

**ÉTUDE DE DÉTECTION SISMIQUE ET ACOUSTIQUE POUR  
LA DISCRIMINATION DES ORDRES DE RÉACTIONS DE  
DÉTONATION**

**Bernard Giroux, Issam Bakari**

**Institut National de la Recherche Scientifique  
Centre Eau Terre et Environnement**

Rapport final

Soumis au Dr. Sonia Thiboutot, Autorité Scientifique DRDC Valcartier

2016-03-30

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016  
Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec  
Dépôt légal, Bibliothèque et archives Canada  
ISBN : 978-2-89146-862-6

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1. RÉSUMÉ</b>	<b>12</b>
<b>2. EXECUTIVE SUMMARY</b>	<b>13</b>
<b>3. INTRODUCTION</b>	<b>14</b>
3.1 Contexte	14
3.2 Tâches	14
<b>4. TRAVAUX EFFECTUÉS</b>	<b>16</b>
4.1 Recensement des visites de terrain	16
4.2 Installation des tours de communication	16
4.3 Algorithmes de détection, de pointé et de localisation	18
4.3.1 Détection	19
4.3.2 Pointé des temps d'arrivée	24
4.3.3 Localisation	28
4.4 Calibration du modèle de vitesse	29
4.4.1 Tirs de calibration du 25 septembre 2014	30
4.4.2 Tirs de calibration du 13 et 14 mai 2015	33
4.4.3 Pointé des temps d'arrivée	38
4.4.4 Estimation du modèle de vitesse	39
4.4.5 Estimation de la précision de la localisation	41
4.5 Achat et installation d'équipement	43
<b>5. ESSAIS AVEC MUNITIONS INERTES</b>	<b>45</b>
5.1 Obus de 105 mm	45
5.1.1 Essai du 20 Juillet	45
5.1.2 Essai du 25 Novembre	48
5.1.3 Comparaison entre les signatures des obus inerte et « live »	51
5.2 Obus de 155 mm	52
5.3 Mortier de 84 mm	54
<b>6. CONCLUSION</b>	<b>56</b>
<b>7. REMERCIEMENTS</b>	<b>57</b>
<b>8. RÉFÉRENCES</b>	<b>58</b>





## LISTE DES FIGURES

---

Figure 1 – Installation des radios. ....	17
Figure 2 – Localisation des stations après mise à jour. ....	18
Figure 3 – Méthode STA/LTA appliquée à un signal de 1600 échantillons ( $F_s=1000$ Hz, STA=30 ms, LTA=300 ms, CR=2). ....	20
Figure 4 – Processus de détection d'évènement en utilisant les critères de seuil dynamique. (a) trace à trois composantes. (b) Les spectrogrammes et leurs spectres de fréquence-amplitude (courbes rouges) (tiré de Akram 2014). ....	21
Figure 5 – c) Profils d'amplitude des pics de fréquences. (d) Sommation et lissage de la courbe (c). (e) la fonction de référence S. (f) les résultats de détection, où le STA / LTA en noir et la courbe de seuil dynamique est en rouge (tiré de Akram 2014). ....	21
Figure 6 – Méthode ATA/BTA/DTA appliquée sur un signal de longueur 1600 échantillon ( $F_s=1000$ Hz, BTA=ATA=DTA=50ms). ....	23
Figure 7 – Exemple d'évènement détecté par analyse vectorielle. ....	24
Figure 8 – Exemple d'évènement détecté avec la méthode MER. ....	25
Figure 9 – Exemple d'évènement pointé par la méthode CMC ( $nt=T$ , $\beta=0.2$ ). ....	26
Figure 10 – Exemple d'évènement pointé par la méthode AIC. ....	27
Figure 11 – Application des différentes techniques de détection sur un signal qui contient 6 évènements avec un rapport signal/bruit supérieur à 5. ....	28
Figure 12 – Position des tirs de calibration (étoiles rouges de 1 à 8 ordonnées selon l'heure de tir). ....	30
Figure 13 – Sismogrammes d'un tir de calibration (2 blocs de C4) montrant les arrivées sismiques et acoustiques. ....	31
Figure 14 – Spectres d'amplitude du signal enregistré aux capteurs de la station 2 durant une minute d'enregistrement (10:47). Trois tirs ont été réalisés durant cette période. ....	32
Figure 15 – Spectres d'amplitude du signal enregistré aux capteurs de la station 2 durant une minute avant (10:46) les tirs de calibration. ....	33
Figure 16 – Système de détection optique synchronisé par GPS. ....	34
Figure 17 – Positions des points de tir (en vert) réalisés lors de l'essai de calibration de mai 2015. ....	35
Figure 18 – Comparaison de la phase acoustique observée dans le signal du sonomètre (bleu) et le capteur sismique (noir) de la même station. ....	36
Figure 19 – Composante verticale du capteur triaxial de chaque station pour cinq tirs différents à distance croissante. ....	37

Figure 20 – Transformée de Stockwell de la phase sismique pour le tir de calibration #7 (12 blocs) enregistré à la station 1.....	38
Figure 21 – Transformée de Stockwell de la phase acoustique pour le tir de calibration #7 (12 blocs) enregistré à la station 1.....	38
Figure 22 – Vitesse apparente de l’onde P pour les 10 tirs.....	40
Figure 23 – Modèle de vitesse de l’onde P obtenu à partir des tirs de calibration dans le secteur de l’impact Liri.....	40
Figure 24 – Couverture des rais sismiques résultant de l’essai de calibration. Les cercles rouges sont les points de tir et les triangles verts représentent les capteurs sismiques. ....	41
Figure 25 – Variation du résidu en fonction des itérations pour les 10 tirs de calibration. ....	42
Figure 26 – Position de la Station 4. ....	43
Figure 27 – Installation des support à panneaux solaires. ....	44
Figure 28 – Phase acoustique du canon (noir), phase sismique de l’impact (rouge) et phase acoustique de l’explosion (vert) pour un tir live. ....	46
Figure 29 – Position du canon (drapeau rouge) et la zone cible (cercle rouge).....	46
Figure 30 – Transformée Stockwell de la phase acoustique de l’explosion (105 mm) enregistré par le sonomètre.....	47
Figure 31 – Transformée de Stockwell de la phase acoustique du canon (Novembre).....	47
Figure 32 – Exemple de signal sismique enregistré lors d’un tir d’obus live 105 mm. ....	48
Figure 33 – Premier tir inerte montrant la présence de la phase acoustique (noir) avant la phase sismique (rouge) aux quatre stations sismiques. ....	49
Figure 34 – Zoom sur la phase sismique du premier tir inerte de 105 mm, enregistré à la station 1.....	50
Figure 35 – Enregistrement du deuxième tir inerte montrant les phases acoustiques du canon (noir) et la phase sismique de l’impact de l’obus à la Station 3 (rouge). ....	50
Figure 36 – Signal sismique enregistré aux stations sismiques au moment du troisième tir inerte.....	51
Figure 37 – Transformée Stockwell de la phase sismique (en rouge) de l’impact d’un obus inerte 105 mm.....	52
Figure 38 – Transformée de Stockwell de la phase sismique de l’explosion d’un obus live 105 mm.....	52
Figure 39 – Exemple d’enregistrements sismiques pour un obus inerte. On observe les phases acoustiques du canon (noir) et la phase sismique de l’impact de l’obus (rouge). ....	53
Figure 40 – Exemple d’enregistrements sismiques pour un obus « live ». On observe les phases acoustiques du canon (noir), la phase sismique de l’impact de l’obus (rouge) et la phase acoustique de la détonation (vert). ....	53

Figure 41 – Localisation des impacts d’obus 155 mm inertes tirées le 25 novembre 2015. .... 54  
Figure 42 – Signal sismique enregistré pendant l’essai de tir des mortiers inertes. .... 55



## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 – Temps de calcul et erreur de détection des méthodes appliquées. ....	28
Tableau 2 : Coordonnées des tirs de calibration (25 septembre 2014) .....	30
Tableau 3 – Coordonnées des tirs de calibration (13-14 mai 2015) .....	35
Tableau 4 – Temps relatif des arrivées de l’onde P directe (en secondes) .....	39
Tableau 5 – Statistiques sur la localisation des tirs de calibration .....	42
Tableau 6 - Heure des tirs de 105 mm le 20 Juillet.....	45
Tableau 7 – Heure des tirs de 105 mm le 25 Novembre.....	48



# 1. Résumé

---

Dans ce rapport on présente les résultats obtenus en date du mois de Mars 2016 dans le cadre du projet « Étude de détection sismique et acoustique pour la discrimination des ordres de réactions de détonation ». Suite aux résultats obtenus au mois de juillet 2015, une quatrième station sismique-acoustique a été recommandée et installée dans le secteur afin d'améliorer la précision de localisation. Dans cette phase, deux essais de détectabilité ont été effectués dans le secteur Liri, le premier pendant le mois de juillet 2015 et le deuxième au mois de novembre 2015. Le premier essai correspond à neuf tirs d'obus de 105 mm dont trois sont inertes. Le deuxième essai de détectabilité a comporté des tirs d'obus « live » et inertes de différents calibres (155 mm, 105 mm et 84 mm). Plusieurs conclusions peuvent être tirées à partir de ces essais :

- Les obus inertes de calibre 155 mm peuvent être détectés et localisés avec une confiance élevée avec la configuration d'instruments installée autour de la zone d'impact et avec notre algorithme de localisation.
- La détection des obus inertes de calibre 105 mm est limitée (rapport signal/bruit en deçà de 2 la majorité du temps) et dépend des conditions liées aux caractéristiques géologiques du site (atténuation des ondes sismiques et niveau de bruit ambiant).
- La détection des mortiers 84 mm n'est pas faisable dans le secteur d'étude (Impact Liri) avec la configuration de mesure utilisée.

Ces résultats limitent l'intérêt de la méthode pour le secteur Liri. Les résultats indiquent par contre que la méthode pourrait être applicable sur un secteur de plus faible dimension, ou un secteur présentant un caractère géologique différent. En effet, l'atténuation des ondes sismiques dépend des caractéristiques géologiques et du type de terrain sur le site. Pour le secteur Liri, une partie importante de l'atténuation est attribuable au mort-terrain qui est hétérogène et peu consolidé à l'emplacement des capteurs sismiques. Une piste de solution pourrait être d'enfouir les capteurs sismiques à une profondeur où ils attendraient le roc.

Le projet a également mis en lumière les limites de l'équipement utilisé. Les systèmes d'acquisition sismique ont subi plusieurs défaillances et nécessitent une maintenance assez serrée. Le choix de l'équipementier apparaît être un point crucial pour le succès de la méthode.

## 2. Executive summary

---

This final report presents the results obtained as of March 2016 for the project “Étude de détection sismique et acoustique pour la discrimination des ordres de réaction de détonation”. Following the results obtained in July 2015, a fourth seismic station was installed near the Liri impact zone to improve the accuracy of impact location. Moreover, two firing tests with duds were done to evaluate the levels of detectability, the first at the end of July and the second at the end of November 2015. During the first test, nine 105 mm shell, including three duds, were fired. The second test spanned two days and included 155 mm and 105 mm shells as well as 84 mm mortar shells. A number of conclusions can be drawn from these tests:

- 155 mm duds can be detected and located with a high level of confidence with the system deployed around the Liri impact zone. The detected impacts were located with the algorithms developed in this project.
- Detection of 105 mm duds is limited (signal-to-noise ration below 2 for most events) and depends on geological and weather conditions (intrinsic attenuation of seismic waves and effect of wind).
- 84 mm mortar duds could not be detected with the system deployed.

These results seriously limit the interest of the method, at least for the Liri impact zone. However, a smaller training range or a different geological setting where seismic attenuation is lower could be more favorable. In the Liri area, the overburden appears highly heterogeneous and poorly consolidated at the location of the seismic sensors, and most of the seismic attenuation is likely attributable to the overburden. A potential solution could be to bury the sensors down to the bedrock.

This project also highlighted the limits of the seismic data acquisition system used in the project. A number of system faults occurred in the course of the project, which resulted in data loss. The choice of equipment should be driven in large part by reliability to ensure the success of the method.

## 3. Introduction

---

### 3.1 Contexte

La présence de munitions non explosées (*unexploded ordnance*, ou UXO) sur les champs de tir entraîne une multitude de risques pour le corps militaire, l'environnement et pour la population dans le cas éventuel d'une désaffectation des secteurs d'entraînement. Les munitions non explosées sont typiquement des obus ou des projectiles n'ayant pas détonné ou n'ayant pas détonné complètement lors de l'impact. Il existe un besoin pour une méthode permettant de détecter et de localiser les UXO en temps réel, de façon à en permettre un retrait rapide et sécuritaire. Le monitoring microsismique a connu un essor important au cours des cinq dernières années, depuis son introduction comme outil de surveillance des réservoirs pétroliers et de la fracturation hydraulique. Les modèles théoriques et les outils utilisés pour traiter et interpréter les mesures microsismiques ont été développés en très grande partie par les sismologues pour l'étude des tremblements de terre, et ces modèles et outils ont dû être adaptés aux nouvelles applications principalement en raison des différences d'échelle. L'emploi d'une technique de monitoring des UXO basée sur l'écoute microsismique présente plusieurs attraits, mais demande à ce que les modèles et outils existants soient adaptés au problème. Il est à noter qu'à la fin des années 2000, le département américain de la défense a initié un programme de recherche en ce sens (Anderson et Weale, 2006; VanDeMark *et coll.*, 2009; VanDeMark *et coll.*, 2010).

### 3.2 Tâches

Le ministère de la défense nationale du Canada est intéressé à développer un tel outil de monitoring microsismique pour ses besoins. Suite aux tâches AT 23 et AT 26 demandées à l'INRS qui ont permis de montrer que théoriquement l'approche est valable, mais que la performance de la méthode est fonction du site étudié (Giroux *et coll.*, 2012; Giroux *et coll.*, 2013), une 3<sup>e</sup> tâche a été demandée pour poursuivre les travaux de caractérisation des conditions propres au site de l'impact Liri et évaluer la faisabilité à ce site. En juin 2015, cette tâche a été prolongée jusqu'au 31 mars 2016. En particulier, les activités demandées sont :

1. Procéder à l'acquisition du matériel requis (tel que fils de raccordement, gaines pour les fils, attaches et batteries), pour la finalisation de l'installation des unités d'enregistrement acoustique et sismique pour réaliser les tâches 2 à 8 afin d'optimiser la discrimination des ordres de réaction de détonation.
2. Procéder à l'installation, à l'intégration et à la calibration finale des équipements sur le secteur impact Liri. Compléter la mise en fonction de système de transfert de données par radios sur les tours de transmission, possiblement via relais internet.
3. Effectuer des visites terrain pour superviser l'installation du matériel et des visites terrain régulières de vérification de la bonne marche des instruments. De six à douze visites de terrain sont prévues.
4. Poursuivre l'enregistrement du bruit de fond pour avoir les signatures de bruit de fond annuel.

5. Procéder à un essai contrôlé avec obus inertes.
  - a. Assister aux tirs.
  - b. Recueillir les données.
  - c. Analyser les données.
6. Procéder à un essai contrôlé avec détonation de charges explosives de calibres connus en surface du sol.
  - a. Assister aux détonations.
  - b. Obtenir l'heure et les coordonnées GPS précises des détonations.
  - c. Recueillir les données.
  - d. Analyser les données.
7. Effectuer des mesures pendant deux exercices de tir réguliers
  - a. Assister aux tirs (1 à 2 jours par exercice).
  - b. Recueillir les données.
  - c. Analyser les données
8. Identifier un algorithme qui permettra la localisation des événements.
  - a. Effectuer un inventaire des logiciels disponibles.
  - b. Suivre la littérature relative à ce sujet.
  - c. Développer un algorithme de détection automatique
  - d. Localiser les événements avec la plus grande précision possible et finaliser l'algorithme de localisation.
9. Procéder à l'achat de matériel d'entretien des stations (batteries, boîtes de protection pour les instruments et autre matériel requis pour l'entretien normal des stations) et à l'achat d'une station paladin supplémentaire incluant des capteurs uni-axiaux et tri-axiaux.
10. Installer cette unité paladin supplémentaire dans la zone de triangulation actuelle de l'impact Liri selon les disponibilités du site. Cette unité permettra l'augmentation de la précision des données et permettra aussi d'assurer la pérennité du système en cas de bris d'une des trois stations existantes.
11. Finaliser l'intégration des capteurs acoustiques.
12. Procéder aux calculs de vitesse de propagation des ondes sismiques dans la formation géologique.
13. Procéder à deux essais supplémentaires de tirs comportant des obus inertes et live en tir seul et en tirs groupés.
14. À partir des données de ces tests, confirmer et tester l'algorithme de détection automatique utilisant le signal sismique et le signal acoustique
15. Confirmer l'algorithme qui permettra la localisation des événements et rédiger les recommandations finales pour l'utilisation de la technologie par le MDN.

Les activités 9 à 15 ont été ajoutées suite à la prolongation en juin 2015. Ce rapport consigne les travaux réalisés en date du 31 mars 2016 dans le cadre de ce mandat.

## 4. Travaux effectués

---

### 4.1 Recensement des visites de terrain

Conformément à l'AT-41, ce rapport détaille les visites de terrain réalisées durant la période couverte par l'AT. Les activités sur le terrain sont les suivantes :

Date	Personnel INRS	Activité
7 juillet 2014	B. Giroux	Maintenance des stations
21 et 22 août 2014	B. Giroux, I. Bakari, L. Perozzi	Installation des tours radios, déplacement de la station 1, installation des sonomètres
26, 27, 28 et 29 août 2014	B. Giroux, I. Bakari, L. Perozzi	Installation des tours radios, déplacement de la station 1, installation des sonomètres
25 septembre 2014	B. Giroux, I. Bakari	Essai 1 – tirs de calibration
31 octobre 2014	B. Giroux	Orientation des radios par les <i>linemen</i>
2 décembre 2014	B. Giroux, I. Bakari	Essai des radios
30 janvier 2015	B. Giroux, I. Bakari	Maintenance des stations
7 mai 2015	B. Giroux, I. Bakari	Essai des radios avec M. Beaumont, reconnaissance – tirs de calibration 2
13 et 14 mai 2015	B. Giroux, I. Bakari	Essai 2 – tirs de calibration
15 mai 2015	B. Giroux	Positionnement DGPS des stations
17 juillet 2015	B. Giroux, I. Bakari	Mise en marche et maintenance des stations
6 août 2015	B. Giroux, I. Bakari	Récupération des données
22-23 septembre 2015	B. Giroux, L. Perozzi	Installation des supports à panneaux solaires
12 novembre 2015	B. Giroux	Installation de la station 4
25 novembre 2015	B. Giroux, I. Bakari	Tirs 105 et 155 mm
28 novembre 2015	B. Giroux	Tirs 84 mm
14 au 16 décembre 2015	B. Giroux, I. Bakari	Maintenance des stations

### 4.2 Installation des tours de communication

Cette section répond aux tâches 1, 2 et 3 de l'AT.

Le matériel requis pour l'installation des radios a été acheté et les antennes radio ont été fixées sur des mâts de bois de 75' (Figure 1). Ces travaux ont eu lieu entre le 22 et le 29 Aout 2014. Il était prévu initialement que l'installation des antennes soit faite une fois les mâts érigés, en utilisant une nacelle pour accéder à l'extrémité des mâts. Cependant, les antennes ont dû être installées avant l'érection des mâts, ce qui fait que l'orientation des antennes n'a pu être qu'approximative. Par ailleurs, la position initiale de la station relais (prévue au point d'observation) a été modifiée car l'accès était impraticable pour la grue. L'emplacement final de la station relais est indiqué à la Figure 2. La Station 1 a également été déplacée pour contourner un accident topographique et assurer la visibilité avec la station relais.



**Figure 1 – Installation des radios.**

Une fois les tours montées, les premiers essais de communication n'ont pas été concluants. En effet, les antennes radios des stations 1 et 3 ne parvenaient pas à communiquer avec la station relais, et le signal était intermittent entre la station 2 et la station relais. Après consultation avec le fabricant des antennes (Tranzeo), la mauvaise performance a été attribuée à une mauvaise orientation. Il a été convenu de faire appel à des *linemen* pour orienter les antennes correctement, ce qui a pu être fait le 31 octobre 2014. La performance de l'équipement s'est trouvée améliorée, mais le niveau de bruit ambiant demeure élevé. En effet, toutes les stations peuvent communiquer avec le relais, mais selon Tranzeo le débit n'est pas assez élevé pour assurer la communication avec les instruments de mesure.

Une nouvelle série d'essai a été effectuée le 7 mai 2015 sur le terrain avec l'aide Martin Beaumont de RDDC. Deux radios supplémentaires ont été achetées pour réaliser ces tests. Malheureusement, les conclusions sont restées les mêmes. Il a ainsi été décidé de donner un sous-contrat à la compagnie qui fabrique les radios pour qu'ils assistent l'INRS-ETE pour la calibration finale des radios.

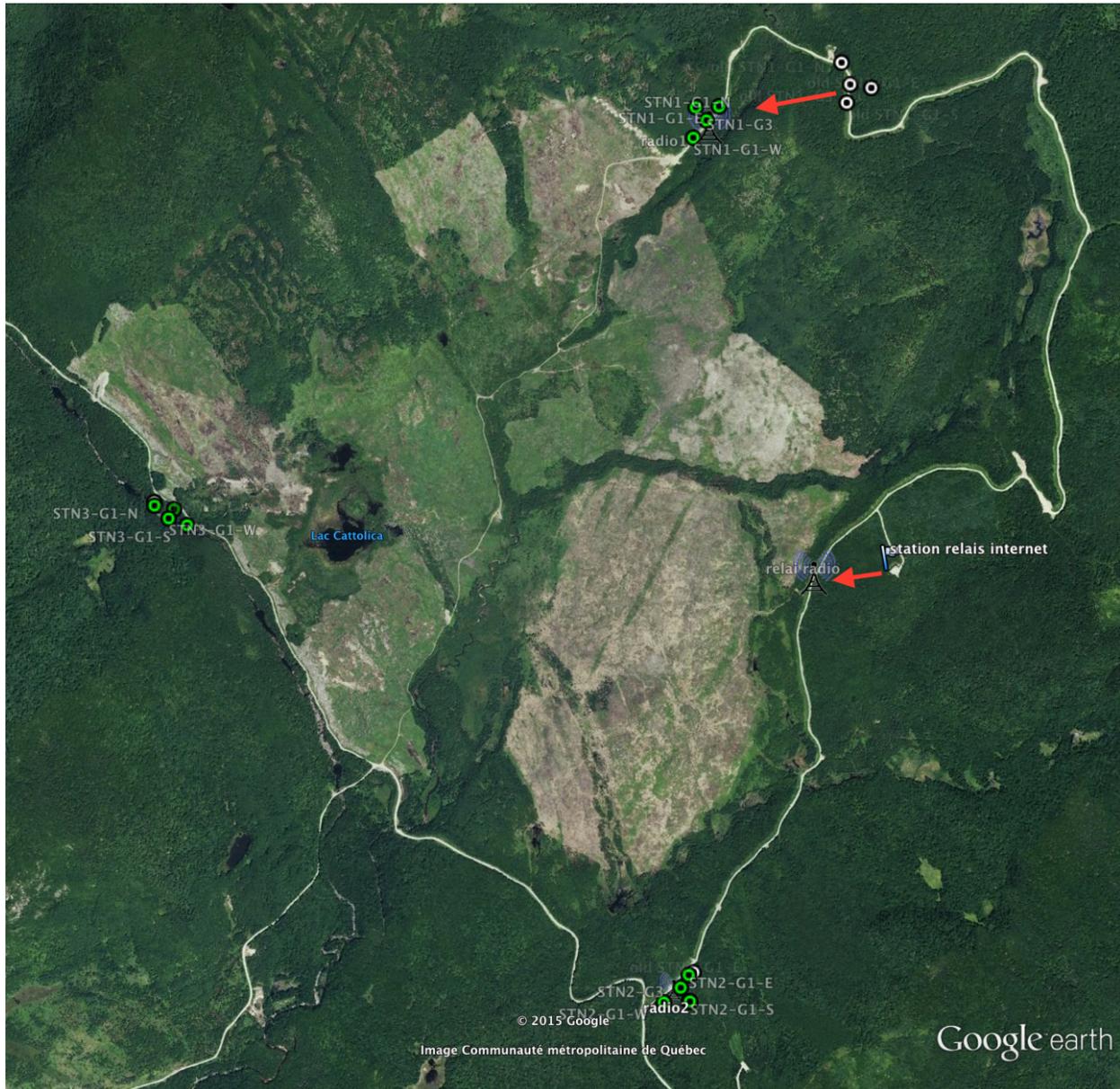


Figure 2 – Localisation des stations après mise à jour.

### 4.3 Algorithmes de détection, de pointé et de localisation

Cette section répond à la tâche 8 de l'AT.

### 4.3.1 Détection

Les algorithmes automatiques de détection des évènements microsismiques ont été examinés régulièrement par plusieurs auteurs par le passé. Cependant, certaines études méthodologiques ont été menées de façon plus détaillée par le groupe de CREWES (Munro, 2006) ainsi que par d'autres auteurs (Coppens, 1985; Chen et Stewart, 2005; Wong *et coll.*, 2009; Han, 2010; Sabbione et Velis, 2010; Akram, 2014).

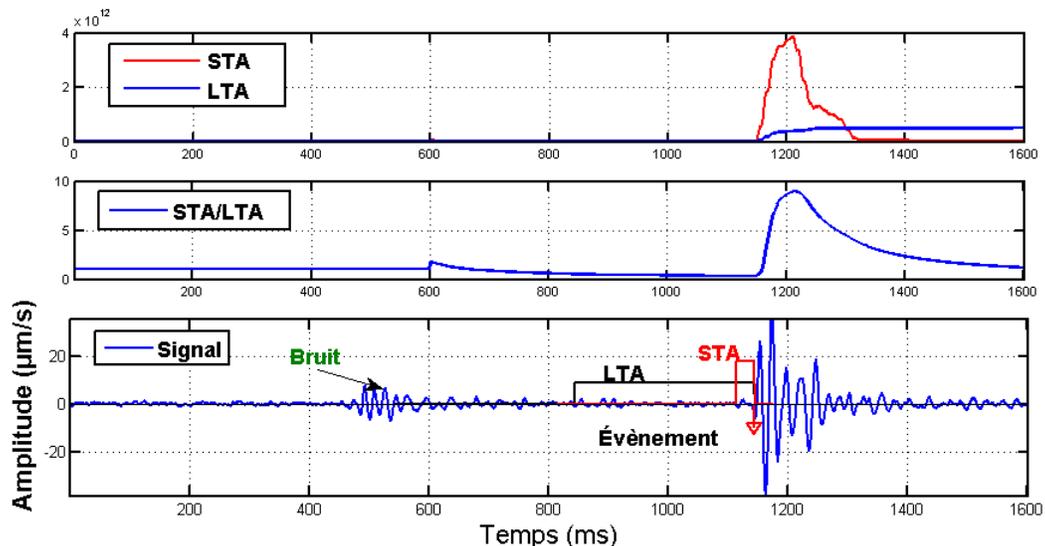
#### 4.3.1.1 Méthode STA/LTA

La méthode la plus utilisée pour la détection des évènements microsismiques consiste à balayer tout le signal enregistré par deux fenêtres temporelles, courte (STA) et longue (LTA), simultanément tout en calculant le rapport d'énergie entre les deux. Pour chaque pas d'échantillonnage on calcule ce ratio et on le compare avec une valeur prédéfinie (critère de détection) qui dépend des propriétés du signal enregistré, de la durée des évènements et de leurs amplitudes. Le choix de la longueur des fenêtres ainsi que du critère de détection exige une bonne connaissance des propriétés des évènements microsismiques visés (amplitude, fréquence, durée). Les deux fenêtres temporelles sont définies par les équations suivantes:

$$STA = \frac{1}{n_s} \sum_{i-n_s}^i CF, \quad LTA = \frac{1}{n_l} \sum_{i-n_l}^i CF$$

où  $n_s$  et  $n_l$  sont respectivement les nombres d'échantillons des fenêtres STA et LTA et  $CF$  représente la fonction caractéristique qui peut être la valeur absolue (Trnkoczy, 2002) ou l'énergie (Wong *et coll.*, 2009).

Le rapport STA/LTA dépasse le critère prédéfini lorsque l'énergie calculée dans la fenêtre courte (STA) est supérieure à l'énergie de la fenêtre longue (LTA), alors un évènement sera détecté. Généralement la fenêtre courte est sensible à l'augmentation de l'amplitude du signal (arrivée d'évènement) alors que la fenêtre longue donne une idée sur le niveau du bruit ambiant (Trnkoczy, 2002). La longueur de la fenêtre STA est choisie pour être deux à trois fois la période dominante de l'arrivée sismique, alors que la fenêtre LTA est de cinq à dix fois plus longue (Han, 2010). La Figure 3 montre un exemple de détection d'un évènement par la technique STA/LTA où la longueur de LTA est dix fois celle de STA.



**Figure 3 – Méthode STA/LTA appliquée à un signal de 1600 échantillons ( $F_s=1000$  Hz, STA=30 ms, LTA=300 ms, CR=2).**

Parmi les avantages de la technique STA /LTA on retrouve la non détection des arrivées parasites caractérisées par un signal à forte amplitude de durée plus longue qu'un évènement microsismique. Par contre dans le cas de bruit à haute amplitude mais de courte durée, la technique STA/LTA s'avère incapable de le discriminer, c'est pour cela qu'il faut choisir soigneusement les durées des fenêtres et le critère de détection. Par ailleurs, les conditions de détection peuvent être changées si le niveau de bruit ambiant change et cela permet de ne pas détecter les faux évènements.

### **Le choix de critère de détection**

Le choix d'un critère fixe optimal peut être insuffisant pour détecter correctement les évènements valides, étant donné que le rapport S/N des données microsismiques dépend de l'amplitude de la microsismicité générée, de la distance capteur-source et aussi de l'existence d'une source de bruit inconnue. Par conséquent, l'utilisation d'un seuil fixe peut entraîner des détections de « faux » évènements (Akram, 2014). Parmi les inconvénients d'un critère de détection fixe on note la non détection des évènements dont le rapport S/N est faible car le rapport d'énergie calculé de ces évènements est inférieur au critère de détection. Pour s'affranchir de ce problème, un critère de détection dynamique qui tient en compte les propriétés instantanées du signal est souhaitable. Xiantai *et coll.* (2011) et ont proposé un critère de détection dynamique basé sur le niveau du bruit ambiant et le rapport S/N de la phase détectée.

Selon la méthode proposée, une courbe d'évaluation ou de référence du niveau de bruit doit être calculée, et modulée par la grandeur du seuil en question. Les étapes de calcul de la courbe du critère de détection sont :

- Calculer le spectrogramme du signal (Figure 4(b)).
- Faire une sommation le long de l'axe des temps pour obtenir une courbe de l'amplitude en fonction des fréquences (Courbe rouge de la Figure 4(b)).
- Déterminer le pic de fréquence pour chaque composante (E, W et Z du signal Figure 4(a)).
- Déterminer le profil d'amplitude qui correspond au pic pour chaque composante (Figure 5(c)).
- Appliquer une sommation des profils d'amplitude pour les composantes et appliquer un filtre de moyenne mobile dont la fenêtre est égale au double de la période dominante du signal pour obtenir la courbe de référence (Figure 5(d)).

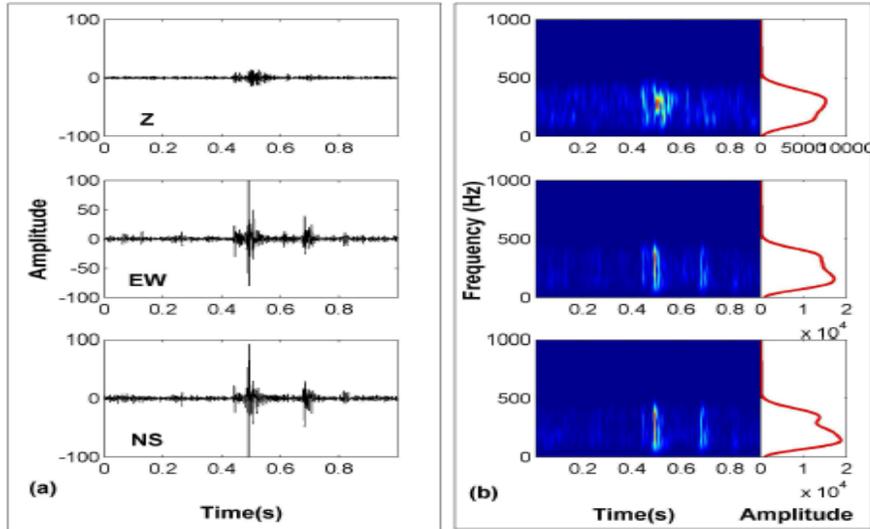


Figure 4 – Processus de détection d'évènement en utilisant les critères de seuil dynamique. (a) trace à trois composantes. (b) Les spectrogrammes et leurs spectres de fréquence-amplitude (courbes rouges) (tiré de Akram 2014).

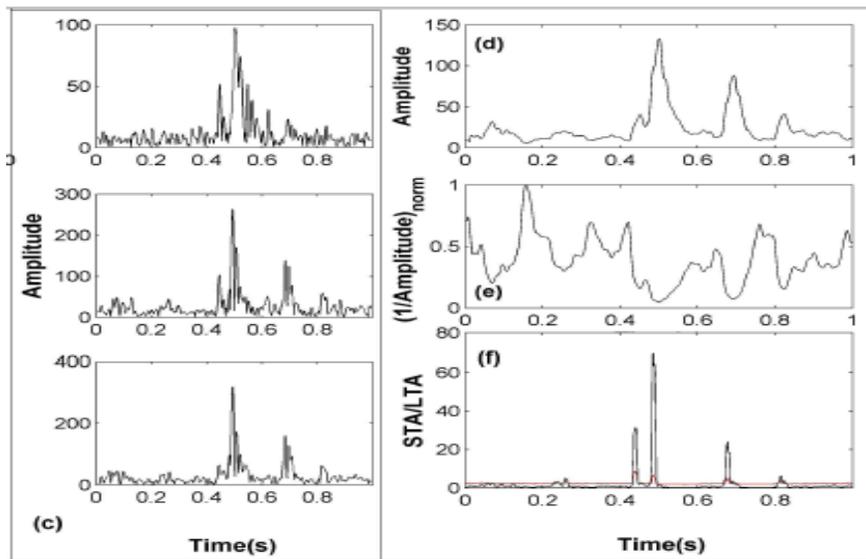


Figure 5 – c) Profils d'amplitude des pics de fréquences. (d) Sommation et lissage de la courbe (c). (e) la fonction de référence S. (f) les résultats de détection, où le STA / LTA en noir et la courbe de seuil dynamique est en rouge (tiré de Akram 2014).

#### 4.3.1.2 Méthode ATA/BTA/DTA

La technique ATA/BTA/DAT est une version modifiée de la technique STA/LTA et consiste à mesurer la moyenne du rapport signal / bruit sur une durée de temps avant (BTA), après (ATA) et après un délai plus long (DTA) d'un point de temps instantané (Chen et Stewart, 2005). Les moyennes des amplitudes absolues dans les trois fenêtres de temps BTA, ATA et DTA sont définies par les équations suivantes :

$$BTA(t) = \sum_{i=1}^m \frac{|u(t-i)|}{m}$$

$$ATA(t) = \sum_{j=1}^n \frac{|u(t+j)|}{n}$$

$$DTA(t) = \sum_{k=1}^q \frac{|u(t+k+d)|}{q}$$

$u(t)$  représente l'amplitude du signal au point  $t$ , alors que  $m$ ,  $q$  et  $n$  sont les longueurs des fenêtres ATA, BTA et DTA et  $d$  est le délai temporel choisit pour DTA. Ensuite deux termes sont calculés à partir de ces 3 rapports :

$$R_2 = \frac{ATA(t)}{BTA(t)}$$

$$R_3 = \frac{DTA(t)}{BTA(t)}$$

$R_2$  et  $R_3$  sont utilisés pour discriminer entre une forte amplitude de faible durée (évènement) et une forte amplitude de longue durée (bruit). Le critère de discrimination CR est généralement estimé en mesurant la moyenne et l'écart type du rapport S/N juste dans la fenêtre BTA (Chen et Stewart, 2005) selon l'expression suivante :

$$CR(t) = E(t-p) + \alpha \sigma(t-p)$$

avec  $E$  l'enveloppe du signal,  $p$  le nombre d'échantillons décalés et  $\alpha$  le coefficient d'ajustement. Généralement  $\alpha$  prend la valeur de 3. Notons que CR est le critère de détection associé au signal alors que  $H_2$  et  $H_3$  sont respectivement les critères de détection associés à  $R_2$  et  $R_3$ .  $H_2$  et  $H_3$  sont des constantes estimées en se basant sur le niveau du rapport signal/bruit.

Si le critère de détection CR est atteint en un point  $t$ , le terme  $R_2$  permet de différencier entre un évènement à haute amplitude de longue durée et un bruit à haute amplitude de faible durée. En effet lorsqu'un évènement valide survient,  $R_2$  dépasse la valeur prédéfinie  $H_2$ . Par contre dans le cas où le bruit est à haute amplitude et de durée comparable à l'évènement,  $R_2$  perd sa capacité de distinguer entre évènement et bruit de longue durée car le critère de détection  $H_2$  est déjà atteint mais par du bruit et non pas par un évènement. Dans ce cas le terme  $R_3$  devient inférieur à  $H_3$  ce qui indique la présence de bruit à haute amplitude et à longue durée. C'est de cette manière qu'on peut se débarrasser des faux évènements causés par les hautes amplitudes de durée longue.

La Figure 6 présente le détail de la technique ATA/BTA/DTA où on observe la variation des deux courbes  $R_2$  et  $R_3$ . On remarque qu'à 430 ms  $R_2$  dépasse  $H_3$  alors que  $R_3$  est encore sous  $H_3$ .

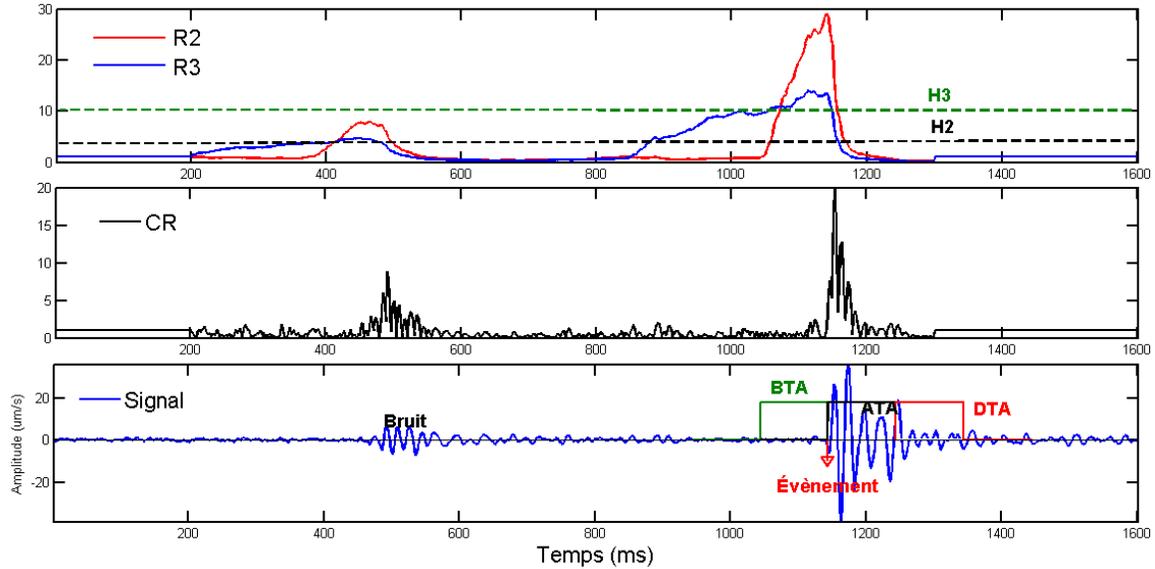


Figure 6 – Méthode ATA/BTA/DTA appliquée sur un signal de longueur 1600 échantillon (Fs=1000 Hz, BTA=ATA=DTA=50ms).

#### 4.3.1.3 Analyse vectorielle

Cette technique est largement appliquée en sismique réflexion pour réduire les effets de bruit et les ondes ascendantes et descendantes sur les profils sismiques verticaux en puits (VSP) (Freire et Ulrych, 1988) et l'analyse des horizons sismiques (Sabeti *et coll.*, 2007). Diehl et son équipe (Diehl *et coll.*, 2009) ont appliqué cette technique pour détecter les premières arrivées des ondes S. Cette approche repose sur la décomposition en valeur singulière (SVD) d'une trace sismique à 3 composantes (X, Y, Z).

Les trois traces sismiques d'un capteur triaxial [N E W] s'organisent dans une matrice  $\mathbf{M}$  de dimension  $[\mathbf{N} \times 3]$  où N est le nombre d'échantillons. Par factorisation SVD on peut écrire M sous la forme suivante :

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$$

où  $\mathbf{U}$  et  $\mathbf{V}$  sont les matrices contenant les vecteurs propres de  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{S}$  est la matrice des valeurs singulières de  $\mathbf{M}$  et  $\mathbf{T}$  désigne l'opérateur transposé. Sachant que les valeurs singulières de  $\mathbf{S}$  sont égales à la racine carrée positive des valeurs propres de la matrice de covariance  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T$ . L'idée est de calculer pour chaque fenêtre le long du signal une valeur appelée PEV qui correspond à la racine carrée de la plus grande valeur singulière de  $\mathbf{S}$ . On définit un seuil de détection pour la courbe PEV obtenue.

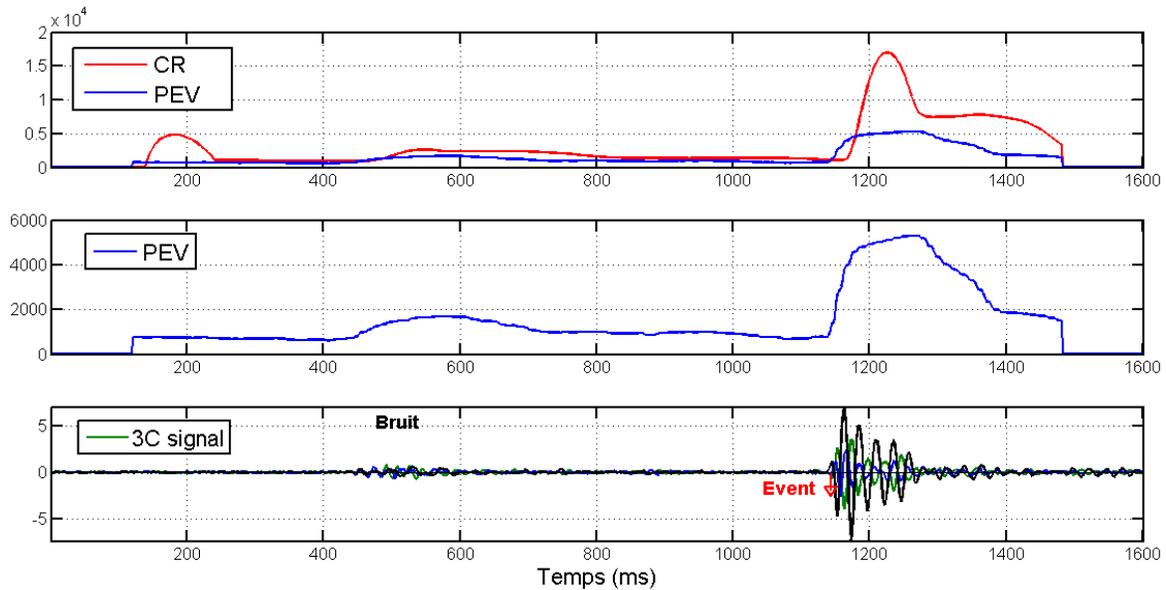


Figure 7 – Exemple d'évènement détecté par analyse vectorielle.

### 4.3.2 Pointé des temps d'arrivée

La précision du pointé des arrivées a une grande influence sur la précision de la localisation des sources. Une fois que l'évènement est détecté au sein du signal, on passe à pointer les arrivées des phases manuellement ou automatiquement à l'aide d'algorithmes de pointé. Il existe une vaste gamme d'algorithmes de pointé, allant d'un type très simple basé sur un seuil d'amplitude à ceux très sophistiqués basés sur des méthodes adaptatives (Sharma *et coll.*, 2010). Parmi les algorithmes les plus connus et appliqués dans le monitoring microsismique, on trouve les algorithmes MER, MCM et AIC.

#### 4.3.2.1 Algorithme des rapports d'énergie modifié (MER)

Cette méthode a été proposée par Han (2010) sous la forme d'une version particulière de l'algorithme STA/LTA et consiste à calculer le rapport d'énergie de deux fenêtres égales (avant et arrière). Le rapport d'énergie est :

$$ER_i = \frac{\sum_{i-L}^{i+L} u_i^2}{\sum_{i-L}^i u_i^2}$$

avec  $u$  l'amplitude du signal et  $L$  la longueur de la fenêtre temporelle. Ensuite un terme d'énergie modifié est calculé de la façon suivante :

$$er_i = (ER_i |u_i|)^3$$

Lorsque ce produit dépasse un seuil prédéfini, un temps d'arrivée est enregistré. D'après Han (2010), le produit de l'équation précédente est mis au cube pour avoir une version de convolution qui donne le maximum de sensibilité sur le signal. La largeur de la fenêtre doit être deux à trois fois la période dominante du signal. La Figure 8 montre un exemple où la largeur de la fenêtre appliquée est 30 ms.

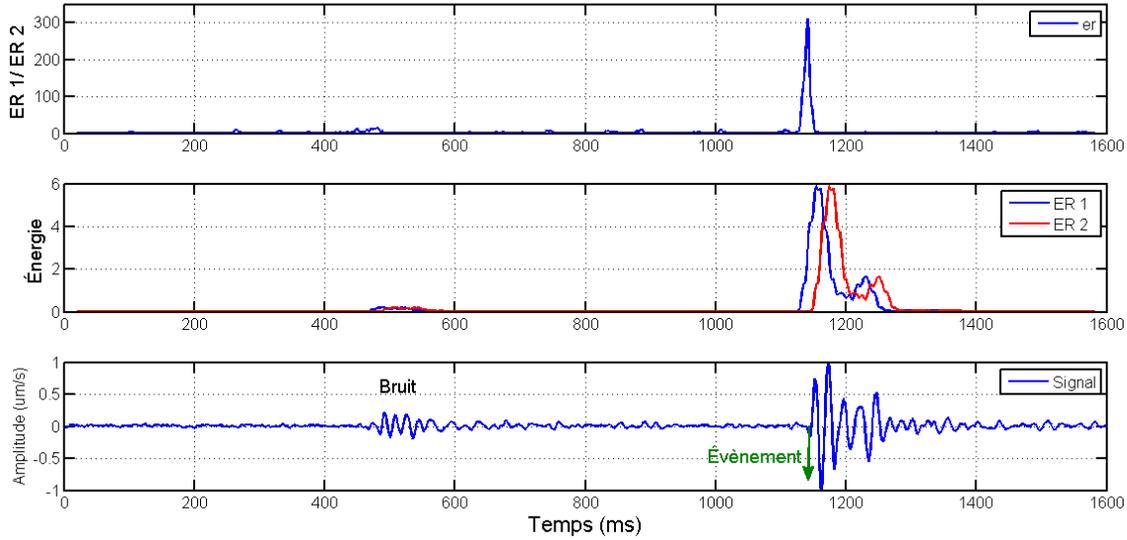


Figure 8 – Exemple d'évènement détecté avec la méthode MER.

#### 4.3.2.2 Algorithme modifié de la méthode de Coppens (MCM)

Proposée par Sabbione et Velis (2010) sous la forme d'une version modifiée de l'algorithme de détection de Coppens (1985), l'approche est basée sur les rapports d'énergie de deux fenêtres temporelles. Cette méthode diffère de la précédente par la largeur des fenêtres. Le but de la méthode est de distinguer le signal du bruit incohérent en se basant sur la différence d'énergie calculé dans les deux fenêtres (Sabbione et Velis, 2010). Le rapport d'énergie est calculé avec les termes

$$E_1(i) = \sum_{t=i-nl+1}^i u^2(t)$$

où  $nl$  est la largeur de la première fenêtre et  $u(t)$  l'amplitude du signal, et

$$E_2(i) = \sum_{t=1}^i u^2(t)$$

On remarque que la longueur de la deuxième fenêtre augmente en fonction du temps. Ensuite le rapport d'énergie est

$$MCM(i) = \frac{E_1(i)}{E_2(i) + \beta}$$

où  $\beta$  est une constante de stabilisation qui permet de réduire les fluctuations rapides des valeurs  $MCM(i)$  qui pourraient conduire à une fausse détection, surtout quand le bruit est très faible (Sabbione et Velis, 2010). La largeur  $nl$  est très critique, et Sabbione et Velis (2010) recommandent des valeurs de 0.2 pour  $\beta$  et la période dominante  $T$  du signal pour  $nl$ .

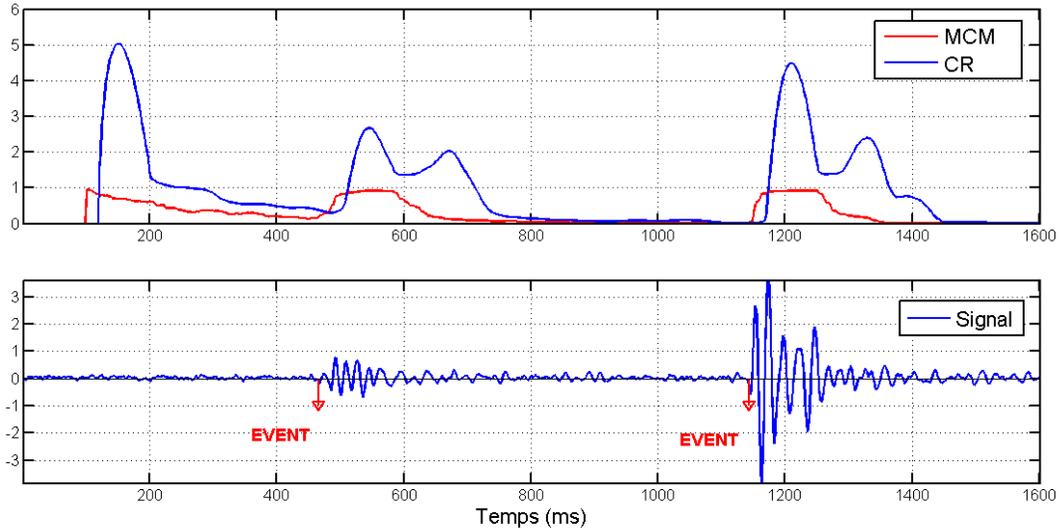


Figure 9 – Exemple d'évènement pointé par la méthode CMC ( $nt=T$ ,  $\beta=0.2$ ).

#### 4.3.2.3 Le critère d'information d'Akaike (AIC)

Cette technique mesure la qualité d'un modèle statistique, basée sur l'idée que la non stationnarité des signaux microsismiques peut être estimée en divisant une série temporelle non stationnaire en des petits segments localement stationnaires chacun modélisé comme un processus autorégressif (Leonard, 2000). Les deux intervalles avant et après le temps de l'arrivée de l'évènement sont supposés provenir de deux processus stationnaires différents (Sleeman et van Eck, 1999).

L'ordre et la valeur des coefficients du modèle autorégressif changent lorsque la caractéristique du segment en cours de sismogramme est différente du précédent. Par exemple, le bruit sismique typique est modélisé par un processus autorégressif d'ordre relativement faible, alors que les signaux microsismiques nécessitent généralement un processus autorégressif d'ordre plus élevé (Leonard et Kennett, 1999). Le critère d'information d'Akaike s'écrit sous la forme suivante :

$$AIC(k) = k \log(\text{var}(u(i, k))) + (n - k - 1) \log(\text{var}(u(k + 1, n)))$$

avec  $u$  la trace sismique,  $k$  l'indice de l'échantillon et  $n$  le nombre d'échantillons.

L'AIC détecte le minimum global qui déclenche un évènement. Pour cette raison, il est nécessaire de choisir une fenêtre temporelle qui ne comprend que le segment de sismogramme d'intérêt. La Figure 10 montre que cette technique a pointé trois évènements dont un seul est vrai et les autres sont soit du bruit ou un minimum local. En raison de cet inconvénient, nous proposons d'appliquer l'AIC que dans la partie du signal ou nous sommes certains qu'elle correspond à un évènement (généralement détecté par d'autres techniques)

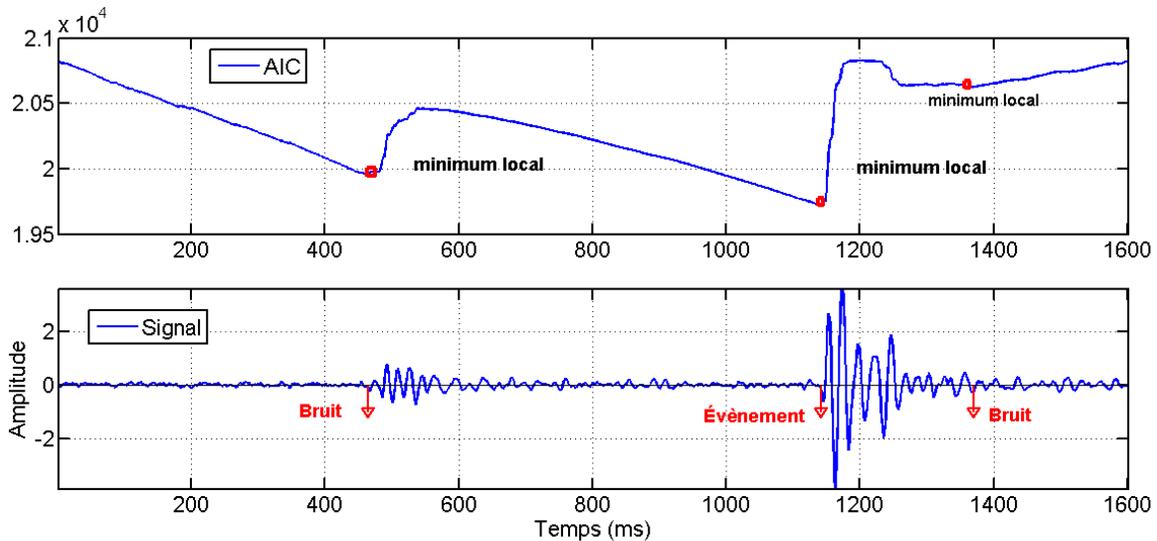


Figure 10 – Exemple d'évènement pointé par la méthode AIC.

#### 4.3.2.4 Choix d'une méthode efficace de détection et de pointé

Afin de réduire l'erreur de détection des temps d'arrivées il est important de choisir convenablement la méthode de détection. Cependant, le choix dépend fortement des propriétés du signal recueilli. Nous avons choisi de tester toutes les méthodes citées précédemment sur une partie de notre signal dont le niveau de bruit ambiant varie d'un capteur à un autre, tout comme les amplitudes des évènements.

La Figure 11 montre six évènements qui ont été détectés et pointés manuellement et par les méthodes automatiques. *Seules les méthodes MER et ATA-BTA ont détecté correctement ces six évènements.* Les autres méthodes ont soit raté un évènement, soit ajouté des faux évènements. Le pointé par la méthode MER est assuré par la technique AIC tandis que les autres selon le critère de détection associées, c'est-à-dire quand le rapport des énergies de chaque méthode dépasse le seuil CR associé. On constate que la méthode MER est la plus robuste parmi toutes les méthodes citées : une meilleure précision est atteinte d'une part, et elle est efficace en temps de calcul d'autre part (voir le Tableau 1).

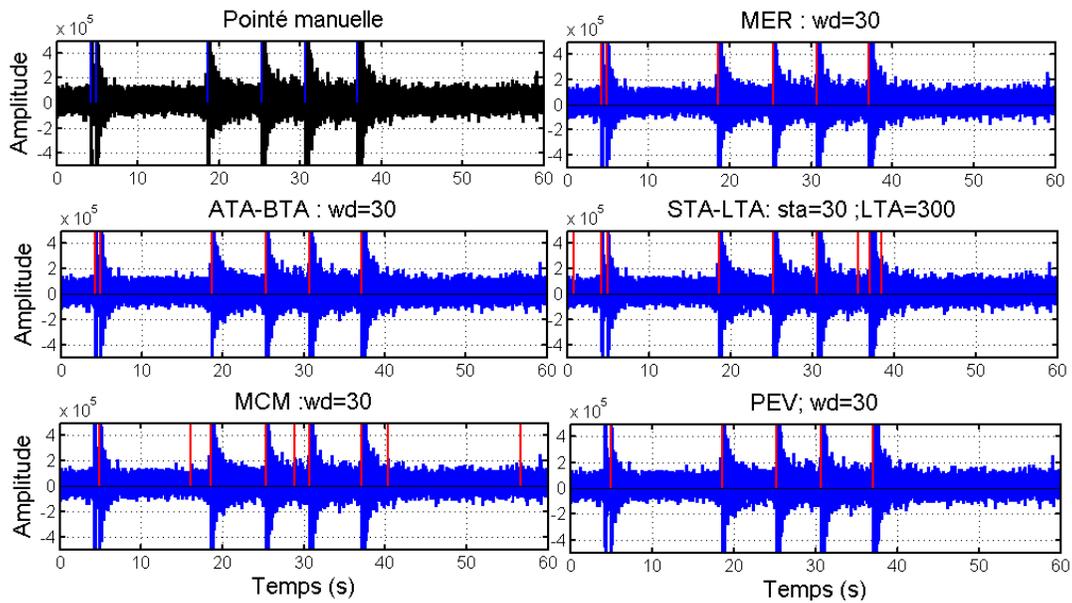


Figure 11 – Application des différentes techniques de détection sur un signal qui contient 6 évènements avec un rapport signal/bruit supérieur à 5.

Tableau 1 – Temps de calcul et erreur de détection des méthodes appliquées.

Méthode	Temps de calcul (s)	Erreur de pointé (ms)
MER	1.052	0.66
ATA/BTA/DTA	1.970	1.33
STA/LTA	1.117	13,3
MCM	10.90	2.6
PEV	8.280	4,6

### 4.3.3 Localisation

La plupart des méthodes de localisation des hypocentres des évènements microsismiques exigent les temps d'arrivées des ondes P et/ou S (Xuan et Sava, 2010). Cependant, d'autres méthodes dites de migration fonctionnent juste avec les signaux enregistrés sans les temps d'arrivées des phases, mais requièrent un modèle de vitesse. On présente dans le texte qui suit trois méthodes de localisation et une discussion sur leurs avantages et inconvénients respectifs.

#### 4.3.3.1 Inversion conjointe hypocentre-vitesse

L'inversion conjointe hypocentre-vitesse a été utilisée notamment par Pavlis et Booker (1980), (Block, 1991) et Giroux (2001). Le but de l'inversion est de minimiser par moindres carrés la différence entre les temps d'arrivées observés et les temps d'arrivée calculés à partir d'un modèle de vitesse initial. Le problème est non linéaire car la localisation des hypocentres dépend du modèle de vitesse, et vice versa. On peut procéder en linéarisant le problème, et l'idée est alors de changer itérativement les paramètres du modèle de vitesse et les

hypocentres de départ pour que les nouveaux temps d'arrivée calculés soient égaux au temps d'arrivées observés aux stations.

#### **4.3.3.2 Tomographie différence double**

La tomographie différence double a été proposée par Waldhauser et Ellsworth (2000) pour localiser les hypocentres des séismes. Par la suite, cette technique a été améliorée par Zhang et Thurber (2006) dans le but de modéliser les structures interne de la terre par l'estimation du modèle de vitesse et l'imagerie des zones de subduction et les structures des volcans (Zhang et Thurber, 2006). La tomographie différence double a aussi été appliquée pour modéliser les réservoirs de stockage de CO<sub>2</sub> par la localisation des sources des évènements créés lors de l'injection et l'estimation du modèle de vitesse de la zone de stockage (Zhou *et coll.*, 2010).

#### **4.3.3.3 Localisation par migration**

La technique de semblance a été appliquée surtout pour imager la structure interne de la croûte terrestre et les volcans ainsi pour localiser les sources hydrothermales dans les zones d'activité sismique élevée (Kugaenko *et coll.*, 2005). La semblance a aussi été appliquée avec succès pour localiser les sources des évènements microsismiques (Chambers *et coll.*, 2010), localiser les sources hydrothermales et l'imagerie des micro-fractures.

Cette méthode repose sur la mesure du degré de cohérence entre les traces enregistrées à chaque géophone. Le calcul de semblance a l'avantage qu'il n'exige pas le pointé des temps d'arrivée, ce qui le rend idéal pour l'analyse de grands ensembles de données à faible rapport signal sur bruit. Cependant, cette technique exige la connaissance a priori du modèle de vitesse pour calculer le temps de trajet depuis la source vers le capteur.

#### **4.3.3.4 Choix d'une méthode de localisation**

Parmi les algorithmes de localisation présentés plus haut, seule l'approche par inversion conjointe semble adaptée à notre problème car elle permet de travailler avec un seul type d'arrivée et d'ajuster le modèle de vitesse tout en tenant compte facilement de la topographie. À l'inverse, l'approche de tomographie différence double fonctionne avec des différences doubles entre les temps d'arrivées aux capteurs, ce qui nécessite un nombre important de capteur ainsi qu'une distance restreinte entre les hypocentres pour maintenir une différence acceptable pour résoudre le système des doublets. Toutefois, ce n'est pas évident que ces caractéristiques soient atteignables pour notre cas. Dans le cas de la migration, la robustesse de la méthode en fonction d'erreurs dans le modèle de vitesse devrait être étudiée. Il n'apparaît pas évident au départ que le modèle de vitesse obtenu par les tirs de calibration suffise, bien que cet aspect mérite d'être étudié.

Compte tenu du fait qu'il était initialement prévu d'utiliser les ondes de surface pour ce projet (voir §4.4.1.1 pour plus d'information à ce sujet), l'inversion conjointe a été retenue et un programme d'inversion a été développé (maitrise d'Issam Bakari). Ce programme peut assez aisément être modifié pour travailler avec l'onde P plutôt que l'onde de surface.

## **4.4 Calibration du modèle de vitesse**

Cette section répond aux tâches 4, 6 et 12 de l'AT.

#### 4.4.1 Tirs de calibration du 25 septembre 2014

Un essai contrôlé de tirs de calibration a été fait le 25 septembre 2014 pour voir la possibilité d'identifier la nature des phases détectées et pour estimer le modèle de vitesse dans le secteur d'étude. Lors de cet essai, huit détonations dispersées sur le site ont été déclenchées dans le champ de tir et à différents moments entre 10h et 15h (Figure 12 et Tableau 2). Pour chaque détonation, deux blocs de C4 posés en surface ont été utilisés. Les heures de détonation nous ont été fournies par l'adjudant Proulx du 5<sup>e</sup> RGC.

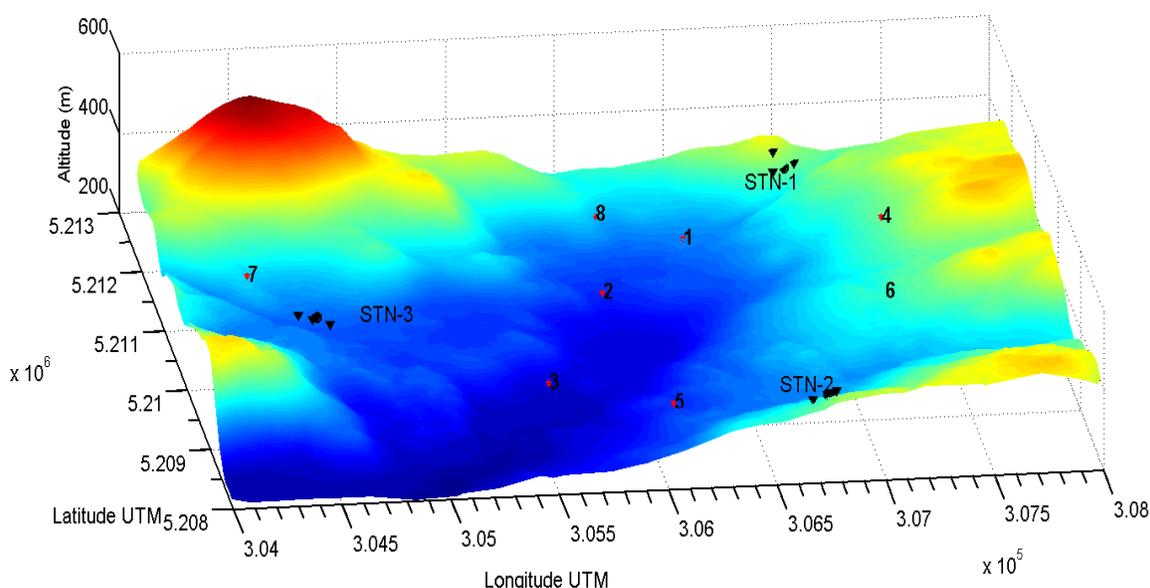


Figure 12 – Position des tirs de calibration (étoiles rouges de 1 à 8 ordonnées selon l'heure de tir).

Tableau 2 : Coordonnées des tirs de calibration (25 septembre 2014)

Tir #	Longitude UTM	Latitude UTM	Heure
1	306478	5211510	10 :47 :33
2	306014	5210904	10 :47 :46
3	305626	5209662	10 :47 :53
4	307332	5211164	13 :10 :09
5	306136	5208946	13 :45 :23
6	307292	5210046	13 :45 :45
7	304364	5210992	14 :03 :38
8	306018	5211812	14 :50 :44

#### 4.4.1.1 Analyse des données des tirs de calibration

Malheureusement lors de cet essai, les temps d'émission n'ont pu être mesurés avec une précision suffisante pour évaluer la vitesse dans le milieu (certaines arrivées sont plus précoces que l'heure fournie par l'adjudant Proulx). Les enregistrements nous ont quand même permis de faire des observations intéressantes.

Avant d'entamer la partie relocalisation des points d'impact des UXO dans le champ de tir, on doit premièrement analyser le signal enregistré et classer les types d'arrivées observées (arrivées d'ondes sismiques (P, S et R), onde acoustique et arrivées parasites). Une première évaluation des données enregistrées dans le domaine temporel montre *qu'une phase de forte amplitude, créée au moment de l'explosion, est généralement bien observable et détectée par tous les capteurs.* (Seul l'évènement 7, très proche de la station STN-3 (500 m de distance), n'est pas détecté à cette station en raison d'un problème non déterminé avec l'instrument au moment de l'explosion - l'instrument n'a rien enregistré pendant environ 5 minutes). Au moment de l'essai, les stations acoustiques étaient installées mais les seuils de détection des sonomètres n'étaient pas calibrés et le signal acoustique n'a pas été enregistré. La classification des arrivées se base alors uniquement sur les enregistrements sismiques. Au moment de l'explosion d'une charge à la surface du sol deux types d'onde se génèrent, l'onde sonore (explosion) et l'onde sismique (micro-secousse terrestre). La vitesse de l'onde sonore est constante dans l'air (fonction de la température), par contre la vitesse de l'onde sismique dépend des propriétés du terrain traversé. En cas d'explosion d'une charge à la surface du sol, l'onde sonore est beaucoup plus énergétique que l'onde sismique car d'une part une fraction important de l'énergie est émise dans l'air, et d'autre part l'atténuation de la phase sismique est beaucoup plus forte. Ceci explique la présence des ondes acoustiques dans tous les séismogrammes enregistrés (comme le montre la Figure 13), alors que par contre l'onde sismique n'est détectée qu'à l'intérieur d'une distance précise. Cet état de fait *confirme l'importance d'utiliser les stations acoustiques pour faciliter l'identification des différentes phases sismiques.*

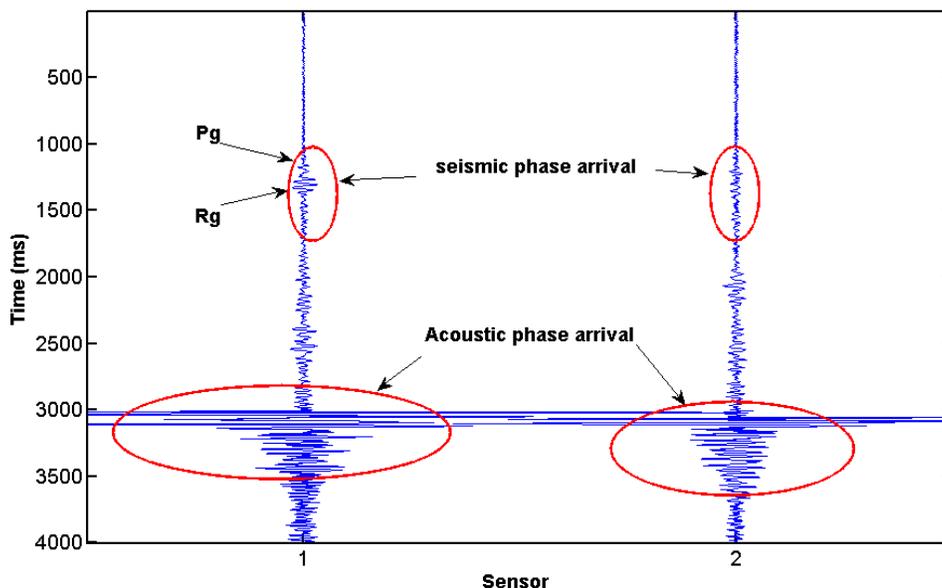
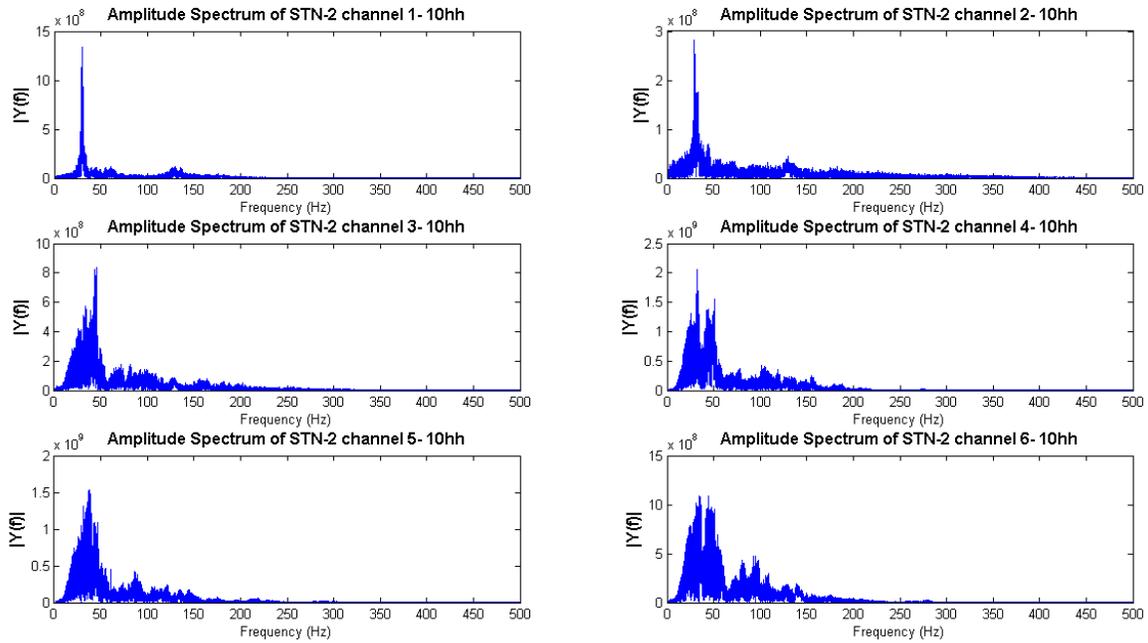
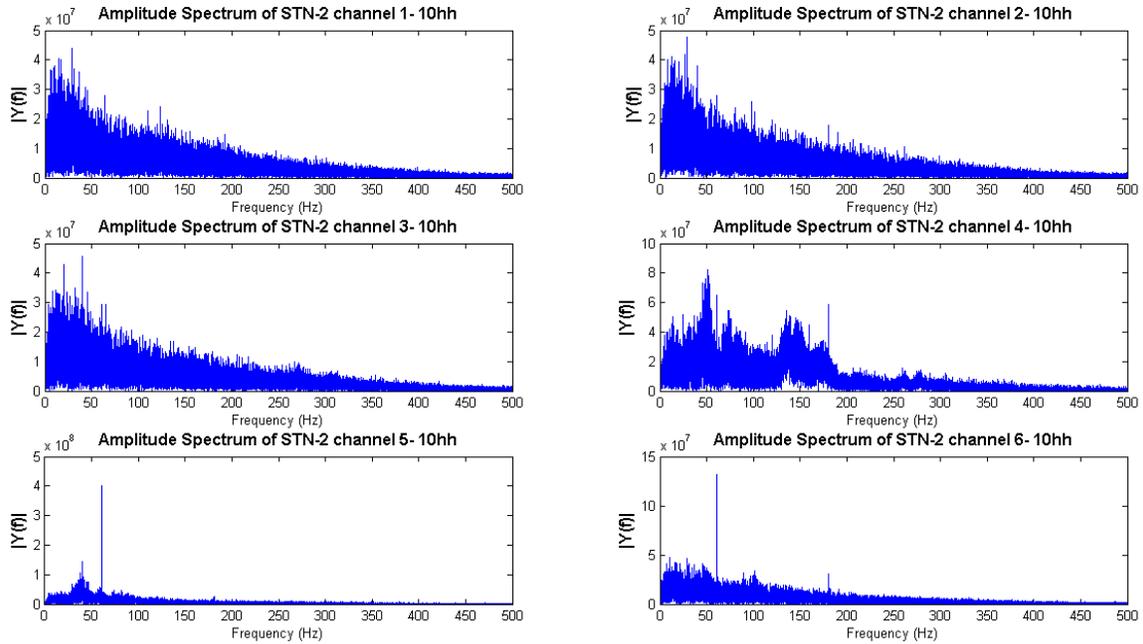


Figure 13 – Sismogrammes d'un tir de calibration (2 blocs de C4) montrant les arrivées sismiques et acoustiques.

Les figures qui suivent illustrent les spectres d'amplitudes des signaux recueillis à la station STN-2 avant et durant les tirs de calibration (3 premiers tirs). On peut constater que *les évènements observés ont une gamme fréquentielle de 15 à 50 Hz* (Figure 14). En effet, sous le même niveau de bruit sismique ambiant on observe bien le pic qui correspond à la signature fréquentielle des tirs de calibration réalisés dans cette période. Parfois on observe deux pics dans le spectre durant les tirs. Cela est expliqué par la présence d'une autre source parasite dans la même gamme fréquentielle, par exemple les pics de 60 Hz ou encore des pics à l'entour de 50 Hz. D'ailleurs les spectres de bruit avant les tirs montrent ces pics parasites surtout aux capteurs 4 et 6 (Figure 15).



**Figure 14 – Spectres d'amplitude du signal enregistré aux capteurs de la station 2 durant une minute d'enregistrement (10:47). Trois tirs ont été réalisés durant cette période.**



**Figure 15 – Spectres d’amplitude du signal enregistré aux capteurs de la station 2 durant une minute avant (10:46) les tirs de calibration.**

#### 4.4.2 Tirs de calibration du 13 et 14 mai 2015

Les tirs de calibration ont été repris les 13 et 14 mai 2015 en utilisant cette fois un système de détection optique synchronisé par GPS pour déterminer le temps d’explosion des charges avec une précision meilleure que la milliseconde. Ce système, opéré par Daniel Gauthier (RDDC), était monté à bord d’un véhicule blindé Coyote et est illustré à la Figure 16. Les stations acoustiques étaient également opérationnelles au moment de l’essai.



**Figure 16 – Système de détection optique synchronisé par GPS.**

La position des charges (Figure 17 et Tableau 3) a été relevée avec un GPS différentiel, avec une précision centimétrique. Les charges utilisées lors de cet essai sont des blocs de C4 rassemblés en 4 blocs ou 12 blocs. Nous avons choisi de varier la quantité d'explosifs pour estimer sommairement le degré de détectabilité des types des phases sismiques générées au moment de la détonation.

Tableau 3 – Coordonnées des tirs de calibration (13-14 mai 2015)

Position	C4	Date	Heure	Longitude UTM	Latitude UTM
1	4	15-05-13	12:54:42,792591	305620,964	5209540,512
	12	15-05-13	13:19:23,372014		
2	4	15-05-13	14:07:07,858735	305730,996	5209849,779
3	4	15-05-13	14:52:32,263246	306027,446	5210396,634
4	4	15-05-13	15:40:22,530652	306193,506	5211008,279
	12	15-05-13	16:01:40,009969		
5	4	15-05-14	10:42:23,166390	306672,195	5210996,568
	12	15-05-14	10:54:13,883086		
6	4	15-05-14	11:49:14,608330	306458,207	5211625,291
7	4	15-05-14	12:21:12,908606	306519,777	5211873,998
	12	15-05-14	12:32:24,149404		
8	4	15-05-14	13:37:18,973005	306033,884	5210406,520
9	4	15-05-14	16:16:38,540869	304701,079	5211278,988
	12	15-05-14	16:29:50,143945		
10	4	15-05-14	17:05:22,959317	304396,337	5210982,736
	12	15-05-14	17:16:53,941038		

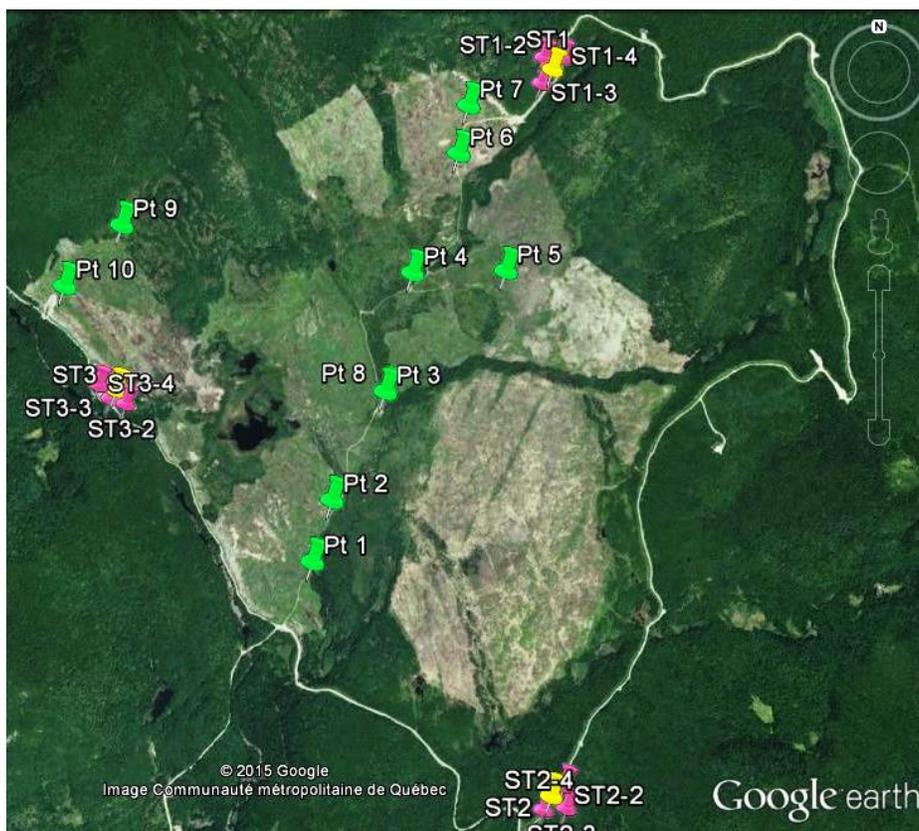
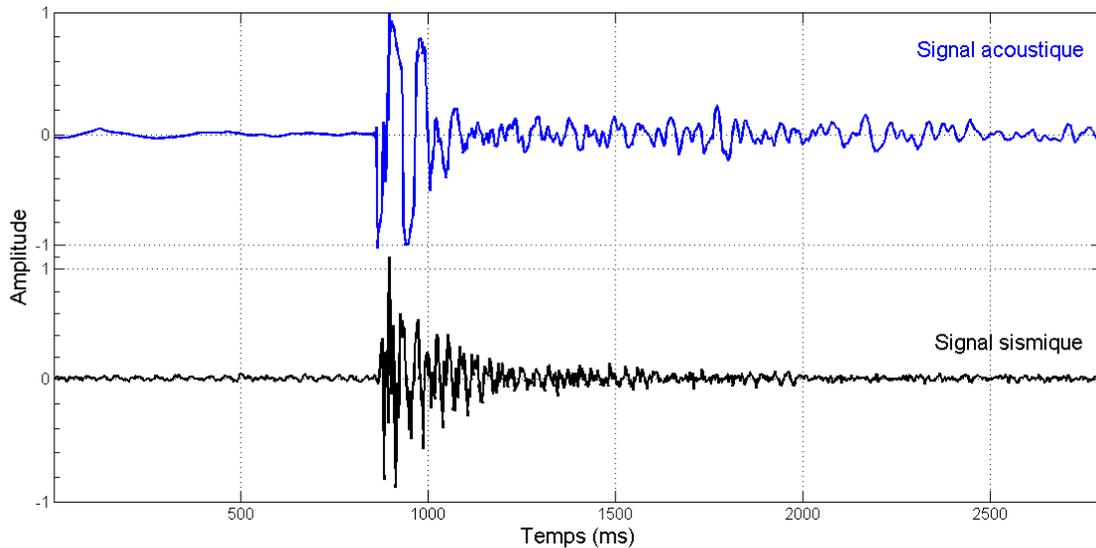


Figure 17 – Positions des points de tir (en vert) réalisés lors de l'essai de calibration de mai 2015.

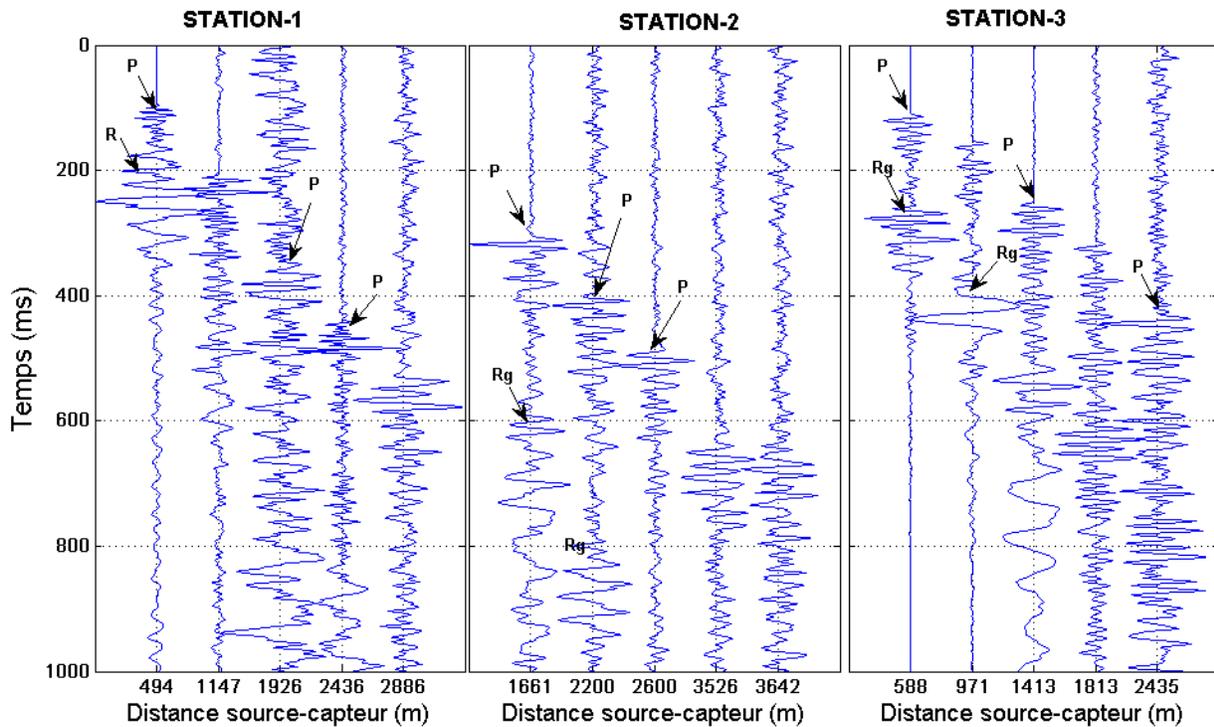
#### 4.4.2.1 Identification des phases acoustique et sismique

D'abord, les données des sonomètres valident bien la nature de la phase très énergétique observée dans le signal sismique enregistré aux géophones. En effet cette phase correspond à l'arrivée de la phase sonore des détonations. Le temps d'arrivée de cette phase au sonomètre est conforme avec celui du capteur sismique de la même station (Figure 18). Ce résultat élimine complètement les doutes sur la nature de la deuxième phase observée dans le signal sismique.



**Figure 18 – Comparaison de la phase acoustique observée dans le signal du sonomètre (bleu) et le capteur sismique (noir) de la même station.**

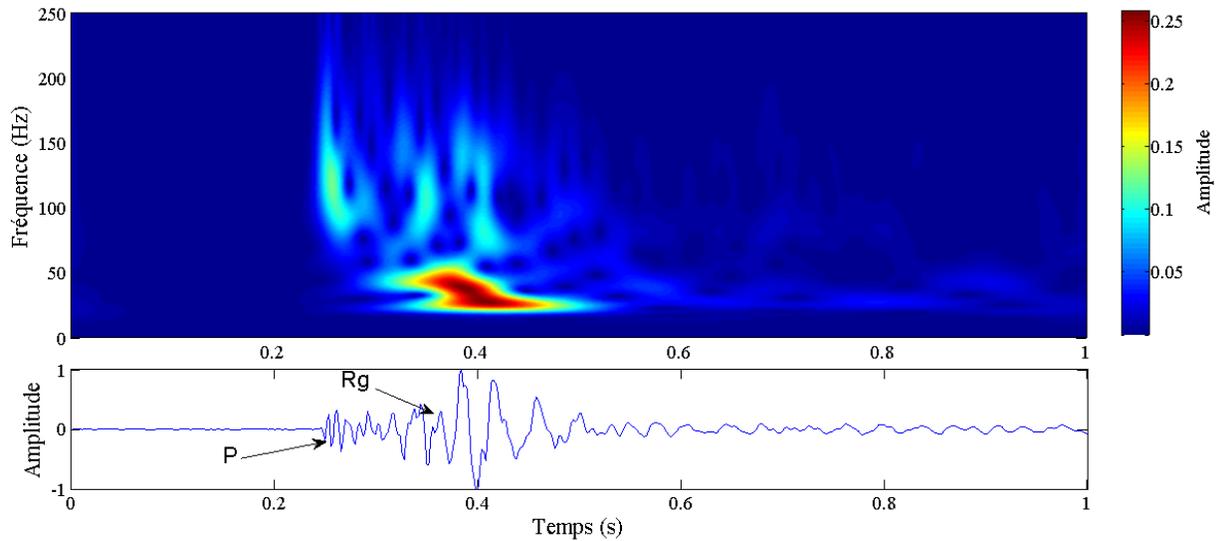
Dans notre secteur, la variation de la topographie est relativement importante (variation d'altitude et présence de petites collines ainsi qu'une épaisseur variable de la couverture végétale et un mort terrain hétérogène) alors l'effet de l'atténuation sismique risque d'être plus fort sur l'onde de surface (Lay et Wallace, 1995). L'analyse des signaux pour les tirs de calibration montre que l'onde de surface  $R_g$  s'atténue rapidement (Figure 19). La distance la plus faible (494 m) est entre le tir 7 et la station 1, et on observe bien la présence des ondes P et  $R_g$ . Par contre, à une distance supérieure à 2 km, le pointé de l'arrivée de l'onde de surface devient très difficile à cause d'un niveau élevé du bruit ambiant. L'onde de surface n'étant pas détectée par tous les capteurs, surtout dans le cas où la distance source est supérieure à 2 km, *il semble difficile de baser la méthode proposée dans ce projet sur la mesure de l'onde de surface*. En consultant le travail de VanDeMark *et coll.* (2013), on remarque que la distance source-capteur maximale rencontrée dans leur étude est de l'ordre de 1 km, soit deux fois moins que la distance à laquelle on perd l'onde de surface dans le secteur Liri. Au contraire des ondes de surface, l'onde P directe peut être identifiée pour tous les tirs. Pour la suite du projet dans le secteur Liri, *l'onde P directe sera donc utilisée au lieu de l'onde de surface*. Cependant, dans le cas d'un autre site de dimension plus faible que l'impact Liri, l'onde de surface pourrait être utilisée.



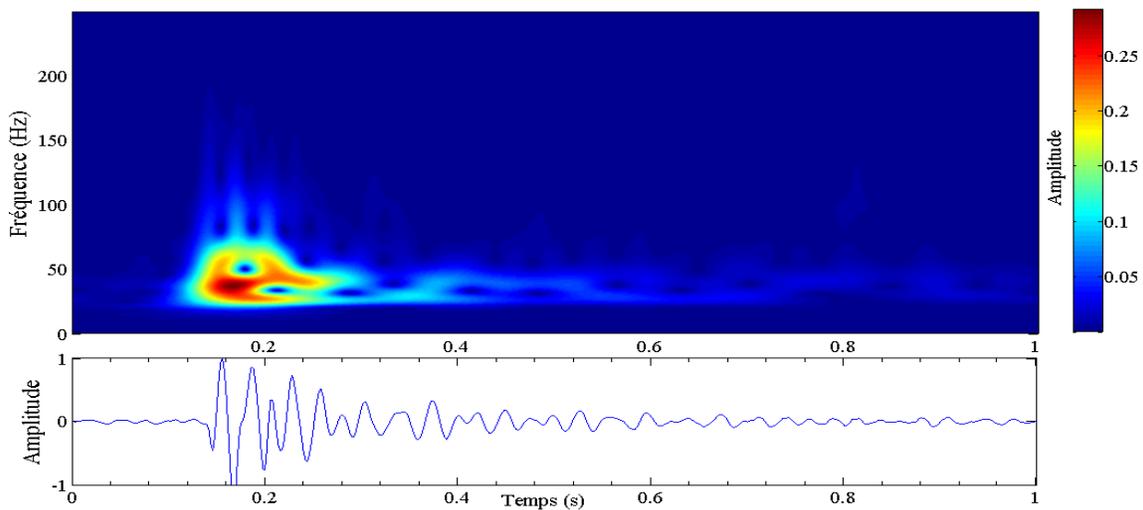
**Figure 19 – Composante verticale du capteur triaxial de chaque station pour cinq tirs différents à distance croissante.**

#### 4.4.2.2 Contenu fréquentiel

Afin de mieux caractériser le contenu fréquentiel notre signal cible, la phase sismique et la phase acoustique des signatures de détonation, nous avons appliqué une transformé de Stockwell (*S-Transform*) sur chaque phase pour observer le signal dans le domaine temps-fréquence. La distribution temps-fréquence de la phase sismique (Figure 20) montre une gamme fréquentielle de 80 à 140 Hz pour l'onde P et une gamme plus faible de 25 à 60 Hz pour l'onde de surface  $R_g$ , qui est beaucoup plus énergétique. Pour la phase acoustique, la bande de fréquence est de 30 à 70 Hz (Figure 21), ce qui recoupe la bande de l'onde de surface. Le choix d'un critère de d'identification basé sur le contenu fréquentiel devra tenir compte de ces faits.



**Figure 20 – Transformée de Stockwell de la phase sismique pour le tir de calibration #7 (12 blocs) enregistré à la station 1.**



**Figure 21 – Transformée de Stockwell de la phase acoustique pour le tir de calibration #7 (12 blocs) enregistré à la station 1.**

#### 4.4.3 Pointé des temps d'arrivée

Le pointé des ondes P a été fait manuellement pour assurer une meilleure précision. On note aussi que les capteurs STN1-3, STN1-2, STN3-2, et STN3-4 ont montré un signal contenant uniquement un bruit de faible amplitude. L'analyse des signaux mesurés au cours de l'automne montre le même comportement. Il est fort probable que ces capteurs aient pu être endommagé (infiltration d'eau, câble abimé) au cours des deux dernières années. Suite à la prolongation de l'AT, des capteurs ont été commandés pour les remplacer. Le Tableau 4 contient les temps d'arrivées relatifs de l'onde P.

**Tableau 4 – Temps relatif des arrivées de l’onde P directe (en secondes)**

<b>Tirs de calibrations</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>	<b>#5</b>
<b>Temps d'origine</b>	23,372	7,859	32,263	40,01	13,883
<b>STN1-1</b>	23,902	8,325	32,621	40,256	14,088
<b>STN1-4</b>	23,902	8,326	32,622	40,258	14,09
<b>STN2-1</b>	23,678	8,195	32,656	40,498	14,372
<b>STN2-2</b>	23,676	8,198	32,656	40,499	14,376
<b>STN2-3</b>	23,685	8,202	32,66	40,504	14,378
<b>STN2-4</b>	23,67	8,198	32,657	40,497	14,37
<b>STN3-1</b>	23,616	8,103	32,524	40,32	14,275
<b>STN3-3</b>	23,614	8,1	32,519	40,318	14,277
<b>Tirs de calibrations</b>	<b>#6</b>	<b>#7</b>	<b>#8</b>	<b>#9</b>	<b>#10</b>
<b>Temps d'origine</b>	14,608	24,149	18,973	50,144	22,959
<b>STN1-1</b>	14,754	24,232	19,33	50,581	23,468
<b>STN1-4</b>	14,758	24,234	19,332	50,583	23,47
<b>STN2-1</b>	15,215	24,778	19,371	50,8	23,596
<b>STN2-2</b>	15,22	24,78	19,375	50,804	23,602
<b>STN2-3</b>	15,22	24,78	19,376	50,805	23,601
<b>STN2-4</b>	15,216	24,778	19,372	50,8	23,597
<b>STN3-1</b>	15,016	24,578	19,238	50,303	23,056
<b>STN3-3</b>	15,014	24,581	19,236	50,301	23,057

#### **4.4.4 Estimation du modèle de vitesse**

Cette section répond à la tâche 12 de l’AT.

L’estimation du modèle de vitesse par inversion des temps d’arrivée requiert en entrée un modèle de vitesse initial. Un modèle de vitesse homogène ayant pour valeur la vitesse apparente moyenne est utilisé à cet effet. La vitesse apparente est calculée en divisant la distance entre le capteur et la source par la durée du trajet pour chaque tir de calibration. La vitesse sismique apparente de l’onde P directe varie de 5450 m/s à 5750 m/s (Figure 22) avec une moyenne de 5554 m/s.

L’algorithme d’inversion développé par Issam Bakari a été utilisé pour estimer le modèle de vitesse. Puisque le problème est non linéaire et mal posé, une contrainte de lissage (relativement faible) est appliquée pour régulariser la solution. Le modèle obtenu est illustré à la Figure 23. Le modèle de vitesse obtenu n’est pas unique car notre problème est sous-déterminé, mais c’est un modèle qui vérifie les données des tirs de calibrations d’une part et qui

est conforme avec la géologie du terrain d'autre part. En effet, on observe que la vitesse est plus élevée dans la partie Nord-ouest où affleure le roc, que dans la partie centrale où se trouve la couverture des dépôts meubles.

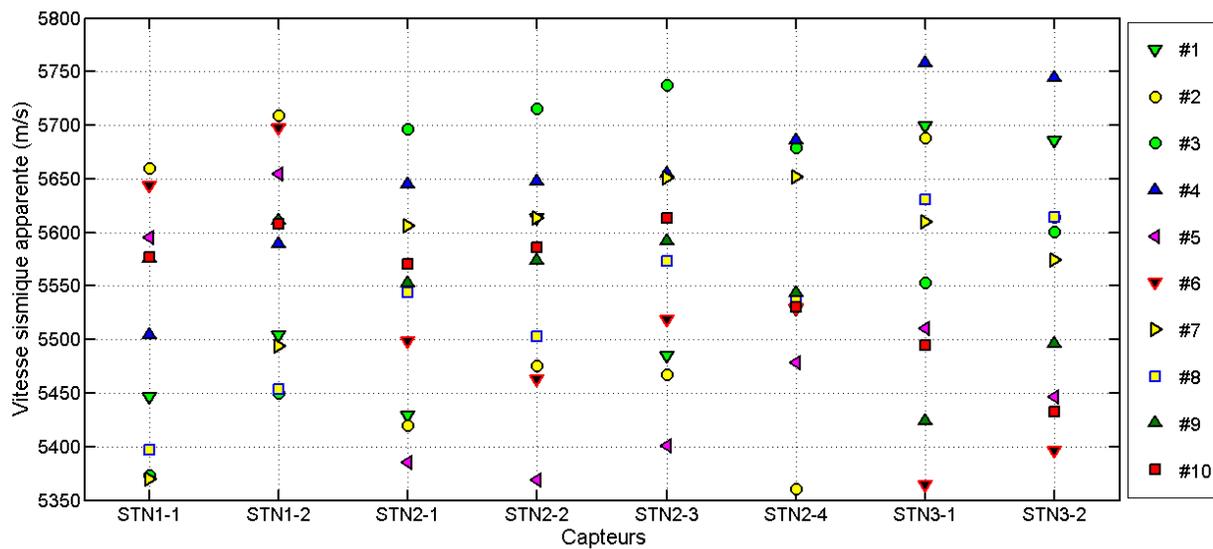


Figure 22 – Vitesse apparente de l’onde P pour les 10 tirs.

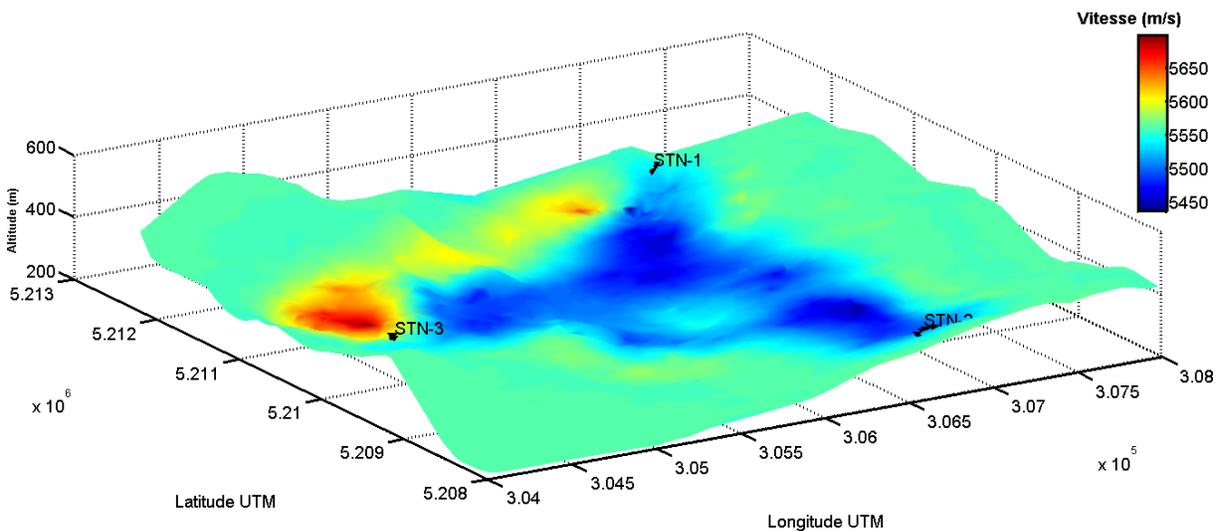


Figure 23 – Modèle de vitesse de l’onde P obtenu à partir des tirs de calibration dans le secteur de l’impact Liri

On note que la zone située à l’extérieur du champ d’impact (triangle STN1-STN2-STN3) est faiblement couverte par les rais sismiques car la plupart des tirs sont situés à l’intérieur (Figure 24). Dans ce cas on parle de problème de “faible couverture rai-station” et alors la correction sur la vitesse de départ est faible car les nœuds qui composent la grille n’ont pas été touchés par les rais sismiques. D’ailleurs on remarque que la vitesse dans ces zones n’est que très légèrement modifiée par rapport à la moyenne.

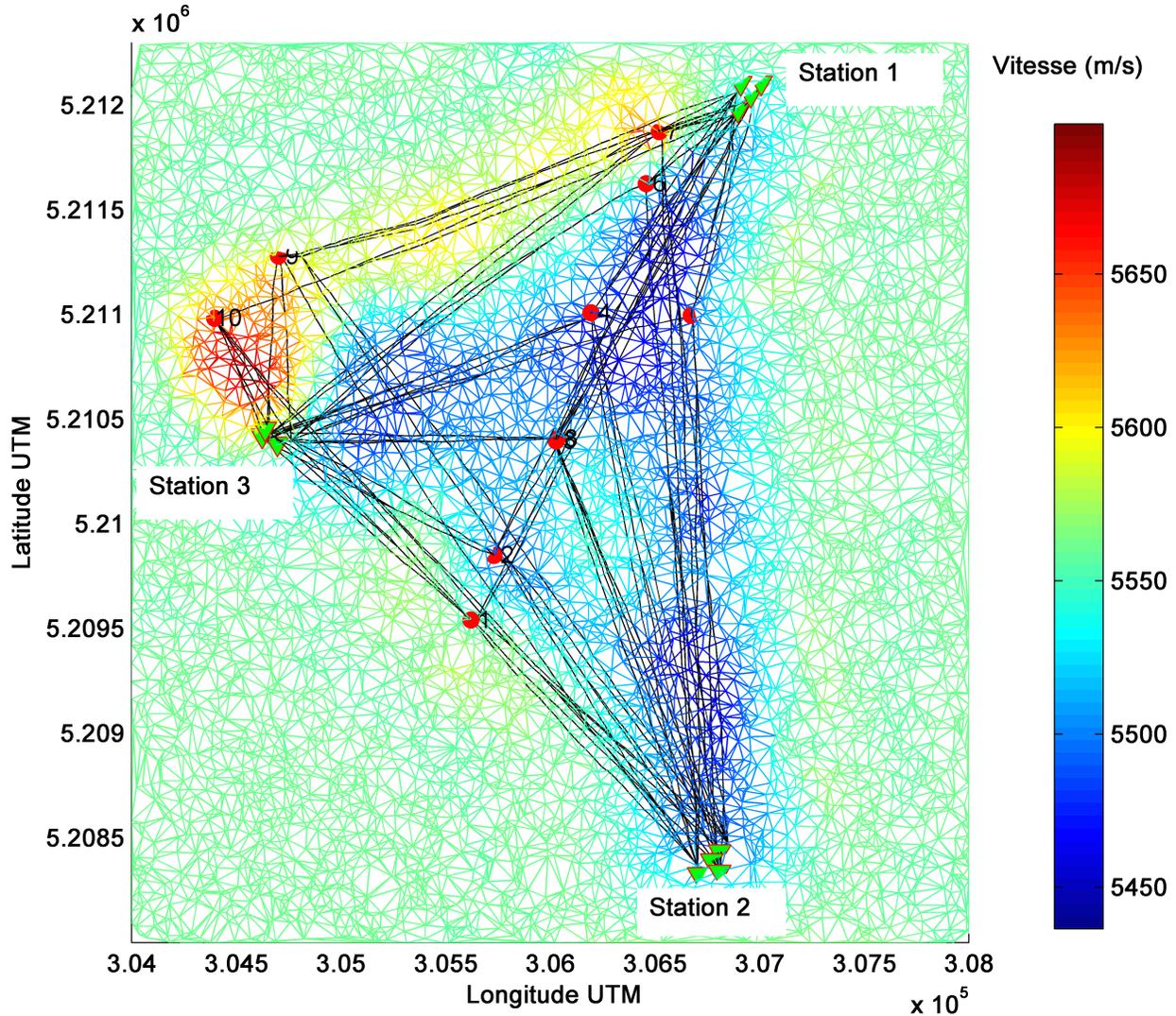


Figure 24 – Couverture des rais sismiques résultant de l’essai de calibration. Les cercles rouges sont les points de tir et les triangles verts représentent les capteurs sismiques.

#### 4.4.5 Estimation de la précision de la localisation

Les données des tirs de calibration ont été utilisées pour tester l’algorithme de localisation développé par Issam Bakari dans le cadre de sa maîtrise. On a ainsi tenté de repositionner les positions des tirs de calibration en utilisant leurs temps d’arrivée. Pour ne pas tomber dans des minimums locaux, surtout avec un modèle de vitesse hétérogène, nous avons décidé de partir avec des positions initiales calculées par l’inversion des arrivées acoustiques. Ainsi, les arrivées des phases acoustiques détectées par les capteurs ont été inversées en utilisant un modèle de vitesse constant (vitesse du son égale à 342 m/s pour une température de 20°C). La localisation montre une erreur de quelques dizaines de mètre entre les positions calculées et observées.

L’inversion des arrivées sismiques en se basant sur le modèle de vitesse estimé montre une incertitude de 9 m à 60 m avec une moyenne de 32 m sur les 10 positions. La Figure 25 montre

que le résidu RMS s'affaiblit directement après la première itération car la position est de départ (localisé par inversion des données acoustique) n'est pas loin du position réelle.

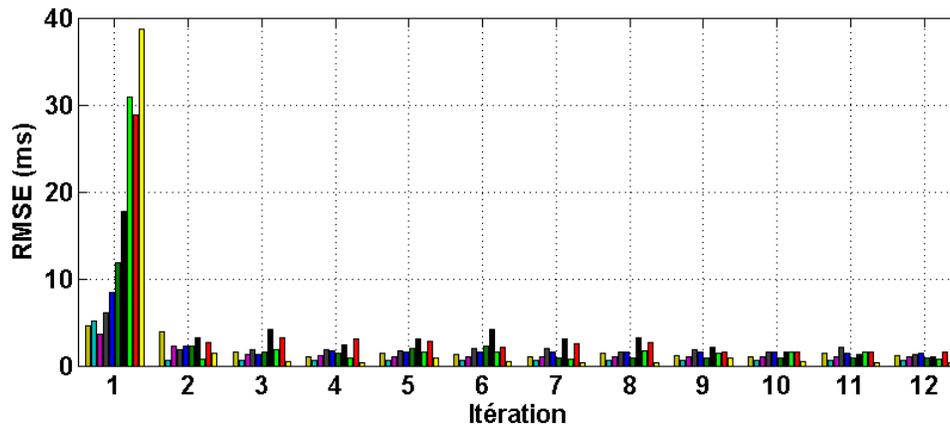


Figure 25 – Variation du résidu en fonction des itérations pour les 10 tirs de calibration.

Une incertitude de 32 m sur dix positions est très encourageante surtout si on la compare avec les résultats de VanDeMark et al (2013) qui ont obtenu une incertitude moyenne de 20 m, mais dans un terrain tabulaire moins large (superficie de moins de 1 km<sup>2</sup>) avec des multiples capteurs.

Les résultats du calcul des incertitudes sur les positions (Tableau 5) montre que la plupart des positions localisées sont situées à l'intérieur de l'ellipsoïde de confiance à l'exception des tirs #2, #4 et #6, qui sont situés complètement à l'extérieur. L'incertitude temporelle sur le temps d'origine des tirs de calibration varie de 0 à 14 ms avec une moyenne de 4 ms sur les 10 évènements. La moyenne de l'incertitude sur le temps d'origine est de 4.3 ms.

Tableau 5 – Statistiques sur la localisation des tirs de calibration

Ordre de tirs	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	
Incertitude réelle (m)	23	59	22,9	60	27	44	15	8,9	14	50	
Incertitude calculée (m)	axe majeur	38	26	27,6	25	36	27	47	32	36	87
	axe mineur	20	23	23,1	24	20	22	20	23	19	30
Incertitude sur le temps d'origine (ms)	0,3	-8,9	1,18	-1,9	-2	-14	9,9	-3	0,9	-2	

Il est important de noter que les résultats présentés dans ce rapport sont préliminaires et partiels. En effet, la précision de la localisation est fonction du nombre de capteurs entourant le secteur ainsi que du nombre de données d'entrée (i.e. le nombre de tir pour lequel un temps d'arrivée a pu être mesuré). Comme une station comportant 4 capteurs sera ajouté au système, et puisqu'un exercice de tir comporte un nombre de tir plus élevé que le nombre de tirs de calibration, il est prévu que la précision sera améliorée.

## 4.5 Achat et installation d'équipement

Cette section répond aux tâches 9, 10 et 11 de l'AT.

Comme convenu dans la prolongation de l'AT, une station supplémentaire identique aux trois stations déjà installées ainsi que quatre capteurs de remplacement ont été commandés. La commande a été effectuée par le personnel administratif de l'INRS le 3 juillet 2015. L'équipement a été reçu en Aout, mais malheureusement le fabricant a utilisé des connecteurs de capteurs non compatibles et les capteurs ont dû être retournés pour remplacement. L'installation de la Station 4 a pu être effectuée le 12 Novembre 2015 et les capteurs défectueux ont également été remplacés à cette date. Cette station a été installée (tâche 10) à la position de la station relais. Cet emplacement permet d'améliorer adéquatement la couverture sismique (Figure 26) en plus d'avoir l'avantage d'être déjà équipé d'un panneau solaire.

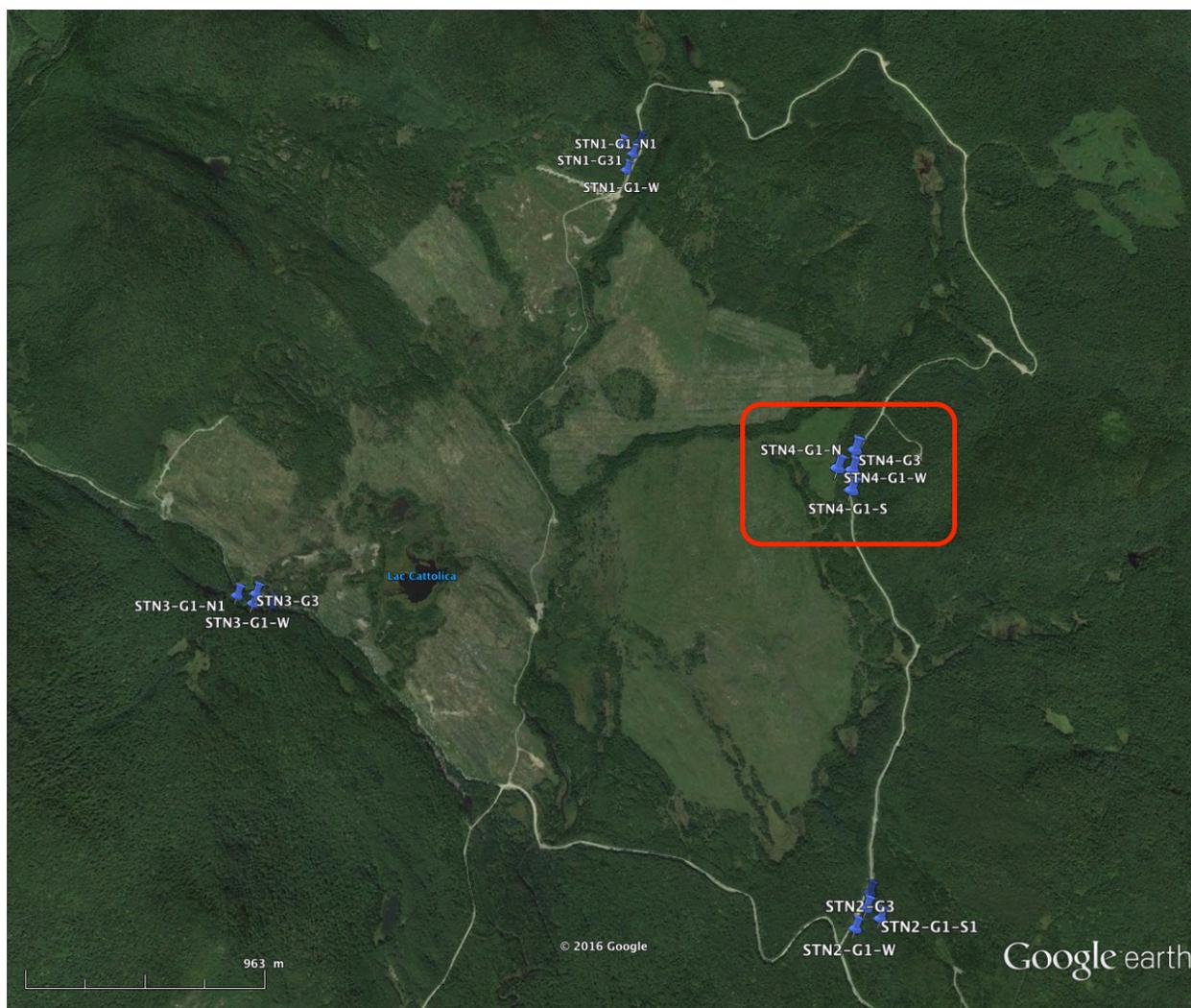


Figure 26 – Position de la Station 4.

Enfin, l'alimentation des stations acoustiques et sismiques a été revue en installant des supports à panneaux solaires surélevés, de façon à assurer un ensoleillement maximal et une recharge adéquate des batteries (Figure 27).



**Figure 27 – Installation des support à panneaux solaires.**

## 5. Essais avec munitions inertes

---

Ce chapitre permet de répondre aux tâches 13 et 14 de l'AT.

Deux séries d'essais avec obus inertes ont été réalisés pour évaluer en conditions réelles les seuils de détectabilité. Le premier essai, au cours duquel trois obus inertes de 105 mm ont été tirés, a eu lieu le 20 Juillet 2015. Les autres essais ont eu lieu le 25 (tirs de 105 et 155 mm) et le 28 Novembre 2015 (tirs de mortier 84 mm).

### 5.1 Obus de 105 mm

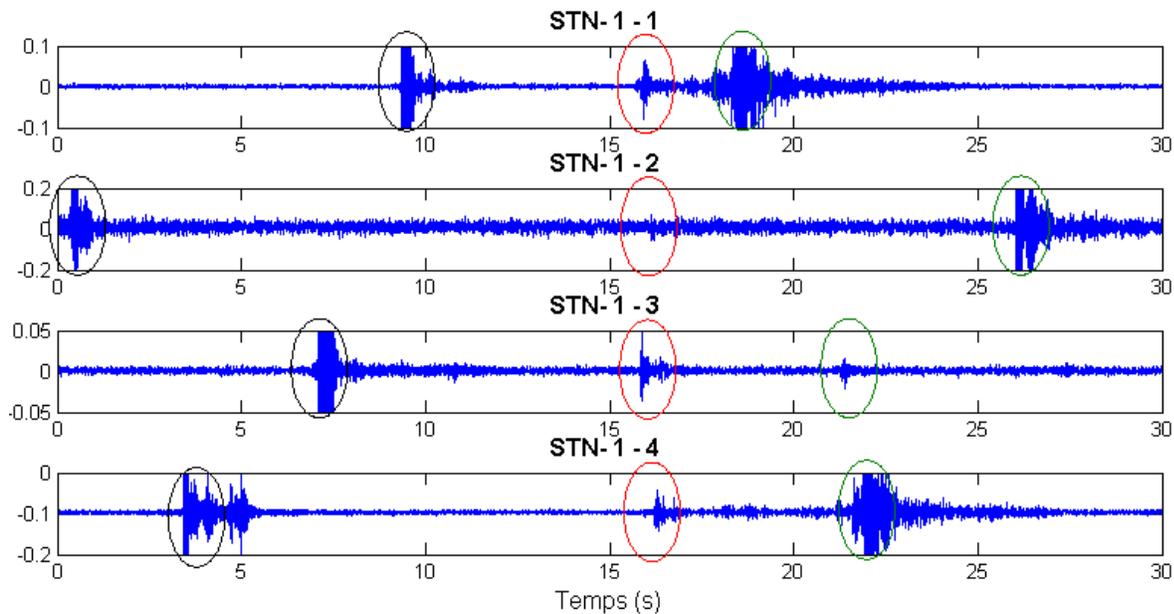
#### 5.1.1 Essai du 20 Juillet

Lors de cet essai, neuf tirs de 105 mm ont été effectués dont trois avec des obus inertes. Le personnel de l'INRS n'a pas pu assister à l'essai, et les temps de tirs ont d'abord été estimés *a posteriori* à partir des logs de tir. Malheureusement, après avoir tenté de corroborer sans succès les heures de tir indiqués dans les logs avec les enregistrements avec les enregistrements, nous avons appris que les heures indiquées dans les logs sont approximatives (comm. Maj. Vaillancourt). Nous avons finalement procédé sans tenir compte des logs de tir, à partir des signaux acoustiques et sismiques, avec les incertitudes que cela comporte dans une phase de calibration où plusieurs signaux non désirés se superposent au signal d'intérêt.

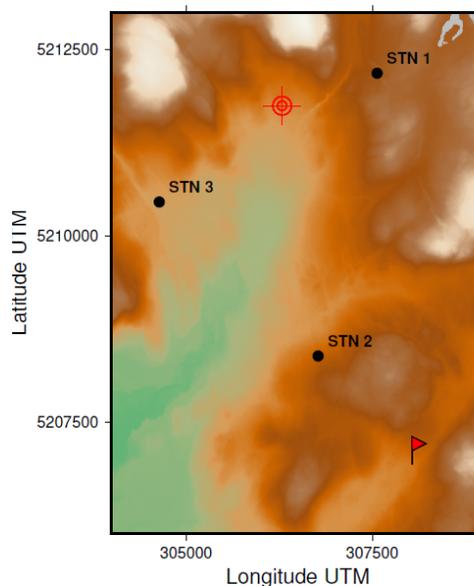
**Tableau 6 - Heure des tirs de 105 mm le 20 Juillet**

<b>Tir</b>	<b>Type</b>	<b>Heure</b>
1	Live 1	11:01:20
2	Inerte 1	11:08:05
3	Live 2	11:11:31
4	Live 3	11:14:50
5	Live 4	11:20:44
6	Live 5	11:29:14
7	Inerte 2	11:31:05
8	Inerte 3	11:31:39
9	Live 6	11:32:27

Les tirs "live" sont normalement caractérisés par la présence de trois phases : la première est la phase acoustique du canon, ensuite vient la signature sismique de l'explosion et finalement la phase acoustique de l'explosion (Figure 28). Or, en se basant sur les données acoustiques enregistrées par les sonomètres, on n'arrive pas à identifier avec certitude les tirs inertes car seuls les impacts des obus live sont enregistrés par les sonomètres. En effet, durant cet essai, nous avons remarqué l'absence de la phase acoustique du canon pour la plupart des tirs. Cela peut être expliqué par la direction du vent (sens inverse de la position du canon vers le champ de tir (Figure 29)) le jour de l'essai, qui a atténué l'arrivée de la phase.

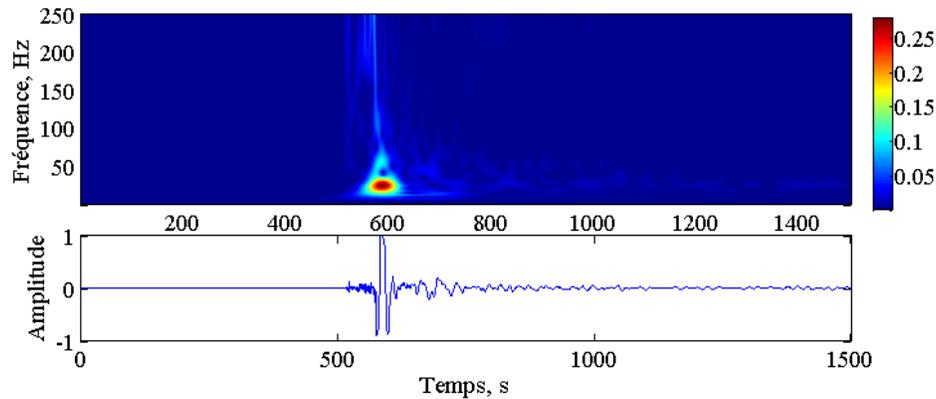


**Figure 28 – Phase acoustique du canon (noir), phase sismique de l'impact (rouge) et phase acoustique de l'explosion (vert) pour un tir live.**

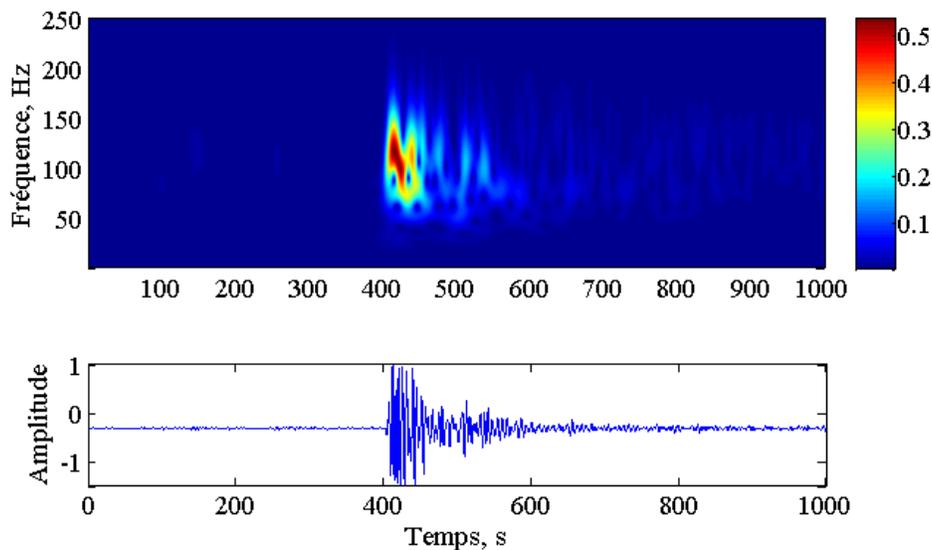


**Figure 29 – Position du canon (drapeau rouge) et la zone cible (cercle rouge).**

À l'écoute des enregistrements aux sonomètres, il est difficile de discerner entre l'onde acoustique générée par le canon et l'onde acoustique générée par la détonation de l'obus. Les données du mois de Novembre permettent de faire une analyse comparative en fréquence, ce qui permet de confirmer que lors de l'essai de Juillet, la phase acoustique du canon est absente. La Figure 30 montre l'analyse temps-fréquence du signal d'une explosion enregistrée en Juillet. On note que le contenu fréquentiel s'étale de 30 à 60 Hz, ce qu'une analyse des autres signaux permet d'identifier comme la fourchette typique d'une explosion d'obus 105 mm. En comparaison, la Figure 31 montre l'analyse temps-fréquence du signal acoustique du canon, qui a un contenu fréquentiel plus élevé, entre 70 et 150 Hz.



**Figure 30 – Transformée Stockwell de la phase acoustique de l'explosion (105 mm) enregistré par le sonomètre.**



**Figure 31 – Transformée de Stockwell de la phase acoustique du canon (Novembre).**

La présence de la phase acoustique du canon permet de déterminer avec certitude la présence d'un tir. De plus, la présence de la phase acoustique de l'explosion facilite la discrimination entre les tirs (inertes ou explosé). Partant de ce principe, on a tenté classer les phases identifiées dans les enregistrements de cet essai. Malheureusement l'absence de la phase acoustique du canon rend l'exercice difficile. En effet, en se référant aux logs de tirs, on peut

déterminer que l'essai a démarré à 9h35m le matin et s'est terminé à 11h30. En examinant le signal sismique durant ces deux heures nous remarquons un niveau de bruit ambiant élevé, qui rend difficile la détection de la signature sismique des tirs inertes. En effet même si on détecte un évènement dans le signal d'une station et qu'il paraît typique d'une phase sismique, ce n'est pas suffisant pour confirmer que c'est la phase sismique d'un tir inerte, surtout s'il n'y a pas d'autres phases similaires aux autres stations. C'est ici qu'apparaît la nécessité de la phase acoustique du canon pour confirmer la nature des phases sismiques.

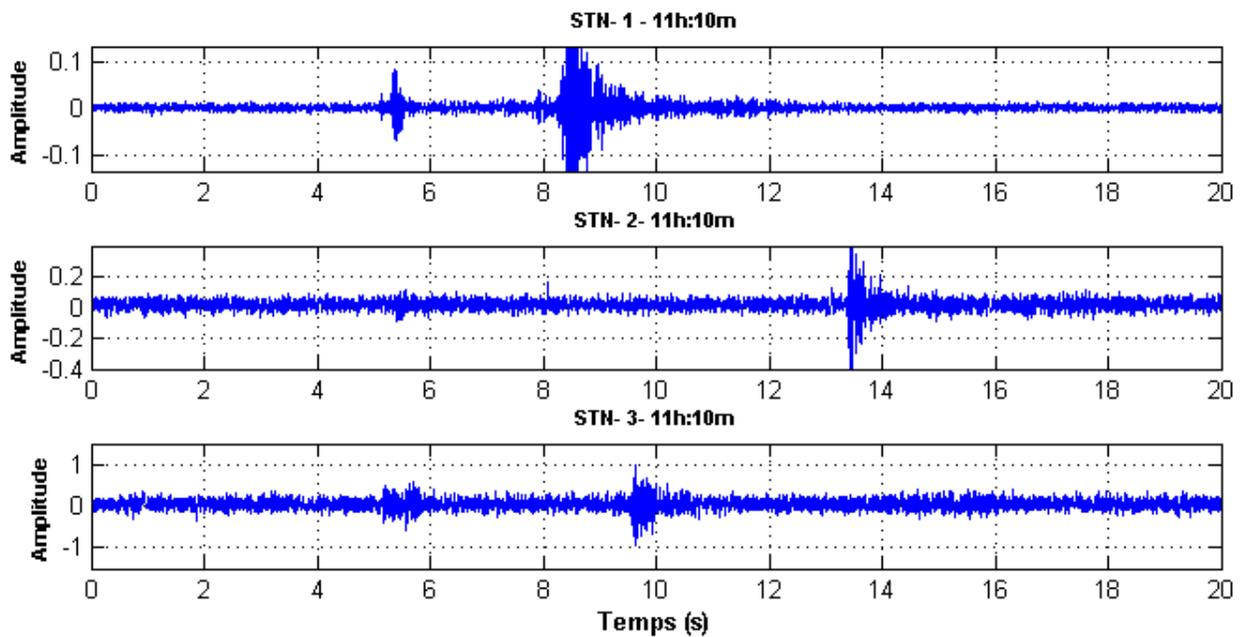


Figure 32 – Exemple de signal sismique enregistré lors d'un tir d'obus live 105 mm.

### 5.1.2 Essai du 25 Novembre

Lors de cet essai, douze tirs de 105 mm ont été réalisés parmi lesquels trois sont inertes et deux sont des fumigènes. Cet essai a été réalisé en présence de I. Bakari et B. Giroux de l'INRS. L'heure des tirs nous était communiquée par l'officier et a pu être noté avec une précision de l'ordre de la minute.

Malheureusement aucun sonomètre n'a fonctionné lors de cette journée. Cependant, la phase acoustique des canons est présente dans le signal sismique pour presque toutes les stations, ce qui nous a aidé à différencier les types d'évènement.

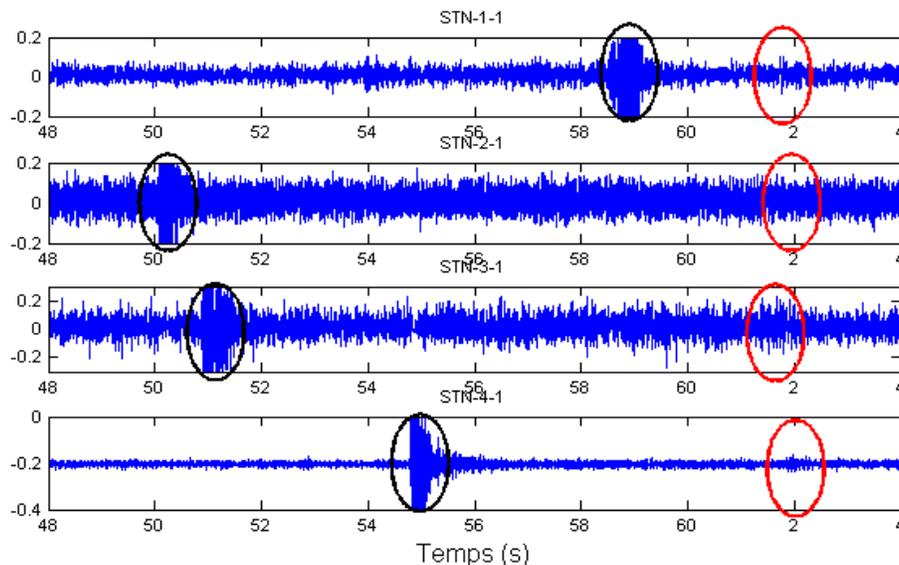
Tableau 7 – Heure des tirs de 105 mm le 25 Novembre

Tirs	Heure	Type
1	9h55	Live
2	10h29	Inerte

3	10h35	Live
4	10h51	Fumigène
5	10h55	Fumigène
6	11h08	Inerte
7	11h09	Live
8	11h15	Live
9	11h19	Live
10	11h23	Live
11	11h39	inerte

### 5.1.2.1 Premier tir d'obus inerte (10h29)

La Figure 33 montre les enregistrements du premier tir d'obus inerte pour un capteur à chaque station sismique. La phase acoustique du canon (déterminée à partir de la vitesse du son dans l'air et de la position relative des capteurs par rapport au canon) ainsi qu'une faible phase sismique sont observables dans les enregistrements. De fait, le décalage temporel entre les phases aux stations n'est pas constant car l'onde acoustique se propage dans l'air avec une vitesse de 330 m/s (de la position du canon vers les stations) alors que la phase sismique se propage dans la terre avec une vitesse beaucoup plus élevée (de l'ordre de 5500 m/s).



**Figure 33 – Premier tir inerte montrant la présence de la phase acoustique (noir) avant la phase sismique (rouge) aux quatre stations sismiques.**

En zoomant sur la phase sismique de la Figure 33, on remarque que l'arrivée sismique peut être identifiée, mais qu'elle est de très faible amplitude. La Figure 34 montre les signaux pour les quatre capteurs de la station 1. Le rapport signal/bruit est de l'ordre de 2, et les résultats sont comparables aux trois autres stations.

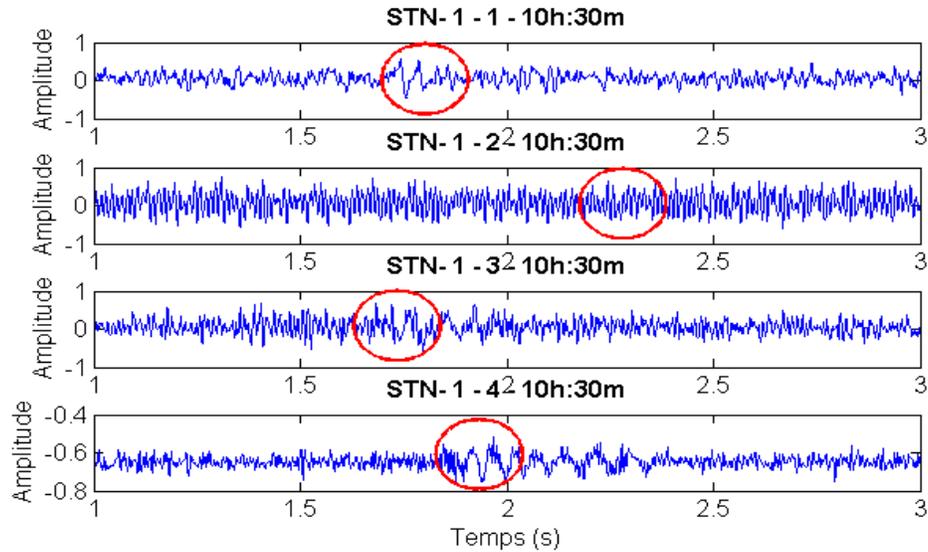


Figure 34 – Zoom sur la phase sismique du premier tir inerte de 105 mm, enregistré à la station 1.

### 5.1.2.2 Deuxième tir d'obus inerte

La phase sismique de ce tir est détectable avec certitude seulement à la Station 3, alors que le signal acoustique du canon est mesuré aux quatre stations (Figure 35).

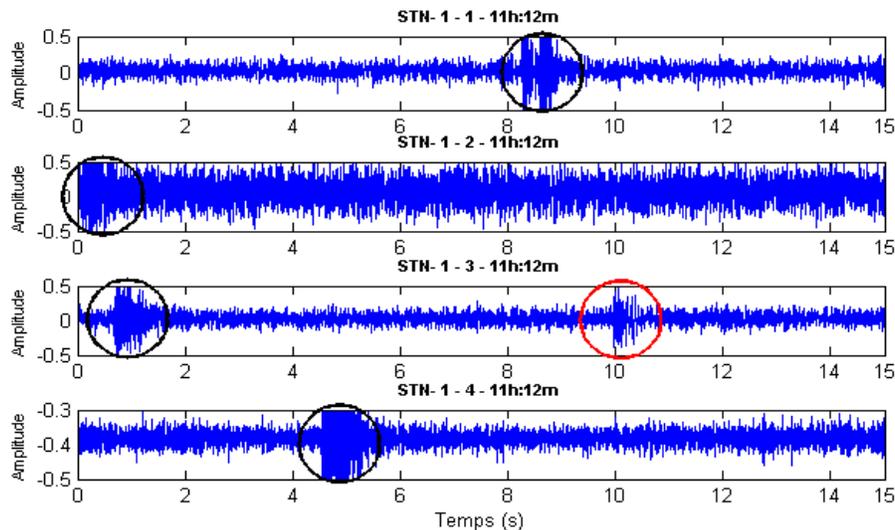


Figure 35 – Enregistrement du deuxième tir inerte montrant les phases acoustiques du canon (noir) et la phase sismique de l'impact de l'obus à la Station 3 (rouge).

### 5.1.2.3 Troisième tir d'obus inerte

Étrangement, les enregistrements du troisième tir d'obus inerte ne contiennent aucune phase acoustique du canon. La Figure 36 montre ces enregistrements au cours de la minute où le tir aurait été fait; seule une faible arrivée est visible à la Station 1 (on remarque que capteur 3 a cessé de fonctionner à environ 11h39'6"). Nous avons vérifié les enregistrements avant et après, sans rien remarquer. Nous avons examiné les logs de tirs fournis par le Maj.

Vaillancourt pour voir si l'heure qui a été notée au moment de l'exercice était erronée, malheureusement les logs sont incomplets et se terminent vers 11h19'.

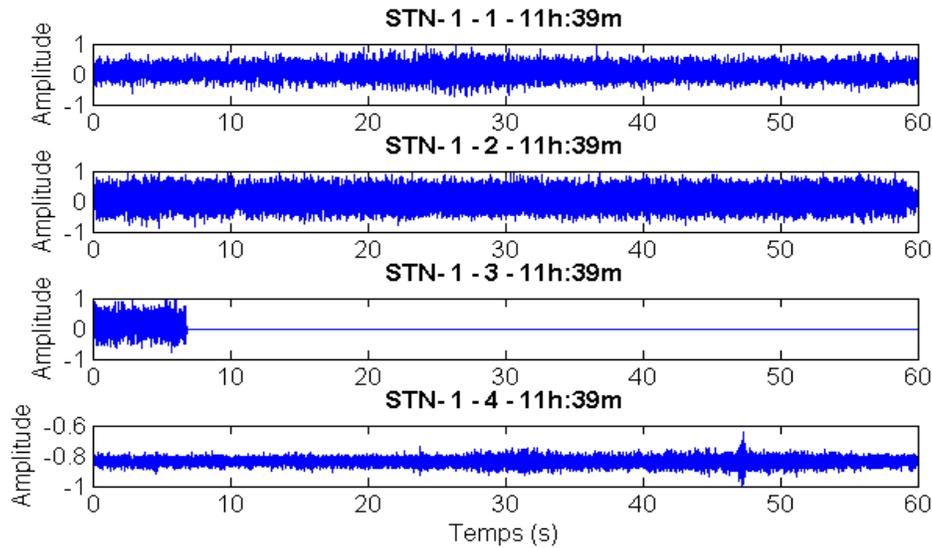


Figure 36 – Signal sismique enregistré aux stations sismiques au moment du troisième tir inerte.

### 5.1.3 Comparaison entre les signatures des obus inerte et « live »

Afin de mieux caractériser le signal nous appliquons la transformée de Stockwell sur la partie qui contient l'arrivée sismique. D'après la Figure 37, il est clair que la signature sismique de l'obus inerte correspond à une bande fréquentielle relativement basse, de 30 Hz à 50 Hz. Pour un obus live, la largeur de bande est légèrement plus élevée, de 30 à 60 Hz (Figure 38), mais plus énergétique sur le plan amplitude. Le fait que la largeur de bande est relativement similaire est probablement dû au fait que le sol agit comme filtre passe-bas et que peu d'énergie haute fréquence se rend aux capteurs. Le contenu en fréquence ne semble donc pas un moyen de discriminer les types de signaux, le ratio signal/bruit est ici un meilleur indicateur (si on exclu l'information provenant du signal acoustique).

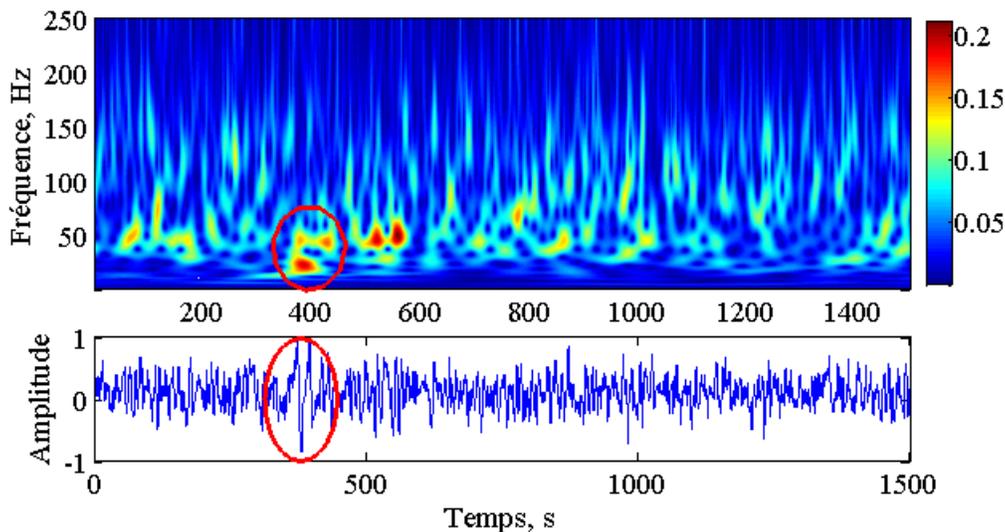


Figure 37 – Transformée Stockwell de la phase sismique (en rouge) de l'impact d'un obus inerte 105 mm.

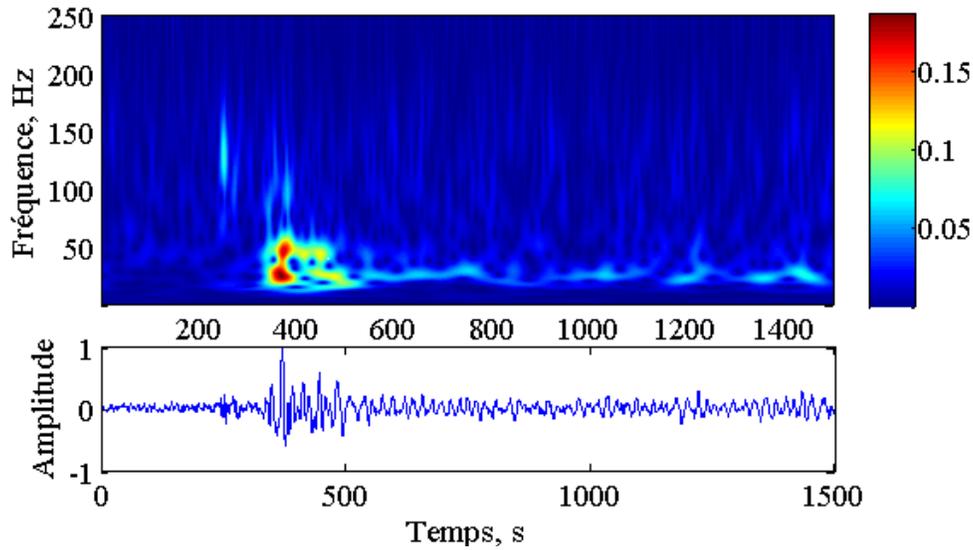
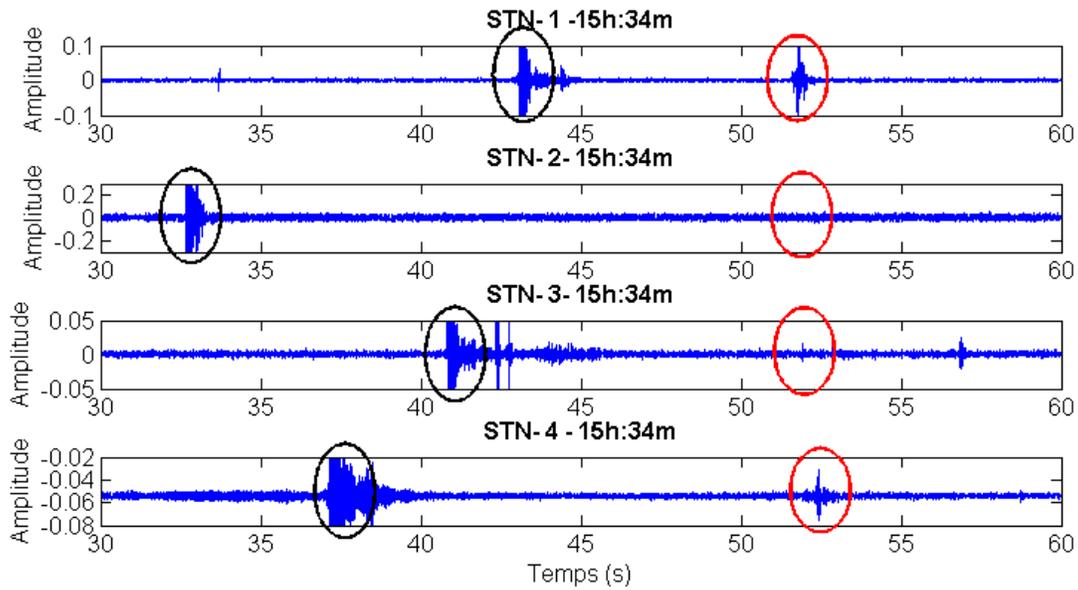


Figure 38 – Transformée de Stockwell de la phase sismique de l'explosion d'un obus live 105 mm.

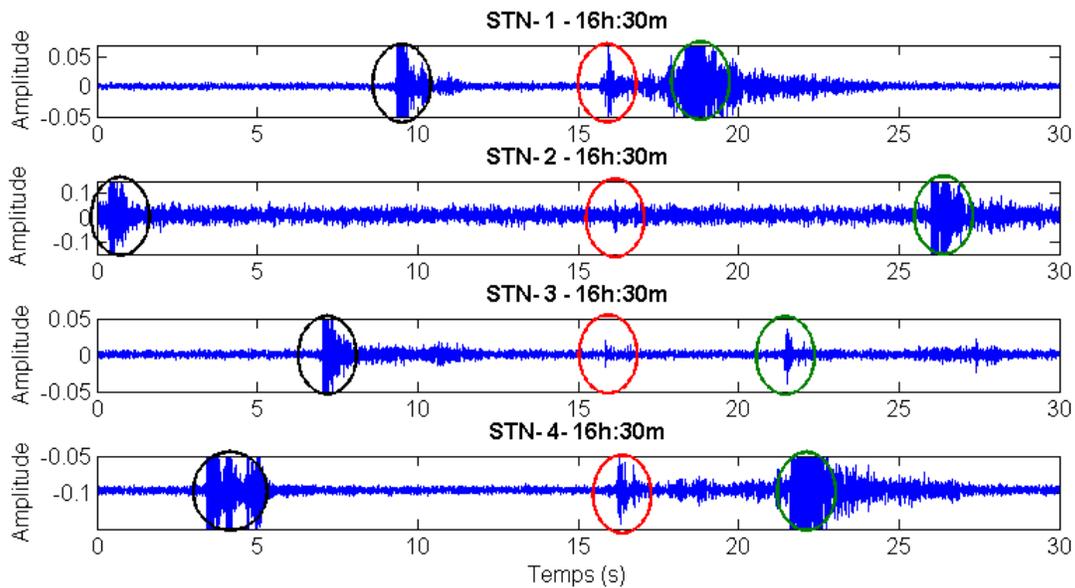
## 5.2 Obus de 155 mm

Douze obus inertes de 155 mm ont été tirés entre 15h20 et 16h25 le 25 Novembre. Pour onze de ces tirs, la phase sismique est détectable sans ambiguïté, bien qu'elle soit parfois faible. Dans le cas du tir non détecté, la présence de fumigènes complexifie les signaux au point où la phase sismique ne peut être identifiée avec certitude.

Les Figure 39 et Figure 40 montrent la différence entre les enregistrements pour les obus inertes et « live ». Ces figures montrent que même lorsque l'obus explose, le signal sismique qui se propage jusqu'au capteur est relativement faible ; et que la phase acoustique est toujours plus énergétique que la phase sismique. Cela confirme la nature très atténuante du sous-sol.



**Figure 39 – Exemple d’enregistrements sismiques pour un obus inerte. On observe les phases acoustiques du canon (noir) et la phase sismique de l’impact de l’obus (rouge).**



**Figure 40 – Exemple d’enregistrements sismiques pour un obus « live ». On observe les phases acoustiques du canon (noir), la phase sismique de l’impact de l’obus (rouge) et la phase acoustique de la détonation (vert).**

Les tirs inertes ont été localisés avec l’algorithme d’inversion développé dans le cadre du projet. La Figure 41 montre les positions obtenus, qui sont dans le secteur visé lors de l’exercice, tel que nous avons pu l’observer sur le terrain lors de l’exercice. Nous avons cherché dans les logs de tir les coordonnées des points ciblés par ces tirs pour estimer la précision de la localisation. Malheureusement, aucun log de tir n’identifie les obus inertes (contrairement aux tirs du mois de Juillet), et il n’a pas été possible de faire ce calcul.

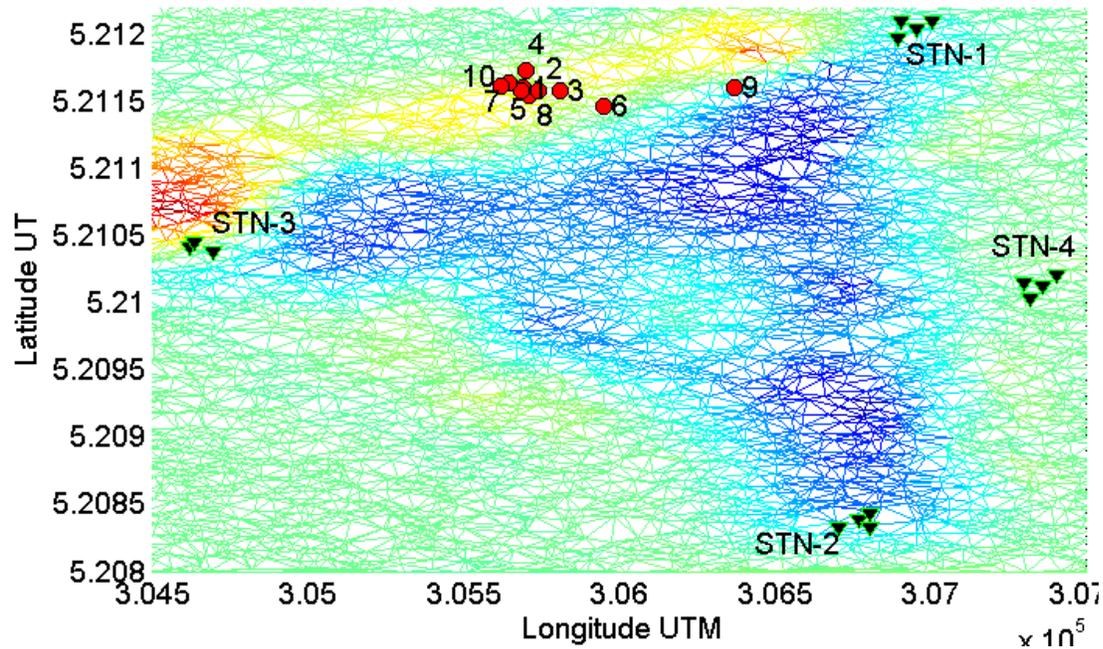
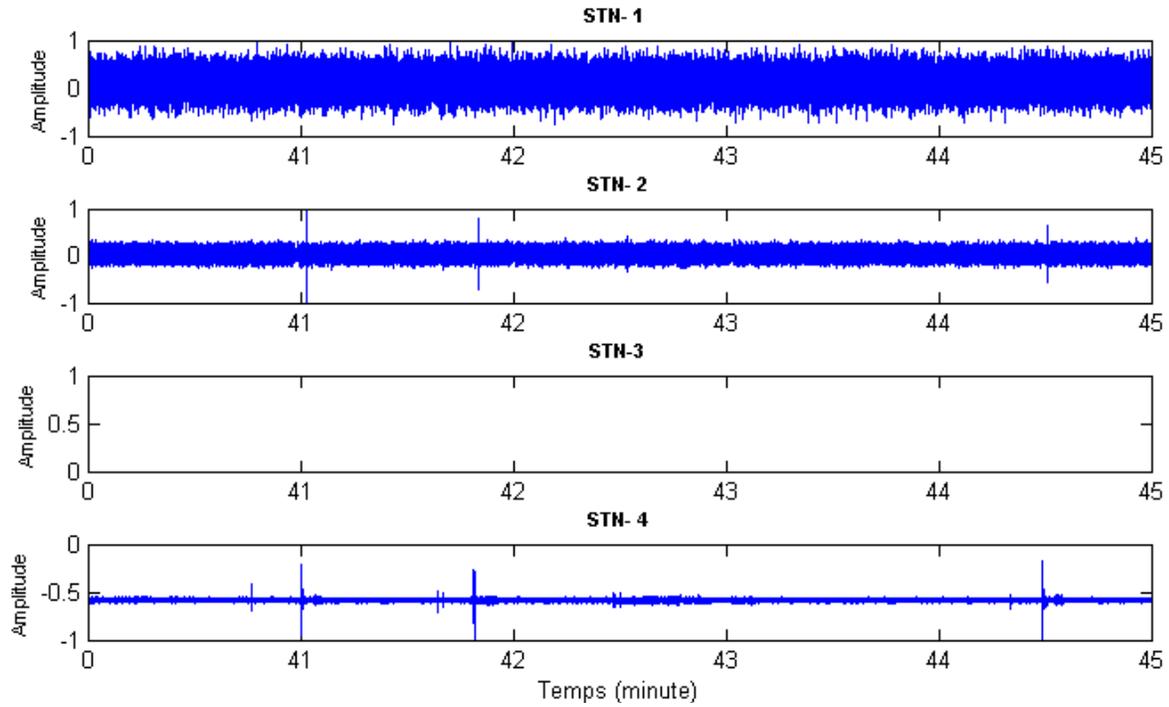


Figure 41 – Localisation des impacts d’obus 155 mm inertes tirées le 25 novembre 2015.

### 5.3 Mortier de 84 mm

La figure suivante représente cinq minutes d’enregistrement de signal sismique aux quatre stations. On remarque la présence de la phase acoustique uniquement aux Stations 2 et 4 (la Station 3 était hors d’usage). Les notes de terrain indiquent que 4 tirs de mortiers inertes ont été effectués lors de ces cinq minutes. Un examen détaillé des enregistrements ne permet pas d’identifier les phases sismiques. Il est clair que la détection des mortiers inertes n’est pas faisable avec le système de monitoring microsismique. En effet, l’amplitude sismique de l’impact des mortiers est très faible ce qui les rendent très difficile à détecter par les capteurs sismiques.



**Figure 42 – Signal sismique enregistré pendant l'essai de tir des mortiers inertes.**

## 6. Conclusion

---

Les travaux décrits de ce rapport répondent aux tâches de l'AT-41 décrites au paragraphe 3.2. Les conclusions importantes qui se dégagent de ces travaux sont :

- La méthode des rapports d'énergie modifiée (MER) semble la plus performante pour détecter et pointer l'arrivée des ondes P (§4.3.2.4).
- La localisation par inversion conjointe hypocentre-vitesse a été retenue pour ce projet en raison de sa flexibilité, mais il serait intéressant d'évaluer la performance de la localisation par migration (§4.3.3.4).
- L'atténuation des ondes de surface est trop importante pour utiliser cette phase sismique pour la zone d'impact Liri, mais l'utilisation des ondes P semble appropriée et faisable (§4.4.2.1).
- La vitesse moyenne de l'onde P a pu être déterminée avec succès (§4.4.4).
- Une estimation préliminaire et partielle de la précision de localisation à partir des tirs de calibration a été estimée à 32 m. Cette précision sera améliorée par l'ajout d'une quatrième station et la réparation des capteurs endommagés et en utilisant un nombre de données plus grand que les 10 tirs de calibration (§4.4.5).
- Les essais au site Liri ont montré que seule les obus inertes de 155 mm peuvent être détectés avec une confiance élevée. Les obus de 105 mm génèrent un signal avec un rapport signal/bruit en deçà de 2 la majorité du temps et ne sont généralement pas détectables. Les mortiers inertes de 84 mm n'ont pu être détectés (chap. 5).
- L'équipement sismique (stations portable Paladin fabriquées par ESG) utilisé pour ce projet n'est pas fiable pour un déploiement de ce type. Des arrêts des instruments sont survenus assez fréquemment au cours du projet. Ces arrêts étaient au départ attribués à des problèmes d'alimentation, mais les mesures prises pour améliorer l'alimentation des stations n'ont pas eu l'effet escompté (une station a même cessé de fonctionner pendant l'essai du mois de Novembre).

Ces résultats limitent l'intérêt de la méthode pour le secteur Liri. Les résultats indiquent par contre que la méthode pourrait être applicable sur un secteur de plus faible dimension, ou un secteur présentant un caractère géologique différent. En effet, l'atténuation des ondes sismiques dépend des caractéristiques géologiques et du type de terrain sur le site. Pour le secteur Liri, une partie importante de l'atténuation est attribuable au mort-terrain qui est hétérogène et peu consolidé à l'emplacement des capteurs sismiques. Une piste de solution pourrait être d'enfouir les capteurs sismiques à une profondeur où ils attendraient le roc.

Le projet a également mis en lumière les limites de l'équipement utilisé. Les systèmes d'acquisition sismique ont subi plusieurs défaillances et nécessitent une maintenance assez serrée. Le choix de l'équipementier apparaît être un point crucial pour le succès de la méthode.

## 7. Remerciements

---

Nous tenons à remercier le Directeur de l'Environnement Terrestre et DRDC Valcartier pour le support financier de ces travaux, ainsi que le major Jules Vaillancourt pour la coordination des essais et le centre d'essai expérimental des munitions pour leur support pour les mesures précises des temps de détonation.

## 8. Références

---

- Akram, J., 2014. Downhole microseismic monitoring : processing, algorithms and error analysis., PHD, UNIVERSITY OF CALGARY.
- Anderson, T.S. et Weale, J.C., 2006. Seismic-Acoustic Active Range Monitoring for Characterizing Low-Order Ordnance Detonation. US Army Corps of Engineers, Rapport de recherche ERDC/CRREL TN-06-1.
- Block, L.V., 1991. Joint Hypocenter-Velocity inversion of Local Earthquake Arrival Time Data in Two Geothermal Regions, PHD, Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory.
- Chambers, K., Kendall, J., Brandsberg-Dahl, S. et Rueda, J., 2010. Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity, *Geophysical Prospecting*, 58, 821-830.
- Multi-window algorithm for detecting seismic first arrivals, 2005, CSEG National Convention,
- Coppens, F., 1985. First arrival picking on common-offset trace collections for automatic estimation of static corrections, *Geophysical Prospecting*, 33, 1212-1231.
- Diehl, T., Deichmann, N., Kissling, E. et Husen, S., 2009. Automatic S-wave picker for local earthquake tomography, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99, 1906-1920.
- Freire, S.L. et Ulrych, T.J., 1988. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling, *Geophysics*, 53, 778-785.
- Giroux, B., Claprod, M. et Martel, R., 2013. Étude de la détection sismique pour la discrimination des réactions de détonation en entraînement - Phase 2. INRS-ETE, Rapport de recherche 1413.
- Giroux, B., Claprod, M., Martel, R. et Gloaguen, E., 2012. Surveillance de munitions non explosées par écoute microsismique. INRS-ETE, Rapport de recherche 1345.
- Han, L., 2010. Microseismic monitoring and hypocenter location, Msc.Thesis, University of Calgary.
- Kugaenko, Y., Saltykov, V., Sinitsyn, V. et Chebrov, V., 2005. Passive Seismic Monitoring in Hydrothermal Field: Seismic Emission Tomography. *Papier présenté à Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey. WGC.*
- Lay, T. et Wallace, T.C., 1995. *Modern Global Seismology*, 58.

- Leonard, M., 2000. Comparison of Manual and Automatic Onset Time Picking, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1384-1390. doi:10.1785/0120000026
- Leonard, M. et Kennett, B.L.N., 1999. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 113, 247-263.
- Munro, K.A., 2006. Analysis of microseismic event picking with applications to landslide and oil-field monitoring settings, MSc. thesis, , University of Calgary.
- Pavlis, G.L. et Booker, J.R., 1980. The Mixed Discrete-Continuous Inverse Problem: Application to the Simultaneous Determination of Earthquake Hypocenter and Velocity Structure, *Journal of Geophysical Research*, 85, 4801-4810. doi:10.1029/JB085iB09p04801
- Sabbione, J.I. et Velis, D., 2010. Automatic first-breaks picking: New strategies and algorithms, *Geophysics*, 75, V67-V76.
- Principal component analysis applied to seismic horizon interpretations, 2007, International congress of Petroleum Geostatistics, Cascais, Portugal,
- Sharma, B., Kumar, A. et Murthy, V., 2010. Evaluation of seismic events detection algorithms, *Journal of the Geological Society of India*, 75, 533-538.
- Sleeman, R. et van Eck, T., 1999. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings, *Physics of the earth and planetary interiors*, 113, 265-275.
- Trnkoczy, A., 2002. Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm, *IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice*, 2, 1-19.
- VanDeMark, T., Johnson, L., Pitarka, A., Bennett, H., Simms, J. et Yule, D., 2013. Evaluation of Seismic-Acoustic Analysis Methods for a Real-time UXO Monitoring System, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 18, 71-85. doi:10.2113/JEEG18.1.71
- VanDeMark, T.F., Conner, R., Johnson, L.B., Bennett, J., Simms, J.E. et Yule, D.E., 2010. Technical Overview of the Seismic Acoustic Impact Monitoring Assessment (SAIMA) System, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 23, 1065-1076. doi:10.4133/1.3445422
- VanDeMark, T.F., Johnson, L.B., Bennett, J., Simms, J.E. et Yule, D.E., 2009. Evaluation of Seismic-Acoustic Analysis Methods for a Real-Time UXO Monitoring System, *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 22, 775-784. doi:10.4133/1.3176767
- Waldhauser, F. et Ellsworth, W.L., 2000. A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353-1368. doi:10.1785/0120000006
- Wong, J., Han, L., Bancroft, J. et Stewart, R., 2009. Automatic time-picking of first arrivals on noisy microseismic data, *CSEG. 0 0.2 0.4 0.6 0.8*, 1, 1.4.
- Xiantai, G., Zhimin, L., Na, Q. et Weidong, J., 2011. Adaptive picking of microseismic event arrival using a power spectrum envelope, *Computers & Geosciences*, 37, 158-164.

- Xuan, R. et Sava, P., 2010. Probabilistic microearthquake location for reservoir monitoring, *Geophysics*, 75, MA9-MA26.
- Zhang, H. et Thurber, C., 2006. Development and applications of double-difference seismic tomography, *Pure and Applied Geophysics*, 163, 373-403.
- Zhou, R., Huang, L. et Rutledge, J., 2010. Microseismic event location for monitoring CO<sub>2</sub> injection using double-difference tomography, *The Leading Edge*, 29, 208-214.