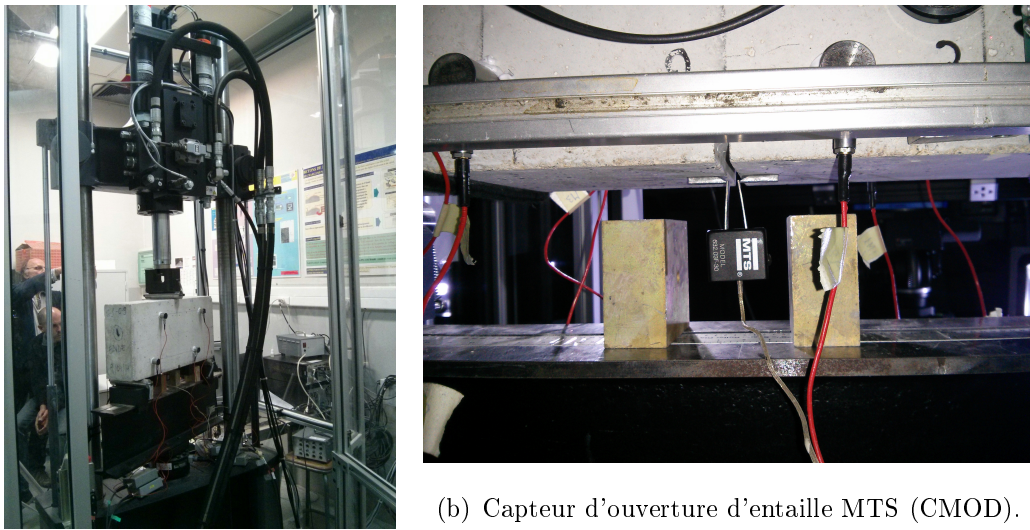


FIGURE 2.2 – Essai de flexion 3 points.

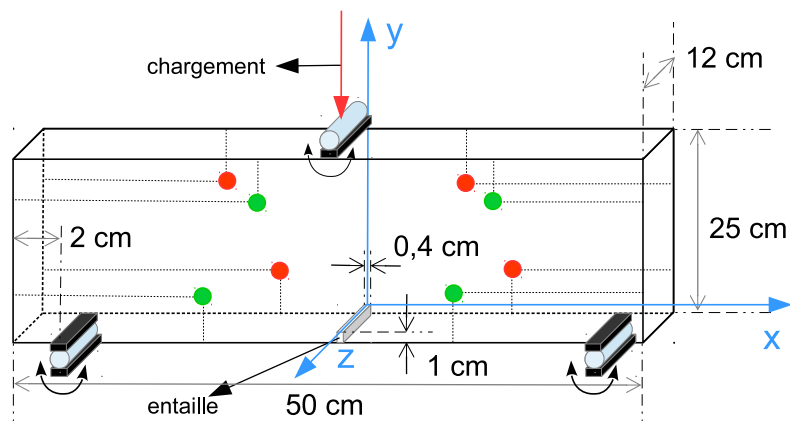


FIGURE 2.3 – Schéma et dimension des poutres p1-x pour la flexion 3 points.

thèse car elles sont bruitées par l'activité des signaux générés par les partenaires.

La position des capteurs d'EA a dû être adaptée à chacun des essais en fonction de l'encombrement généré par les autres systèmes d'acquisition. La figure 2.3 représente un exemple de positions des capteurs d'EA sur les poutres en flexion 3 points. Les capteurs verts sont situés sur la face  $z = 12 \text{ cm}$  et les capteurs oranges sur la face  $z = 0 \text{ cm}$  relativement au repère. La position des capteurs pour chacune des poutres est présentée dans le tableau 2.3.

capteur	p1-1			p1-2			p1-3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	-15,0	4,0	12,0	-8,0	2,5	12,0	-7,8	2,5	12,0
2	-10,0	19,0	12,0	-8,0	13,0	12,0	-8,0	13,0	12,0
3	15,0	19,0	12,0	8,0	16,0	12,0	8,1	16,0	12,0
4	10,0	4,0	12,0	8,0	4,0	12,0	8,0	4,0	12,0
5	15,0	4,0	0,0	8,0	2,5	0,0	9,3	2,3	0,0
6	10,0	19,0	0,0	7,5	11,0	0,0	8,0	15,0	0,0
7	-15,0	19,0	0,0	-9,0	17,5	0,0	-7,0	19,6	0,0
8	-10,0	4,0	0,0	-8,0	5,0	0,0	-4,5	2,3	0,0

TABLE 2.3 – Position des capteurs en *cm* dans les poutres p1-1, p1-2 et p1-3

### 2.1.3 Essais de refermeture de fissure

Les essais présentés ici ont pour objectif de se rapprocher le plus possible des conditions expérimentales sur la maquette Vercors. En effet il existe des zones déjà fissurées sur la maquette. Ces essais ont été imaginés afin d'évaluer la capacité de l'EA et des autres techniques CND à détecter une fissure déjà existante qui sera réouverte puis refermée comme décrit dans la section 5.3.

Les essais de fermeture de fissure ont été réalisés sur 3 poutres nommées p2-1, p2-2 et p2-3. Chacun des 3 essais s'est déroulé en deux phases, la première concerne la propagation de fissure. Cette première phase a été réalisée via des essais de flexions 4 points sur une presse fabriquée au LMDC de capacités 200 *kN* (figure 2.4). La poutre est chargée progressivement jusqu'à l'apparition et la propagation de la fissure depuis l'entaille. La deuxième phase des essais consiste à refermer la fissure à l'aide d'un câble de précontrainte disposé à l'intérieur de la poutre. Dans cette thèse nous ne nous intéressons uniquement à cette deuxième phase.

Les dimensions des poutres utilisées sont de 250x25x12 *cm*<sup>3</sup> (figure 2.5). Ces poutres ont été coulées avec un câble de précontrainte disposé selon l'axe principal de la poutre et à 5 *cm* de sa surface inférieure (en vert sur la figure 2.5). Le chargement du câble de précontrainte est piloté à l'aide d'un verin hydraulique manuel. Le câble est libre à l'intérieur d'une gaine et fixé à chaque extrémité de la



FIGURE 2.4 – Essai de flexion 4 points de refermeture de fissure.

poutre. Lorsque le câble est mis en tension, la poutre est comprimée ce qui entraîne la refermeture de la fissure. Le tableau 2.4 regroupe les positions des capteurs sur ces poutres.

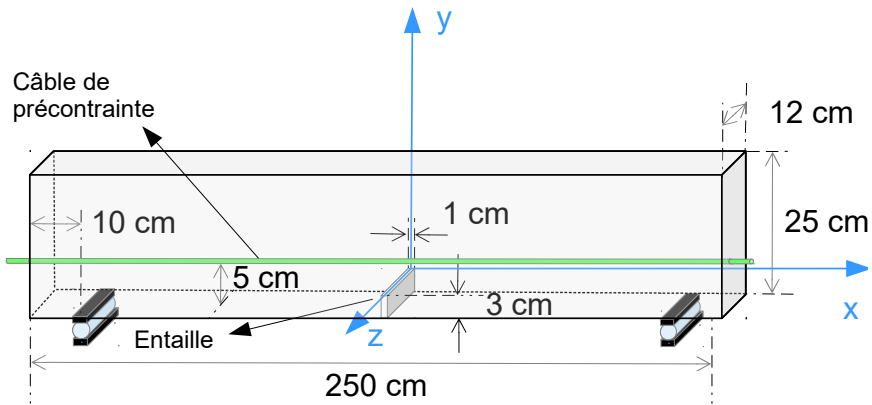


FIGURE 2.5 – Schéma et dimension des poutres p2-x pour la refermeture de fissure.

## 2.1.4 Essais d'endommagement sous sollicitation thermique

L'objectif de cet essai est de montrer la capacité de l'EA à suivre l'endommagement mécanique due à une sollicitation thermique. Pour ce faire deux poutres nommées p1-4 et p1-5 ont été testées. Ces poutres de dimensions  $50 \times 25 \times 12 \text{ cm}^3$

capteur	p2-1			p2-2			p2-3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	-15,0	2,0	12,0	-15,0	5,0	0,0	-10,0	18,0	0,0
2	-10,0	17,0	12,0	-10,0	20,0	0,0	-10,0	5,0	0,0
3	20,0	17,0	12,0	20,0	20,0	0,0	10,0	9,5	0,0
4	15,0	2,0	12,0	15,0	5,0	0,0	10,0	14,0	12,0
5	20,0	2,0	0,0	20,0	5,5	12,0	10,0	1,0	12,0
6	15,0	17,0	0,0	15,0	20,0	12,0	-10,0	9,5	12,0
7	-15,0	17,0	0,0	-15,0	20,5	12,0	/	/	/
8	-10,0	2,0	0,0	-10,0	5,0	12,0	/	/	/

TABLE 2.4 – Position des capteurs en *cm* dans les poutres p2-1, p2-2 et p2-3

(voir figure 2.6) sont équipées d'une résistance électrique chauffante de forme cylindrique de 8 *cm* de long et 1 *cm* de diamètre disposée selon l'axe Oz (figure 2.7). La température est mesurée à l'aide de deux thermocouples dont un placé à côté de la résistance et à 1,5 *cm* de la surface et le deuxième sur la surface de la poutre. Ce deuxième thermocouple permet de contrôler la température extérieure pour éviter tout endommagement des capteurs. Le tableau 2.5 regroupe les positions des capteurs sur ces poutres.

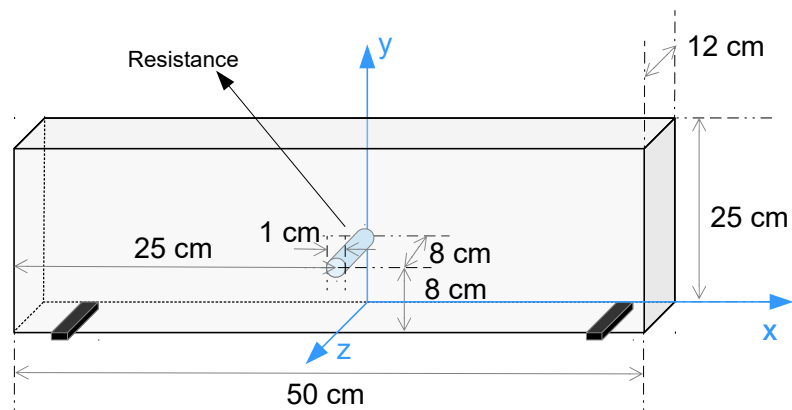


FIGURE 2.6 – Schéma et dimensions des poutres p1-4 et p1-5 pour les essais d'endommagement thermique.

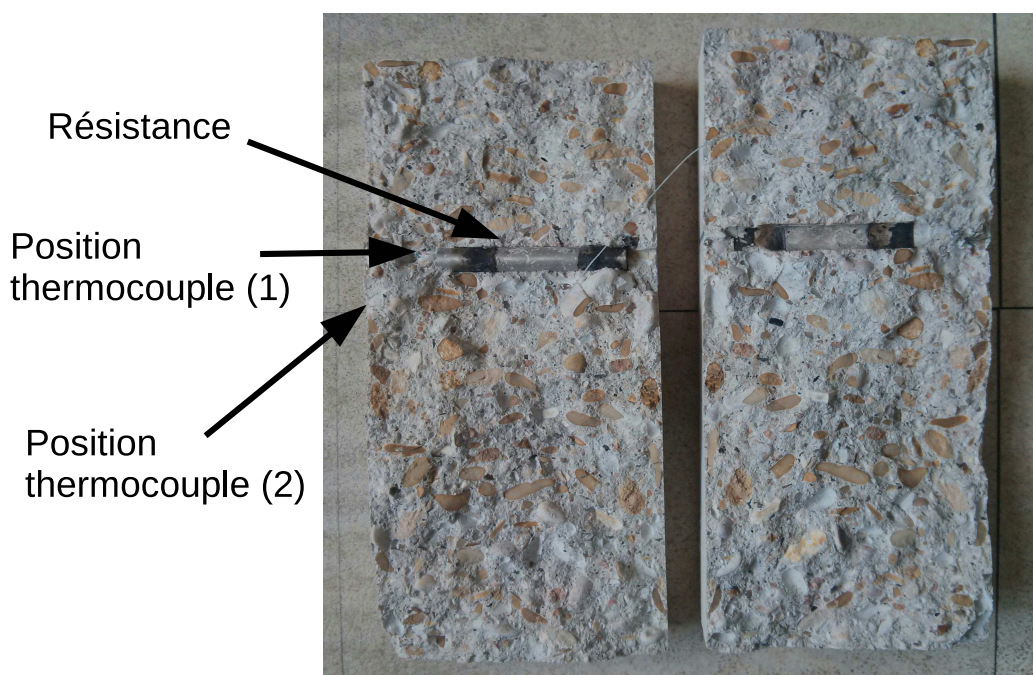


FIGURE 2.7 – Position de la résistance et des thermocouples dans la poutre.

## 2.2 Instrumentation

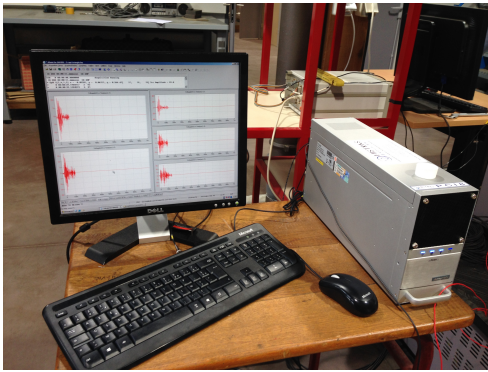
### 2.2.1 Matériel d'acquisition

Le système d'acquisition utilisé pendant les campagnes d'essais est formé d'un PC Mistras (figure 2.8(a)) équipé d'une carte d'acquisition PCI8 8 voies (figure 2.8(b)) ainsi que du logiciel d'acquisition et de traitement des données AWin. Les signaux sont enregistrés par des capteurs piézoélectriques résonants R15 (figure 2.8(d)) de fréquence centrale 150kHz (figure 2.9) et préamplifiés de 40dB (figure 2.8(c)).

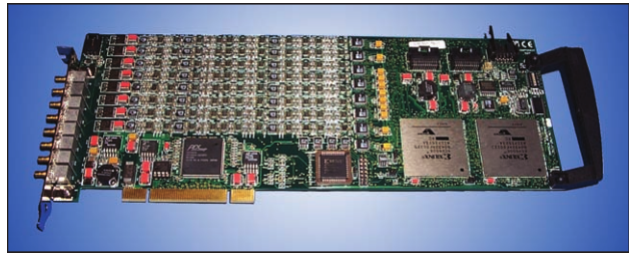
Dans chacun des essais présentés dans la section 2.1, 8 capteurs sont utilisés et disposés autour de la zone de propagation de fissure. Chaque face principale est équipée de 4 capteurs afin d'effectuer une localisation des événements en 3 dimensions. Les capteurs sont fixés directement à la surface grâce à une fine couche de colle silicone à prise rapide (ref : CAF 33, Bluestar silicones). Le couplage entre la surface du béton et chacun des capteurs est vérifié à l'aide d'une source HSU-NIELSEN (norme NF EN 1330). Le protocole consiste à casser une mine de critérium 2H de 2 à 3 mm

capteur	p1-4			p1-5		
	x	y	z	x	y	z
1	-8,0	2,0	12,0	-8,0	3,0	0,0
2	-8,0	14,0	12,0	-8,0	15,0	0,0
3	9,0	16,0	12,0	8,0	17,0	0,0
4	8,0	4,0	12,0	8,0	5,0	0,0
5	8,0	2,0	0,0	8,5	2,3	12,0
6	8,0	14,0	0,0	9,5	18,5	12,0
7	-8,0	16,0	0,0	-8,0	20,5	12,0
8	-10,0	4,0	0,0	-7,5	5,0	12,0

TABLE 2.5 – Position des capteurs en *cm* dans les poutres p1-4 et p1-5



(a) PC d'EA.



(b) Carte d'acquisition PCI8.



(c) Pré-amplificateur 40dB.



(d) Capteur R15.

FIGURE 2.8 – Système d'acquisition.

de longueur avec un angle de 30 degrés par rapport à la surface du matériau à côté de chaque capteur. Une amplitude maximale supérieure à 95dB à chaque cassé de mine permet de valider le couplage.



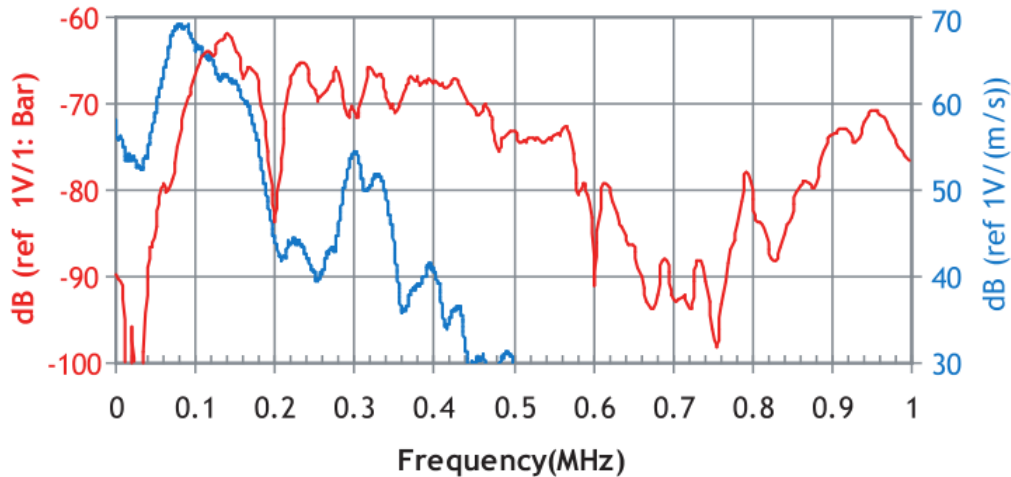


FIGURE 2.9 – Réponse fréquentielle des capteurs R15 $\alpha$ .

### 2.2.2 Choix des paramètres d'acquisition

L'ensemble des paramètres d'acquisition utilisés lors des essais en laboratoire sont présentés dans le tableau 2.6. La fréquence d'échantillonnage choisie est en accord avec le théorème de Shannon [87]. Le filtrage des signaux est analogique, leur échantillonnage se fait à l'aide d'un convertisseur 16 *bits*. Comme indiqué dans la sous-section 1.4.5 les paramètres temporels PDT, HDT et HLT sont propres au matériau inspecté. Leurs valeurs sont définies à partir d'observations sur un grand nombre de signaux d'EA.

## 2.3 Traitement des données avec « bibEA »

Pour traiter les données d'EA, une bibliothèque de fonctions appelée *bibEA* a été créée. *bibEA* est un ensemble de fonctions qui permet d'interagir avec une base de données d'EA. L'intérêt d'un tel outil est de disposer d'un moyen de traitement unique et modulable et donc utilisable sur tous les essais d'EA. L'unicité de l'outil permet d'appliquer rigoureusement les mêmes algorithmes de traitement d'un essai à un autre et d'assurer ainsi une homogénéité dans le traitement des données. Le caractère modulable de *bibEA* permet d'effectuer des tâches de nature différente. Ainsi certaines fonctions ne serviront qu'à calculer de nouveaux paramètres comme

Paramètre	Valeur
Seuil d'acquisition	35 <i>dB</i>
Fréquence d'échantillonnage	1 <i>MHz</i>
Fréquence de coupure du filtre passe bas	400 <i>kHz</i>
Fréquence de coupure du filtre passe haut	100 <i>kHz</i>
PDT	100 $\mu s$
HDT	200 $\mu s$
HLT	400 $\mu s$
Pre-trigger	256 $\mu s$
Taille Maximale des signaux	2048 <i>pts</i> ou 2,048 <i>ms</i>

TABLE 2.6 – Paramètres d'acquisition.

la position des événements et d'autres uniquement à afficher des résultats dans un format particulier. Les 4 grands types de variables qui forment la base de données sur laquelle se base *bibEA* ainsi que le fonctionnement de la bibliothèque sont présentés ci-après.

### 2.3.1 Types de variables

L'utilisation de *bibEA* présuppose un formatage particulier des données d'EA.

Les 4 grands types de variables utilisés sont :

- **configuration**, cette variable contient les données générales d'un essai (position des capteurs, vitesse de propagation des ondes, type d'éprouvette, fréquence d'échantillonnage des signaux, etc...). Ces données sont communes à tous les signaux.
- **signaux** contient tous les signaux d'EA enregistrés pendant un essai.
- **hits** contient l'ensemble des paramètres calculés sur chacun des signaux d'EA (temps d'arrivée, amplitude maximale, durée, temps de montée, fréquence du pic d'énergie sur la transformée de Fourier, etc...).
- **événements** contient l'ensemble des paramètres calculés pour chaque événement. Les événements sont des regroupements de signaux. Il est possible de leur attribuer des paramètres qui n'ont de sens que pour l'événement et pas

pour les signaux dont il est composé. Ces paramètres peuvent être la position de l'événement, les retards d'acquisition entre les signaux, etc...

La figure 2.10 représente ces 4 variables et leurs liens. Les traits noirs symbolisent les liaisons entre les éléments de chaque variable. Par exemple l'événement 1 est formé des hits 1, 2, 3 et 4 qui correspondent eux mêmes aux signaux 1, 2, 3 et 4. Pour assurer cette liaison un attribut particulier est associé à l'événement 1 et permet de faire le lien avec les hits dont il se compose. De la même manière, des attributs particuliers sur les hits 1, 2, 3 et 4 permettent de faire le lien avec l'événement 1. Dans le cas présenté ici chaque hit « i » correspond au signal « i ». Dans la réalité ce n'est pas forcément le cas notamment lorsque le temps d'arrivée des signaux est recalculé et où la variable des hits est rangée dans l'ordre chronologique.

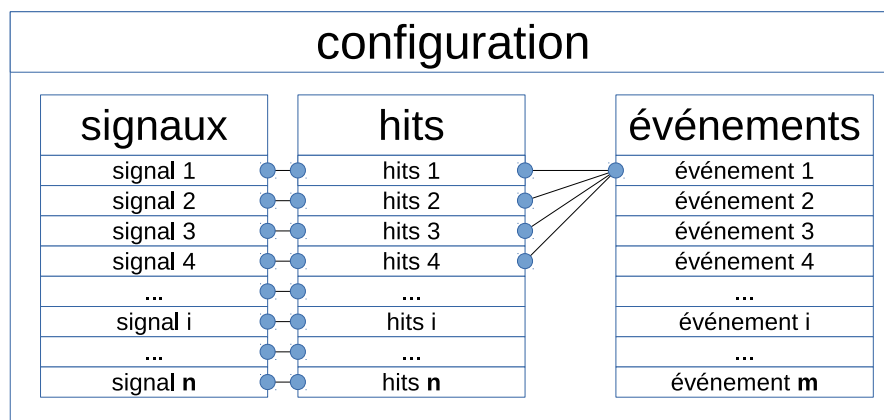


FIGURE 2.10 – Schéma d'interaction des 4 grands types de variables de données.

La figure 2.11 représente l'environnement Matlab lorsque les données relatives à un essai sont chargées en mémoire. Dans le cas présent, les données contiennent 141583 signaux sur lesquels 26 paramètres ont été calculés. 15047 événements ont été formés à partir de ces signaux. L'organisation des données à l'intérieur et leur accès est présenté dans l'annexe A.

### 2.3.2 Fonctionnement de la bibliothèque « bibEA »

L'interaction avec les variables présentées ci-avant se fait à l'aide de fonctions de différents types. Le type « DISP » permet d'afficher des résultats sous un format

Name	Value	Size	Bytes	Class
config	1x1 global struct	1x1	624596	struct (global)
evt	1x15047 struct	1x15047	27145120	struct
hits	141583x26 table	141583x26	29456648	table
signaux	141583x1 cell	141583x1	1137871512	cell

FIGURE 2.11 – Environnement de travail Matlab pour un jeu de données chargé en mémoire.

particulier. Les types « EXTR » et « AJOU » permettent respectivement d'extraire et d'ajouter des données dans une variable. Enfin le type « TOOL » permet de calculer de nouveaux paramètres sur les signaux ou les événements. Ainsi il existe une fonction « TOOL » par algorithme de localisation utilisé pour calculer la position des événements. Au total plus de 45 fonctions ont été créés. L'utilisation de *bibEA* permet de normaliser au mieux le traitement des données d'un essai un autre. Ainsi un script écrit pour un essai peut être réutiliser et modifié à la marge pour s'adapter à un autre.

La figure 2.12 illustre la position de *bibEA* dans la chaîne d'analyse et de traitement des données d'EA. L'avantage de cette bibliothèque est qu'elle permet de traiter les données d'EA indépendamment du matériel et du logiciel d'acquisition utilisé. En revanche son utilisation nécessite la mise en forme des données par souci de compatibilité avec les fonctions de la bibliothèque. En ce sens, *bibEA* constitue une ébauche de langage universel de traitement et d'analyse des données d'EA.

## 2.4 Bilan

Les différents essais présentés dans ce chapitre ont été imaginés pour répondre aux problématiques générales de la thèse. La fiabilisation de la localisation des événements acoustique présentée dans le chapitre 3 se basera sur les essais de flexion 3 points. Le chapitre 4 utilisera les données issues de chaque type d'essai pour proposer des méthodes de suivi de l'endommagement thermique et de la propagation de fissure. L'identification des zones pré-fissurées se fera dans le même chapitre sur les essais de refermeture.

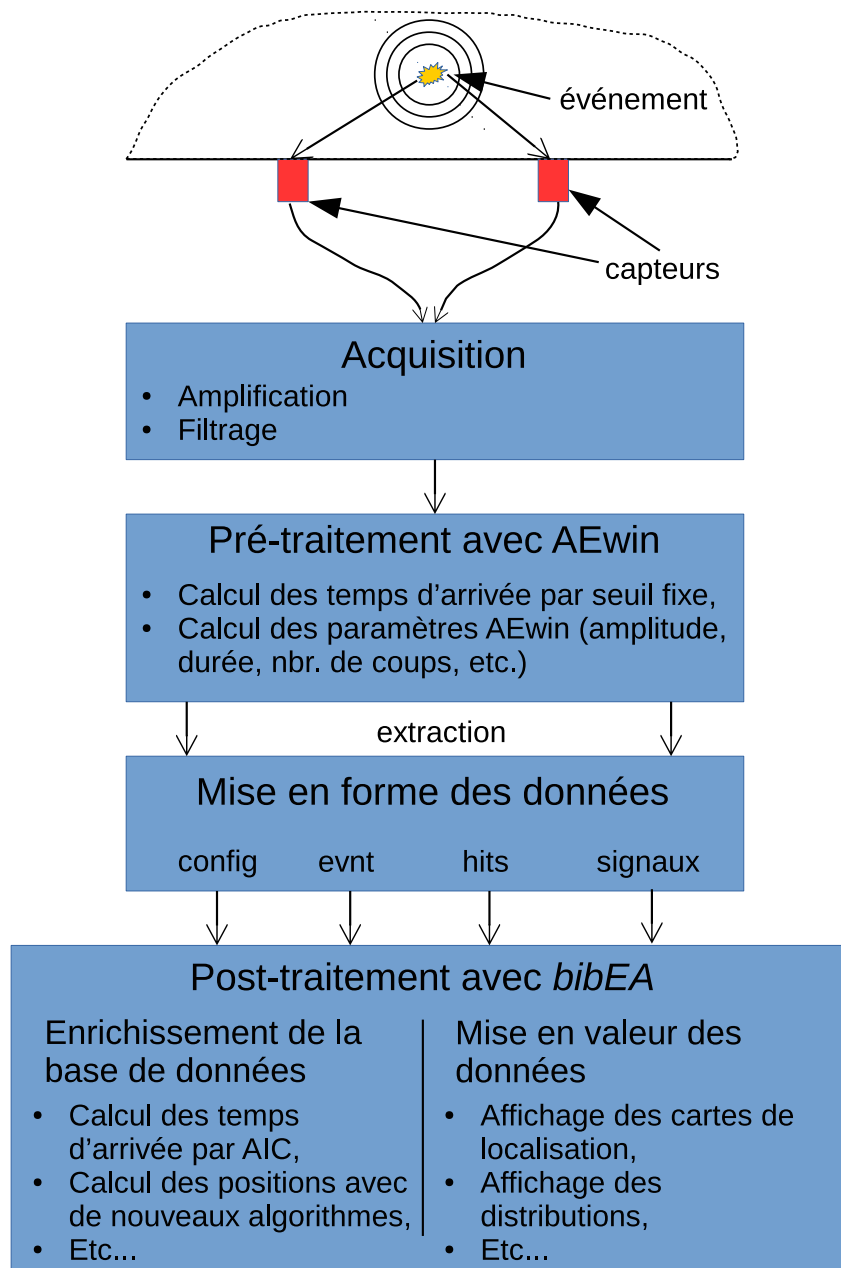


FIGURE 2.12 – Illustration schématique de la position de *bibEA* dans la chaîne de traitement et d'analyse des données d'EA.

Le développement de l'outil de traitement des données *bibEA* permet de gérer toutes les données d'EA de la même manière. Ce protocole d'analyse des données permet d'appliquer rigoureusement les mêmes traitements à tous les essais.

# Chapitre 3

## Fiabilisation de la localisation des événements acoustiques

### 3.1 Introduction

La localisation d'un événement acoustique est un traitement couramment utilisé en EA. Elle permet d'identifier les zones d'activité acoustique, c'est à dire les zones où la structure du matériau évolue. Il existe différentes méthodes de localisation. La plus utilisée est un dérivé de la méthode par « triangulation ». Cette méthode repose sur un modèle de propagation des ondes simple en ligne droite depuis la source jusqu'aux capteurs. L'utilisation d'un tel modèle permet de calculer les temps d'arrivée des ondes sur les capteurs à partir de n'importe quelle position source dans le milieu d'étude. La triangulation consiste à comparer ces temps d'arrivée à ceux mesurés dans le cas de sources dont la position est inconnue. La recherche de l'erreur minimum entre la mesure et les temps d'arrivée issus du modèle permet de conclure sur la position supposée de l'événement acoustique par la résolution d'un problème inverse.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à deux aspects fondamentaux de la localisation pour montrer leur influence sur la représentation globale de la zone d'activité acoustique dans le béton. Le premier aspect est le critère de détermination du début des salves d'EA. La détermination des temps d'arrivée des ondes passe par

l'identification du début des salves enregistrées. Nous comparerons donc dans un premier temps l'influence de deux critères : le seuil fixe (SF) et le critère d'Akaike (AIC) sur la zone d'activité acoustique. Dans un second temps nous étudierons l'influence de l'algorithme utilisé pour résoudre le problème de minimisation d'erreur. L'influence de l'algorithme Gbnm, d'un algorithme par maillage adaptatif (AMA) ainsi que d'un algorithme génétique (AG) sera discutée. Enfin, les avantages et limites de la localisation par triangulation seront exposées.

## 3.2 Déroulement des essais de flexion 3 points

La figure 3.1 représente les courbes de chargement en fonction de l'ouverture d'entaille pour les 3 poutres p1-1 (A), p1-2 (B) et p1-3 (C). Ces courbes sont typiques d'un essai de flexion sur un matériau quasi-fragile comme le béton. Elles comprennent un domaine linéaire correspondant au comportement élastique du matériau. Ce domaine est compris entre 0 et 16  $\mu\text{m}$  selon la poutre testée (voir tableau 3.1). Le domaine non linéaire correspond au reste de la courbe et peut se diviser en deux parties. La première se situe entre la fin du domaine linéaire et le passage au pic de chargement. Elle correspond à l'instant d'initiation de la fissure. La deuxième partie est dite « adoucissante », elle correspond à la propagation de la fissure. Elle se caractérise par une décroissance lente du chargement en fonction de l'ouverture d'entaille. On observe d'autre part des cycles de déchargement/rechargement dans la partie adoucissante. Ces cycles ont été effectués pour les partenaires du projet afin de calculer une variable d'endommagement globale des poutres au cours de la propagation de fissure.

Une autre représentation des essais est proposée sur la figure 3.2. Sur cette figure le chargement est représenté en fonction du temps. Cette représentation laisse apparaître les paliers de chargement effectués dans la partie pre-pic pour les 3 poutres ainsi que les deux paliers en post-pic sur la poutre p1-1. ainsi que les étapes de déchargement/rechargement effectués entre ces paliers. Un découpage de chaque essai en phases est symbolisé par le code couleur suivant :

- en rouge les phases de propagation de fissure. Pendant ces phases l'entaille s'ouvre à vitesse constante et entraîne la propagation de la fissure. En réaction

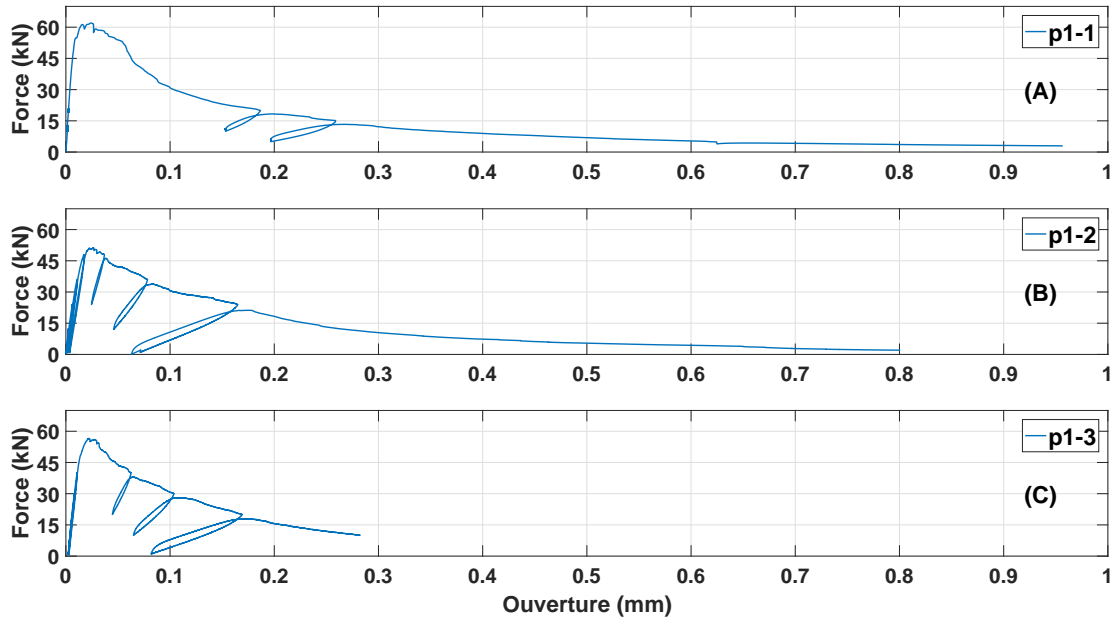


FIGURE 3.1 – Force en fonction de CMOD des poutres p1-1 (A), p1-2 (B) et p1-3 (C).

à cette propagation et donc à la perte de rigidité de la poutre, la poutre est progressivement déchargée.

- En vert les phases de chargement ou déchargement. Ces phases sont toujours effectuées à vitesse d'ouverture/fermeture d'entaille constante. Elles correspondent dans la partie post-pic aux cycles visibles sur la figure 3.1.
- En bleu les paliers de chargement. Ces paliers ont permis aux partenaires de faire leurs mesures dans des états quasi-stables de la poutre.

Les conditions d'essai ne sont pas strictement identiques à plusieurs titres. Premièrement le nombre de cycles et leur position au cours de l'essai ne sont pas les mêmes dans la partie post-pic de chacune des poutres. D'autre part deux paliers de chargement ont été effectués au milieu des cycles dans la partie post-pic sur la poutre p1-1 contrairement aux autres poutres. Ces deux paliers ont permis aux partenaires de faire des mesures sur la poutre entaillée. Une autre différence concerne la vitesse d'ouverture d'entaille. Elle n'est pas identique d'un essai à l'autre. En effet la vitesse de pilotage est de  $20\mu m.min^{-1}$  sur l'ensemble de l'essai sur la poutre p1-1 mais aussi pour les deux dernières phases de la poutre p1-2 (dernier chargement et dernière propagation de fissure). En revanche la vitesse d'ouverture d'entaille est de



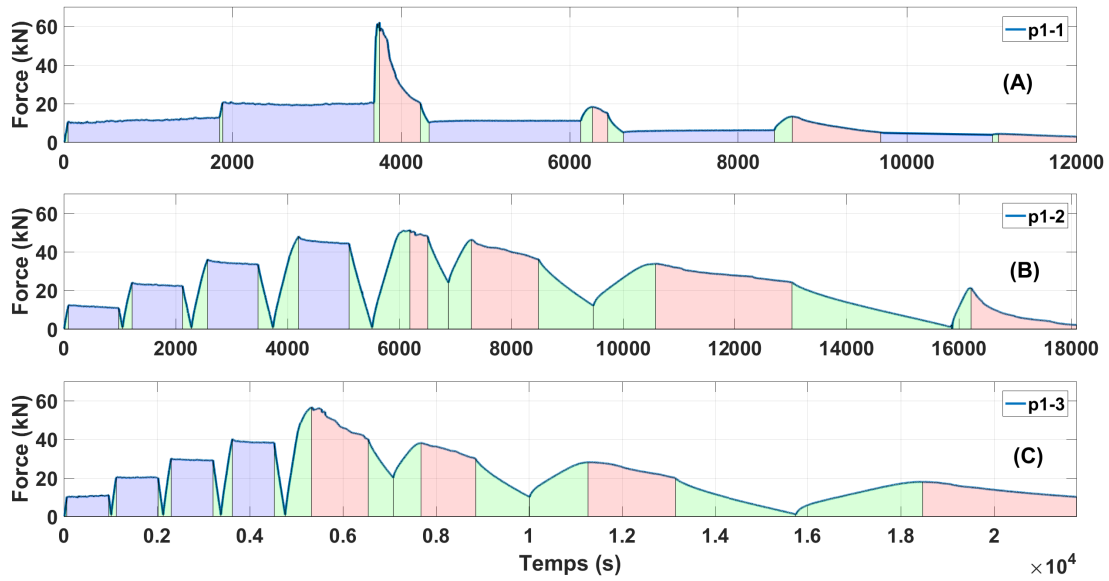


FIGURE 3.2 – Force en fonction du temps des poutres p1-1 (A), p1-2 (B) et p1-3 (C). En rouge : les phases de propagation de fissure, en bleu : les paliers de chargement, en vert : les phases de déchargement/rechargement pendant les cycles.

$2\mu m.min^{-1}$  sur le reste de l'essai p1-2 et sur tout l'essai p1-3. Ces différences de vitesses sont essentiellement dues aux contraintes de temps pour réaliser les essais. Le tableau 3.1 résume les caractéristiques de chaque essai.

	p1-1	p1-2	p1-3
Force au pic ( $kN$ )	62,0	51,2	56,6
Ouverture au pic ( $\mu m$ )	24	26	22
Vitesse d'ouverture ( $\mu m.min^{-1}$ )	20	2 puis 20	2
Domaine linéaire ( $\mu m$ )	0 à 8	0 à 16	0 à 13
Nombre de cycles	2	3	3

TABLE 3.1 – Caractéristiques des essais de flexion 3 points.

Les données présentées dans la suite de ce chapitre sont issues de la poutre p1-1. Les données équivalentes sur les autres poutres sont présentées dans l'annexe B.

### 3.3 Critères de filtrage des signaux enregistrés

Cette section présente deux filtres appliqués aux signaux d'EA enregistrés. L'objectif est d'identifier et de filtrer les salves susceptibles d'influencer négativement la localisation des événements. Comme nous l'avons vu dans la sous-section 1.5.3, la détermination du début des salves joue un rôle majeur dans la localisation par triangulation. Le critère de conservation des signaux sera donc centré sur la possibilité de définir le début des salves.

#### 3.3.1 Le nombre de coups et l'amplitude

La figure 3.3 représente le nombre de coups (sur une échelle logarithmique) en fonction de l'amplitude maximale des salves d'EA enregistrées. Sur la base de la méthode de filtrage évoquée dans la sous-section 3.3.2, les signaux dont le nombre de coups est inférieur à 10 et dont l'amplitude maximale est inférieure à  $50dB$  sont identifiés, ils représentent 24,5% des signaux enregistrés au cours de l'essai.

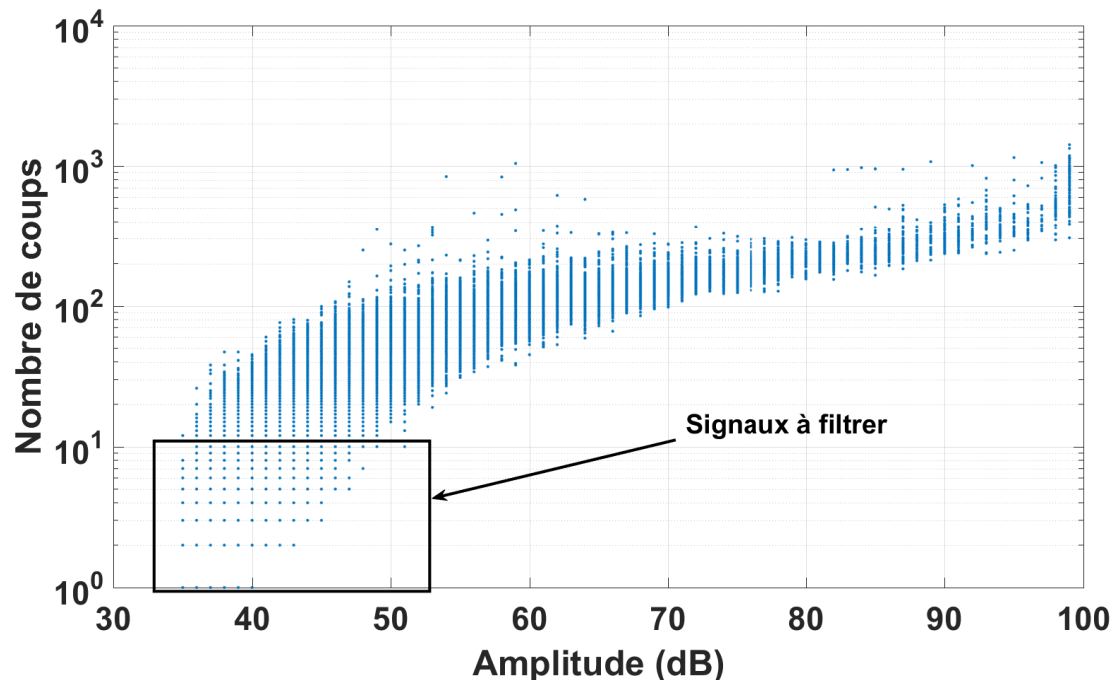


FIGURE 3.3 – Nombre de coups en fonction de l'amplitude maximale des signaux.

La figure 3.4 illustre quant à elle un signal représentatif de l'ensemble identifié sur

la figure 3.3. L’instant de dépassement de seuil est symbolisé par un trait vertical rouge à  $256\mu s$  (valeur du pre-trigger). L’amplitude maximale de ce signal est de  $35dB$ , deux « coups » ont été calculés par le logiciel d’acquisition AWin sur ce signal à partir du dépassement de seuil.

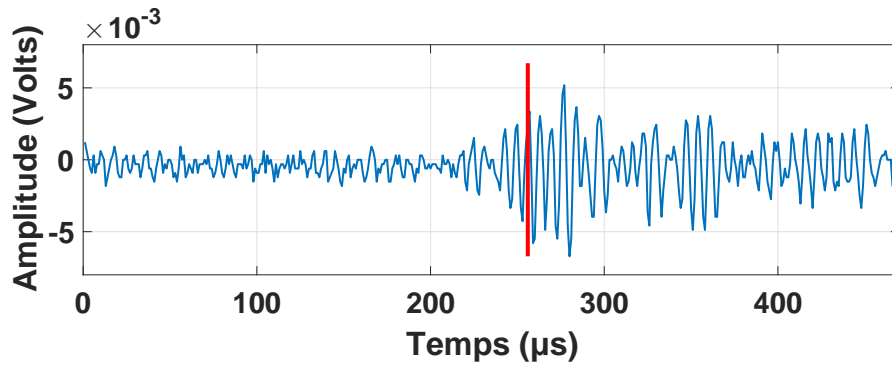


FIGURE 3.4 – Exemple d’un signal d’amplitude maximale de  $35dB$  et de 2 coups.

Plusieurs éléments sont à souligner sur cet exemple. Premièrement le signal est relativement court (moins de  $500\mu s$ ). Ceci est due au fait que l’amplitude mesurée ne dépasse qu’à 2 reprises le seuil d’acquisition (2 coups). Ainsi conformément au protocole d’acquisition décrit dans la section 1.4.5 la fin du signal est déterminée après une durée de la valeur du **HDT** soit environ  $256 + 200 \mu s$ . En revanche le signal est conforme à la description faite dans la sous-section 1.4.5. On observe un temps de montée relativement court (entre  $200$  et  $277\mu s$ ) suivi par une décroissance lente de l’amplitude même si toute la CODA n’a pas été enregistrée. On observe par ailleurs une distinction assez claire entre le bruit naturel enregistré entre  $0$  et  $200\mu s$  et le début du signal à environ à  $200\mu s$ . L’ensemble de ces caractéristiques sont typiques d’un signal d’EA associé à une libération d’énergie au sein du matériau. Il n’est pas conséquent pas nécessaire de filtrer ce signal.

La deuxième remarque tient à l’importance du seuil d’acquisition dans l’interprétation de la validité ou non du signal. En effet comme nous pouvons le voir ici, le début de la salve ne correspond pas au dépassement de seuil. Ainsi le nombre de coups calculé à partir de ce dépassement de seuil est très faible en comparaison de la durée réelle du signal. La valeur du nombre de coups calculé de cette manière n’est donc pas représentative du signal. Le nombre de coups semble donc ne pas être un indicateur fiable de la pertinence des signaux enregistrés.

Cette analyse s'applique à l'ensemble des paramètres temporels et fréquentiels calculés et qui dépendent du seuil d'acquisition. En effet le temps de montée ou la durée dépendent eux aussi de la détermination du début de la salve et donc du seuil d'acquisition. Le problème soulevé ici ne concerne pas seulement le filtrage des données. Il est en relation avec le protocole d'acquisition des signaux et la méthode employée pour calculer l'ensemble des paramètres associés à chacune des salves.

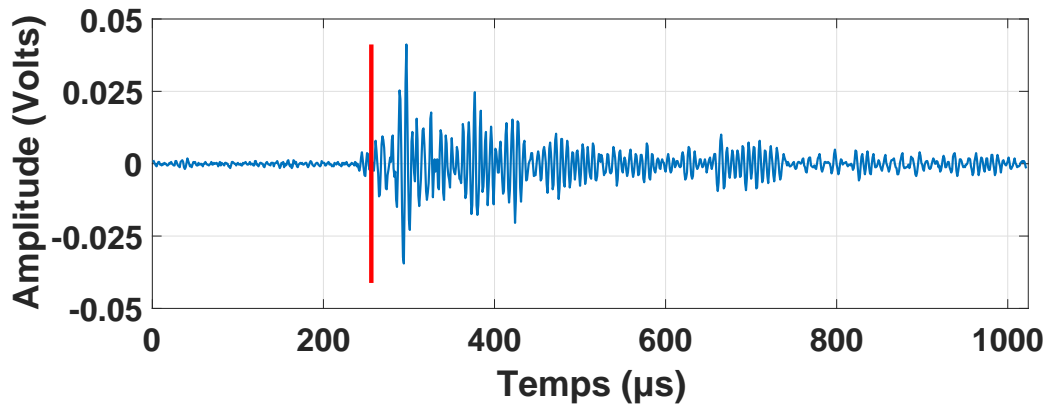


FIGURE 3.5 – Exemple d'un signal d'amplitude maximale de  $52dB$  et de 45 coups.

Enfin l'importance du phénomène mis en évidence ici est à relativiser pour les salves dont l'amplitude maximale est plus importante. En effet comme on peut le voir sur la figure 3.5, le phénomène décrit précédemment est moins important pour les signaux de plus forte amplitude. Il existe toujours une différence apparente entre le début de salve et le dépassement de seuil susceptible d'influencer les paramètres dépendant du début de salve. Cependant les valeurs de temps de montée ( $36\mu s$ ) et de durée ( $566\mu s$ ) sont plus proches de la réalité ici.

A la vue des résultats présentés ici, la méthode de filtrage basée sur le nombre de coup ne constitue pas un bon indicateur des signaux à filtrer pour la problématique de la localisation. Ce filtre n'est donc pas appliqué aux données présentées ultérieurement dans ce chapitre.

### 3.3.2 L'énergie contenue avant le début des salves

Ce filtre se base sur le contenu énergétique du bruit avant le début de salve. Conformément à la définition du début de salve donnée dans la sous-section 1.5.3,

l'amplitude enregistrée avant le début de la salve correspond à un bruit constant et faible. Ainsi l'énergie contenue dans cette partie de l'enregistrement est censée être constante au cours de l'essai et être la même sur tous les signaux. Le filtrage proposé ici consiste donc à ne conserver uniquement que les signaux dont l'énergie de bruit calculée est inférieure à une valeur définie. L'énergie est normalisée par unité de temps puisque que la période sur laquelle elle est calculée est différente avant chaque début de salve (figure 3.6). L'énergie calculée est donc divisée par la durée de la période considérée.

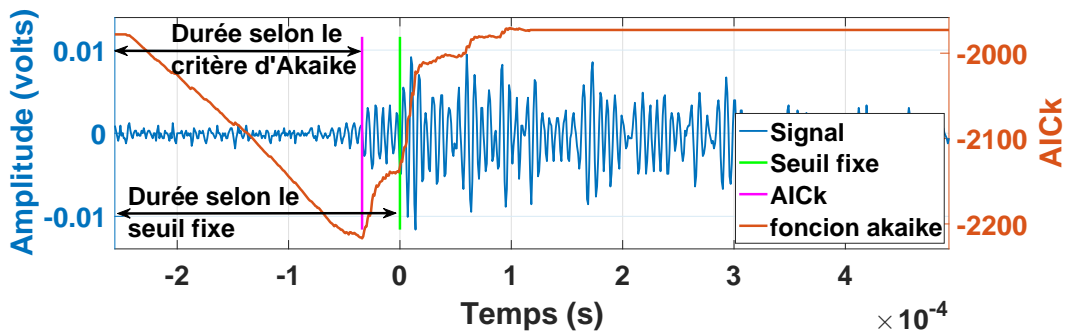


FIGURE 3.6 – Périodes considérées sur lesquelles l'énergie est calculée en fonction de la méthode de détermination du début des salves.

La figure 3.7(a) présente la proportion cumulée de signaux (tous capteurs confondus) en fonction de l'énergie de bruit normalisée (de 0 à 1) pour chaque méthode de détermination du début des salves. Les courbes présentées ici ne représentent que partiellement la disparité des énergies calculées puisque l'axe des abscisses est limité à  $1.10^{-6}$ . De plus, la proportion de signaux est systématiquement supérieure lorsque le début des salves est déterminé par le critère d'Akaike.

Pour définir la valeur limite d'énergie qui va nous permettre de filtrer les salves on se propose d'examiner 3 signaux positionnés à différents quantiles (figure 3.7(b)). Les trois signaux associés aux énergies des quantiles 90%, 95% et 98% et dont le début de salve a été déterminé par le critère d'Akaike sont présentés figure 3.8. Comme on peut le voir sur les deux premiers signaux (90% et 95%), le niveau de bruit avant le début des salves est constant. Ces salves ne sont donc pas à filtrer. On observe en revanche pour le troisième signal (98%) que la période symbolisée par la double flèche noire ne correspond pas à du bruit. Il n'est donc pas possible de définir

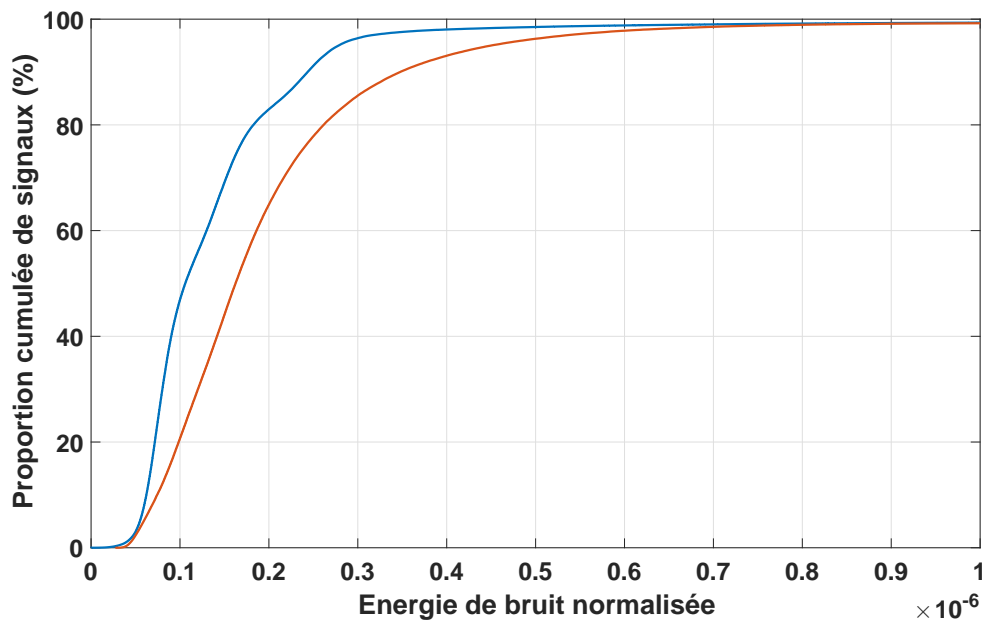
réellement le début de la salve. La fonction Akaike présente plusieurs minimums importants qui reflètent l'incompatibilité de la technique dans ce cas précis. A la vue des résultats présentés ici et dans le cas d'une utilisation du critère d'Akaike pour définir le début des salves, les signaux dont l'énergie de bruit calculée se situe dans les 4 derniers quantiles (entre 96 et 100%) sont à supprimer.

La même opération est répétée pour les signaux dont l'énergie de bruit est calculée jusqu'à un début de salve déterminé par seuil fixe (figure 3.9). Dans les trois cas présentés le niveau de bruit est relativement constant, le début des salves semble pouvoir être déterminé manuellement. Ces signaux ne sont donc pas à filtrer au regard du critère défini au début de cette section. La difficulté ici pour déterminer un niveau d'énergie tient à l'utilisation du seuil fixe. Comme on peut le voir le dépassement de seuil ne correspond pas au début du signal. La période sur laquelle l'énergie est calculée comprend alors le début des signaux.

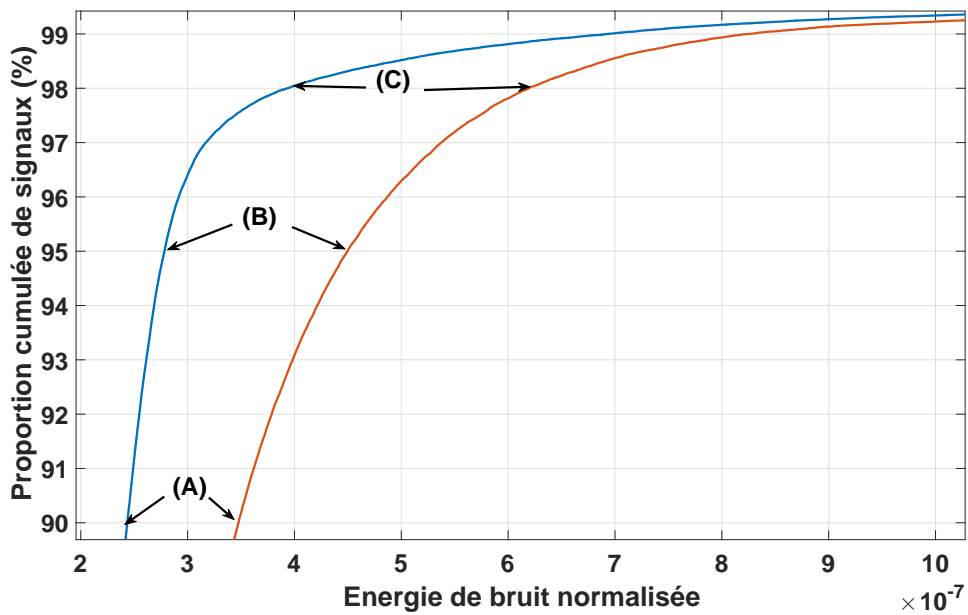
La méthode de filtrage sur l'énergie du bruit est applicable dans le cas où le début de salve est correctement déterminé. Ici l'utilisation du critère d'Akaike permet de ne supprimer que 4% des signaux pour lesquels la période précédant le début de salve ne correspond pas au bruit de fond constant. Le filtre proposé est adapté à une problématique de localisation. L'objectif est d'identifier les signaux pour lesquels le début de salve ne peut pas être correctement identifié. Son application nécessite un pre-trigger suffisamment grand pour estimer à la fois le début de salve par le critère d'Akaike et l'énergie contenue avant ce début de salve.

### **3.4 Critères de filtrage des événements localisés**

Cette section a pour but de montrer quels sont les critères de filtrage appliqués aux événements acoustiques formés après le filtrage des salves présenté dans la section précédente.

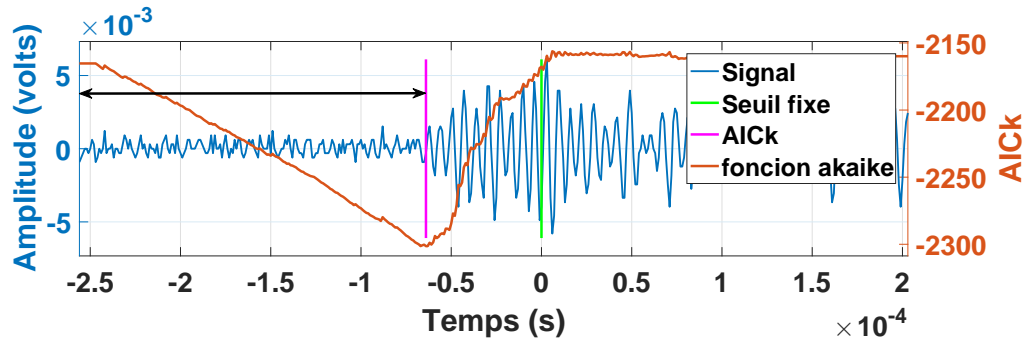


(a) Totalité des signaux.

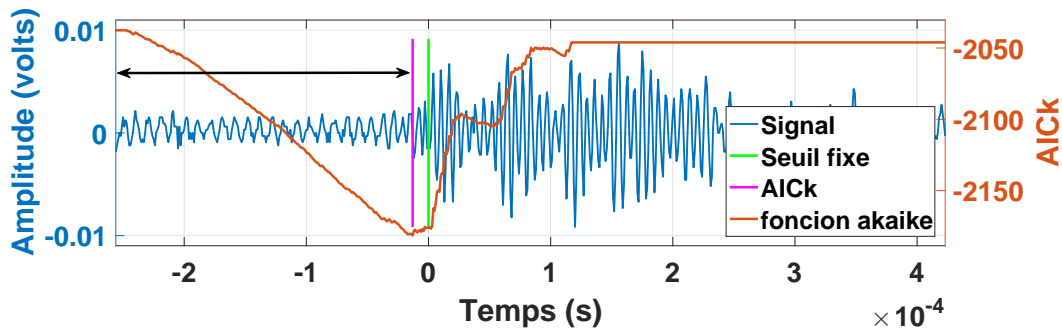


(b) Zoom entre 90 et 99% des signaux.

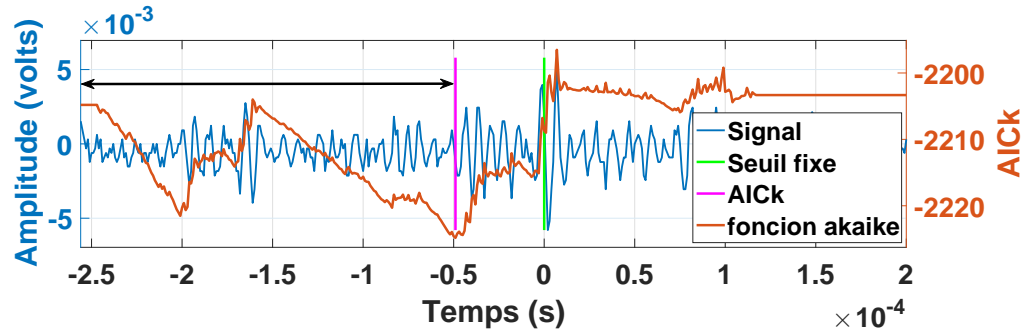
FIGURE 3.7 – Proportion cumulée de signaux en fonction de l'énergie par unité de temps contenue avant le début de la salve. Début de salve déterminés par le critère d'Akaike (bleu) et début de salve déterminé par seuil fixe (rouge).



(a) Signal sélectionné au quantile : 90%.



(b) Signal sélectionné au quantile : 95%.



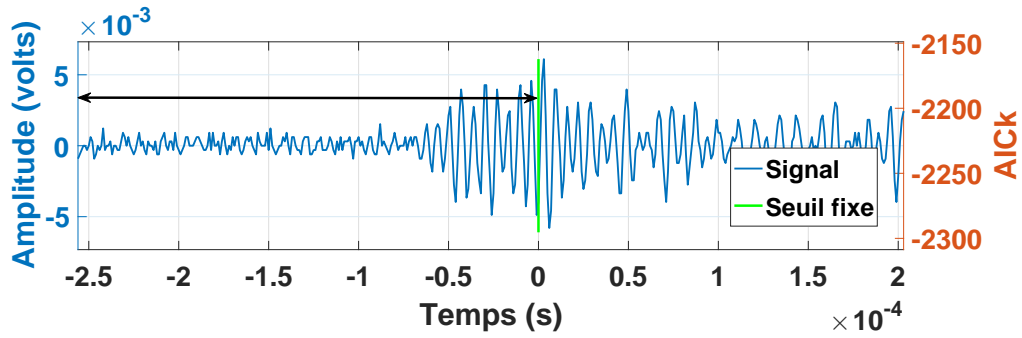
(c) Signal sélectionné au quantile : 98%.

FIGURE 3.8 – 3 signaux d’EA dont l’énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le critère d’Akaike. La durée sur laquelle est calculée l’énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire.

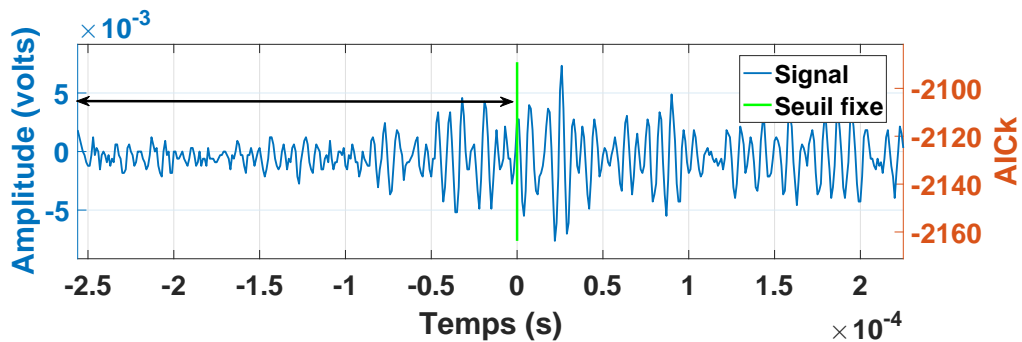
### 3.4.1 Seuil d’acquisition

La quantité de données d’EA enregistrées pendant un seul essai peut être extrêmement importante. Le nombre de signaux acquis au cours des essais présentés au chapitre 2 est de l’ordre de plusieurs centaines de milliers. Sur la base de ces signaux, seuls 10000 à 15000 événements sont formés. Avec entre 4 et 8 signaux maximum

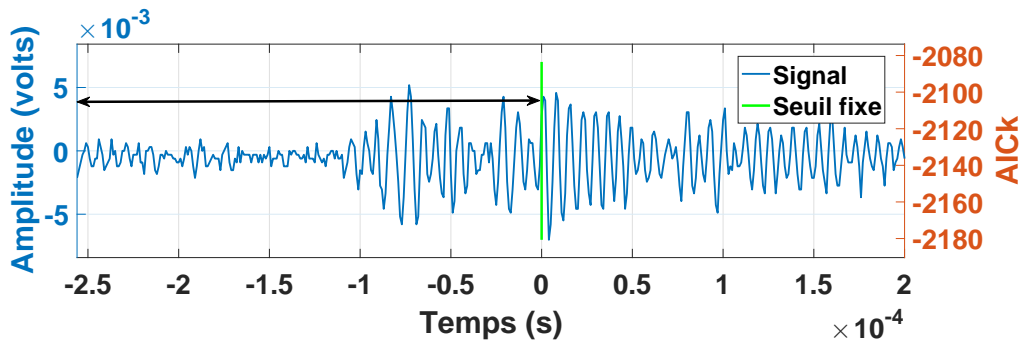




(a) Signal sélectionné au quantile : 90%.



(b) Signal sélectionné au quantile : 95%.



(c) Signal sélectionné au quantile : 98%.

FIGURE 3.9 – 3 signaux d’EA dont l’énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le seuil fixe. La durée sur laquelle est calculée l’énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire.

par événement, les signaux associés aux événements ne représentent qu’une fraction des signaux enregistrés. En effet, comme nous l’avons vu dans la sous-section 1.4.5 la formation d’un événement se fait lorsque 4 à 8 signaux sont acquis dans une fenêtre temporelle réduite. Or il y a toujours une part des signaux acquis qui ne rentrent jamais dans cette fenêtre. Ce sont des salves isolées. Le fait de travailler sur les

événements et non uniquement sur les signaux constitue donc le premier filtre.

Pour illustrer ce premier filtre « passif », la figure 3.10 représente la distribution des signaux de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-1 en fonction des amplitudes. La proportion de signaux enregistrés (bleu) est d'autant plus forte que leur amplitude est faible. En revanche la distribution des signaux associés à des événements (jaune) passe par un maximum à 42 dB puis suit précisément la distribution de la totalité des signaux. Ainsi les signaux de faible amplitude ne sont que rarement associés à des événements alors qu'à partir de 50 dB, quasiment aucun signal n'est en dehors d'un événement. L'importance de ce premier filtre tient donc essentielle-

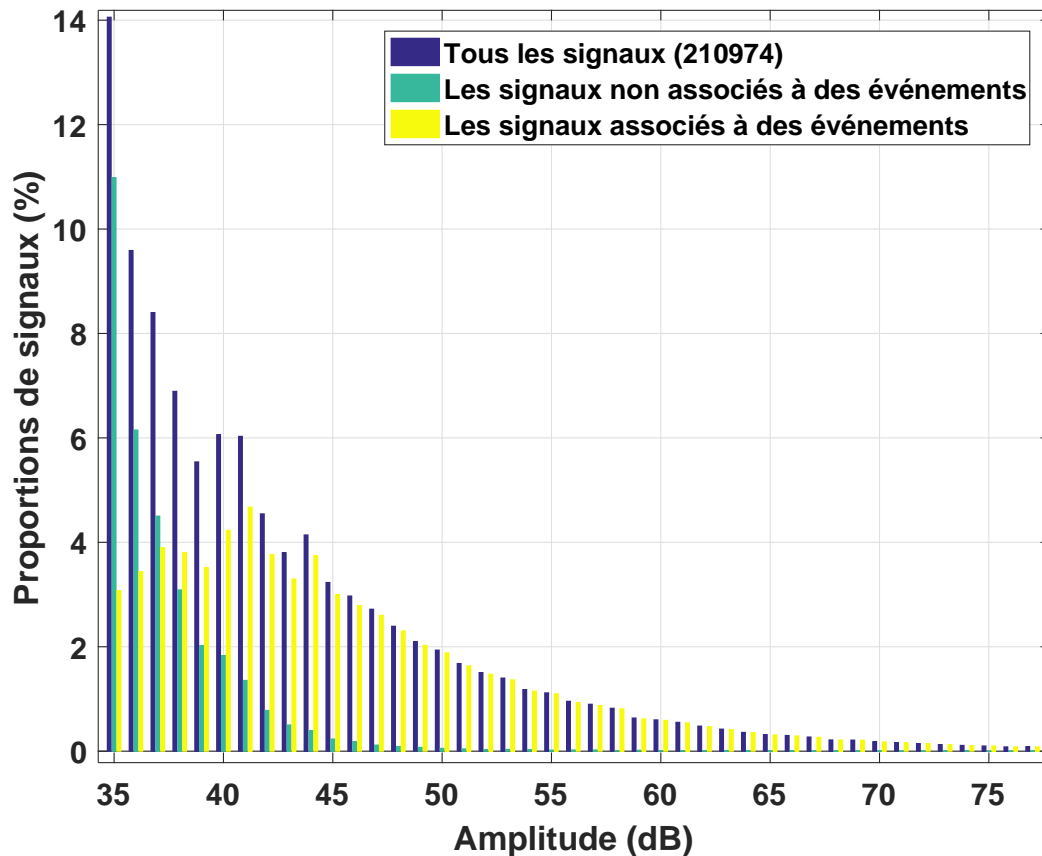


FIGURE 3.10 – Distribution des signaux en fonction de leur amplitude. Tous les signaux (bleu), signaux associés à des événements (jaune) et signaux non associés à des événements (vert).

ment au seuil d'acquisition choisi. Un seuil plus grand aurait permis d'augmenter la proportion de signaux associés aux événements mais aurait tout de même fait bais-

ser le nombre d'événements formés. Cela explique pourquoi les seuils d'acquisition utilisés dans la littérature sont souvent proches de  $40dB$ .

### 3.4.2 Sur-représentation d'événements sur les parois des poutres

La figure 3.11 représente un exemple de carte de localisation avec la distribution des événements dans chaque direction. Cette carte est issue de la localisation effectuée par le logiciel *AEwin*. L'algorithme utilisé est un dérivé des simplex dont les détails ne sont pas fournis par la marque. Chaque extrémité des distributions d'événements montre une quantité importante d'événements localisés soit sur la surface de la poutre soit en dehors. Ces événements extérieurs sont dus au fait que l'algorithme utilisé n'est pas borné ce qui est le cas de l'algorithme de localisation du logiciel *AEwin*. Il peut donc fournir une solution en dehors de la poutre. Les algorithmes présentés et utilisés dans ce chapitre sont tous bornés. Les événements localisés sur les parois de la poutre sont filtrés.

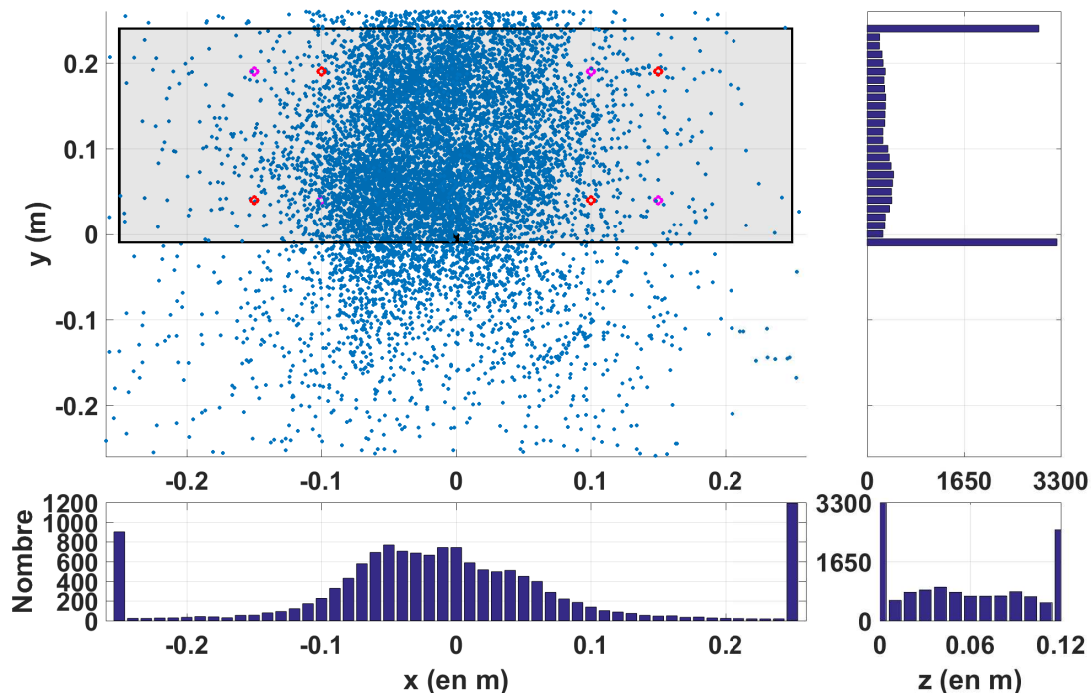


FIGURE 3.11 – Exemple de carte d'événements non filtrée et des distributions d'événements dans chaque direction.

Les proportions d'événements localisés dans la poutre sont relativement faibles. Une explication de cette sur-représentation des événements sur les parois et en dehors des poutres est présentée dans la sous-section 3.5.4. En revanche les proportions d'énergies associées restent systématiquement très importantes avec au minimum 92,6 % de l'énergie reçue localisée à l'intérieur de la poutre. Ces fortes proportions d'énergies conservées permettent donc de relativiser la perte d'information due au filtrage des événements.

Sur les cartes de localisation et les distributions présentées ci-après les événements localisés à l'extérieur et à moins de 2 *mm* des bords des poutres sont filtrés. Cette valeur de 2 *mm* a été choisie par rapport aux paramètres de calculs utilisés sur AMA qui seront détaillés par la suite.

### 3.4.3 Erreur sur la minimisation

Dans l'optique d'une analyse spatiale de l'EA, un autre critère de filtrage des événements peut être la valeur  $\xi_m$  de la minimisation de la fonction d'erreur. En effet, un utilisateur peut choisir de ne conserver que les événements pour lesquels  $\xi_m$  est inférieur à une valeur donnée plus ou moins élevée, ce n'est pas le cas dans ce chapitre. Le travail présenté ici vise à montrer l'influence qu'a la stratégie de localisation sur les cartes d'événements. Les événements utilisés ne sont donc pas filtrés en fonction de l'erreur sur la localisation. En revanche les erreurs obtenues à la fin de la localisation sont utilisées comme critère de comparaison des stratégies employées.

### 3.4.4 Conséquences du filtrage

La principale conséquence du filtrage appliqué est que le nombre d'événements conservé est différent pour chaque stratégie de localisation employée. Les proportions d'événements présentés dans la suite de ce chapitre font référence au nombre d'événements conservés pour chaque stratégie. Ainsi x% d'événements dans une stratégie fera référence à x% des événements conservés pour cette stratégie.

## 3.5 Effet du critère de détermination du début de salve

Dans cette partie nous allons comparer les cartes de localisation des événements en fonction de deux critères de début de salve : le seuil fixe et le critère d'Akaike. Dans chaque cas, l'algorithme de résolution du problème de minimisation utilisé est Gbnm. Seule diffère la manière dont a été déterminée le début des salves, c'est à dire les retards entre capteurs. Deux types de comparaisons sont proposées. La première est qualitative. Elle se base sur les cartes de localisation ainsi que sur la distribution des événements. La seconde comparaison est quantitative. Elle se base sur la proportion cumulée d'événements localisés en fonction de l'erreur présentée dans l'équation 1.8.

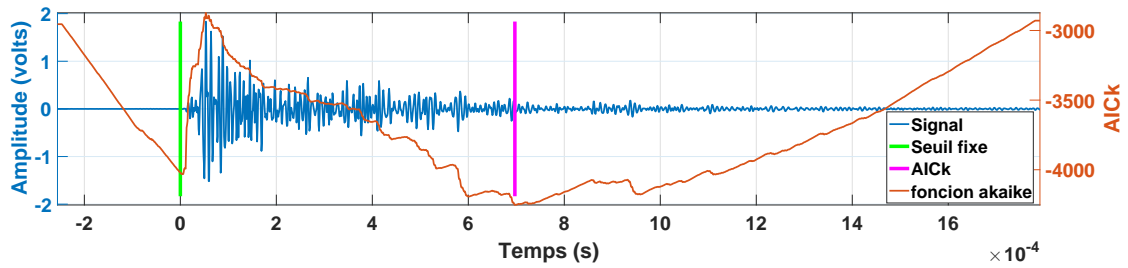
### 3.5.1 Application du critère d'Akaike

Dans le cas présenté ici et pour tous les signaux acquis sur l'ensemble des essais dans cette thèse, le paramètre  $N$  de l'équation 1.9 a été fixé à  $256 + 128$  ce qui correspond à 128 points après le dépassement de seuil ou après le pre-trigger (voir tableau 2.6). La valeur de ce paramètre influe premièrement sur le temps de calcul, plus  $N$  est grand et plus le temps de calcul de la fonction sera long. De plus une valeur de  $N$  trop grande peut conduire sur certains signaux à un minimum de la fonction Akaike après le pic d'amplitude du signal (figure 3.12).

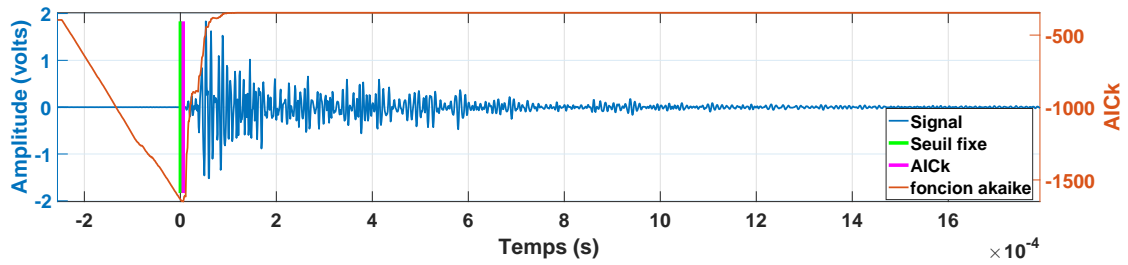
La fonction Akaike a été calculée à partir du 10<sup>ème</sup> point de chaque signal afin d'éviter le calcul du logarithme d'une variance nulle. Ainsi les 9 premières valeurs de la fonction Akaike ont été définies comme identiques à la 10<sup>ème</sup> valeur.

### 3.5.2 Cartes de localisation et distribution des événements

La figure 3.13 présente les cartes de localisation obtenues à l'issue du traitement par seuil fixe (figure 3.13(a)) et par AIC (figure 3.13(b)). Chaque point bleu représente la position d'un événement acoustique. Il s'agit ici de la projection des événements localisés en 3D sur le plan principal de la poutre dont les contours sont



(a)  $N = 2048$ .



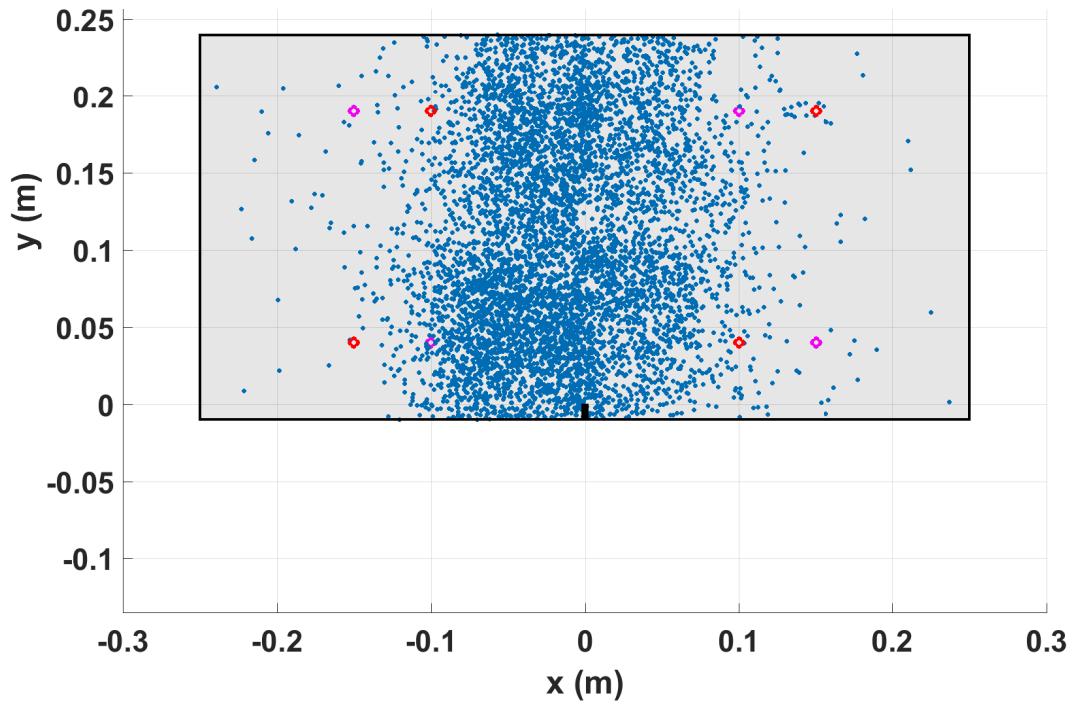
(b)  $N = 384$ .

FIGURE 3.12 – Application du critère d’Akaike sur 2048 points (a) et sur 386 points (b).

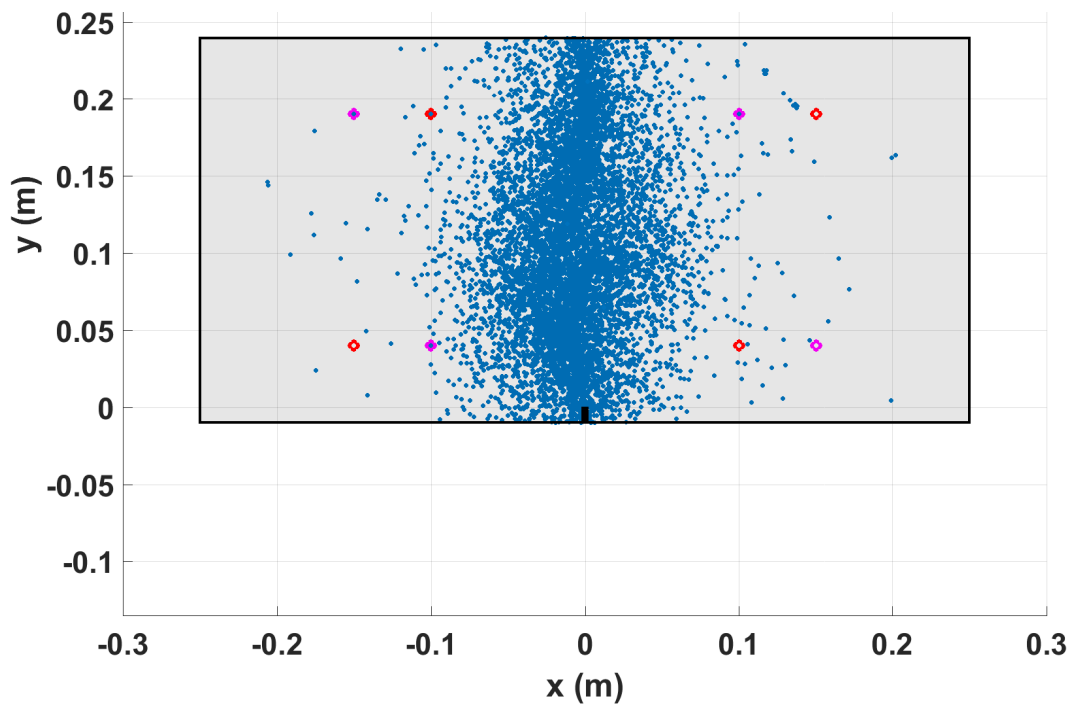
représentés par des traits noirs. Les capteurs sont représentés par des ronds rouges et roses. Sur ces deux cartes les événements sont localisés autour de la fissure c’est à dire autour de l’axe vertical au dessus de l’entaille en  $x = 0cm$ . En revanche la distribution des événements est plus large et plus homogène dans le cas du seuil fixe. Sur la carte relative à l’utilisation du critère d’Akaike, la concentration des événements est d’autant plus forte que l’on se rapproche de l’axe  $x = 0$  donc autour du trajet de la fissure.

La figure 3.14 représente la distribution des événements de la poutre p1-1 dans les trois directions. La distribution relative au seuil fixe est en bleu et celle relative au critère d’Akaike en jaune. Chaque classe représente le nombre d’individus sur 1  $cm$  de large (Ex : la classe  $x = 0cm$  regroupe les événements localisés entre  $x = -0,5cm$  et  $x = +0.5cm$ ).

La différence principale observée entre les deux cas présentés concerne la distribution selon l’axe  $Ox$ . Les deux distributions selon cet axe sont gaussiennes mais leurs maximums et leurs largeurs sont différentes. La concentration maximale d’évén-



(a) Seuil fixe.



(b) Critère d'Akaike.

FIGURE 3.13 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Utilisation du seuil fixe (a), et utilisation du critère d'Akaike (b).

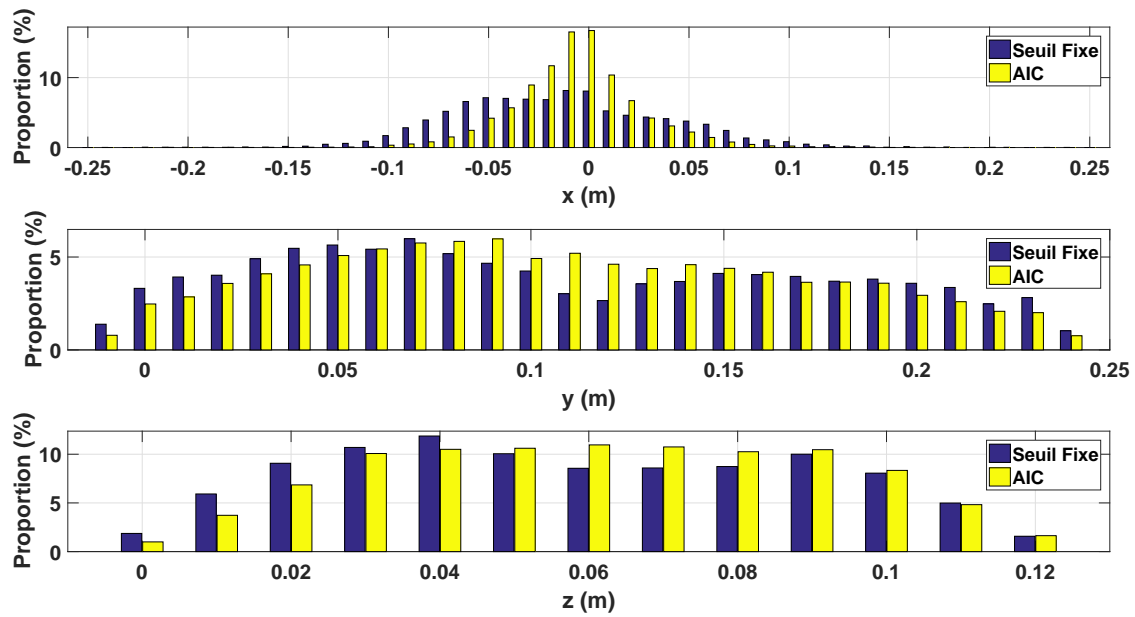


FIGURE 3.14 – Distribution des événements dans les trois directions sur la poutre p1-1. Comparaison entre le seuil fixe en bleu et le critère d’Akaike (AIC) en jaune.

nements est de 8,2% en  $x = -1cm$  pour le seuil fixe contre 16,7% en  $x = 0cm$  pour AIC. La largeur de la distribution à 20% du pic est de 18cm pour le seuil fixe contre 10cm pour le critère d’Akaike.

La répartition des événements est relativement homogène selon l’axe  $Oy$  avec néanmoins un pic à 7cm au dessus de l’entaille pour le seuil fixe contre 9cm pour le critère d’Akaike. On observe d’autre part une concentration d’événements qui tend vers 0 sur les bords de la poutre dans les directions  $Oy$  et  $Oz$ . En revanche les différences de distributions dans ces deux directions restent faibles.

### 3.5.3 Proportion cumulée d’événements en fonction de l’erreur $\xi_m$

La comparaison des cartes de localisation du paragraphe précédent montre une sensibilité importante des résultats vis à vis du critère de début de salve. Si dans le cas du critère d’Akaike les événements sont plus concentrés autour de la fissure que pour le seuil fixe, cette observation n’en est pas moins qualitative. Ici nous



proposons de travailler à partir du résidu  $\xi_m$  de l'équation 1.8 obtenu à la fin de chaque localisation et ce pour les deux critères.

La figure 3.15 représente la proportion cumulée d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de  $\xi_m$  sur la poutre p1-1. Les proportions indiquées ici font référence au nombre total d'événements formés au cours de l'essai et non pas aux seuls événements à l'intérieur de la poutre. Indépendamment de la gamme d'erreur  $\xi_m$  observée, la proportion d'événements dont les signaux sont traités par AIC est toujours supérieure à celle des signaux traités par le seuil fixe. Ainsi 48,4% des événements traités par AIC ont un résidu  $\xi_m$  inférieur à 3cm contre 27,7% pour ceux traités par le seuil fixe.

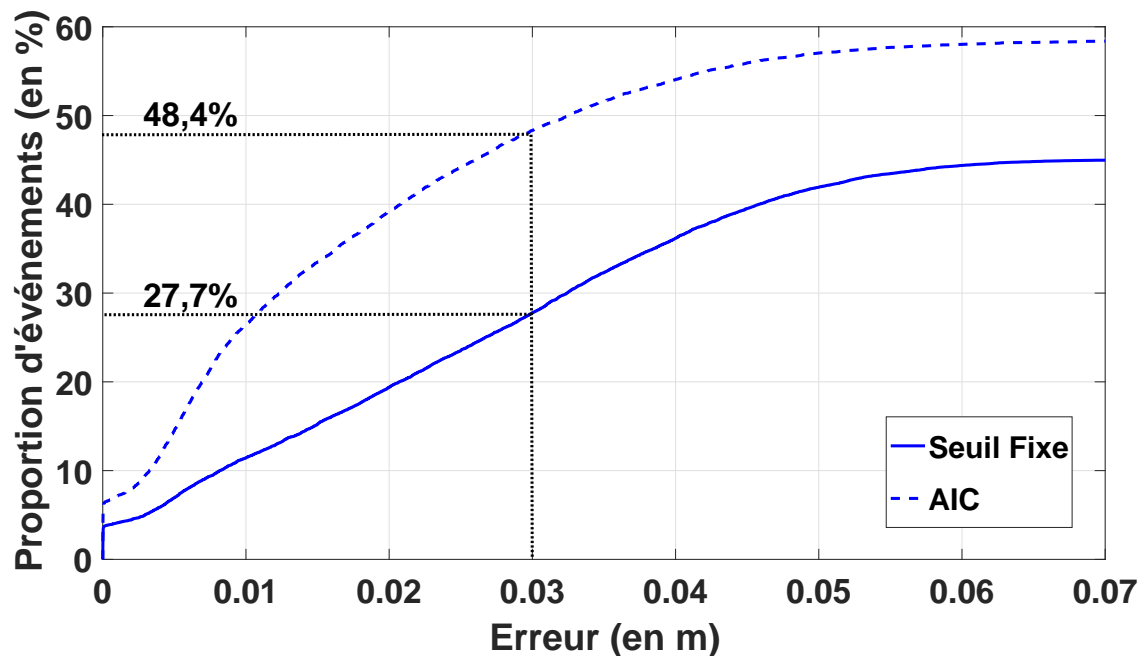


FIGURE 3.15 – Proportion cumulée d'événements en fonction du résidu  $\xi_m$  dans la poutre p1-1 pour deux critères de définition du début de salves. Algorithme de localisation : Gbnm

### 3.5.4 Analyse

Nous venons de voir que (i) comparativement au seuil fixe, l'utilisation du critère d'Akaike a pour effet de recentrer les événements à proximité de la fissure avec une

distribution croissante à mesure que l'on s'en rapproche, (ii) la proportion d'événements localisés pour n'importe quelle erreur  $\xi_m$  est systématiquement supérieure avec le critère d'Akaike, et (iii) sur la totalité des événements formés au cours de l'essai, un plus grand pourcentage d'événements est localisé à l'intérieur de la poutre avec AIC.

La différence de proportions d'événements localisés en fonction de l'erreur indique que le choix du critère de détermination du début de salve a une influence sur la capacité de l'algorithme à faire converger le résidu  $\xi_m$  vers 0. Ce résultat peut être expliqué par l'effet du critère de détermination du début des salves sur le processus de localisation. Comme nous l'avons vu dans la section 1.5.2, il existe un ensemble de  $dt_i^k$  associé à chaque position dans le milieu de propagation. En revanche tous les ensembles de  $dt_i^k$  imaginables ne sont pas possibles. Par exemple si l'on se réfère à la répartition des capteurs en 2D de la figure 1.19, il n'est pas possible de trouver l'ensemble de retards présentés sur l'équation 3.1. Ces retards signifieraient que la source est équidistante de chacun des capteurs ce qui n'est possible que lorsque les capteurs sont placés aux sommets d'un carré ou sur un arc de cercle.

$$\begin{pmatrix} dt_1^1 = 0 \\ dt_4^2 = 0 \\ dt_2^3 = 0 \\ dt_3^4 = 0 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Ainsi les ensembles de retards  $dt_i^k$  possibles dépendent essentiellement de la répartition des capteurs. De plus, peu importe la répartition des capteurs, il y aura toujours un ensemble limité de  $dt_i^k$  possibles.

Une mauvaise détermination du début des salves peut mener à un ensemble de retards qui ne sont pas possibles vis à vis des hypothèses posées au début de ce chapitre. En effet si l'ensemble de  $dt_i^k$  mesuré n'est pas envisageable alors l'algorithme ne pourra pas faire converger le critère de minimisation vers 0.

Une autre manière de présenter les résultats obtenus serait donc que l'utilisation du critère d'Akaike permet de calculer des ensembles de  $dt_i^k$  plus réalistes et permette donc à l'algorithme de faire converger plus efficacement le critère d'erreur vers 0 pour un plus grand nombre d'événements. Il résulte de cette fiabilisation de la localisation un recentrage des événements autour de la fissure observée ainsi qu'une

augmentation du nombre d'événements localisés à l'intérieur de la poutre.

### 3.6 Effet de l'algorithme de minimisation

Dans cette partie nous allons comparer la localisation des événements en fonction des algorithmes présentés ci-dessus. Compte tenu des résultats obtenus dans la section précédente, les signaux des événements localisés sont systématiquement traités par le critère d'Akaike. Le nombre d'événements initial et les signaux traités sont identiques. Seule diffère la manière avec laquelle a été résolu le problème de minimisation. Comme pour les critères de début de salve, deux types de comparaisons sont proposées. La première est quantitative. Elle se base sur les cartes de localisation ainsi que sur la distribution des événements. La seconde comparaison est quantitative. Elle se base sur la proportion cumulée d'événements localisés en fonction de l'erreur présentée dans l'équation 1.8.

La figure 3.16 illustre le rôle de l'algorithme de minimisation. Elle représente la valeur de  $\xi$  (eq. 1.7) calculée dans une poutre pour un événement fictif symbolisé par le quart de cercle vert à la position  $p_f(x = 5cm, y = 12cm, z = 8cm)$ . Pour obtenir cette carte, les retards  $\Delta t$  ont été calculés pour l'événement fictif. Ces retards ont été considérés comme « mesurés ». Pour retrouver la position de cet événement, le critère de minimisation  $\xi$  a été calculé sur un maillage très fin dans une zone englobant les capteurs ( $-20cm < x < 20cm$ ). La carte colorée représente la valeur de la fonction  $\xi$  dans différents plans de coupe à l'intérieur de la poutre. L'échelle de couleur indique que le jaune correspond aux valeurs de  $\xi$  les plus grandes et que le bleu foncé correspond au contraire aux valeurs les plus faibles. Cette carte fait apparaître le minimum de la fonction  $\xi$  à la même position que l'événement fictif. En revanche la valeur de la fonction est d'autant plus grande que l'on se rapproche des capteurs (rouges et roses). L'objectif de l'algorithme de minimisation consiste à trouver le minimum de cette fonction dans un temps de calcul acceptable. Dans le cas présent la fonction  $\xi$  a été évaluée sur plus de 12 millions de points ce qui a nécessité 3,7s. Rapporté au nombre d'événements enregistrés sur nos essais (10000 à 15000) le temps de calcul serait systématiquement supérieur à 10 heures.

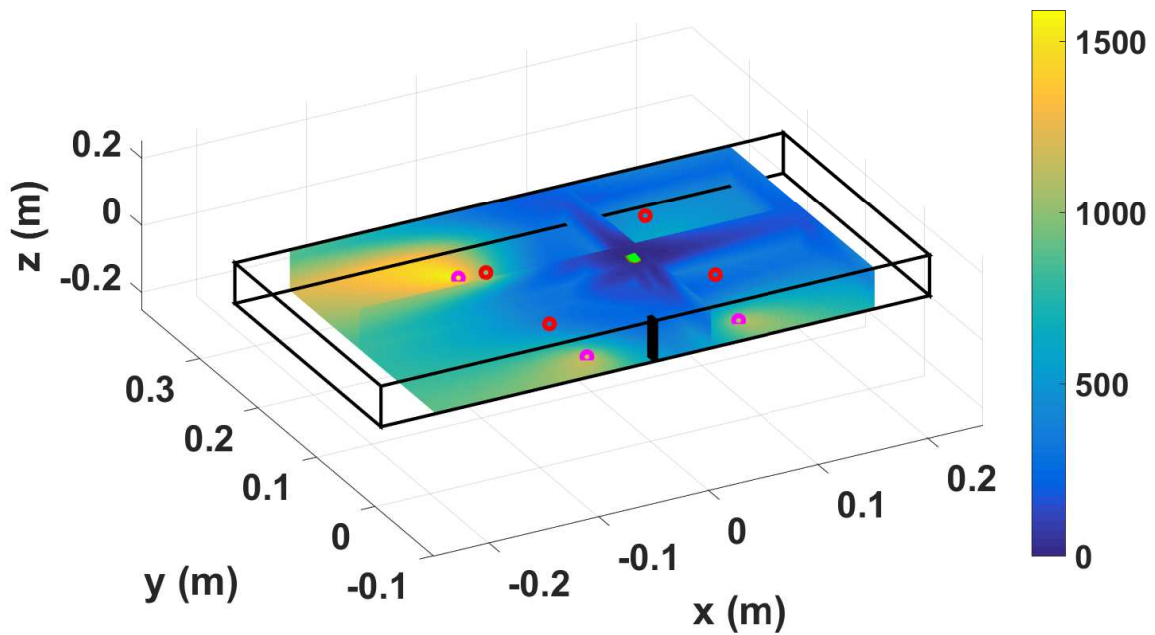


FIGURE 3.16 – Distribution des événements dans les trois directions. Comparaison entre les algorithmes Gbnm, de maillage adaptatif et génétique.

### 3.6.1 Descriptif et paramètres d'entrée des algorithmes de localisation utilisés

#### Algorithme des Simplex

Pour pallier les contraintes liées à l'algorithme des simplex présenté dans le paragraphe 1.5.4 une version différente des simplex appelée GBNM pour « globalized and bounded Nelder-Mead » [88] a été utilisée. Cette version de l'algorithme utilise un ensemble de positions initiales réparties aléatoirement dans l'espace désiré. Il permet en outre de définir des limites aux solutions recherchées ce qui est utile dans le cas de localisation de sources dans un espace fermé. Les paramètres d'entrée de l'algorithme utilisé sont détaillés dans le tableau 3.2.

#### Algorithme par maillage adaptatif

Contrairement à Gbnm, l'algorithme par maillage adaptatif (AMA) recherche la solution idéale parmi un grand nombre de positions initiales couvrant la zone

options	valeurs
Nombre initial de positions	50
Coefficient de reflexion	1
Coefficient de contraction	0,5
Coefficient d'expansion	2

TABLE 3.2 – Paramètres d'entrée de l'algorithme GBNM.

d'intérêt. Ces positions initiales sont les nœuds d'un maillage préalablement défini. La position retenue comme solution du problème est celle pour laquelle le résidu calculé  $\xi$  est le plus faible. Afin d'éviter un trop grand nombre de calculs sur un maillage trop fin, plusieurs maillages successifs appelés aussi maillages de raffinement sont appliqués. Chaque maillage de raffinement est centré sur la solution du maillage précédent et couvre une zone plus petite, la distance entre ses nœuds est aussi réduite. La figure 3.17 représente les trois maillages successifs utilisés pour tous les essais réalisés en laboratoire. Le tableau 3.3 regroupe les caractéristiques de chacun de ces maillages.

	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 2
Nombre de nœuds selon Ox	51	21	15
Nombre de nœuds selon Oy	26	21	15
Nombre de nœuds selon Oz	13	21	15
Distance entre les nœuds	1 <i>cm</i>	5 <i>mm</i>	2 <i>mm</i>
Volume occupé par le maillage	15000 <i>cm</i> <sup>3</sup>	1000 <i>cm</i> <sup>3</sup>	21,6 <i>cm</i> <sup>3</sup>
Nombre total de nœuds	17238	9261	3375

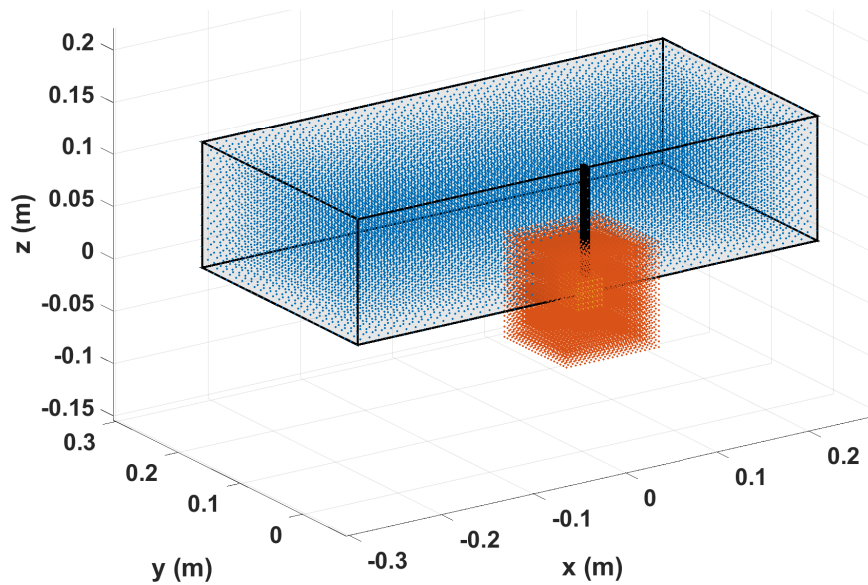
TABLE 3.3 – Caractéristiques des maillages AMA.

L'algorithme par maillage adaptatif peut être résumé ainsi :

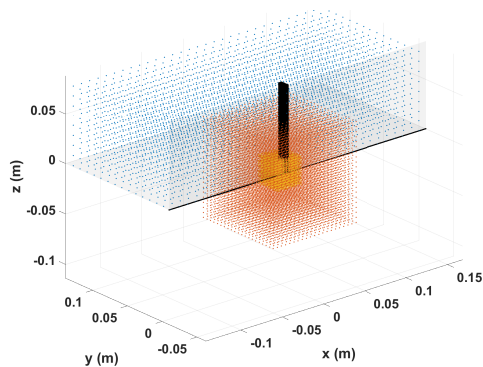
1. un maillage initial couvrant la zone d'intérêt est construit,
2. les temps d'arrivée et retards entre capteurs sont calculés pour chacun des nœuds du maillage,
3. l'erreur  $\xi$  entre les retards mesurés et les retards associés à chacun des nœuds du maillage est calculée. La position du nœud pour laquelle le résidu est le

plus faible est conservée,

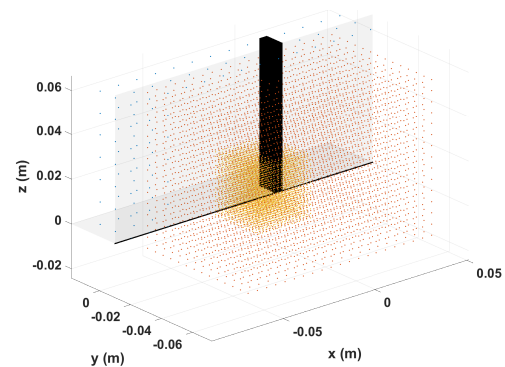
4. un maillage raffiné est appliqué avec pour position centrale la position retenue à l'étape 3,
5. retour à l'étape 2 avec le maillage obtenu à l'étape 4 jusqu'au dernier maillage,
6. la position du dernier maillage fournissant l'erreur la plus petite est considérée comme solution du problème.



(a) Premier maillage (bleu). Distance entre les nœuds :  $1\text{cm}$ .



(b) Deuxième maillage (orange). Distance entre les nœuds :  $5\text{mm}$ .



(c) Troisième maillage (jaune). Distance entre les nœuds :  $2\text{mm}$ .

FIGURE 3.17 – Exemple de 3 maillages successifs appliqués par l'algorithme AMA.

## Algorithme génétique

L'algorithme génétique (AG) recherche une solution à partir d'un ensemble de positions initiales générées aléatoirement dans un espace donné. Les meilleures solutions parmi les positions initiales sont conservées pour en former de nouvelles. Cette étape est répétée jusqu'à ce que la valeur de  $\xi$  désirée soit atteinte. Les étapes de l'algorithme sont les suivantes :

1. un ensemble de positions initiales est généré dans un espace prédéfini,
2. les retards sur les capteurs associés à ces positions sont calculés, l'erreur  $\xi$  associée à ces positions est évaluée,
3. les positions associées aux  $\xi$  les plus faibles sont conservées (Ex : 50%),
4. des couples de positions sont formés. Ces couples sont appelés « parents »,
5. de nouveaux couples de positions appelés « enfants » sont formés à partir des parents. Par exemple en 1D le couple de parents  $(x_1, x_2)$  donne les deux enfants  $(x'_1, x'_2)$  avec  $x'_1 = \frac{x_1+x_2}{2}$  et  $x'_2 = \frac{x_1-x_2}{2}$ ,
6. retour à l'étape 2 avec les enfants comme nouvel ensemble de positions initiales tant que le critère de précision n'est pas atteint.

Les paramètres d'entrée de l'algorithme génétique sont présentés dans le tableau 3.4.

options	valeurs
Fonction génératrice de la première population	gacreationuniform
Fonction de croisement	crossoverscattered
Fraction de la population à la prochaine génération	80%
Critère d'arrêt de la convergence sur la fonction	$1.10^{-6}$
Fonction de mutation	mutationgaussian
Bornes de la population initiale (cm)	x[-25;25] et y[-1;24]

TABLE 3.4 – Paramètres d'entrée de l'algorithme génétique.

### 3.6.2 Cartes de localisation et distribution des événements

La figure 3.19 présente les cartes de localisation obtenues à l'issue du traitement par AMA (figure 3.19(a)) et par GA (figure 3.19(b)). Ces deux cartes sont à comparer avec celle de la figure 3.13(b) obtenue avec l'algorithme Gbnm. Les cartes obtenues via GA ou SA sont quasiment identiques. En revanche la zone d'activité acoustique sur la carte obtenue par AMA est plus diffuse autour de l'axe principal de la fissure. Ces différences se retrouvent sur les distributions d'événements de la figure 3.18. Les distributions GA (jaune) et SA (bleu) sont équivalentes dans les trois directions. Le maximum des distributions selon  $Ox$  est identique pour GA et SA (16,7%) en  $x = 0$  alors que le maximum pour AMA est de 13,4% en  $x = -1cm$ . De plus une concentration d'événements toujours anormale sur les bords de l'éprouvette est observée pour AMA selon  $Oy$  et  $Oz$ .

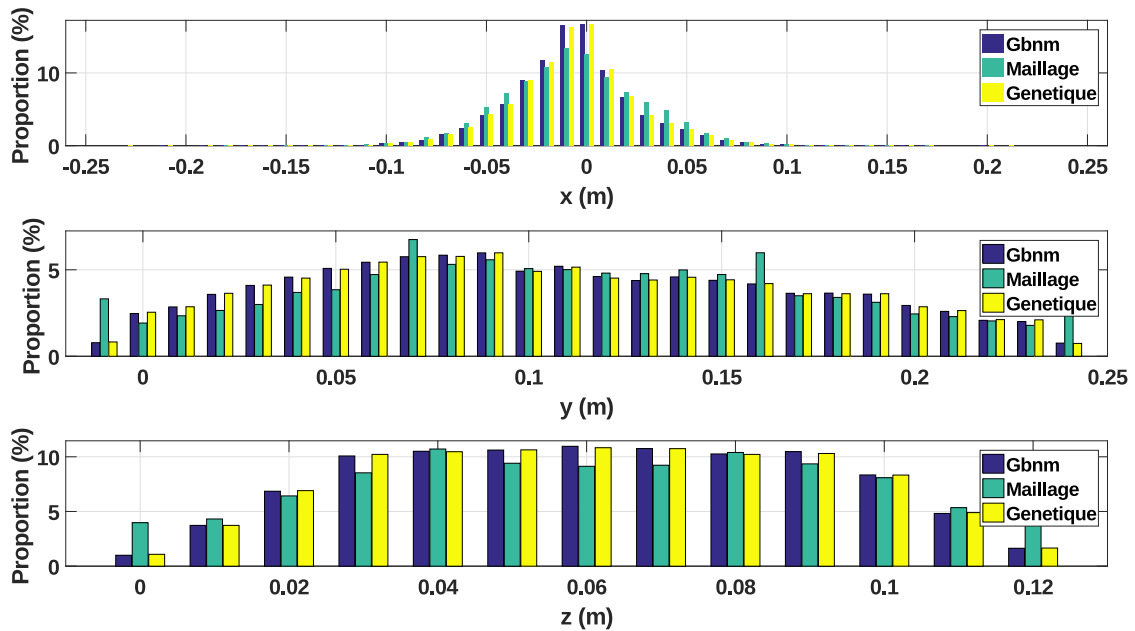
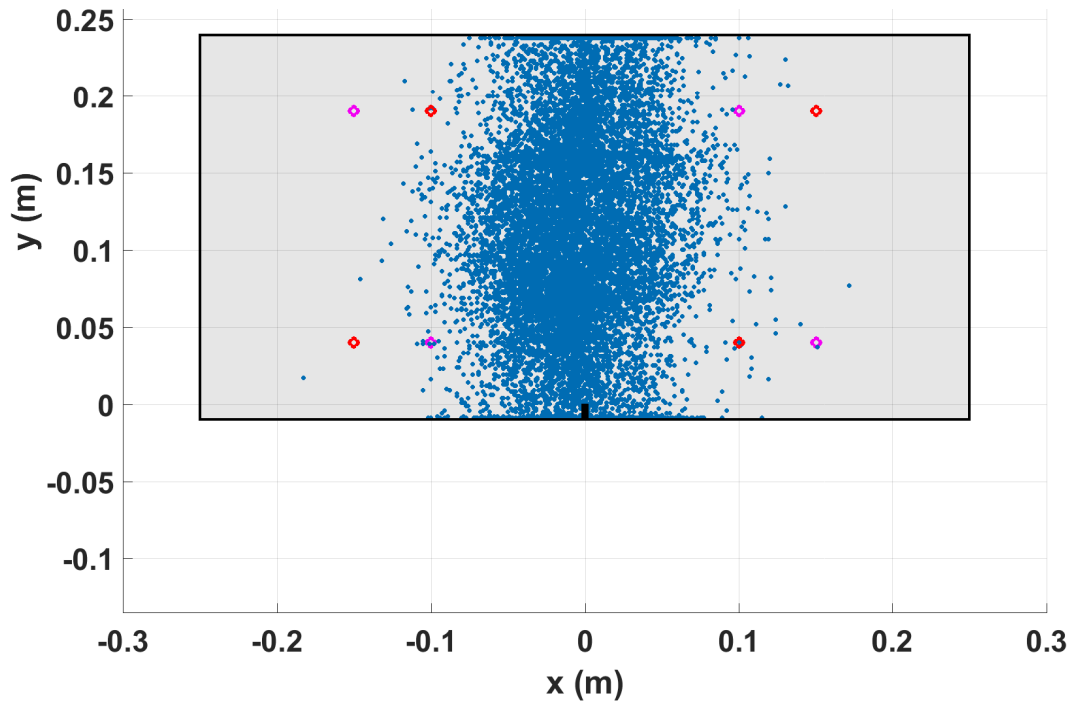


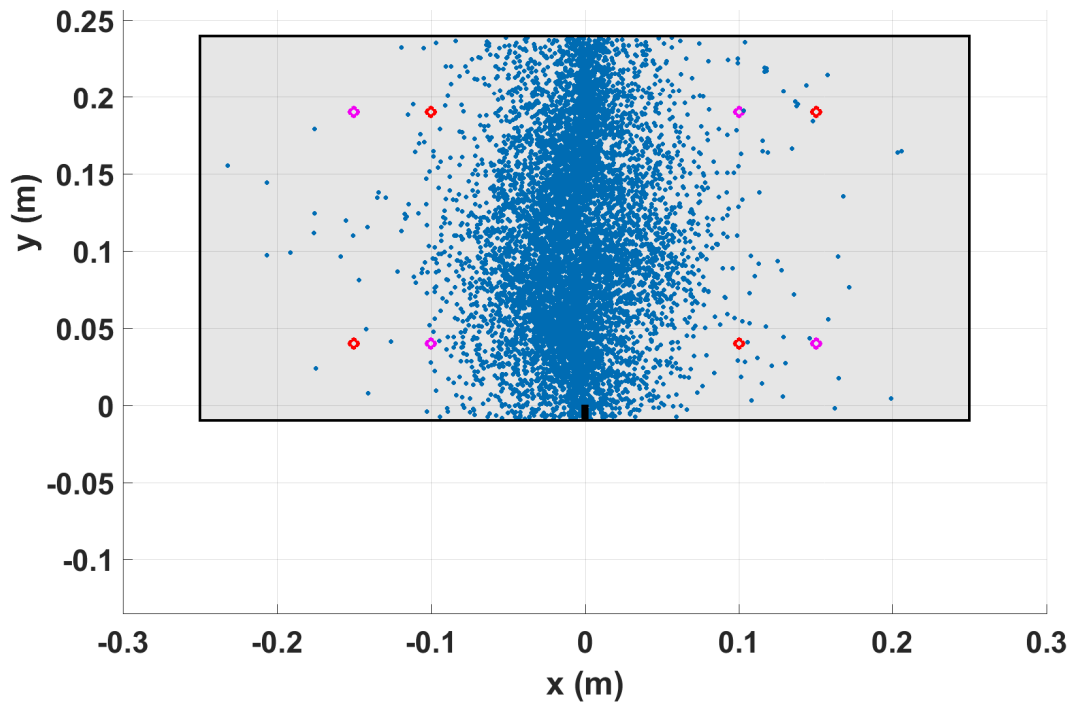
FIGURE 3.18 – Distribution des événements dans les trois directions. Comparaison entre les algorithmes Gbnm, maillage adaptatif et génétique.

Les résultats présentés ici pour les cartes de localisation et les distributions d'événements sont à relativiser compte tenu du nombre d'événements comparés pour chaque stratégie. En effet nous avons vu dans le tableau 3.5 que l'utilisation d'AMA a permis de conserver plus de 18% d'événements supplémentaires dans la poutre





(a) Algorithme par maillage adaptatif (AMA).



(b) Algorithme génétique (GA).

FIGURE 3.19 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Utilisation de AMA (a) et de l’algorithme génétique (b).

par rapport aux autres algorithmes. Rapportés aux valeurs absolues d'événements les maximums de distribution selon  $Ox$  sont de 1427 événements pour AMA, 1347 pour Gbnm et 1356 pour l'algorithme génétique. La densité d'événements autour de l'axe principal de la fissure est donc légèrement supérieure dans le cas d'AMA. D'autre part et toujours compte tenu des résultats présentés dans le tableau 3.5 les proportions d'énergies sont quasiment identiques.

### 3.6.3 Proportion cumulée d'événements en fonction de l'erreur $\xi_m$

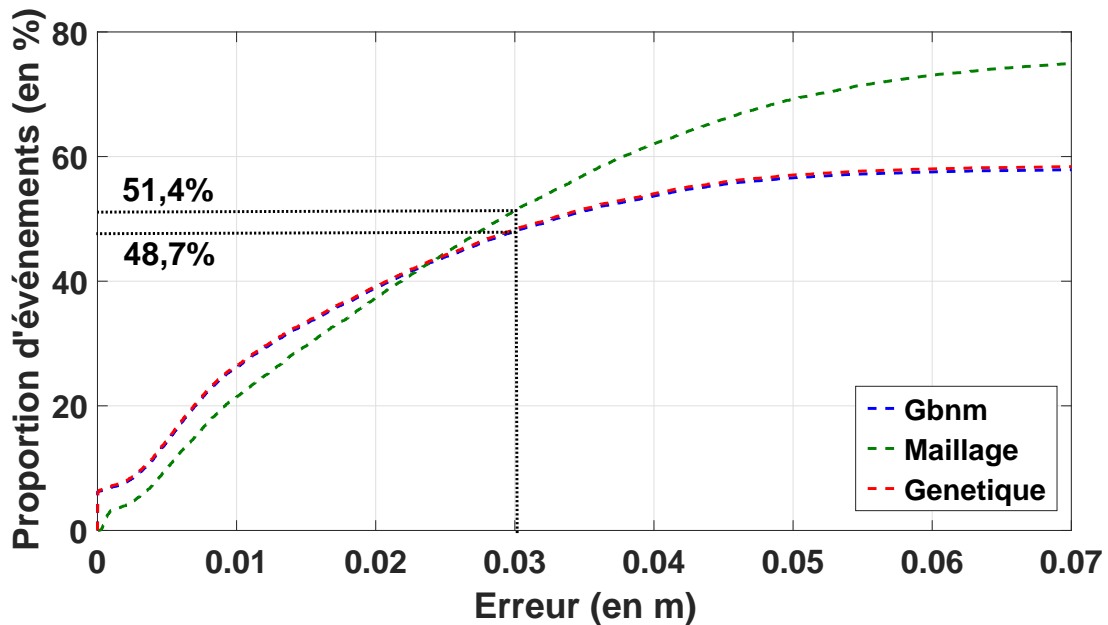


FIGURE 3.20 – Proportion cumulée d'événements en fonction du résidu  $\xi_m$  pour trois algorithmes de minimisation. Critère de détermination du début des salves : AIC.

La figure 3.20 représente la proportion cumulée d'événements localisés à l'intérieur de la poutre p1-1 en fonction de  $\xi_m$ . Comme pour la comparaison des critères de détermination du début des salves, les proportions indiquées ici font référence au nombre total d'événements formés au cours de l'essai et non pas aux seuls événements à l'intérieur de la poutre. Les algorithmes SA et GA sont confondus sur toute la gamme d'erreurs observée. En revanche la pertinence de l'algorithme AMA dépend de l'erreur observée. En effet, la proportion d'événements localisés avec une erreur  $\xi_m < 2,4\text{cm}$  est systématiquement supérieure pour les algorithmes SA et GA.

En revanche AMA permet de localiser un plus grand nombre d'événements pour des erreurs supérieures. Par exemple pour une erreur  $\xi_m \leq 3\text{cm}$  les algorithmes SA et GA conservent 48,7% de ces événements contre 41,4% pour AMA. Cette différence de proportions est croissante en fonction de l'erreur.

### 3.7 Conclusion

Ce chapitre propose de montrer l'influence de deux composantes fondamentales de la localisation sur la représentation de la zone d'activité acoustique. La première partie du travail présenté concerne le filtrage des données. Le filtrage des signaux d'EA par le critère énergétique a permis de conserver 96% des salves initialement enregistrées. Ce type de filtrage original a permis en outre de souligner l'importance de la détermination du début des salves dans le calcul de tous les paramètres qui en découlent. La pertinence de cette méthode de filtrage repose en partie sur l'utilisation du critère d'Akaike.

Les résultats obtenus sur la localisation montrent l'influence prépondérante du critère de détermination du début des salves. On observe en effet une proportion d'événements conservés supérieur dans le cas de l'utilisation du critère d'Akaike (figure 3.21). Par ailleurs la concentration des événements est deux fois plus importante sur l'axe principal de la fissure pour les événements traités par AIC (figure 3.22).

L'influence de l'algorithme est moins évidente puisqu'il ne modifie pas fondamentalement la carte de localisation et les distributions d'événements (figure 3.22). Le choix de l'algorithme dépend essentiellement d'autres critères comme les temps de calcul ou la précision voulue des résultats.

Le choix de la stratégie adoptée a en outre une influence sur la proportion d'événements localisés à l'intérieur de la poutre (tableau 3.5). On observe par ailleurs que la proportion d'énergie conservée est systématiquement supérieure à 92,6% et ce indépendamment de la stratégie employée. Ainsi le filtrage relativement important du nombre d'événements n'aura qu'un impact limité sur une analyse énergétique de l'endommagement.

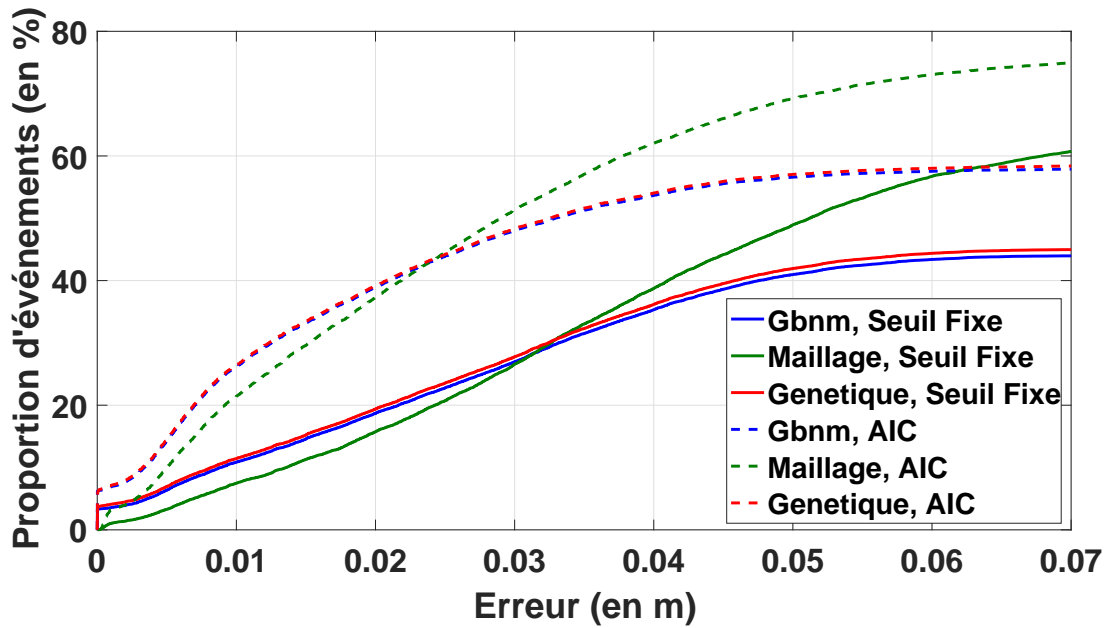


FIGURE 3.21 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu  $\xi_m$  et pour toutes les stratégies de localisation étudiées.

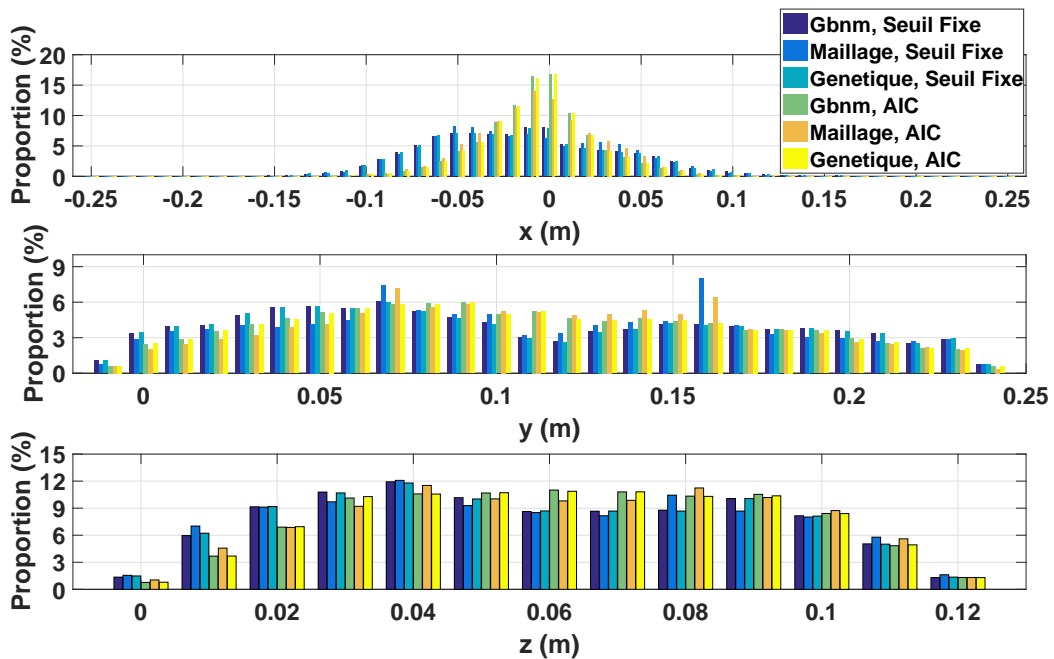


FIGURE 3.22 – Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-1.

Algorithme	Gbnm		Maillage		Genetique	
	SF	AIC	SF	AIC	SF	AIC
Critère de début de salve						
Proportion d'événements localisés à l'intérieur (%)	44,1	58,0	65,3	76,6	45,1	58,4
Proportion d'énergie associée (%)	92,6	96,8	97,4	97,2	94,5	96,8

TABLE 3.5 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-1. Nombre d'événements initial : 13909.

# Chapitre 4

## Suivi de l'endommagement et de la propagation de fissure

### 4.1 Introduction

Les cartes de localisation telles que présentées dans le chapitre 3 ainsi que dans l'annexe B font apparaître une zone d'activité acoustique relativement large autour de la fissure. De plus la distribution des événements est inégale dans la direction perpendiculaire à l'axe principal de la fissure. En effet, dans cette direction la concentration des événements est d'autant plus importante que l'on se rapproche de la fissure. La densité spatiale des événements représente donc un indicateur intéressant pour localiser l'endommagement et la fissure.

En se basant sur les résultats de la localisation, ce chapitre propose différentes analyses de la propagation de l'endommagement et donc du suivi de la fissuration. Ces analyses consistent à étudier l'évolution des densités spatiales d'événements et d'énergies dans les poutres au cours de leur endommagement. Elles sont appliquées dans le cas des essais de flexion 3 points ainsi que lors des essais d'endommagement thermique.

En ce qui concerne les essais de flexion 3 points, une attention particulière sera portée sur la poutre p1-2 pour laquelle les données présentées sont comparées avec les résultats de suivi de propagation de fissure par video-corrélation. Cette technique

employée par le laboratoire LMDC au cours de l'essai permet d'évaluer la hauteur de la fissure sur la surface de la poutre à partir de l'observation de ses déformations. Les données issues de la video-corrélation sont dans un premier temps comparées aux distributions cumulées d'événements et d'énergie dans l'espace. Dans un second temps, les mêmes données sont comparées aux cartes de densité d'événements et d'énergie présentées dans ce chapitre. Les résultats concernant l'endommagement d'origine thermique se focaliseront sur la poutre p1-5. Pour cette poutre, une analyse sur les cartes de densité est proposée. Tous les résultats analogues sur les autres poutres seront présentés dans l'annexe C.

Les cartes présentées, les proportions d'événements et d'énergies font référence à la somme des événements conservés suite à l'application des critères de filtrage suivants :

- seuls les événements localisés à l'intérieur de la poutre sont conservés,
- seuls les événements dont l'erreur numérique sur la localisation  $\xi_m$  est inférieure ou égale à  $1cm$  sont conservés.

Compte tenu des résultats obtenus dans le chapitre précédent et des filtres appliqués ici, les données présentés dans ce chapitre ont été obtenues par un traitement des salves par critère d'Akaike. L'algorithme de localisation retenu est l'algorithme génétique.

## 4.2 Construction des cartes de densités

La méthodologie employée consiste dans un premier temps à découper les essais en différentes phases temporelles. Le détail de ces coupes est présenté dans les sections relatives à chaque type d'essai. Les cartes de densités associées à chacune de ces phases sont ensuite présentées afin d'observer la progression des zones d'activité acoustique et énergétique au cours de l'essai. A cette étude, basée sur les cartes de densité, est ajouté dans le cas de la flexion 3 points une comparaison entre la hauteur de fissure obtenue via video-corrélation et la distribution spatiale des événements et des énergies.

## 4.2.1 Méthode de calcul des densités d'événements et d'énergies

La figure 4.1 représente le principe de calcul des cartes de densités d'événements. Sur cette figure le schéma de gauche représente une carte de localisation où les événements projetés dans le plan  $xOy$  sont symbolisés par des points bleus. Le nombre d'événements présent dans chaque maille d' $1cm$  de côté est calculé pour obtenir le schéma de droite. La densité d'événements donne ainsi une indication des zones d'activités acoustiques dans l'espace.

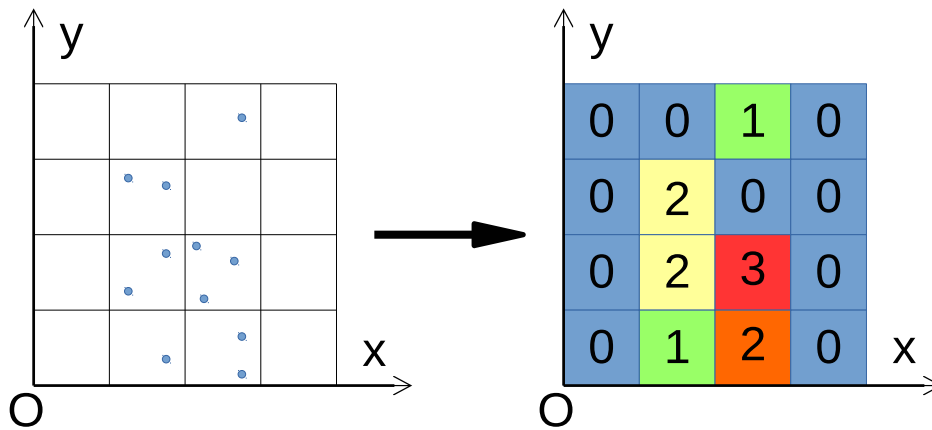


FIGURE 4.1 – Principe du calcul des densités spatiales d'événements.

La figure 4.2 représente quant à elle le principe de calcul des cartes de densités d'énergies. La différence avec la densité d'événements réside dans le fait que chaque événement est pondéré par l'énergie qui lui est associée. Ce type de représentation offre donc une indication des zones d'activité acoustique de forte énergie. Comme on peut le voir dans l'exemple présenté aux figures 4.1 et 4.2, une même carte de localisation peut mener à des cartes de densités très différentes en fonction de la répartition des énergies dans les événements.

## 4.2.2 Calcul de l'énergie associée à un événement

L'énergie associée à chaque événement se base sur l'énergie contenue dans chacun des signaux qui forme l'événement. L'équation 4.1 représente l'énergie d'un signal



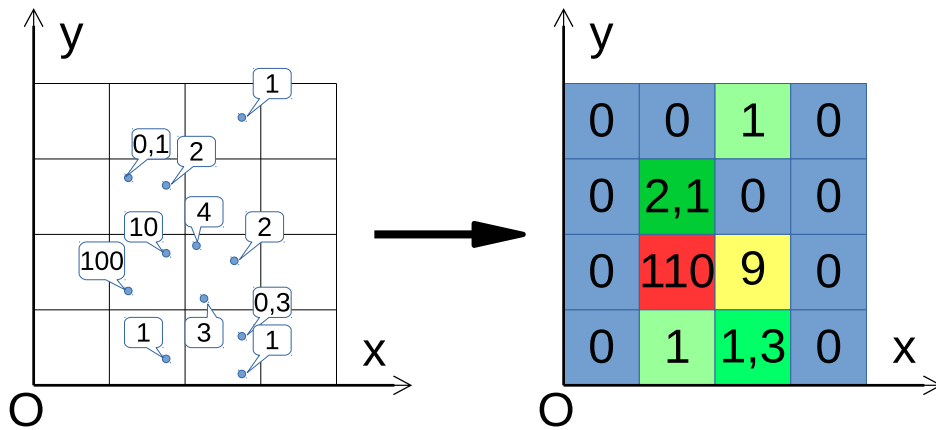


FIGURE 4.2 – Principe du calcul des densités spatiales d'énergies.

comme la somme des amplitudes élevées au carré.

$$e = \sum_{i=1}^{i=n} s_i^2 \quad (4.1)$$

où :

- $e$  représente l'énergie du signal  $s$ ,
- $s_i$  est l'amplitude (en Volts) du signal au point  $i$ ,
- $n$  est le nombre total de points du signal  $s$ .

A partir de l'équation 4.1, l'énergie d'un événement est définie comme la moyenne des énergies des signaux (eq. 4.2). Prendre la moyenne des énergies des signaux permet de s'affranchir du nombre de signaux contenus dans un événement. Ce nombre peut varier de 4 à 8.

$$E = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} e_j}{N} \quad (4.2)$$

ou :

- $E$  représente l'énergie de l'événement,
- $e_j$  est l'énergie du signal  $j$ ,
- $n$  est le nombre de signaux qui forment l'événement.

Ce qui est appelé ici « énergie » n'est pas homogène à des joules mais à des  $[volts]^2$ . Cette grandeur reste directement proportionnelle à l'énergie reçue par chaque capteur. Dans notre cas d'étude la conversion est secondaire car nous ne nous intéressons qu'à des comparaisons qualitatives normalisées.

### 4.2.3 Représentation des densités d'énergie à l'aide d'une échelle logarithmique

La figure 4.3 représente la distribution des événements de la poutre p1-5 en fonction de leur énergie sur une échelle logarithmique. L'énergie associée aux événements est exprimée en  $dB$  à l'aide de l'équation 4.3 :

$$E_{j(dB)} = \log \left( \frac{E_j}{\min\{E\}} \right) \quad (4.3)$$

avec  $\min\{E\}$  la plus petite énergie associée à un événement. Cette valeur sert de référence ( $0dB$ ). La conversion en  $dB$  permet de représenter les grandes disparités d'énergie entre les événements. Chaque saut de  $1dB$  correspond à un ordre de grandeur supérieur ( $\times 10$ ). Dans le cas présenté ici, l'événement de plus forte énergie contient  $10^7$  fois plus d'énergie que le plus faible. Une échelle colorimétrique linéaire ne permettrait pas de rendre compte de telles disparités de grandeurs d'où le choix du calcul logarithmique. Afin de rendre les représentations les plus lisibles possible, une échelle colorimétrique logarithmique sera utilisée. En revanche les valeurs associées seront des proportions d'énergie.

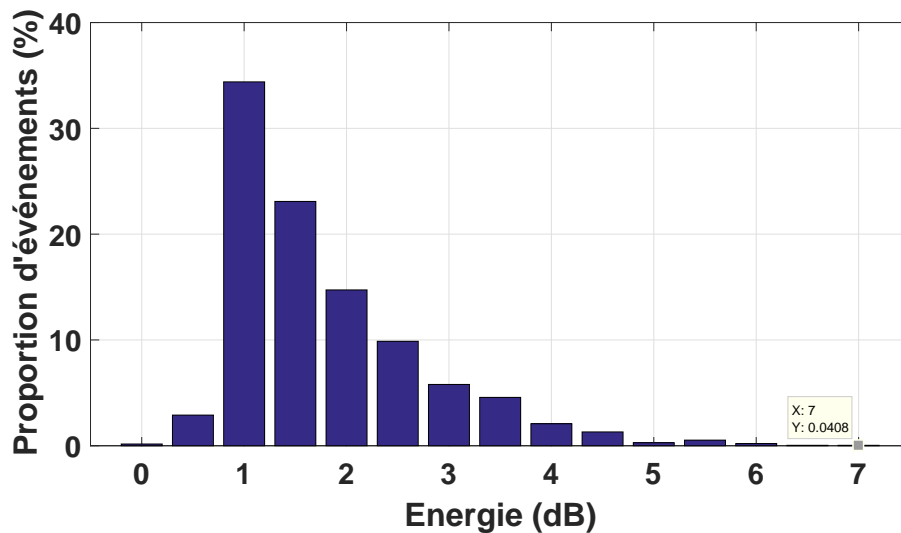


FIGURE 4.3 – Distribution des événements en fonction de leur leur énergie. Poutre p1-5.

## 4.3 Application aux essais de flexion 3 points

Le déroulement des essais de flexion 3 points est présenté dans la sous-section 3.2. Les données concernant la flexion 3 points présentées dans ce chapitre sont issues de la poutre p1-2. Les données analogues liées aux poutres p1-1 et p1-3 sont présentées dans l'annexe C.

### 4.3.1 Découpage de l'essai en phases

La figure 4.4 illustre le découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-2. La courbe donnant l'évolution de la force est en bleu, sa valeur est donnée par l'axe de gauche. La courbe verte représente la proportion d'événements cumulés au cours de l'essai. La proportion d'énergie reçue associée est en rouge. Les valeurs de ces deux dernières courbes se lisent sur l'axe de droite. Chaque phase de temps numérotée de 1 à 12 est représentée par une surface en nuance de rouges. Chacune de ces phases correspond à une étape particulière de l'essai. Les phases 3, 5, 8, 11 et 12 correspondent à la propagation de la fissure. Les phases 4, 6, 7, 9 et 10 correspondent aux étapes de déchargement ou rechargement dans les cycles post-pic. La vitesse d'ouverture d'entaille est de  $2\mu m.min^{-1}$  au cours des phases 1 à 9 et de  $20\mu m.min^{-1}$  pour les phases 10 à 12.

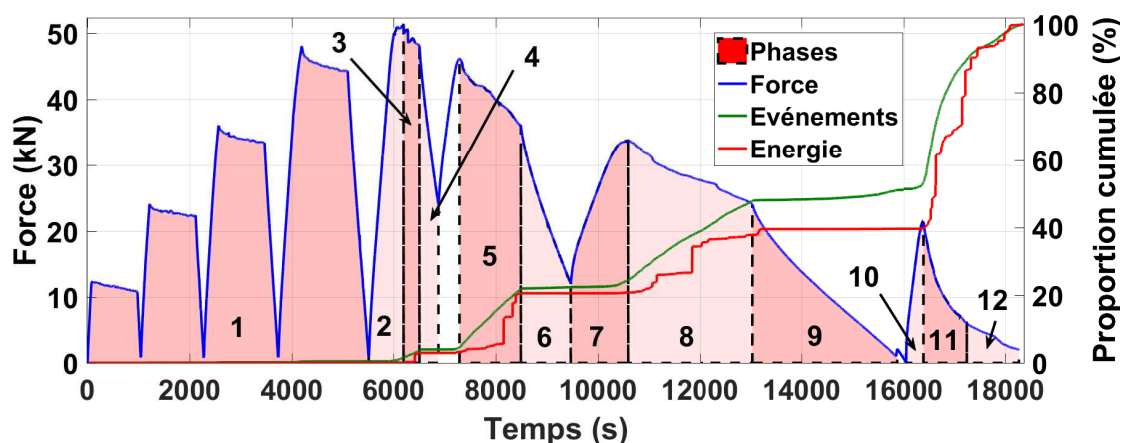


FIGURE 4.4 – Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-2 en 12 phases.

### 4.3.2 Activité acoustique et énergétique au cours des essais

On observe sur la figure 4.4 l'absence de libération d'énergie dans la partie pré-pic. L'augmentation de l'énergie se fait ensuite par paliers séparés par des sauts de libération d'énergie. Ces sauts sont présents uniquement dans les phases de propagation de fissure et représentent 2,5% de l'énergie totale libérée dans la phase 3 à plus de 11% dans la phase 11. L'accroissement de la proportion d'événements reçus est monotone sur chacune des phases 3 à 9. La vitesse de cet accroissement dépend de la nature de la phase observée puisqu'elle est de l'ordre de  $0,02\%.min^{-1}$  lors des cycles et de  $0,58\%.min^{-1}$  pendant les phases de propagation de fissure. L'accroissement de la proportion d'événements reçus au cours des phases 11 et 12 n'est en revanche pas monotone même s'il reste proportionnel à la vitesse de déchargement.

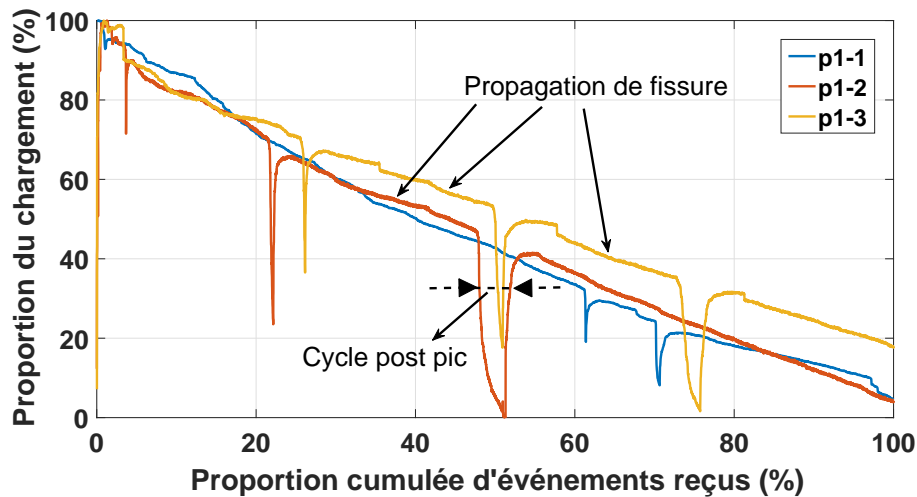
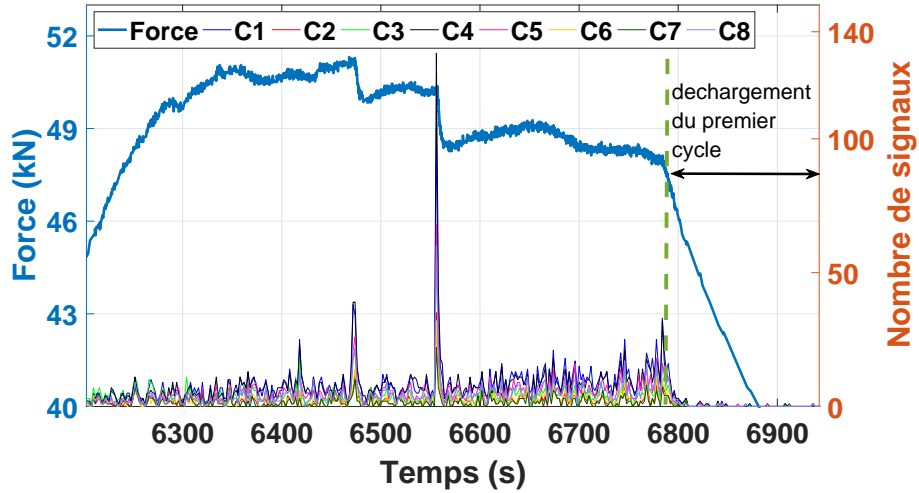


FIGURE 4.5 – Proportion du chargement en fonction de la proportion cumulée d'événements au cours de l'essai.

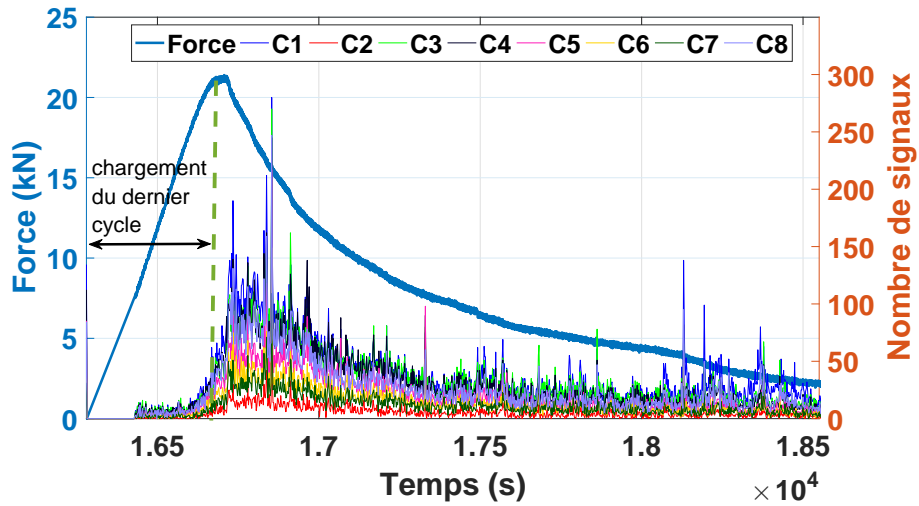
La figure 4.5 représente la proportion du chargement appliqué aux poutres en fonction de la proportion cumulée d'événements reçus au cours de chaque essai. On observe dans la partie post pic des poutres p1-2 et p1-3 et en dehors des cycles une relation linéaire entre ces deux grandeurs lors des phases de propagation de fissure. Le cas de la poutre p1-2 est particulièrement intéressant puisque la vitesse d'ouverture d'entaille est multiplié par 10 ( $2$  à  $20 \mu m.min^{-1}$ ) dans la dernière phase de propagation de fissure. Malgré cette modification de vitesse d'ouverture, la proportion d'événements reçus reste linéaire en fonction du taux de chargement. La relation

linéaire sur la poutre p1-1 est moins évidente. En effet la proportion d'événements reçus en fonction du déchargement diminue progressivement pour se stabiliser à 50 % du chargement sur une pente identique à celle des deux autres essais.

Les courbes de la figure 4.6 proposent une autre représentation de l'activité acoustique au cours de l'essai. Le nombre de signaux reçus par seconde est représenté



(a) Première phase de propagation de fissure au niveau du pic (vitesse d'ouverture d'entaille :  $2 \mu m.min^{-1}$ ).



(b) Dernière phase de propagation de fissure (vitesse d'ouverture d'entaille :  $20 \mu m.min^{-1}$ ).

FIGURE 4.6 – Force et nombre de signaux enregistrés par seconde en fonction du temps.

en fonction du temps. La figure 4.6(a) représente l'activité acoustique au niveau du pic de chargement. On observe une corrélation entre les pics d'activité observés (jusqu'à 132 signaux par seconde) et les variations brutales de chargement. Les pics précèdent toujours les variations de chargement. La figure 4.6(b) concerne la dernière phase de chargement sur la même poutre. Cette dernière phase a été effectuée à une vitesse d'ouverture d'entaille 10 fois plus importante que pendant le reste de l'essai. L'activité acoustique globale y est plus importante que sur la figure précédente. Les pics observés sur cette deuxième figure sont aussi corrélés à des variations de chargement brutales bien qu'elles ne soient pas visibles sur cette figure. Enfin on observe un comportement identique sur chacun des capteurs. Les pics d'activité sont observés aux mêmes instants.

Pour essayer de quantifier ces variations d'activité, la figure 4.7 représente les temps entre deux salves consécutives sur le capteur 1 au cours de l'essai. Compte tenu des grandes disparités de temps entre deux salves consécutives, les intervalles sont calculés en  $dB$  à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta t_i = \log\left(\frac{t_{i+1} - t_i}{1ms}\right) \quad (4.4)$$

avec  $t_i$  le temps d'arrivée de la  $i^{ime}$  salve. Ainsi un intervalle de 1  $dB$  correspond à 10  $ms$ , 2  $dB$  à 100  $ms$ , 3  $dB$  à 1  $s$ , etc... Sur cette figure, l'axe des abscisses

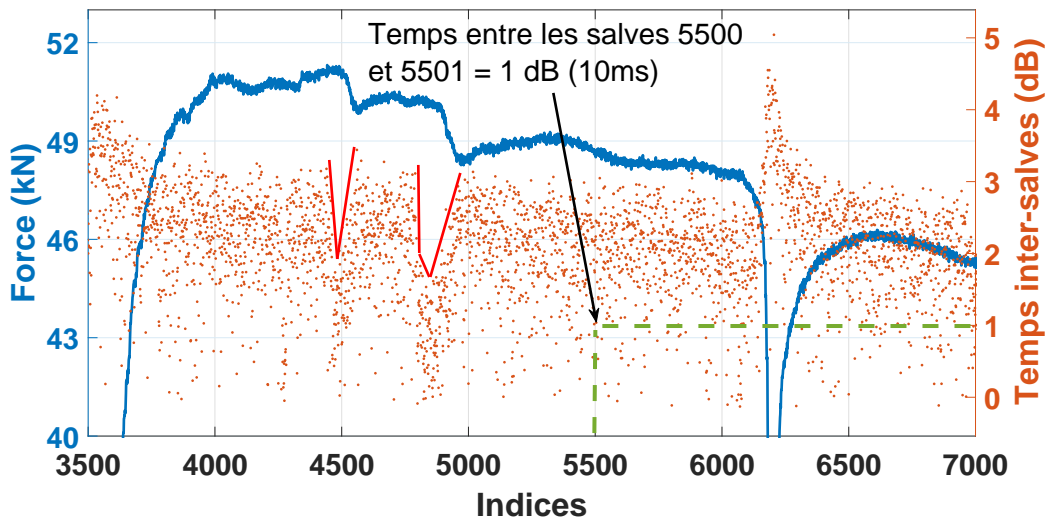


FIGURE 4.7 – Temps inter-salves calculé au niveau du pic de chargement pour pour le capteur 1.

indique l'indice  $i$  des salves reçues dans l'ordre chronologique. La force enregistrée au moment où chaque salve est acquise est représentée en bleu. Les variations brutales de chargement sont précédées par une division des intervalles maximums entre salves d'un facteur 10 (1  $dB$ ). Ces zones de variation de chargement sont donc caractérisées par des intervalles entre salves inférieurs à 100  $ms$  (2  $dB$ ).

### 4.3.3 Résultats de la video-corrélation

La figure 4.8 illustre un exemple de champ de déplacement obtenu par video-corrélation (vc) au cours de l'essai. La hauteur de fissure est déterminée selon la méthode des jauges décrite dans la sous-section 1.3.2.

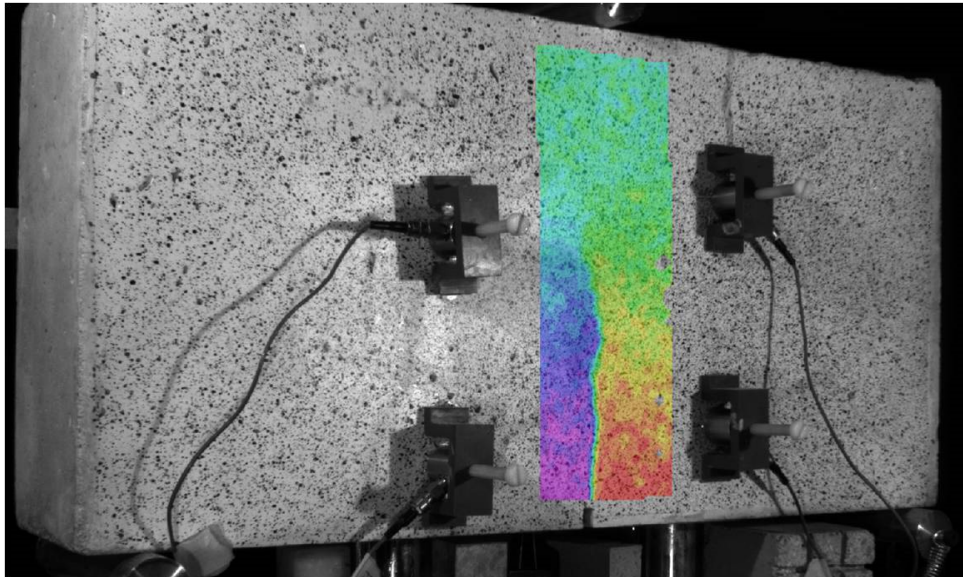


FIGURE 4.8 – Exemple de champ de déformation obtenu sur une poutre en flexion 3 points par video-corrélation.

La figure 4.9 présente les différentes positions de la pointe de fissure sur la surface de la poutre p1-2 au cours du temps. Les 6 valeurs ont été obtenues dans les phases de propagation de fissure. La hauteur affichée de la fissure a pour référence la partie supérieure de l'entaille. La première valeur a été prise au pic de chargement, 3 autres au début, au milieu et à la fin de la phase 4. Enfin les 2 dernières valeurs sont obtenues au cours de la phase 8.

D'après les résultats présentés ici, la video-corrélation permet de détecter une

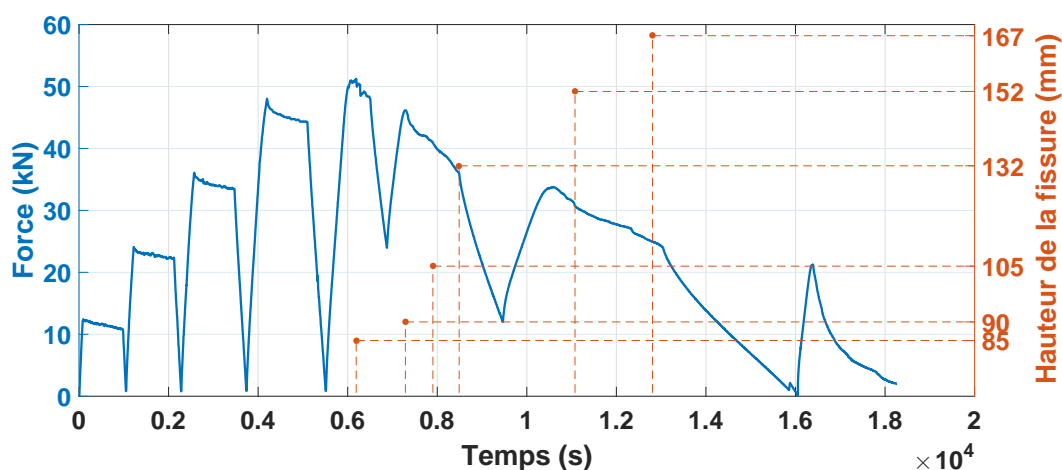


FIGURE 4.9 – Hauteur de la fissure déterminée en surface par la technique de video-corrélation au cours de l’essai sur la poutre p1-2.

fissure dès le pic de chargement à  $8,5\text{cm}$  au dessus de l’entaille. Elle s’étend ensuite progressivement jusqu’à  $16,7\text{cm}$  au dessus de l’entaille au cours des trois premières phases de propagation de fissure (3, 5 et 8).

Les 6 valeurs de hauteur de fissure vont servir de référence et seront comparées aux différents résultats d’EA présentés ci-après. Le tableau 4.1 synthétise les résultats de la video-corrélation.

mesure	1	2	3	4	5	6
$h_{vc}$ (cm)	8,5	9,0	10,5	13,2	15,2	16,7
temps (s)	6190	7288	7902	8489	11080	12810
force (kN)	51,2	46,2	40,9	35,9	30,8	25,0
CMOD (mm)	0,026	0,038	0,059	0,078	0,100	0,157

TABLE 4.1 – Récapitulatif des mesures effectuées par video-corrélation.

#### 4.3.4 Suivi de la fissuration par analyse des densités d’événements et d’énergies

Les données présentées ici concernent les phases de propagation de fissure 2, 3, 5, 8 et 11 de l’essai sur la poutre 1-2.



## Phase 2

La phase 2 se concentre sur la dernière étape de chargement jusqu'au pic (figure 4.10). Les cartes de densités associées sont présentées sur la figure 4.11. Cette phase ne regroupe que 0,9 % de l'activité acoustique et 0,013% de l'énergie reçues au cours de l'essai. Si l'activité acoustique est centrée au niveau de l'entaille (figure 4.11(b)) on observe tout de même quelques événements jusqu'à 10 cm au dessus d'elle.

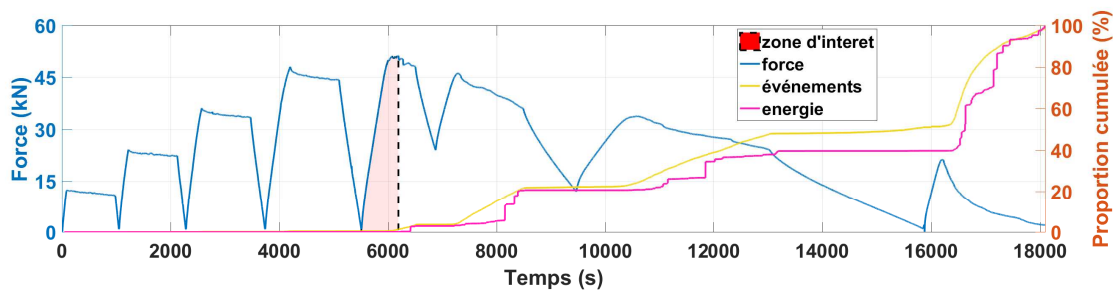


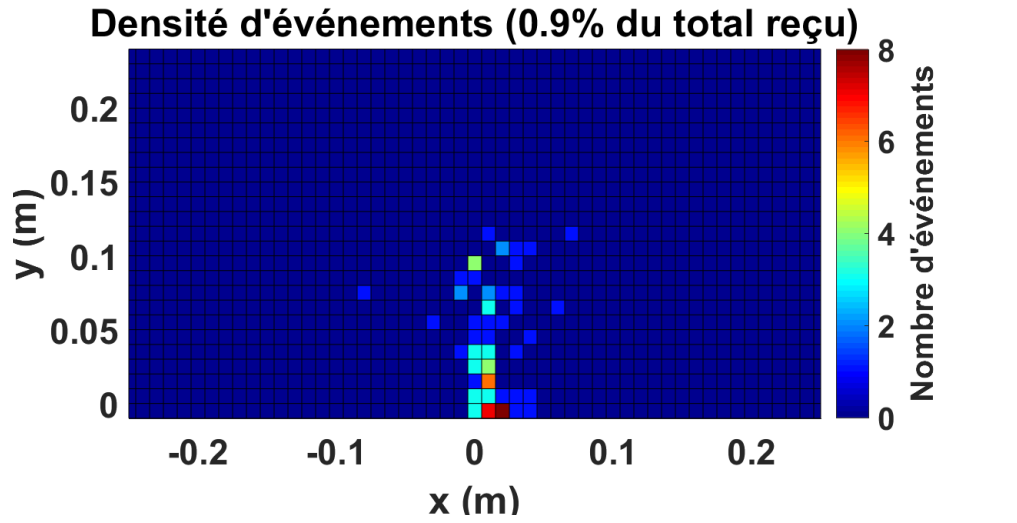
FIGURE 4.10 – Position de la phase numéro 2 au cours de l'essai.

L'énergie reçue bien que faible au regard de l'ensemble de l'essai est principalement localisée juste au dessus de l'entaille en  $(-0,5\text{cm} < x < 0,5\text{cm}, 0\text{cm} < y < 1\text{cm})$ .

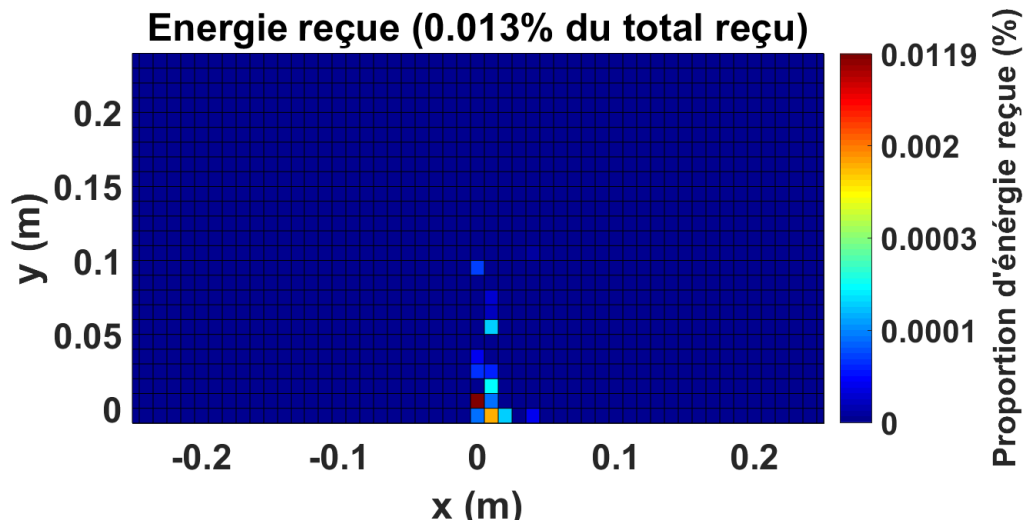
## Phase 3

La phase 3 se situe entre le pic de chargement et le début du premier cycle post-pic (figure 4.12). Les cartes de densités associées sont présentées sur la figure 4.13. Cette phase regroupe 2,2 % de l'activité acoustique et 2,9% de l'énergie reçues au cours de l'essai. La zone d'activité acoustique (figure 4.13(b)) s'étend sur une bande de 2 cm de large et 8 cm de haut au dessus de l'entaille. En revanche la répartition de l'activité acoustique dans cette zone est inégale puisque l'essentiel des événements sont localisés juste au dessus de l'entaille en  $(-0,5\text{cm} < x < 1,5\text{cm}, 0\text{cm} < y < 4\text{cm})$ .

La distribution des énergies est corrélée à l'activité acoustique. Elle s'étend sur une bande plus étroite de 1 cm de large mais sur une longueur similaire à celle de l'activité acoustique. Le maximum d'énergie libérée est quant à lui situé à proximité



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.11 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2.

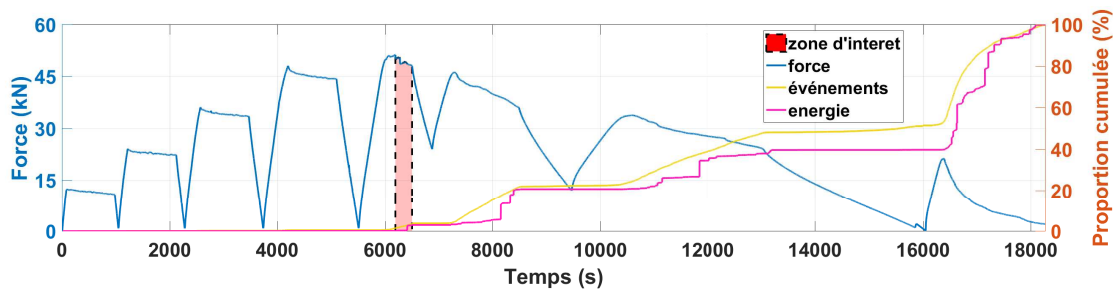
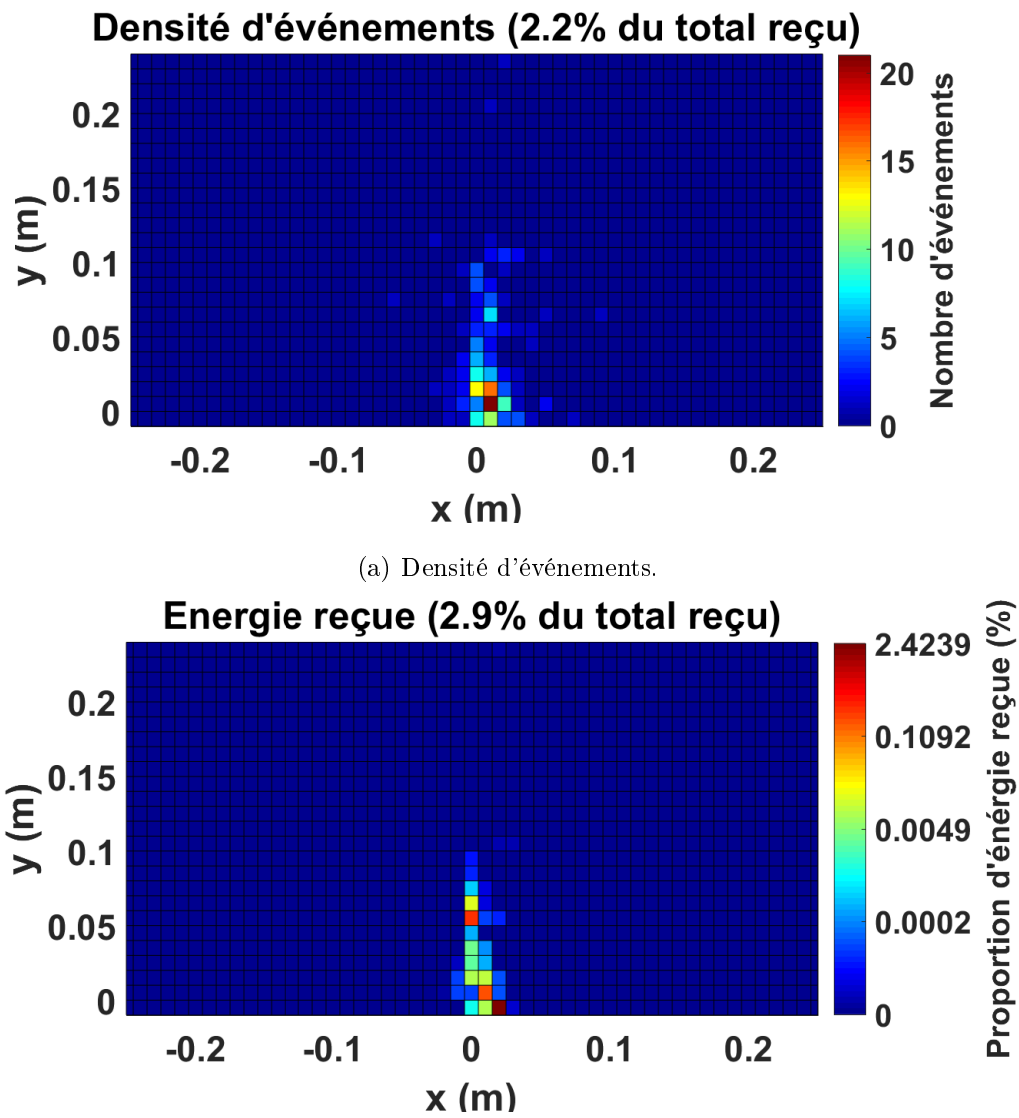


FIGURE 4.12 – Position de la phase numéro 3 au cours de l'essai.

de l'entaille en  $(1,5\text{cm} < x < 2,5\text{cm}, -1\text{cm} < y < 0\text{cm})$ . La phase numéro 3 est comparable au premier point de mesure obtenue par video-corrélation. Bien que l'activité acoustique et énergétique se situe essentiellement au niveau de l'entaille, les cartes de densités montrent une activité jusqu'à  $10\text{ cm}$  au dessus de l'entaille ce qui est proche de la hauteur de fissure de  $8,5\text{ cm}$  obtenue via video-corrélation.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.13 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3.

## Phase 5

La position de la phase 5 est rappelée sur la figure 4.14, les densités d'événements et d'énergies qui lui sont associées sont présentées sur la figure 4.15. Dans cette phase les zones d'activité acoustique et d'activité énergétique sont toujours corrélées. Elles forment une bande de 3 cm de large et de 12 cm de hauteur au dessus de l'entaille. Les maximums de densité d'événements et d'énergie ont progressé respectivement de 2 et 5 cm au dessus de l'entaille par rapport à la phase 3.

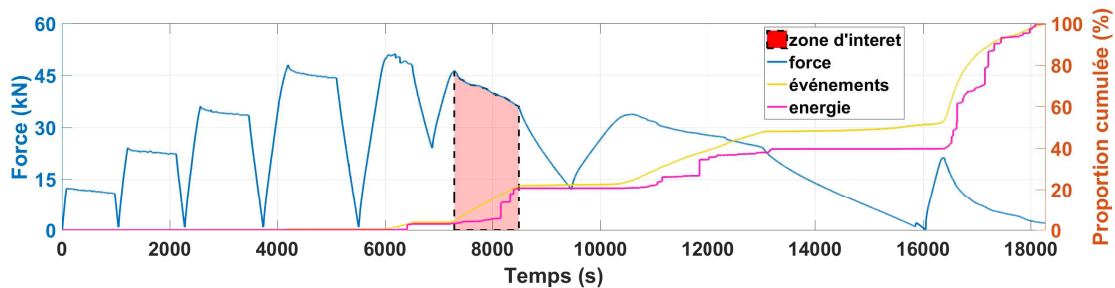
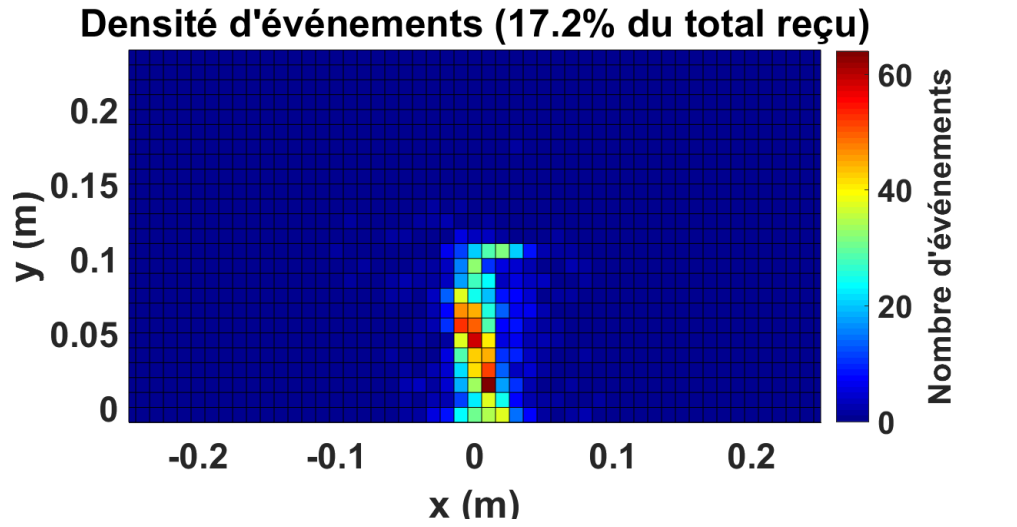


FIGURE 4.14 – Position de la phase numéro 5 au cours de l'essai.

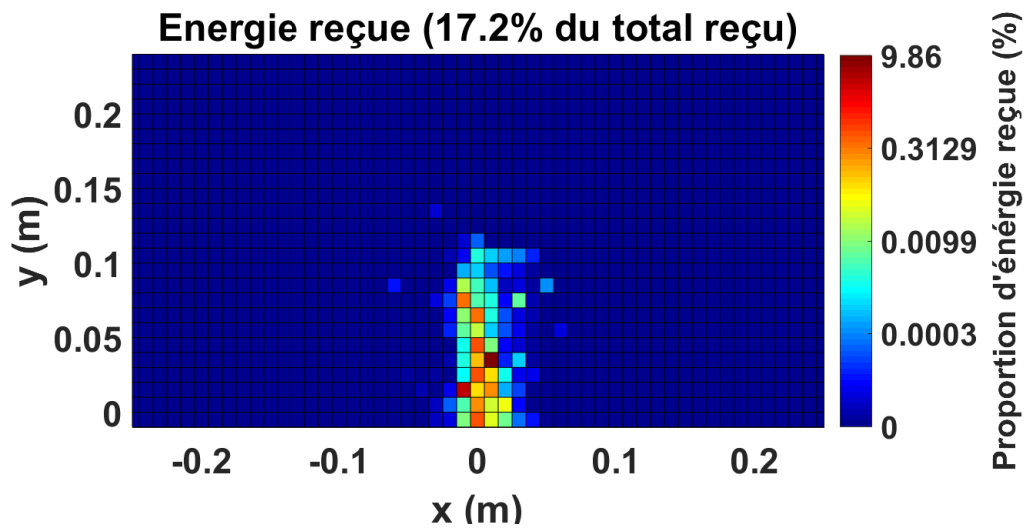
## Phase 8

La figure 4.17 présente les résultats de la phase 8 (figure 4.16) qui regroupe 23,5 % de l'activité acoustique et 17 % de l'énergie totale. Contrairement aux phases précédentes la corrélation entre la zone d'activité acoustique et la zone d'activité énergétique est moins évidente. Lors de cette phase l'activité acoustique majeure se détache de l'entaille et progresse vers la partie supérieure de la poutre. On note un pic d'activité important de 136 événements sur 2 cm<sup>2</sup> en  $(-1,5\text{cm} < x < -0,5\text{cm}, 6\text{cm} < y < 8\text{cm})$  et un pic secondaire de 55 événements sur 1 cm<sup>2</sup> est observé en  $(-0,5\text{cm} < x < 0,5\text{cm}, 11\text{cm} < y < 12\text{cm})$ . Malgré la présence de ces pics, les zones d'activité s'étendent depuis l'entaille jusqu'à 15 cm au dessus.

Le phénomène de détachement de la zone d'activité acoustique ne s'observe pas sur la carte des densités d'énergie. En effet la zone d'activité énergétique s'étend depuis l'entaille jusqu'à  $(y = 17\text{cm})$ . On observe par ailleurs deux pics d'activité énergétique sur la figure 4.17(b). Le premier de 8,5 % en  $(-1,5\text{cm} < x < -0,5\text{cm}, 7\text{cm} < y < 8\text{cm})$  et le second de 2,3 % en  $(-1,5\text{cm} < x < -0,5\text{cm}, 11\text{cm} < y < 12\text{cm})$ .



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.15 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergies (b) de la phase 5.

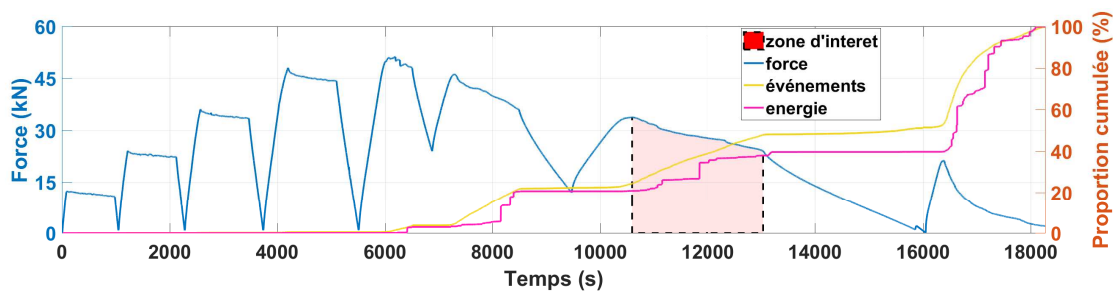


FIGURE 4.16 – Position de la phase numéro 8 au cours de l'essai.

Ces deux pics coïncident avec les positions des maximums d'intensité des activités acoustique enregistrées sur la carte des densités d'événements.

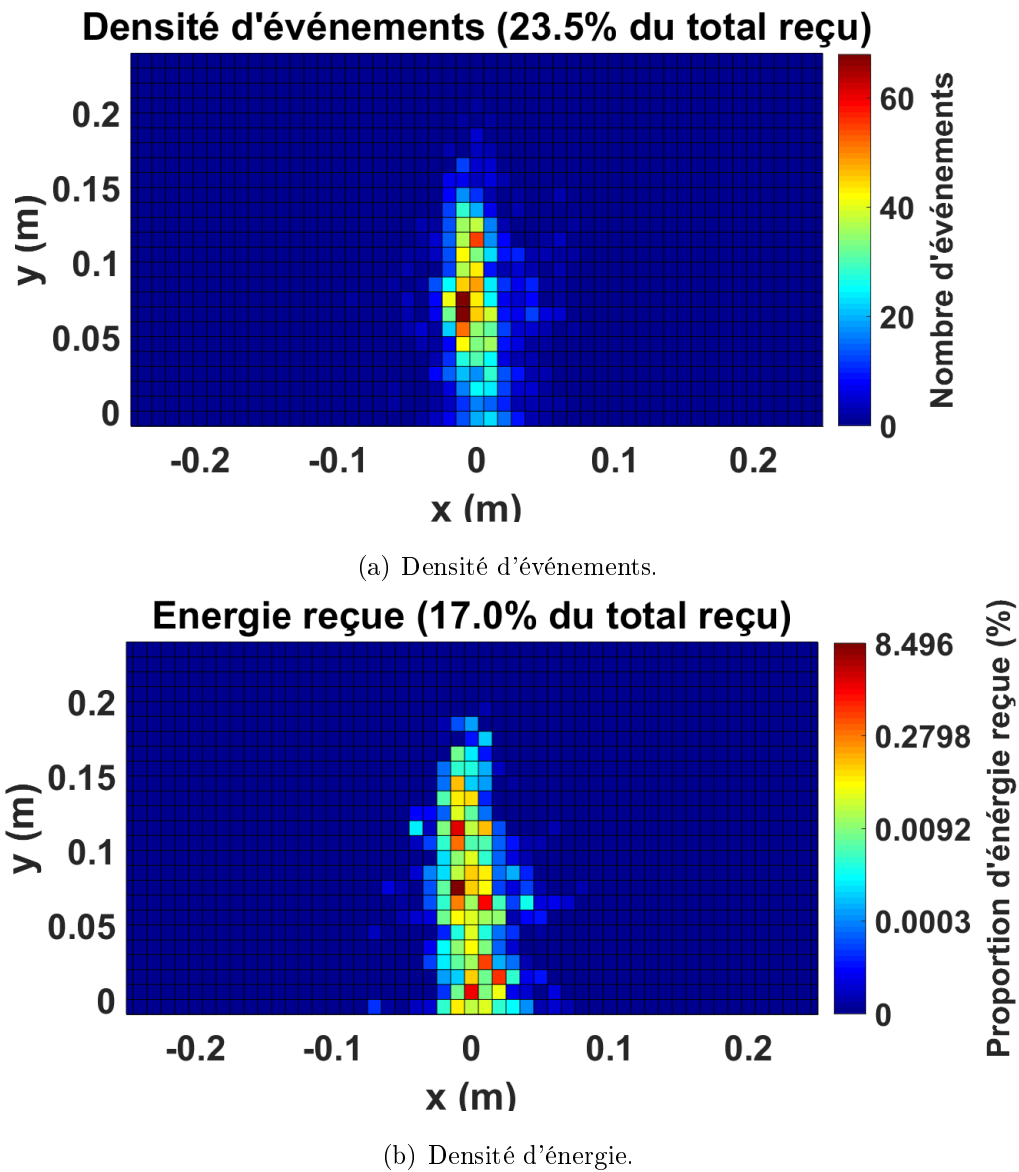


FIGURE 4.17 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 8.

### Phase 11

Les résultats de la phase 11, située dans la dernière phase d'ouverture de fissure (figure 4.18), sont présentés sur la figure 4.19. Cette phase est la plus active de toutes celles observées sur cette poutre puisqu'elle regroupe 36,3% de l'activité acoustique

et 46,8% de l'activité énergétique. Le pic d'activité acoustique observé figure 4.19(a) est situé au même endroit que lors de la phase numéro 8 et avec une intensité comparable. On observe néanmoins une progression de l'activité acoustique jusqu'à ( $y = 18\text{cm}$ ) avec des densités allant jusqu'à 50 événements par  $\text{cm}^2$ . Cette densité bien que peu mise en évidence sur la figure 4.19(a) reste de même intensité que le pic de densité de la phase 8 figure 4.17(a).

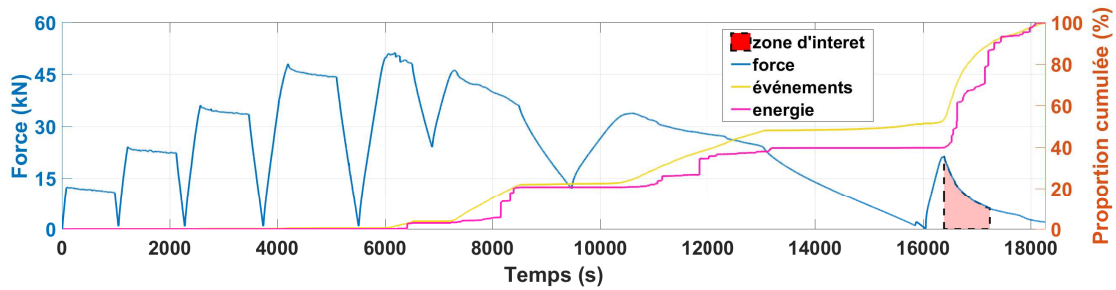


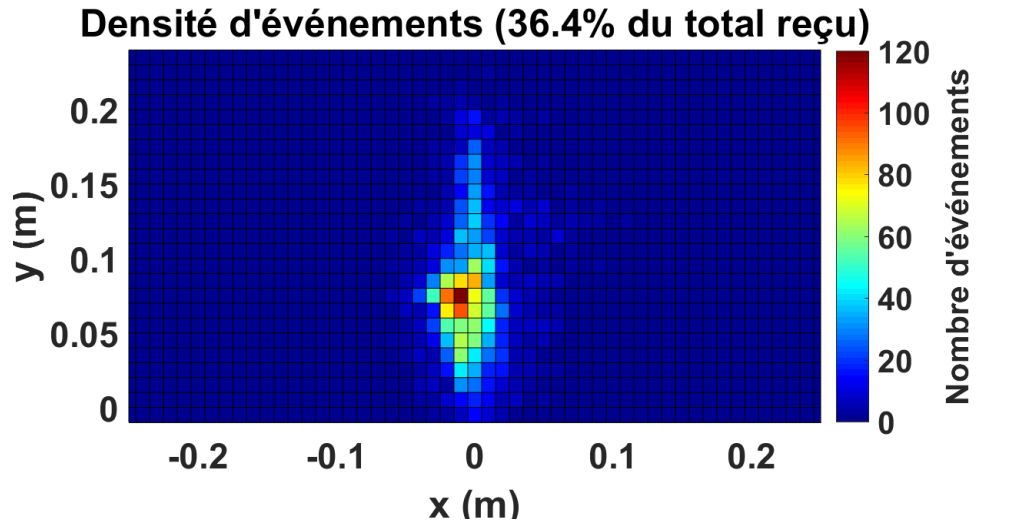
FIGURE 4.18 – Position de la phase numéro 11 au cours de l'essai.

## Discussion

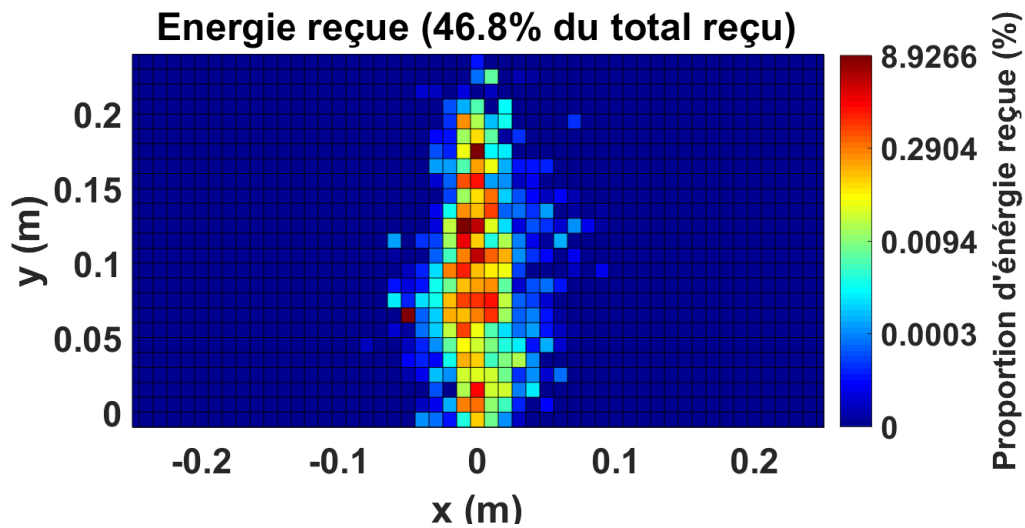
La seconde partie de l'analyse proposée ici concerne les cartes de densité d'événements et d'énergie. Les cartes présentées concernent les phases successives de propagation de fissure. On observe sur les cartes de densité d'événements une progression de la zone d'activité acoustique depuis l'entaille jusqu'à 20  $\text{cm}$  de hauteur au cours de l'essai. Malgré cette progression le maximum d'activité acoustique ne dépasse jamais les 8  $\text{cm}$  au dessus de l'entaille. Le suivi du maximum d'activité ne semble donc pas être un indicateur fiable de la position du front de fissure.

On observe par ailleurs un détachement progressif de la zone d'activité acoustique de la partie inférieure de la poutre autour de 50% du chargement. Ce phénomène de détachement apparaît aussi sur les cartes de densité d'énergie mais plus tard dans l'essai.

A la différence des pics d'activité acoustique sur les cartes de densité d'événements, on observe une progression systématique des pics d'énergie au cours de la propagation de fissure. Les maximums d'énergie successifs sont situés en ( $-1\text{cm} < y < 0\text{cm}$ ), ( $4\text{cm} < y < 5\text{cm}$ ), ( $7\text{cm} < y < 8\text{cm}$ ) et jusqu'à ( $17\text{cm} < y < 18\text{cm}$ ) à la fin de l'essai. A titre de comparaison pour ces trois premières valeurs, les positions



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.19 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 11.

du front de fissure issues de la video-corrélation aux mêmes instants sont respectivement de  $8,5\text{ cm}$ ,  $13,2\text{ cm}$  et  $16,7\text{ cm}$ . Il y a donc un écart de 8 à 9  $\text{cm}$  entre le pic d'activité énergétique et la position fournie par la video-corrélation.

Pour tenter de quantifier plus précisément la propagation de la fissure, une méthode basée sur les distributions d'événements selon l'axe principal de la fissure est proposée ci-après.



### 4.3.5 Recherche d'un critère de position de fissure sur les distributions cumulées d'événements

Le travail présenté ici consiste à déterminer un critère d'identification de la pointe de fissure à partir des distributions cumulées d'événements selon  $Oy$ . Les positions de la pointe de fissure obtenues via video-corrélation sont par la suite rapportées sur les distributions. L'objectif de cette comparaison est de repérer une relation entre la mesure par video-corrélation qui constitue notre référence et les valeurs de proportions d'événements en amont et en aval de la mesure. La recherche des événements situés au dessus du front de fissure mesuré revient à identifier les événements formant la FPZ qui précède le passage de la fissure.

#### Distribution locale

La distribution notée « locale » consiste à ne considérer que les événements reçus dans une fenêtre de temps correspondant à l'intervalle entre deux mesures successives. Par exemple pour évaluer la distribution d'événements au niveau du 4<sup>ème</sup> point de mesure de la figure 4.9 en ( $t = 8489s, h_{vc} = 13,2cm$ ), seuls les événements enregistrés entre les points de mesure 3 et 4, respectivement 80 à 70% de la charge au pic, sont considérés.

La figure 4.20 représente les distributions cumulées locales des événements selon  $Oy$ . Chacune des courbes correspond à la distribution des événements enregistrés entre deux mesures successives par video-corrélation. Le cas de la première mesure ( $h_{vc} = 8,5cm$ ) regroupe les événements enregistrés entre le début de l'essai et la première mesure (0 à 100% du chargement). La position relative à chaque hauteur de fissure obtenue par video-corrélation est symbolisée par une droite verticale en pointillés. Une droite horizontale en pointillés permet de lire sur l'axe de gauche la proportion d'événements localisés en dessous et au dessus de la hauteur «  $h_{vc}$  ».

On observe sur les résultats présentés ici le cas particulier de la première distribution ( $h_{vc} = 8,5cm$ ). A cet instant 83,1% des événements sont situés en dessous des 8,5cm. Dans tous les autres cas la proportion d'événements localisés en dessous de la hauteur «  $h_{vc}$  » de la fissure est systématiquement supérieure à 94%. Le cas par-

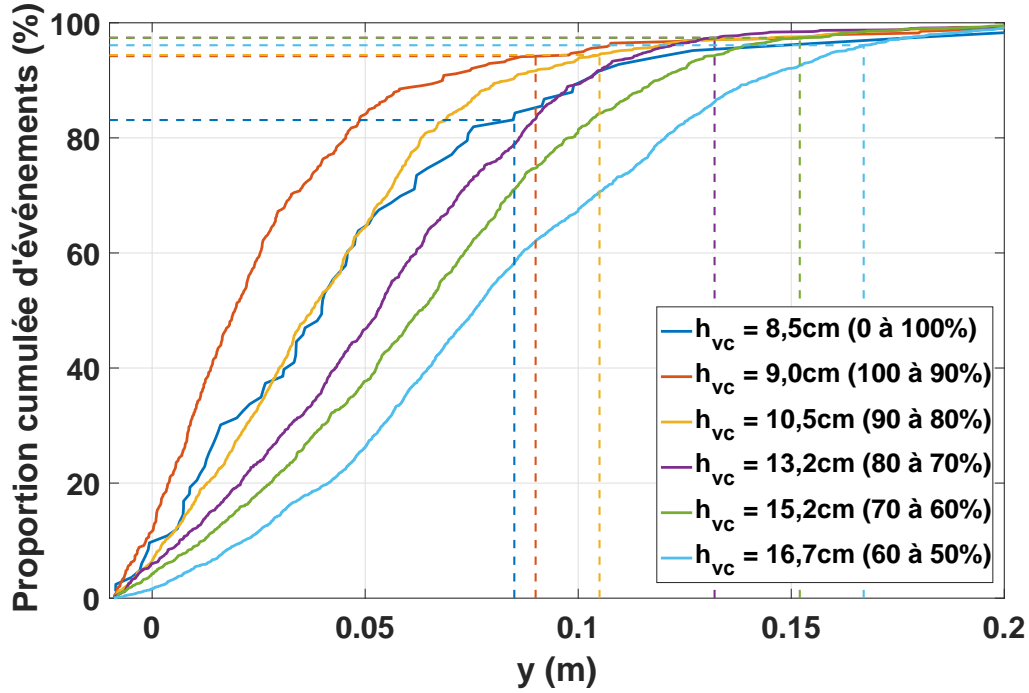


FIGURE 4.20 – Distribution cumulée locale des événements selon  $Oy$  à chacun des points de mesure par video-corrélation.

ticulier de la première mesure (au pic de chargement) est difficilement comparable aux autres car les événements reçus qui précèdent cette mesure sont étalés sur toute la partie pre-pic de l'essai. Le tableau 4.3 regroupe les proportions d'événements localisés sous le front de fissure pour chaque mesure.

mesure	1	2	3	4	5	6
$h_{vc}$ (cm)	8,5	9,0	10,5	13,2	15,2	16,7
Proportion à $h_{vc}$ (%)	83,1	94,2	94,4	97,4	97,4	96,1
$h_{Lea}$ à 96% (cm)	14,5	10,1	10,9	11,7	13,5	16,0
$ h_{Lea} - h_{vc} $ (cm)	6,0	1,1	0,4	1,5	1,7	0,7

TABLE 4.2 – Proportions d'événements localisés sous la hauteur mesurée de la fissure par video-corrélation à partir de la distribution locale.

Les écarts entre les hauteurs obtenues par video-corrélation ( $h_{vc}$ ) et celles obtenues sur les distributions d'événements ( $h_{ea}$ ) à 96% sont également présentées. La valeur de 96% correspond à la moyenne des proportions d'événements présentées pour les mesures 2 à 6. Outre la première mesure, l'écart moyen entre les deux

méthodes est de 1,0 *cm* avec un maximum de 1,7 *cm*.

## Distribution globale

Contrairement à la distribution « locale », la distribution dite « globale » à un instant « *t* » de l'essai consiste à prendre en compte la totalité des événements enregistrés depuis le début de l'essai jusqu'au temps « *t* ». La figure 4.21 représente les distributions cumulées globales des événements selon *Oy* effectuées aux mêmes instants que les mesures par video-corrélation. La distribution relative à la première mesure ( $h = 8,5\text{cm}$ ) est strictement identique à celle de la figure 4.20 puisqu'elle prend en compte les mêmes événements. On observe par ailleurs une évolution de la zone d'activité acoustique au cours de l'essai. En effet la position de la zone endommagée à proportion constante (par exemple 80%) progresse dans la poutre de 4,9 à 10,0 *cm* entre la 2<sup>ieme</sup> et 6<sup>ieme</sup> mesure. Comme pour la distribution locale, la proportion moyenne d'événements à chaque point de mesure par video-corrélation est de 96%. L'écart moyen maximal entre  $h_{vc}$  et  $h_{ea}$  à 96% d'événement pour les mesures 2 à 6 sont respectivement de 1,1 *cm* et 1,7 *cm* comme pour les distributions locales. Le choix du type de distribution ne semble donc pas avoir un impact sur les écarts observés entre les deux méthodes.

mesure	1	2	3	4	5	6
$h_{vc}$ (cm)	8,5	9,0	10,5	13,2	15,2	16,7
Proportion à $h_{vc}$ (%)	83,1	92,3	94,4	97,1	97,6	97,5
$h_{Gea}$ à 96% (cm)	14,5	10,7	11,9	12,2	13,9	16,7
$ h_{Gea} - h_{vc} $ (cm)	6,0	1,7	1,4	1,0	1,3	0,0

TABLE 4.3 – Proportions d'événements localisés sous la hauteur mesurée de la fissure par video-corrélation à partir de la distribution globale.

## Discussion

Le suivi des distributions d'événements au cours de l'essai montre une progression du front d'activité acoustique à proportion constante. Ainsi pour les 5 derniers points de mesures successifs étudiés, la position correspondant à 80% des événements reçus

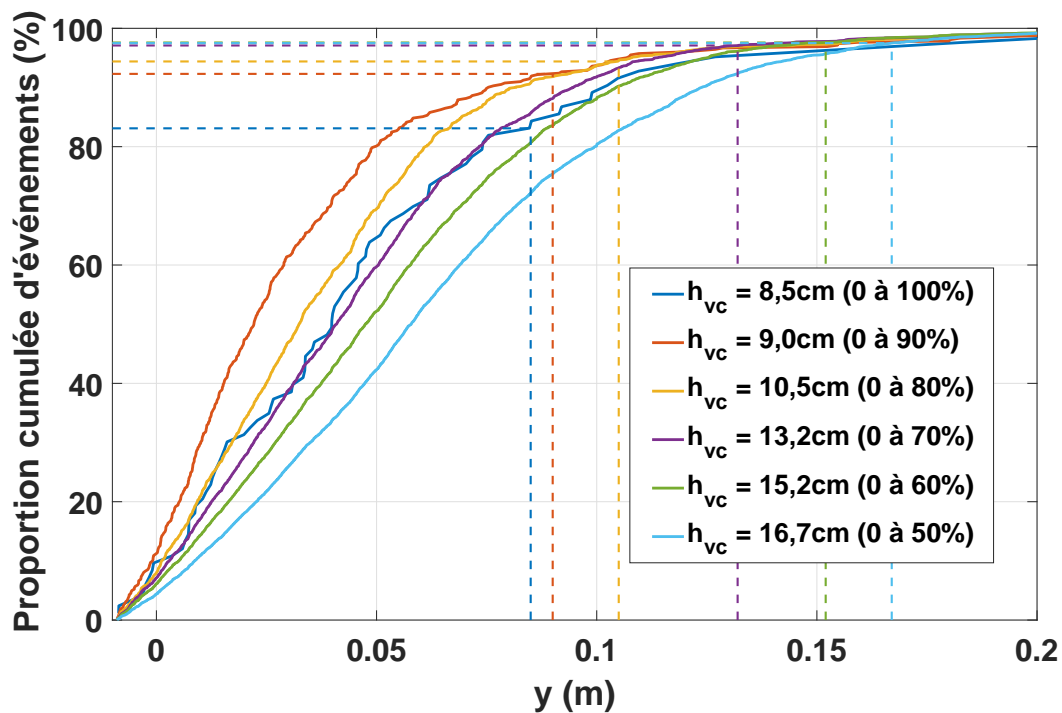


FIGURE 4.21 – Distribution cumulée globale des événements selon  $Oy$  à chacun des points de mesure par video-corrélation.

progressive de 9,5 *cm* dans le cas des distributions locales et de 5,1 *cm* dans le cas des distributions globales.

Les résultats issus de la comparaison entre les distributions et les mesures par video-corrélation ont permis de faire émerger une valeur de proportions constante d'environ 4 % d'événements en aval de la pointe de fissure mesurée. Outre la première comparaison faite au niveau du pic de chargement, la proportion d'événements en aval de la hauteur mesurée varie entre 2,4 et 7,7 % et ce indépendamment de la méthode utilisée. Les proportions très faibles d'événements localisés en aval du front de fissure mesuré semblent indiquer une FPZ constituée d'un très faible nombre d'événements en comparaison de ceux localisés en amont. Cette répartition d'activité acoustique inégale de part et d'autre du front de fissure mesuré peut s'expliquer par une zone de pontage toujours fortement active en amont du front de fissure.

En dehors du point de mesure au pic de chargement, l'écart moyen entre la hauteur mesurée par video-corrélation et la hauteur obtenue pour les deux méthodes de distribution d'événements est quasiment identique (1,0 *cm* pour la distribution

locale et 1,1 *cm* pour la distribution globale). En revanche l'utilisation de la distribution globale fournit systématiquement une hauteur de fissure plus importante que dans le cas de la distribution locale (0,6 *cm* en moyenne) (figure 4.22).

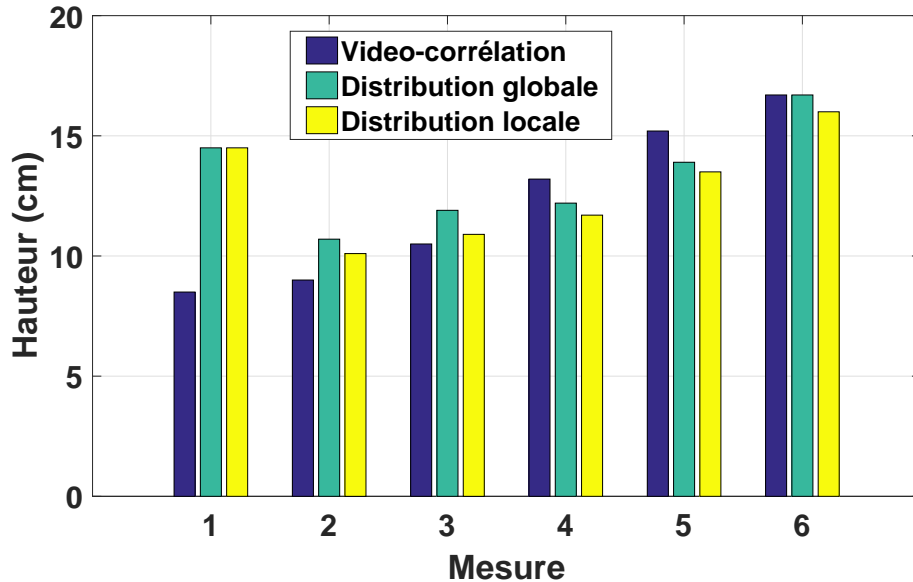


FIGURE 4.22 – Comparaison des hauteurs de fissure obtenues par video-corrélation (bleu) et par émission acoustique avec la distribution globale (vert) et la distribution locale (jaune).

L'étude des distributions cumulées d'événements à différents instants de l'essai peut donc servir d'indicateur de propagation de fissure avec une incertitude qui reste à valider sur d'autres mesures.

Il convient de nuancer la comparaison entre les données d'EA et celles issues de la video-corrélation qui ont servi de référence dans le travail présenté ici. En effet la video-corrélation n'est pas une méthode absolue puisque la détermination du front de fissure part du principe que celui-ci correspond à une ouverture de 6  $\mu m$ . L'utilisation d'un autre critère pourrait mener à conclure sur une autre valeur de proportion d'événements en aval de la fissure. Comme pour l'EA les résultats de cette méthode dépendent de la méthodologie employée pour définir la position du front de fissure.

Un récapitulatif des hauteurs mesurées sur les 3 poutres à 96 % d'événements aux mêmes étapes de déchargement est présenté dans le tableau 4.4.

mesure	1	2	3	4	5	6
	p1-1					
$h_{Gea}$	5,0	7,7	9,0	10,1	11,9	13,5
$h_{Lea}$	4,7	7,7	9,4	11,0	12,8	15,8
	p1-2					
$h_{Gea}$	14,5	10,7	11,9	12,2	13,9	16,7
$h_{Lea}$	14,5	10,1	10,9	11,7	13,5	16,0
	p1-3					
$h_{Gea}$	11,5	10,0	8,8	10,1	10,3	10,9
$h_{Lea}$	11,4	8,2	8,5	10,4	10,8	11,9

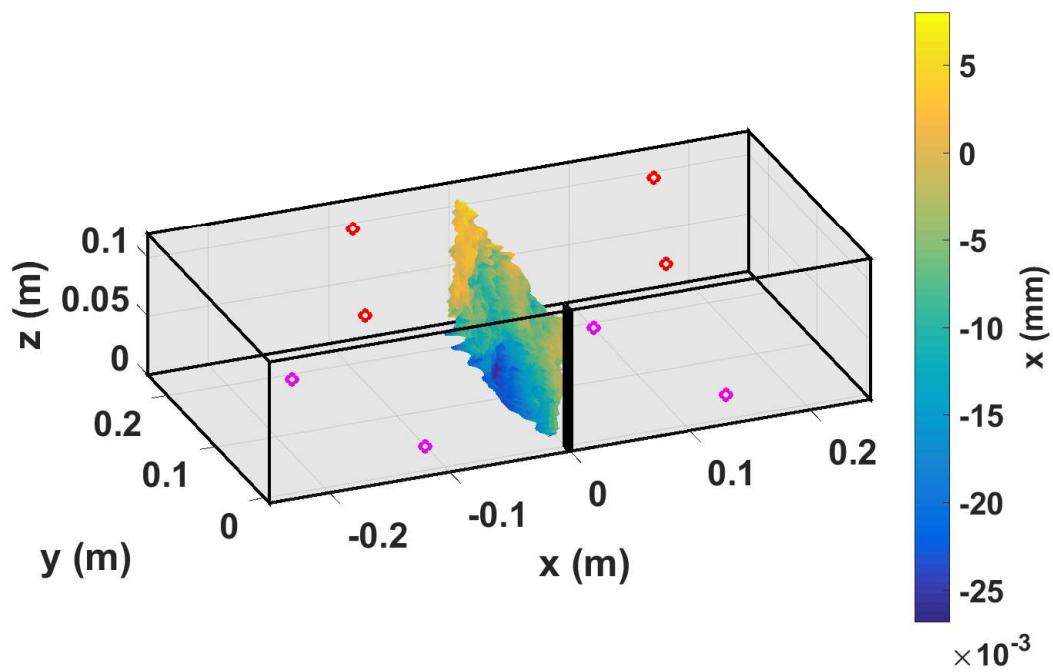
TABLE 4.4 – Récapitulatif des positions à 96 % d'événements pour les trois poutres en fonction de la méthode employée. Distribution globale :  $h_{Gea}$  et distribution locale :  $h_{Lea}$ .

### 4.3.6 Reconstruction du profil de fissure

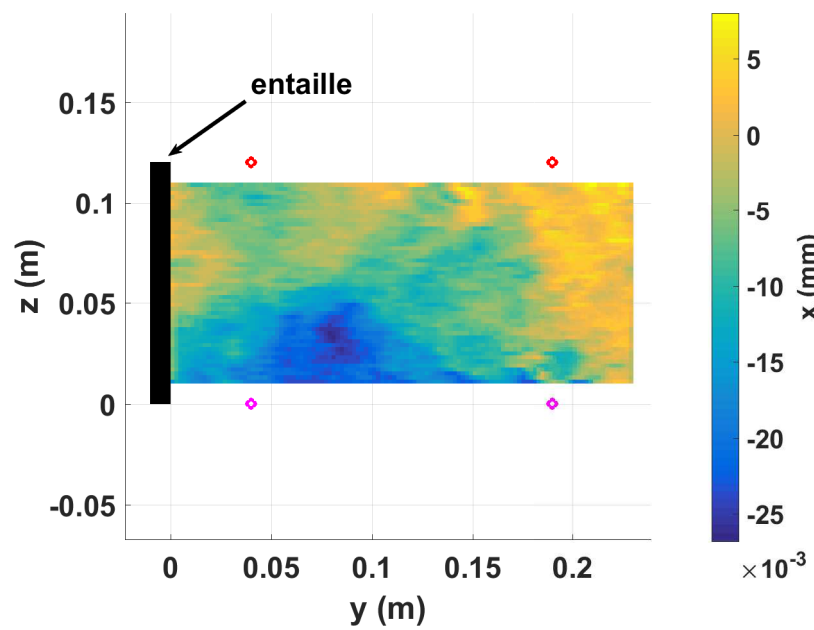
Sur la base de travaux effectués et publiés au cours de la thèse [89], une reconstruction du profil de fissure est proposée ici à partir des densités d'événements. La figure 4.23 présente le profil reconstruit sur la poutre p1-1. L'écart maximal du profil reconstruit autour de l'axe  $x = 0$  est de  $-25\text{ mm}$ . Ce maximum apparaît dans la partie inférieure de la poutre ( $y < 13\text{cm}$ ) et au niveau de la surface en  $z = 0\text{cm}$ . Sur l'autre surface principale en  $z = 12\text{cm}$ , la distance du profil reconstruit oscille entre  $-5$  et  $+5\text{ mm}$  par rapport à l'axe  $x = 0$ .

La figure 4.24 permet de comparer qualitativement le profil reconstruit au chemin de fissuration observé sur la surface  $z = 0\text{cm}$ . Dans les deux cas on observe à proximité de l'entaille en  $z = 0\text{cm}$  une déviation du chemin de fissure dans les abscisses négatives. Même si la comparaison n'est pas quantifiée ici, la reconstruction à partir des densités permet d'obtenir une représentation global du chemin de fissure dans la poutre.

Enfin la figure 4.25 offre un aperçu du profil de fissuration réel sur la surface principale en  $z = 12\text{cm}$ . La deviation de la fissure sur cette surface est moit prononcé dans les  $x$  négatifs. Le chemin de fissuration est plus proche de l'axe médian



(a) Vue en perspective.



(b) Vue sur le plan  $zOy$ .

FIGURE 4.23 – Profil de fissure reconstruit à partir des densités d'événements.

$x = 0\text{cm}$  ce qui est en accord avec les résultats du profil reconstruit.

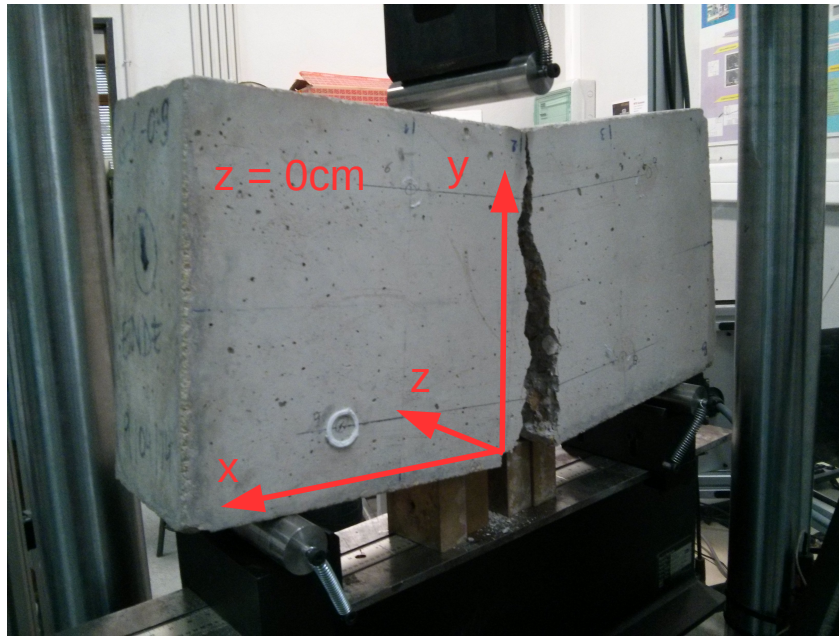


FIGURE 4.24 – Photo de la poutre p1-1 avec la surface  $z = 12\text{cm}$  au premier plan.

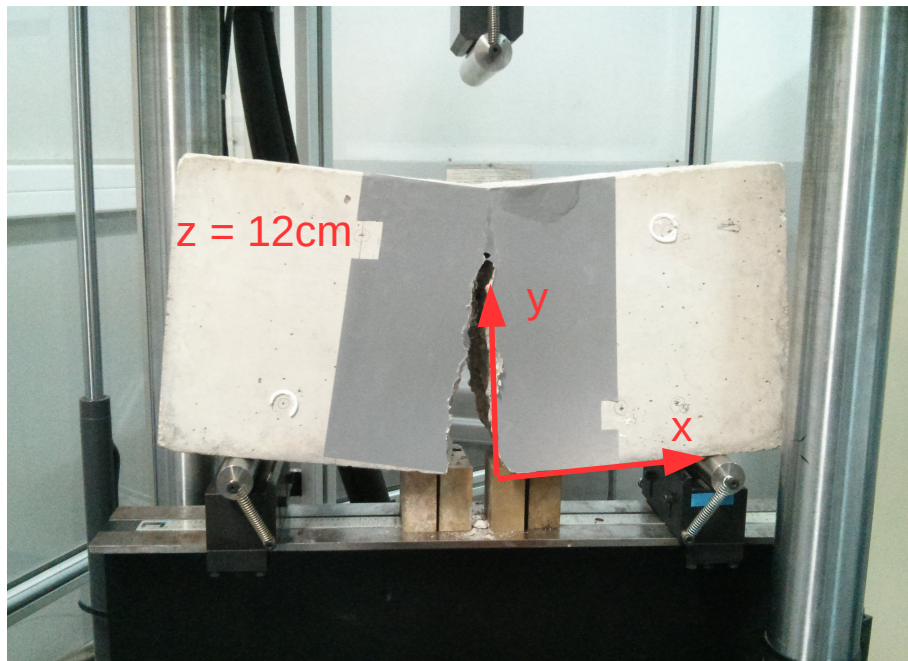


FIGURE 4.25 – Photo de la poutre p1-1 avec la surface  $z = 0\text{cm}$  au premier plan.



## 4.4 Détection de fissures existantes

L'objectif de cette section est de vérifier la capacité de l'EA à mettre en évidence une fissure déjà présente dans le béton. Pour cela notre analyse se base sur les essais de refermeture de fissures décrits dans la sous-section 2.1.3 ainsi que sur les cycles de déchargement/rechargement dans la partie post-pic des essais de flexion 3 points.

### 4.4.1 Cycles de décharge/recharge dans les essais de flexion 3 points

Cette sous-section se focalise sur les cycles de décharge/recharge dans la partie post-pic des essais de flexion 3 points, plus particulièrement l'essai sur la poutre p1-3 (figure 4.26). Ces cycles interviennent au cours de la propagation de fissure. Contrairement aux essais de refermeture actifs de la fissure à l'aide du câble de précontrainte, ici la poutre est uniquement déchargée progressivement mais pas totalement. Lors de ce déchargement la fissure se referme partiellement. La deuxième partie des cycles consiste au rechargement progressif de la poutre jusqu'à la reprise de la propagation de la fissure.

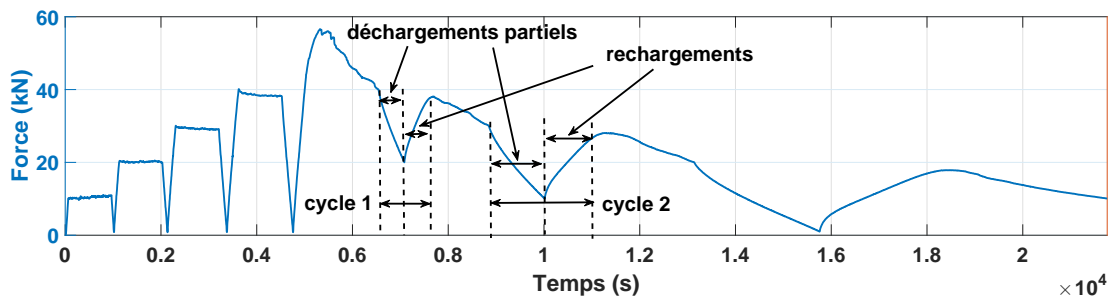


FIGURE 4.26 – Positions des cycles au cours de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-3.

Les proportions d'événements et d'énergie présentées sur les cartes de densités qui suivent sont relatives à l'ensemble de l'activité enregistrée sur les deux cycles étudiés.

## Les phases de déchargement

La figure 4.27 présente les cartes de densités associées à la première refermeture partielle due au déchargement dans le premier cycle. L'activité acoustique enregistrée est dispersée. Elle s'étend de l'entaille à ( $y = 12\text{cm}$ ) sur une largeur de  $9\text{ cm}$

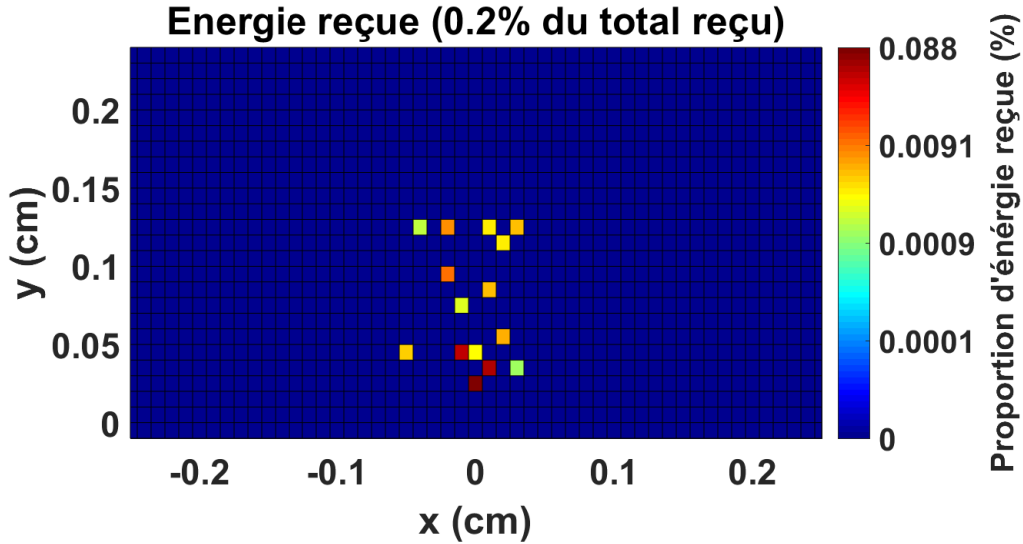
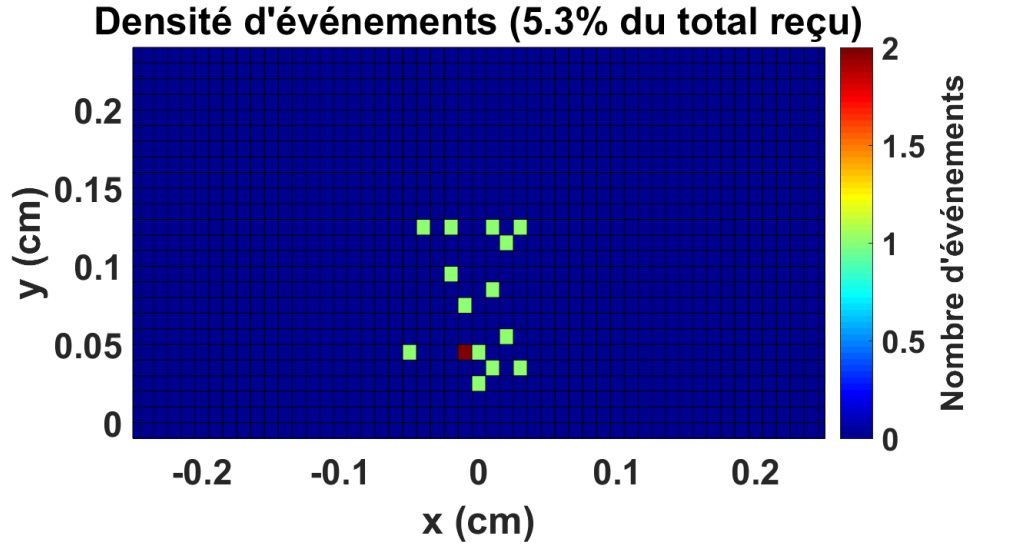


FIGURE 4.27 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant la décharge du premier cycle.

mais ne fait pas apparaître de zone plus active qu'une autre. La proportion d'énergie associée à cette phase (figure 4.27(b)) est quasiment nulle au regard de toute

l'activité enregistrée lors de ces deux cycles et n'apporte pas plus d'information que la carte de densité d'événements.

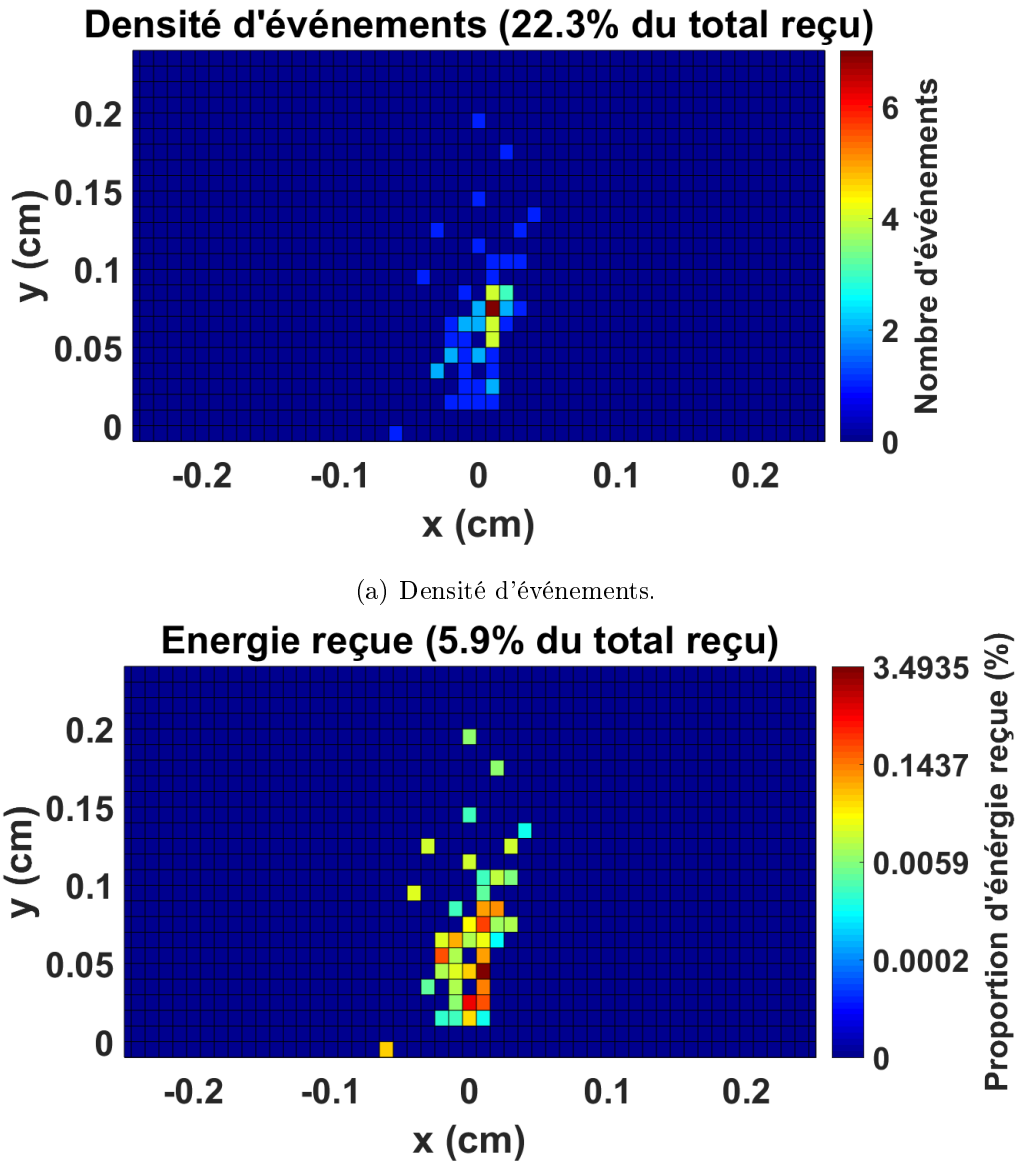


FIGURE 4.28 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant la décharge du deuxième cycle.

Les cartes de densité associées à la phase de déchargement du deuxième cycle sont présentées sur la figure 4.28. On observe une progression de la zone d'activité acoustique vers la partie supérieure de la poutre et une concentration d'événement légèrement plus importante en  $(0,5\text{cm} < x < 1,5\text{cm}, 7\text{cm} < y < 8\text{cm})$ . L'activité énergétique associée à cette phase reste relativement faible (5,3 %) et concentrée

dans la partie inférieure de la poutre.

### Les phases de rechargement

Les figures 4.29 et 4.30 présentent les cartes de densités relatives aux deux phases de chargement pendant les cycles. Ces deux phases font apparaître une zone d'acti-

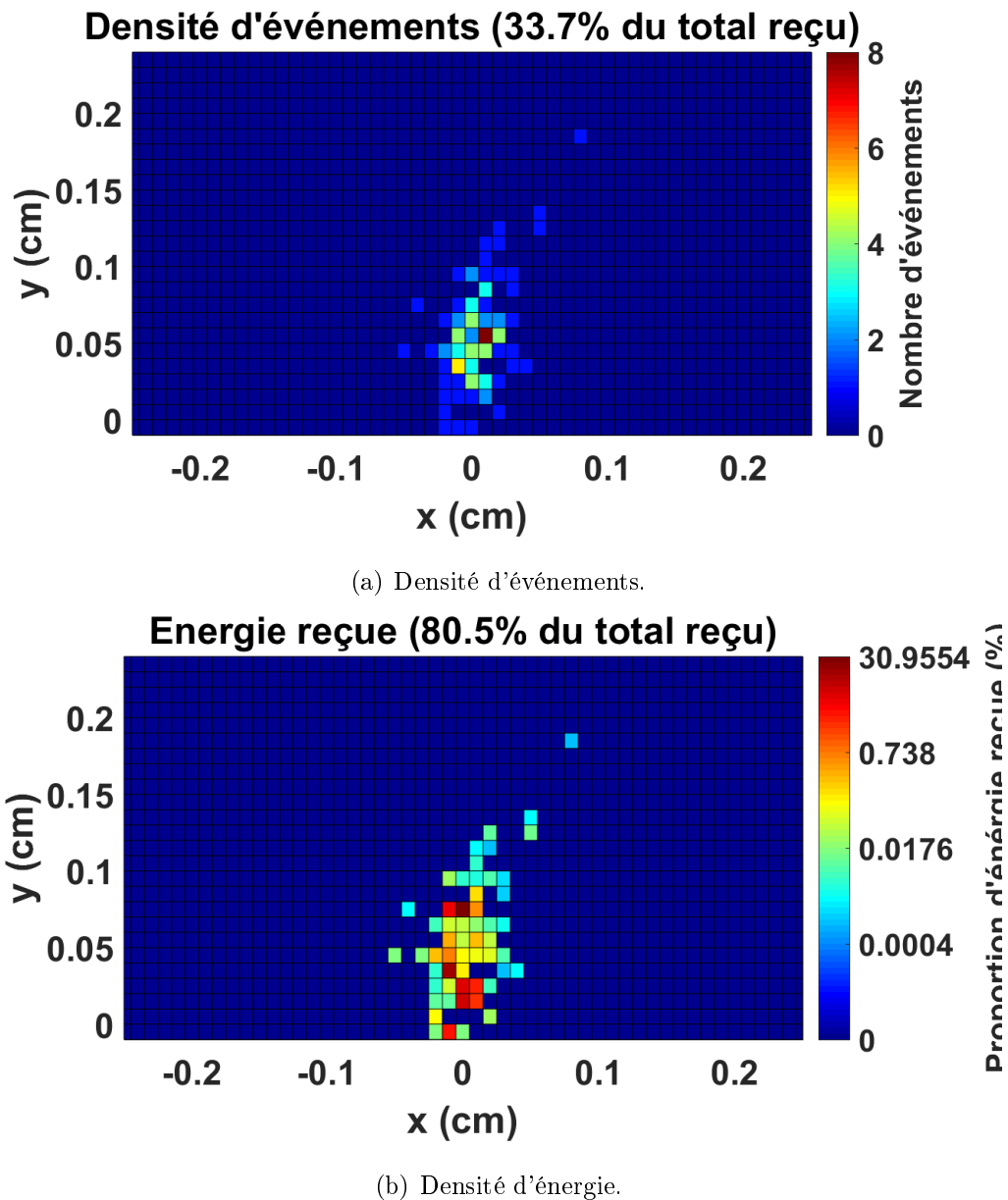
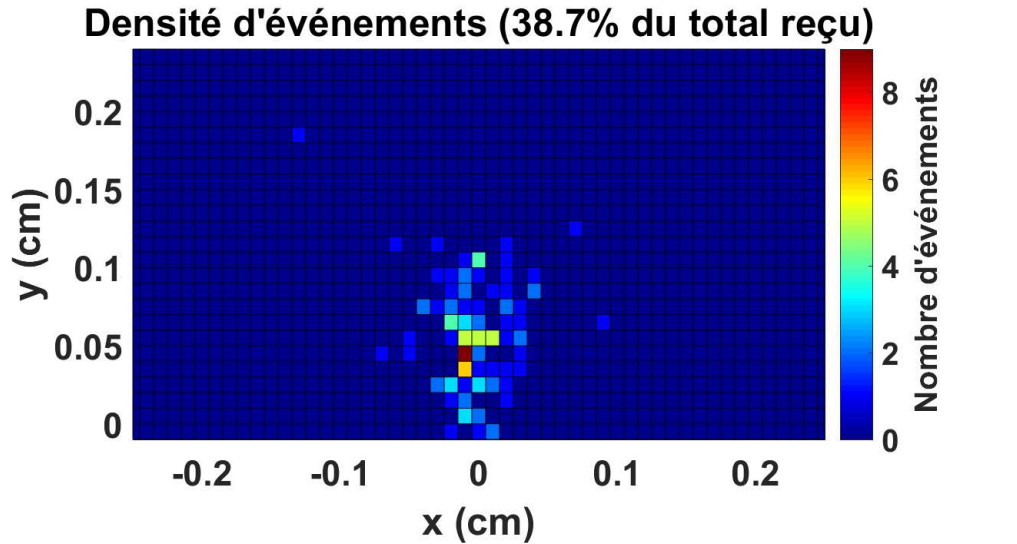


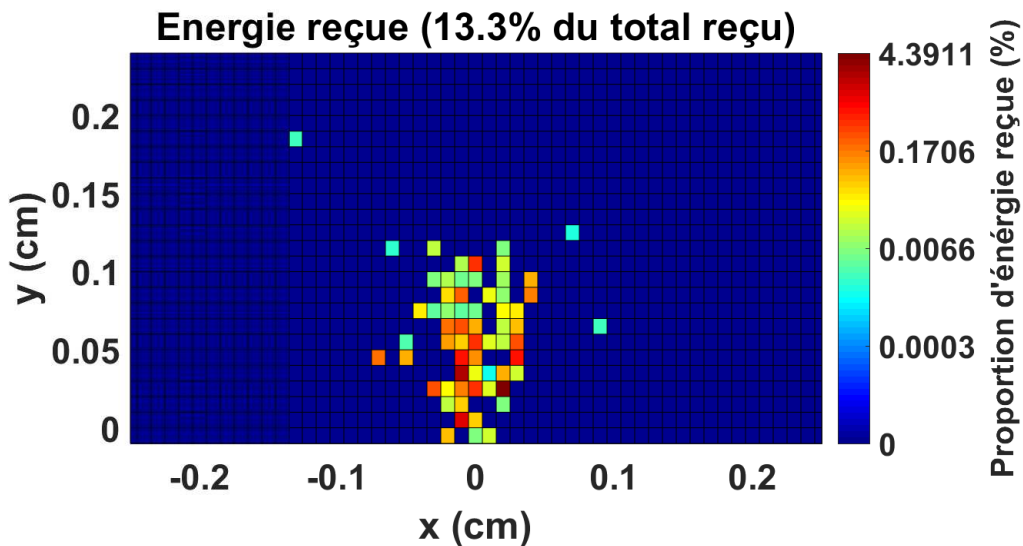
FIGURE 4.29 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant le chargement du premier cycle.

tivité toujours centrée au dessus de l'entaille et dans la moitié inférieure de la poutre.

La différence majeure avec les phases de déchargement est le poids relatif de ces deux phases par rapport à la totalité des deux cycles puisqu'elles représentent 72,4 % de l'activité acoustique et 93,8 % de l'énergie totale reçue lors des deux cycles.



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.30 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) pendant le chargement du deuxième cycle.

Les résultats présentés concernant les cycles de décharge/recharge de la poutre dans la partie post-pic lors d'un essai de flexion 3 points font clairement apparaître une zone d'activité acoustique cohérente avec l'axe vertical de la fissuration. La différence principale observée tient au poids que représentent les phases de recharge

pendant lesquelles la fissure est réouverte. La réouverture de fissure est globalement plus active que les phases de déchargement aussi bien du point de vue de l'activité acoustique (72,4 %) que de l'énergie enregistrée (93,8 %).

Les phases de refermeture que l'on associe aux déchargements de la poutre ne sont pas forcées à l'aide d'un câble de précontrainte comme lors des essais précédents. Par conséquent la faible activité enregistrée ici pendant la fermeture partielle de la fissure peut s'expliquer par une diminution importante voir une disparition des mécanismes d'écrasement imposés par le câble de précontrainte.

Enfin on n'observe pas de progression claire de la zone d'activité entre les deux cycles. L'activité reste concentrée dans la moitié inférieure de la poutre suggérant un front de fissure entre 10 et 15 *cm* de longueur.

#### 4.4.2 Essais de refermeture de fissure

Les données présentés ici pour les essais de refermeture de fissure sont celles de la poutre p2-1. Elles concernent les différentes phases de tension et de relâchement du câble de précontrainte après que la fissure se soit propagée. La hauteur de la fissure n'est à priori pas connue. La figure 4.31 représente ces différentes phases. Deux phases de relâchement ont été effectuées (en vert) ainsi que 3 phases de tension à 20, 40 et 60 *kN* (en rouge). Il s'agit ici d'un schéma qui représente les phases d'action sur le câble dans l'ordre chronologique. L'action sur le câble étant manuelle, sa tension est directement lue sur un manomètre mais aucune valeur n'a été enregistrée pendant les mises sous tension ou les relâchements.

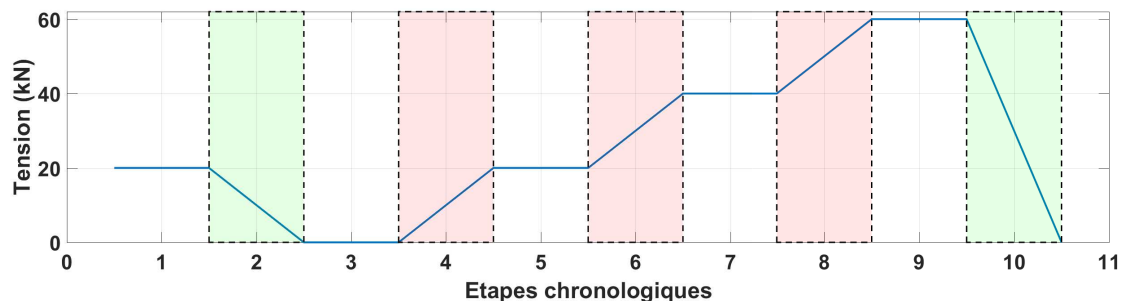


FIGURE 4.31 – Représentation schématique du déroulement des phases de changement de précontrainte dans la poutre 2-1.

Les proportions d'événements et d'énergies présentées sur les cartes de densités qui suivent font référence à la quantité totale d'événements et d'énergie reçue pendant les 5 phases de modification de la tension du câble.

### **Les phases de déchargement du câble**

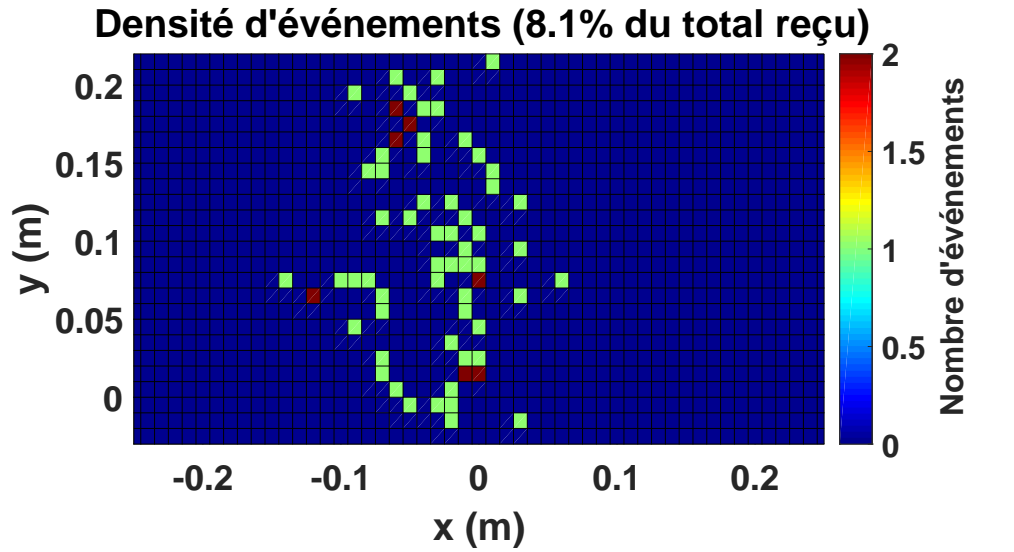
La figure 4.32 présente les cartes de densités d'événement et d'énergie obtenues lors du passage d'une tension de 20 à 0  $kN$  dans le câble de précontrainte. Cette première phase regroupe 8,1 % de l'activité acoustique et 16,3 % de l'énergie reçue. La zone d'activité acoustique s'étend sur toute la hauteur de la poutre. Si elle est centrée autour d'un axe partant du haut de l'entaille ( $x = 0cm, y = 3cm$ ) jusqu'en ( $x = -5cm, y = 20cm$ ) elle ne fait pas apparaître de concentration d'événements particulière. On observe sur le même axe trois points d'activité majeur sur la carte des densités d'énergie (figure 4.32(b)).

La phase finale de déchargement correspondant au passage de la tension de 60 à 0  $kN$  est présentée sur la figure 4.33. Les activités acoustique et énergétique sont moins importantes dans cette dernière phase de déchargement. On observe par ailleurs un élargissement de la zone d'activité. L'axe d'activité acoustique repéré dans la phase précédente n'est plus clairement observé. L'activité énergétique est aussi plus diffuse. Les points d'activité majeurs sont moins importants relativement à la phase précédente.

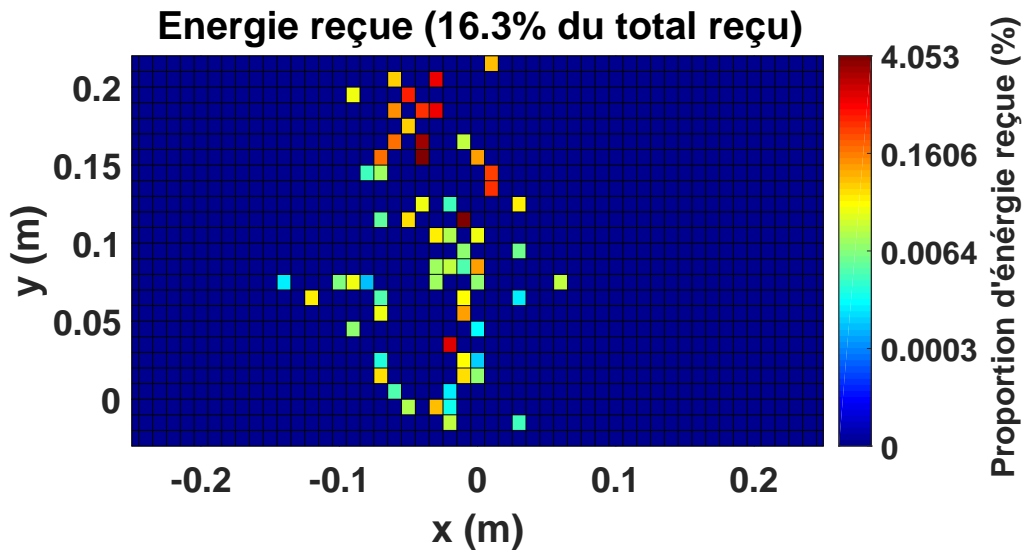
### **Les phases de chargement du câble**

Les cartes de densités relatives aux phases d'augmentation de la tension dans le câble de précontrainte de 0 à 20  $kN$ , 20 à 40  $kN$  et 40 à 60  $kN$  sont présentées respectivement sur les figures 4.34, 4.35 et 4.36. Lors de ces phases la tension appliquée au câble tend à refermer la fissure.

La première phase de chargement (figure 4.34(b)) regroupe la majeure partie de l'activité acoustique (44,3 %) et de l'activité énergétique (60,6 %) enregistrée pour toutes les phases confondues. On observe par ailleurs un alignement des zones d'activité acoustique et énergétique sur l'axe identifié lors de la première décharge.



(a) Densité d'événements.



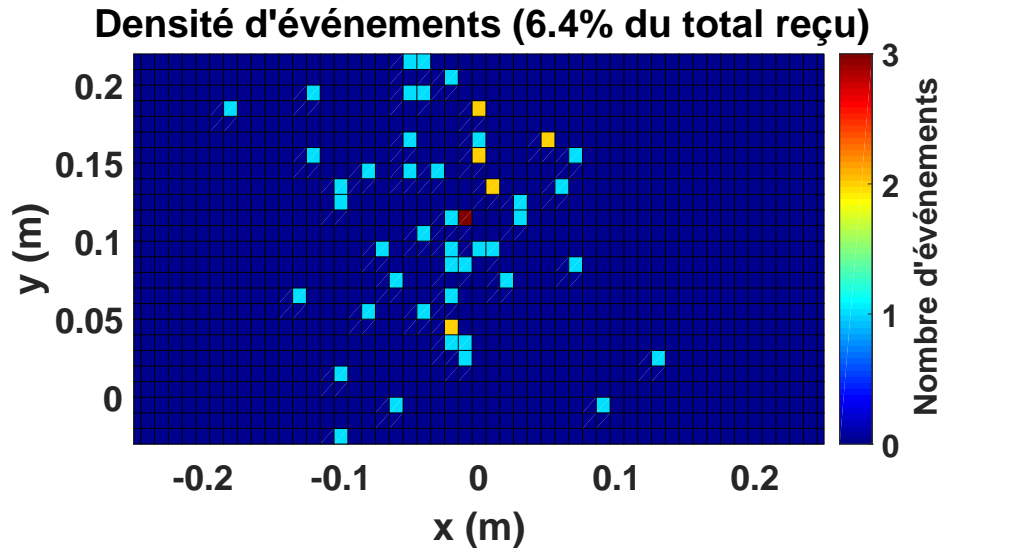
(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.32 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 20 à 0  $kN$ .

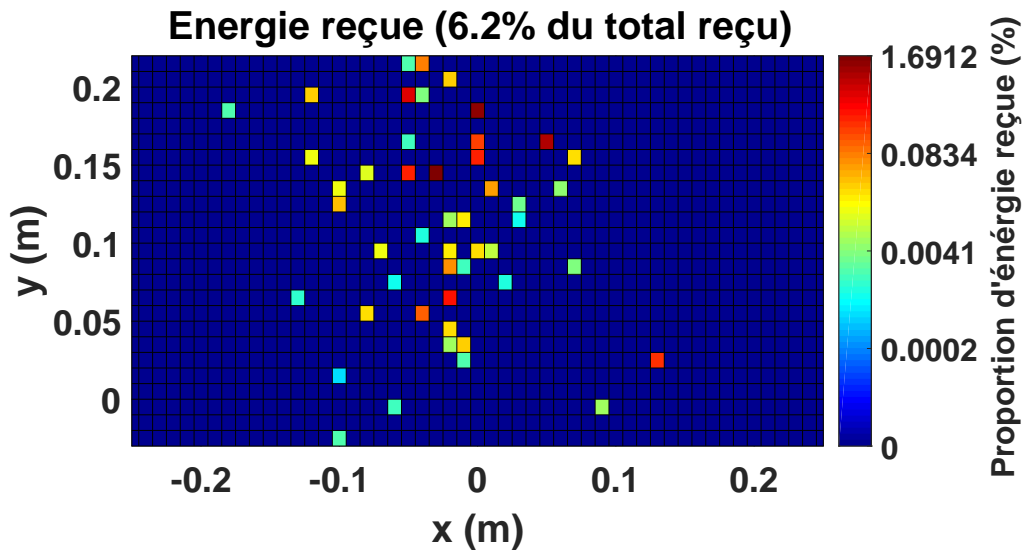
Si la zone d'activité acoustique reste aussi dispersée que dans cette première phase on observe une concentration des événements plus importante sur cet axe avec un pic à 11 événements. L'activité énergétique reste majoritairement située dans la zone  $(-3cm < y < 10cm)$ .

La seconde phase de chargement du câble (figure 4.35) est moins active que la précédente. Si le barycentre de l'activité acoustique progresse vers le câble de





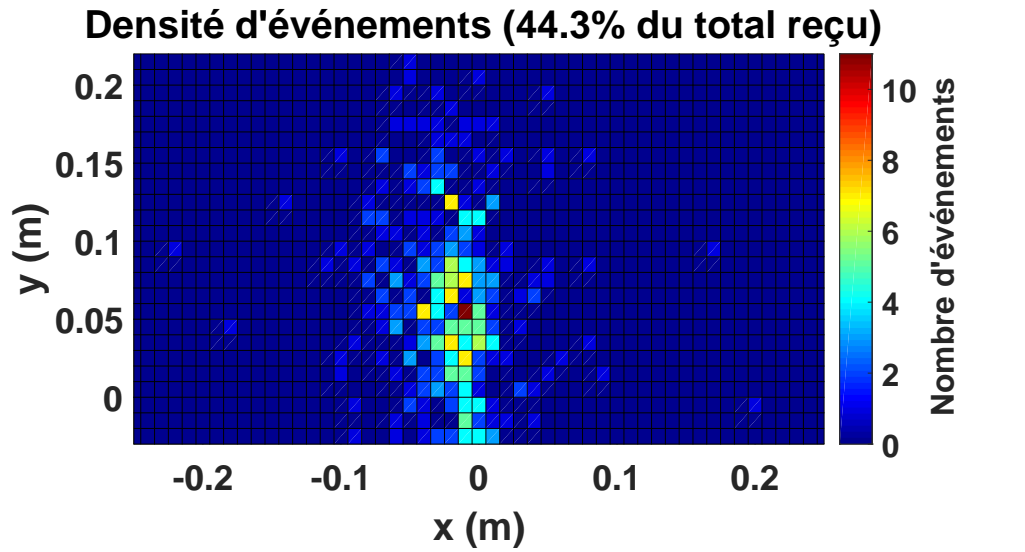
(a) Densité d'événements.



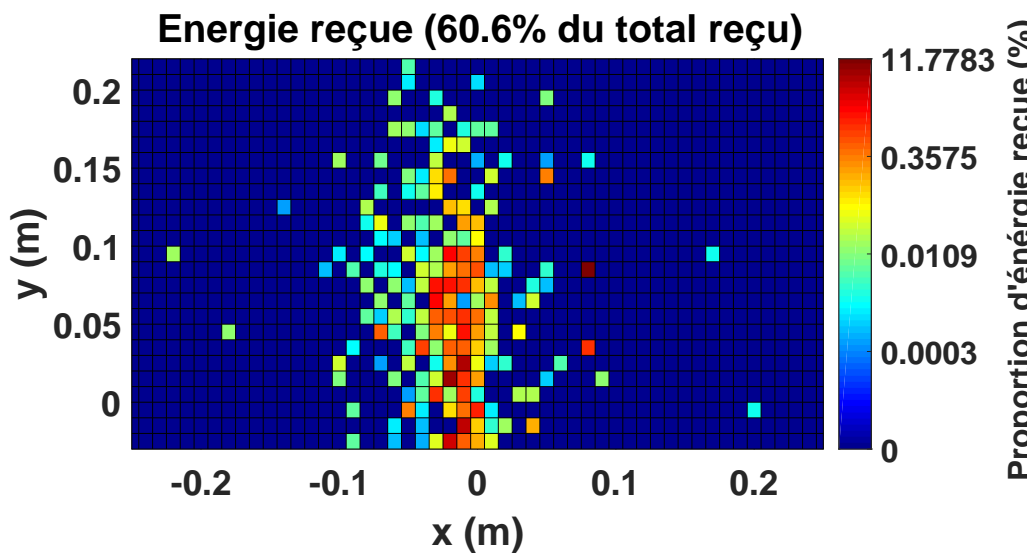
(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.33 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 60 à 0  $kN$ .

précontrainte ( $y = 2cm$ ), son intensité diminue avec un maximum de 5 événements. L'activité énergétique est aussi moins élevée que lors de la phase précédente puisque quasiment divisée par 6. La carte de densité d'énergie fait en revanche apparaître une nouvelle zone d'activité située sur la partie supérieure de la poutre ( $-16cm < y < 21cm$ ) avec une intensité plus importante de ce qui a été observé dans la phase précédente.



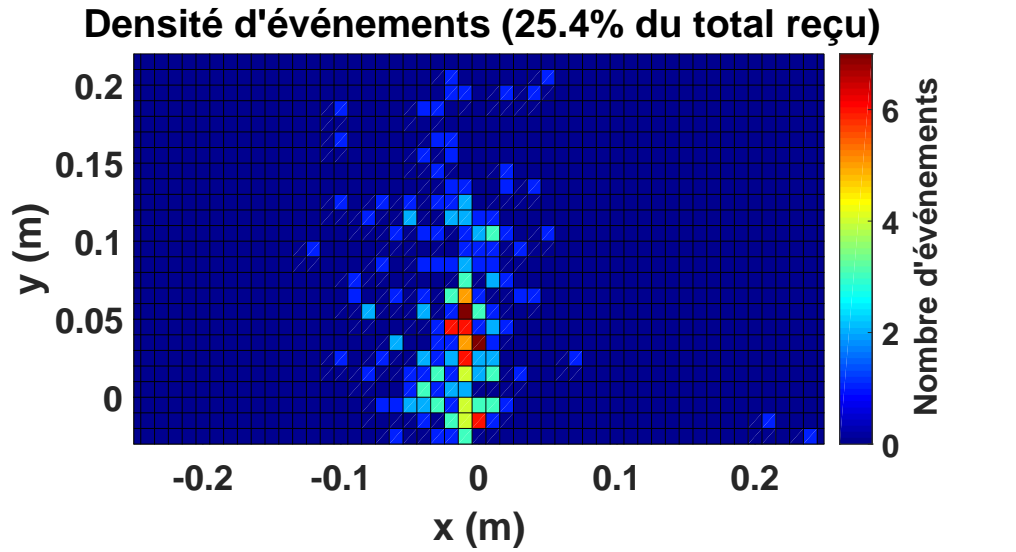
(a) Densité d'événements.



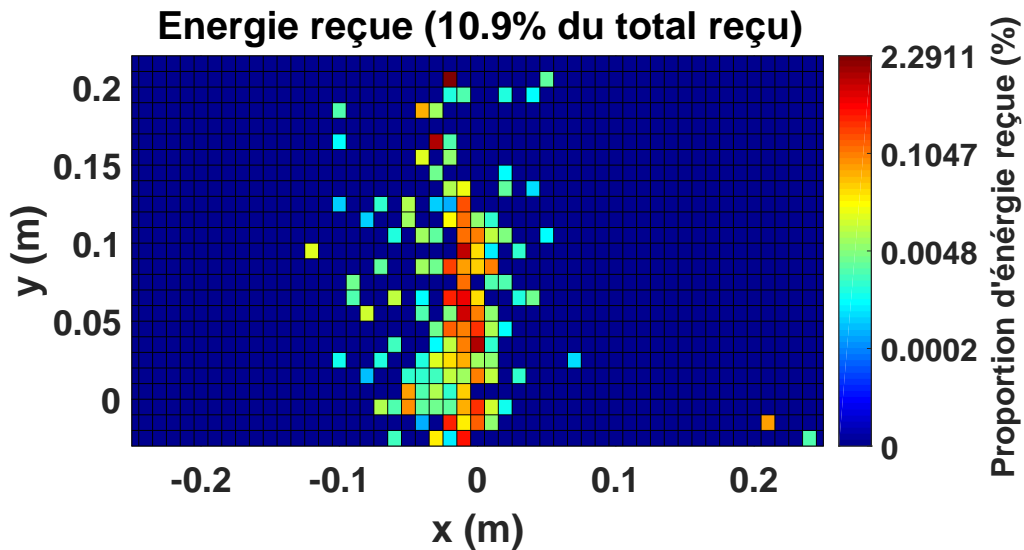
(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.34 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 0 à 20  $kN$ .

L'activité acoustique et énergétique de la troisième étape de chargement du câble décroît encore par rapport à la phase précédente (figure 4.36). L'activité acoustique est désormais centrée autour du câble de précontrainte, au dessus de l'entaille et sur le chemin de la fissure. Comme pour la deuxième phase, on observe ici un pic d'activité énergétique relativement important dans la partie de la poutre en traction.



(a) Densité d'événements.

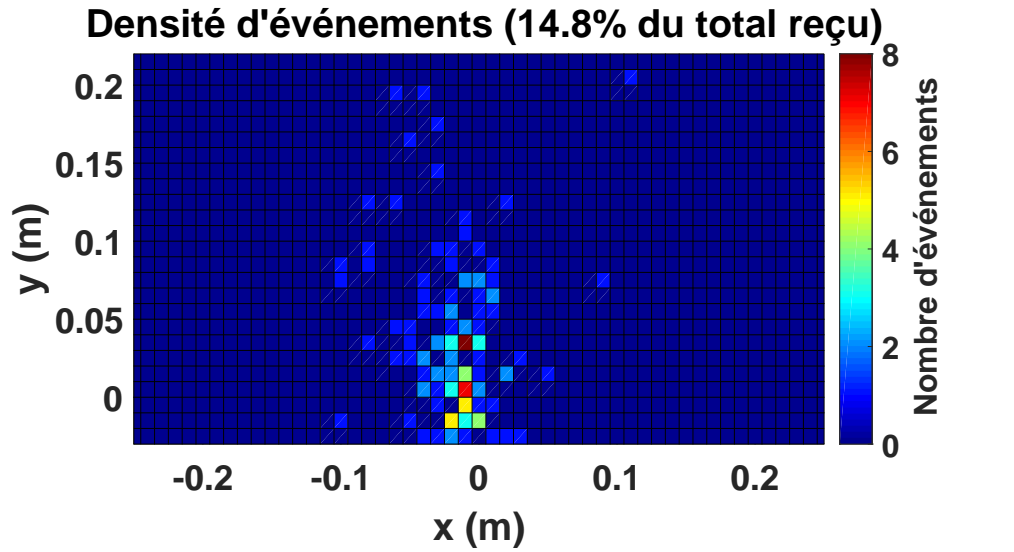


(b) Densité d'énergie.

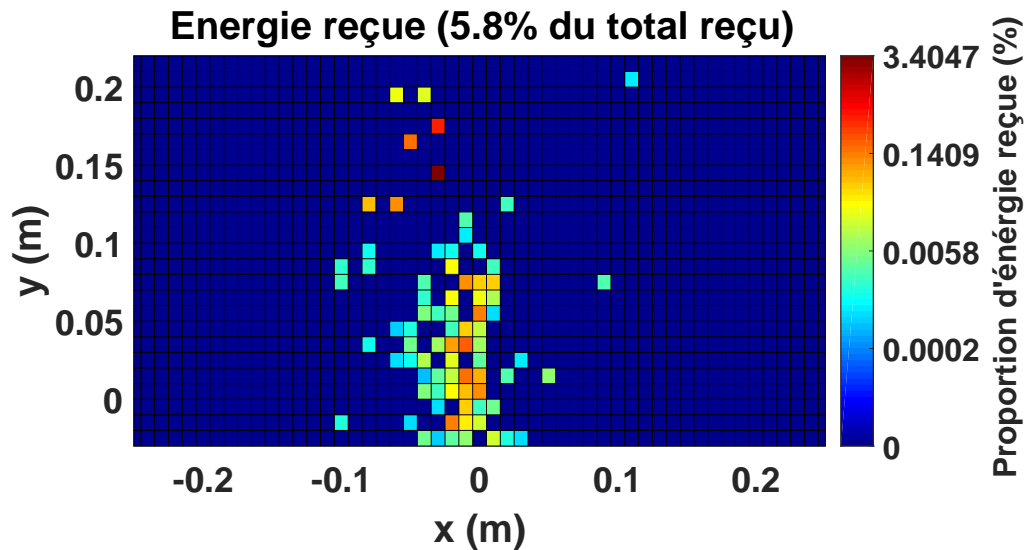
FIGURE 4.35 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 20 à 40  $kN$ .

## Discussion

Les résultats présentés ici montrent une activité acoustique significative centrée autour d'un axe quasiment vertical à partir de l'entaille située sur la surface inférieure de la poutre. L'activité acoustique et énergétique est plus faible et plus diffuse dans les phases de déchargement du câble de précontrainte. Lors de ces phases la fissure s'ouvre sous le poids de la poutre. Si l'activité énergétique reste faible dans ces



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.36 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) lors du passage de la tension de 40 à 60  $kN$ .

phases (22,5 %) par rapport aux phases de refermeture (77,5 %), les pics d'énergie observés sont situés sur la partie supérieure de la poutre et donc probablement au niveau du front de fissure.

Les phases de tension du câble de précontrainte imposent la refermeture de la fissure. Elles sont plus actives acoustiquement (84,5 % contre 15,5 % pour les phases de déchargement). Contrairement aux phases de déchargement, l'activité acoustique

est d'autant plus intense que l'on se rapproche de l'axe majeur d'activité identifié. Cette zone d'activité plus intense sur un axe suggère la présence des deux lèvres de fissure. L'activité acoustique dégagée par le contact entre ces lèvres est probablement issue des mécanismes de frottement et d'écrasement.

On observe par ailleurs un recentrage de l'activité acoustique au niveau du câble de précontrainte à mesure que la tension appliquée augmente. Ainsi l'activité acoustique générée lors du passage de la tension de 40 à 60  $kN$  est quasiment nulle dans la deuxième moitié supérieure de la poutre. En partant du principe que le front de fissure se situe dans la partie supérieure de la poutre, les résultats obtenus suggèrent que la refermeture de la fissure au niveau de sa « pointe » est effectuée dès le premier chargement (0 à 20  $kN$ ). Cette analyse est confortée par le fait qu'au cours des trois phases successives de chargement du câble, l'activité acoustique diminue pour passer de 44,3 à 25,4 puis 14,8 %. Cette diminution témoigne d'une stabilisation de l'activité acoustique et donc d'une limite aux mécanismes de frottement ou écrasement en fonction de la tension appliquée.

L'activité énergétique lors de la première phase de chargement est principalement centrée autour du câble de précontrainte. Les pics observés dans la partie supérieure de la poutre au cours de cette phase ne dépassent pas les 0,3 %. En revanche les pics d'activité énergétiques lors des deux phases suivantes sont situés dans la partie supérieure de la poutre. Leur intensité varie entre 2 et 3 % et représente l'essentiel de l'énergie enregistrée dans ces phases. Cette activité énergétique plus intense se situe dans la partie de la poutre en traction et probablement proche du front de fissure.

## 4.5 Application aux essais d'endommagement thermique

L'objectif des essais d'endommagement thermique est de caractériser spatialement l'endommagement à l'aide de l'émission acoustique. Les essais consistent à solliciter thermiquement le béton grâce à une résistance de forme cylindrique d'axe principal Oz et située en  $(x = 0\text{cm}, y = 8\text{cm})$ . Trois paliers de températures sont imposés dans le cas de l'essai sur la poutre p1-5 détaillé ici (100, 120 et 150 °C).

### 4.5.1 Déroulement des essais

La figure 4.37 présente l'évolution de la température mesurée au cours du temps pour cette deuxième poutre. La consigne est moins bien respectée sur cet essai puisque des variations allant jusqu'à 30 °C autour de la consigne sont enregistrées. La température mesurée en surface ne dépasse pas les 65 °C et reste donc dans le domaine de mesure des capteurs acoustiques R15. La partie de courbe manquante sur la température interne est due à un débranchement du thermocouple par erreur. La partie manquante sur la température de surface est liée à un décollement du thermocouple de surface.

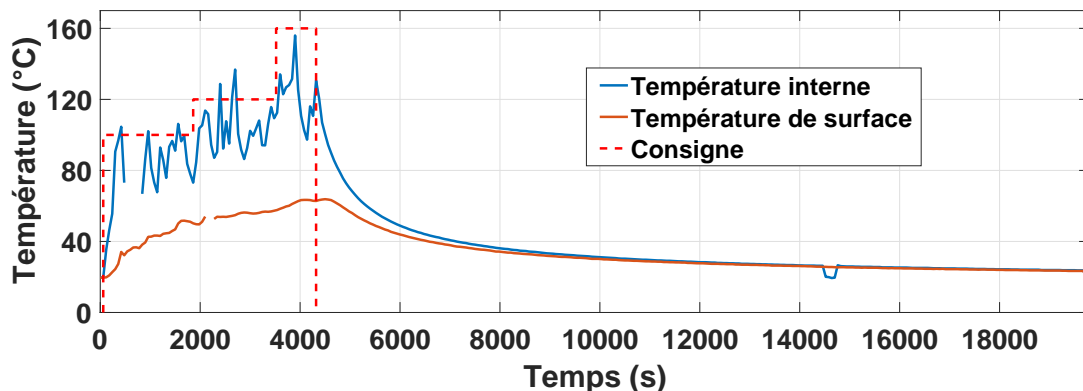


FIGURE 4.37 – Température en fonction du temps sur la poutre p1-5.

Les données présentées dans la suite de cette section sont issues de la poutre p1-5. Les données analogues pour la poutre p1-4 sont présentées dans l'annexe C.

## 4.5.2 Découpage de l'essai en phases

La figure 4.38 illustre le découpage temporel de l'essai sur la poutre p1-5. Chaque phase numérotée de 1 à 4 est représentée par une surface en nuance de rouges. Chacune d'entre elles correspond à une période sur laquelle la consigne en température est constante (1 : 100 °C, 2 : 120 °C, 3 : 150 °C et 4 : 0 °C). La courbe des températures est en bleu, ses valeurs se lisent sur l'axe de gauche. La courbe verte représente la proportion d'événements cumulés reçus au cours de l'essai. La proportion d'énergie reçue associée est en rouge. Les valeurs de ces deux dernières courbes se lisent sur l'axe de droite. Comme pour les essais de flexion 3 points, la proportion d'énergie reçue est inégalement répartie au cours de l'essai puisque la première phase regroupe 60,3 % de l'activité acoustique et 77,8 % de l'énergie reçue au cours de l'essai. La proportion d'événements enregistrée progresse elle aussi par à-coup en suivant les sauts énergétiques.

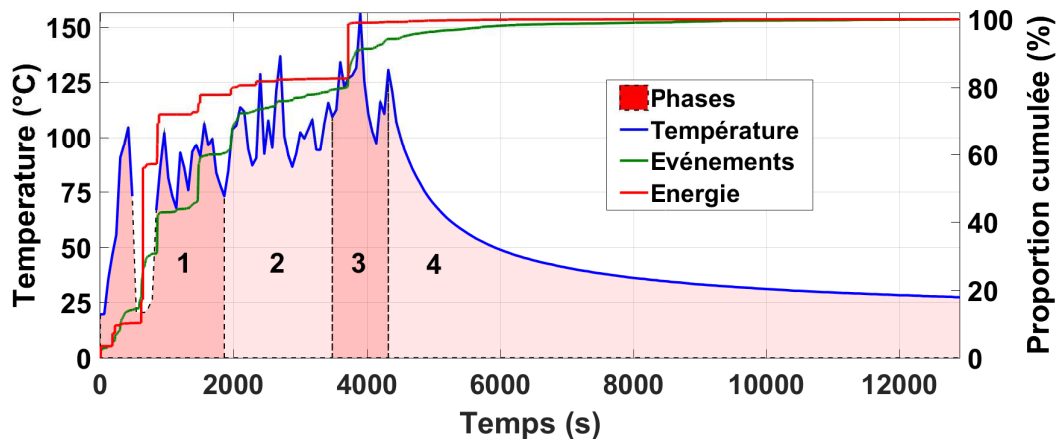


FIGURE 4.38 – Découpage temporel de l'essai d'endommagement thermique sur la poutre p1-5 en 4 phases.

## 4.5.3 Suivi de l'endommagement par analyse des densités d'événements et d'énergies

Compte tenu de la répartition inégale de l'énergie et de l'activité acoustique au cours de l'essai, seules les phases 1 et 3 seront détaillées ici. Elles représentent 75,3 % de l'activité acoustique et 94,5 % de l'énergie reçue au cours de l'essai.

## Phase 1

Dans la première phase, la température mesurée par le thermocouple atteint  $104^{\circ}C$ . Cette phase regroupe la majeure partie de l'activité acoustique avec 60,3% des événements ainsi que 77,8% de l'énergie enregistrés au cours de l'essai. La carte d'activité acoustique ainsi que la distribution selon  $Ox$  (figure 4.39) permettent de mettre en évidence une zone d'activité principale de 4 cm de large (50 % des événements) et de 12 cm de haut. Cette zone s'étend de la surface inférieure de la poutre jusqu'à 4 cm au dessus de la résistance (placée en  $(x = 0\text{cm}, y = 8\text{cm})$ ).

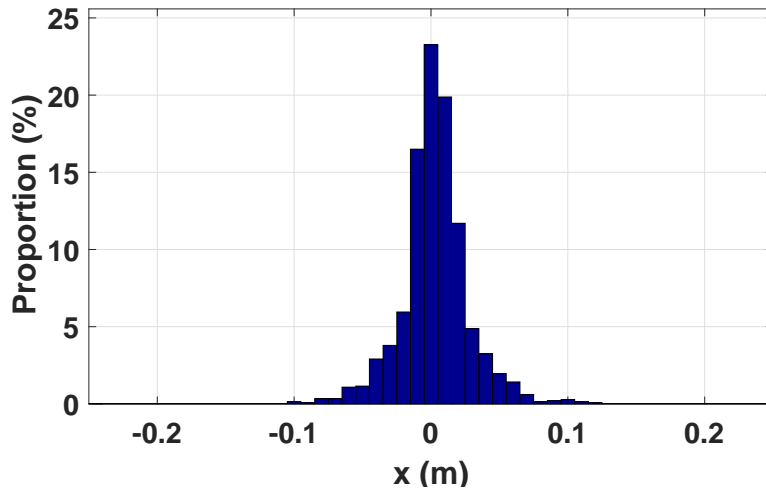
Comme pour l'activité acoustique, l'activité énergétique (figure 4.40) est principalement distribuée selon l'axe vertical  $Oy$  qui passe par la résistance et le point le plus proche de la surface de la poutre. En revanche la distribution de cette énergie selon  $Ox$  est beaucoup plus étroite puisque 64 % de l'énergie reçue au cours de l'essai l'a été dans une bande d'1 cm de large. Les deux maximums principaux de cette distribution ne sont pas situés sur la résistance mais en  $(-0,5 < x < 0,5\text{cm}, 5\text{cm} < y < 6\text{cm})$  et  $(-0,5 < x < 0,5\text{cm}, 1\text{cm} < y < 2\text{cm})$  et représentent respectivement 34,1 et 13,7 % de l'énergie reçue au cours de l'essai.

Les résultats présentés sur cette première phase montrent une zone d'activité acoustique étendue puisque des événements sont localisés jusqu'à 10 cm de part et d'autre de la résistance (selon  $Ox$ ). En revanche 50 % de l'activité acoustique est localisée sur une bande de 4 cm de large. La distribution spatiale des énergies selon  $Oy$  fournit une information supplémentaire puisqu'elle met en évidence une concentration d'énergie libérée (64 %) dans une bande verticale d'1 cm de large et 12 cm de haut passant par la résistance chauffante. La position des deux pics principaux de libération d'énergie suggère une progression des zones d'endommagement entre la résistance et la surface la plus proche.

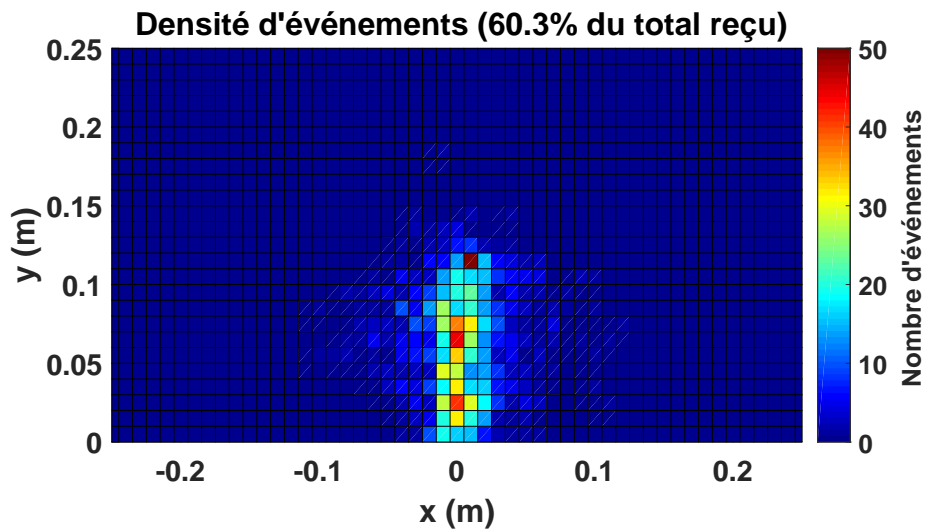
## Phase 3

La consigne imposée lors de la troisième phase est de  $150^{\circ}C$ . La valeur maximale enregistrée sur le thermocouple est de  $156^{\circ}C$ . Les cartes de densité relatives à la troisième phase sont présentées sur la figure 4.41. Cette phase regroupe 15,1%





(a) Distribution d'événements selon  $Ox$ .

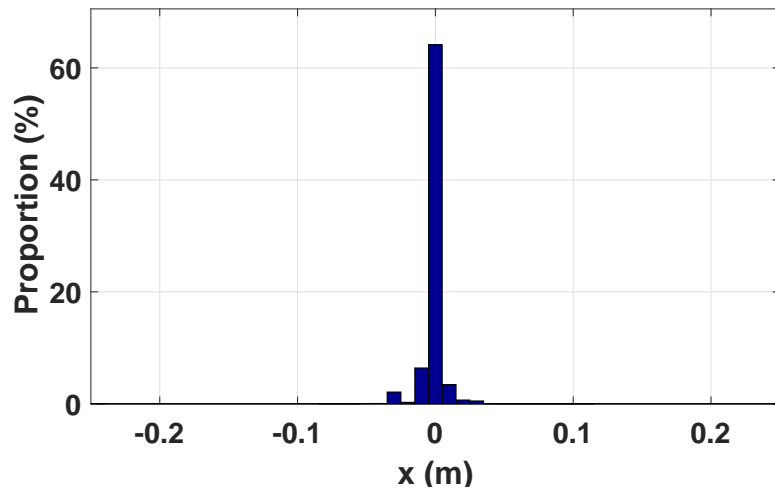


(b) Densité d'événement.

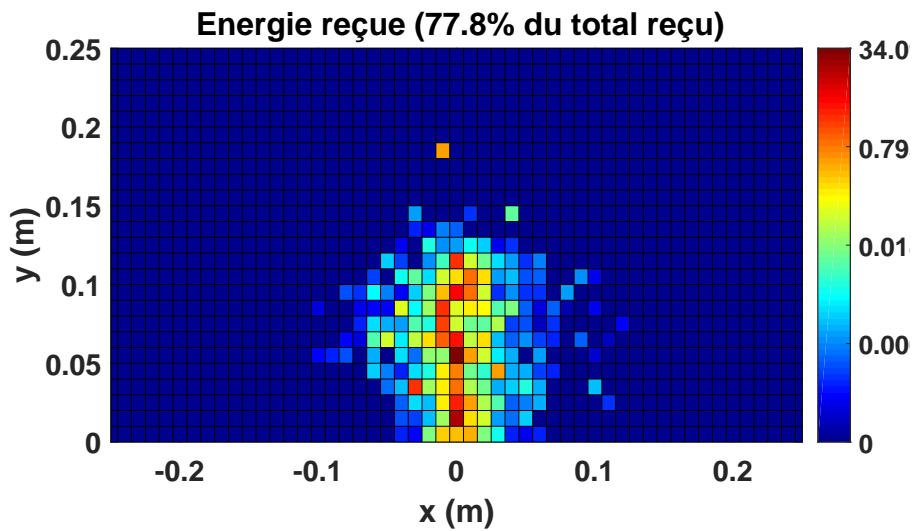
FIGURE 4.39 – Distribution des événements (a) et cartographie des densités d'événements (b) de la phase 1.

de l'activité acoustique et 16,7% de l'énergie enregistrée. A l'exception d'un pic d'activité situé en  $(-0,5 < x < 0,5\text{cm}, 1\text{cm} < y < 2\text{cm})$  sur la figure 4.41(a), l'activité acoustique lors de cette phase est centrée autour de la résistance.

Le pic d'énergie observé sur la figure 4.41(b) en  $(-1,5 < x < -0,5\text{cm}, 2\text{cm} < y < 3\text{cm})$  représente 15,8 % de l'énergie reçue au cours de l'essai et 95 % de l'énergie reçue au cours de cette phase. Malgré le peu d'activité acoustique dans cette zone ce pic d'énergie est dans la continuité de ce qui est observé dans la première phase



(a) Distribution d'énergie selon  $Ox$ .



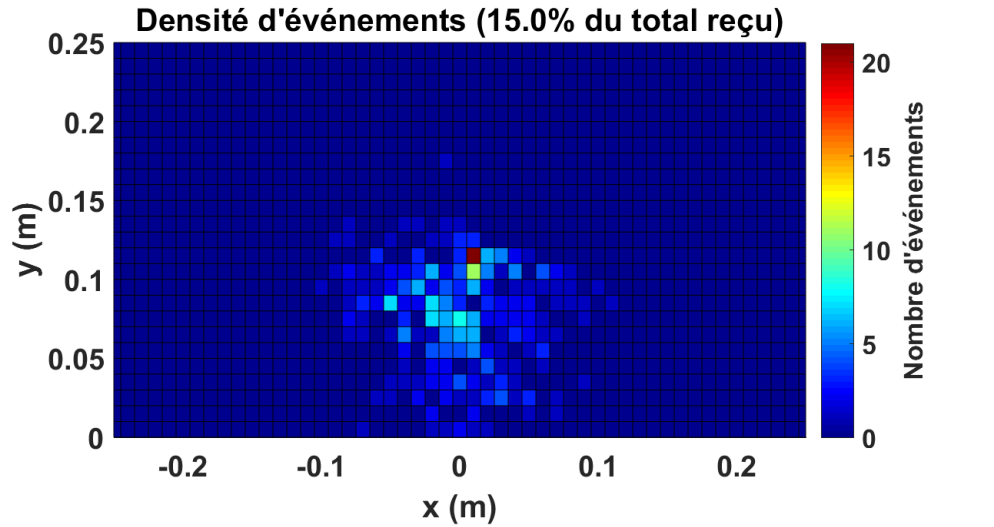
(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.40 – Distribution des énergies (a) et cartographie des densités d'énergies (b) de la phase 1.

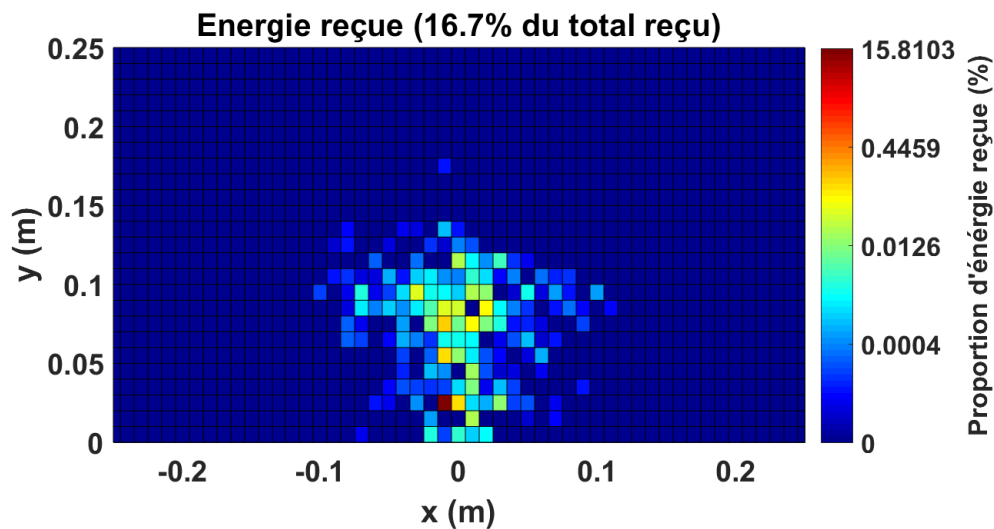
puisque son intensité est d'une part du même ordre de grandeur et d'autre part situé à seulement 1 *cm* de l'axe mis en évidence dans la première phase.

## Discussion

Les proportions cumulées d'événements et d'énergie reçues au cours de l'essai présentent les mêmes caractéristiques que lors des essais de flexion 3 points. Des pics



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 4.41 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3.

énergétiques sont observés sur des temps courts pendant l'essai. La présence de ces pics laisse présager la propagation d'une fissure entre 10 et 20 mins après le début de l'essai. Un dernier pic d'énergie apparaît dans la troisième phase lorsque la consigne en température est de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Des pics d'activité acoustique apparaissent aux mêmes instants mais la relation entre proportion d'énergie et proportion d'événements reçus n'est pas linéaire.

Lors de la première phase les cartes de densité mettent en évidence une zone

d'activité centrée sur l'axe vertical entre la surface inférieure de la poutre et la résistance. L'énergie libérée au cours de cette première phase est concentrée sur le même axe et dans une bande 4 fois plus étroite que celle de l'activité acoustique. De plus les pics d'énergie principaux sont situés entre la résistance et la surface inférieure. La position de ces pics renforce l'idée de propagation de fissure sur l'axe principal mis en évidence.

## 4.6 Conclusion

Ce chapitre propose, sur la base des résultats de localisation, une analyse spatiale de la propagation de l'endommagement et de la fissuration du béton. Les résultats présentés concernent trois types d'essais effectués au cours de cette thèse. Le premier type d'essai étudié est la flexion 3 points sur des poutres entaillées. Le second type d'essai concerne la refermeture active d'une fissure déjà existante à l'aide d'un câble de précontrainte. Enfin le troisième type d'essai concerne l'endommagement mécanique par sollicitation thermique à l'aide d'une résistance chauffante placée dans la poutre.

La recherche du front de fissure sur les distributions d'événements dans le cas de la flexion 3 points a permis de montrer qu'une très faible proportion d'événements (de l'ordre de 4 %) étaient localisés en aval du front de fissure. La différence moyenne entre les positions correspondant aux 96 % d'événements localisés sur les distributions et les positions de front de fissure obtenues par video-corrélation est de l'ordre de 1 *cm*. En revanche la technique de détermination du front de fissure sur les distributions d'événements appliquée au niveau du pic de chargement ne fonctionne pas puisque la hauteur estimée est 7 *cm* au dessus de celle mesurée par video-corrélation.

Le suivi de la position des maximums énergétiques les plus importants dans la poutre permet d'obtenir une évaluation cohérente de la direction et du sens de propagation de la fissure. Néanmoins les positions des maximums énergétiques sont systématiquement en amont de 8 à 9 *cm* du front de fissure mesuré par video-corrélation. Par conséquent le suivi de fissure par cette méthode reste qualitatif.

De manière générale les zones d'activité mises en évidence par les deux types de carte de densité englobent le front de fissure ainsi que la partie déjà fissurée de la poutre. L'activité acoustique et énergétique ne témoigne donc pas seulement de la propagation de la fissure mais aussi de l'activité des zones déjà fissurées d'où la difficulté d'identifier précisément le front de fissure.

Les résultats présentés concernant la détection de fissure déjà existante ont montrés la capacité de l'EA à mettre en évidence les mécanismes de frottement entre les lèvres de la fissure. La localisation des événements associés à l'activité acoustique générée par ces mécanismes permet de localiser la position d'une fissure dès lors que ses lèvres sont en contact. Par ailleurs la refermeture active et forcée de fissure à l'aide d'un câble de précontrainte accroît sensiblement l'activité acoustique due à l'écrasement des deux lèvres l'une contre l'autre.

Les pics des énergies observés au cours de l'essai d'endommagement thermique sont de même nature que ceux observés dans le cas de la flexion 3 points dans les phases de propagation de la fissure. La concentration de ces pics de dissipation d'énergie sur l'axe compris entre la résistance et la surface inférieure de la poutre permet de tracer un chemin de fissuration. Plus de 77 % de l'énergie reçue sur les capteurs au cours de cet essai l'a été dans la première phase de sollicitation de la poutre (consigne à 100 °C). En accord avec la littérature, les deux indices de propagation de fissure observés (présence de sauts énergétiques importants et distribution spatiale de cette énergie suivant un axe unique) dans cette gamme de température permettent d'associer l'activité acoustique enregistrée à des microfissurations dues à la déshydratation du béton sous l'effet de la température.

Les résultats présentés dans ce chapitre illustrent l'importance du couplage entre une représentation de l'endommagement par des cartes de densités d'événements mais aussi de densités d'énergie pour le suivi de la fissuration. Si l'identification du front de fissure est difficile, l'étude des cartes de densités permet néanmoins de suivre la direction et le sens de propagation d'une fissure principalement grâce à la localisation des pics d'énergie dans les poutres. Il permet en outre de reconstruire le profil de fissure en 3D.

# Chapitre 5

## Application sur sites

### 5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'EA obtenus sur deux campagnes d'essais sur site. La première campagne a été effectuée sur la soufflerie de l'Onera sur le site de Mauzac près de Toulouse. La deuxième campagne d'essais a été effectuée sur la maquette Vercors à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement de centrale nucléaire sur le site R&D d'EDF.

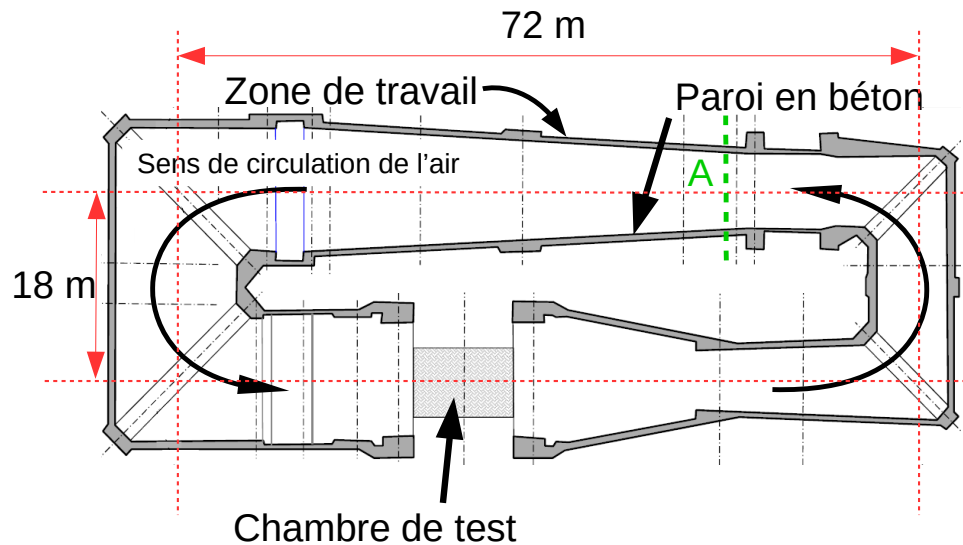
L'objectif de ces essais est de mettre en évidence la propagation ou non de fissures ou la réouverture de fissures déjà existantes sous sollicitations. Pour répondre à cet objectif, l'instrumentation par EA s'est focalisée, dans les deux cas, sur une zone pré-fissurée de la surface du béton.

L'ensemble des données de localisation présentées ici ont été obtenues avec l'utilisation de l'algorithme par maillage adaptatif en 2D. Le début des salves a été déterminé à l'aide du critère d'Akaike.

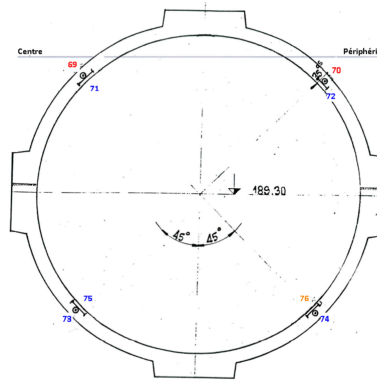
## 5.2 Soufflerie de l'Onera

### 5.2.1 Présentation de la structure

La soufflerie F1 de l'Onera se présente sous la forme d'un conduit fermé en béton armé (figure 5.1(a)) de forme cylindrique (figure 5.1(b)). L'objectif de la soufflerie est



(a) Vue du dessus.



(b) Coupe transversale de la structure au point A de la figure 5.1(a).

FIGURE 5.1 – Schémas de la soufflerie F1 de l'Onera.

de reproduire les conditions d'un déplacement jusqu'à 0,36 Mach dans une chambre de  $11 \times 4,5 \times 3,5 \text{ m}^3$ . L'unité « Mach » se définit comme le rapport entre la vitesse d'un mobile et celle du son dans le même milieu. La chambre est prévue pour accueillir

différentes structures dont des maquettes (figure 5.2) afin de pouvoir effectuer des études aérodynamiques sur celles-ci. L'air est propulsé à l'aide d'une turbine de 16 pâles située à l'intérieur de la structure en béton. Cette turbine est alimentée par un moteur électrique de 9,5 MW. Pour atteindre de telles conditions, la pression interne de la soufflerie peut être ajustée jusqu'à une valeur de 3,85 bars. Cet ajustement est maîtrisé en temps réel à l'aide d'un réservoir de 300 m<sup>3</sup> d'air à 11 bars directement connecté à la soufflerie.

La montée régulière jusqu'à cette pression ainsi que l'âge de la structure ont menés au développement de fissures à différents endroits de la structure. Ces fissures sont systématiquement réouvertes à chaque montée en pression. L'EA est ainsi utilisée pour détecter l'ouverture de fissure au cours des phases de montée et de redescende en pression.



FIGURE 5.2 – Maquette d'un avion commercial dans une configuration d'atterrissage placé dans la chambre de test.

### 5.2.2 Présentation de l'essai

La zone de travail instrumentée par EA est présentée sur la figure 5.3. Sa position au niveau de la structure est précisée sur la figure 5.1(a). Dans cette zone, la paroi mesure 35 cm d'épaisseur. Le choix de cette zone répond essentiellement à 2 critères qui sont : (i) la facilité d'accès pour une instrumentation rapide et dans des



conditions de sécurité satisfaisantes et (ii) la présence d'une fissure traversante.



FIGURE 5.3 – Zone de travail sur la structure.

La position des capteurs ainsi que le chemin observé de la fissure dans la zone d'inspection sont présentées sur la figure 5.4. Les capteurs sont positionnés de part et d'autre de la fissure. Ils forment des mailles triangulaires symbolisées par les pointillés rouges dont la taille moyenne des arêtes est de  $52\text{ cm}$ . La taille des mailles est définie à partir de la courbe d'atténuation présentée sur la figure 5.6. Cette courbe est obtenue à partir de cassés de mines effectués à intervalles réguliers en partant du capteur numéro 1. L'atténuation mesurée est de l'ordre de  $50\text{ dB.m}^{-1}$ . Compte tenu de cette valeur d'atténuation, la taille des mailles choisie permet de former des événements à partir d'au moins 3 signaux issus d'une source d'intensité moyenne ( $60\text{ dB}$  et plus) située au centre des mailles.

Le déroulement de l'essai est divisé en trois phases 5.5. La première phase concerne la montée en pression à l'intérieure de la structure (symbolisée par une première double flèche verte). La deuxième phase débute lorsque la pression de  $3,85\text{ bars}$  est atteinte (double flèche rouge). Pendant cette phase, la turbine est mise en route à plusieurs reprises pour les essais de l'Onera. Enfin, la dernière phase concerne la descente en pression progressive.

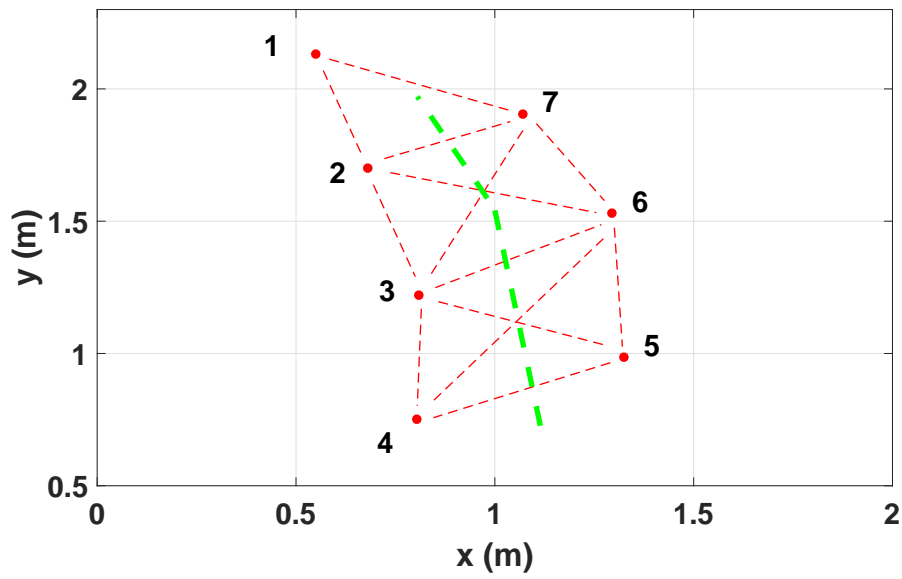


FIGURE 5.4 – Position des capteurs (points rouges) et chemin observé de la fissure (vert).

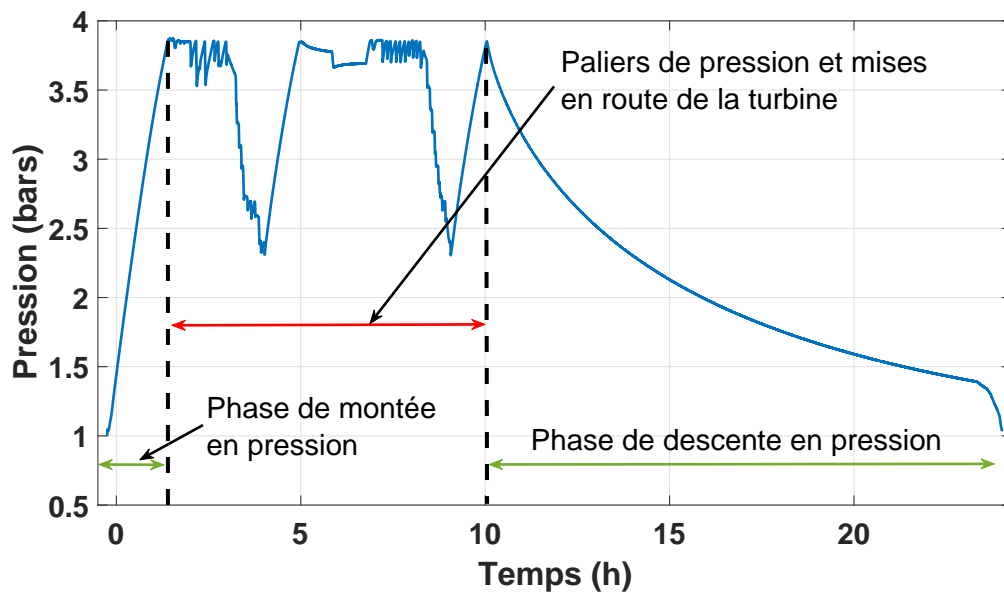


FIGURE 5.5 – Pression absolue en fonction du temps pendant l'essai.

### 5.2.3 Suivi à l'aide de la technique d'EA

Lors de la seconde phase présentée sur la figure 5.5, les vibrations et le bruit générés par la turbine ne permettent pas de poursuivre l'acquisition puisque les capteurs enregistrent un bruit constant à 88 *dB*. Aucune donnée relative à cette

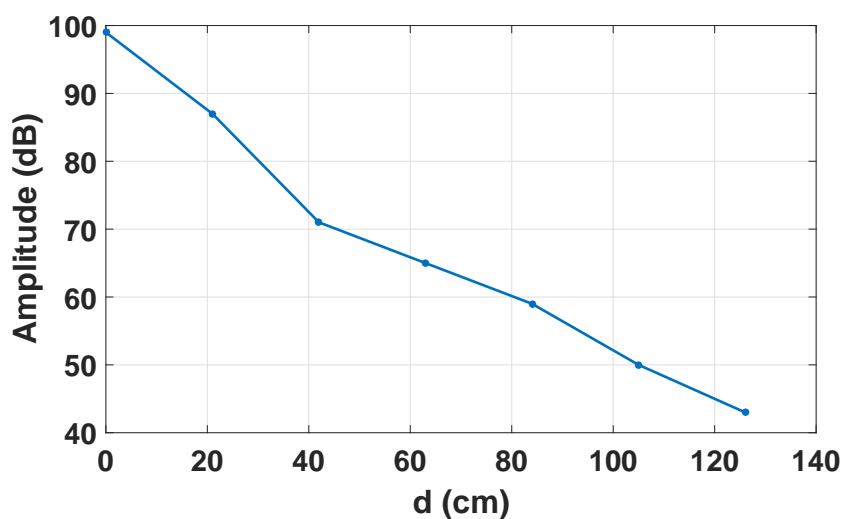


FIGURE 5.6 – Amplitude maximale des salves reçues sur le capteur 1 en fonction de la distance de la source.

phase ne pourra donc être présentée.

Au cours de la phase de montée en pression l'activité acoustique est extrêmement faible. Seulement 1090 signaux ont été enregistrés sur les 7 capteurs d'EA. La figure 5.7 représente la proportion de signaux cumulés reçus par capteur pendant cette phase. Les proportions font référence à la totalité des signaux enregistrés au cours de l'essai (1232). La phase de montée en pression regroupe 89 % des signaux enregistrés au cours de l'essai. On observe par ailleurs une répartition inégale des signaux entre les capteurs. En effet, les capteurs situés sur la partie supérieure (1, 2, 6 et 7) regroupent 70,6 % de l'activité enregistrée au cours de l'essai au cours de la phase de montée. Par ailleurs, l'activité acoustique enregistrée lors de la phase de descente de pression ne représente que 11,4 % du total.

La proportion d'énergie enregistrée sur chaque capteur au cours de l'essai est présentée sur la figure 5.8. Comme pour l'activité acoustique, l'énergie reçue au cours de l'essai est concentrée dans la phase de montée en pression qui regroupe 70,8 % de l'énergie reçue. L'essentiel de cette énergie est reçue sur les capteurs situés sur la partie supérieure de la zone couverte. L'énergie reçue dans la phase de descente en pression provient essentiellement d'un signal reçu sur le capteur 2. Ce signal représente 88 % de l'énergie obtenue lors de cette phase. Outre ce cas particulier, l'activité énergétique est quasiment nulle dans cette phase.

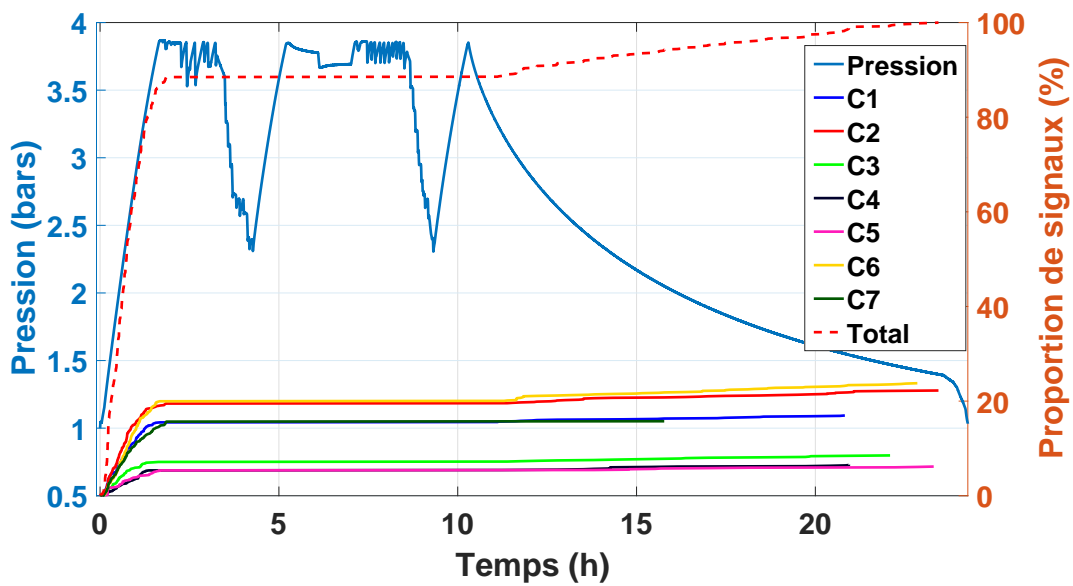


FIGURE 5.7 – Evolution de la pression et de la proportion cumulée des signaux reçus par capteur en fonction du temps au cours de l’essai.

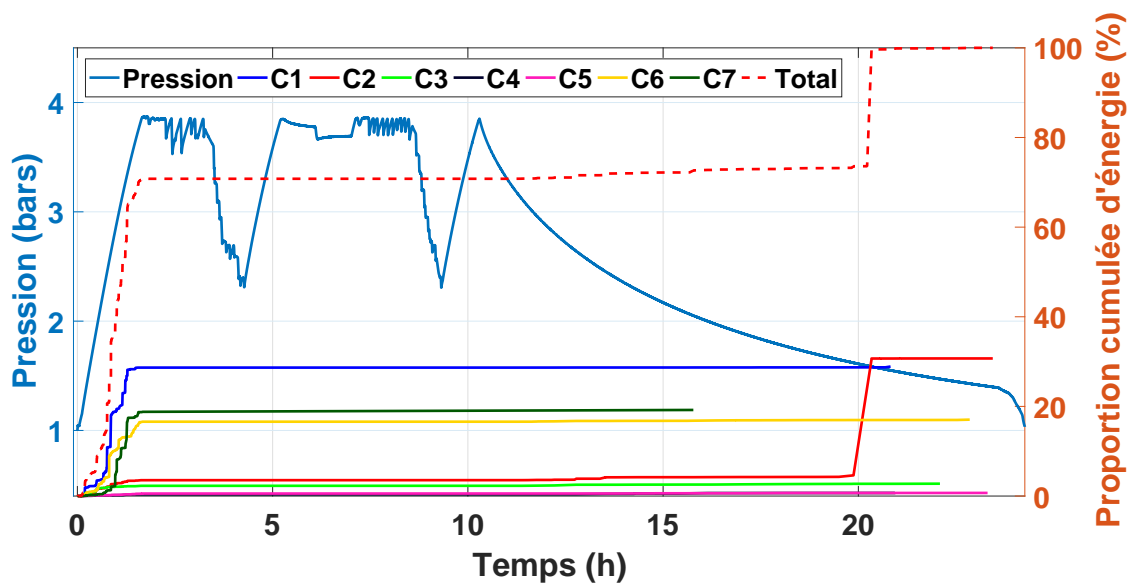
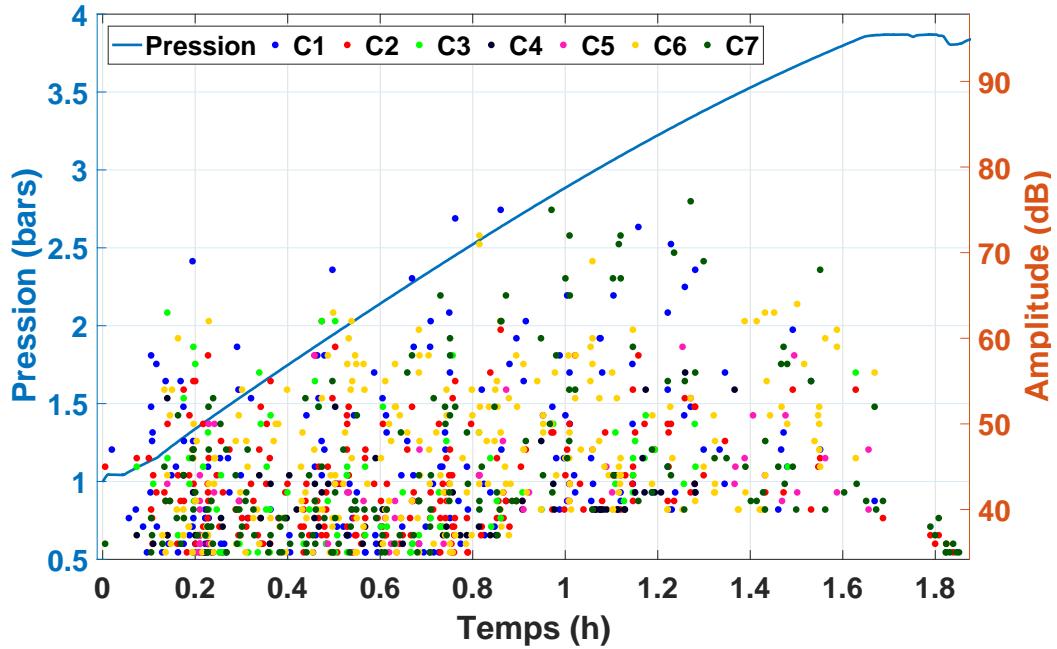


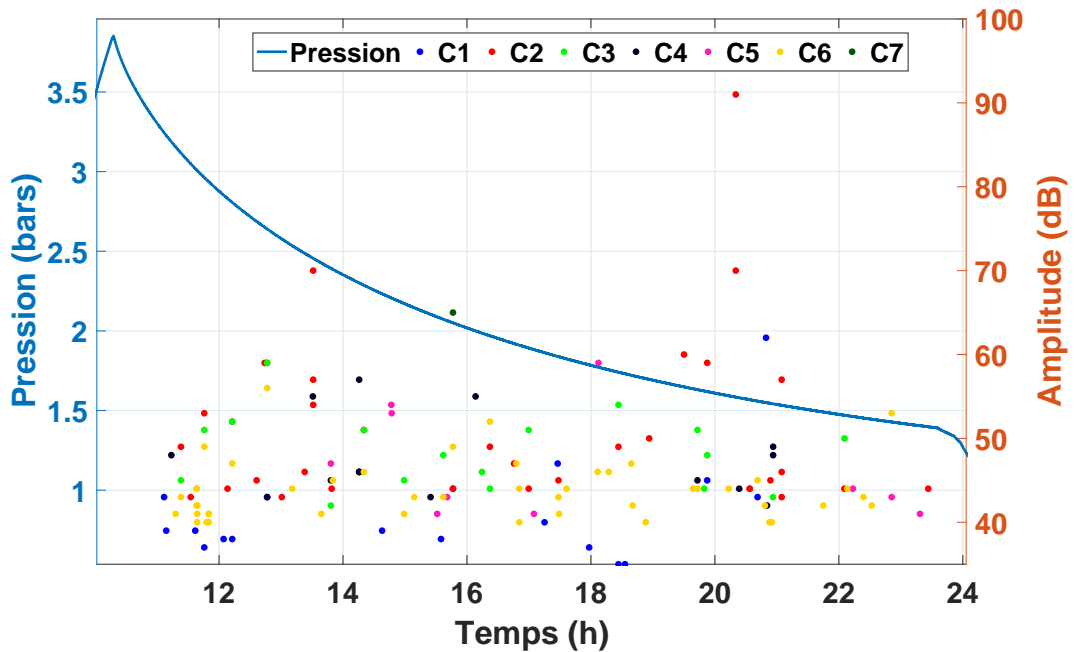
FIGURE 5.8 – Evolution de la pression et de la proportion d’énergie reçue par capteur en fonction du temps au cours de l’essai.

La figure 5.9 présente l’amplitude maximale des signaux enregistrés sur chacun des capteur au cours des phases de montée (figure 5.9(a)) et de descente en pression (figure 5.9(b)). Sur ces figures chaque point représente l’amplitude maximale d’un signal dont la valeur se lit sur l’axe de droite. Lors de la montée en pression, le seuil d’acquisition est remonté de 35 à 40  $dB$  entre 0,8 et 1,8  $h$ . Cette modification est

due à l'enregistrement d'un bruit continue supérieure à  $35dB$  pendant cette période. On observe par ailleurs une activité constante au cours des deux phases bien que



(a) Phase de montée en pression.



(b) Phase de descente en pression.

FIGURE 5.9 – Evolution de la pression et amplitude maximale des signaux reçus sur chaque capteur en fonction du temps.

plus faible lors de la descente en pression. De la même manière on n'observe pas de modification des amplitudes maximales en dehors du signal à 91 *dB* enregistré sur le capteur 2 dans la phase de redescente. Le caractère monotone des deux critères de l'activité acoustique et énergétique au cours des deux phases observées ne permet pas de diagnostiquer la propagation d'une fissure dans le matériau.

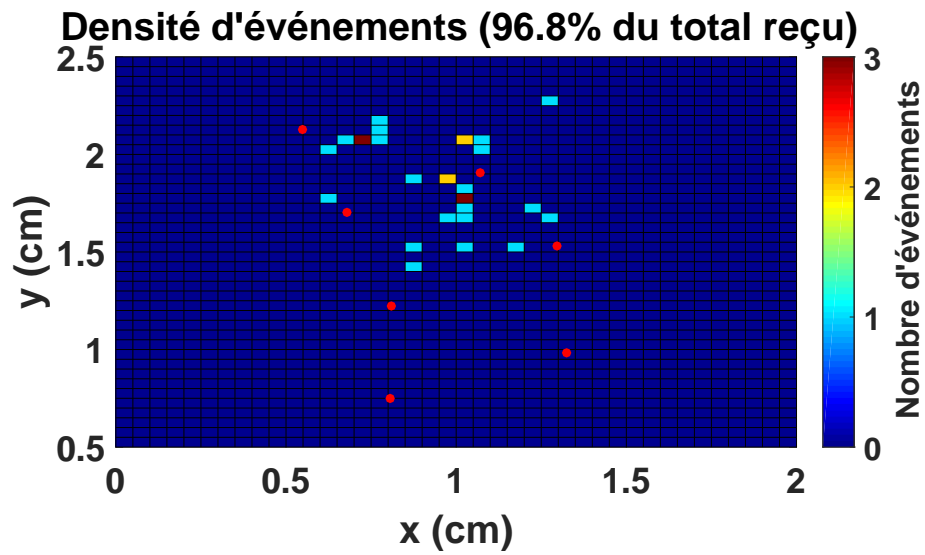
#### 5.2.4 Identification des zones d'activité acoustique

Les cartes de densité d'événements et d'énergie relatives à la phase de montée en pression sont présentées sur la figure 5.10. La position des capteurs est représentée par des points rouges. Seuls 35 événements ont été formés au cours de l'essai, 4 sont localisés en dehors de la zone représentée sur les cartes ci-dessous, 30 sont situés dans la phase de montée en pression et 1 seul événement est formé dans la phase de descente en pression. La position des événements sur la carte des densités d'événements est en accord avec les résultats présentés dans la sous-section précédente. La partie supérieure de la zone couverte est plus active que la partie inférieure. En revanche aucune concentration d'événements suffisamment importante ne permet de localiser un chemin de fissure. La carte des densités d'énergie fait apparaître une zone localisée d'activité puisque plus de 90 % de l'énergie associée aux événements formés au cours de l'essai provient d'une zone restreinte pouvant se trouver sur le chemin de la fissure observée.

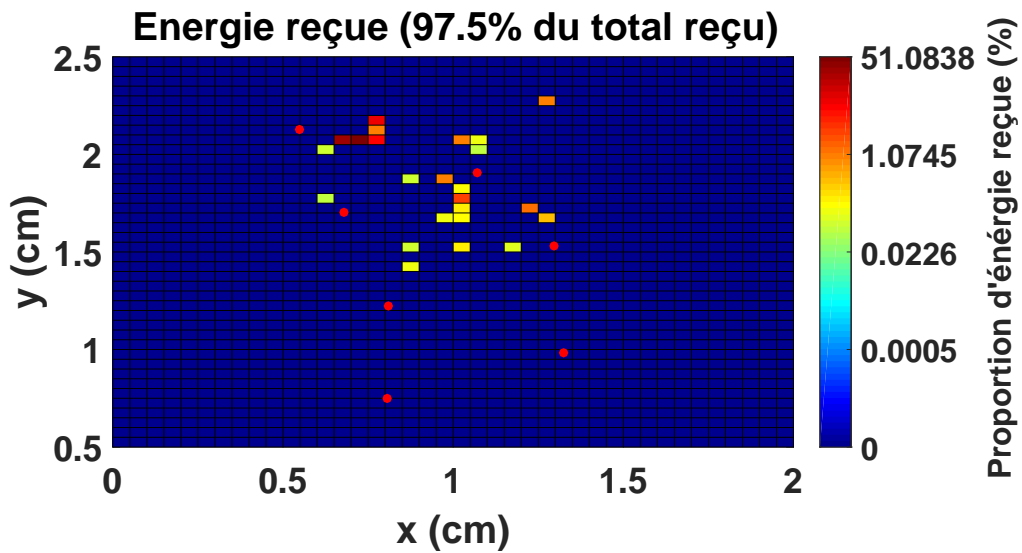
#### 5.2.5 Discussion

Les résultats obtenus sur la soufflerie de l'Onera permettent d'affirmer qu'il n'y a pas de propagation de fissure dans la zone couverte par les capteurs. En effet la faible activité acoustique enregistrée au cours de l'essai avec 1232 signaux et 35 événements formés n'est pas compatible avec l'activité observée lors des essais de propagation de fissure (flexion 3 points). Lors de ces essais le nombre de signaux enregistré est de l'ordre de la centaine de milliers pour 10 à 15000 événements formés.

En revanche la répartition inégale de l'activité acoustique et énergétique entre les capteurs permet de localiser une activité plus importante dans la partie supérieur



(a) Densité d'événement.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 5.10 – Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la phase de montée en pression. Surface des mailles :  $4 \text{ cm}^2$ .

de la zone d'inspection. Cette zone plus active est possiblement reliée à l'extrémité supérieure de la fissure. Pour confirmer cette hypothèse d'autres essais comprenant un réseau de capteurs plus étendu dans la partie supérieure pourrait être envisagés. De tels essais permettraient de confirmer une activité plus importante au niveau des extrémités de la fissure.

## 5.3 Vercors

### 5.3.1 Présentation de la structure

Vercors (**VE**rification **R**éaliste du **CO**nfinement des **R**éacteurs) est une maquette du bâtiment réacteur d'une centrale nucléaire à l'échelle 1/3 (figure 5.11). Cette structure se présente sous la forme d'une double enceinte de forme cylindrique avec d'un dôme, le tout en béton armé (figure 5.11(b)). Les murs de chacune des deux enceintes mesure 40 cm d'épaisseur. La première enceinte (interne) en béton précontraint assure l'étanchéité de la structure. La deuxième enceinte (externe) assure un confinement supplémentaire en plus de protéger l'enceinte interne des agressions externes. La structure finale mesure 30 m de haut et 16 m de diamètre.



(a) Enceinte à l'échelle 1/3. (b) Espace entre enceintes avant la pose des dôme.

FIGURE 5.11 – Maquette Vercors à l'échelle 1/3 d'une enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire sur le sites R & D : « les Renardières » d'EDF à Écuelles.

Les essais menés sur la maquette permettent de mieux comprendre les phénomènes de vieillissement qui affectent les ouvrages en béton. En effet, l'effet d'échelle



1/3 provoque un vieillissement accéléré des matériaux par rapport à un ouvrage grandeur nature. Ceci permet de vérifier la robustesse de l'ouvrage dans le temps pour mieux comprendre et ainsi modéliser le vieillissement du béton.

D'autres essais visent à évaluer la robustesse et la capacité de confinement de l'enceinte interne dans le cas d'un accident grave. Les conséquences identifiées d'un accident (perte de réfrigérant primaire ou rupture de tuyauterie vapeur) conduirait à une augmentation de la pression interne jusqu'à 5 *bars* ainsi que de la température interne jusqu'à 190 °C en 20 secondes.

Pour vérifier les capacités de résistance et de confinement des enceintes à l'échelle réelle une batterie d'essais est programmée sur chacune d'entre elle tous les 10 ans. Lors de ces essais, la pression interne de l'enceinte est augmentée à l'aide de compresseurs jusqu'à 5 *bars* afin de se rapprocher le plus possible des conditions d'un accident. Le même type d'essai est prévu 1 fois tous les 13 mois sur la maquette Vercors. La sous-section suivante détaille le déroulement de ces essais.

### 5.3.2 Présentation de l'essai

La montée en pression est assurée par deux compresseurs reliés à l'intérieur de l'enceinte interne (figure 5.12). La figure 5.13 présente le déroulement de l'essai sur les 3 jours. Un premier palier de pression de 4 heures à 3,02 *bars* est atteint après 10 heures de montée en pression. Ce premier palier permet à EDF de vérifier le bon comportement de l'enceinte. Le palier principal d'une durée de 12 heures à 5,27 *bars* est atteint après une deuxième phase de montée en pression de 12 heures. L'accès à l'espace entre enceintes est possible pendant ce deuxième palier. Il permet à différentes équipes d'effectuer des essais d'aspersion et des mesures de débits de fuites à l'aide de boîtes collectrices. Enfin, la pression est relâchée progressivement à deux vitesses différentes pendant 20 heures jusqu'au retour à la pression atmosphérique.

La courbe de pression de la figure 5.13 est scindée en deux parties. La première en trait plein correspond à la mesure de la pression en temps réel fournie par EDF. La seconde en pointillés correspond à une projection de la pression par rapport au protocole défini avant le début de l'essai. La pression exacte mesurée dans cette seconde partie n'a pas été fournie pour des raisons de confidentialité.



FIGURE 5.12 – Compresseurs utilisés pour la montée en pression.

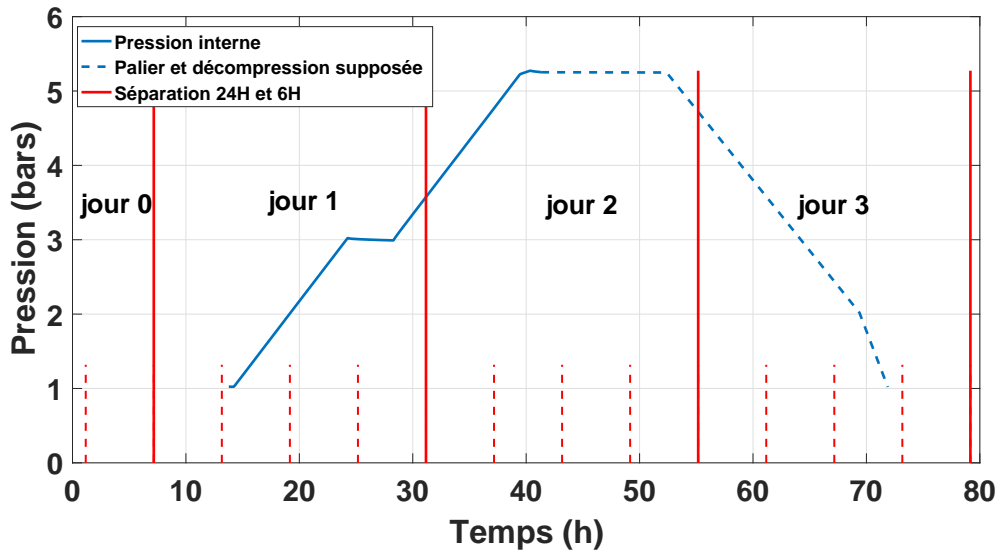


FIGURE 5.13 – Evolution de la pression interne en fonction du temps.

L'instrumentation par EA a été effectuée la veille (jour 0) afin de lancer l'acquisition 13 heures avant le début de la montée en pression pour évaluer l'activité acoustique en dehors de toute sollicitation. Il faut noter ici que les données reçues au cours du deuxième palier n'ont pas été conservées car trop bruitées par l'intervention des différentes équipes.

### Instrumentation

La photo de la figure 5.14 représente la zone d'inspection couverte avec les 8 capteurs R15 d'EA. Le mur instrumenté est la face extérieure de l'enceinte interne

dans l'espace entre enceintes. La position des 8 capteurs est symbolisée par des cercles rouges. La zone couverte mesure 1,5 m de large sur 1,1 m de haut. Cette zone a été choisie pour la présence de 3 fissures observées lors d'essais antérieurs. Les autres capteurs présents sur la photo ainsi que le robot fixé contre le mur sont associés à d'autres techniques appliquées par les partenaires du projet ENDE.

La figure 5.14(b) illustre la position relative des capteurs sur la surface d'investigation. Sur la même figure, les chemins symboliques de fissures observables à l'œil nu sont représentés par des traits verts en pointillés. Cette disposition de capteurs permet de couvrir une zone assez large pour pouvoir éventuellement suivre plusieurs fissures en même temps. La limite de la taille de la surface d'investigation est la distance entre les capteurs. Celle-ci ne doit pas être trop grande afin de pouvoir enregistrer les ondes d'un même événement par plusieurs capteurs en même temps. La taille moyenne des mailles symbolisées par des pointillés rouges est d'environ 60 cm. Cette valeur a été déterminée en se basant sur les essais d'atténuation présentés dans la sous-section 5.3.3. Elle permet de localiser un événement par au moins 3 capteurs si la source se situe à l'intérieur de ces mailles.

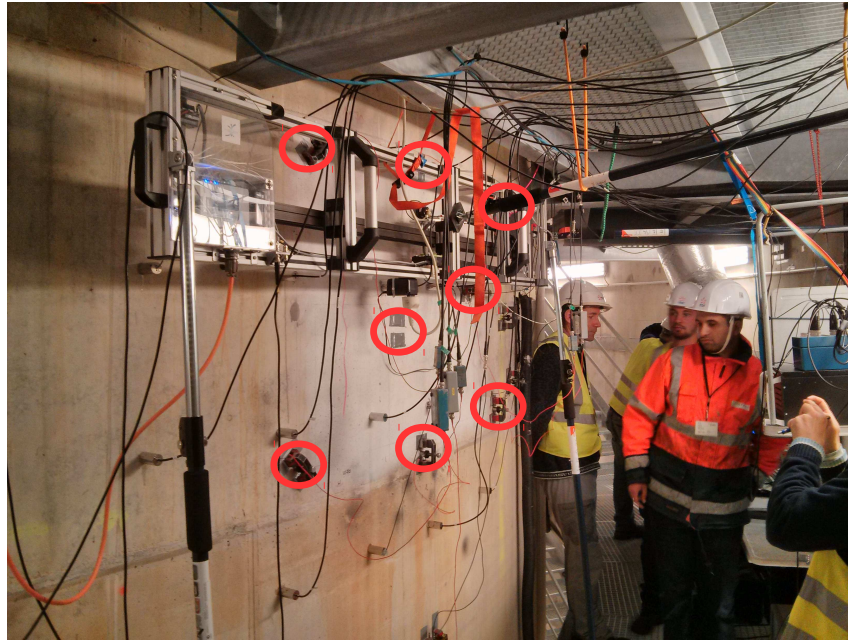
Le couplage des capteurs à la surface est assuré par le même silicone utilisé pour les essais en laboratoire. La figure 5.15 représente le système de fixation des capteurs sur la paroi. Il s'agit d'un dispositif aimanté posé sur deux plaques métalliques préalablement collées sur la surface du béton. Un ressort permet de maintenir une pression constante sur le capteur.

### 5.3.3 Suivi à l'aide de la technique d'EA

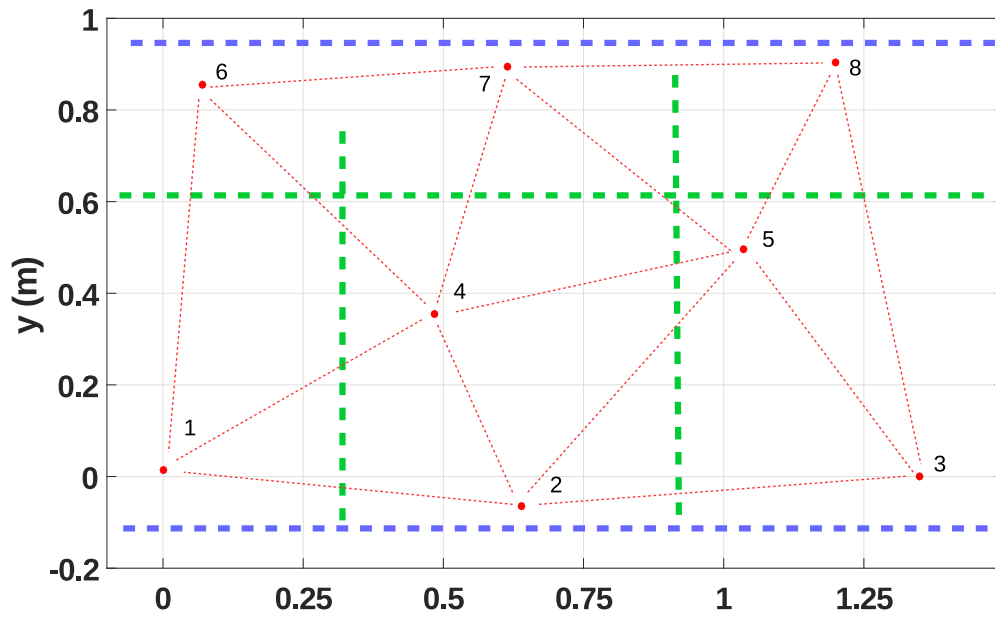
#### Courbes d'atténuation

Des essais d'atténuation préliminaires ont été effectués entre différents capteurs à l'aide des cassés de mines (CDM). La figure 5.16(a) représente la position des CDM par des croix vertes et la position des événements associés aux CDM par des croix bleues. L'erreur maximale entre les positions des événements et les positions réelles des sources est de 6 cm.

Les courbes d'atténuation obtenues sur les capteurs 2 et 3 sont présentées sur la



(a) Zone de travail dans l'espace entre enceintes et position des capteurs (cercles rouges).



(b) Position des capteurs (points rouges), chemins symboliques des fissures observables à l'œil nu (pointillés verts) et reprises de bétonnage (pointillés bleus) sur la zone d'inspection.

FIGURE 5.14 – Zone de travail (a) et position des capteurs et des fissures observables (b).

figure 5.16(b). Elles représentent l'amplitude maximale de l'onde reçue sur chaque capteur en fonction de la distance CDM/capteur. Une atténuation de 35 dB pour

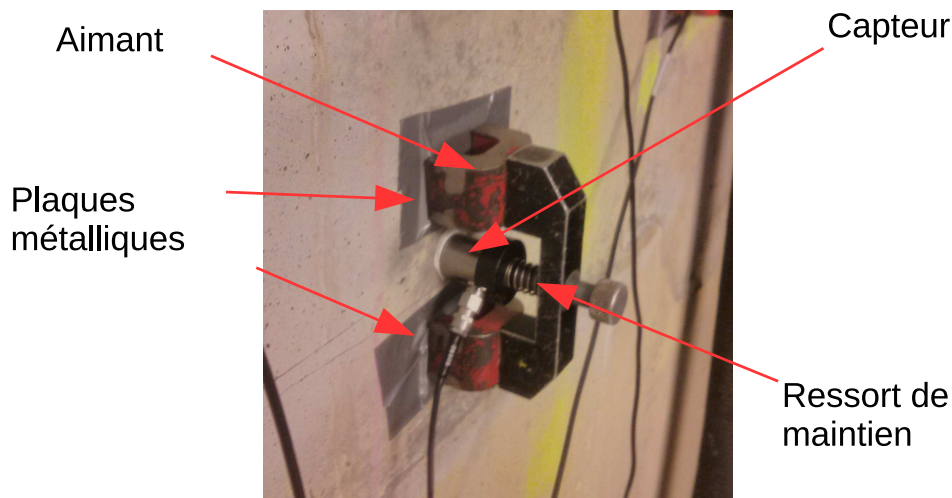


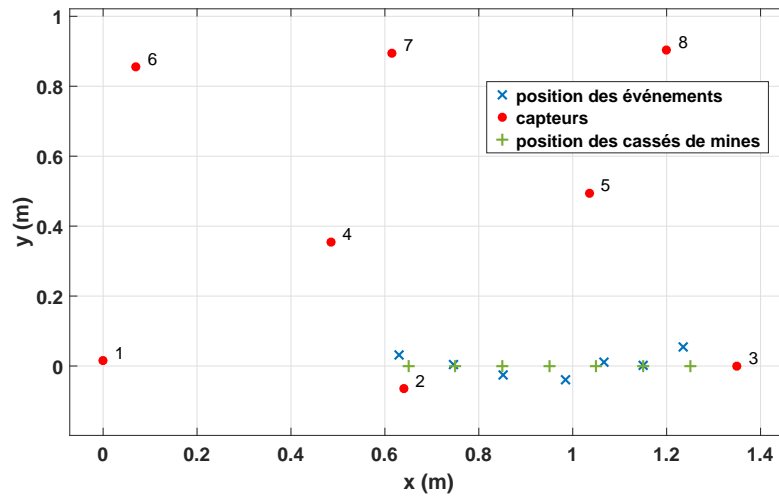
FIGURE 5.15 – Système de fixation magnétique des capteurs R15.

une distance de 50 *cm*. A partir de cette valeur et compte tenue de la distance moyenne entre les capteurs, on peut estimer que l'onde émise par un événement de 70 *dB* ou plus à proximité d'un capteur pourra être captée par au moins deux autres capteurs afin de former un événement et le localiser.

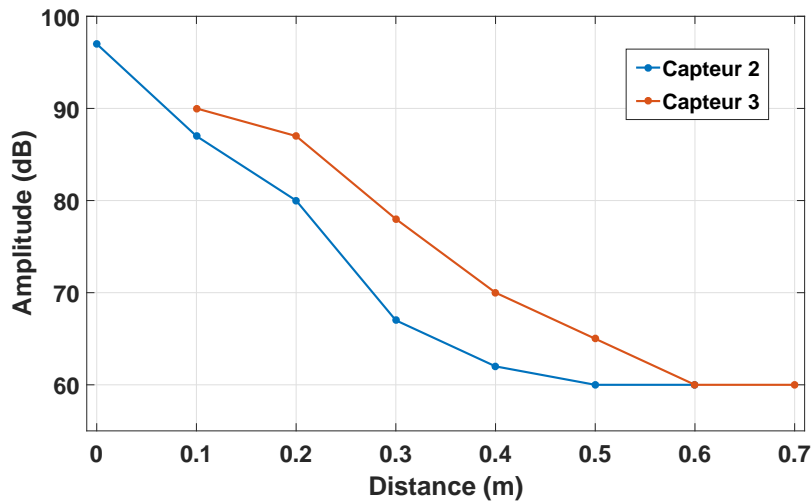
### Activité acoustique

La distribution de l'activité acoustique par capteur est présentée sur la figure 5.19. Les proportions représentées sur cette figure font référence à l'ensemble des signaux reçus au cours de l'essai. Une activité légèrement plus importante est observée dans la partie droite de la zone d'inspection avec les capteurs 2, 3, 5 et 8 qui totalisent 60,5% de l'activité totale reçue au cours de l'essai.

La figure 5.18 présente l'activité acoustique cumulée par capteur au cours du temps en corrélation avec la pression. Bien que les phases d'activité acoustique soient identiques d'un capteur à l'autre, on observe une distinction forte entre l'activité enregistrée pendant les deux phases de montée en pression et la phase de descente. En effet, les deux phases de montée en pression représentent entre 80 et 90 % de l'activité reçue contre 10 à 20 % en fonction des capteurs pour la phase de descente en pression. En revanche, la deuxième phase de montée en pression correspondant à



(a) Position des cassés de mine entre les capteurs 2 et 3.



(b) Courbes d'atténuation.

FIGURE 5.16 – Courbes d'atténuation des ondes entre les capteurs 2 et 3 obtenues par cassé de mine.

un  $\Delta p$  de 2,2 bars regroupe à elle seule 60 à 70 % de l'activité enregistrée. L'activité acoustique est donc prédominante dans cette deuxième phase pour  $2 \text{ bars} < p_{abs} < 5,27 \text{ bars}$ .

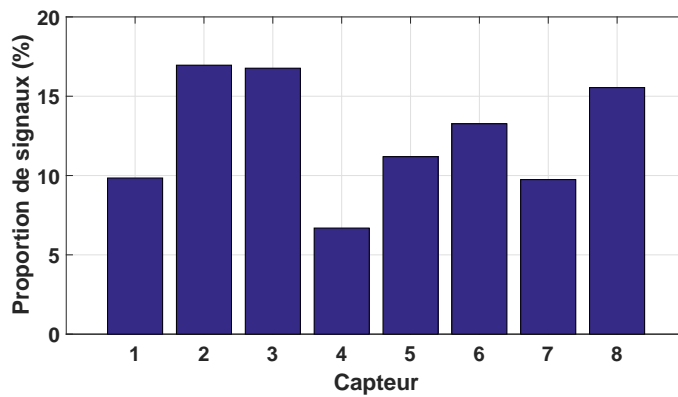


FIGURE 5.17 – Proportion de signaux reçus par capteur au cours de l’essai.

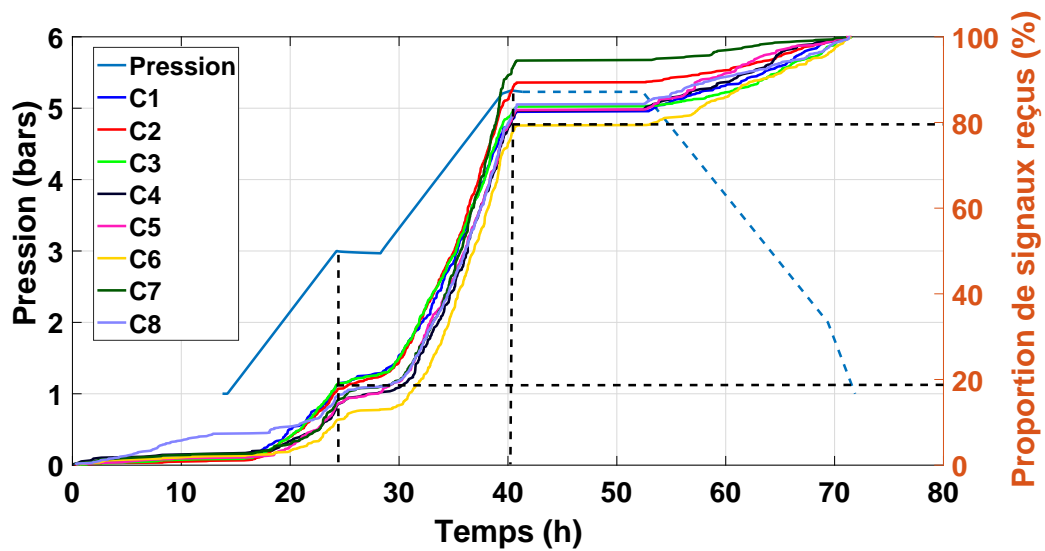


FIGURE 5.18 – Pression et activité acoustique par capteur en fonction du temps.

### Etude énergétique

La distribution d’énergie par capteur présentée sur la figure 5.19 est plus inégale que l’activité acoustique puisque les capteurs 5 à 8 situés dans la partie à droite de la zone d’inspection totalisent 78,8 % de l’énergie enregistrée au cours de l’essai.

Comme pour l’activité acoustique, l’importance de la deuxième phase de montée en pression est soulignée par l’énergie cumulée reçue au cours de l’essai (figure 5.20). Cette deuxième phase regroupe 96 % de l’énergie reçue. L’énergie détectée pendant la phase de descente en pression est très faible. Par ailleurs moins de 4 % de l’énergie totale est détectée au cours du premier palier en pression.

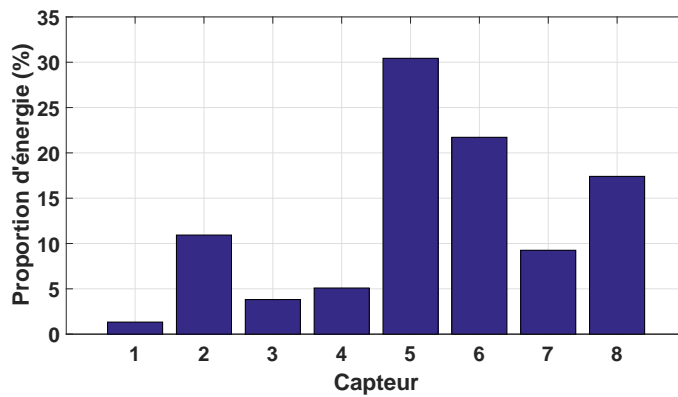


FIGURE 5.19 – Proportion d'énergie reçue au cours de l'essai par capteur.

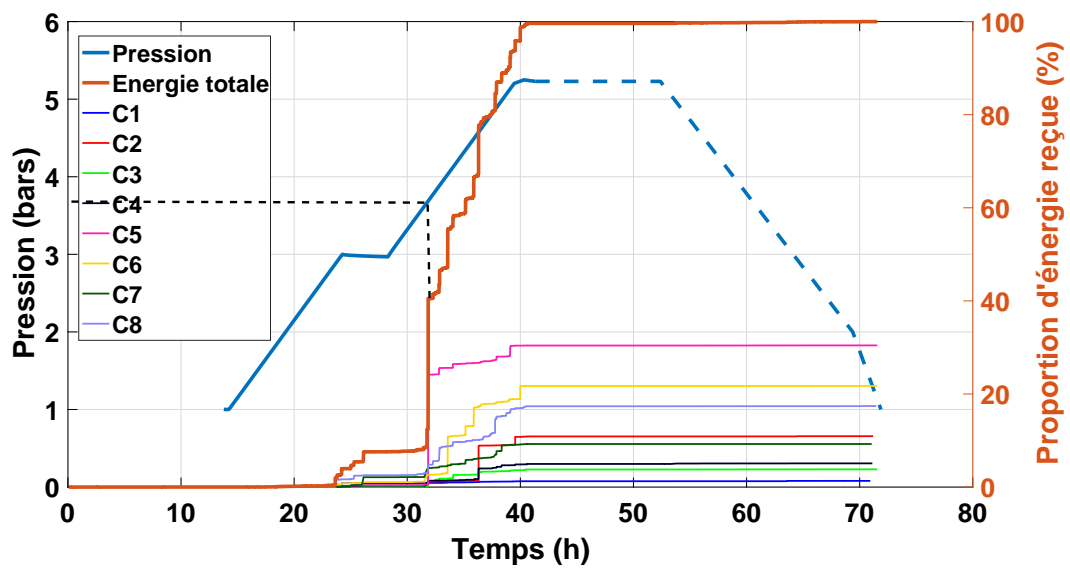
### 5.3.4 Identification des zones d'activité acoustique

#### Filtrage des signaux pour la localisation

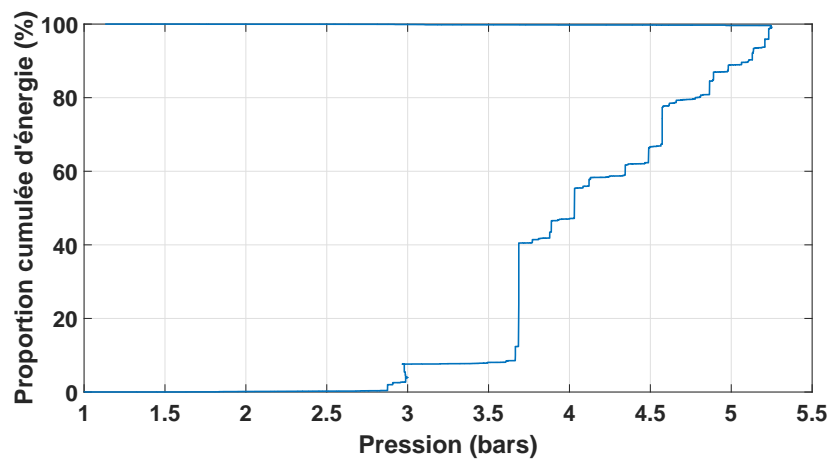
Afin de fiabiliser la base de données des signaux pour la localisation, la technique de filtrage appliquée ici est identique à celle employée dans la sous-section 3.3.2. Elle se base sur l'énergie moyenne (ou énergie de bruit) avant le début de la salve déterminé par le critère d'Akaike. La figure 5.21 représente la proportion cumulée de signaux en fonction de l'énergie de bruit normalisée. Deux signaux sélectionnés aux quantiles 80 % et 83 % sont présentés sur la figure 5.22. Le premier (figure 5.22(a)) illustre un signal dont l'amplitude dans la période précédent le début de salve peut être associée à du bruit. En revanche, il n'est pas possible d'identifier la séparation entre le bruit et la salve d'EA sur le signal sélectionné au niveau du quantile 83 % (figure 5.22(b)). La même analyse sur des signaux situés à des quantiles autour de 80 % permet d'identifier ce quantile comme le plus approprié au filtrage des salves reçues au cours de cet essai. Ainsi, les signaux dont l'énergie de bruit fait partie des 2 derniers déciles sont supprimés de la base de données.

La proportion des signaux filtrés par cette technique est sensiblement plus élevée que lors des essais de flexion 3 points (5 %). Les signaux présentés sur la figure 5.22 illustrent la raison principale de cette différence. En effet le temps de montée de ces signaux est beaucoup plus important dans le cas de l'essai sur Vercors. Cette différence est due essentiellement aux distances de propagation des ondes plus importantes. La variation lente de l'amplitude au début du signal ne permet pas de





(a) Pression et activité énergétique par capteur en fonction du temps.



(b) Proportion d'énergie cumulée en fonction de la pression.

FIGURE 5.20 – Courbes d'atténuation des ondes entre les capteurs 2 et 3 obtenues par cassé de mine.

déterminer clairement le début de la salve. Or la méthode du critère d'Akaike se base sur une variation « brutale » de l'amplitude au début de la salve. Une solution possible pour palier ce problème est l'augmentation de la valeur du pre-trigger (ici  $256 \mu s$ ) afin d'assurer l'enregistrement du bruit seul avant le début de la salve.

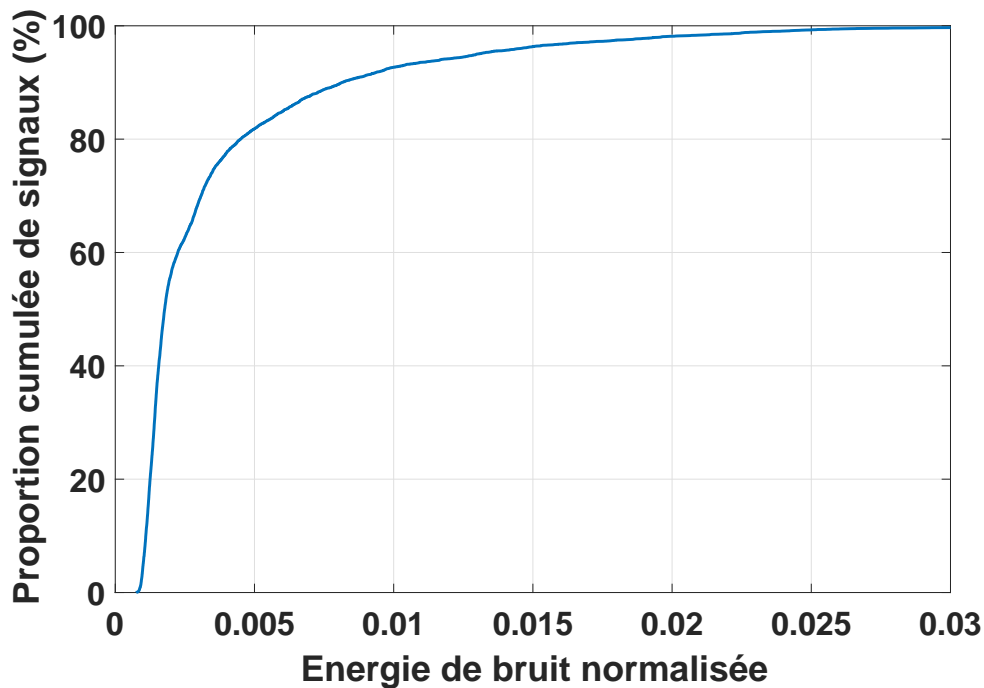


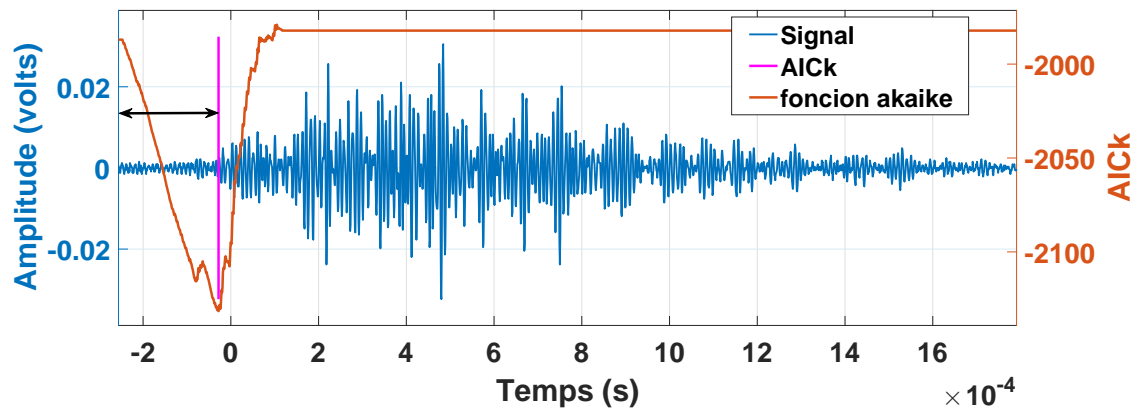
FIGURE 5.21 – Proportion cumulée de signaux en fonction de l'énergie du bruit.

### Cartes de densités d'événements et d'énergies

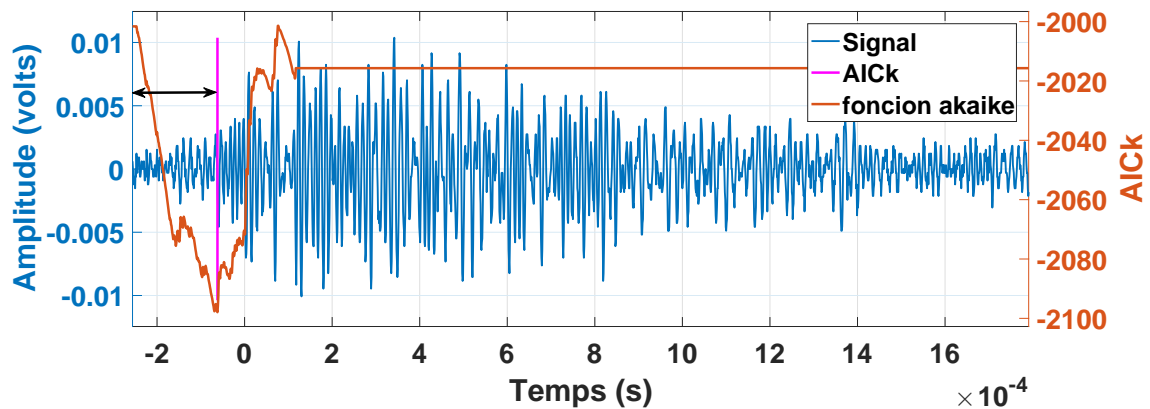
Seuls 265 événements ont été formés au cours de l'essai ce qui est très faible au vue de la taille de la zone couverte par les capteurs. Les cartes de densité d'événements et d'énergies associées aux 2 phases de montée et de descente en pression sont présentées ci-après.

La première phase de montée en pression présentée sur la figure 5.23 regroupe 12,7 % des événements formés et 0,1 % de l'énergie contenue dans la totalité des événements. Le caractère diffus de la zone d'activité observée sur ces cartes ne permet pas de mettre en évidence la position d'une fissure ou de sa propagation.

Les cartes associées à la deuxième montée en pression sont présentées à la figure 5.24. Cette deuxième phase regroupe 68,6 % des événements formés et 87,9 % de l'énergie contenue dans la totalité des événements. Par contre, même si le nombre d'événements est plus important dans cette phase, la carte ne fait pas apparaître de zone de concentration particulière. Par ailleurs même si deux pics d'énergie sont observés sur la seconde carte (figure 5.24(b)), ils ne permettent pas de faire émerger un chemin de fissure.



(a) Signal sélectionné au quantile 80%.

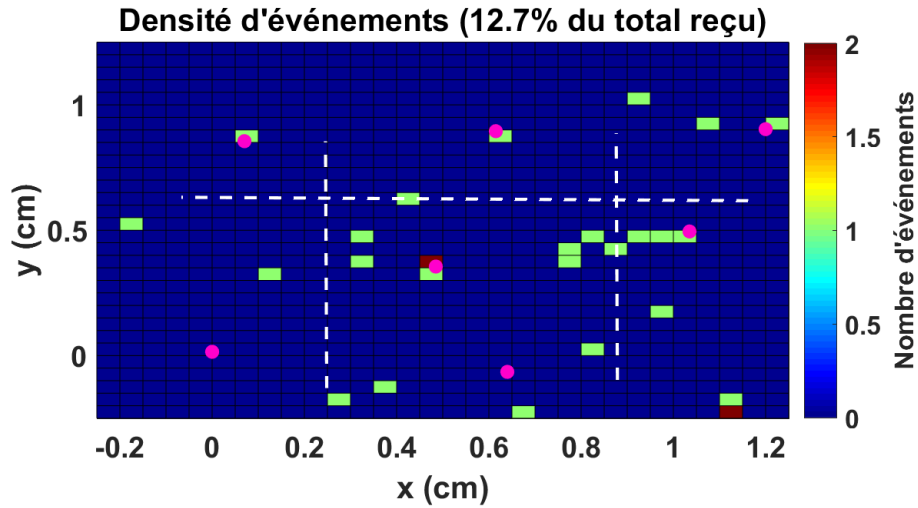


(b) Signal sélectionné au quantile 83%.

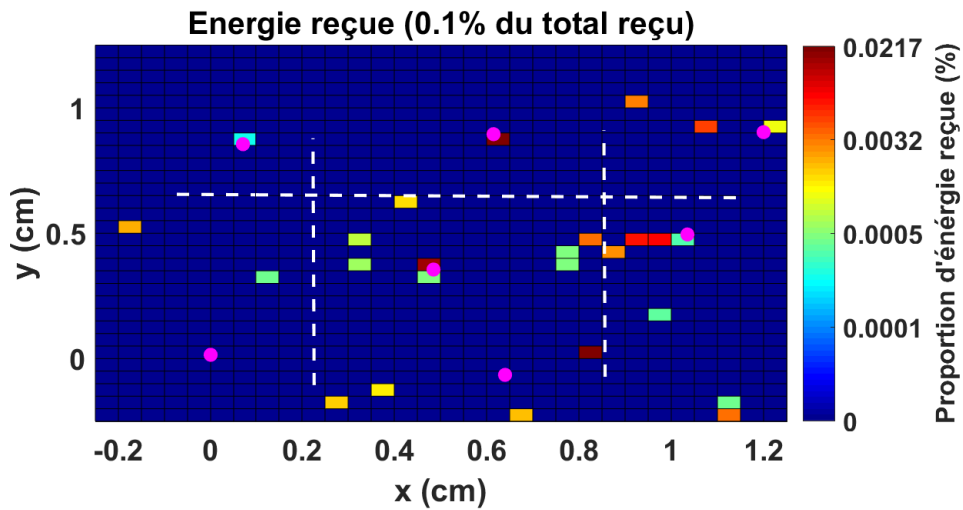
FIGURE 5.22 – 2 signaux d’EA dont l’énergie de bruit a été calculée en se basant sur un début de salve défini par le critère d’Akaike. La durée sur laquelle est calculée l’énergie du bruit est symbolisée par une double flèche noire.

### 5.3.5 Discussion

Les résultats obtenus sur Vercors ne permettent pas de mettre en évidence un chemin de fissuration. En revanche l’activité acoustique faible et diffuse sur la zone couverte par les capteurs suggère une simple ouverture de fissure sans propagation. Les mécanismes à l’origine de cette activité acoustique peuvent être dus aux frottements entre les lèvres des fissures déjà existantes. Il faut ajouter à cela le rôle des câbles de précontraintes ainsi que l’ensemble du ferrailage présent dans la structure qui sont susceptibles de représenter des zones de frottements supplémentaires aux interfaces acier/béton.



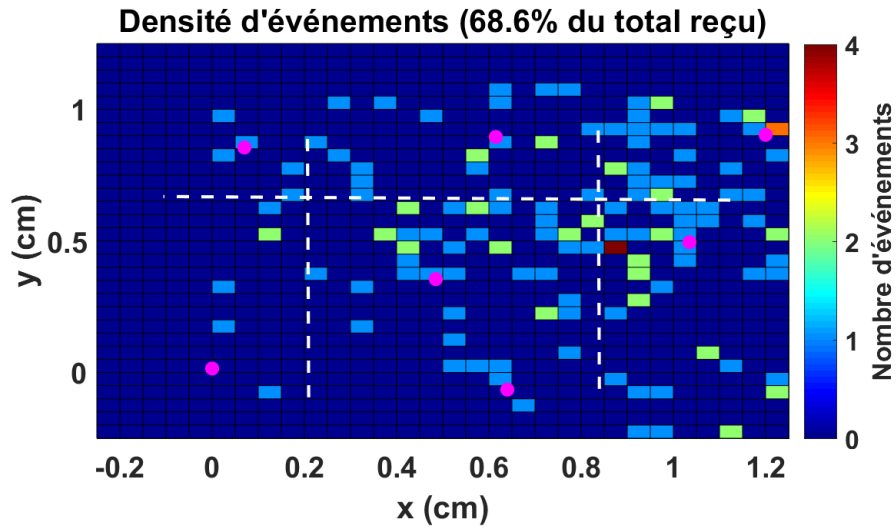
(a) Densité d'événement.



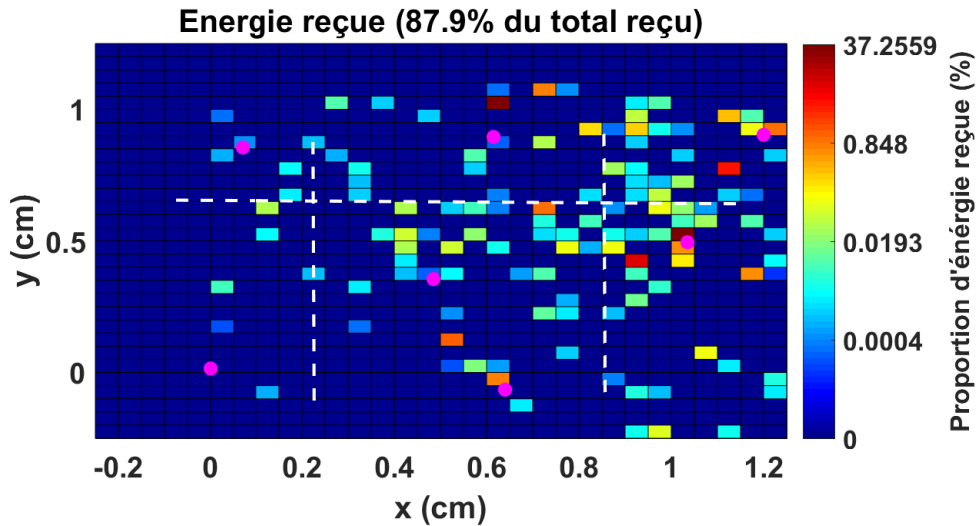
(b) Densité d'énergie.

FIGURE 5.23 – Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la première phase de montée en pression. Position des capteurs (points roses) et chemins de fissures observés (pointillés blancs).

L'étude de l'activité enregistrée au cours du temps permet d'affirmer que la première phase de montée en pression n'a quasiment pas d'influence sur la zone testée. La phase de redescente en pression présente une activité faible en terme de signaux et d'événements (moins de 20 %) et ne représente qu'une petite partie de l'énergie reçue : moins de 0,5 % de l'énergie de tous les signaux et 4,1 % de l'énergie contenue dans les événements. Ces rapports d'énergie entre les phases d'ouverture de fissure (montée en pression) et de refermeture de fissure (descente en pression)



(a) Distribution d'énergie selon  $Ox$ .



(b) Densité d'énergie.

FIGURE 5.24 – Densité d'événement (a) et d'énergie (b) détectés pendant la deuxième phase de montée en pression. Position des capteurs (points roses) et chemins de fissures observés (pointillés blancs).

sont du même ordre de grandeur que ceux observés lors des cycles de déchargement/rechargement sur les essais de flexion 3 points (voir sous-section 4.4.1). Lors de ces essais, les phases de rechargement (réouverture de fissure) regroupaient 93,8 % de l'énergie reçue contre seulement 6,2 % lors des phases de déchargement (fermeture de fissure). De ce point de vue l'essai sur Vercors peut être comparé à un

cycle de fermeture/ouverture de fissure sur flexion 3 points inversé. En revanche, ces mêmes rapports d'énergie entre phases d'ouverture et refermeture sont différents des essais de refermeture forcés de fissure à l'aide du câble de précontrainte de la section 4.4.2. En ce sens on peut affirmer qu'il n'y a pas de phénomène d'écrasement des lèvres de fissure lors de la descente en pression sur Vercors.

Un deuxième essai strictement similaire a été effectué une semaine après le premier. Lors de ce deuxième essai le nombre de signaux reçus est réduit de 80,9 % par rapport à la première semaine (figure 5.25). Seuls 37 événements ont été formés à partir de ces signaux. De plus, l'énergie reçue est réduite de 89 % par rapport au premier essai. Cette différence importante en terme de quantité d'information enregistrée permet de conforter le diagnostic de non propagation de fissure à ce niveau de pression interne de l'enceinte.

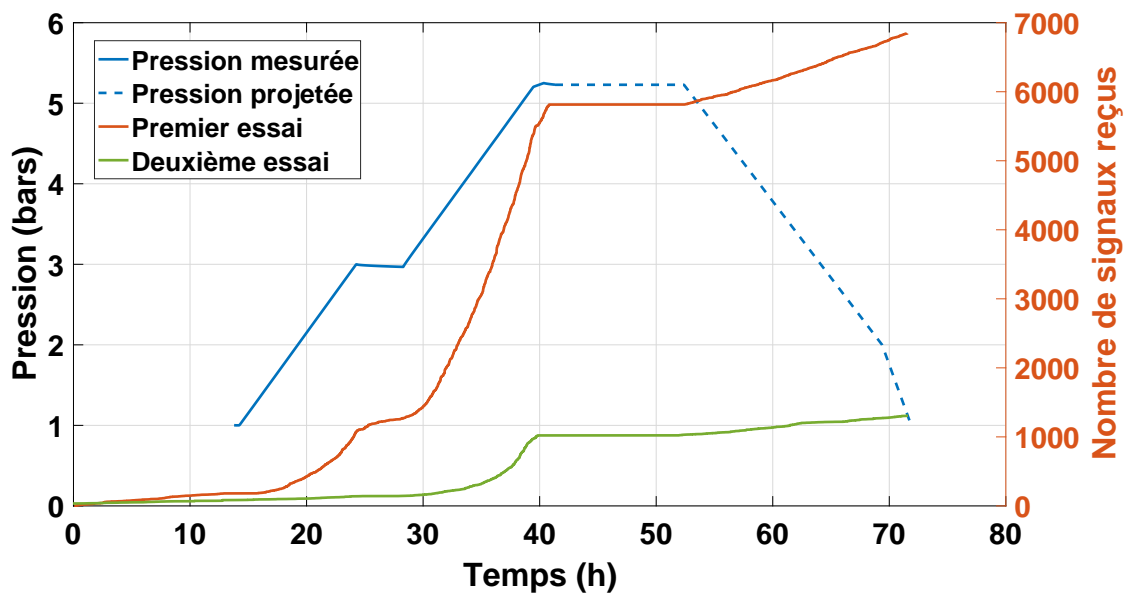


FIGURE 5.25 – Comparaison de l'activité au cours des deux essais consécutifs sur Vercors.

## 5.4 Conclusion

L'objectif des deux essais présentés dans ce chapitre était de mettre en évidence la présence de fissures ainsi que leur éventuelle propagation sur des structures à grande

échelle. Ces structures sont (i) la soufflerie de l'Onera et (ii) la maquette Vercors d'une enceinte de confinement de centrale nucléaire. Pour remplir ces objectifs des zones identifiées comme fissurées ont été instrumentées à l'aide de la technique d'EA sur les deux structures.

Un point commun caractérise les deux essais présentés ici. Dans les deux cas, très peu de signaux ont été enregistrés en comparaison des essais de fissuration présentés dans le chapitre 3. Par conséquent il n'est pas possible d'affirmer qu'il y a eu progression de fissures dans les zones couvertes par les capteurs.

Un parallèle entre les résultats obtenus ici et ceux présentés dans la section 4.4 peut être fait. En effet les phases de sollicitation des structures par augmentation de la pression interne regroupent 70 à 80 % des signaux enregistrés. Ces phases correspondent à une ouverture des fissures existantes. Une répartition similaire de l'activité acoustique entre les phases d'ouverture et de fermeture de fissures est observée lors des cycles de décharge/recharge des poutres en flexion 3 points. Ce point de comparaison permet d'envisager une simple ouverture et refermeture des fissures lors des essais sur site.

La localisation des événements acoustique, ne permet pas de faire apparaître des chemins de fissuration. Sur Vercors on note une distribution diffuse des événements sur la zone d'investigation. On note par ailleurs lors des deux essais une activité acoustique plus importante à l'extrémité supérieure des fissures. Cette activité acoustique plus importante est possiblement liée aux mécanismes de frottements plus nombreux dans une zone où les lèvres des fissures sont plus proches. Enfin la carte des densités d'énergie obtenue sur la soufflerie permet de mettre en évidence une zone de libération d'énergie majeur toujours sur l'extrémité de la fissure observée. Des essais d'EA supplémentaires et focalisés sur l'extrémité des fissures permettraient de confirmer ou infirmer l'hypothèse d'une activité acoustique principalement localisés aux extrémités des fissures.

# Conclusions générales et perspectives

Les objectifs de cette thèse, définis dans le cadre du projet ENDE, sont la détection et le suivi de la fissuration du béton à l'aide de la technique d'émission acoustique. Le mécanisme de fissuration du béton est lié au développement d'une zone de microfissuration précédant le passage de la fissure. Parmi les techniques d'auscultation et de suivi de la fissuration présentées dans la littérature, l'émission acoustique est la seule technique qui permet de répondre favorablement aux contraintes de suivi sur le long terme et d'adaptabilité sur des structures diverses. L'émission acoustique se distingue aussi par sa capacité à localiser les sources des ondes issues des microfissurations.

L'étude bibliographique menée au cours de cette thèse a permis de mettre en évidence le manque de travaux sur l'impact des choix de stratégie de localisation sur la représentation des cartes d'activité acoustique. Par ailleurs si le lien entre énergie et/ou amplitude des signaux et chemin de fissuration est connu, les techniques de suivi spatial de la fissure restent peu nombreuses ou consistent en un filtrage important des données. Enfin peu ou pas de travaux permettent d'évaluer l'EA comme technique de détection de fissures existantes.

Pour comprendre l'importance du choix de la stratégie de localisation des événements acoustique, une première étude comparative sur 3 algorithmes de localisation (« global bounded nelder mead » (GBNM), l'algorithme génétique (AG) et un algorithme par maillage adaptatif (AMA)) ainsi que sur 2 critères de détermination du début des salves (seuil fixe (SF) et critère d'Akaike (AIC)) a été menée. Les résultats mettent en évidence la efficacité du critère d'Akaike comme méthode de détermination du début des salves. Son utilisation conduit à une concentration des événements autour de l'axe principal de la fissure. Par ailleurs les erreurs numériques



calculées pour chaque événement sont systématiquement inférieures par rapport à celles obtenues avec le seuil fixe.

L'influence des algorithmes de localisation comparés au cours de cette thèse est quasiment nulle sur la carte d'activité acoustique. Les variations observées sur les distributions d'événements obtenues via différents algorithmes sont de l'ordre de 1 %. En revanche lorsque le critère de conservation des événements est centré sur l'erreur de localisation, les algorithmes AG et GBNM permettent de localiser une proportion d'événements plus importante qu'AMA pour de faibles erreurs. En revanche AMA s'avère plus efficace pour les erreurs plus élevées. Le choix d'une erreur limite étant conditionné à la taille de la zone d'inspection, il n'est pas possible de faire émerger une valeur d'erreur limite pour laquelle un algorithme sera plus performant qu'un autre.

A partir des résultats de localisation, une étude basée sur les cartes de densité d'événements et d'énergie est proposée afin de suivre la progression des zones d'activité acoustique. Il ressort de cette étude l'importance du couplage entre le suivi de l'activité acoustique fournit par les densités d'événements et le suivi des zones de libération d'énergie. En effet les résultats montrent qu'il n'existe pas nécessairement de corrélation entre zone de forte activité acoustique et les zones de forte libération d'énergie. Le suivi spatial des pics d'énergie libérés au cours de la propagation permet de positionner la fissure. Le suivi des zones d'activité acoustique permet lui de prédire le chemin futur de la fissure. On observe par ailleurs une activité acoustique toujours importante dans les zones de pontage de la fissure.

Les positions du front de fissure obtenues par video-corrélation ont été comparées aux distributions d'événements dans l'espace à différents instants. Les résultats montrent qu'une part extrêmement faible des événements sont localisés en aval du front de fissure (4 %). Une bonne corrélation a été aussi montrée entre les deux techniques.

Les essais menés sur la fermeture/ouverture de fissures existantes ont montrés la capacité de l'EA détecter la présence de fissures. L'activité acoustique générée lors de ces essais est concentrée au niveau de l'axe de la fissure lors de son ouverture. Par ailleurs l'activité détectée pendant les ouvertures/refermetures est sensiblement

moins importante que lors de la propagation des fissures.

L'instrumentation de poutres en béton sous sollicitation thermique a permis de valider la pertinence de l'EA pour le suivi de l'endommagement d'origine thermique. Lors de ces essais, des sauts énergétiques de même nature que lors des essais de fissuration sont observés. Par ailleurs les cartes de densités permettent de mettre en évidence un chemin clair de fissuration situé entre la zone de sollicitation et la surface la plus proche de la poutre.

Des essais de refermeture de fissures déjà existantes ont été menés. L'activité acoustique enregistrée à cette occasion permet de localiser les zones fissurées. En revanche et contrairement aux phases de propagation de fissures, les ouvertures/refermetures de fissures se distinguent par une activité acoustique et énergétique faible. De plus les phases d'ouverture de fissures sont plus émissives que les phases de refermeture avec un rapport d'environ 4 entre les deux.

Les essais menés sur la soufflerie de l'Onera et sur Vercors ont permis de mettre en évidence l'absence de propagation de fissure sur les surfaces instrumentées. Néanmoins des zones d'activité plus importantes ont été identifiées. Elles suggèrent une activité accrue au niveau des extrémités des fissures. Cette incertitude pourrait être levée avec de nouveaux essais en recentrant la zone couverte par les capteurs autour des extrémités d'une fissure.

La majeure partie des résultats obtenus au cours de cette thèse se basent sur la localisation des événements. La modification de la structure du béton au cours de son endommagement n'est pas prise en compte puisqu'une vitesse unique et constante est utilisée tout au long de l'essai. Un niveau de fiabilisation supérieur peut être atteint en tenant compte de ces modifications. La tomographie passive par EA semble être une perspective intéressante pour aller plus loin dans le suivi de la fissuration en continu. En effet cette technique permet de considérer des vitesses de propagation différentes. Une carte de vitesse de propagation peut être établie dans le matériau et mise à jour au cours d'un essai pour faire apparaître les zones endommagées en temps réel.

Les résultats sur l'activité acoustique observée lors des variations brutales de chargement mettent en évidence un mode d'émission en « rafale ». Ce mode se

caractérise par une accélération de la fréquence d'émission de salves pendant un court instant. La comparaison des signaux enregistrés pendant ce mode d'émission avec ceux enregistrés lors des phases d'émission plus « monotone » peut constituer une piste intéressante pour mettre en évidence des mécanismes de libération d'énergie différents au sein du matériau.

Enfin une étude spectrale des signaux à l'aide de capteurs large bande pourrait permettre de former des classes de signaux sur le modèle de ce qui est développé dans les matériaux composites. La difficulté de cette approche réside dans l'identification des classes formées et leur association à des mécanismes physiques. Ainsi l'identification des signaux associés à la rupture des granulats pourrait constituer un vecteur de fiabilisation supplémentaire pour la localisation de la fissure. En dehors des problématiques de localisation, cette identification pourrait permettre l'emploi d'un capteur seul pour détecter les ruptures de granulats et donc propagation de fissures. Une telle approche ouvre la voie à une méthode simple, peu coûteuse et peu encombrante (1 capteur) pouvant servir d'alarme à la propagation de fissures sur des périodes très longues.

# Bibliographie

- [1] Planetoscope - Statistiques : Production mondiale de béton. [www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html](http://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-production-mondiale-de-beton.html).
- [2] Le nucléaire en chiffres. <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>, July 2015.
- [3] C.R. Farrar and K. Worden. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851) :303–315, 2007.
- [4] J.D. Achenbach. Structural health monitoring—what is the prescription? *Mechanics Research Communications*, 36(2) :137–142, 2009.
- [5] H. Sohn, C.R. Farrar, F.M. Hemez, and J.J. Czarnecki. A review of structural health review of structural health monitoring literature 1996-2001. Technical report, Los Alamos National Laboratory, 2002.
- [6] J.M. Torrenti. *Comportement multiaxial du béton : aspects expérimentaux et modélisation*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1987.
- [7] S.P. Shah and C. Ouyang. Failure of concrete : fracture mechanics approach. 9 :352–375, 1992.
- [8] X. Hu and K. Duan. Size effect and quasi-brittle fracture : the role of fpz. *International Journal of Fracture*, 154(1) :3–14, 2008.
- [9] A. Gangnant. *Étude de la rupture quasi-fragile d'un béton à l'échelle mésoscopique : aspects expérimentaux et modélisation*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2016.

- [10] E. Denarie, V.E. Saouma, A. Iocco, and D. Varelas. Concrete fracture process zone characterization with fiber optics. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(5) :494–502, 2001.
- [11] Z.P. Bažant and B.H. Oh. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Construction*, 16(3) :155–177, 1983.
- [12] Z. Wu, H. Rong, J. Zheng, F. Xu, and W. Dong. An experimental investigation on the fpz properties in concrete using digital image correlation technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(17) :2978–2990, 2011.
- [13] K. Otsuka and H. Date. Fracture process zone in concrete tension specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 65(2) :111–131, 2000.
- [14] M. Castellote, C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, and J. Campo. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34(9) :1633–1644, 2004.
- [15] M. Tsimbrovska. *Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées, évolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 1998.
- [16] M. Choinska. *Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2006.
- [17] J. Piasta. Heat deformations of cement paste phases and the microstructure of cement paste. *Materials and Structures*, 17(6) :415–420, 1984.
- [18] C. Castillo and A.J. Durrani. Effect of transient high-temperature on high-strength concrete-closure. *ACI Materials Journal*, 87(6) :653–653, 1990.
- [19] M.H.H. Hettema. *The thermo-mechanical behaviour of sedimentary rock : an experimental study*. Thèse de doctorat, 1996.
- [20] S.Y. Alam. *Experimental study and numerical analysis of crack opening in concrete*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2011.
- [21] S. Mindess. Fracture process zone detection. *Fracture mechanics test methods for concrete*. Chapman & Hall, London, pages 231–261, 1991.
- [22] E.J. Kaiser. A study of acoustic phenomena in tensile test. *Dr.-Ing. Dissertation*. Technical University of Munich, 1950.

- [23] Cofrend - Emission acoustique (AT). <http://www.cofrend.com/contrôles-non-destructifs/methodes-de-contrôle/emission-acoustique-at/>.
- [24] M. Kaphle. *Analysis of acoustic emission data for accurate damage assessment for structural health monitoring applications*. Thèse de doctorat, Queensland University of Technology, 2012.
- [25] A. Dobrovat. *Modélisation multi-échelle de l'endommagement et de l'émission acoustique dans les roches*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2011.
- [26] F. Lamy. *Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois sous Sollicitations Mécanique et Climatique : Apports de l'Émission Acoustique*. Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2016.
- [27] S. Huguet. *Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère*. Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2002.
- [28] A. Marec. *Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique non linéaire : discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 2008.
- [29] J. Saliba. *Apport de l'émission acoustique dans la compréhension et la modélisation du couplage fluage-endommagement du béton*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [30] D. Lockner. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 30, pages 883–899. Elsevier, 1993.
- [31] H.L. Dunegan, D. Harris, and C. Tatro. Fracture analysis by use of acoustic emission. *Engineering Fracture Mechanics*, 1(1) :105IN23111–110IN24122, 1968.
- [32] P.J. De Groot, P. AM. Wijnen, and Roger B. Janssen. Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 55(4) :405–412, 1995.

- [33] M. Naderi, A. Kahirdeh, and M.M. Khonsari. Dissipated thermal energy and damage evolution of glass/epoxy using infrared thermography and acoustic emission. *Composites Part B : Engineering*, 43(3) :1613–1620, 2012.
- [34] Ming S Weng, Stanley E Dunn, William H Hartt, and Robert P Brown. Application of acoustic emission to detection of reinforcing steel corrosion in concrete. *Corrosion*, 38(1) :9–14, 1982.
- [35] H. Le Chatelier. Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments. *Bulletin Societe de l'encouragement pour l'industrie nationale*, 5, 1900.
- [36] G. C McLaskey and S.D. Glaser. Temporal evolution and 3d locations of acoustic emissions produced from the drying shrinkage of concrete. *Journal of Acoustic Emission*, 25(1) :52–57, 2007.
- [37] V. Carmona. *Étude de l'endommagement de matériaux composites par tomographie X et émission acoustique*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2009.
- [38] J.C. Lenain. Introduction à l'émission acoustique. applications industrielles. *Revue de Métallurgie*, 87(3) :285–298, 1990.
- [39] P. Nivesrangsan, J. A. Steel, and R.L. Reuben. Source location of acoustic emission in diesel engines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(2) :1103–1114, February 2007.
- [40] R.D. Finlayson, M. Friesel, M. Carlos, P. Cole, and J.C. Lenain. Health monitoring of aerospace structures with acoustic emission and acousto-ultrasonics. *Insight-Wigston then Northampton-*, 43(3) :155–158, 2001.
- [41] J. Hensman, K. Worden, M. Eaton, R. Pullin, K. Holford, and S. Evans. Spatial scanning for anomaly detection in acoustic emission testing of an aerospace structure. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(7) :2462–2474, 2011.
- [42] G. Lackner and P. Tscheliesnig. Acoustic emission testing on flat-bottomed storage tanks : How to condense acquired data to a reliable statement regarding floor condition. *Journal of Acoustic Emission*, 20 :179–187, 2002.
- [43] S. Iliopoulos, D.G. Aggelis, L. Pyl, J. Vantomme, P. Van Marcke, E. Coppens, and L. Areias. Detection and evaluation of cracks in the concrete buffer of the belgian nuclear waste container using combined ndt techniques. *Construction and Building Materials*, 78 :369–378, 2015.

- [44] A. Nair and C.S. Cai. Acoustic emission monitoring of bridges : Review and case studies. *Engineering Structures*, 32(6) :1704–1714, June 2010.
- [45] A. Carpinteri and G. Lacidogna. Damage monitoring of an historical masonry building by the acoustic emission technique. *Materials and Structures*, 39(2) :161–167, 2006.
- [46] Y.C. Choi, J.H. Park, and K.S. Choi. An impact source localization technique for a nuclear power plant by using sensors of different types. *ISA transactions*, 50(1) :111–118, 2011.
- [47] D. Lockner. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7) :883–899, December 1993.
- [48] L. Margerin, M. Campillo, and B.A. Van Tiggelen. Diffusion multiple des ondes sismiques. *Images de la physique-CNRS*, pages 220–224, 2005.
- [49] A. Mostafapour, S. Davoodi, and M. Ghareaghaji. Acoustic emission source location in plates using wavelet analysis and cross time frequency spectrum. *Ultrasonics*, 54(8) :2055–2062, 2014.
- [50] Christian U Grosse and Masayasu Ohtsu. *Acoustic emission testing*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [51] M.K. ElBatanouny, P.H. Ziehl, A. Larosche, J. Mangual, F. Matta, and A. Nanni. Acoustic emission monitoring for assessment of prestressed concrete beams. *Construction and Building Materials*, 58 :46–53, 2014.
- [52] S. Sengupta, A.K. Datta, and P. Topdar. Structural damage localisation by acoustic emission technique : A state of the art review. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 12(8) :1565–1582, 2015.
- [53] M.A. Hamstad, A. O’GALLAGHER, and J. Gary. A wavelet transform applied to acoustic emission. *Journal of Acoustic Emission*, 20 :39–61, 2002.
- [54] M. Ohtsu, K. Ohno, and M.A. Hamstad. Moment tensors of in-plane-waves analyzed by sigma-2d. *Journal of Acoustic Emission*, 23 :47–63, 2005.
- [55] S. Köppel and C. Grosse. Advanced acoustic emission techniques for failure analysis in concrete. *WCNDT Proceedings*, 2000.
- [56] M. Ge. Analysis of source location algorithms : Part I. Overview and non-iterative methods. *Journal of Acoustic Emission*, 21(1) :21–28, 2003.



- [57] M. Ge. Analysis of source location algorithms - Part II Iterative methods.pdf. *Journal of Acoustic Emission*, 21(1) :21–28, 2003.
- [58] J. A Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7(4) :308–313, 1965.
- [59] A. Tobias. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors. *Non-destructive testing*, 9(1) :9–12, 1976.
- [60] F. Bai, D. Gagar, P. Foote, and Y. Zhao. Comparison of alternatives to amplitude thresholding for onset detection of acoustic emission signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 84 :717–730, 2017.
- [61] M. Shehadeh, J. Steel, and 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*, 220(2) :121–133, 2006.
- [62] 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*, 43(7) :538–546, 2005.
- [63] 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*, 34(4) :529–537, 2012.
- [64] B. Schechinger and T. Vogel. Acoustic emission for monitoring a reinforced concrete beam subject to four-point-bending. *Construction and building Materials*, 21(3) :483–490, 2007.
- [65] E. Verstrynghe, L. Schueremans, D. Van Gemert, and M. Wevers. Monitoring and predicting masonry’s creep failure with the acoustic emission technique. *NDT & E International*, 42(6) :518–523, 2009.
- [66] M.J. Eaton, R. Pullin, and K.M. Holford. Towards improved damage location using acoustic emission. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(9) :2141–2153, 2012.
- [67] A.F. Prugger and D.J. Gendzwill. Microearthquake location : A nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(2) :799–815, 1988.

- [68] M.S. Caceci. Fitting curves to data : the simplex algorithm is the answer. *Byte*, 9 :340–348, 1984.
- [69] M Ohtsu. Identification of microcracking process in fracture process zone by ae. In *Earthquakes and Acoustic Emission : Selected Papers from the 11th International Conference on Fracture, Turin, Italy, March 20-25, 2005*, page 79. CRC Press, 2007.
- [70] M. Shigeishi and M. Ohtsu. Acoustic emission moment tensor analysis : development for crack identification in concrete materials. *Construction and Building Materials*, 15(5) :311–319, 2001.
- [71] K. Ohno and M. Ohtsu. Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 24(12) :2339–2346, 2010.
- [72] D.G. Aggelis. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters. *Mechanics Research Communications*, 38(3) :153–157, 2011.
- [73] S.E. Hamdi. *Contribution au traitement du signal pour le contrôle de santé in situ de structures composites : Application au suivi de température et à l'analyse des signaux d'émission acoustique*. Thèse de doctorat, Le Mans, 2012.
- [74] F. Pashmforoush, R. Khamedi, M. Fotouhi, M. Hajikhani, and M. Ahmadi. Damage classification of sandwich composites using acoustic emission technique and k-means genetic algorithm. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 33(4) :481–492, 2014.
- [75] Y.H. Kim, S. Lee, and H.C. Kim. Attenuation and dispersion of elastic waves in multi-phase materials. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 24(10) :1722, 1991.
- [76] T.P. Philippidis and D.G. Aggelis. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 43(7) :584–595, 2005.
- [77] M. Ohtsu and K. Ono. The generalized theory and source representations of acoustic emission. *Journal of acoustic emission*, 5(4) :124–133, 1986.
- [78] K. Ono and M. Ohtsu. A generalized theory of acoustic emission and green's functions in a half space. *Journal of Acoustic Emission*, 3 :27–40, 1984.
- [79] M. Ohtsu. Acoustic emission theory for moment tensor analysis. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, 6(3) :169–184, 1995.

- [80] C. Grosse, H. Reinhardt, and T. Dahm. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques. *NDT & E International*, 30(4) :223–230, 1997.
- [81] F. Finck, M. Yamanouchi, H.W. Reinhardt, and C.U. Grosse. Evaluation of mode i failure of concrete in a splitting test using acoustic emission technique. *International Journal of Fracture*, 124(3-4) :139–152, 2003.
- [82] C.U. Grosse and F. Finck. Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques. *Cement and Concrete Composites*, 28(4) :330–336, 2006.
- [83] S. Wold, K. Esbensen, and P. Geladi. Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2(1-3) :37–52, 1987.
- [84] A. Likas, N. Vlassis, and J.J. Verbeek. The global k-means clustering algorithm. *Pattern Recognition*, 36(2) :451–461, 2003.
- [85] F. Lamy. *Analyse du Processus de Fissuration dans le Bois sous Sollicitations Mécanique et Climatique : Apports de l’Emission Acoustique*. Thèse de doctorat, Limoges, 2016.
- [86] EDF. VerCoRs, une maquette pour étudier le vieillissement des bâtiments réacteurs. [https://www.youtube.com/watch?v=OLDAA\\_e7MkA](https://www.youtube.com/watch?v=OLDAA_e7MkA).
- [87] Abdul J. Jerri. The shannon sampling theorem—its various extensions and applications : A tutorial review. *Proceedings of the IEEE*, 65(11) :1565–1596, 1977.
- [88] M. A Luersen and R. Le Riche. Globalized nelder–mead method for engineering optimization. *Computers & structures*, 82(23) :2251–2260, 2004.
- [89] A. Boniface, Z.M. Sbartaï, and J. Saliba. Reconstruction du profil 3d de fissure dans le béton par émission acoustique. In *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 2015.

# Annexe A

## Bibliothèque *bibEA*

Nous avons vu dans la section 2.3 les 4 grands types de variables utilisés par *bibEA*. Chacune de ces variables repose sur une classe particulière de Matlab. Ces classes sont : `struct`, `table` et `cell`. Chacune de ces classes permet de stocker des données de différente manière. Dans cette section nous allons voir pourquoi ces classes ont été choisies et comment sont organisées les données contenues à l'intérieur des variables.

### Les signaux

La variable des signaux se base sur la classe « `cell` » de Matlab. Cette classe permet de stocker des données dans un tableau. Les éléments d'un tableau de type « `cell` » peuvent être de différentes natures (`string`, `double`, etc...) et tailles. Dans notre cas les signaux d'EA sont des ensembles plus ou moins grands de points (au maximum 2048) correspondants aux valeurs d'amplitudes mesurées. La variable des signaux est donc un tableau de « `cell` » d'une colonne et d'autant de lignes qu'il y a de signaux enregistrés.

### Les hits

La variable des hits contient les paramètres calculés sur les signaux. Tous ces paramètres sont regroupées dans une variable de classe « `table` ». Cette classe est

un tableau auquel peut être associé une étiquette par colonne et/ou par ligne. Dans notre cas chaque colonne contient les valeurs d'un paramètre calculés pour tous les signaux. La figure A.1 illustre deux exemples d'accession aux données de la variable des hits.

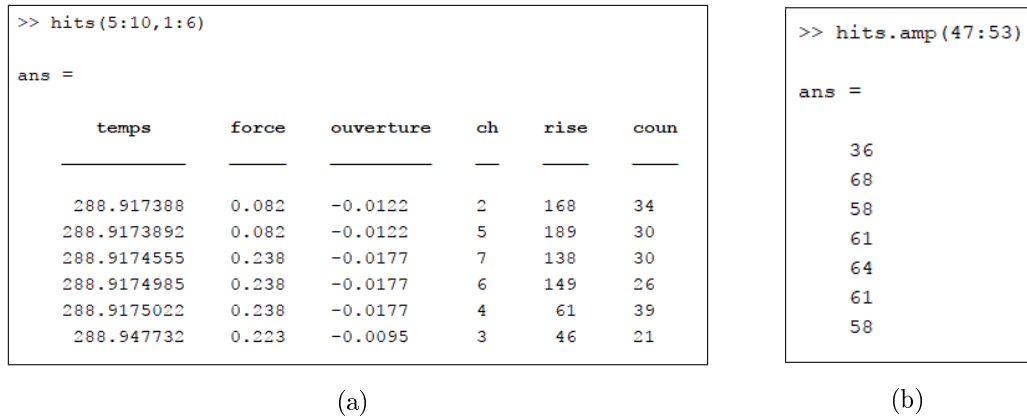


FIGURE A.1 – Exemples d'utilisation de la variable des hits. Affichage des paramètres 1 à 6 calculés sur les signaux 5 à 10 (a). Affichage des amplitudes maximales des signaux 47 à 53 (b).

## Les événements

Les paramètres relatifs aux événements sont enregistrées dans une structure. Une variable de type « struct » permet de stocker des données sous forme d'arborescence. Ainsi on peut associer différents paramètres à un individu. Chacun de ces paramètres peut lui aussi contenir des paramètres qui lui sont propres. Dans notre cas les individus sont des événements auxquels appartiennent un certain nombre de paramètres comme leur position ou l'indice des hits qui composent l'événement. La figure A.2 donne un exemple d'accès aux paramètres associés à un événement. Dans cet exemple l'événement est formé des hits 482 à 485 et a été reçu 301,1104 secondes après le début de l'acquisition.

```

>> evnt(42)

ans =

      nHits: 4
         dt: [0 3 5 30]
    posSimplex: [-0.0160 0.6047 0.1798]
    errSimplex: 0.5284
    posMaillage: [0.0111 0.2389 0.0665]
    errMaillage: 9
    posGenetique: [0.0068 0.2400 0.0684]
    errGenetique: 11.2823
         temps: 301.1104
    indHits: [482 483 484 485]
    ampMoy: 38.2500
    ampMax: 42
    force: 0.2747
    ouverture: -0.0070

```

(a)

```

>> evnt(42).temps

ans =

    301.1104

```

(b)

FIGURE A.2 – Exemples d'utilisation de la variable des événements. Affichage des paramètres associés à l'événement 42 (a). Affichage du temps d'arrivée de l'événement 42 (b).

## Configuration

La variable de configuration regroupe l'ensemble des paramètres associés à un essai. La figure A.3 donne un exemple d'accès aux paramètres associés à un événement. La plupart de ces paramètres sont nécessaires aux traitements effectués dans chacune des fonctions de la bibliothèque. Par exemple « typeEprouvette » permet d'afficher les contours de l'éprouvette via l'appel de la fonction « DISP\_carteEvt(...) ». D'autres ne sont là qu'à titre d'information comme le nom de l'expérience (« nomExp »).

```
>> config

config =

          fe: 1000000
          te: 1.0000e-06
           N: 2048
           t: [1x2048 double]
          f_fft: [1x2048 double]
decalage_presse_aewin: 280.7929
 tempsDebutPhases: [1x22 double]
          filtrage: [1x1 struct]
          nomExp: 'poutre1-2'
preTrigger: 2.5600e-04
          posCapt: [8x3 double]
          limAxis: [-0.2600 0.2600 -0.2600 0.2600 -0.2600 0.2600]
typeEprouvette: 'endeF3pEntaille'
          nCapt: 8
          indDebAEwin: 256
```

FIGURE A.3 – Exemple de contenu de la variable de configuration.

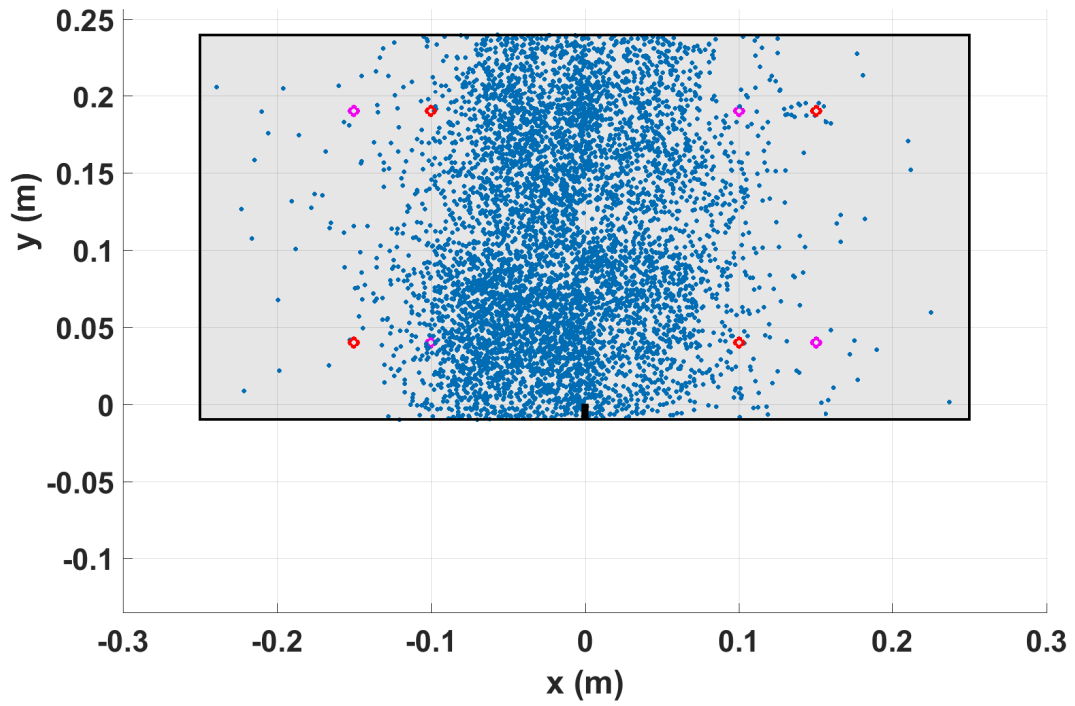
## Annexe B

# Cartes de localisation, distributions et nombre d'événements cumulés en fonction de $\xi_m$

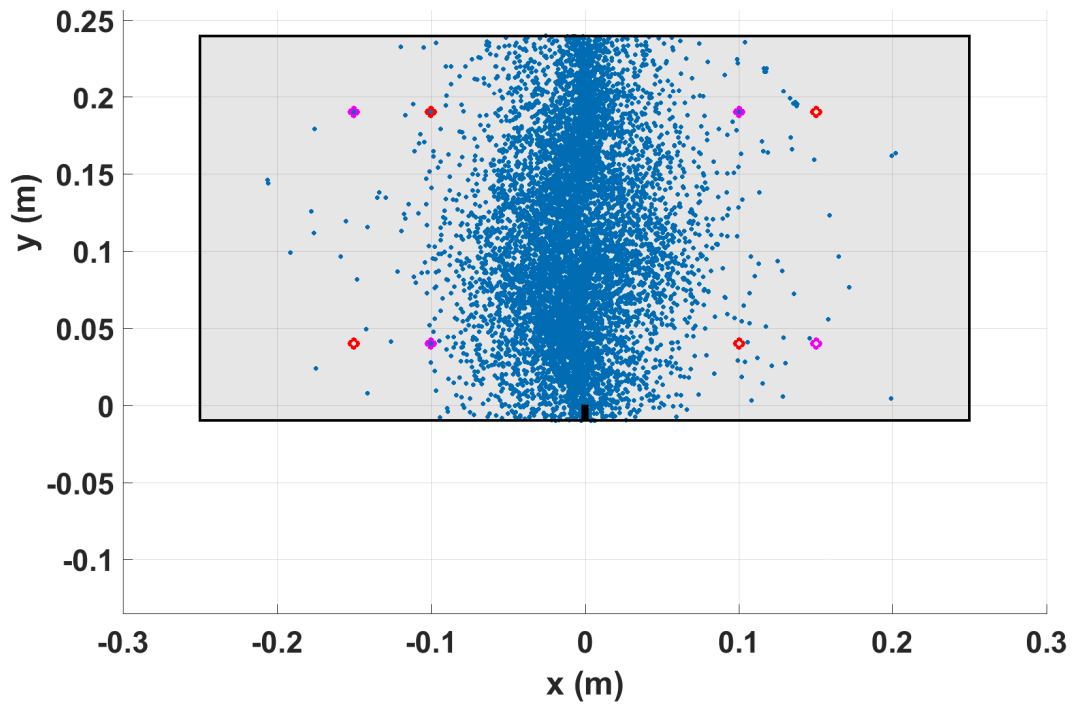
### Poutre p1-1

Les cartes de localisation pour la poutre p1-1 sont présentées figure B.1 pour l'algorithme des simplex, figure B.2 pour l'algorithme par maillage adaptatif et figure B.3 pour l'algorithme génétique.



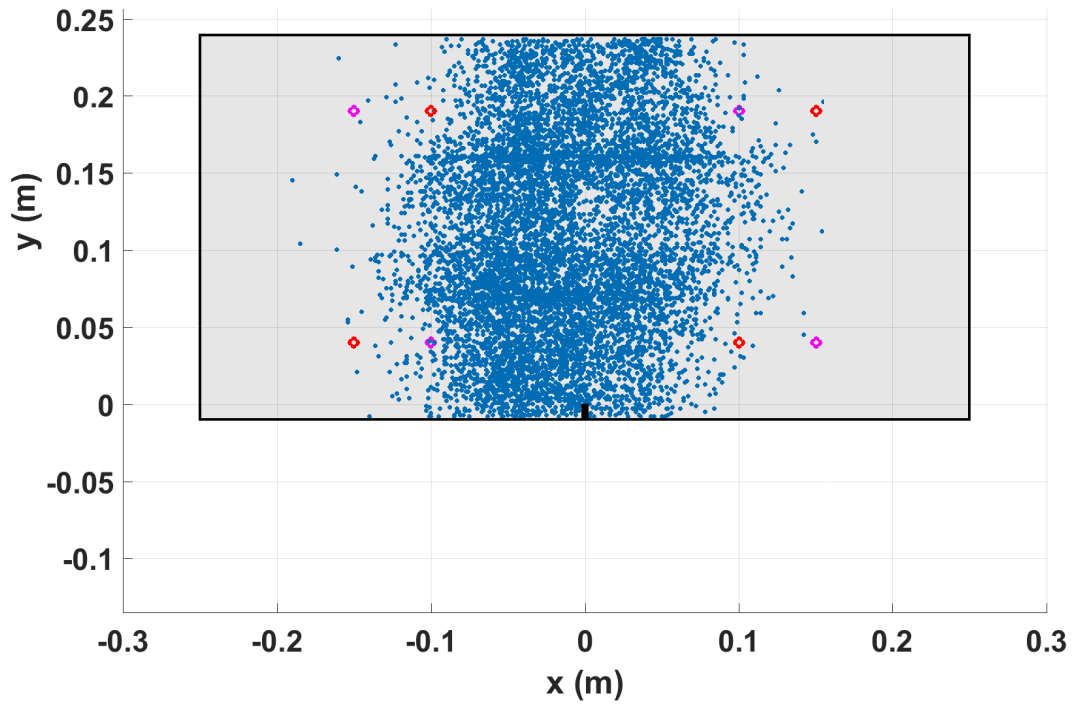


(a) Seuil fixe.

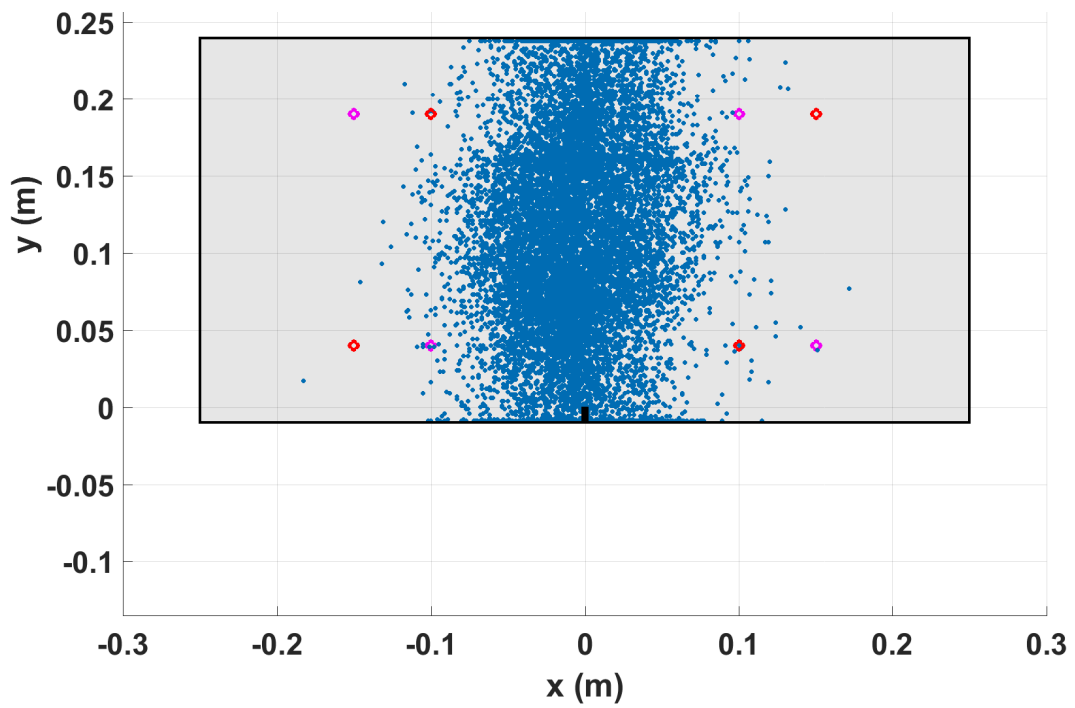


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.1 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme des simplex.

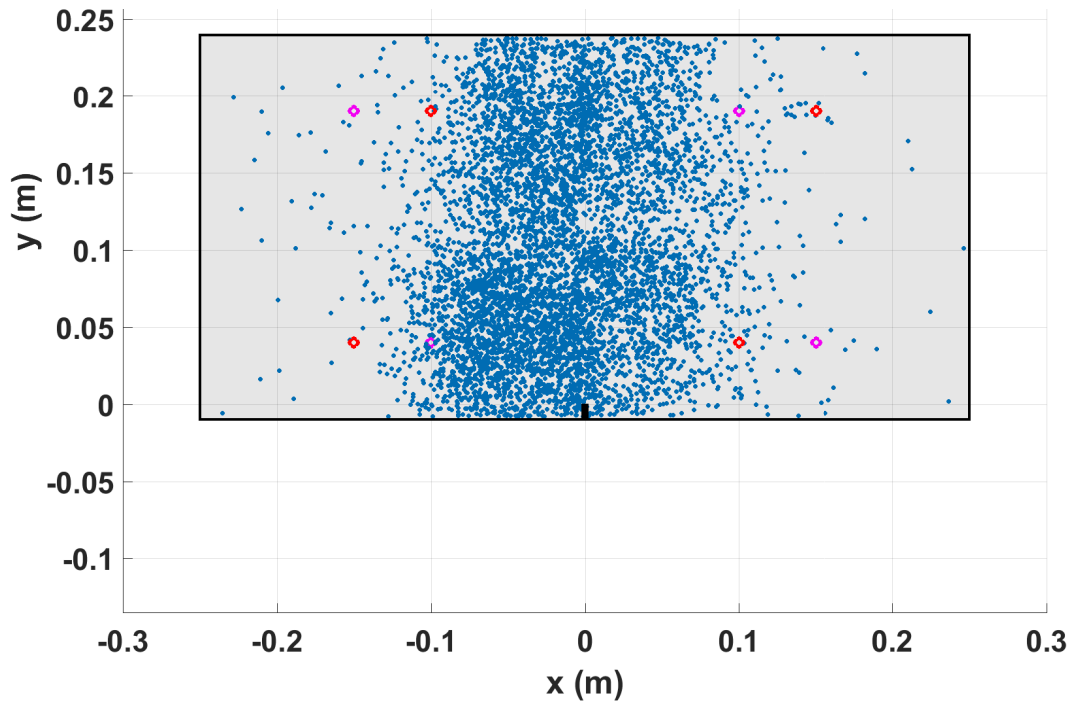


(a) Seuil fixe.

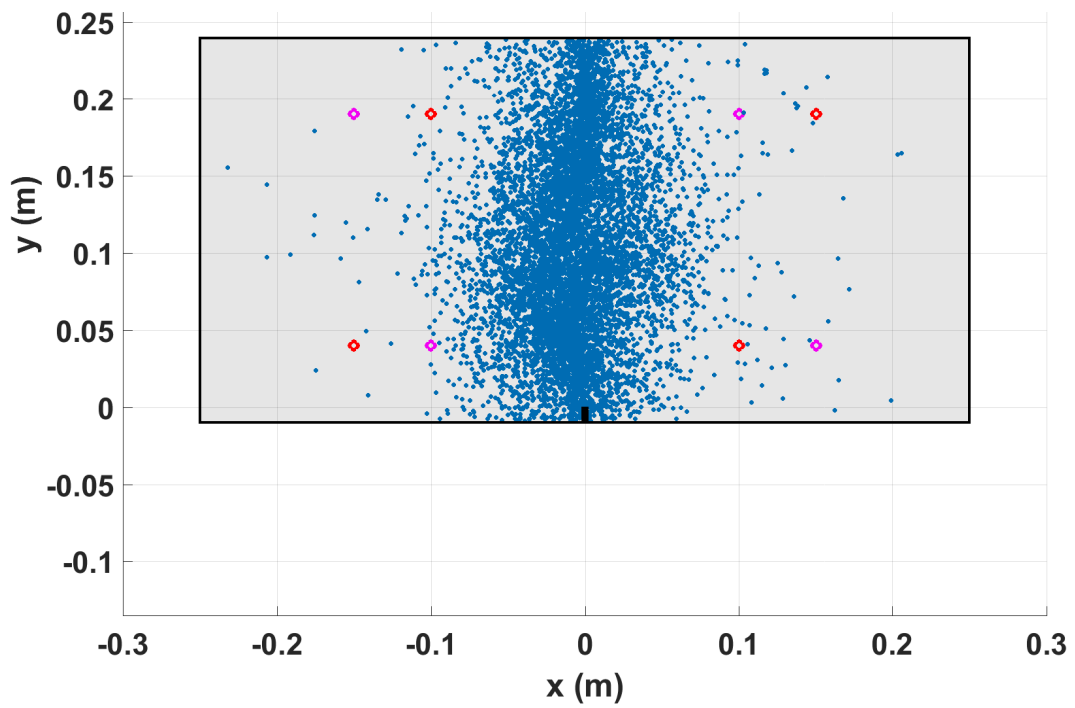


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.2 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme par maillage adaptatif.



(a) Seuil fixe.



(b) Critère d'Akaike.

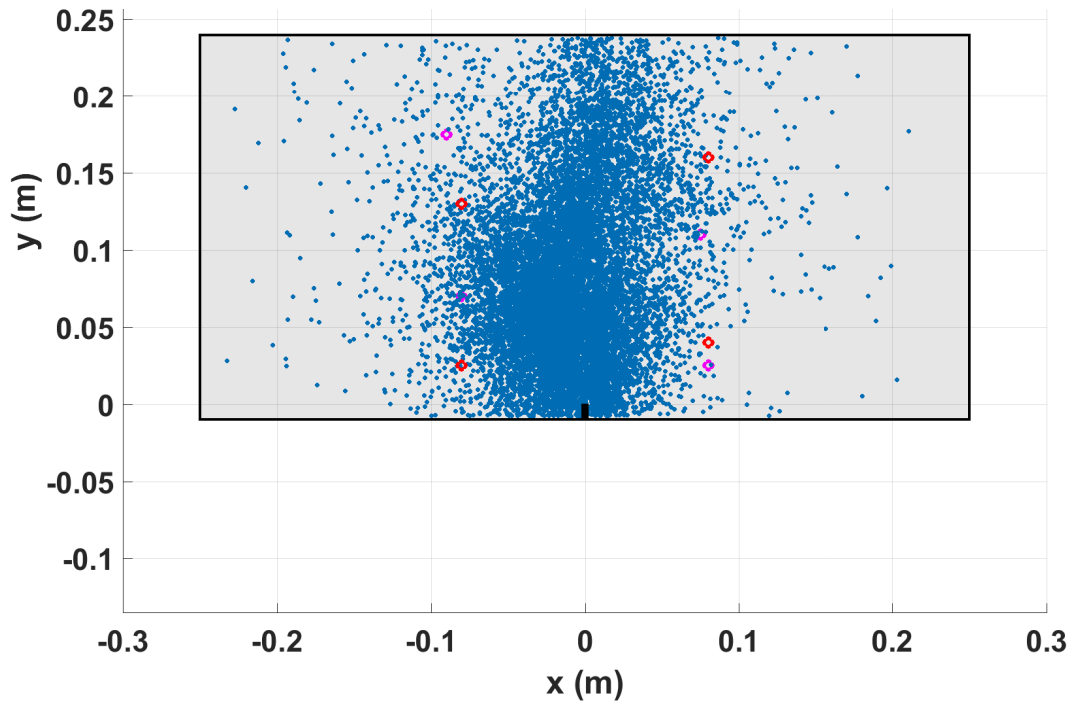
FIGURE B.3 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-1. Algorithme génétique.

## Poutre p1-2

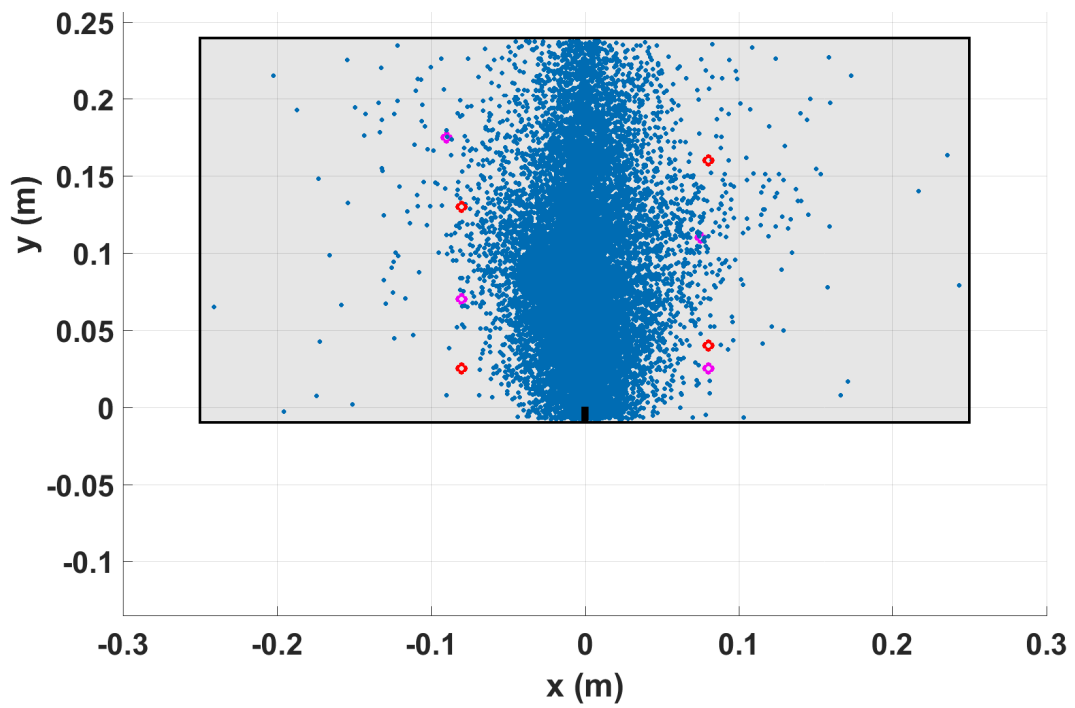
Le tableau B.1 donne les proportions d'événements localisés à l'intérieure de la poutre p1-2 ainsi que la proportion d'énergie associées. Les cartes de localisation sont présentées figure B.4 pour l'algorithme des simplex, figure B.5 pour l'algorithme par maillage adaptatif et figure B.6 pour l'algorithme génétique.

Algorithme	Simplex		Maillage		Genetique	
	SF	AIC	SF	AIC	SF	AIC
Critère de début de salve						
Proportion d'événements localisés à l'intérieur (%)	43,8	55,6	63,3	70,9	44,7	56,1
Proportion d'énergie associée (%)	82,6	92,7	85,4	96,0	82,9	92,7

TABLE B.1 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-2. Nombre d'événements initial : 30190.

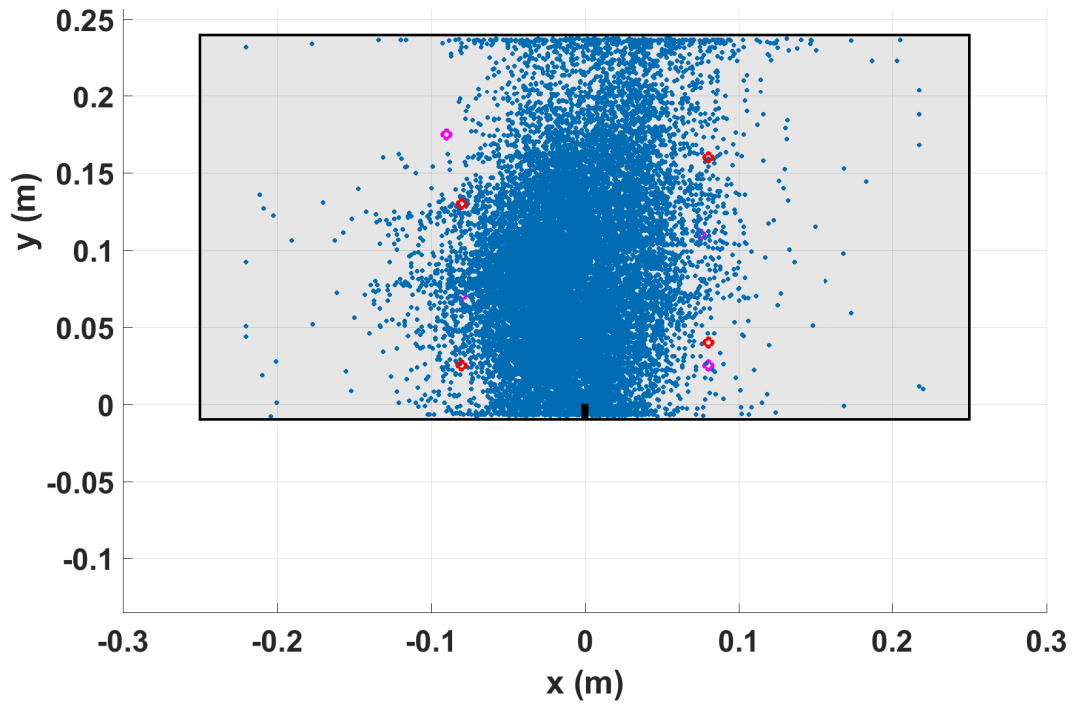


(a) Seuil fixe.

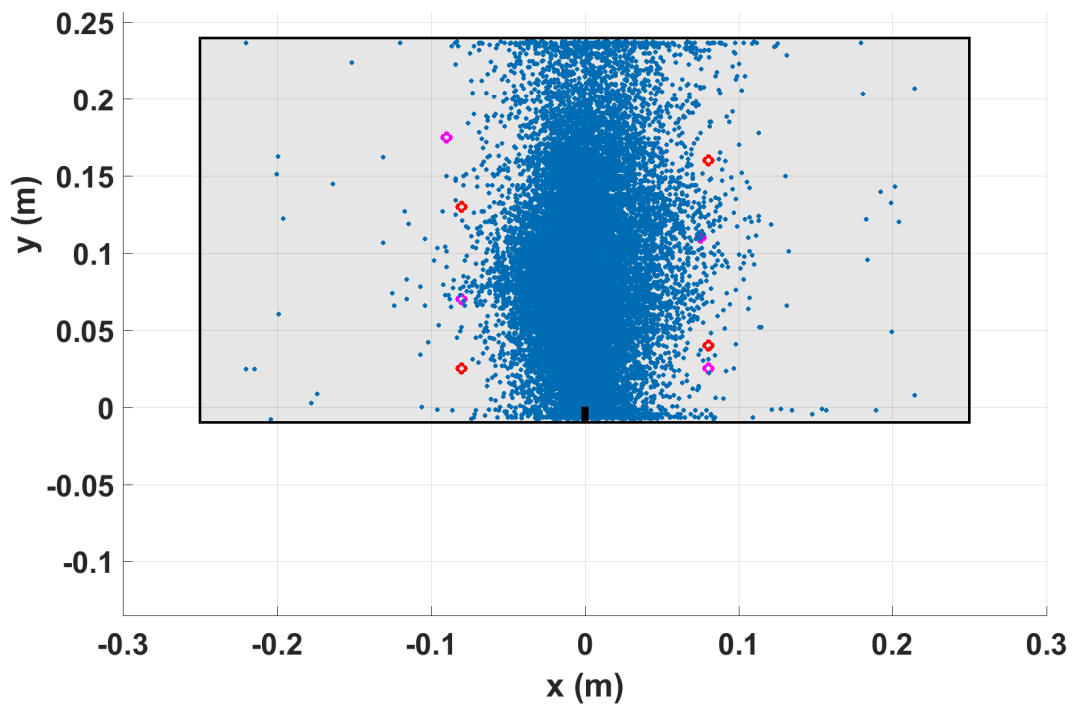


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.4 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme des simplex.

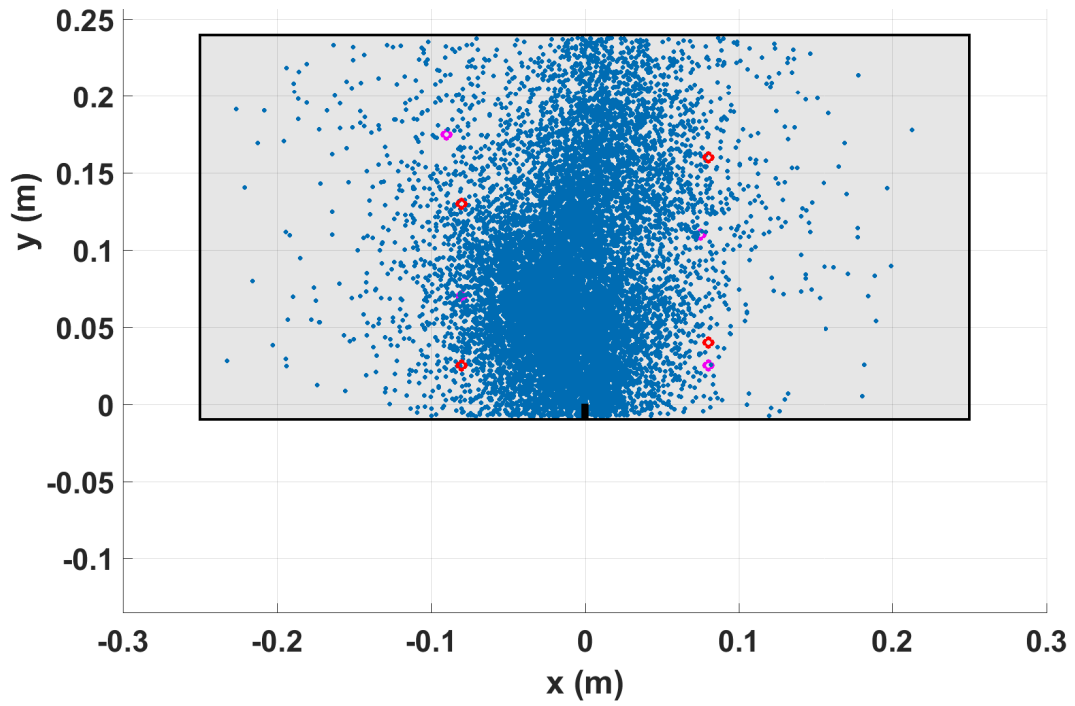


(a) Seuil fixe.

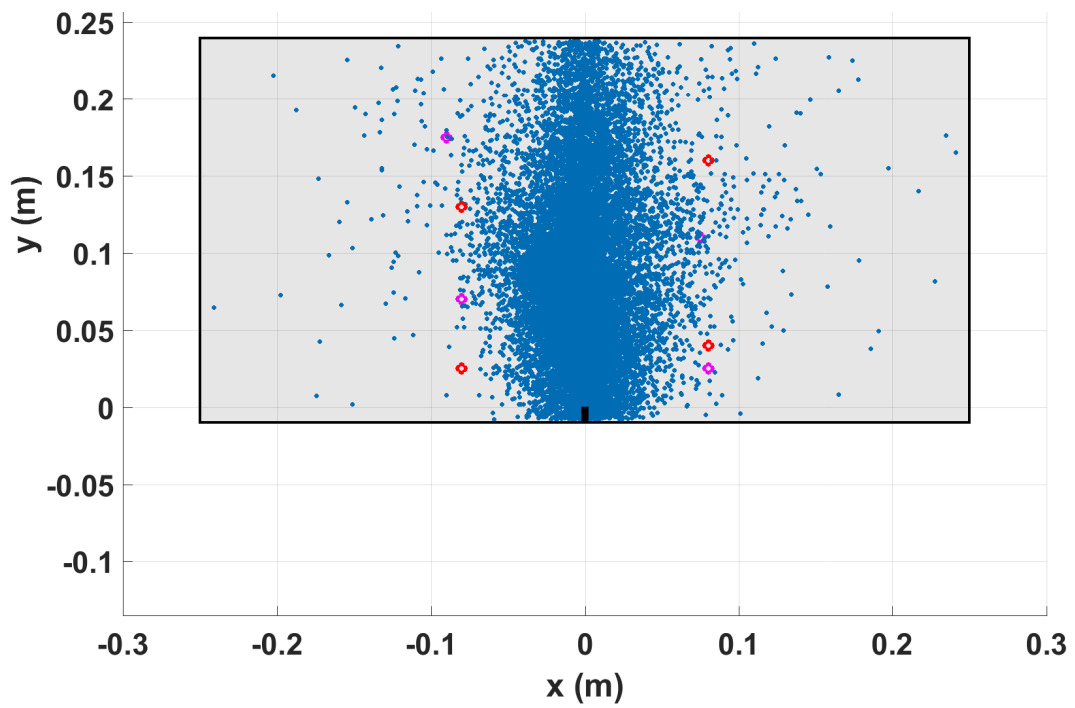


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.5 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme par maillage adaptatif.



(a) Seuil fixe.



(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.6 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-2. Algorithme génétique.

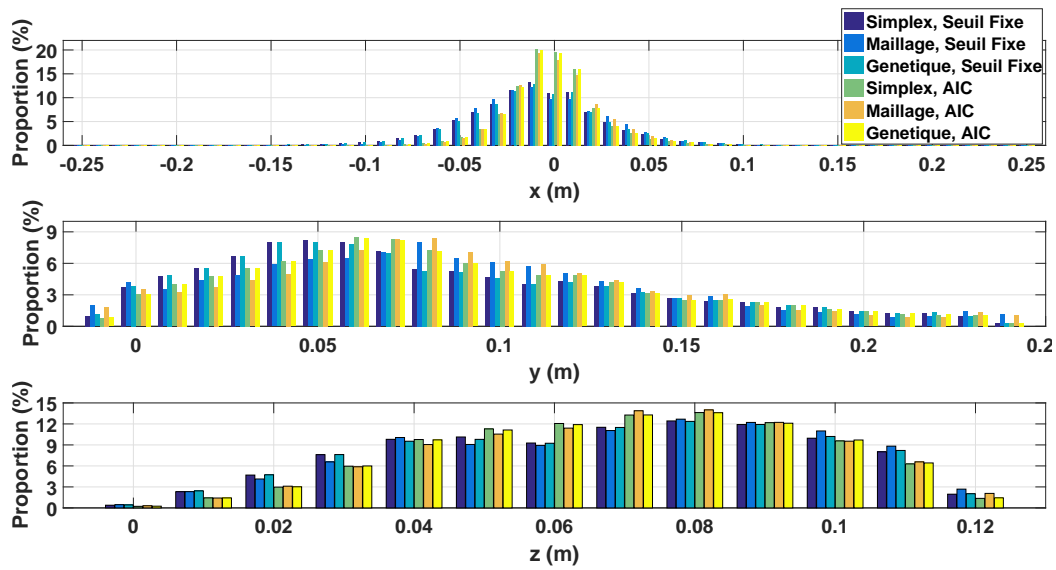


FIGURE B.7 – Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-2.

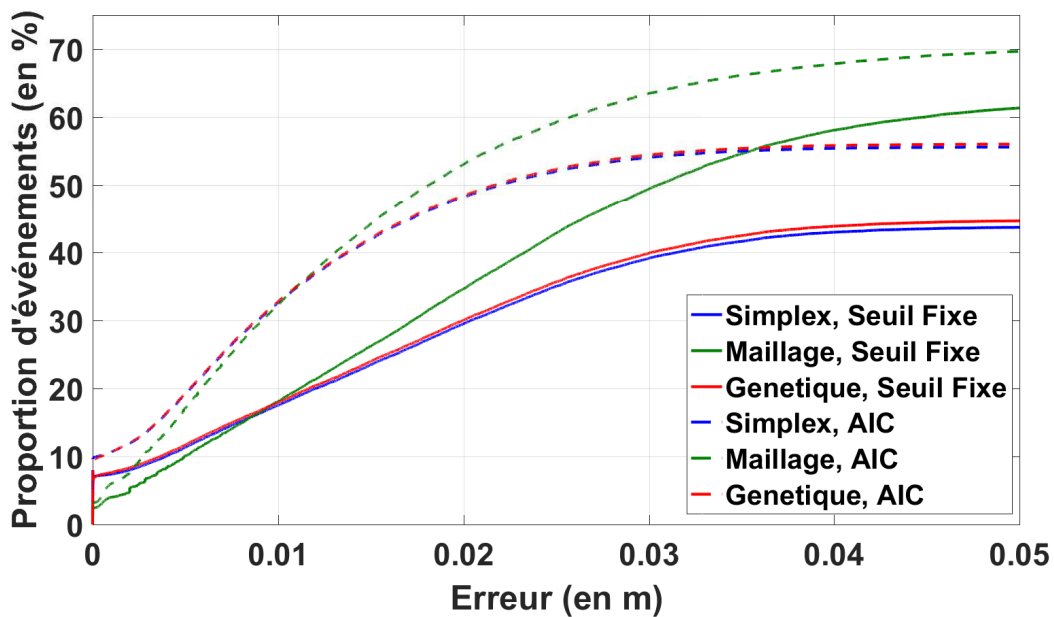


FIGURE B.8 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu  $\xi_m$  et pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Seuil fixe en traits plein. Critère d'Akaike en pointillés. Algorithme des simplex en bleu, algorithme par maillage adaptatif en vert et algorithme génétique en rouge. Poutre p1-2.

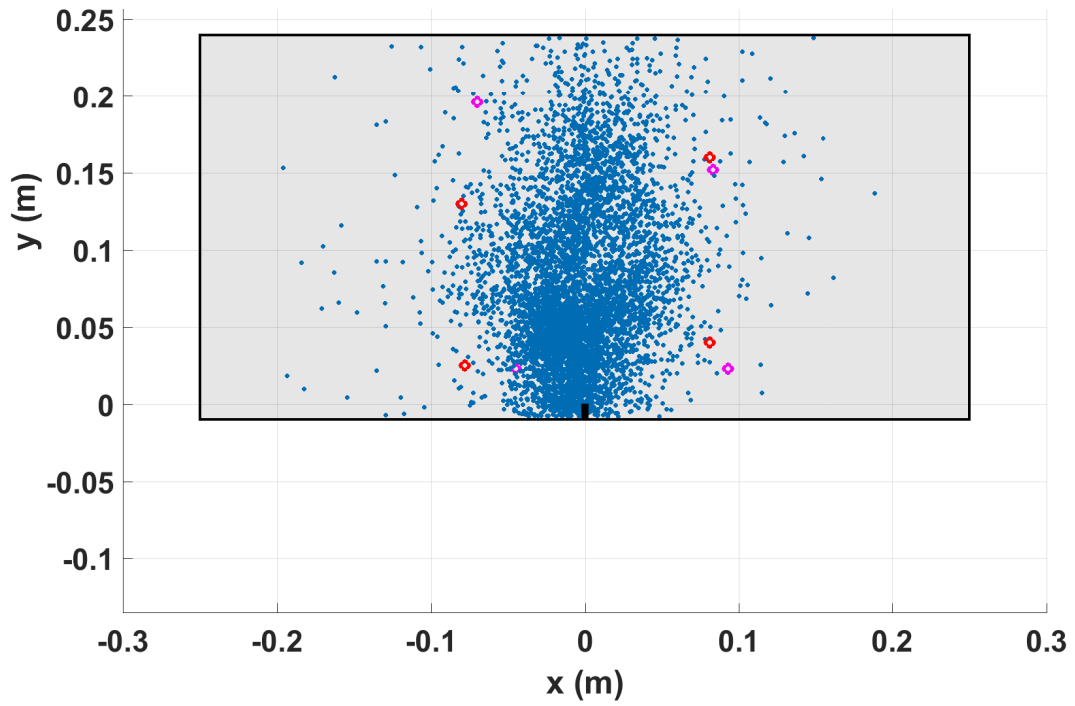


## Poutre p1-3

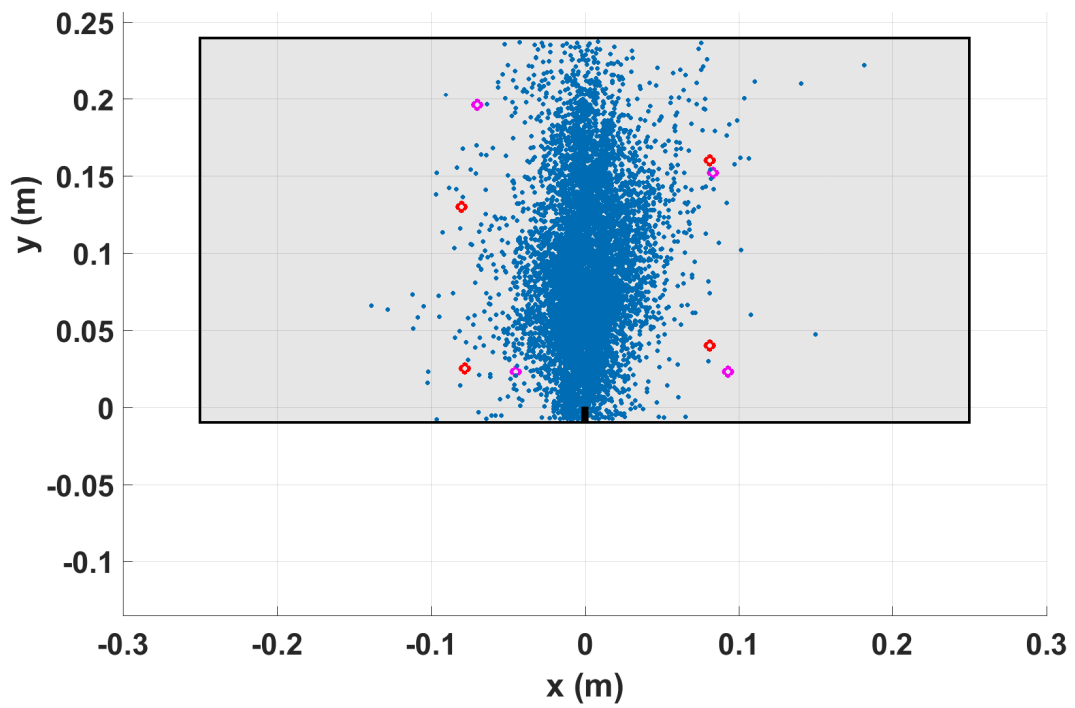
Le tableau B.2 donne les proportions d'événements localisés à l'intérieure de la poutre p1-3 ainsi que la proportion d'énergie associées. Les cartes de localisation sont présentées figure B.9 pour l'algorithme des simplex, figure B.10 pour l'algorithme par maillage adaptatif et figure B.11 pour l'algorithme génétique.

Algorithme	Simplex		Maillage		Genetique	
	SF	AIC	SF	AIC	SF	AIC
Critère de début de save						
Proportion d'événements localisés à l'intérieur (%)	47,9	70,1	69,9	84,1	49,7	71,4
Proportion d'énergie associée (%)	86,9	85,5	85,7	86,3	87,0	85,4

TABLE B.2 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre et proportion d'énergie associée en fonction des stratégies de localisation utilisées pour la poutre p1-3. Nombre d'événements initial : 12387.

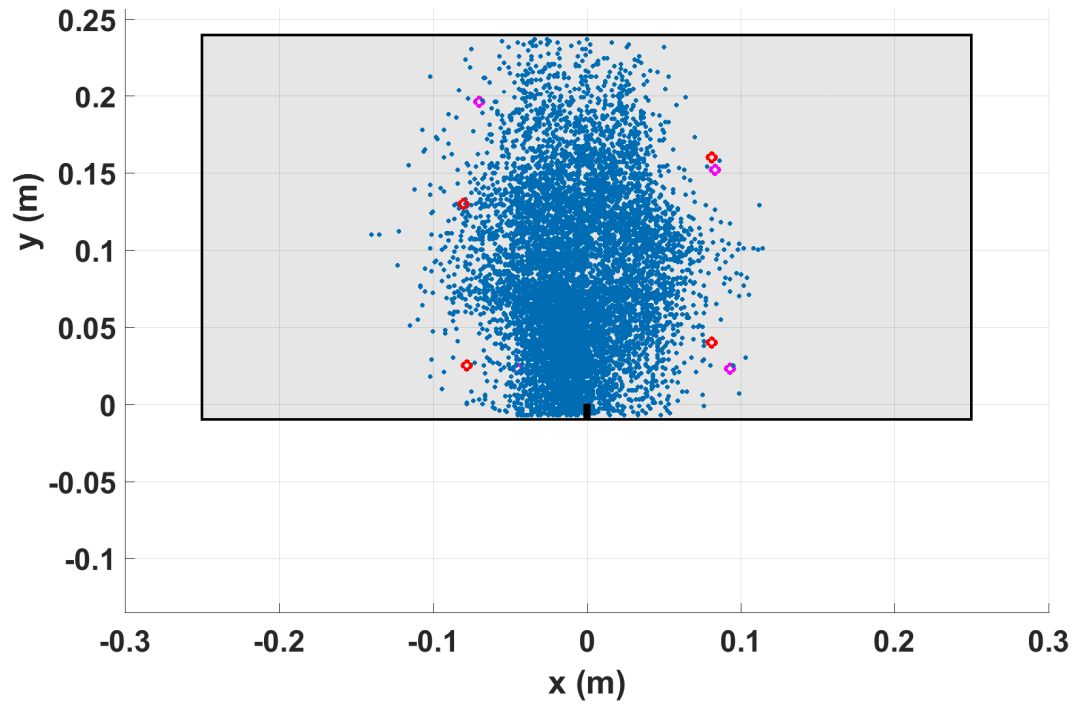


(a) Seuil fixe.

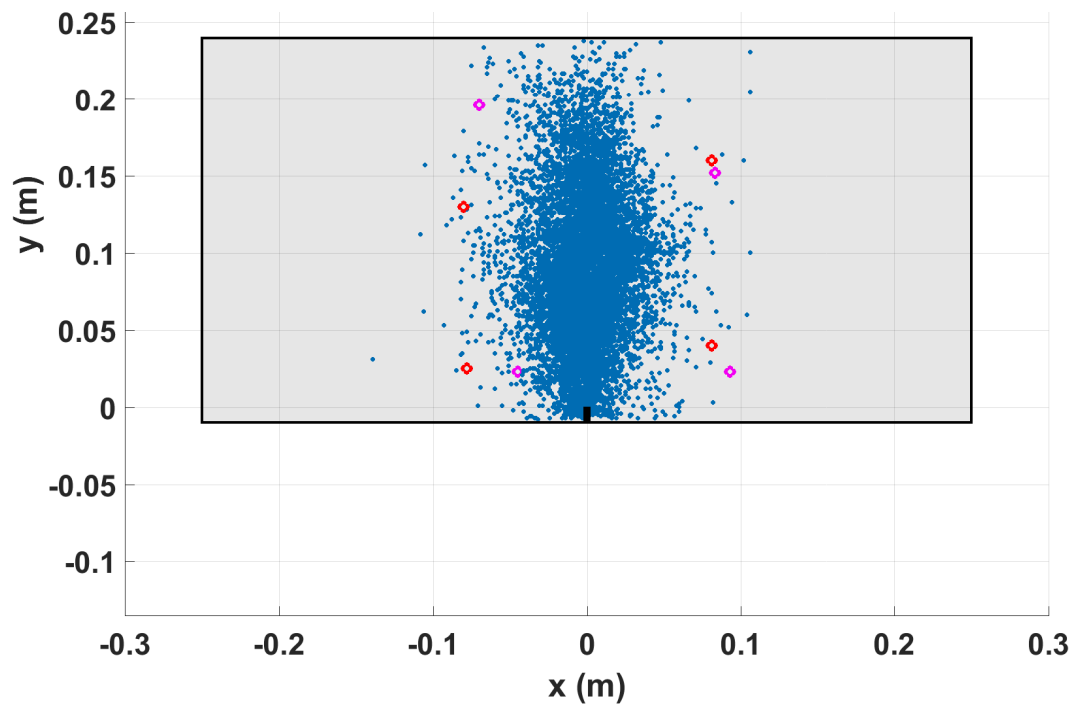


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.9 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme des simplex.

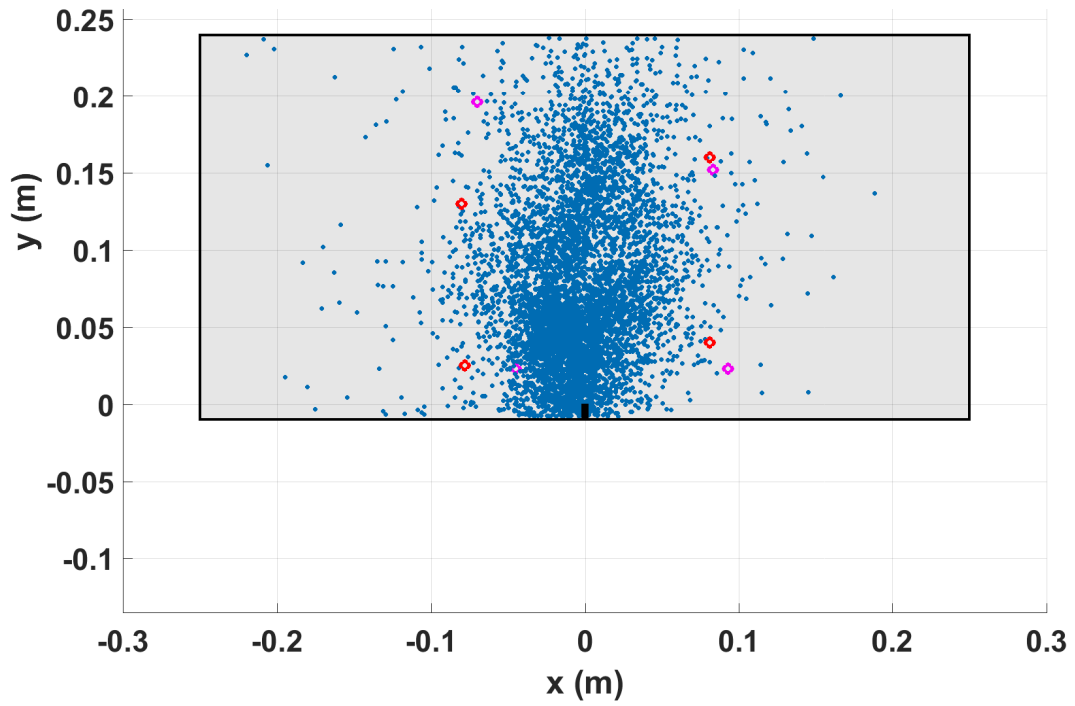


(a) Seuil fixe.

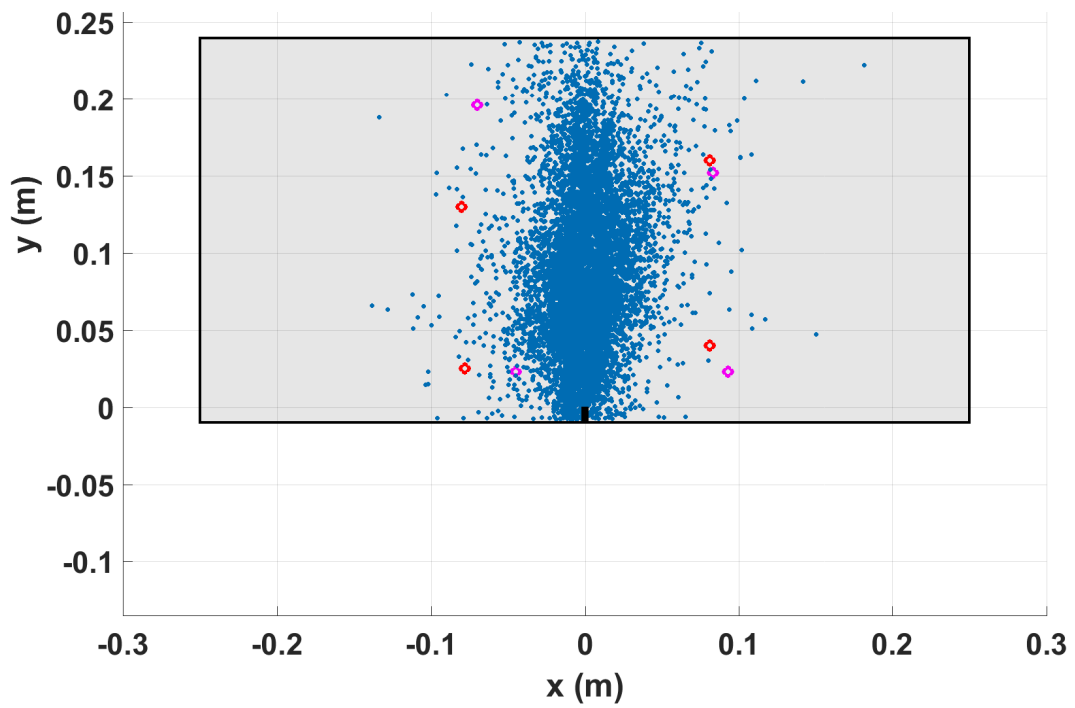


(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.10 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme par maillage adaptatif.



(a) Seuil fixe.



(b) Critère d'Akaike.

FIGURE B.11 – Cartes de localisation des événements acoustiques sur la poutre p1-3. Algorithme génétique.

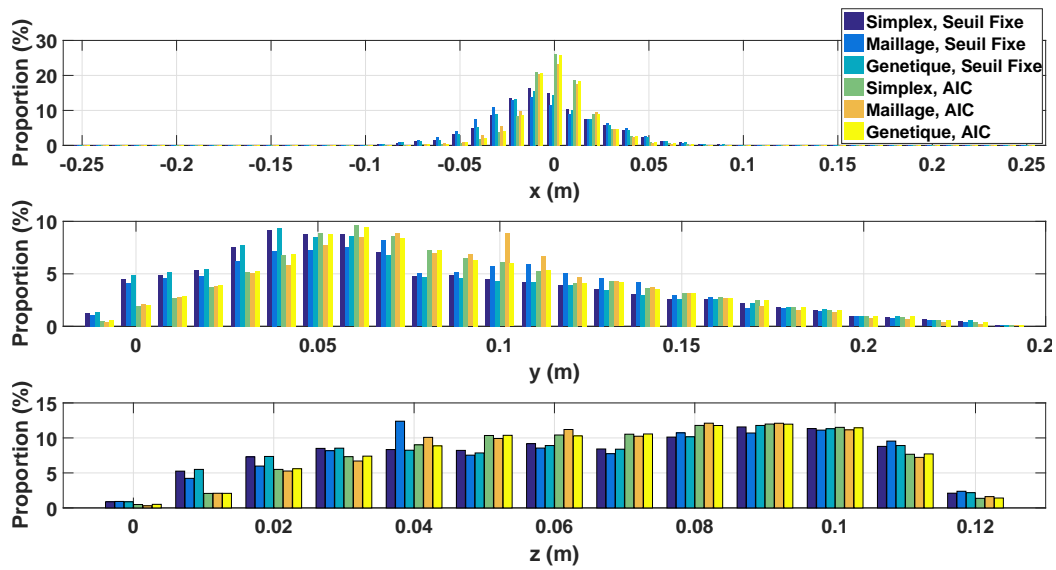


FIGURE B.12 – Distributions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Poutre p1-3.

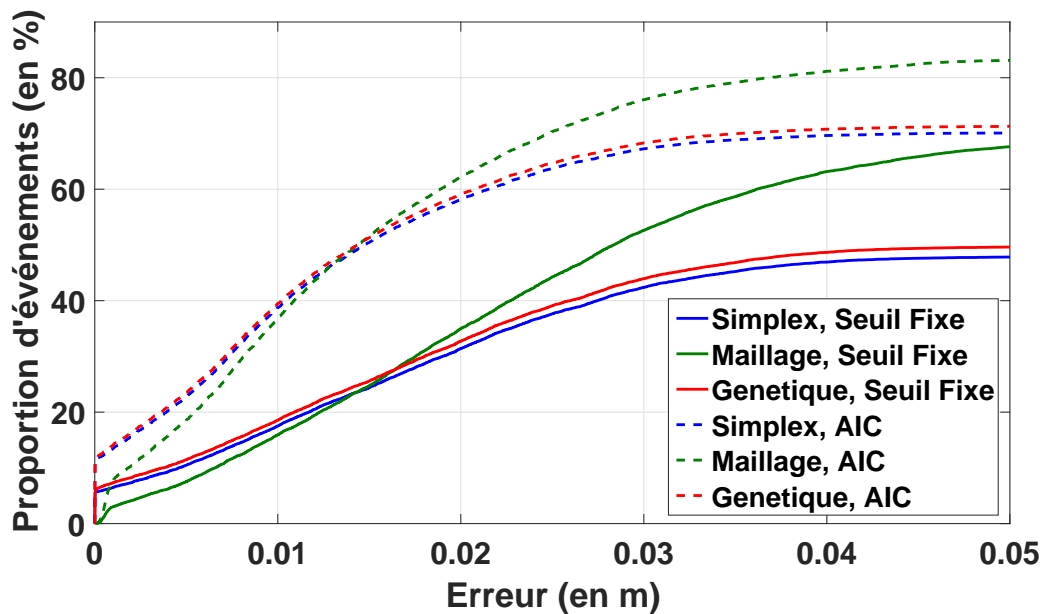


FIGURE B.13 – Proportions d'événements localisés à l'intérieur de la poutre en fonction de du résidu  $\xi_m$  et pour toutes les stratégies de localisation étudiées. Seuil fixe en traits plein. Critère d'Akaike en pointillés. Algorithme des simplex en bleu, algorithme par maillage adaptatif en vert et algorithme génétique en rouge. Poutre p1-3.

# Annexe C

## Cartes des densités des événements et de l'énergie

### Flexion 3 points

#### Poutre p1-1

La figure C.1 représente le découpage de l'essai sur la poutre p1-1 en phases. Les cartes de densités présentées ci-après concernent les phases 1, 2 et 3. Ces phases correspondent à la propagation de fissure.

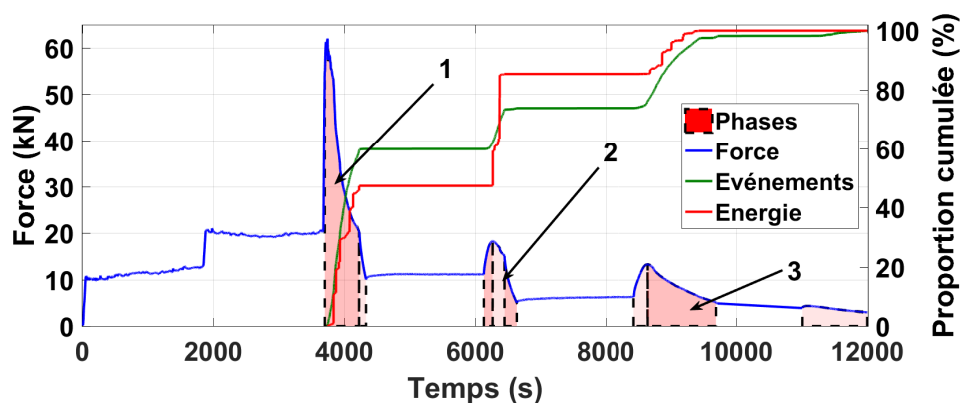
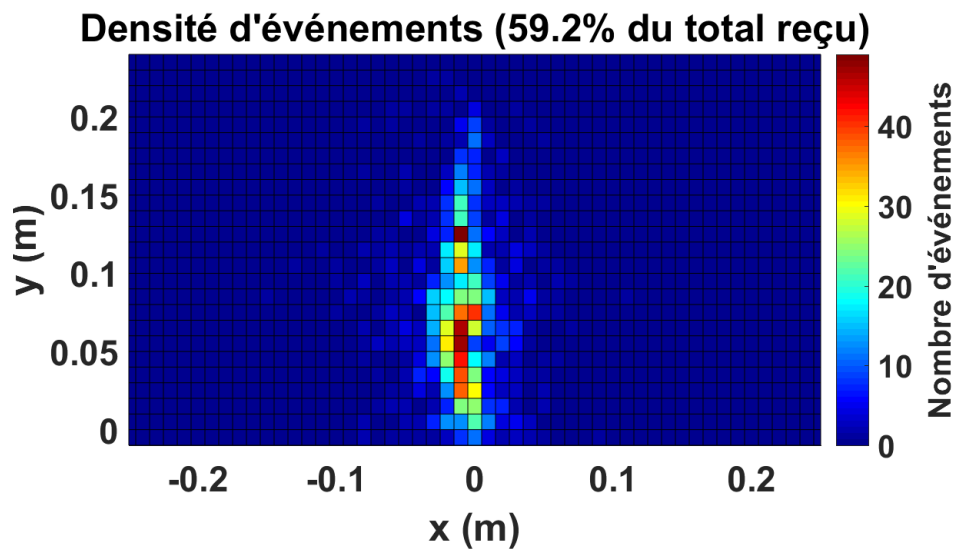
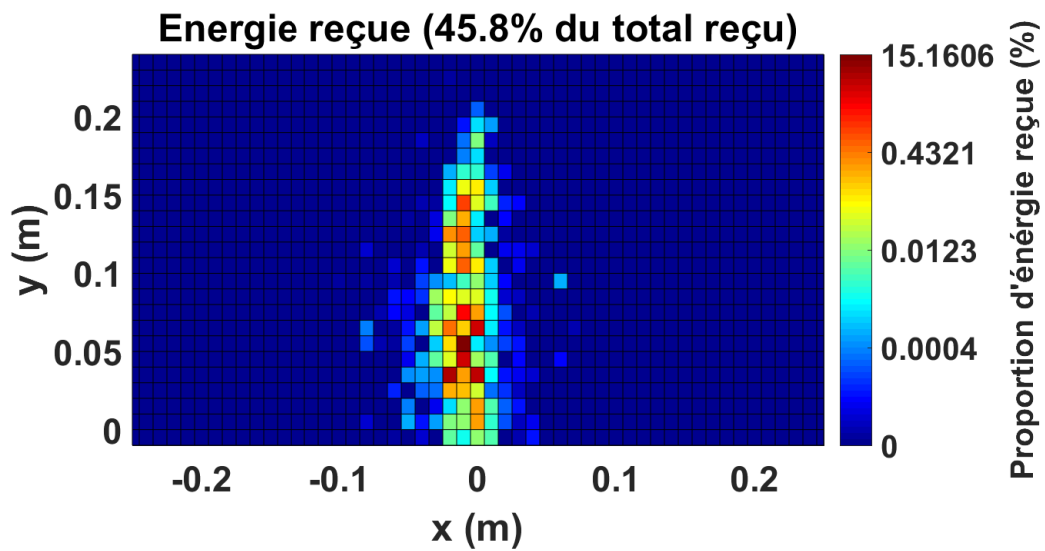


FIGURE C.1 – Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-1.

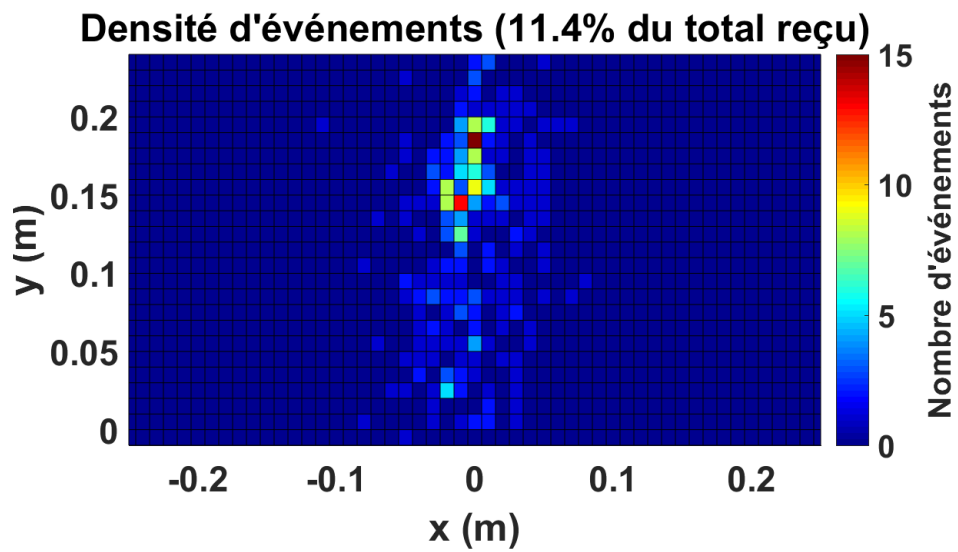


(a) Densité d'événements.

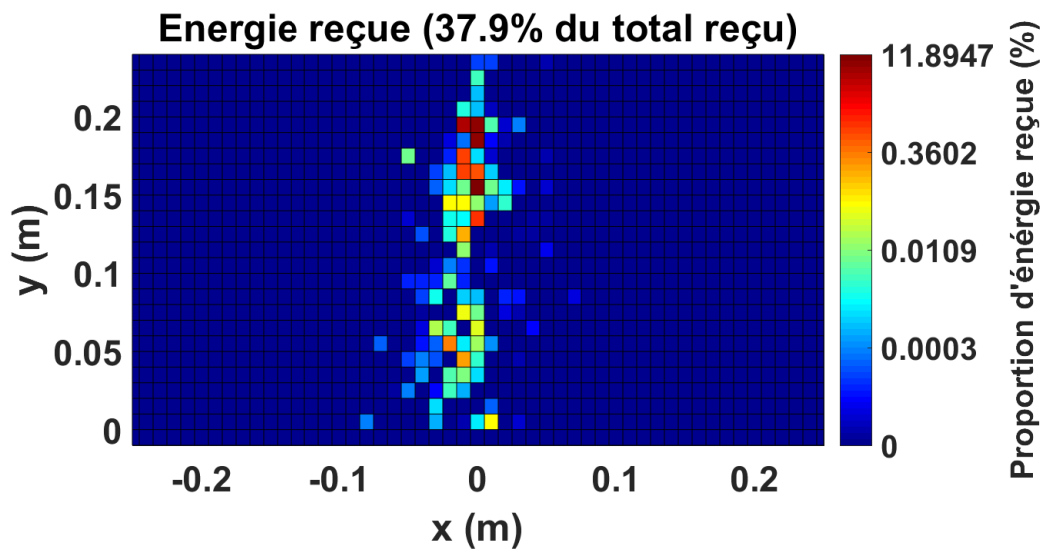


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.2 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 1.



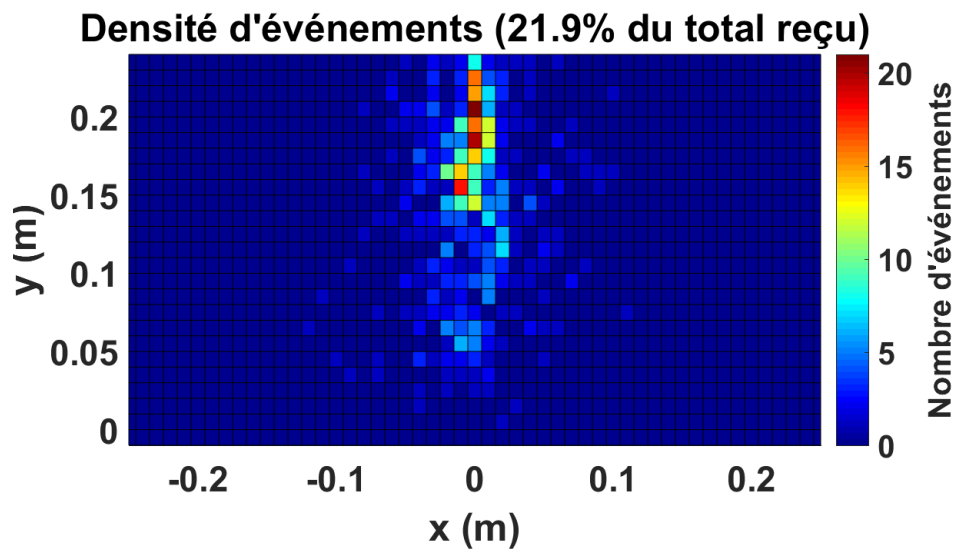
(a) Densité d'événements.



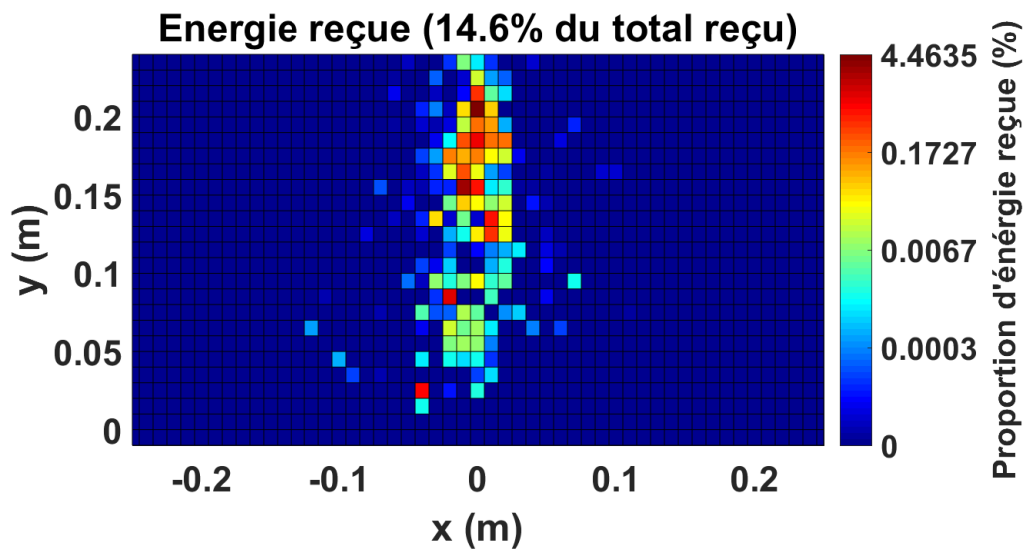
(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.3 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2.





(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.4 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3.

## Poutre p1-3

La figure C.5 représente le découpage de l'essai sur la poutre p1-3 en phases. Les cartes de densités présentées ci-après concernent les phases 1, 2, 3 et 4. Ces phases correspondent à la propagation de fissure.

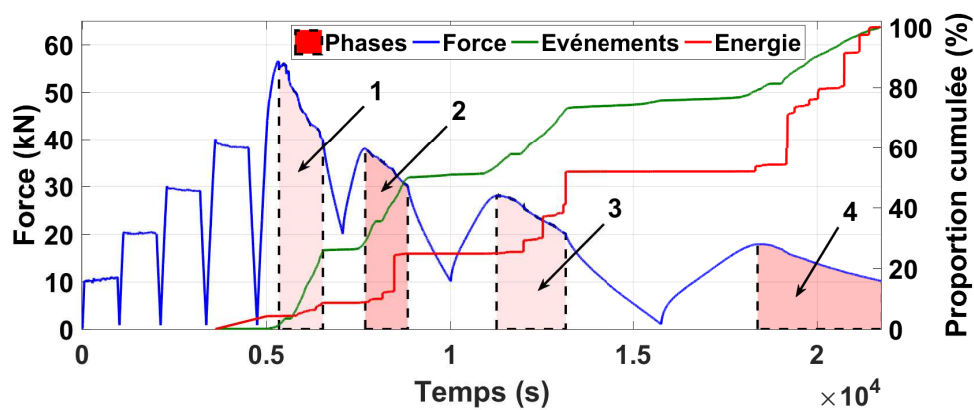


FIGURE C.5 – Découpage temporel de l'essai de flexion 3 points sur la poutre p1-1.

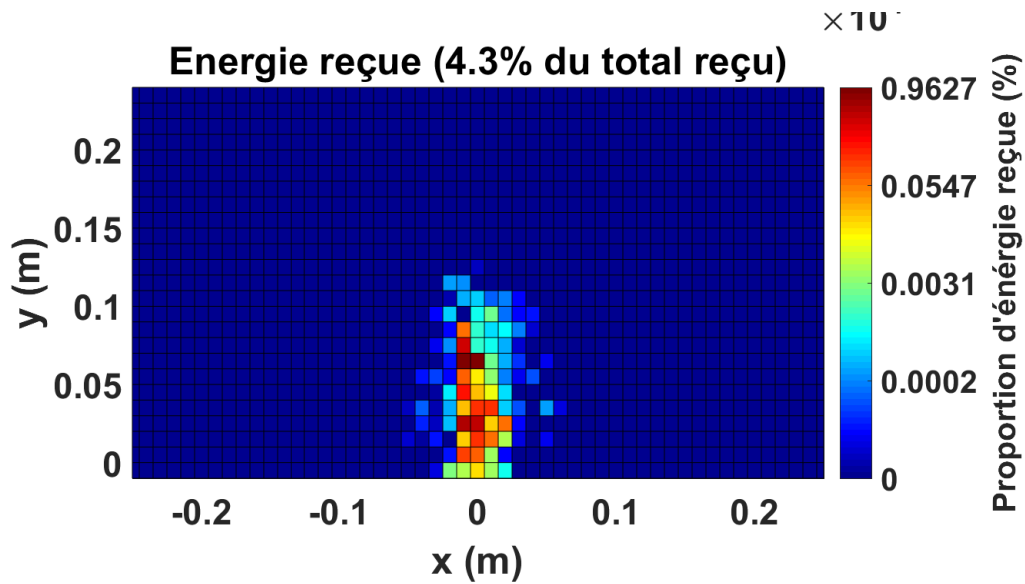
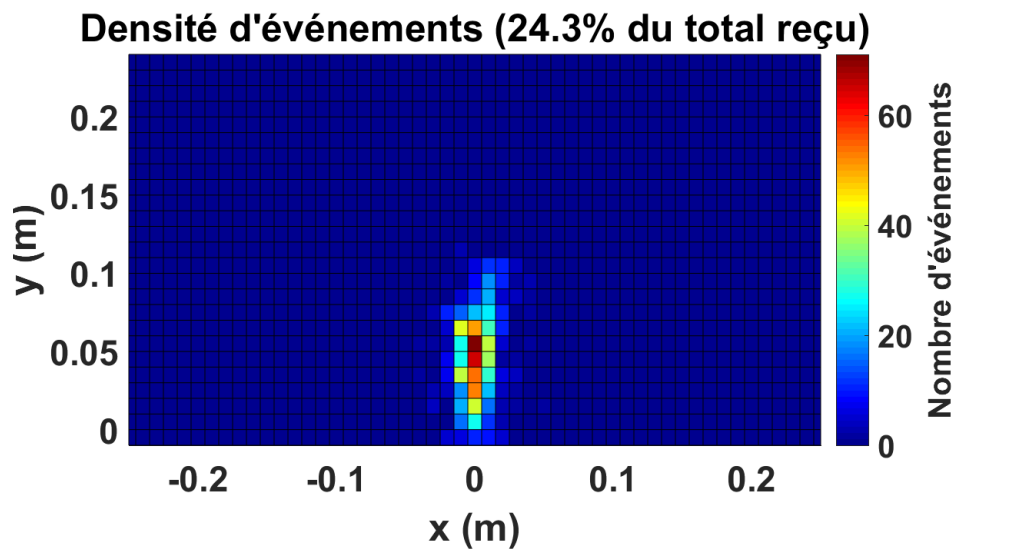
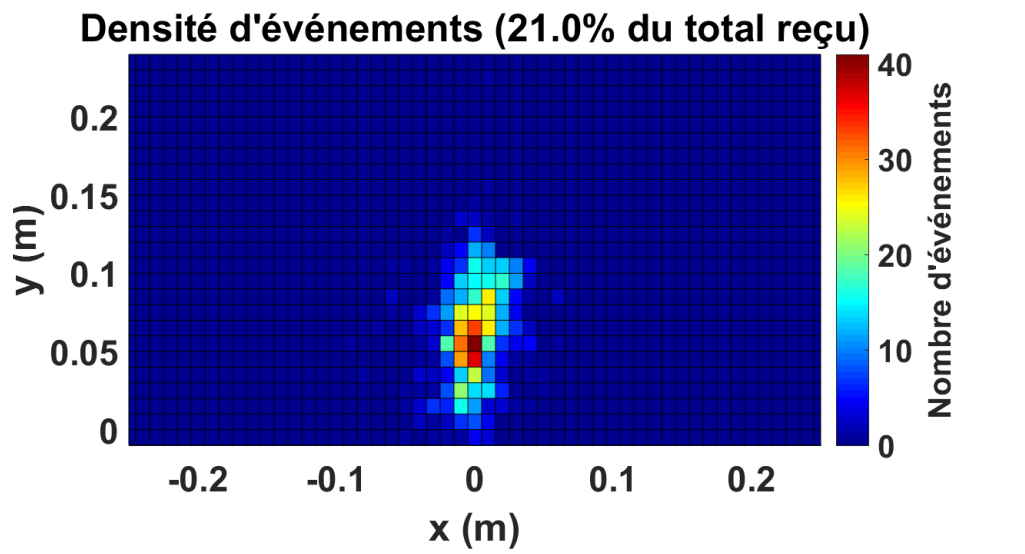
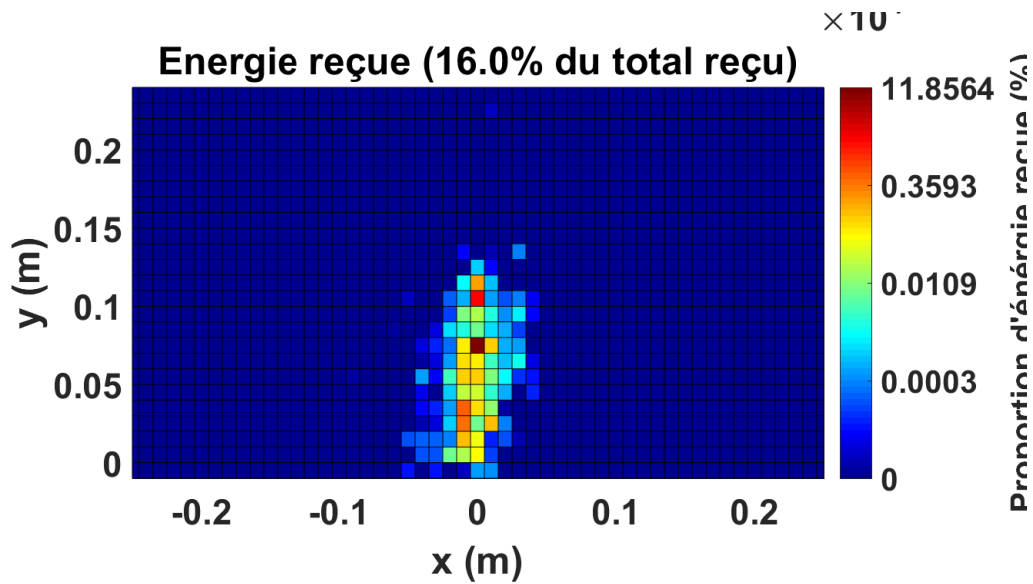


FIGURE C.6 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 1.

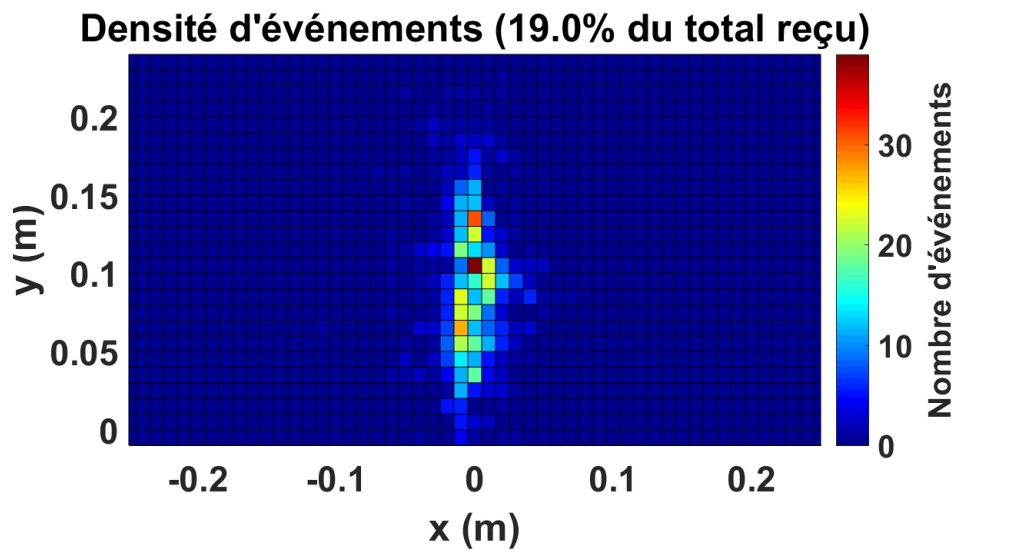


(a) Densité d'événements.

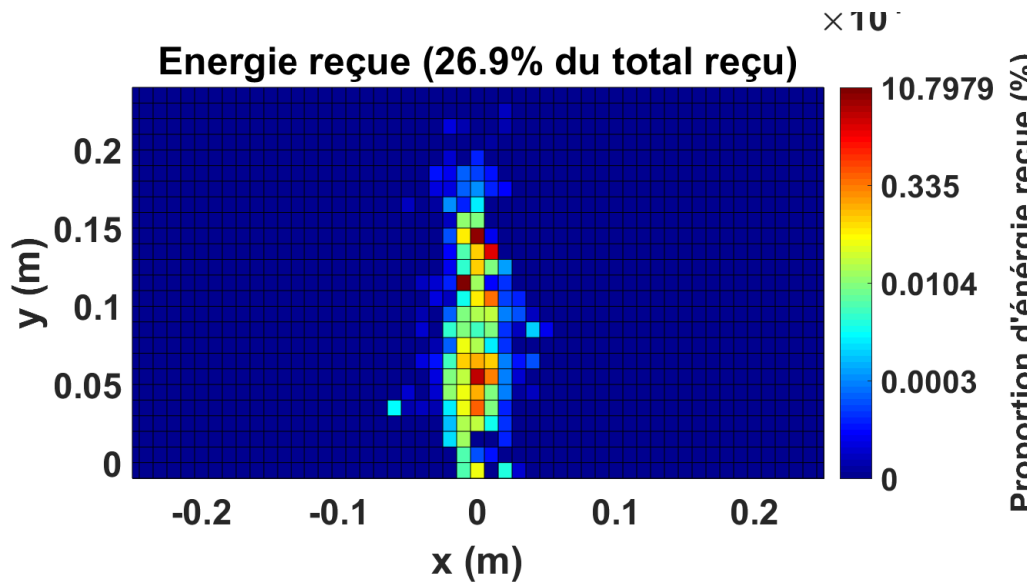


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.7 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 2.

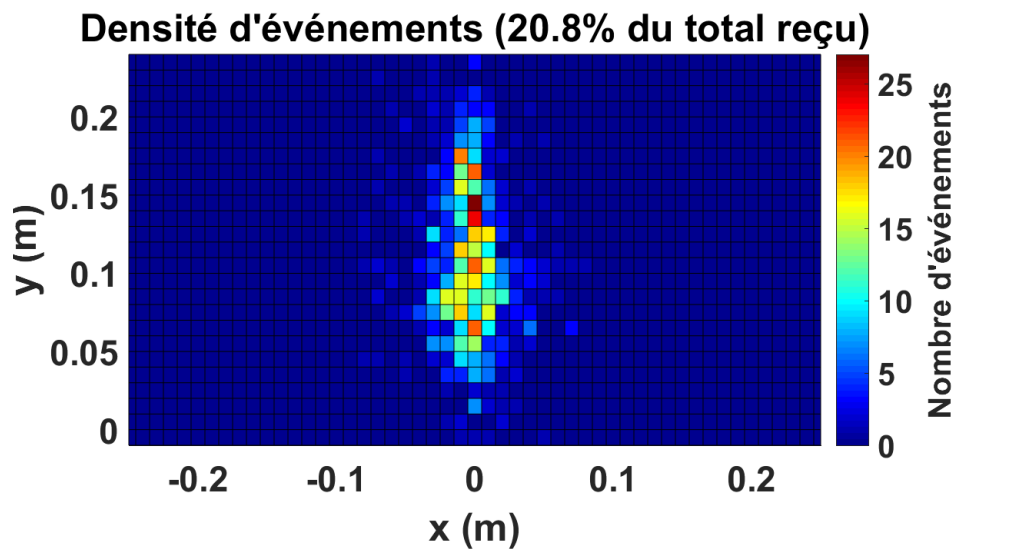


(a) Densité d'événements.

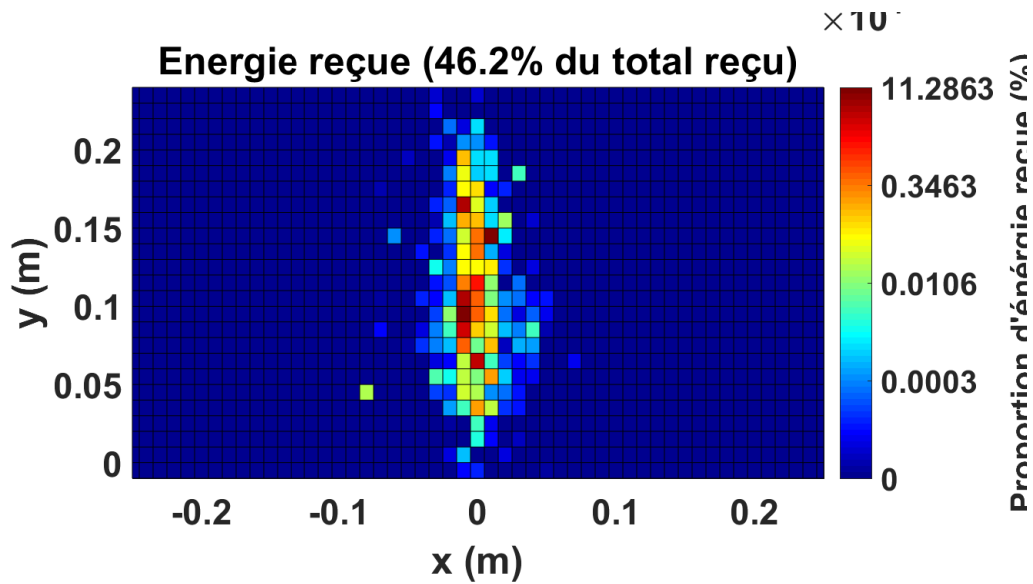


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.8 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 3.



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.9 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) de la phase 4.

# Endommagement thermique

## Poutre p1-4

Les essais sur la poutre p1-4 se sont déroulés sur trois jours. Différentes séries de paliers en température ont été effectuées chacun de ces jours. Ces paliers sont présentés sur la figure C.10. La température liée au refroidissement naturel après le premier palier à 90 °C n'a pas été enregistrée. Ce refroidissement démarre immédiatement après la fin de la courbe (A). Les cartes de densités ci-après correspondent à chacun des paliers en température présentés sur la figure C.10.

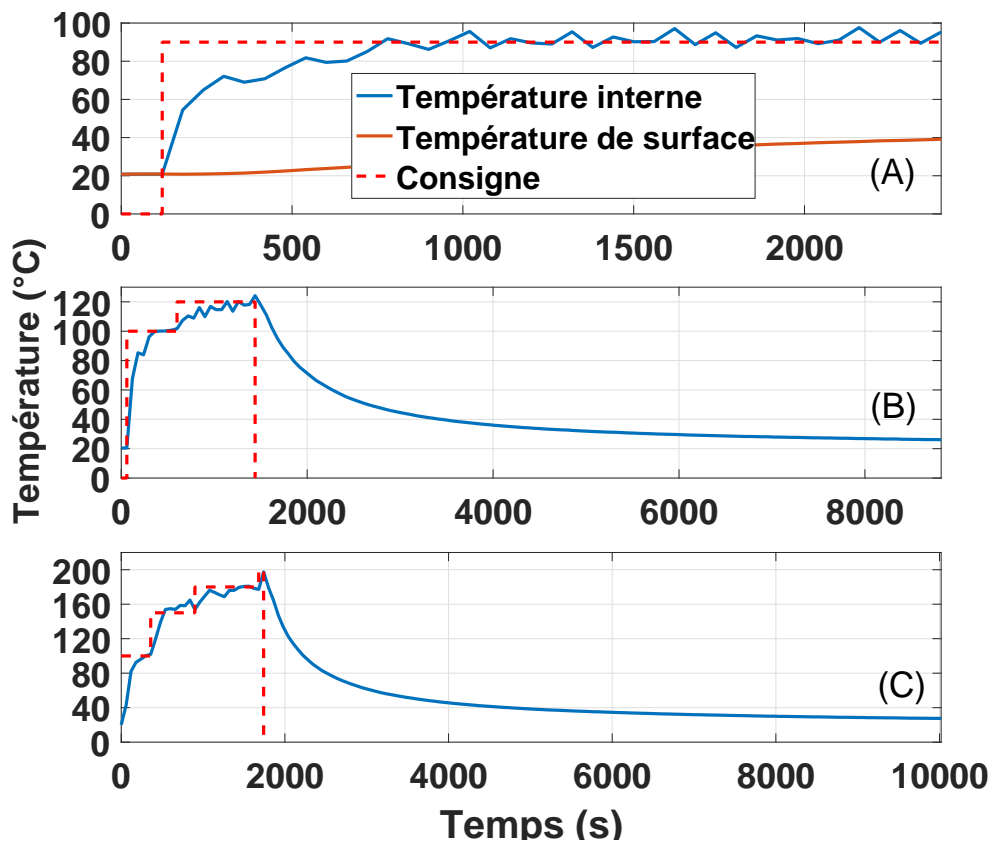
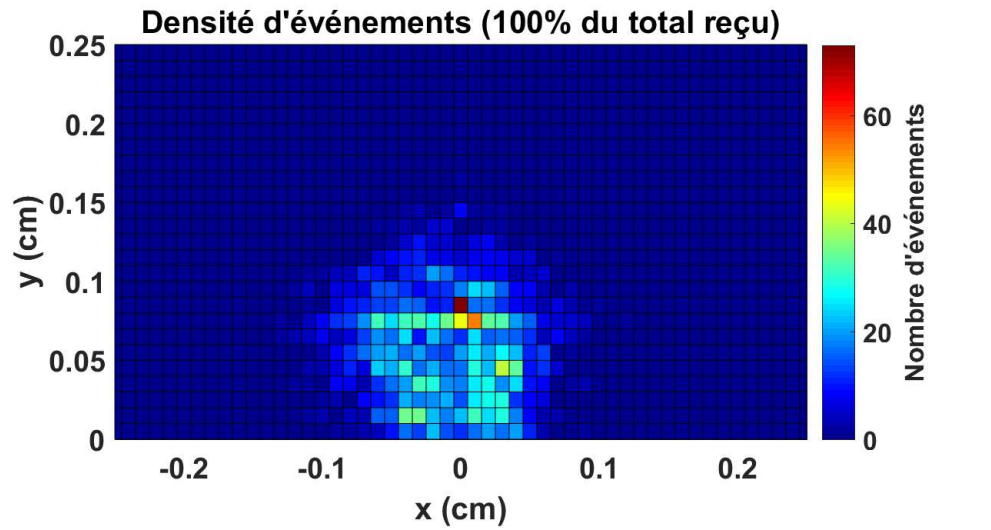
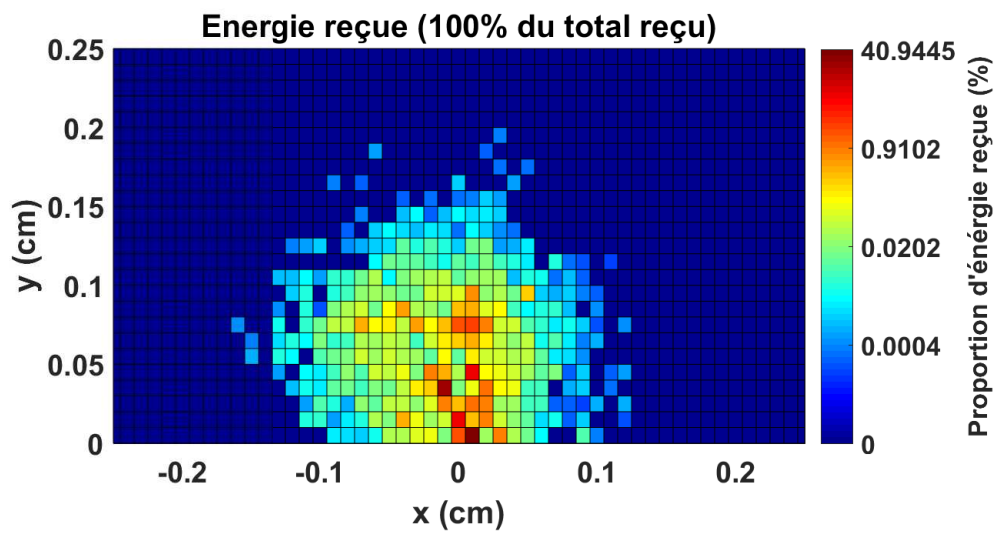


FIGURE C.10 – Température en fonction du temps sur la poutre p1-4. Premier jour (A), deuxième jour (B) et troisième jour (C).



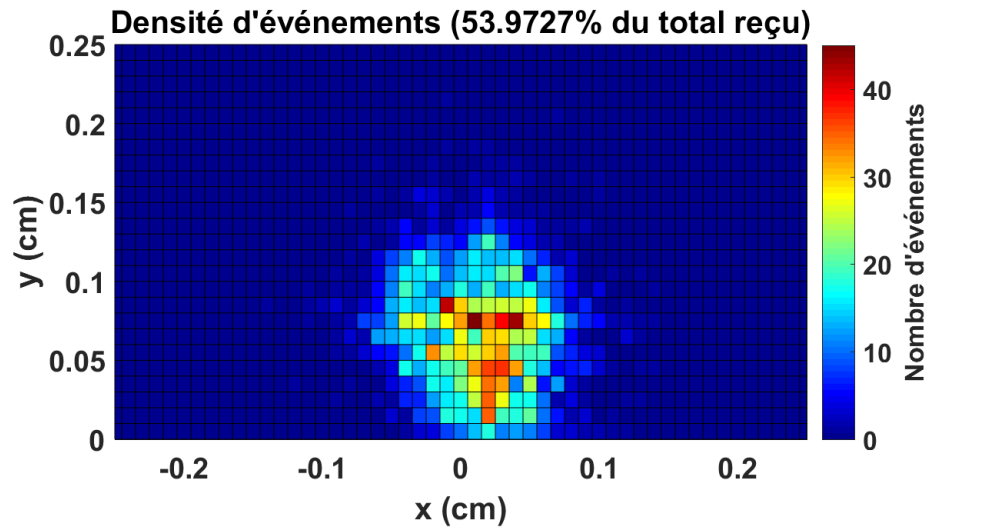
(a) Densité d'événements.



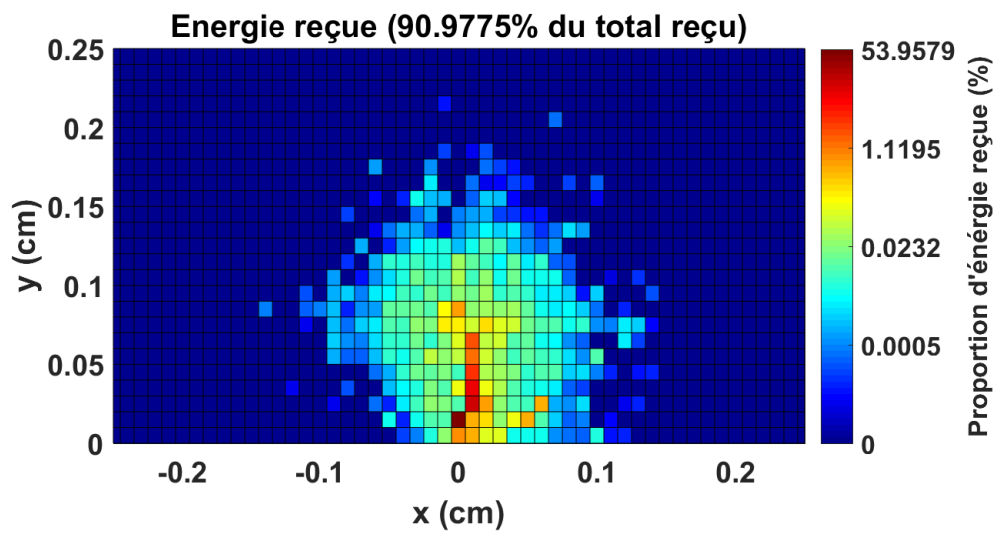
(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.11 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du premier jour. Palier de température :  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



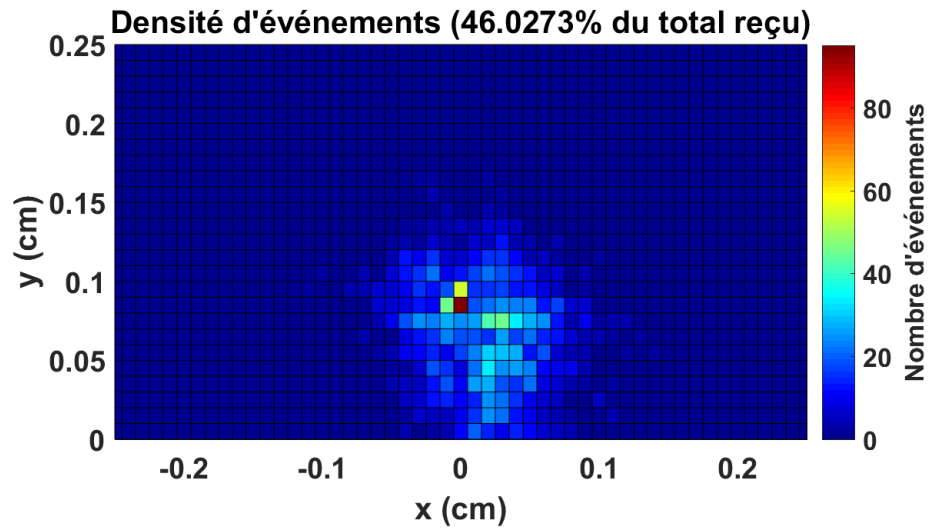


(a) Densité d'événements.

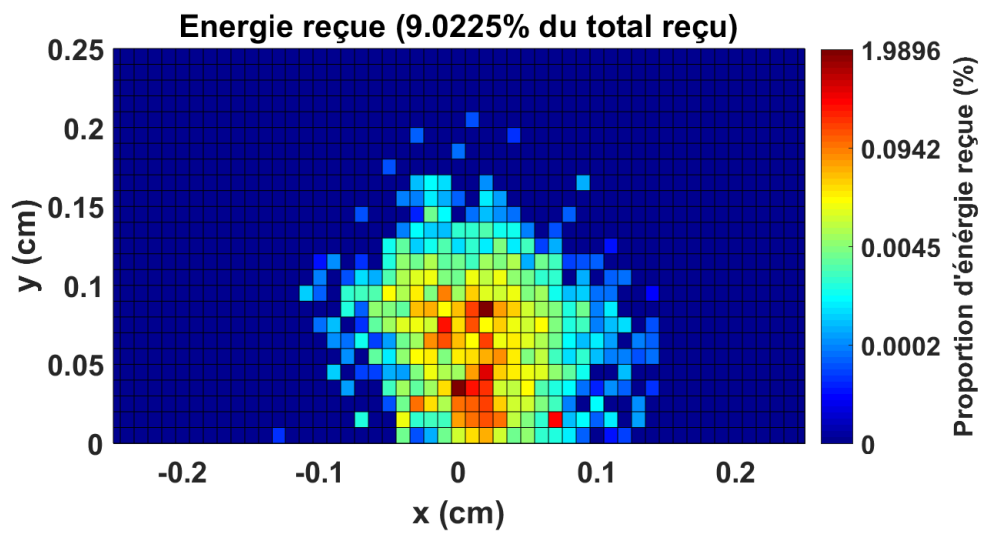


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.12 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température :  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

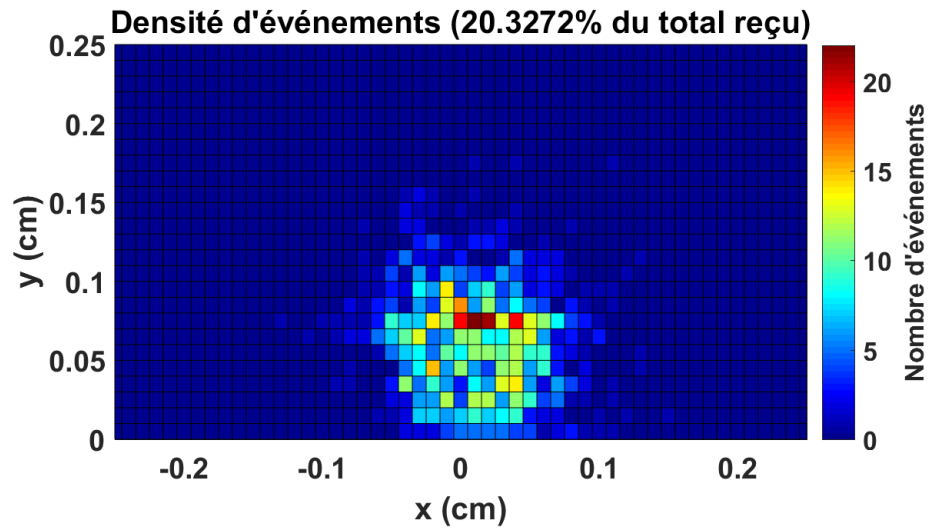


(a) Densité d'événements.

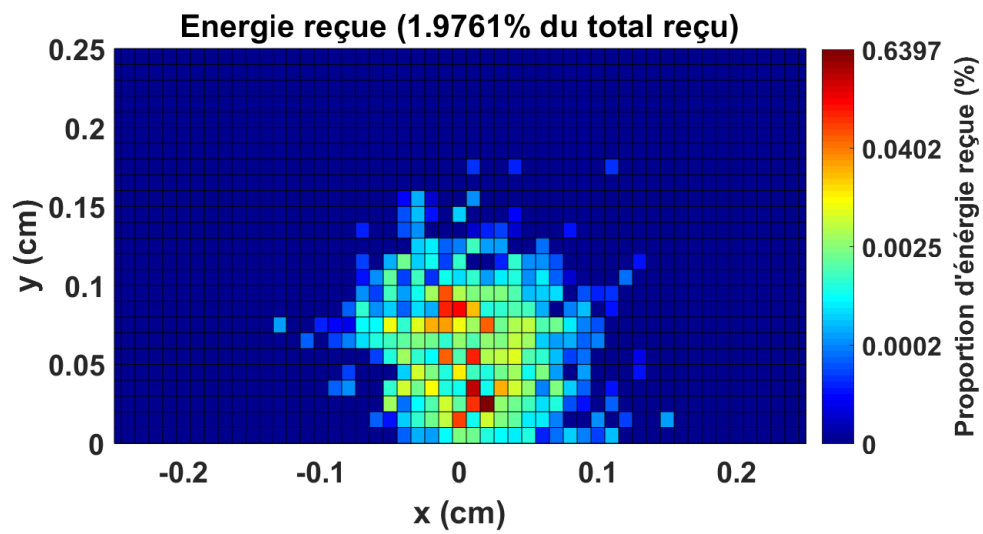


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.13 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 120 °C.

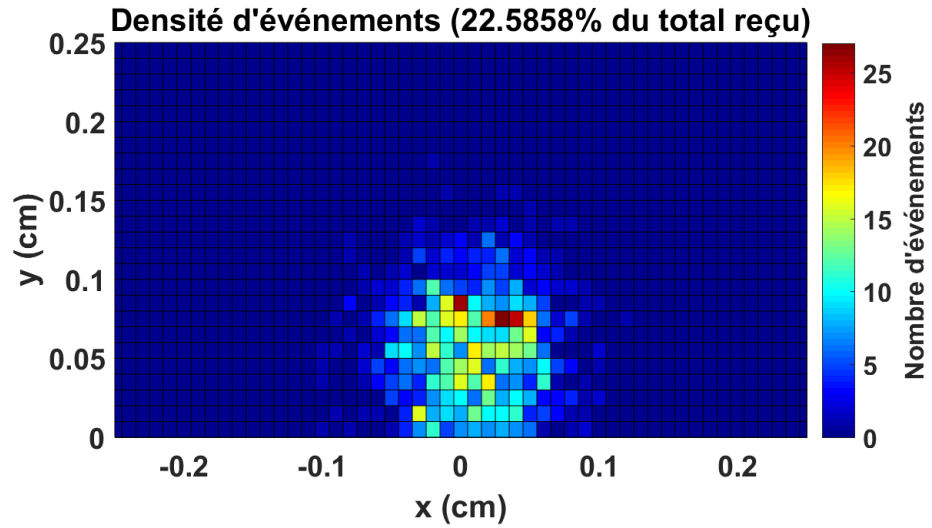


(a) Densité d'événements.

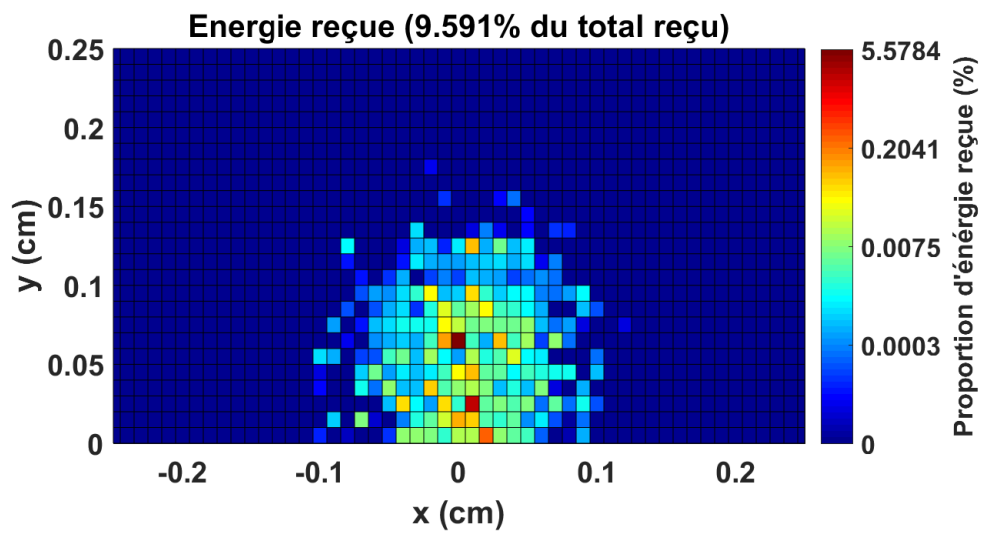


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.14 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 90 °C.

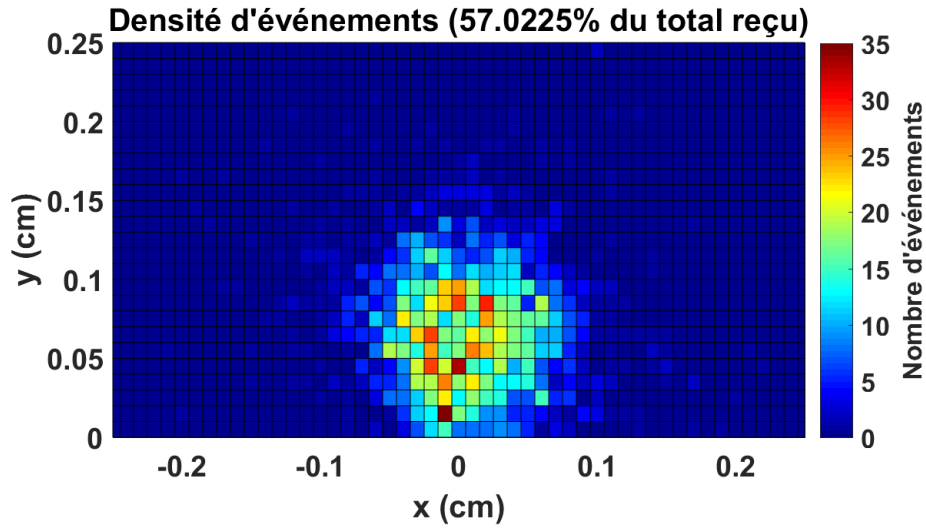


(a) Densité d'événements.

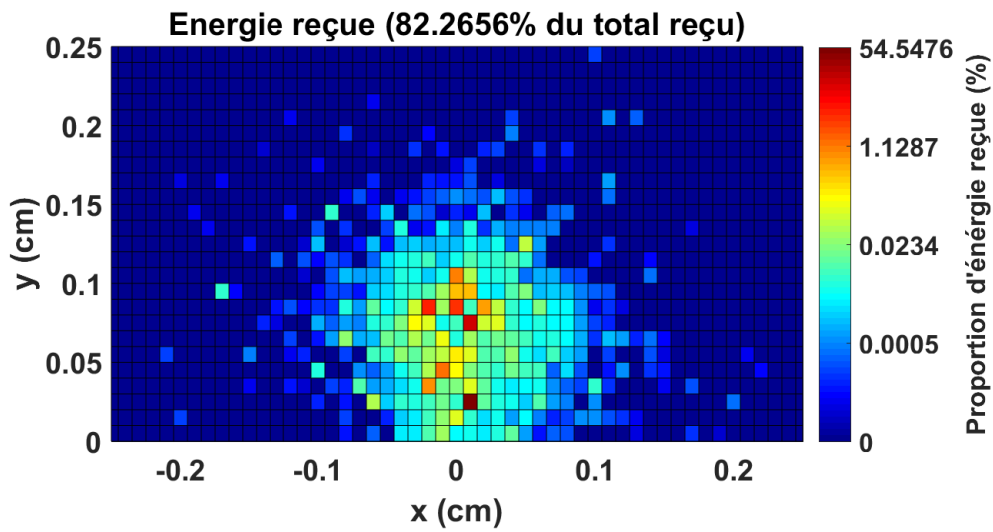


(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.15 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température : 150 °C.



(a) Densité d'événements.



(b) Densité d'énergie.

FIGURE C.16 – Cartographie des densités d'événements (a) et d'énergie (b) du deuxième jour d'essai. Palier de température :  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ .