(ID Modèle = 454913)

Ineris - 230822 - 2828975 - v2.0

02/02/2026

Caractérisation non destructive de l'endommagement d'un pilier de carrière : apport de la fusion de tomographies géophysiques

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : BALLAND Cyrille

Vérification : DRIF KAMEL

Approbation : Document approuvé le 02/02/2026 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : RESPAUD Cyril (Cerema Sud-Ouest) - DEFFRENNE Timothée

Résumé

La connaissance de l'endommagement des piliers pourrait être un moyen d'estimer le risque d'effondrement des carrières souterraines. Cependant, le niveau d'endommagement de la roche est difficile à déterminer sans l'utilisation de méthodes destructives notamment pour accéder au cœur des piliers telles que les carottages ou autres prélèvements. C'est dans ce contexte que les méthodes d'imagerie géophysique offrent une alternative non invasive pertinente.

Trois méthodes géophysiques basées sur l'analyse de la propagation des ondes sismiques ou électromagnétiques ont été sélectionnées. Il s'agit de la tomographie sismique, du radar et la tomographie de résistivité électrique. Un dispositif expérimental commun aux trois méthodes a été conçu pour combiner les résultats afin de caractériser un pilier de la carrière de Saint Maximin.

Les tomographies sismiques et électriques ont chacune mis en évidence que le pilier était composé de 3 zones distinctes, associées à différents niveaux d'endommagement ou d'altération. Le radar montre cependant un pilier relativement homogène, mais les acquisitions en mode réflexif ont permis de détecter plusieurs fractures internes, qui semblent coïncider avec les interfaces entre les zones identifiées par les autres méthodes.

L'utilisation de plusieurs méthodes d'imagerie sur le même ouvrage permet donc une validation croisée des anomalies détectées, une réduction des incertitudes dans l'interprétation et une modélisation plus robuste du pilier. La prochaine étape consisterait à relier les paramètres géophysiques à des paramètres mécaniques contrôlés en laboratoire afin de quantifier la capacité portante du pilier.

Summary

Understanding the damage to pillars could be a way to assess the risk of collapse in underground quarries. However, determining the level of rock damage is challenging without using destructive methods, particularly those required to access the core of the pillars, such as coring or sampling. In this context, geophysical imaging methods offer a relevant non-invasive alternative.

Three geophysical methods based on the analysis of seismic or electromagnetic wave propagation were selected: seismic tomography, ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity tomography. A common experimental setup for all three methods was designed to combine the results and characterize a pillar in the Saint-Maximin quarry.

Both seismic and electrical tomography revealed that the pillar consisted of three distinct zones, each associated with different levels of damage or alteration. The GPR, however, showed a relatively homogeneous pillar, but acquisitions in reflection mode detected several internal fractures, which appear to coincide with the interfaces between the zones identified by the other methods.

Using multiple imaging methods on the same structure thus enables cross-validation of detected anomalies, reduces uncertainties in interpretation, and supports more robust modelling of the pillar. The next step would be to link geophysical parameters to mechanical parameters controlled in the laboratory in order to quantify the load-bearing capacity of the pillar.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2026, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 230822 - 2828975 - v2.0. 02/02/2026

Mots-clés :

Carrière, pilier, fracturation, méthodes géophysiques, endommagement, stabilité.

Keywords

Quarry, pillar, fracturing, geophysical methods, damage, stability.

Table des matières

1 Introduction 5
2 Méthodes d'auscultation sélectionnées 6
2.1 Tomographie sismique par transmission 6
2.2 Géoradar 6
2.3 Tomographie de résistivité électrique 7
3 Configuration du dispositif expérimental 9
3.1 Choix d'un pilier expérimental 9
3.2 Systèmes d'acquisition 10
3.3 Capteurs 12
3.4 Source sismique 12
3.5 Géométrisation du pilier 12
4 Méthodes de traitement 14
4.1 Tomographies ultrasoniques et radar 14
4.1.1 Détermination des temps d'arrivée 14
4.1.2 Inversion tomographique (sismique et radar) 15
4.2 Tomographie de résistivité électrique 16
4.2.1 Modèle d'inversion 18
5 Résultats 19
5.1 Tomographies radar et sismique 19
5.1.1 Rais radar et sismique 19
5.1.2 Qualité des données 21
5.1.3 Images inversées 24
5.2 Tomographie électrique 25
5.2.1 Erreurs et itérations 25
5.2.2 Image inversée 26
5.3 Fusion des images 27
5.3.1 Méthode de centrage et de réduction 27
5.3.2 Fusion de la tomographie sismique avec la tomographie électrique 28
5.3.3 Fusion des tomographies avec la tomographie radar 28
5.4 Apport du radar en mode bi-statique 30
6 Conclusion 32
7 Annexes 33

1 Introduction

La prédisposition à la rupture des piliers de carrière dépend en partie des contraintes qui s'y exercent et de leur résistance. Les contraintes sont tributaires du taux de défruitement[1] local (ou proportion du massif exploité) et de la profondeur de la carrière souterraine. Pour une géométrie donnée, la résistance varie suivant la nature de la roche et son endommagement. Lorsque les carrières souterraines sont accessibles, le taux de défruitement, la profondeur d'exploitation et la résistance intrinsèque de la roche peuvent être déterminés facilement.

L'endommagement, quant à lui, est beaucoup plus difficile à définir bien qu'il soit déterminant dans la stabilité des piliers. La méthode la plus simple est de relever la fissuration ou la fracturation en surface des piliers. Cette méthode permet de détecter les blocs les plus instables et prévenir leur chute. Néanmoins, elle ne permet pas de dire si le pilier est endommagé en son cœur et s'il est proche de la ruine. Seule une imagerie interne des piliers est susceptible de répondre à cette question.

Dans le cadre de nos actions d'appui aux pouvoirs publics sur les risques gravitaires, nous avons passé en revue les différentes méthodes qui peuvent imager le cœur des piliers (Rapport Ineris-204392-2705562-v1.0). La plupart de ces méthodes est basée sur l'analyse de la propagation des ondes sismiques ou électromagnétiques. En effet, les caractéristiques mécaniques et électromagnétiques de la roche changent avec l'endommagement physique et l'altération chimique. Généralement, l'endommagement réduit la vitesse des ondes sismiques et la résistivité électrique dans une roche préalablement compacte. Si le contraste entre la zone saine et la zone endommagée de la roche est suffisant, il est alors possible de détecter voire d'imager l'endommagement et localiser les fractures.

Cette étude nous a permis de sélectionner 3 méthodes d'imagerie adaptées à l'auscultation des piliers. Il s'agit de la tomographie sismique, la tomographie par radar géologique ou géoradar et la tomographie de résistivité électrique. La tomographie sismique et le géoradar sont plus adaptés pour déterminer la fracturation et les modules d'élasticité. La tomographie de résistivité électrique quant à elle, est plus sensible aux caractéristiques hydrauliques de la roche comme la teneur en eau ou l'altération qui se traduit par des anomalies de résistivité électrique.

Nous rappelons ici les principes des 3 méthodes sélectionnées, la conception des dispositifs expérimentaux et leur mise en œuvre sur un pilier de la carrière de Saint Maximin dans l'Oise. Les travaux ont été réalisé en collaboration avec le Cerema Sud-Ouest (Département Infrastructures de Bordeaux). Les résultats ont permis de connaitre la structure interne de ce pilier pour chacune des méthodes dans un premier temps puis en fusionnant les méthodes deux à deux et finalement toutes les 3 ensemble. Nous discutons alors de l'apport d'une fusion des informations pour améliorer le niveau de qualité et la robustesse des conclusions relatives à la stabilité du pilier.

[1] Le **taux de défruitement** d'une carrière est la proportion de minerai exploité (surface des galeries / surface totale).

2 Méthodes d'auscultation sélectionnées

Les résultats de la revue des différentes méthodes d'auscultation utilisées dans le contexte des piliers de carrière souterraines sont synthétisés dans le rapport Ineris-204392-2705562-v1.0. Nous rappelons ici le principe des 3 méthodes d'imagerie sélectionnées dans cette étude à savoir : la tomographie sismique, le géoradar et la tomographie électrique.

2.1 Tomographie sismique par transmission

La tomographie sismique par transmission consiste à mesurer les temps de trajets directs des ondes à travers un milieu rocheux. Pour obtenir une image fiable du sous-sol, le nombre de chemins de propagation (ou *rais*) doit être suffisamment élevé pour assurer une bonne couverture de la zone d'étude : en surface (2D) ou en volume (3D).
Il faut ensuite trouver le champ de vitesse discrétisé qui vérifie au mieux les temps d'arrivée mesurés. Pour cela, une matrice reliant les temps de trajet, les longueurs de parcours des ondes et les vitesses locales est construite pour être inversée afin d'estimer le modèle de vitesses le plus cohérent avec les données.

La résolution de la tomographie sismique dépend principalement de la fréquence dominante des ondes qui traversent le milieu. La résolution est généralement une fraction de la longueur d'onde (typiquement 1/3). C'est ce qui définit la zone de Fresnel qui représente la capacité d'une onde à différencier deux hétérogénéités distinctes ou plus simplement de détecter la plus petite hétérogénéité dans un encaissant homogène. Enfin, la résolution dépend aussi de la densité de rais qui traversent le milieu et de la distance entre la source et les récepteurs sismiques.

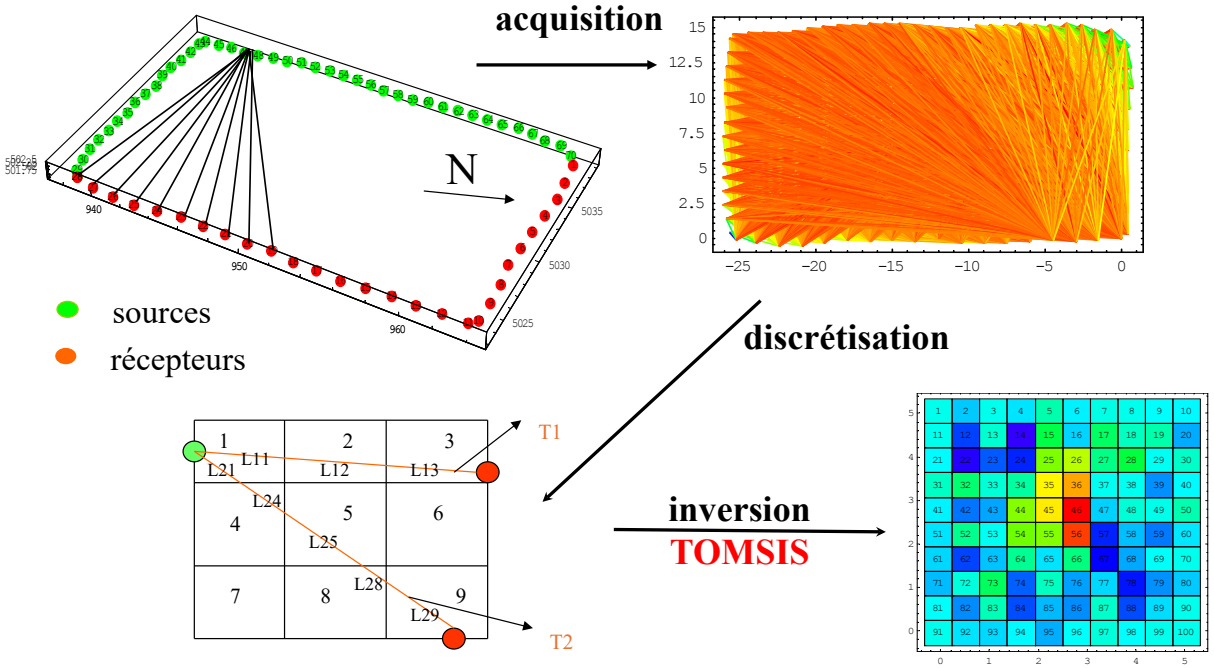


Figure 1 : Schéma de principe de la tomographie sismique par transmission (L : longueur, T : Temps).

2.2 Géoradar

Le radar géologique ou géoradar est basé sur l'impulsion d'une onde électromagnétique à une fréquence comprise entre quelques centaines de MHz à quelques dizaines de GHz en fonction des cibles et de la profondeur d'investigation voulue. Cette onde est transmise dans la roche par une antenne qui se déplace à sa surface dans une direction donnée (Figure 2). L'énergie transmise par l'impulsion est rayonnée suivant un faisceau plus ou moins focalisé en fonction du type d'antenne. Une portion de cette énergie est plus ou moins réfléchie aux interfaces (sédimentaires ou mécaniques) présentant un contraste de propriétés physiques. Cette portion est alors réceptionnée par une seconde antenne dite réceptrice. L'impulsion réfléchie donne alors une information sur les caractéristiques de la roche traversée durant le parcours aller-retour de l'onde électromagnétique.

- ✓ L'impulsion réfléchie contient des informations sur les propriétés du matériau traversé durant le parcours aller-retour. Ce signal dépend principalement de deux paramètres électriques de la roche

la permittivité diélectrique (ou constante diélectrique), qui contrôle la vitesse de propagation de l'onde,

- ✓ la conductivité électrique, qui contrôle l'atténuation du signal et donc la profondeur de pénétration... En mécanique des roches, la permittivité dépend principalement de la nature de la roche et de la porosité. La constante diélectrique varie de 1 pour le plus rapide (air) à 81 pour le plus lent (eau).

Les résultats de cette méthode sont représentés sous formes d'images radar ou radargrammes qui sont la superposition chronologique de chaque impulsion enregistrée par l'antenne de réception. Comme pour la sismique réflexion pétrolière ou encore l'échographie en médecine, le radargramme est composé de réflexions multiples qu'il faut identifier pour déterminer les réflecteurs qui en sont à l'origine.

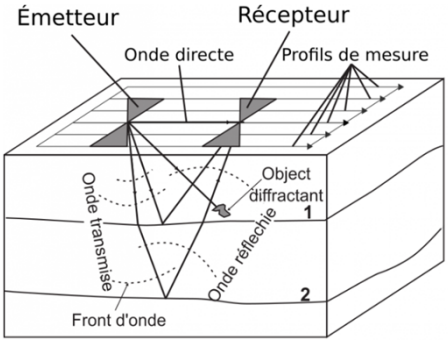


Figure 2 : Principe du géoradar (Milsom et Eriksen, 2011[2])

Le radar géologique est utilisé en transmission (mode tomographie) en disposant l'antenne émettrice et l'antenne réceptrice, de part et d'autre du pilier de manière à connaître les temps de propagation de l'onde dans le milieu et d'en déduire les vitesses électromagnétiques à partir des distances connues.

La multiplication des positions des sources et des récepteurs est nécessaire à l'obtention d'une image suffisamment contrainte et interprétable. Un programme de calcul de la propagation des ondes électromagnétique en 2D, basée sur l'inversion des temps des arrivées des ondes électromagnétiques transmises (et la comparaison, par itération, à un modèle géophysique qui prend en compte la géométrie du pilier) permet de construire une image 2D représentant la répartition des vitesses des ondes électromagnétiques dans le piler.

2.3 Tomographie de résistivité électrique

La tomographie de résistivité électrique repose sur l'injection dans le massif rocheux d'un courant à l'aide de deux électrodes (pôles + et -) et la mesure de la différence de potentiel engendrée sur deux autres électrodes. La différence de potentiel dépend de la géométrie et de la résistivité du matériau traversé. Entre deux points P1 et P2 (Figure 3), elle s'écrit sous la forme :

[2] Milsom, J. and Eriksen, A. (2011) Field Geophysics, 4th edn.Monaghan W.D., Trevits M.A., (2003), Application of ground penetrating radar to evaluate the extent of polyurethane grout infiltration for mine roof control - a case study, National Institute for Occupational Safety and Health, Pittsburgh

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi}\left(\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)\right) \quad (1)$$

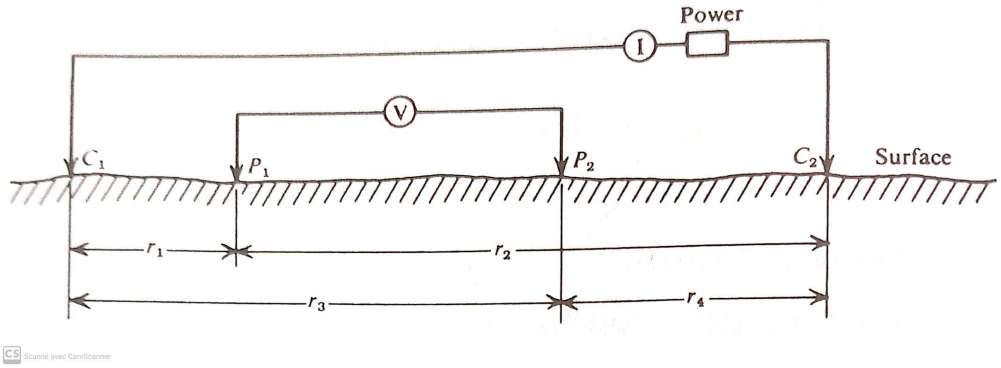


Figure 3: Montage à deux électrodes de courant en surface d'un milieu homogène et isotrope (Telford et al., 1976)

La profondeur d'investigation dépend de la configuration du dispositif avec en particulier la distance entre les électrodes. La profondeur d'investigation est donc de l'ordre de 1/8ème de la longueur du dispositif lorsque toutes les électrodes sont sur un même plan.

Il existe plusieurs dispositifs (Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle pour les principaux) suivant la configuration et les l'inter-distances des deux électrodes d'injection et des deux électrodes de mesure du courant circulant dans la roche.

L'imagerie commence par la construction d'une pseudo section à partir des résistivités mesurées pour chaque dispositif. Il s'agit ensuite d'inverser la pseudo section pour remonter au champ de résistivité qui correspond le mieux aux mesures.

Les dispositifs qui vont être utilisés pour la tomographie de résistivité électrique ont principalement des configurations dipôle-dipôle, bipôle-bipôle et pôle-tripôle (Figure 4).

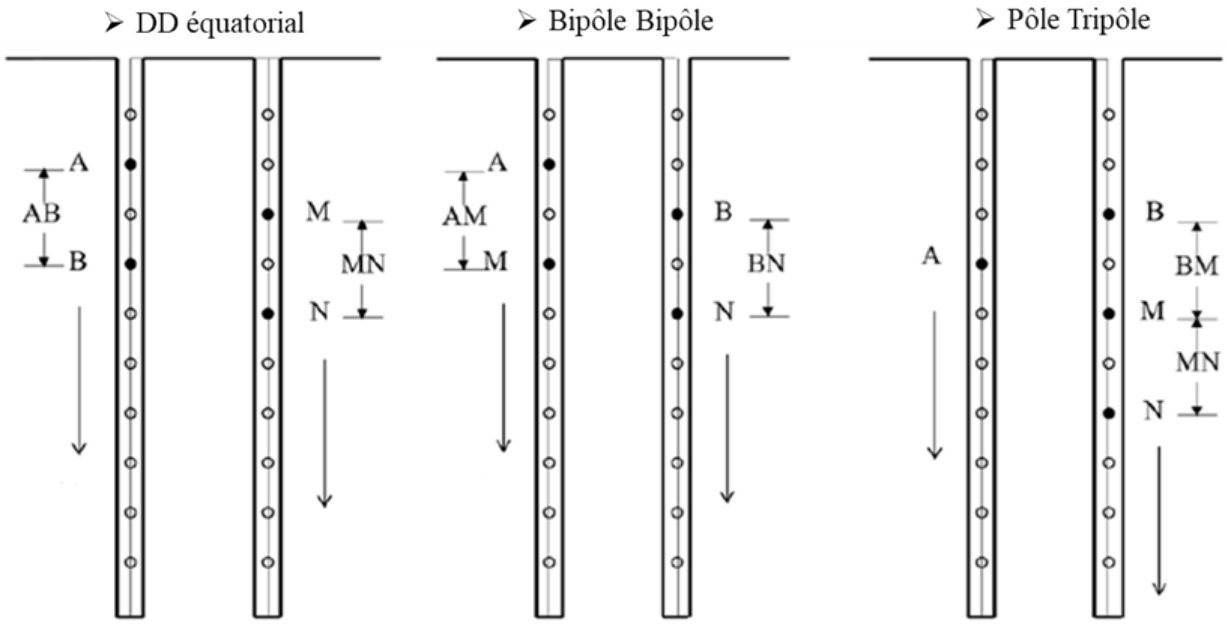


Figure 4 : Schéma de principe de la tomographie de résistivité électrique en configuration dipôle-dipôle, bipôle-bipôle et pôle tripôle.

3 Configuration du dispositif expérimental

Le choix du dispositif expérimental devait répondre aux contraintes communes des trois méthodes d'investigation, notamment en termes de géométrie et de résolution attendue. Le pilier sélectionné devait également présenter des caractéristiques favorables à la propagation des trois types d'ondes physiques impliquées (sismiques, électromagnétiques), afin de garantir l'acquisition de données de qualité pour chaque méthode.

3.1 Choix d'un pilier expérimental

Afin de mettre en évidence les critères d'instabilité, il faut que le pilier soit :

- Favorable à la propagation des 3 types d'ondes impliquées dans les 3 méthodes d'auscultation choisies. Il faut en particulier que l'atténuation mécanique et la permittivité diélectrique de la roche soient modérées pour que les ondes des deux types se propagent dans toute l'épaisseur du pilier ce qui est le cas pour un pilier en calcaire ; ;
- Parcouru d'une ou de plusieurs fractures isolées et présente un état d'endommagement et d'altération partielle dans la masse ;

Sur la base de ces critères, un pilier de la carrière de Saint Maximin a été choisi. Le pilier choisi est présenté sur la Figure 5. Le calcaire de Saint Maximin fait partie du banc de Saint Leu du Lutécien. Ce calcaire a été choisi comme matériau de construction d'une partie des monuments parisiens, le Pont-Neuf par exemple. Sa masse volumique est comprise entre 1500 à 1700 kg/m^3 pour une résistance à la compression allant de 5 à 7 MPa.

La carrière de Saint-Maximin offre par ailleurs un environnement relativement stable en température et en humidité, garantissant des conditions homogènes, notamment en ce qui concerne le taux d'humidité au niveau du pilier ausculté.

Figure 5 : Vue dans sa largeur (en haut) et dans sa longueur (en bas) du piliers ausculté (Carrière de Saint Maximin).

3.2 Systèmes d'acquisition

Pour réaliser les mesures de tomographie sismique nous avons utilisé la centrale d'acquisition Geometrics (StrataVisor NZTM) avec 24 voies d'acquisition intégrées et un module autonome (« Géodes ») de 24 voies soit 48 voies en tout. La gestion de l'acquisition est assurée par le logiciel Seismodule Controller. La fréquence d'échantillonnage de l'acquisition peut monter jusqu'à 50 kHz, soit un échantillon toutes les 20 µs. Cela correspond, par exemple, à une résolution spatiale d'environ 3 cm dans une roche où la vitesse de propagation des ondes sismiques est de 2000 m/s.

Pour la tomographie de résistivité électrique, l'acquisition a été réalisée avec le résistivimètre SYSCAL Pro (Figue 6). Ce système d'acquisition est équipé d'un multiplexeur intégré qui permet un grand nombre de configurations possibles (résolution, puissance maximale, courant d'injection).

Enfin, pour le géoradar, nous avons utilisé un système modèle SIR 3000 GSSI (Figure 7) avec 1 antenne en mode bi-statique ou 2 antennes de 400 MHz en mode transmission. La fréquence d'échantillonnage utilisée était de 60 GHz (2048 échantillons pour 120 ns) soit un échantillon toutes les 0,06 ns. Par exemple, dans une roche avec une vitesse radar de de 70 mm/ns, la longueur d'onde équivalente est de l'ordre de 4 mm.

Figure 6 : Système d'acquisition sismique (géode et PC de contrôle).

Figure 7 : Résistivimètre SYSCAL Pro

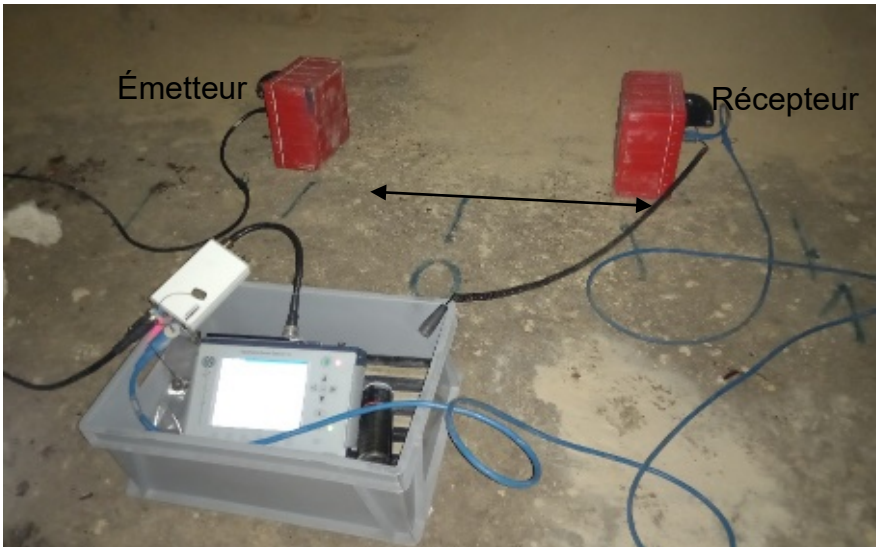


Figure 8 : Unité d'acquisition Sir 3000 de GSSI avec les deux antennes de 400MHz en émission et en réception.

3.3 Capteurs

Le pilier choisi fait environ 20 m de circonférence. Nous pourrons ainsi disposer de 47 positions de capteurs avec un pas de 40 cm environ. En effet, le système d'acquisition électrique dispose de 48 entrées d'électrodes tandis que le système sismique dispose de 48 voies de réception. Les méthodes électriques et sismiques n'ont pas nécessité le déplacement de leur système d'acquisition pendant les mesures. En revanche, la méthode radar nécessite le déplacement pas à pas de l'antenne source et de l'antenne réceptrice autour du pilier.

Les capteurs sismiques sont des géophones horizontaux avec des fréquences de résonance de 10 Hz (Figure 9 et Annexe 1). Les électrodes sont de simples tiges métalliques.

Figure 9 : Capteur sismique géophone (à gauche), et électrode (à gauche).

3.4 Source sismique

Plusieurs sources sismiques ont été testées pour les mesures de tomographie sismique avec des capteurs ultrasoniques et des marteaux. C'est un marteau de Schmidt (Figure 10) qui a finalement été choisi en raison de sa puissance et de sa répétabilité Ces caractéristiques ont permis de réaliser une sommation (stacking) sur 5 à 10 impacts successifs, améliorant significativement le rapport signal/bruit, particulièrement utile dans un environnement naturellement bruité comme celui d'une carrière souterraine.

Figure 10 : Marteau de Schmidt en place sur un point source utilisé pour l'acquisition de la tomographie sismique.

3.5 Géométrisation du pilier

Afin de déterminer avec précision les vitesses de propagation des ondes radar et sismiques, ainsi que les résistivités électriques, une connaissance fine de la géométrie du pilier et du positionnement des capteurs

est indispensable. Le pilier a donc été relevé à l'aide d'un scanner laser 3D de type Faro (Figure 10), permettant une modélisation complète de sa géométrie (Figure 11). Chacun des 47 points de mesure ont donc pu être localisés avec une précision de l'ordre du millimètre.

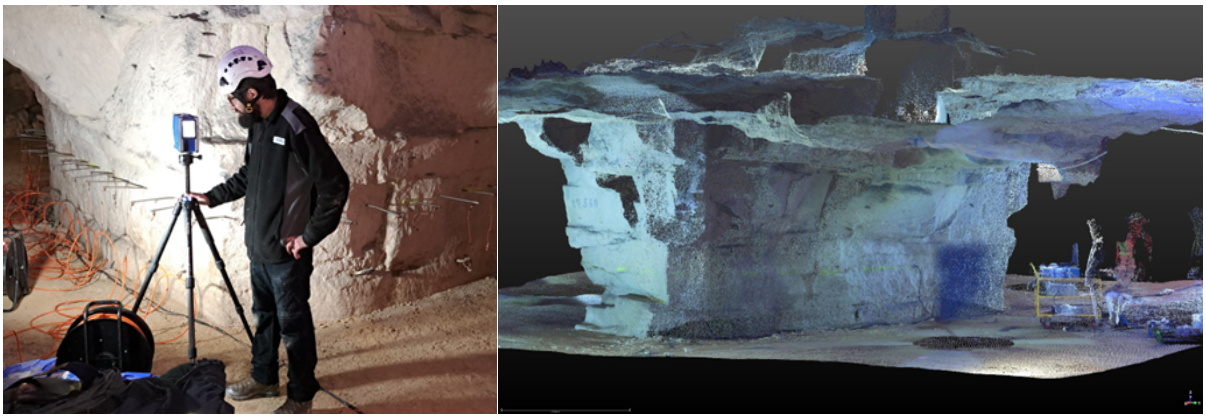


Figure 11 : Scanner laser Faro en acquisition (à gauche) et modèle numérique du pilier (à droite)

4 Méthodes de traitement

La tomographie demande de nombreuses étapes de traitement des données ; l'Ineris les maitrise grâce à des logiciels développés en interne (radar et sismique) ou développé et publié dans la littérature. Ces étapes sont présentées ci-dessous pour chaque méthode mise en œuvre.

4.1 Tomographies ultrasoniques et radar

Le traitement des données de tomographie sismique et radar repose principalement sur deux étapes : la détermination des temps d'arrivée et l'inversion de la matrice des lenteurs.

4.1.1 Détermination des temps d'arrivée

L'estimation de temps d'arrivée des ondes ultrasoniques ou radar est nécessaire pour toutes les applications nécessitant la connaissance de la vitesse des ondes traversant une structure (tomographie, diagraphie, contrôle non destructif…). L'estimation de temps d'arrivée par simple observation du signal est subjective et imprécise. Elle nécessite aussi un temps de traitement important.

Si les signaux enregistrés proviennent de la même source et s'ils traversent (approximativement) le même matériau, il est possible d'estimer le temps d'arrivée (le « pointé ») en utilisant l'opération connue sous le nom de corrélation croisée. Cette opération, exécutée sur deux signaux produit une fonction dite de corrélation, dont l'amplitude correspond à la similarité entre ces signaux. Ainsi, le maximum de la fonction de corrélation indique le décalage temporel pour lequel les signaux se ressemblent le plus. Ce décalage est quasiment identique à la différence du temps de propagation. En corrélant tous les signaux provenant d'une même émission avec un signal de référence dont le pointé est connu, il est donc possible de déterminer avec une grande précision les temps d'arrivée pour tous ces signaux.

Un programme informatique a été développé spécifiquement pour réaliser les pointés par corrélation, simplifiant et améliorant ainsi le traitement. Ce programme peut traiter tous les types d'enregistrements groupés (i.e. les données d'entrée sont représentées par les signaux enregistrés par plusieurs capteurs lors d'une émission d'onde ultrasonique par une source).

La procédure suit les étapes suivantes :

1. Sélection manuelle du signal de référence.
2. Pointé manuel de son temps d'arrivée.
3. Calcul de la fonction de corrélation croisée pour chaque signal mesuré.
4. Détermination automatique du décalage temporel correspondant au maximum de la fonction de corrélation.
5. Extraction des temps d'arrivée relatifs, affichage graphique (Figure 12) et export pour inversion.

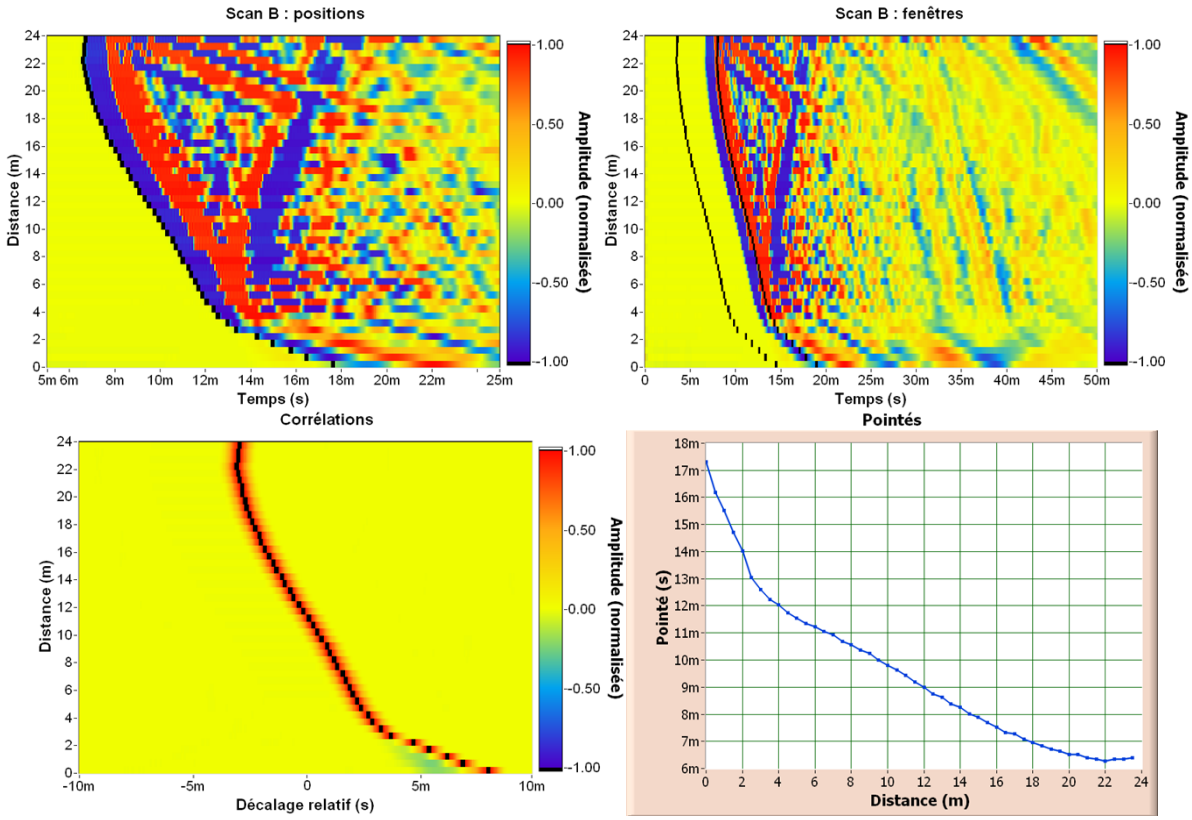


Figure 12 : Signaux ultrasoniques avec l'indication de la position de la fenêtre de corrélation (points noirs) (en haut à gauche), les signaux avec l'indication de positions des fenêtres de corrélation (séquence comprise entre les points noirs) (en haut à droite), corrélations croisées de tous les signaux avec le signal de référence. Les points noirs indiquent les maximas de la fonction de corrélation (en bas à gauche). Valeurs du temps de première arrivée avec la prise en compte du temps d'arrivée du signal de référence (en bas à droite).

4.1.2 Inversion tomographique (sismique et radar)

Un logiciel de tomographie TOMSIS® a été développé par l'Ineris pour mettre en œuvre le traitement des données et interpréter les résultats. Le module de départ de ce logiciel est basé sur l'algorithme d'inversion de QTI (Queen's Tomography Imaging) écrit en langage C. Le logiciel TOMSIS est élaboré dans l'environnement Mathematica® dont les composantes mathématiques et les interfaces graphiques sont parfaitement adaptées aux besoins du traitement des données de tomographie. En effet, ses fonctionnalités permettent un développement modulaire et évolutif de TOMSIS. Les temps d'arrivée et les positions des émetteurs et des récepteurs forment les données d'entrée.

Le volume étudié est discrétisé en une grille 2D composée de cellules, chacune traversée par un certain nombre de trajets de rayons (rais). Comme le temps de calcul n'est pas un facteur limitant dans le choix des paramètres de l'inversion des données de terrain, le nombre de cellules de la grille est maximisé jusqu'à atteindre le seuil de divergence du modèle. En effet, la taille de la matrice à inverser dépend du nombre de cellules, cependant il faut éviter que cette matrice soit trop « creuse », c'est-à-dire que chaque cellule doit être représentée par des segments d'un nombre de rais suffisant pour que le modèle converge vers une solution. Dans notre cas, la taille minimale des cellules qui a été optimisée est de 22 cm (Figure 14).

Une fois l'ensemble des paramètres optimisé, le système est inversé par moindres carrés amortis pour donner le champ de vitesse solution des temps d'arrivée du fichier d'entrée. Le champ de vitesse calculé est ensuite défini comme modèle initial avec des rais correspondant à celui-ci et à nouveau inversé jusqu'à l'obtention d'un modèle stable, c'est-à-dire suffisamment proche du modèle initial.

L'inversion du modèle du champ de vitesse suit le cycle itératif (Figure 13) autant de fois qu'il est nécessaire. Le résultat de l'inversion étant systématiquement comparé avec le modèle initial, un indicateur de convergence est estimé avec l'écart entre les vitesses initiales et résultantes.

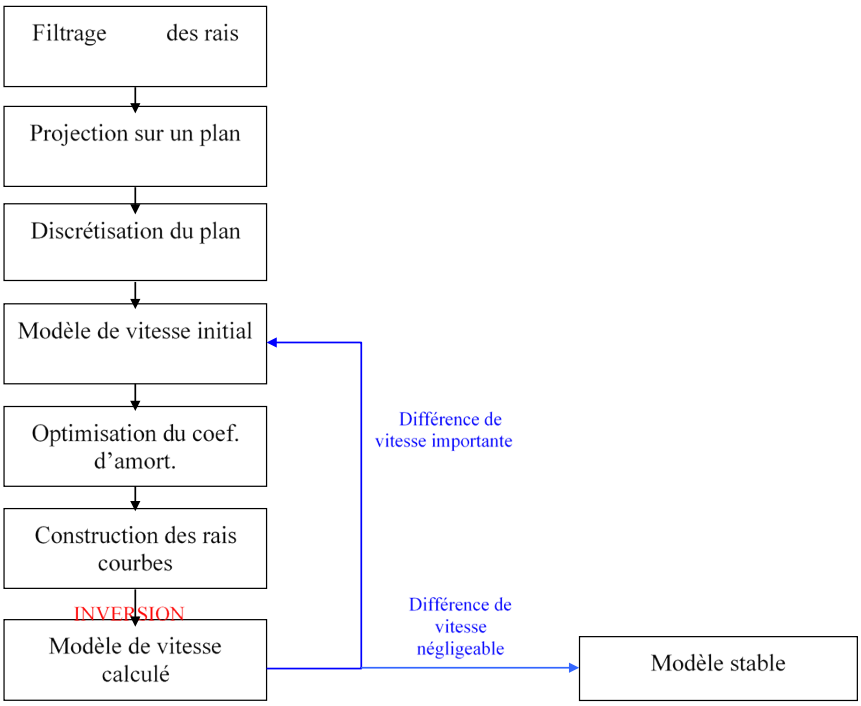


Figure 13 : Schéma de principe de convergence du modèle d'inversion tomographique.

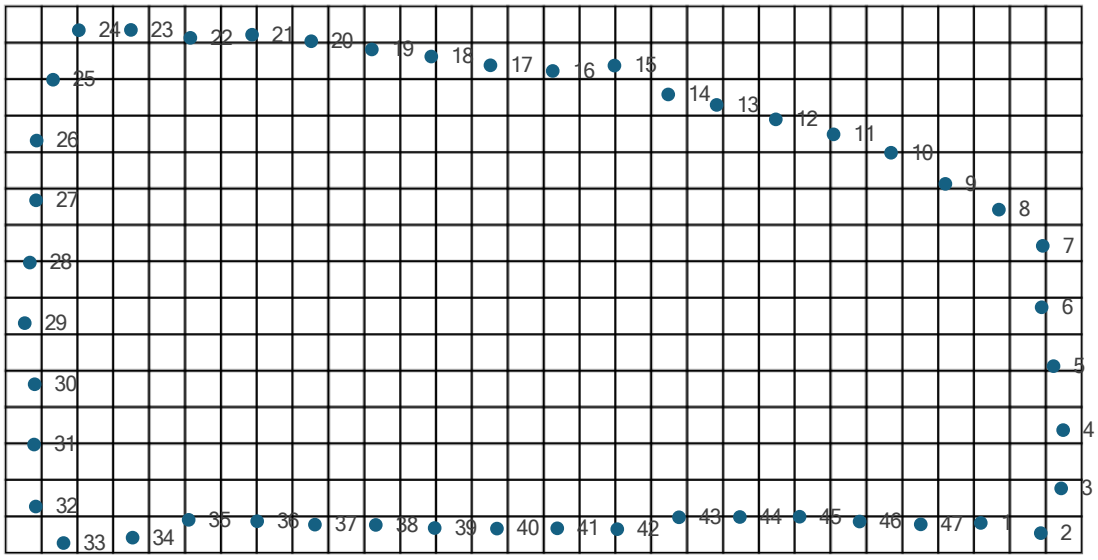


Figure 14 : Discrétisation du plan d'inversion du pilier pour la tomographie sismique et radar avec les numéros de position de tirs et de capteurs, la taille des mailles est de 22 cm.

4.2 Tomographie de résistivité électrique

Le traitement des données de tomographie de résistivité électrique a été réalisé sur le logiciel ResIPY. Il présente l'avantage d'être un logiciel open-source développé par Blanchy et al. 2020[3]. Tout comme TOMSIS®, ResIPY permet de réaliser des simulations et des inversions ; cela par une approche par éléments finis couplée à une méthode d'inversion par moindres carrés pondérés. ResIPY intègre plusieurs moteurs de calcul : R2, cR2 et R3t, qui permettent de traiter aussi bien des dispositifs en 2D qu'en 3D. Les codes R2 et cR2, basés sur les éléments finis, permettent d'intégrer une topographie complexe, ce qui est

[3] Blanchy G., Saneiyan S., Boyd J., McLachlan P. and Binley A. 2020. "ResIPy, an Intuitive Open Source Software for Complex Geoelectrical Inversion/Modeling." Computers & Geosciences.

particulièrement adapté à notre cas, compte tenu de la géométrie irrégulière du pilier. L'inversion prend en compte l'incertitude sur chaque mesure.

La Figure 15 montre les pseudo-sections obtenues avec un dispositif de configuration bipôle-bipôle. La pseudo-section est une représentation bidimensionnelle des données brutes de résistivité mesurées, avant inversion. Chaque point de mesure y est positionné de façon artificielle selon la configuration géométrique des électrodes utilisées. Elle ne représente donc pas directement une coupe réelle du sous-sol, mais permet de visualiser la distribution apparente des résistivités mesurées, appelée pseudo-résistivité.

Dans notre cas, chaque point noir sur la figure correspond à une électrode. Les mesures ont été effectuées par combinaison de deux bipôles (soit quatre électrodes) avec des écartements progressivement croissants, permettant de sonder le pilier à différentes profondeurs. La zone centrale du pilier est plus densément parcourue par des points de mesures car le nombre de combinaisons possibles entre électrodes à cette position y est plus grand contrairement aux zones excentrées.

Deux schémas de distribution des électrodes ont été testés (Figure 15) :

- un premier avec des écartements réguliers entre les électrodes ;
- un second avec des écartements irréguliers permettant des combinaisons plus aléatoires.

Pour passer de la pseudo-résistivité à la résistivité dite vraie, il est alors nécessaire de les inverser en tenant compte de la géométrie et des différents milieux traversés. Sans surprise, c'est la configuration irrégulière qui s'est montrée la plus robuste, engendrant moins d'artéfacts numériques dans l'inversion et ayant un nombre plus important de points de mesures (2325 contre 1575). C'est donc cette configuration qui a été choisie pour le reste de l'étude.

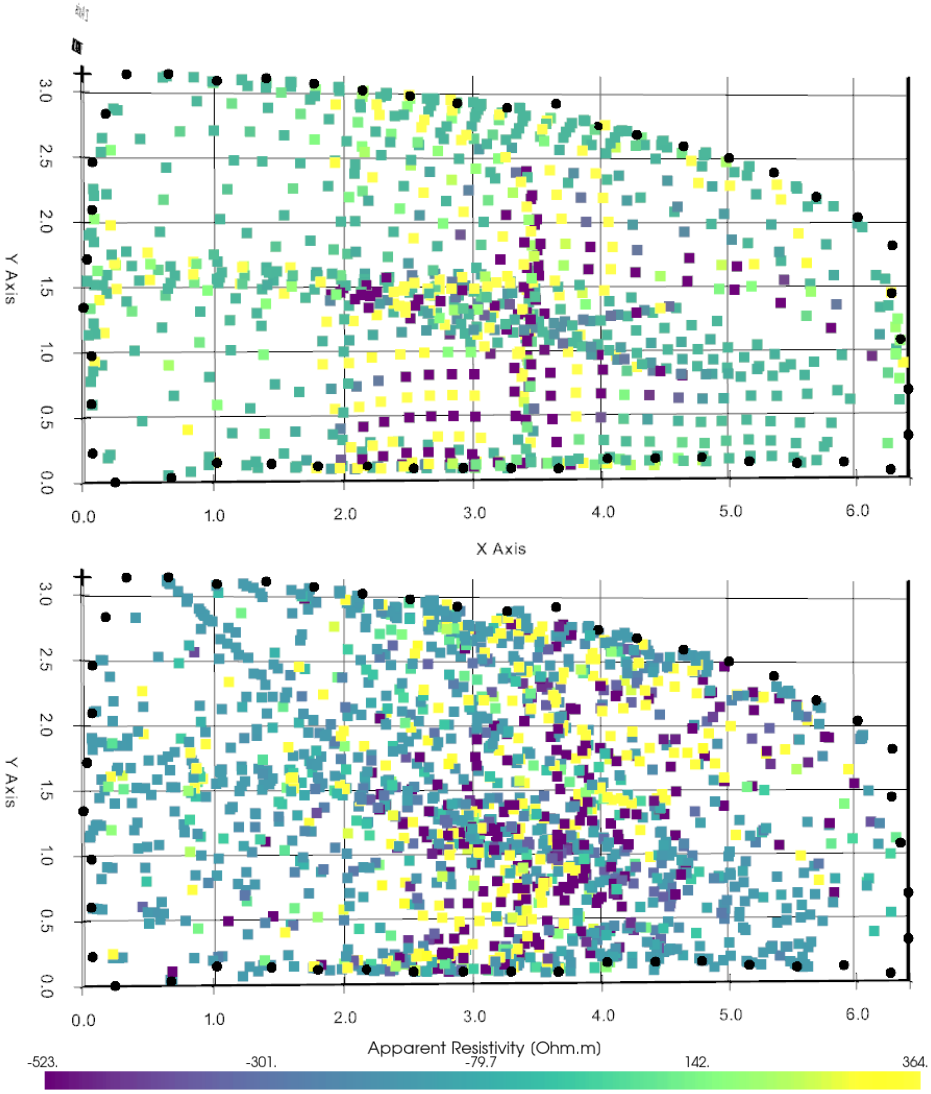


Figure 15 : Pseudo-section de l'acquisition avec une configuration bipôle-bipôle : construction régulière (en haut), construction irrégulière (en bas).

4.2.1 Modèle d'inversion

Bien que les électrodes soient placées uniquement sur la surface du pilier et suivant un même plan à environ 1 m du sol, le problème à résoudre reste un problème 3D. En effet, les lignes de courant électrique peuvent occuper un volume significatif en fonction des variations de résistivité du milieu. Cela a donc nécessité de modéliser un domaine de calcul 3D intégrant une partie de l'épaisseur du pilier (2 m). Afin d'optimiser la résolution, un domaine entre les électrodes de précisément 6,42 m x 3,14 m x 2 m (x, y, z) a été retenu, avec une maille tétraédrique moyenne de 15 cm (Figure 16), cela correspondant finalement à la résolution spatiale maximale du modèle.

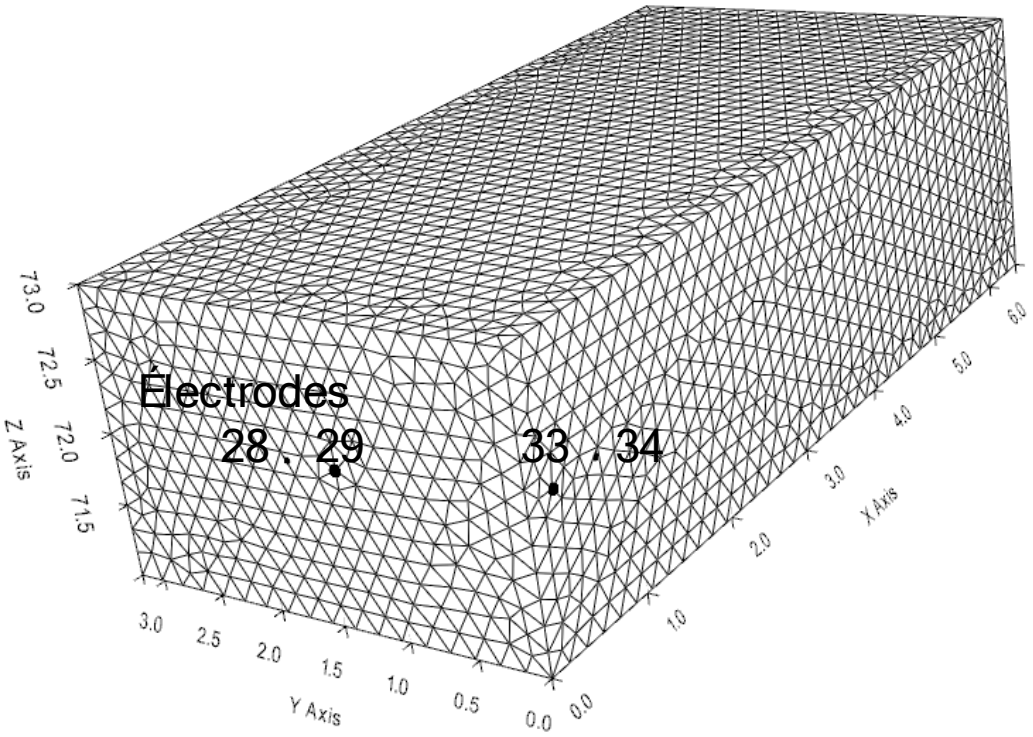


Figure 16 : Modèle utilisé pour l'inversion des résistivité apparentes.

5 Résultats

Le format des résultats des tomographies radar et sismiques sont différents de ceux de la tomographie électrique. Les vitesses sismiques et radar sont associées à des cellules régulières de 22 cm tandis que les résistivités sont associées à des nœuds espacés de 15 cm. Les images tomographiques ont donc été redimensionnées et suréchantillonnées avec une méthode de krigeage[4] et un espacement homogène de 6,5 cm afin de pouvoir les comparer et les fusionner plus facilement.

5.1 Tomographies radar et sismique

5.1.1 Rais radar et sismique

L'acquisition sismique a été réalisée sur le pourtour du pilier soit sur les 47 points de mesures utilisés en réception comme en émission. Ces points ont été espacés d'environ 22 cm les uns des autres, ce qui a permis de générer un total de plus de 2200 rais sismiques (Figure 17). La source sismique, produite par un marteau de Schmidt, a été positionnée successivement à chacun de ces 47 emplacements. (Figure 5). Quasiment toutes les arrivées ondes sismiques ont pu être pointées donnant ainsi le temps de parcours de l'onde sur ces rais. La plupart des rais présente une vitesse apparente des ondes P comprise entre 1000 et 3500 m/s avec une majorité autour de 2250 m/s (Figure 18).

Pour la tomographie radar, le nombre de rais est plus limité avec seulement 450 qui ont pu être pointés (Figure 17) car les rais les plus courts et les plus longs n'ont donc pas pu être acquis pour les raisons suivantes :

- Les ondes radar avaient plus de difficultés à traverser le pilier dans sa longueur ;
- Compte tenu du lobe de rayonnement directionnel des antennes radar, les antennes ne pouvait pas être disposée sur la même face ou sur les faces contiguës du pilier.

Les vitesses radar enregistrées sont majoritairement autour de 70 mm/ns, ce qui correspond à près d'un quart de la vitesse des ondes radar dans le vide soit une constante diélectrique de l'ordre de 16.

[4] Le krigeage réalise l'interpolation spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire. Il tient compte non seulement de la distance entre les données et le point d'estimation, mais également des distances entre les données deux à deux.

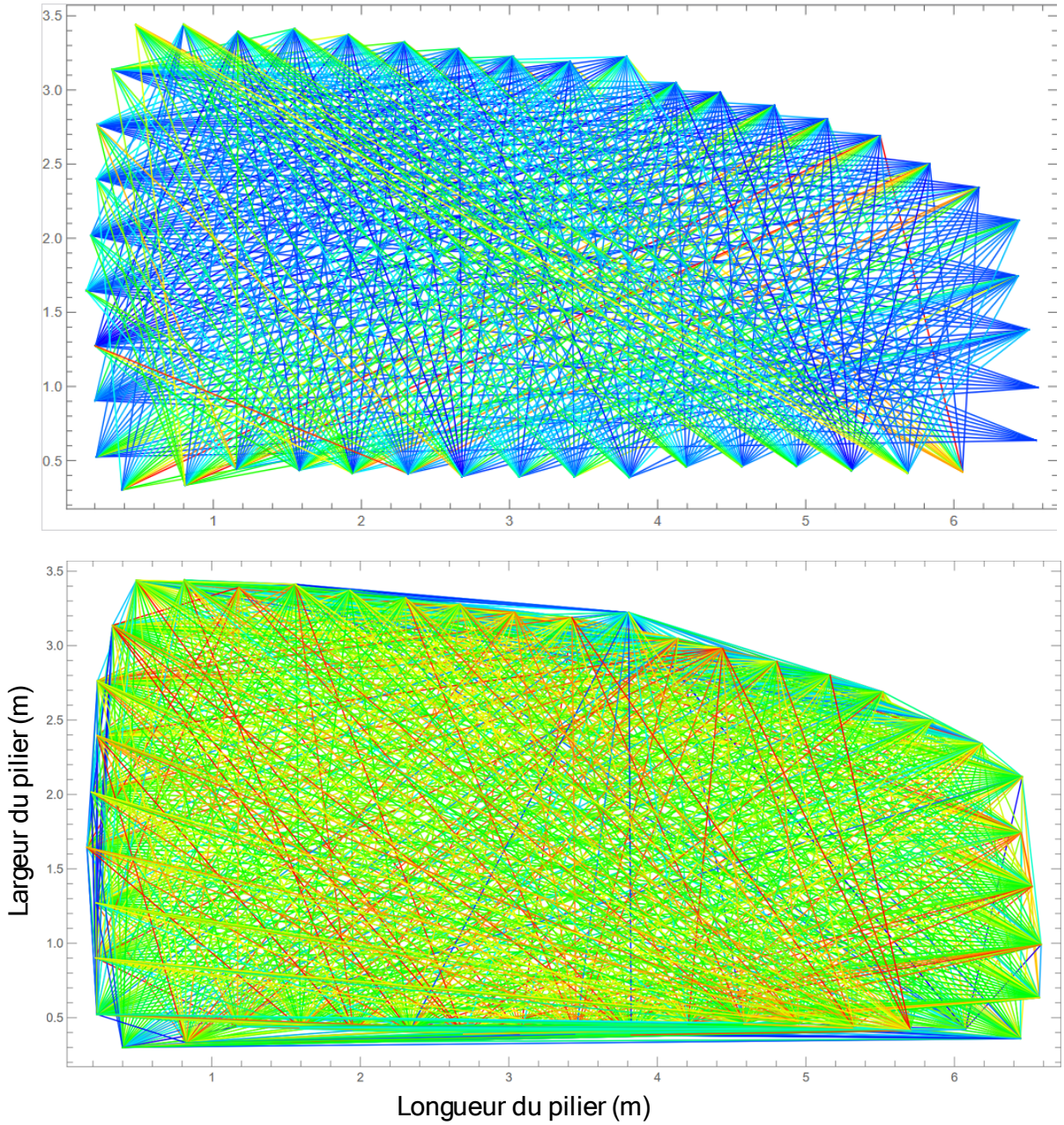


Figure 17 : Tracé des rais radar (en haut) et sismique (en bas).

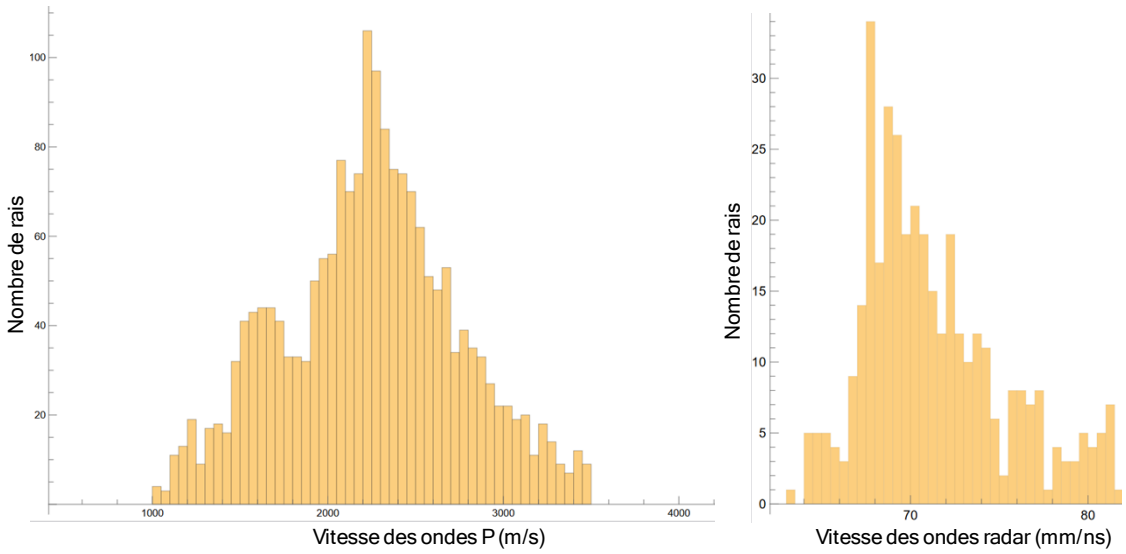


Figure 18 : Répartition des rais sismiques (à gauche) et radar (à droite) en fonction de leur vitesse.

5.1.2 Qualité des données

Il est possible d'appréhender la qualité des données brutes en traçant les hodochrones (diagrammes temps-distance) sismiques et radar. Pour un milieu homogène, ces hodochrones devraient être des droites parfaites reliant linéairement la distance avec le temps de parcours. Les exemples de la Figure 19 et de la Figure 20 montrent donc que le champ de vitesse sismique est plus hétérogène que le champ de vitesse radar. L'exemple de l'hodochrone radar montre cependant une distorsion importante dans un coin du pilier. Cette perturbation n'est vraisemblablement pas due à des variations de vitesse dans le milieu, mais plutôt à des réflexions plus énergétiques qui arrivent avant l'onde directe.

L'origine exacte est cependant difficile à déterminer, cela pourrait probablement être la traduction de réflexion des ondes sur les bordures du pilier ou/et sur des fractures internes.

Par ailleurs, une partie des pointés des premières arrivées sismiques était aberrante. La cause principale de ces anomalies est liée à l'apparition de bruit électronique avant la première arrivée de l'onde, ce qui a pu tromper l'algorithme de pointage automatique des temps d'arrivée. Ces données ont pu être éliminées par un filtrage basé sur les vitesses de propagation, en excluant les trajectoires incohérentes par rapport au reste des données.

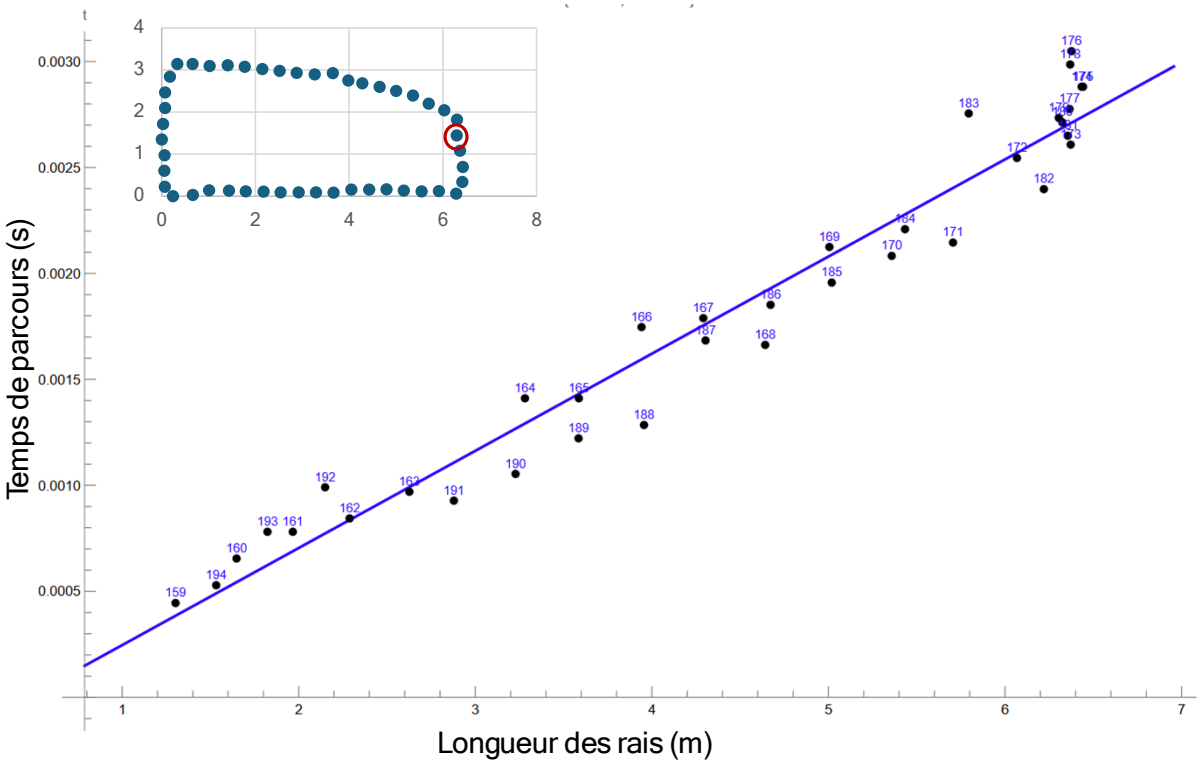


Figure 19 : Exemple d'hodochrone provenant d'une même source sismique en position 26.

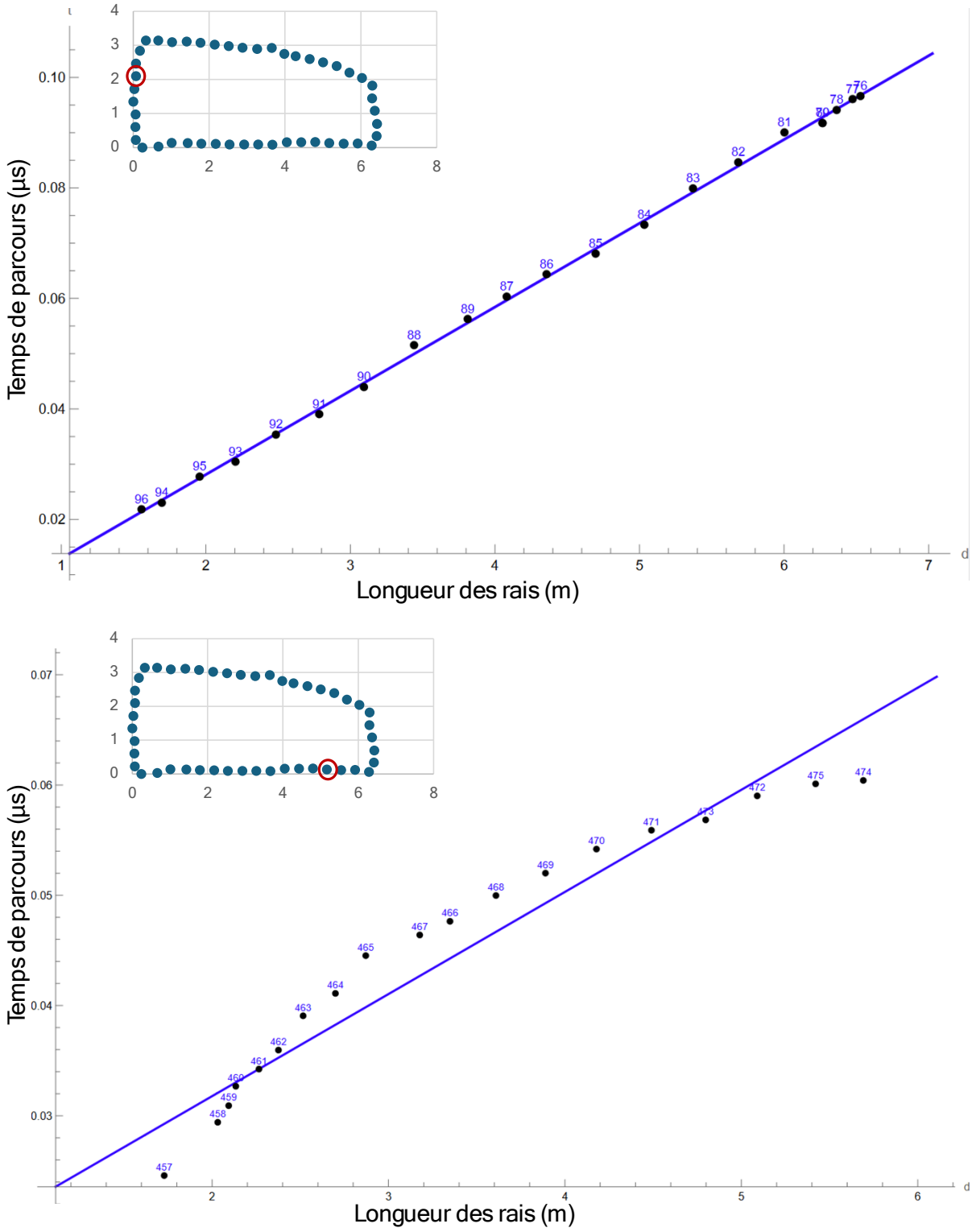


Figure 20 : Exemples de deux hodochrones provenant d'une même source radar : de la position 27 sur le graphique du haut et de la position 46 sur celui du bas.

5.1.3 Images inversées

5.1.3.1 Tomographie sismique

Les résultats de l'inversion des données sismiques sont présentés sur la Figure 21 ci-dessous avec une et deux itérations. Les deux résultats sont équivalents, la deuxième itération apporte néanmoins un contraste en vitesse plus important.

Les deux résultats mettent en évidence une distribution hétérogène des vitesses sismiques dans le pilier. Les vitesses sismiques les plus faibles (<2000m/s) se concentrent sur les parements des deux plus grandes faces du pilier. Elles pourraient correspondre à une couche plus altérée ou plus endommagée en surface liée au mode d'exploitation de la carrière. Cette couche de plus faible vitesse semble cependant moins présente voire absente sur les deux plus petites faces du pilier. La couche pourrait donc aussi être liée à une macro-fracturation.

Le cœur du pilier montre une vitesse moyenne plus élevée et finalement assez homogène témoignant d'une roche plus saine avec un module de déformabilité plus élevé. On peut noter néanmoins deux zones de plus forte vitesse (>2300 m/s) séparées par une zone de plus faible vitesse entre le centre du pilier et un des angles. Ces deux zones de plus fortes vitesses peuvent être considérées comme mécaniquement peu endommagées ou peu fissurées tandis que la zone intermédiaire est probablement altérée et/ou endommagée.

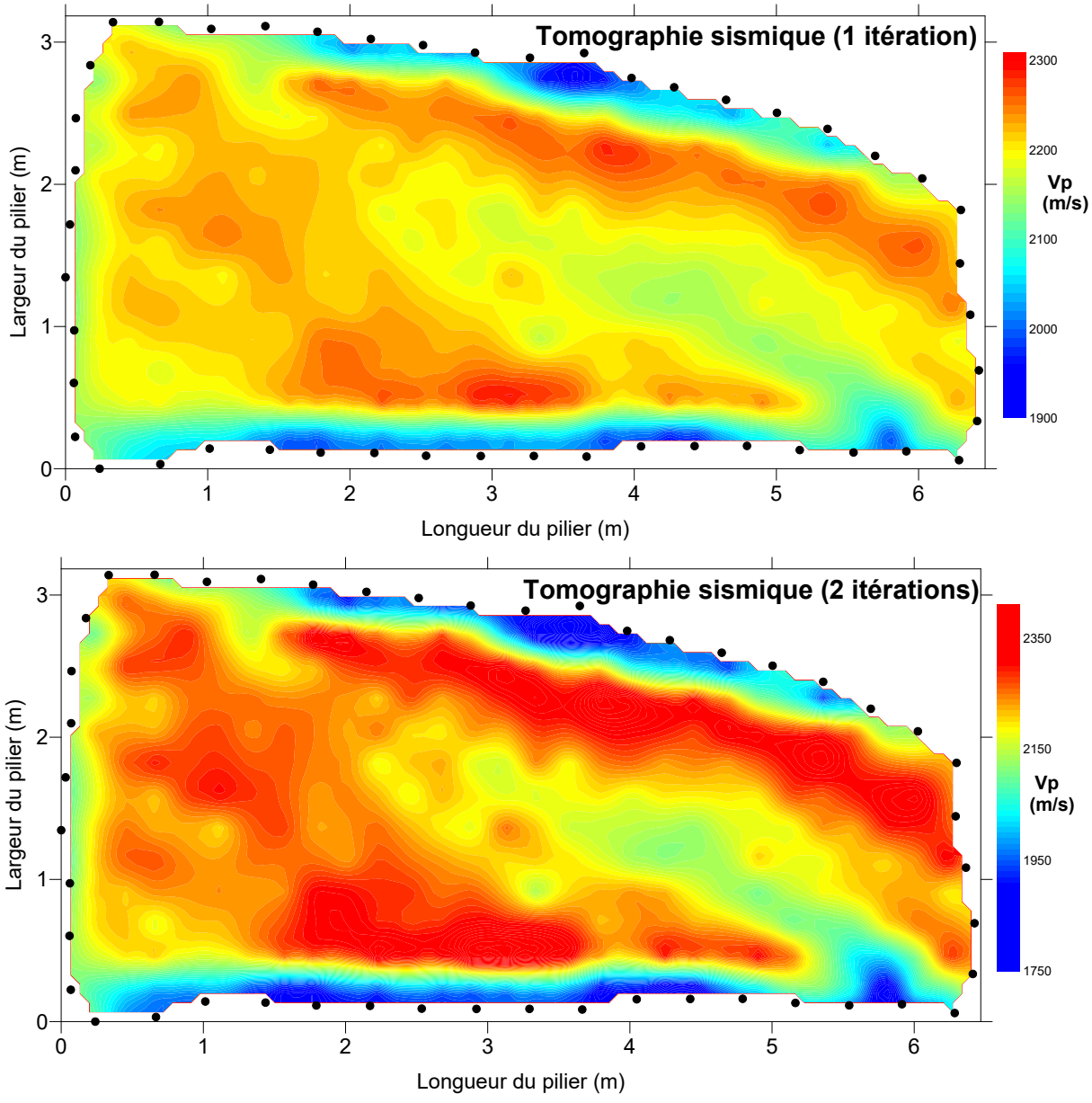


Figure 21 : Images de tomographie sismique après une itération (en haut) et deux itérations (en bas).

5.1.3.2 Tomographie radar

L'inversion des données radar montre une image tomographique (Figure 22) sensiblement différente de la tomographie sismique avec des vitesses radar globalement homogènes inférieures à 80 mm/ns sur l'ensemble de la section du pilier. Cela indique que la roche ne présente pas de fractures ouvertes ou d'endommagement marqué. Il n'y a que quelques cellules qui donnent ponctuellement des vitesses supérieures. Par ailleurs, l'image présente une forme de croix à plus faible vitesse reliant les angles du pilier. Cette forme typique est parfois liée à une anisotropie transverse de la vitesse. L'anisotropie a cependant été calculée et ne présente pas d'amplitude supérieure à 5%. Sa correction sur les données n'a d'ailleurs pas montré de changement significatif de l'image. Une autre cause pourrait être liée à l'asymétrie du dispositif radar. En effet, l'image provient essentiellement de rais traversant la portion la plus étroite du pilier à savoir la direction transverse. Les vitesses longitudinales sont à la fois moins bien explorées que les vitesses transversales et peu contraintes par des rais de surface ou plus courts. Les vitesses longitudinales sont donc plus élevées et contraignent fortement le modèle. Ce qui explique l'anomalie en croix observée sur l'image finale

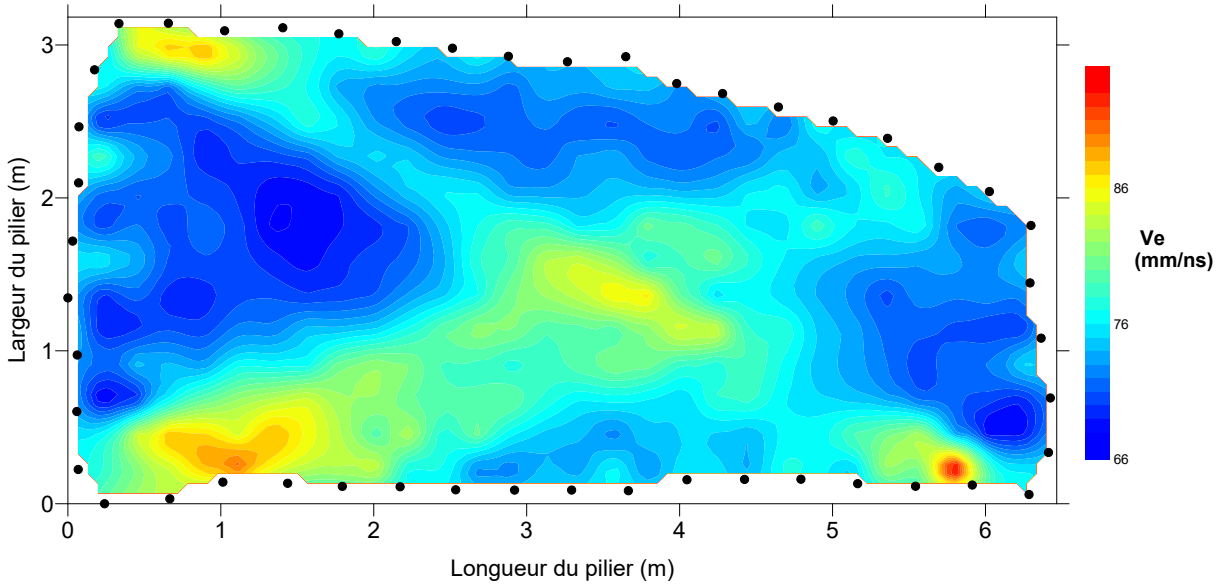


Figure 22 : Images de tomographie radar inversée après une itération.

5.2 Tomographie électrique

5.2.1 Erreurs et itérations

La Figure 23 présente les écarts entre les données de résistivité mesurées expérimentalement et les valeurs simulées par le modèle après inversion. Chaque point bleu correspond à une différence relative entre une mesure brute et sa prédiction par le modèle inversé. La ligne horizontale bleue en pointillés (à 0 %) représente une correspondance parfaite entre mesure et modélisation. Les lignes rouges en pointillés (±3 %) indiquent une plage d'acceptabilité des erreurs.

L'analyse de ces écarts révèle que le pilier présente une distribution localement hétérogène des résistivités témoignant de la présence de variations importantes dans les propriétés électriques du massif. Le nombre d'itérations optimal (temps de calcul/résultat) est de 5 (Figure 24) avec une portion de 20% à 30% (suivant les itérations) des 2325 mesures de résistivité qui ont été exclues de l'inversion. Ces exclusions ont permis de réduire l'erreur globale du modèle inversé, en éliminant les données considérées comme incohérentes ou aberrantes, susceptibles de biaiser la solution.

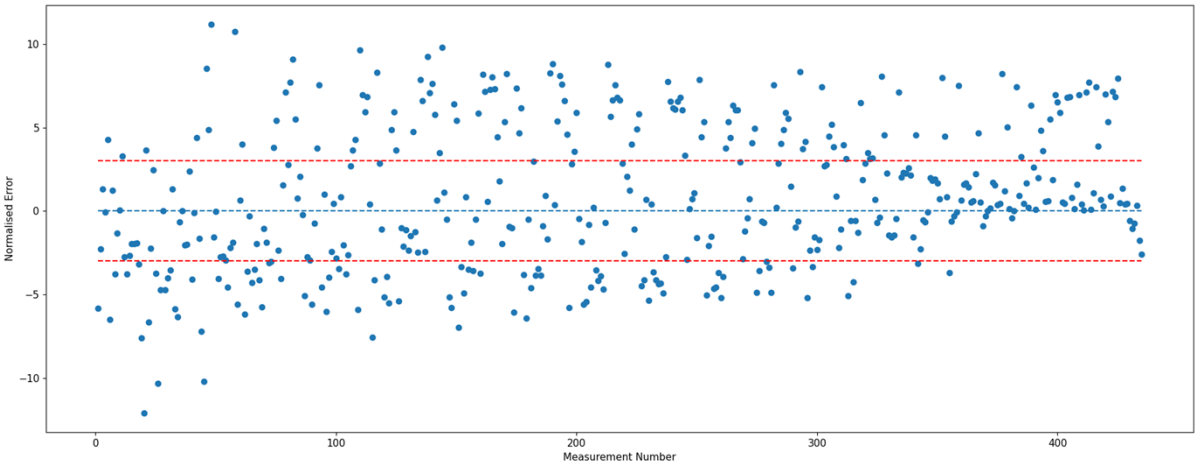


Figure 23 : Répartition des erreurs entre le modèle inversé et les données de résistivité apparente.

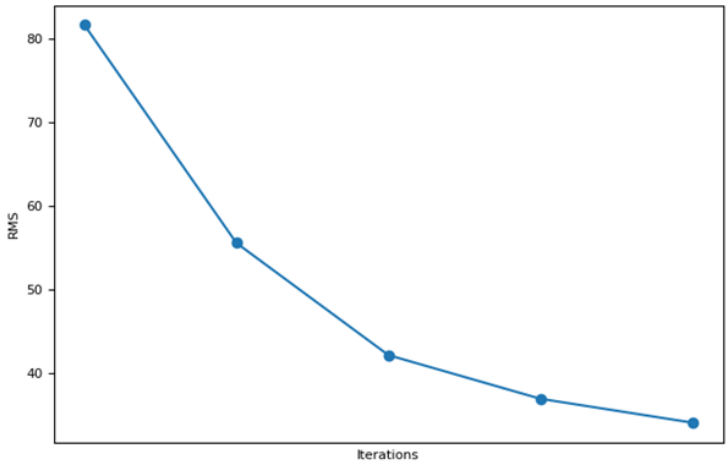


Figure 24 : Nombre d'itérations et erreur associée (%).

5.2.2 Image inversée

Globalement, la tomographie électrique montre des variations très importantes de la résistivité de quelques ohm mètres à plusieurs dizaines de milliers d'ohm mètres d'où l'utilisation d'une échelle logarithmique. La tomographie électrique après 5 itérations montre deux zones très résistantes (>3000 Ω.m) assez similaires aux deux zones à vitesse élevée mises en évidence par la tomographie sismique (Figure 25. De même, une zone moins résistante s'intercale entre ces deux zones avec un minimum de résistivité en direction d'un des angles du pilier. Comme pour la tomographie sismique, une partie du pourtour du pilier (quelques dizaines de centimètres) est peu résistante. Cette zone pourrait correspondre à une couche altérée et/ou endommagée.

Contrairement aux tomographies sismiques et radar, le pilier est très hétérogène d'un point de vue électrique. Ce qui pourrait indiquer la très grande sensibilité de la tomographie électrique aux variations physiques de la roche (endommagement et/ou plus probablement altération).

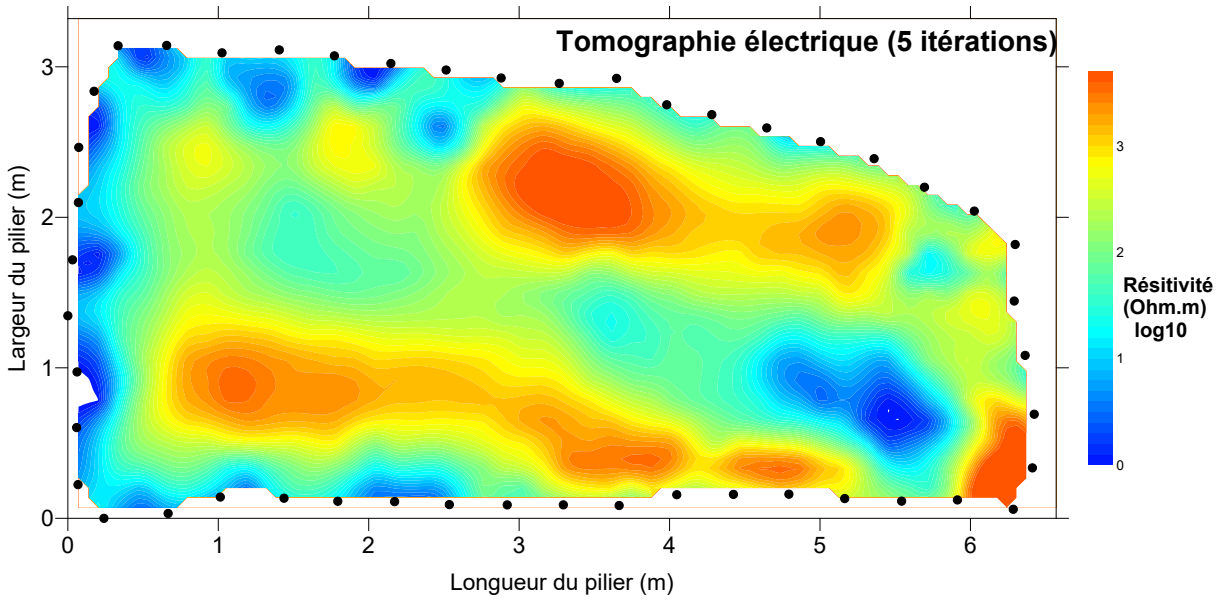


Figure 25 : Images de tomographie électrique inversée après cinq itérations.

5.3 Fusion des images

Pour comparer les 3 images tomographiques (sismique, radar et électrique), il est nécessaire à la fois de normaliser les données et homogénéiser leur échelle de variations. La résistivité par exemple varie de plusieurs ordres de grandeur tandis que les vitesses sismiques et radar varient d'un facteur 2 ou 3 au maximum. Pour rendre ces grandeurs comparables, une méthode statistique simple mais robuste est appliquée : le centrage-réduction.

5.3.1 Méthode de centrage et de réduction

En théorie des probabilités et en statistique, une variable centrée réduite est obtenue par une transformation affine d'une variable aléatoire de telle sorte que sa moyenne soit nulle et son écart type égal à un.

Centrer une variable consiste à soustraire la moyenne à chacune de ses valeurs initiales (c'est ce qui s'appelle un centrage). Cela consiste simplement en un changement d'origine, qui place la moyenne de la distribution au point 0 de l'axe des abscisses

Réduire une variable consiste à diviser toutes ses valeurs par son écart type. Soient μ l'espérance (ou la moyenne dans notre cas) et σ l'écart-type d'une variable aléatoire. Centrer-réduire la vitesse V ou la résistivité revient à calculer :

$$v = \frac{V - \mu}{\sigma}$$

Le résultat est une variable sans unité, de moyenne nulle et de variance unitaire, ce qui permet de comparer les différentes mesures indépendamment de leur nature ou échelle physique. On peut alors comparer facilement les variations de vitesses sismique et radar avec les variations de résistivité. Les valeurs des coefficients de corrélation entre variables centrées réduites demeurent identiques à ce qu'elles étaient avant l'opération de centrage et réduction (Figure 26), l'objectif étant ainsi de fusionner entre elles les tomographies de natures différentes.

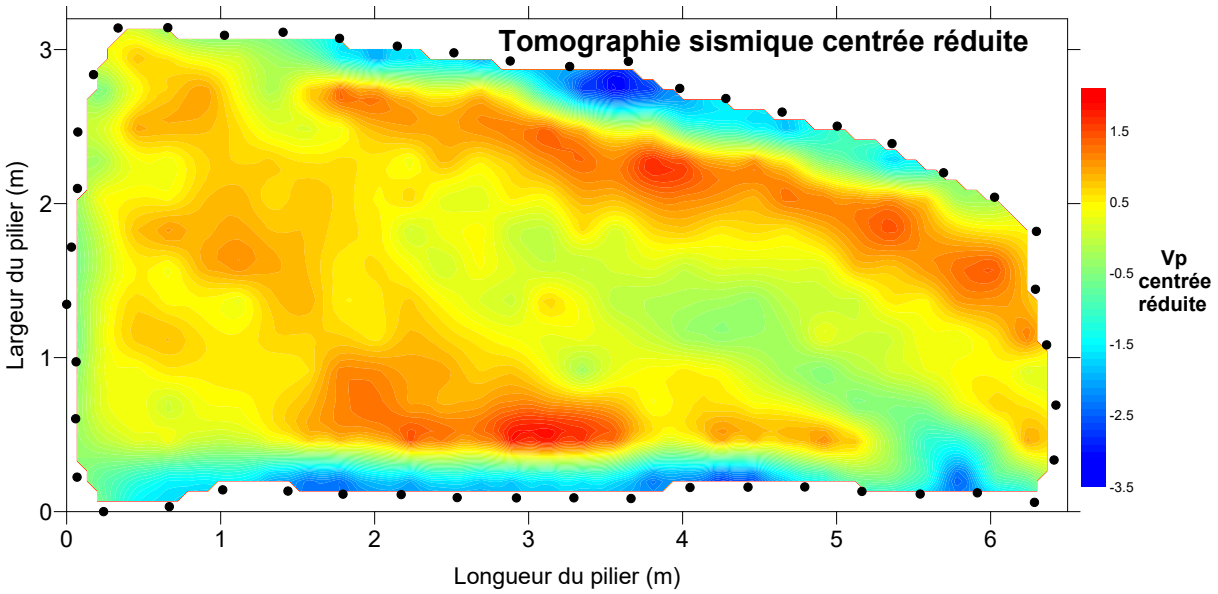


Figure 26 : Images de tomographie sismique centrée réduite comparable à la tomographie initiale en Figure 21.

5.3.2 Fusion de la tomographie sismique avec la tomographie électrique

La fusion la plus logique semble être celle des deux tomographies les plus semblables : la tomographie sismique et la tomographie électrique (Figure 27). Les deux zones avec les caractéristiques mécaniques les plus fortes (en rouge) sont renforcées, ce qui conforte l'interprétation d'un matériau localement peu endommagé ou mécaniquement sain. La couronne de faible vitesse/résistivité sur le pourtour est conservée, suggérant une altération ou un endommagement de surface. À noter que cette couronne de faibles valeurs est absente sur une face, comme déjà observé indépendamment dans la tomographie sismique. Il est possible que pour cette face, un purgeage ait supprimé la couche altérée.

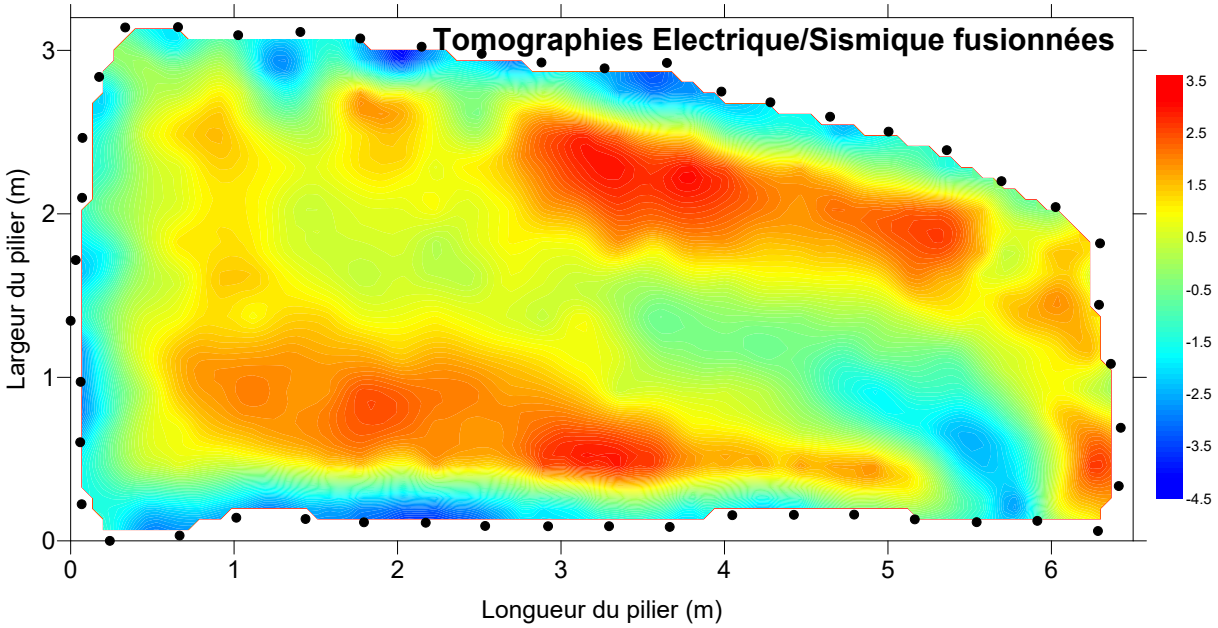


Figure 27 : Image fusionnée de la tomographie électrique avec la tomographie sismique : la couleur rouge correspond aux zones à la fois résistantes et rapides tandis qu'en bleu correspondent les zones conductrices avec des vitesses sismiques plus faibles.

5.3.3 Fusion des tomographies avec la tomographie radar

Les fusions de la tomographie radar avec la tomographie sismique (Figure 28) puis avec la tomographie électrique (Figure 29) sont plus hétérogènes que la fusion sismique-électrique. Les résultats ne sont pas totalement concordants ni avec la tomographie sismique ni avec la tomographie électrique. Cependant, ces fusions permettent de cibler la zone centrale qui semble la moins endommagée et/ou altérée, celle qui reste avec les niveaux de vitesse et de résistivités fusionnées les plus élevées.

Pour une fusion des trois tomographies (Figure 30), la tomographie radar a une influence relative diminuée (de 1/2 à 1/3) dans l'image finale qui reste assez proche de l'image fusionnée entre la tomographie sismique et la tomographie électrique. Cette dernière image donne les principales tendances.

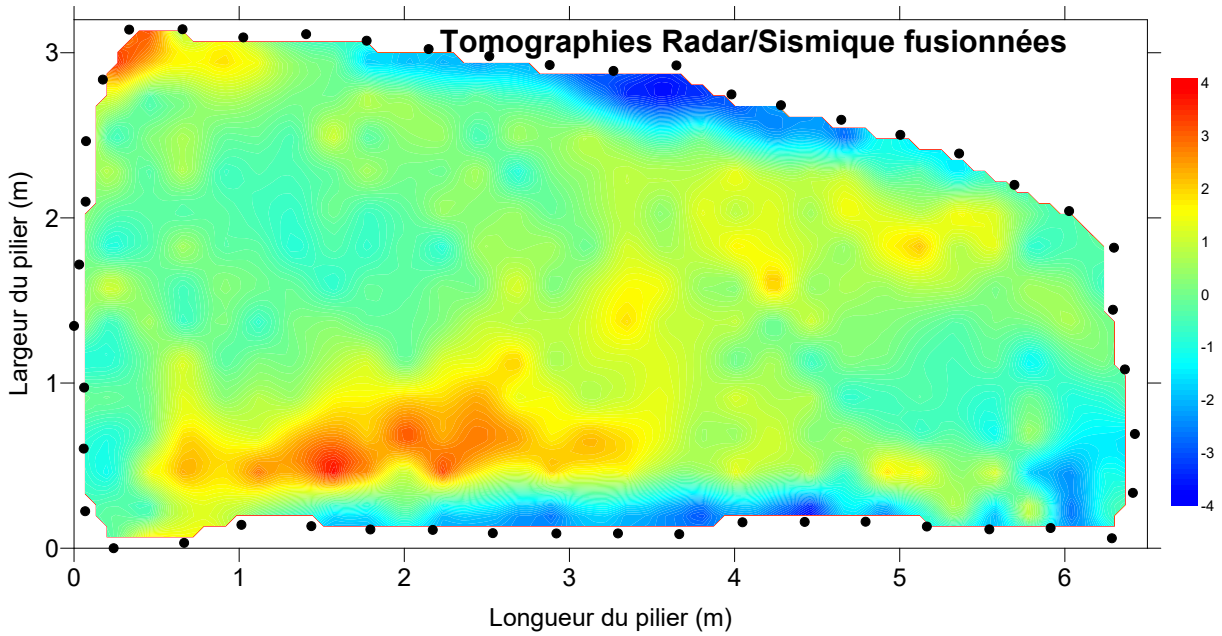


Figure 28 : Image fusionnée de la tomographie radar avec la tomographie sismique : la couleur rouge correspond aux zones rapides tandis qu'en bleu correspondent les zones conductrices avec des vitesses plus faibles.

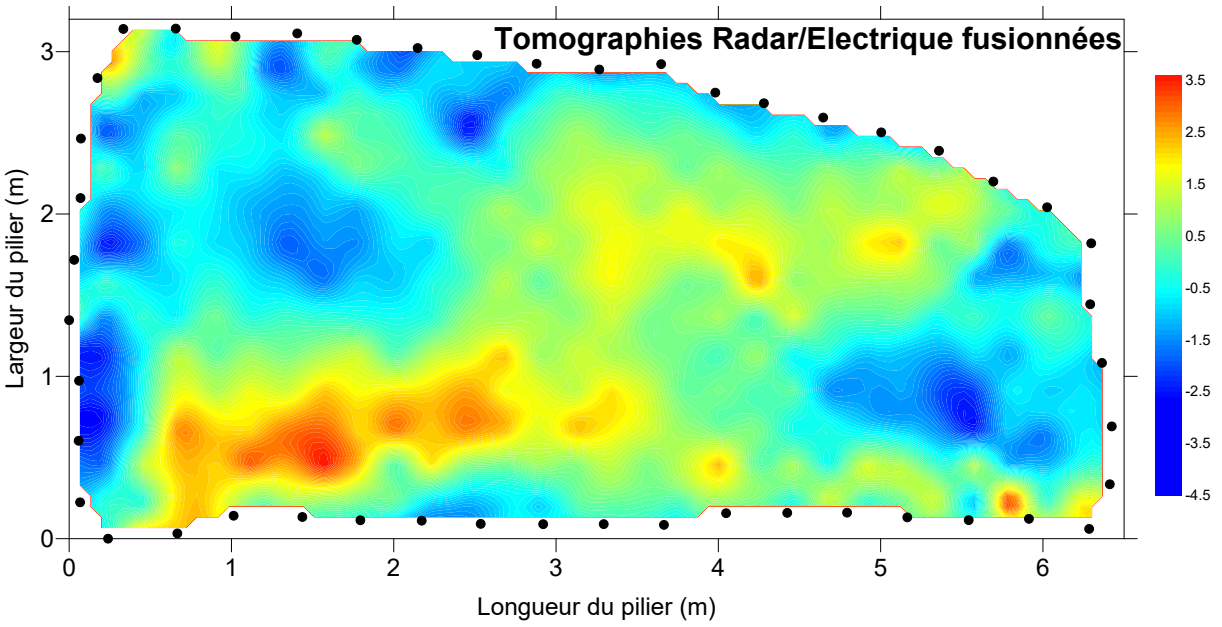


Figure 29 : Image fusionnée de la tomographie radar avec la tomographie électrique : la couleur rouge correspond aux zones à la fois résistantes et rapides tandis qu'en bleu correspondent les zones conductrices avec des vitesses radar plus faibles.

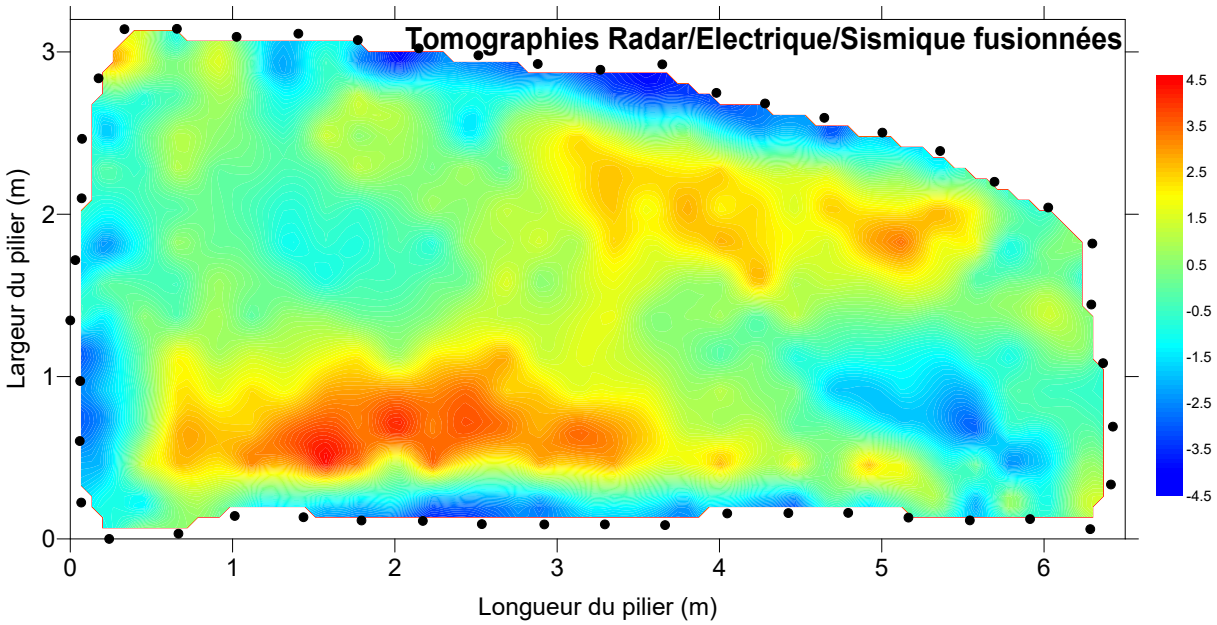


Figure 30 : Image fusionnée de la tomographie radar avec les tomographies électrique et sismique : la couleur rouge correspond aux zones à la fois résistantes et rapides tandis qu'en bleu correspondent les zones conductrices avec des vitesses radar et sismiques plus faibles.

5.4 Apport du radar en mode bi-statique

En plus d'une acquisition en transmission, la méthode radar a été mise en œuvre en mode bi-statique, une seule antenne est utilisée, elle est à la fois émettrice et réceptrice (Figure 2, l'objectif étant de détecter les réflexions des ondes sur des interfaces dans le pilier. L'antenne a été placée sur la grande face la plus plane permettant aux ondes radar de se réfléchir sur la face opposée. Cependant, l'atténuation était trop forte pour enregistrer un aller-retour dans la longueur du pilier. Le résultat se présente sous la forme d'un radargramme : image constituée de l'ensemble des traces en chaque point de mesures (Figure 31). Il n'y a pas de correction de la topographie du pilier dans ce cas. Une erreur du même ordre de grandeur de la rugosité de la grande face du pilier est comprise dans le résultat.

Les principales réflexions radar sont pointées sur le radargramme et ont été reliées pour constituer des alignements de réflecteurs ou interfaces de réflexion. Elles correspondent sans doute à des discontinuités géologiques de type fissure fermée en cohérence avec les données de tomographie radar qui donnent un milieu homogène.

Du radargramme, 5 fissures (notées F1 à F5 sur la Figure 31) ont été mise en évidence. Deux d'entre elles (F1 et F5) parcourent toute la longueur du pilier. Deux autres (F2 et F4) sont plus courtes avec une amplitude du signal réfléchi plus ténue. Cette différence pourrait être liée aux caractéristiques du joint rocheux (ouverture, contrainte, altération...). A noter que seules les fissures proches de la parallèle à la grande face du pilier peuvent être facilement mises en évidence par ce dispositif. Les fissures plus proches de la perpendiculaire n'auraient pu être mises en évidence que par des dispositifs sur les petites faces.

Le positionnement des fissures à partir du radargramme peut être corrélé avec la fusion des tomographies sismiques et électriques (Figure 32). Les fissures F1 et F2 pourraient marquer un décollement en paroi associé avec des vitesses et des résistivités plus faibles. Cette zone pourrait être qualifiée de non portante dans le cas d'un calcul d'aire tributaire[5].

La fissure F5 semble aussi être corrélée avec l'une des deux zones de vitesse sismique et résistivité forte. La zone entre la fissure F5 et le parement est probablement la zone avec les meilleures caractéristiques mécaniques du pilier. L'autre zone de vitesse et de résistivité forte pourrait aussi être contenue entre les fissures F1, F3 et F4. La zone entre F4 et F5 possède probablement des caractéristiques mécaniques plus faibles.

[5] L'aire tributaire est la part de la charge exercée par la couverture sur les piliers en place.

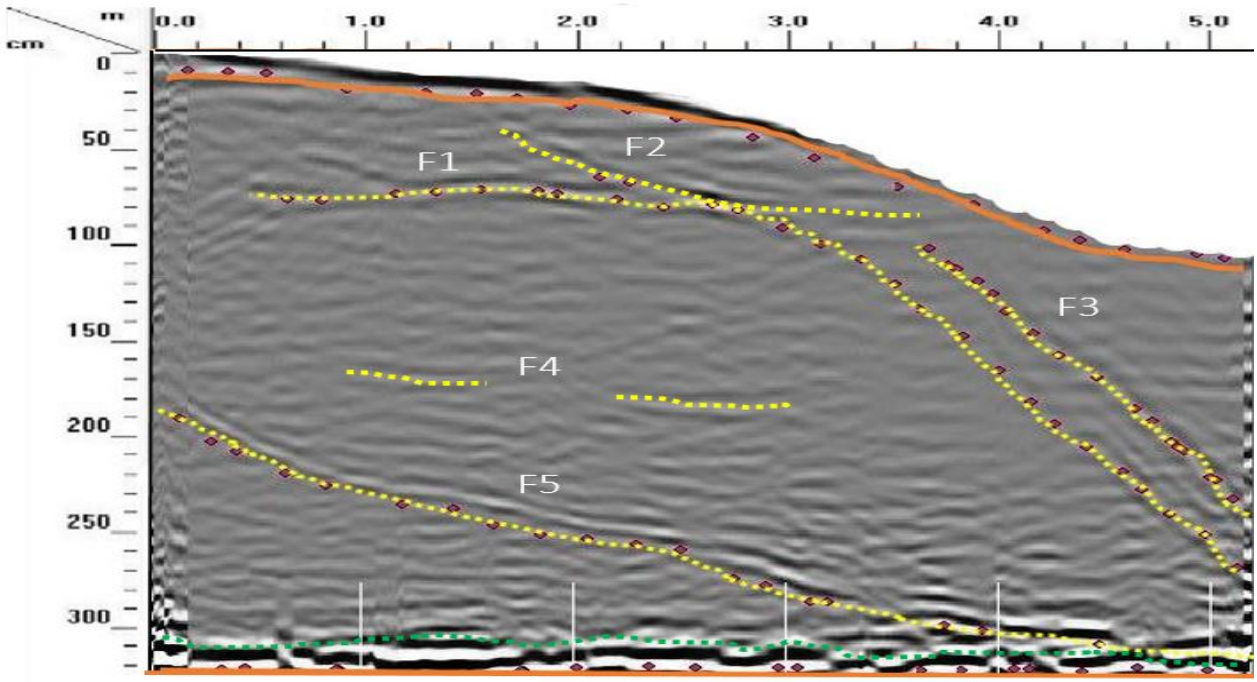


Figure 31 : radargramme réalisé sur une grande face (la plus plane) en mode bi-statique (l'antenne émettrice est aussi l'antenne réceptrice).

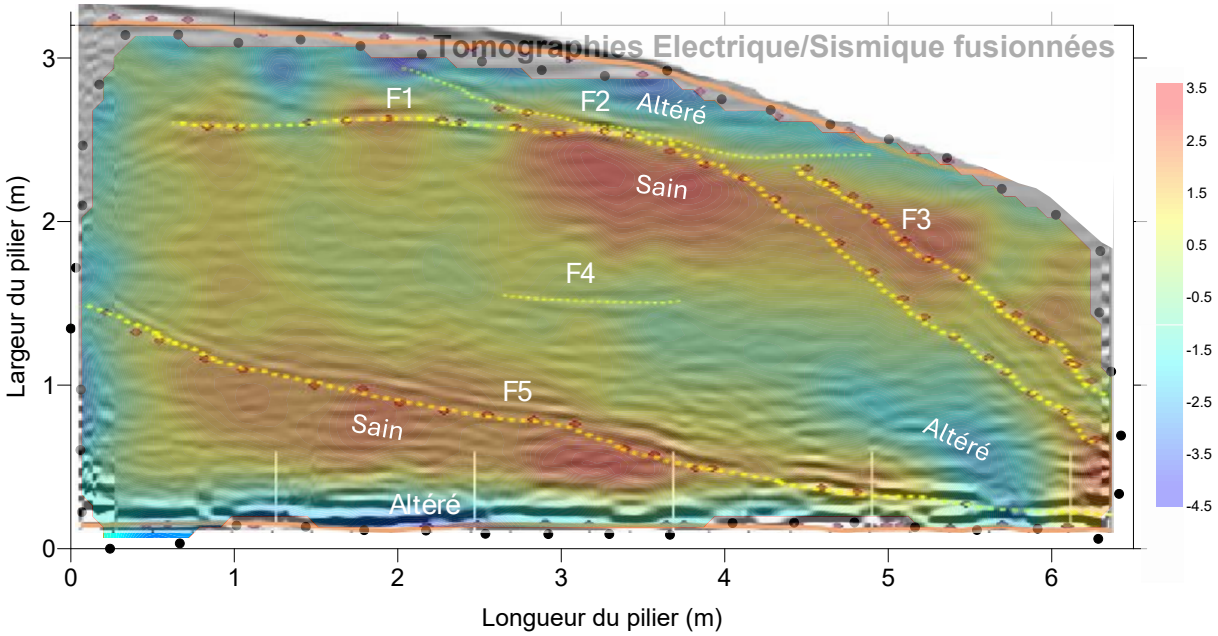


Figure 32 : Superposition de la fusion des tomographies sismiques et électriques et du radargramme en mode bi-statique (FX : fissures).

6 Conclusion

L'objectif de cette étude était de concevoir un dispositif pour estimer l'endommagement des piliers, avec 3 méthodes d'imagerie différentes : la tomographie sismique, le georadar (en mode réflexion et mode transmission) et la tomographie de résistivité électrique. Il s'agissait aussi de vérifier si la fusion de ces 3 tomographies permet d'améliorer la qualité des résultats et les informations obtenues pour estimer la stabilité du pilier.

Il a été possible de mettre en œuvre ces 3 méthodes de tomographie en utilisant les mêmes points de mesures du dispositif sur un pilier dans la carrière de Saint-Maximin. Les géophones et les électrodes ont été mis en place dans les mêmes réservations excavées dans la roche tandis que les antennes radar étaient disposées en surface. Les ondes sismiques et les courants électriques n'ont eu aucun mal à pénétrer dans un pilier calcaire de cette longueur (7 m). Les ondes radar ont cependant été trop atténuées pour investiguer l'ensemble du pilier même si le mode de transmission direct était plutôt favorable. C'est cette limitation de la propagation des ondes radar qui a engendré une asymétrie du dispositif et *in fine* un appauvrissement de la tomographie radar. La mise en œuvre de cette méthode sur un pilier moins long ou avec des antennes plus basses fréquences serait donc plus adaptée.

Les résultats de la tomographie sismique et ceux de la tomographie électrique sont assez proches. Après un centrage et une réduction des variables de résistivité et de vitesse, toutes les tomographies ont pu être fusionnées deux à deux puis toutes les 3 ensemble. Chaque tomographie apporte des informations complémentaires sur l'état du pilier. Leur fusion a mis en évidence deux zones principales de résistivité et de vitesses fortes dans le cœur du pilier qui semble indiquer des compartiments rocheux peu altérés et peu endommagés. Le pilier présente cependant une couronne endommagée et/ou altérée sur 10 à 20 cm d'épaisseur et sur ¾ de son pourtour. Le radargramme utilisé en réflexion indique en complément la présence de plusieurs fissures découplant ces zones. Le pilier n'est donc par porteur dans son ensemble.

La fusion des tomographies permet donc :

- Une détection des anomalies que certaines techniques seules ne verraient pas ;
- La couverture d'une gamme plus large de propriétés physiques ;
- Une validation croisée des anomalies détectées ;
- Une réduction des incertitudes dans l'interprétation ;
- Une modélisation plus robuste du pilier.

Pour aller plus loin, il serait nécessaire de réaliser des prélèvements dans les zones identifiées afin de corréler les paramètres géophysiques (vitesse sismique, résistivité, réponse radar) avec les niveaux d'endommagement et d'altération de la roche mesurés en laboratoire. Cette étape permettrait d'établir des relations fiables entre mesures indirectes et propriétés mécaniques, ouvrant la voie à une modélisation probabiliste de l'état du pilier. La méthodologie proposée pourrait alors être généralisée pour des campagnes de diagnostic non destructif sur d'autres structures souterraines.

7 Annexes

Annexe 1 : Réponse spectrale des capteurs hydrophoniques (fabricant)

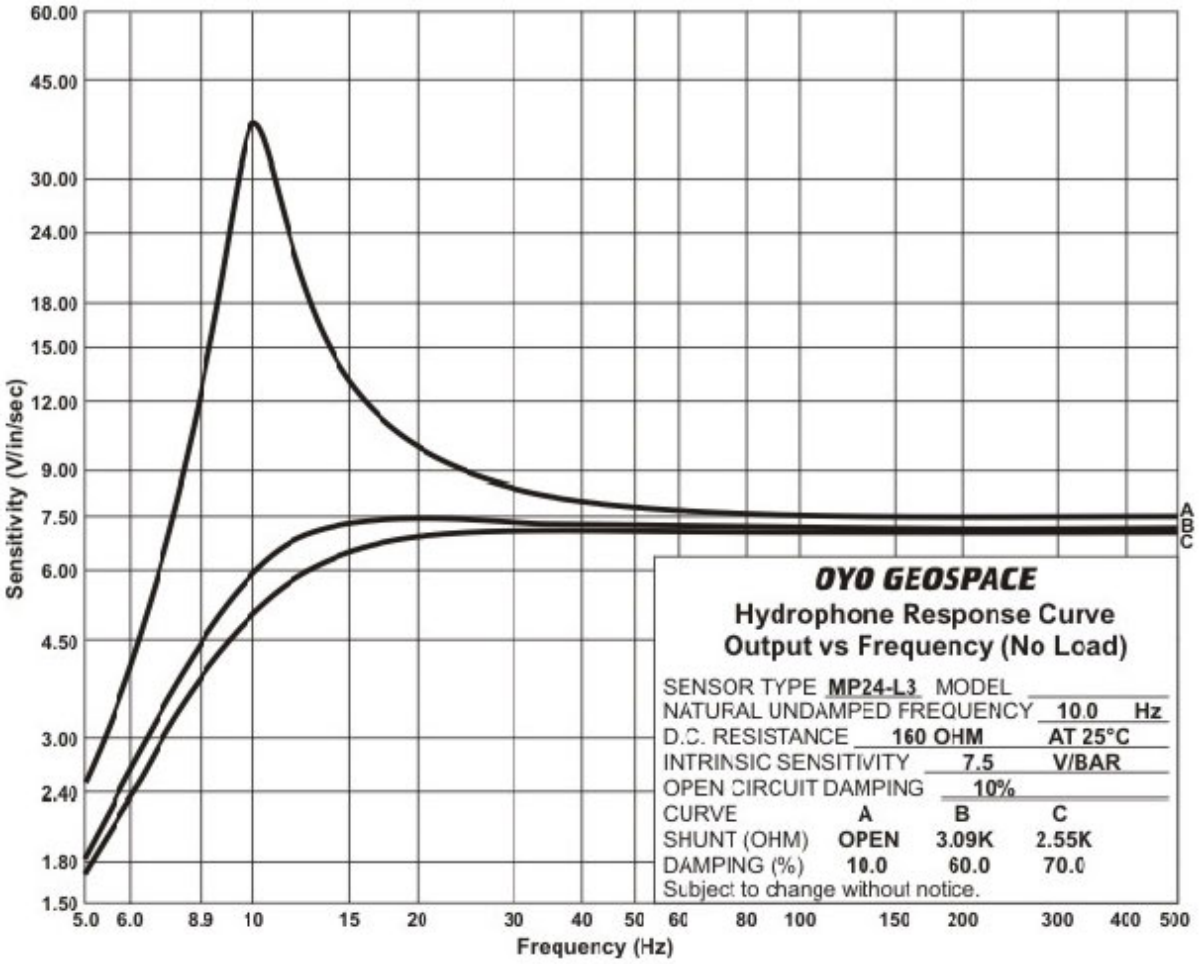
Annexe 2 : Logiciels utilisés

Annexe 3 : Equipements de contrôle et d’essais utilisés

ANNEXE 1

Réponse spectrale des capteurs hydrophoniques (fabricant)

Réponse spectrale des capteurs hydrophoniques (fabricant)



ANNEXE 2

Logiciels utilisés

INERIS	Logiciels utilisés pour une étude

Nota : *cet imprimé vierge est émis et géré par la DSE*

Cette fiche est annexée au rapport.

Un exemple se trouve en V:\QUALITE\Dse_Dse\s_Informatique_Scientifique_Exemples.

Direction opérationnelle : SIT *Unité : AS2G*

Référence étude / CGR : 230822

Logiciel	Version	Données de sortie/Résultats
MATHEMATICA	14	**INVERSION TOMOGRAPHIQUE** Fichiers *.nb et *.txt
TOMSIS	1.3b9	**INVERSION TOMOGRAPHIQUE** Fichiers *.nb et *.txt
SEISMODULE CONTROLLER	-	**ACQUISITION DES DONNÉES** Fichiers « *.seg2 » : texte tabulé contentant l'amplitude du signal en fonction du temps
LABVIEW	2024	**TRAITEMENT DU SIGNAL** Fichiers *.vi et .txt
EXCEL	2412	**REPRÉSENTATION GRAPHIQUE** Fichiers *. xls
RESIPY	3.6.2	**TRAITEMENT DES DONNÉES ÉLECTRIQUES** Fichiers projet *.resipy
RADAN	7	**TRAITEMENT DES DONNÉES RADAR**

ANNEXE 6

Equipements de contrôle et d’essais utilisés

Equipements de Contrôle, de Mesure et d'Essai (ECME) utilisés

Attention : *vérifier à l'aide du réseau, la validité du présent document papier.*

Nota : *ce document a été émis et est géré par DRS-Nancy.*

Direction opérationnelle : SIT *Unité : AS2G*

Référence étude / CGR : 230822

Désignation	Type N°ident.	Données de sortie/Résultats/Unités
SYSTÈME D'ACQUISITION SISMIQUE STRATAVISOR	MESUREUR M-EA-039	Impulsion et enregistrement de signaux sismiques Amplitude (Volt) Temps (seconde)
SYSTÈME D'ACQUISITION ÉLECTRIQUE SYSCAL PRO	MESUREUR IRIS INSTRUMENT	Injection et enregistrement des tensions électriques Amplitude (Volt) Temps (seconde)
SYSTÈME D'ACQUISITION SIR 3000	MESUREUR CEREMA	Impulsion et enregistrement de signaux Radar Amplitude (Volt) Temps (seconde)

Les différents ECME utilisés dans cette étude sont référencés dans le logiciel DECAv6. Leurs maintenances et étalonnages sont périodiquement effectués selon les modes opératoires en vigueur associés à chaque ECME.

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata • BP 2 • F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 • ineris@ineris.fr • www.ineris.fr

INERIS
maîtriser le risque
pour un développement durable