

SURVEILLANCE DU RISQUE D'INSTABILITE DANS LES CAVITES SUPERFICIELLES PAR METHODE ACOUSTIQUE.

ACOUSTIC MONITORING OF GROUND FAILURE HAZARD RELATED TO SUBSURFACE COMPLEX CAVITIES

Christian BOUFFIER¹, Mustapha BENNANI¹, Pascal BIGARRE¹

¹ INERIS, Unité Auscultation et Surveillance Géotechnique et Géophysique, Nancy, France

RÉSUMÉ – Devant les limites que présentent les méthodes de surveillance vis-à-vis du risque d'instabilité des cavités abandonnées, l'INERIS a développé une méthode innovante de surveillance par méthode acoustique. Le protocole de dimensionnement et d'implantation d'un réseau de surveillance acoustique, ainsi que les performances en termes de localisation et de caractérisation des événements détectés, sont présentés dans cet article.

ABSTRACT – Given the operational limitations of classical methods of monitoring of ground failure hazard related to complex subsurface cavities, INERIS developed an innovative method based on acoustic monitoring. The protocol of how to design an acoustic monitoring network and assess its performances in terms of localization and characterization of the detected events are presented in this paper.

1. Contexte

Les cavités superficielles anthropogéniques engendrent des risques d'instabilité variés, comme les phénomènes d'effondrement généralisé, mais peuvent également être affectées par des phénomènes plus circonscrits tels que les fontis (rupture de toit) ou les effondrements localisés (rupture d'un ou de plusieurs piliers voisins).

Ce risque géotechnique touche de nombreuses communes en France et, plus généralement, tous les pays de tradition minière, où les anciennes mines et carrières souterraines sont disséminées à travers le territoire à la fois dans les régions rurales, montagneuses ou urbanisées (Josien, 1995).

Dans le contexte particulier du risque d'instabilités localisées tels que les fontis, la progression des désordres géotechniques pose de réels problèmes car elle est extrêmement lente et peut progresser de manière insidieuse sur des dizaines d'années sans présenter de signe particulier en surface (Van Den Eeckhaut et al, 2007). À tel point que les mémoires s'estompent : le positionnement et la géométrie des ouvrages souterrains et parfois jusqu'à leur présence, sont peu à peu oubliés. La vigilance des riverains et des gestionnaires de risque baisse, favorisée par les cessions immobilières et les mutations urbanistiques. Or, ce sont les derniers mètres précédant l'apparition soudaine du cratère en surface, généralement dans les horizons les plus altérés et les moins cohésifs, qui connaissent les évolutions les plus rapides.

Plusieurs études soulignent les difficultés pour comprendre et suivre les mécanismes aboutissant à ces effondrements localisés en surface (Van Schoor, 2002, Frumkin et al, 2011, Chang et Hanssen, 2014). Diverses méthodes reposant sur des campagnes de mesures ponctuelles sont utilisées pour établir un diagnostic, parfois précis. Elles requièrent souvent un déploiement de moyens humains et matériels coûteux. Mais elles restent particulièrement inadaptées à la surveillance continue de l'évolution du

phénomène.

La figure 1 ci-dessous présente de manière schématique le mécanisme d'évolution d'un fontis.

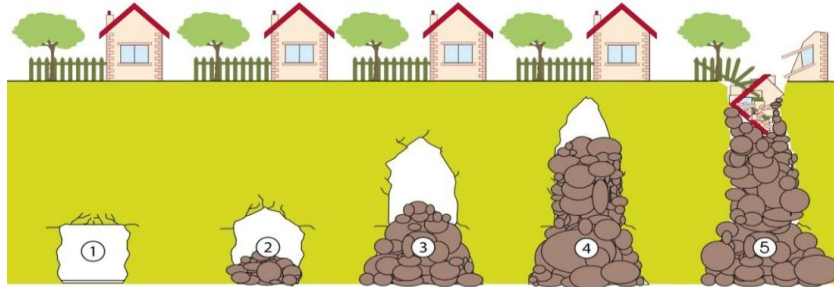


Figure 1. Mécanismes de développement de fontis au droit d'une cavité souterraine en 5 étapes. Source: Nadim et al, 2013.

Dans les cavités très étendues, les départs de fontis sont souvent disséminés sur une importante grande superficie. Le suivi de l'évolution d'un tel phénomène est d'autant plus problématique qu'il ne peut être réalisé quasiment qu'en souterrain, les signes d'évolution en surface n'apparaissant qu'à un stade très tardif. Dans ces conditions, des visites d'inspection peuvent être engagées et réitérées à intervalles réguliers, avec souvent le concours de spécialistes capables d'expertiser visuellement l'ouvrage pour détecter les zones évolutives.

Le retour d'expérience montre que les inspections visuelles présentent cependant des inconvénients majeurs, liés à la précision des diagnostics, au manque de données quantitatives, aux difficultés d'accès et à la sécurité des visites. Dans ce contexte, le développement de solutions alternatives ou complémentaires de surveillance s'est imposé de lui-même.

Le suivi des instabilités de cavités peu profondes par mesure acoustique a fait l'objet d'un programme de développement et de tests de la méthode ainsi que d'applications opérationnelles. Cet article synthétise les principaux travaux menés et les résultats obtenus, décrits dans le rapport d'étude de l'INERIS (Nadim et al, 2013).

2. Unités de mesure acoustique

La mesure acoustique est très bien documentée dans la littérature à travers de nombreuses applications d'ingénierie (Chaigne, 2003). Pour une lecture plus simple, les principales valeurs physiques utilisées en mesure acoustique sont brièvement décrites ci-après.

La pression acoustique $P_a(x,t)$ est définie comme la différence de pression générée par l'énergie acoustique avec la pression atmosphérique P_0 .

En pratique, on mesure l'énergie d'un signal acoustique par des niveaux de pression efficace $L_p(x,t)$ qui peuvent être calculés à partir de la mesure de la pression acoustique (en dB), d'une pression de référence (dans l'air, on choisit généralement $P_{ref} = 2 \times 10^{-5}$ Pa) et de la pression efficace $P_{eff}(x,T)$ (exprimée dans (1)). Pour les événements acoustiques transitoires comme considéré dans cette étude, $L_p(x,t)$ est obtenu pour une période $T=35$ ms par :

$$L_p(x,T) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{eff}^2(x,T)}{P_{ref}^2} \right) \quad \text{avec} \quad P_{eff}(x,T) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P_a^2(x,t) dt} \quad (1)$$

3. Principe de base de la surveillance acoustique dans les cavités souterraines

Le principe de base de l'écoute des ondes acoustiques aériennes est de détecter et d'enregistrer les ondes de pression induites par des événements bruyants relatifs à l'apparition ou à l'extension de désordres géotechniques tels que des craquements, écaillages, chutes de bloc ou éboulements.

Les cavités abandonnées sont habituellement des milieux silencieux, sans activité humaine, excepté parfois la présence limitée de vie animale ; idéalement, les sons peuvent être détectés distinctement à quelques centaines de mètres d'une source de bruit située dans un milieu entièrement délimité par des frontières réfléchissantes.

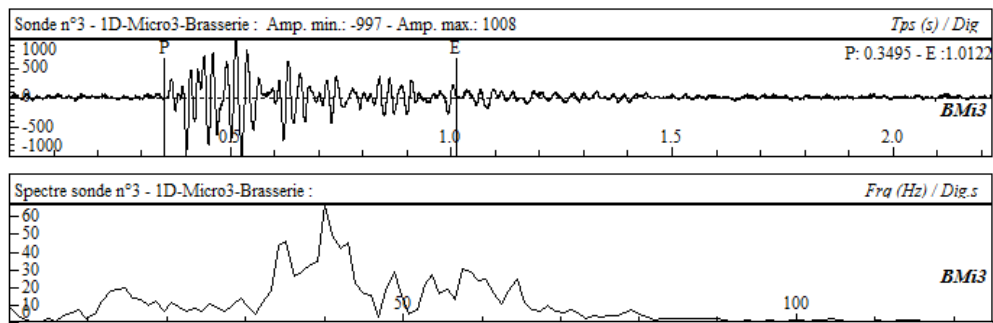


Figure 2. Signal acoustique typique lié à une chute de bloc et enveloppe spectrale du signal et niveaux de pression. Source : Données INERIS.

Les capteurs utilisés pour les mesures acoustiques sont des sondes équipées de microphones et spécifiquement conçues pour un fonctionnement en conditions souterraines relativement agressives, c'est-à-dire pour une humidité élevée et un milieu souvent corrosif. Techniquement, la sonde est montée sur un simple trépied haut, posé à même le sol, ce qui le rend très simple d'installation, facilement récupérable et transposable. D'une manière générale, les sondes sont préférentiellement installées dans les plus grandes chambres, dans des zones d'accès sûres ou aux carrefours de galeries sans désordres, afin de limiter les artefacts de proximité et d'englober une ouverture maximale aux vides par lesquels se propagent les ondes sonores.

L'occurrence de désordres bruyants à un moment donné étant non prévisible, la surveillance acoustique doit reposer sur une scrutation passive et continue. Pour autant, le fonctionnement sur seuil de déclenchement est privilégié, de manière à limiter la consommation d'énergie du système de télémessure et de pouvoir traiter des alarmes en local si nécessaire.

Selon le principe général en matière de traitement de signal, la qualité des signaux peut être appréciée sur la base du rapport signal sur bruit (SNR). Ainsi, on considère en général qu'une différence de 20 dB entre le niveau de fond sonore quasi-permanent de la cavité et le niveau de pression de l'événement détecté est nécessaire pour déclencher l'enregistrement d'un événement.

4. Étude préliminaire

Si la surveillance acoustique est un concept simple et intuitif, la méthode présente des limites d'applicabilité et le dimensionnement correct d'un réseau de surveillance doit donc être fondé sur une méthodologie éprouvée, dans le but de garantir les meilleures performances en fonction des objectifs fixés.

Comme pour tout projet de surveillance (Dunnicliff, 1994), la première étape d'une instrumentation consiste en un examen approfondi du milieu d'observation — ici les vides souterrains — et à procéder à une étude informative pour rassembler les résultats d'études disponibles et toute donnée utile relative aux zones à surveiller. Ce recollement intégrera par exemple, quand ils existent, les plans détaillés des travaux d'exploitation et des différents accès, la carte des désordres observés, la carte des aléas et des enjeux de surface et une description géologique du recouvrement tenant compte des aquifères, des conditions d'humidité et d'intrusions d'eau permanentes ou saisonnières. D'autres informations utiles seront l'activité humaine environnante ou la présence de vie animale, l'inventaire des sources potentielles de bruit, les propriétés connues des roches et des sols, les études historiques géophysiques, géotechniques et géologiques ...

La reconnaissance des sources d'artefacts est importante dans le cas spécifique de la surveillance acoustique. Tous les accès à la surface doivent être localisés (y compris les forages) et la « nuisance » sonore par ces voies évaluée. De plus, la fréquence des visites de sites doit être prise en compte pour une éventuelle implantation de contre-mesures préventives spécifiques.

5. Évaluation du bruit de fond

Plus une cavité est silencieuse, plus le seuil de détection d'un signal sonore pourra être bas et plus la sensibilité du système de surveillance acoustique sera grande. Un sonomètre est habituellement utilisé pour réaliser la cartographie du bruit de fond en galeries souterraines. Afin de réduire l'apport de bruit additionnel par le personnel lors des mesures, une utilisation du sonomètre sur un support est recommandée. Une mesure de 10 secondes par station est suffisante pour la caractérisation du bruit de fond.

En moyenne, l'activité sonore rencontrée dans des cavités silencieuses est de l'ordre de 55 à 75 dB pour des mesures sur des périodes de 10 s (correspondant à 30-40 dB pour des périodes de calculs de 35 ms).

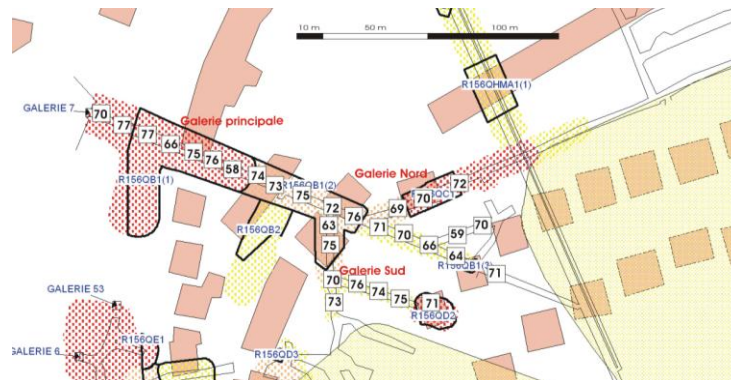


Figure 3. Carte de bruit de fond dans une ancienne mine française (fer) : les valeurs représentent des niveaux de pression efficace sur une période de 10s.

6. Évaluation acoustique des événements à surveiller

La réalisation d'une simulation de chutes de blocs à des endroits judicieux permet l'évaluation des caractéristiques acoustiques des signaux recherchés pour la surveillance, en termes de signature acoustique : amplitude du signal, durée, spectre, et niveau de pression efficace.

Ces simulations initient la mise en place d'un catalogue d'événements de référence qui doit être complété par les signaux caractéristiques des évolutions géotechniques qualifiées par la suite lors de la surveillance.



Figure 4. a : Simulation de chutes de bloc de calcaire dans une carrière abandonnée en région parisienne. b : Chute de toit évaluée à 200 tonnes enregistrée par le réseau de surveillance acoustique en place.

Par ailleurs, la précision d'un réseau est amenée à évoluer avec le temps. Dans le cas présenté dans le tableau 1, si l'événement minimal à enregistrer est une chute de bloc de quelques dizaines de kilos tombant de deux mètres, l'énergie acoustique à la source minimale à détecter en tout point de la cavité sera de 90 dB.

Tableau 1 : Niveaux de pression à la source d'événements de référence (INERIS). Ces valeurs sont données à titre indicatif.

| Masse (kg) | Hauteur (m) | Nature de la chute de bloc | Niveau de pression acoustique (dB) |
|------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 20 | 2 | Roche sur éboulis | 90-100 |
| 50 | 2 | Roche sur remblais | 100-105 |
| 150 | 2,5 | Disques de bétons sur remblais | 110-115 |
| 500 | 1,5 | Bloc de béton dans de l'eau | 110-115 |
| > 100 000 | 5 | Chute de toit massive sur remblais | > 130 |

7. Propagation et atténuation des ondes acoustiques dans les cavités souterraines

La reconnaissance de l'atténuation acoustique d'un réseau de cavités permet un dimensionnement correct du réseau de capteurs, puisque ce paramètre va permettre d'estimer le « rayon d'action » de chaque capteur et la couverture du réseau.

Il existe quatre principaux mécanismes d'atténuation des ondes acoustiques (Chaigne, 2003) : l'atténuation géométrique (limitée en espace confinée à 1 ou 2 dimensions), l'atténuation par réflexion et réfraction, qui agit très vite notamment sur les hautes fréquences (Stokes, 1845) à travers notamment la « rugosité » des parois, l'atténuation par diffusion et l'absorption de l'air.

Dans les sites accessibles, le protocole expérimental pour évaluer l'atténuation acoustique est assez simple. Il consiste à réaliser des enregistrements de signaux reproductibles (typiquement des tirs à blancs) selon un pas régulier de quelques mètres par exemple, depuis la source jusqu'à une extrémité de la chambre, avec un sonomètre. Il est recommandé de procéder à minima à l'évaluation de l'atténuation acoustique dans

chaque zone importante à surveiller.

Considérant un environnement homogène, le but d'une telle expérimentation est l'évaluation des paramètres spécifiques selon le modèle linéaire décrit par l'équation 2 :

$$L_{p\text{Recorded}} = L_{p\text{Source}} - a * D * (X_{\text{Source}} - X_{\text{Microphone}}) \quad (2)$$

Avec $L_{p\text{Recorded}}$ le niveau de pression efficace enregistré au microphone (en dB), $L_{p\text{Source}}$ le niveau de pression efficace à la source, $D(X_{\text{Source}} - X_{\text{microphone}})$ la distance entre la source et le capteur, et a le paramètre d'atténuation spécifique au milieu (en dB.m⁻¹) qui varie selon la fréquence du signal.

8. Dimensionnement du réseau

A ce stade de l'étude, toutes les informations pour une implantation adéquate du réseau de sondes sont rassemblées.

Le rayon d'action d'un microphone est obtenu par la formule suivante :

$$R_{Op} = \frac{L_{Min} - (L_{Noise} + 20)}{a} \quad (3)$$

Avec R_{Op} le rayon d'action d'un capteur (en m.), L_{Min} le niveau de pression de l'événement géotechnique minimal à détecter par le réseau dans une zone donnée (en dB), L_{Noise} le niveau de pression du bruit de fond d'une zone donnée (voir partie 5, en dB), et a le paramètre d'atténuation du milieu pour des ondes de basses fréquences (<80 Hz) d'une cavité donnée (en dB.m⁻¹).

Le réseau peut être maintenant implémenté avec un maillage qui respectera ces conditions et en tenant compte des contraintes de terrains. Par exemple, une cavité présentant les caractéristiques $L_{Noise} = 40$ dB et $a = 0,4$ dB.m⁻¹ et nécessitant la surveillance de tout événement de niveau de pression supérieur à 90dB ($L_{Min} = 90$ dB), donne un rayon d'action de $R_{Op} = 75$ m. Dans ces conditions, un réseau avec un microphone tous les 150 m permettra a priori la détection de tous les événements d'importance supérieure ou égale à L_{Min} .

Si les exigences de surveillance incluent des performances de localisation avec une précision supérieure à la maille (voir §9), ce maillage peut être resserré afin que tout événement de niveau supérieur à L_{Min} soit détecté par au moins trois microphones. Dans ce cas de figure, cela reviendrait à placer un microphone tous les 75 m.

9. Performances d'un réseau en termes de localisation de chutes de bloc

Une localisation précise des événements permet de savoir si les dégradations enregistrées sont spatialement diffuses ou concentrées sur une zone donnée, si les désordres géotechniques concernent des zones d'intérêts en surface (routes, population), et d'apporter des éléments sur la gravité de l'événement enregistré.

En fonction du besoin de précision de localisation, différentes approches peuvent être adoptées.

La localisation par zonage (maillage) permettra d'identifier la zone où s'est produit une chute de bloc grâce l'analyse des temps d'arrivées des ondes aux différents capteurs.

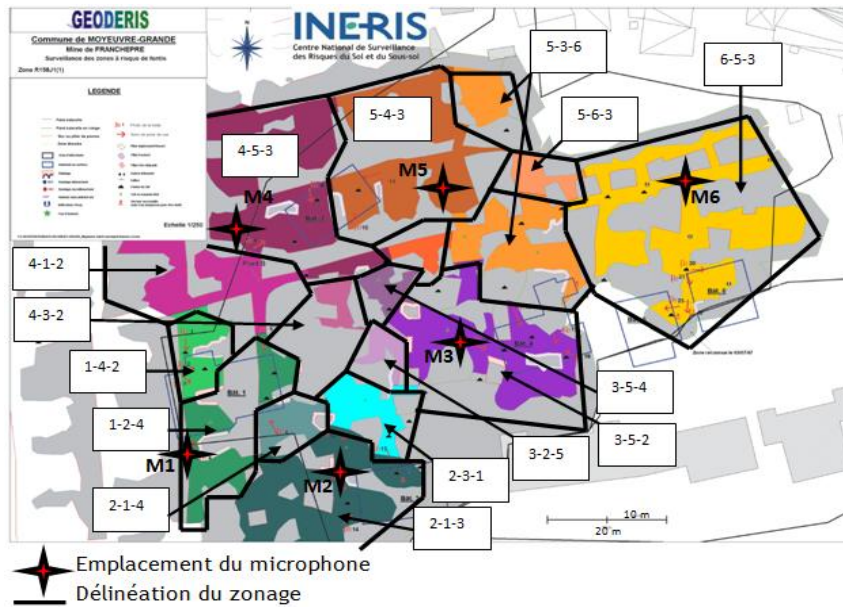


Figure 5. Zonage des premiers temps d'arrivées aux capteurs déterminé par des tirs au pistolet d'alarme. Pour chaque zone, les 3 capteurs déclenchés en premier sont indiqués.

Une autre méthode de localisation consiste à considérer une vitesse équivalente de propagation dans le milieu, indépendamment de la géométrie de la cavité. La méthode d'inversion recherchera alors le point qui minimise les différences entre les temps de trajet mesurés et calculés. Cette simplification permet d'utiliser un modèle de vitesse homogène pour obtenir des résultats d'une précision probablement suffisante à condition de bien le vérifier dans toutes les zones de surveillance.

Une méthode de localisation par inversion sur des trajets d'onde dans les seules cavités est également utilisée par l'INERIS pour les cas où l'approximation de milieu équivalent donne des résultats de précision insuffisante, voire aberrants. Elle nécessite un modèle numérique 2D de la géométrie complexe de la cavité, de sorte à contraindre les trajets des ondes calculés dans les seuls vides souterrains (méthode de fast marching, Sethian, 1999).

10. Performances d'un réseau en termes de caractérisation de chutes de bloc

La localisation d'un événement, combinée aux lois d'atténuation estimées plus haut, permet d'estimer l'énergie acoustique du signal à la source et par conséquent l'intensité propre de l'événement à la source, i.e. le volume de la chute de bloc par exemple.

Le tableau 3 présente un jeu de données (Niveau de pression efficace, distance enregistrement-source de l'événement) pour un signal enregistré sur un réseau de surveillance acoustique. L'incertitude sur la distance est estimée sur la base d'une erreur de pointé des temps de premières arrivées et sur les approximations de la méthode d'inversion.

Une évaluation du niveau de pression acoustique à la source est ainsi obtenue, ce qui permettra ensuite de comparer entre eux différents signaux acoustiques enregistrés.

Le cas particulier où moins de trois microphones ont déclenché (réseau dimensionné selon la méthodologie présentée) correspond généralement à une chute de bloc de faible énergie (masse, hauteur) ou en périphérie de réseau. Dans ces conditions, il est impossible de localiser l'événement avec précision. C'est le nombre de capteurs déclenchés (et non les niveaux de pression) qui donnera une indication sur l'importance de l'événement détecté.

Tableau 3. Estimation des caractéristiques acoustiques à la source d'un événement.

| | Micro 1 | Micro 2 | Micro 3 |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|
| Niveau de pression (dB) | 82 | 69 | 65 |
| Distance estimée à la source par inversion | 25 m (\pm 5 m) | 52 m (\pm 10 m) | 57 m (\pm 10 m) |
| Atténuation (galeries) | 0,4 dB.m ⁻¹ | 0,4 dB.m ⁻¹ | 0,4 dB.m ⁻¹ |
| Estimation du niveau de pression acoustique à la source | 92 dB (\pm 2dB) | 90 dB (\pm 4 dB) | 88 dB (\pm 4dB) |

11. Conclusions

S'il existe différentes méthodes de surveillance de cavités abandonnées, chacune répond à des besoins spécifiques et présente des avantages et des inconvénients.

Dans le domaine des mouvements de terrains gravitaires, on distingue les méthodes géotechniques directes, basées sur la mesure de déformations, de déplacement ou d'inclinaison, des méthodes géophysiques indirectes permettant d'avoir des informations sur le comportement d'un massif. L'émergence des méthodes de télédétection (optique et radar) permet entre autres le suivi en surface des mouvements sur de grandes étendues. Enfin, en matière de d'instabilité de cavités souterraines, les visites d'inspection in situ demeurent l'une des méthodes de surveillance les plus répandues.

La méthode de surveillance par suivi des ondes acoustiques, présentée dans cette étude, est spécifique aux cavités abandonnées. Elle constitue une alternative efficace, de mise en œuvre facile dans les carrières et mines abandonnées dégradées et de rapport coût-bénéfice avantageux. Avec un réseau suffisamment dense, elle permet en outre de localiser et de caractériser avec précision l'importance d'un désordre survenu dans l'ouvrage souterrain.

En revanche, sa limite intrinsèque est qu'elle ne fournit aucune information sur les déformations non acoustiques des ouvrages. Elle peut néanmoins compléter utilement un dispositif de capteurs géotechniques conventionnels, composé typiquement de cannes de convergence et de fissuromètres en paroi.

5. Références bibliographiques

- A Chaigne (2003). *Ondes acoustiques*. Les éditions de l'École Polytechnique, Palaiseau, 218 pages.
- Chang L., Hanssen R. F. (2014). Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series. *Remote sensing of environment* 147, pp. 56-64.
- Dunncliff J. (1994). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons, Hoboken, 608 pages.
- Frumkin A., Ezersky M., Al-Zoubi A., Akkawi E., Abueladas A. R. (2011). The Dead Sea sinkhole hazard: geophysical assessment of salt dissolution and collapse. *Geomorphology* 134, pp. 102-117.
- Josien J. P. (1995). Diagnostic et caractérisation des aléas (Analysis and description of risks). *Bulletin – International Association of Engineering Geology* 51, pp. 95-111.
- Nadim C., Klein E., Bigarre P. (2013). *Méthodologie de surveillance du risque de fontis en cavité souterraine par méthode acoustique*. Rapport d'étude INERIS référencé DRS-13-135992-01259B.
- Occhiena C., Pirulli M., Scavia C., Astolfi A., Puglisi G. E., Shtrepi L., Nadim C. E., Bigarré P. (2014). Detection of underground instabilities in an old limestone quarry through

acoustic monitoring. *EUROCK 2014, ISRM European Regional Symposium*, pp.609-612.

Sethian J. A. (1999). Advancing interfaces: Level set and fast marching methods. *University of California, Berkeley*.

Stokes G. G. (1845). On the theories of the internal friction in fluids in motion and of the equilibrium and motion of elastic solids. *Transaction of the Cambridge philosophical society* 8, pp.287-342.

Van Den Eeckhault M., Poesen J., Dusar M., Martens V., Duchateau P. (2007). Sinkhole formation above underground limestone quarries: a case study in South Limburg (Belgium). *Geomorphology* 91, pp.19-37.

Van Schoor M. V. (2002). Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *Journal of applied geophysics* 50 pp. 393-399.