

METHODE OBSERVATIONNELLE POUR DES INVESTIGATIONS GEOTECHNIQUES ET TRAITEMENT DE TERRAINS KARSTIQUES PAR INJECTIONS SOLIDES EN CONTEXTE URBAIN MEDIEVAL

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS AND COMPACTION GROUTING ON BUILDINGS DAMAGED BY KARSTIC SINKHOLE

Alexandre PHILIPPE¹, Hugues BOUTFOL¹, Guillaume LITOU¹, Lucile SAUSSAYE¹, Ludovic DORE¹

¹ Cerema Direction Territoriale Normandie-Centre, Blois, France

RÉSUMÉ – Au mois de janvier 2022, un affaissement karstique a conduit à la déstabilisation de deux immeubles à Orléans (45). Au cours des investigations géotechniques et des opérations d'injections solides préalables à la démolition, une méthode observationnelle a été adoptée. L'exploitation des contrôles effectués a mis en évidence le rôle des fluides de forage et permis d'appréhender l'impact de futures opérations de travaux.

ABSTRACT – On January 2022, a karstic sinkhole damaged buildings in downtown Orleans. An observational methodology was carried out during the preliminary geotechnical investigations and compaction grouting operations. The results highlighted the role of drilling fluids and made it possible to understand the impact of future work operations.

1. Introduction

Au cours du mois de janvier 2022, un phénomène de mouvement de terrain s'est déclaré dans le centre-ville historique de la ville d'Orléans (45). D'un diamètre de près de 20 m, l'évènement a amorcé la ruine de deux immeubles. L'affaissement s'est accompagné d'un effondrement localisé en pied des bâtiments (Figure 1).



Figure 1. Mouvement de terrain du mois de janvier 2022 et investigations géotechniques légères

Dans le cadre du protocole de démolition, il a été décidé par l'ensemble des parties, de réaliser une campagne d'investigations géophysiques et géotechniques de manière à caractériser l'origine du sinistre, et définir le protocole général de sortie de crise et de démolition. La campagne d'investigations a mis en évidence le contexte karstique du quartier, et la présence d'une couche de remblais historiques très sensibles aux variations hydriques.

Au préalable de la démolition, et suite à la découverte d'anomalies majeures de décompression sous le futur passage des engins, il a été fait le choix de procéder à des travaux de traitement des terrains altérés et karstifiés par injections solides. Les travaux

d'injections solides se sont divisés en 2 phases. Deux plots d'essais ont été menés sur le passage des engins (Figure 2). Ces derniers doivent permettre de traiter les anomalies principales de décompression découvertes. La suite des plots d'injections solides sera réalisée postérieurement à la démolition, cette dernière étant nécessaire pour les deux immeubles les plus sinistrés.



Figure 2. Travaux d'injections solides sur le futur passage des engins de démolition

Le contexte urbain du site est sensible. Dans les couronnes d'avoisnants des immeubles sinistrés, des bâtiments médiévaux à niveaux de fondations différenciés sont observés. Dans ce contexte, les opérations d'investigations géotechniques et d'injections solides ont été réalisées sous auscultations topographiques permanentes et vibratoires ponctuelles.

Après une présentation du contexte géotechnique du site, les dispositifs d'auscultation mis en place au cours des opérations seront présentés. Les mesures obtenues ont permis d'apprécier l'impact des différentes techniques mises en œuvre, et de mieux prédire l'impact des futures opérations de démolition et d'injections solides sur leur environnement proche. Ceci permet d'adapter leurs principes d'exécution.

2. Contexte géomorphologique et bâtementaire du site

La ville d'Orléans est située sur une assise de calcaires lacustres d'âge Aquitainien. Cette formation est surmontée des Marnes et Sables de l'Orléanais et d'une épaisseur de remblais anthropiques. Sur le territoire orléanais, le calcaire de Beauce a été largement exploité comme matériau de construction (Noury, 2018). Dans la plaine alluviale de la Loire, il a subi de lents processus de dissolution et a abouti à la création d'un réseau karstique souterrain. Bien que moins connus, ces phénomènes sont également rencontrés dans la partie sud du centre-ville historique de la ville.

Au cours des investigations géotechniques menées au printemps 2022, les investigations ont mis en évidence la suite lithologique suivante : une couche de remblais historiques de 5 m d'épaisseur, un horizon intermédiaire comprenant des argiles à rognons calcaire puis le substratum de Beauce. Par ailleurs, des anomalies de décompression majeures ont été découvertes dans le sous-sol de la rue desservant les immeubles sinistrés. Ces anomalies illustrent un contexte karstique. Elles ont conduit à procéder à une campagne d'injections solides au préalable des opérations de démolition avec deux plots d'essais.

Dans la rue desservant le secteur sinistré, les immeubles sont anciens, pour certains datant de l'époque médiévale avec des murs de façade appareillés en pierres calcaires ou à pans de bois.

3. Techniques et engins employés sur site en phase d'investigations et de chantier

Pour les phases d'investigations (Bénot, 2021) et de travaux, le choix des techniques à mettre en œuvre s'est basé sur une analyse bénéfice-risque (Philippe, 2022). Elle étudie d'une part l'impact de la technique employée vis-à-vis des immeubles sinistrés et d'autre part le niveau de sécurité des conditions d'intervention.

Les travaux d'injections solides n'ont pas été réalisés immédiatement devant les immeubles principalement sinistrés pour des questions de sécurité. Les opérations se sont en effet arrêtées devant la première couronne d'immeubles avoisinants non impactée par l'évènement. Qu'il s'agisse des reconnaissances géotechniques ou bien des travaux de renforcement de terrain par injections solides, ces opérations ont nécessité l'utilisation d'engins générateurs de vibrations (Tableau 1) susceptibles de favoriser des déplacements du sol ou des ouvrages avoisinants (Briançon, 2018).

Tableau 1 . Détails des principaux engins employés lors des investigations ou travaux

Engin / Technique	Phase	Locomotion	Impact attendu
Pénétromètre - PDG1000	Investigations	Chenilles	Vibrations
Dynaplaque 2	Investigations	Chenilles	Vibrations et déplacements du sol
Foreuse DCH170 – Hi'drill	Travaux – Plot d'essai	Chenilles	Vibrations et déplacements du sol
Minipelle 7.5 T	Travaux – Plot d'essai	Chenilles	Vibrations

Les essais au pénétromètre dynamique et les forages Hi'drill (technique utilisant les effets conjugués de rotation et de translation d'une tête traditionnelle et ceux résultant de la mise en résonance du train de tiges) pour les injections solides ont été portés à des profondeurs variant entre 10 et 25 m. Les essais à la dynaplaque n'ont sollicité que la partie superficielle du massif de terrain. Le PDG1000 et la dynaplaque sont des engins qui développent une énergie constante, ce qui n'est pas le cas de la foreuse Hi'drill pour laquelle l'énergie dépend de plusieurs paramètres réglables comme la vitesse de rotation de la tête et la fréquence de résonance appliquée au train de tiges.

4. Instrumentation et principes d'analyse

4.1. Suivi topographique

Afin de prévenir les risques d'effondrement du bâti, et de garantir la sécurité des opérations, un suivi topographique automatisé a été mis en place par Sixense Geophysics. Le système comprend deux CYCLOPS (Figure 3) qui permettent de suivre l'évolution de la géométrie des immeubles sinistrés, des immeubles immédiatement mitoyens, et de la chaussée. Le système comprend 2 stations totales robotisées installées sur 2 bras déportés fixés à des façades d'immeubles éloignés du sinistre. Les stations totales visent successivement 80 prismes de mesures répartis sur les immeubles sinistrés et une vingtaine de prismes disposés sur la voirie. L'ensemble est complété par 15 prismes de référence.

Les deux CYCLOPS réalisent des cycles de mesures en continu de 15 minutes. Chaque prisme est visé un à un de manière automatique. A la suite d'un cycle de mesures, les données sont envoyées sur des serveurs dédiés où des calculs de compensation par la méthode des moindres carrés sont réalisés. Ceux-ci permettent d'obtenir les coordonnées de chaque point visé dans un système local propre au chantier. L'exploitation des résultats permet de déterminer le vecteur déplacement de chacun des points visés par les systèmes et, par extrapolation, le vecteur vitesse. La précision du dispositif est de ± 1 mm.

4.2. Suivi vibratoire

Des mesures de vibrations ont été réalisées par le Cerema. Les immeubles principalement sinistrés et leurs mitoyens immédiats ont été équipés de capteurs tri-directionnels de vitesse de vibration raccordés à une centrale d'acquisition multivoies (ATV15 de IDETEC) permettant l'acquisition synchrone des vibrations sur les différents capteurs. Les capteurs ont été disposés sur les seuils de porte des immeubles, sur les appuis des fenêtres de immeubles ou souches de cheminée (Figure 3). Les mesures ont été réalisées conformément à la norme NF E90-020-1 (AFNOR, 2015).

Les mesures ont été réalisées par déclenchement manuel sur des acquisitions de 30 s sans aucune autre source perturbatrice.

Les mesures ont été éditées et interprétées selon les dispositions de la norme NF E90-020-1. Les signaux enregistrés et stockés ont été traités (éditions et analyse fréquentielle) avec le logiciel IDTPack. L'incertitude de la chaîne de mesure n'excède pas 8% dans la gamme de fréquence de 2 à 80 Hz.

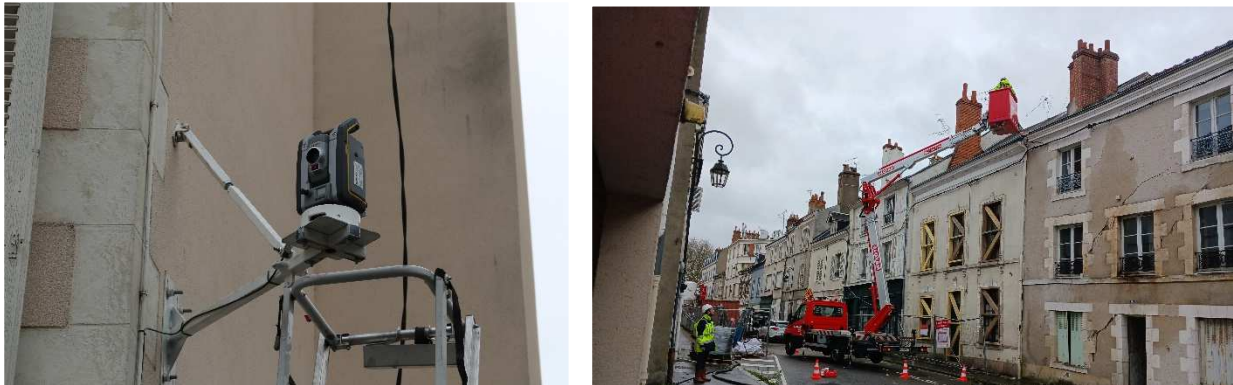


Figure 3. Mise en place des systèmes CYCLOPS et des capteurs tri-directionnels

4.3. Principe de l'analyse de l'impact vibratoire selon la circulaire du 23/07/1986

À ce jour, seul le secteur des installations classées au titre de la protection de l'environnement (ICPE) dispose d'une législation partielle concernant les vibrations (ME, 1986). La circulaire du 23/07/1986 constitue le fondement technique et juridique (via la jurisprudence) de la prise en compte des risques de dommages aux structures provoqués par les vibrations mécaniques en France. Elle est appliquée à toutes les sources vibratoires d'origine mécanique, assimilées soit à une source à impulsions répétées comme la dynaplaque ou le PDG1000, soit à une source continue comme la foreuse.

La circulaire contient notamment la définition de valeurs limites en fonction de la fréquence de la source et de la sensibilité de la structure à préserver. Dans notre cas, les bâtiments instrumentés ont été considérés en tant que « Constructions très sensibles » selon les termes de la circulaire.

Les seuils de dommages aux structures sont définis sur la base de la vitesse maximale de vibration mesurée sur éléments porteurs sur la plage de fréquence 1-150 Hz. Les résultats obtenus pour chacune des 3 sources mesurées sont exprimées en mm/s brut de mesure et sont directement comparables aux seuils admissibles de la circulaire.

5. Résultats et mouvements constatés en cours d'auscultation

5.1. Impact vibratoire des techniques d'investigations et des engins de travaux

Hormis quelques rares dépassements ponctuels, les vitesses de vibration mesurées en cours d'essais ou de forages sont restées inférieures aux seuils recommandés par la circulaire du 23 juillet 1986 pour des constructions jugées très sensibles (Figure 4). La plage fréquentielle se situe entre 4 et 100 Hz pour le PDG1000 et la foreuse, tandis qu'elle se situe entre 10 et 100 Hz pour la dynaplaque.

Des mesures de vibrations ont également été réalisées lors du passage des engins. Plusieurs phases de mesures ont en effet été réalisées en faisant circuler les engins dans la rue desservant le site sinistré. Quelque soit le type de locomotion (chenilles caoutchoucs, chenilles métalliques), les vitesses particulières de vibration mesurées sont restées inférieures aux seuils recommandés. La plage fréquentielle se situe entre 6 et 70Hz.

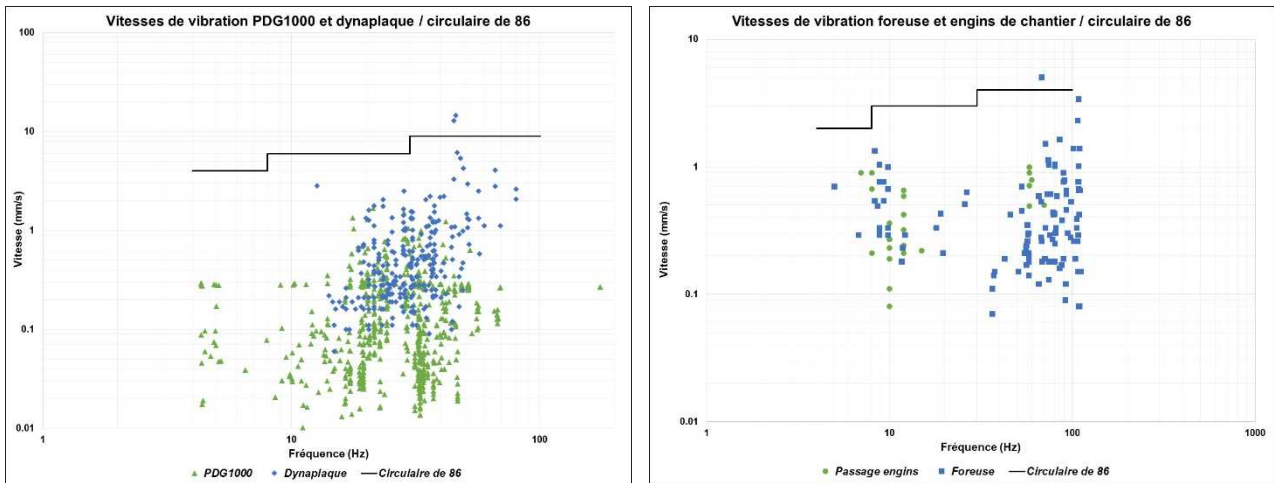


Figure 4. Résultat des mesures de vibrations

5.2. Analyse des déplacements constatés sur immeubles sinistrés et avoisinants

Au cours des investigations géotechniques préalables, aucun déplacement n'a été constaté sur les immeubles sinistrés ni leurs avoisinants. Au cours des plots d'essais des opérations d'injections solides, des déplacements ont été constatés sur l'immeuble mitoyen des immeubles sinistrés. Il s'agit de phénomènes de basculement des façades nord des immeubles en direction de la voie publique (Figure 5). L'amplitude des déplacements est significative de l'ordre de 7 mm. Plusieurs hypothèses ont été émises sur l'origine des déplacements constatés :

- Répercussion d'un mouvement bâtementaire des immeubles sinistrés sur leurs avoisinants immédiats ;
- Affaiblissement de la capacité portante des remblais d'assise des fondations des façades nord des immeubles soit par l'apport d'eau induit par la foration, soit par l'activation de processus de soutirage des matériaux dans des vides non reconnus.

Dans la mesure où l'amorce des déplacements constatés s'est révélée concomitante des phases d'exécution de forage, il est probable que ces derniers soient impliqués dans l'évènement. Au regard des résultats des mesures de vibrations, l'impact vibratoire de la technique de forage Hi'drill a été écartée et c'est le rôle du fluide de forage qui a été mis en évidence. Ce constat a conduit à arrêter le plot d'essai d'injections solides alors en cours. Les déplacements étant apparus en fin de plot d'essai (dernières lignes de forages secondaires), l'arrêt du plot d'essai a eu peu d'impact sur le protocole général de démolition et de sortie de crise.

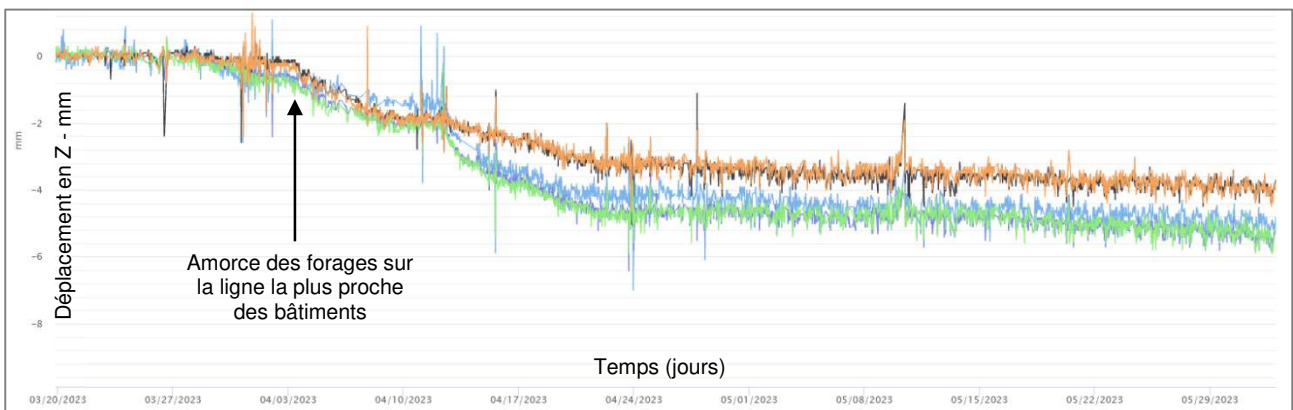


Figure 5. Courbes de déplacements (Z) fonction du temps sur un immeuble mitoyen des immeubles sinistrés

6. Prédiction de l'impact des phases futures de travaux à mettre en œuvre pour mener à bien le protocole de démolition et de sortie de crise

6.1. Détermination des lois d'amortissement des vibrations

Pour définir l'atténuation des vibrations en fonction de la distance source/récepteur, la loi d'amortissement des vibrations est déterminée suivant la formule (LRPC, 2004) :

$$V = K \times D^{-\alpha} \quad (1)$$

Avec :

- V, la vitesse particulière de vibration en mm/s ;
- K, le coefficient de site déterminé de manière empirique et statistique par la répétition des mesures de vibrations sur un même site et qui permet d'englober les différentes natures géologiques et géotechniques traversées par les ondes, les effets liés aux différentes constructions réalisées par l'homme sur le trajet 'source-récepteur' et l'énergie de la source ;
- D, la distance source/récepteur en m ;
- $-\alpha$, la pente d'amortissement.

Cette forme de loi s'applique en présence d'une source à énergie constante. Nous avons donc fait l'hypothèse simplifiée que la foreuse, était comme le PDG1000 et la dynaplaque, une source à énergie constante. La Figure 6 représente les lois d'amortissement moyenne obtenues pour chacune des 3 sources vibratoires étudiées.

En comparant les lois d'amortissement du pénétromètre et de la foreuse, les droites sont quasiment parallèles avec des valeurs de pentes d'amortissement relativement proches ce qui est cohérent. L'écart entre les 2 droites provient de coefficients de site différents qui s'expliquent par la différence d'énergie entre les 2 engins. La dynaplaque est assimilée à une sollicitation dynamique impactant uniquement la couche primaire de surface (60cm) ce qui n'est donc pas comparable aux 2 autres techniques qui pénètrent en profondeur dans le sol (jusqu'à 25m) et impactent donc les différentes couches. Elle est plus impactante à courte distance, avec un coefficient de site plus élevé, mais les vibrations s'atténuent plus rapidement.

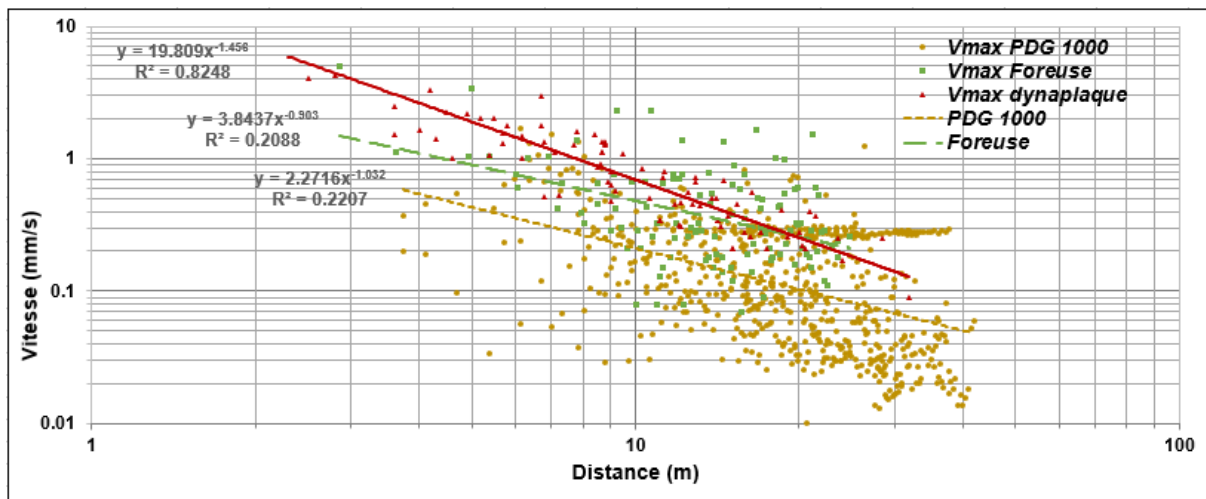


Figure 6. Lois d'amortissement des 3 sources vibratoires étudiées

6.2. Etude de l'impact prévisible d'une chute de bloc en phase démolition

Dans le cadre des opérations de démolition, il faut s'attendre d'une part, à des déplacements de véhicules lourds dans la voie de desserte des immeubles sinistrés, et d'autre part, à des chutes potentielles d'éléments de maçonnerie susceptibles de constituer des sources vibratoires impulsionnelles. Au regard du niveau de dégradation des immeubles, cet aléa est jugé hautement probable.

Le niveau de vibration généré par la chute d'un élément de maçonnerie a été étudié sur la base de l'exploitation de la courbe de vitesse de vibration particulière obtenue sur fondations en fonction du facteur d'énergie gradué (FEG). Le FEG est l'expression de l'énergie produite à la source par la chute d'une masse au sol, de la distance source-récepteur et de la nature du sol (Lukas, 1986). Il a été déterminé sur la base de l'équation (2) et à partir des données obtenues lors des essais de portance à la dynaplaque qui correspondent aux sollicitations impactant directement la surface de la voirie (Figure 7).

$$FEG = \sqrt{\frac{E}{9.8}} / D \quad (2)$$

Avec : E, l'énergie de la source en kJ et D, la distance à la source en m.

Pour apprécier l'impact de la chute d'un élément de construction, le FEG a été déterminé en calculant l'énergie potentielle d'une masse de 500 kg depuis une hauteur de 4m et tombant à 4m du pied de la façade.

Il pourrait s'agir par exemple d'une cheminée. Les données d'entrée conduisent à un FEG de 0,35 kJ.s²/m². L'utilisation de la courbe V= f(FEG) permet d'estimer que la vitesse particulière de vibration dans un tel cas de figure serait voisine de 25 mm/s soit supérieur aux seuils de la circulaire de 1986 pour des sources à impulsion répétée sur des structures très sensibles. L'estimation du niveau de vibration conduit à imposer la mise en œuvre d'un tapis amortisseur en pied des façades des immeubles au préalable à la démolition, dans le but de réduire au maximum les vibrations induites lors d'une chute d'un débris de bâtiment.

L'impact vibratoire du déplacement des véhicules lourds sur la voie de desserte du chantier est difficilement appréciable en l'état. En effet, le différentiel de gabarit des engins de travaux spéciaux en géotechnique et ceux attendus pour la démolition est important.

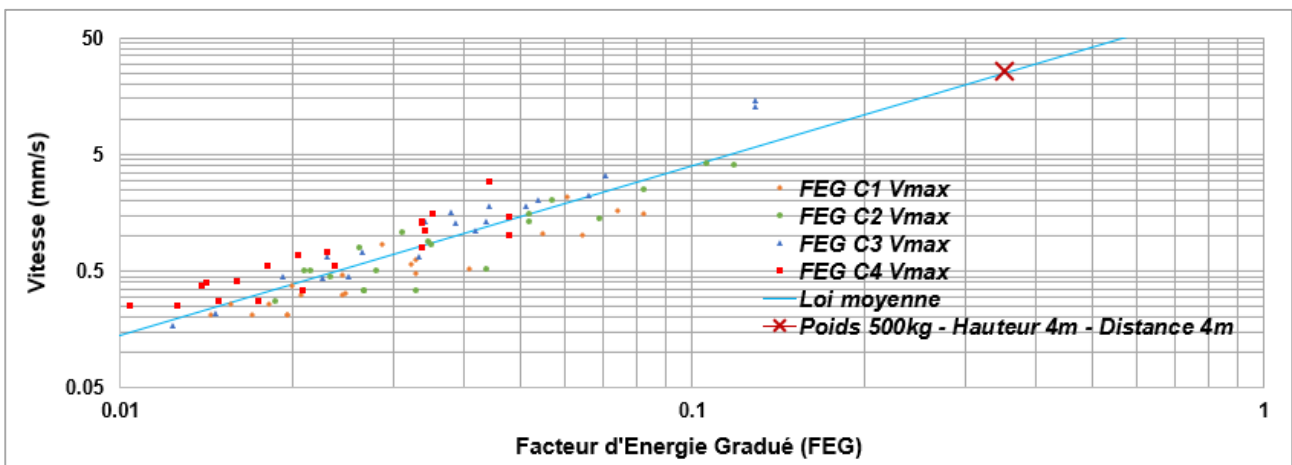


Figure 7 : Prédiction de la vitesse particulière lors de la chute d'un élément de construction

6.3. Etude de l'impact de la poursuite du chantier d'injections solides

A l'issue des travaux de démolition des immeubles, une nouvelle phase d'injections solides sera réalisée. La méthode observationnelle développée au cours des plots d'essais a permis :

- de souligner le rôle du fluide de forage dans la survenue de déplacements ;
- de déterminer une loi d'amortissement des vibrations dans le sol relative à l'action de la foreuse.

A engin de foration équivalent et à technique de forage équivalente, la loi de propagation déterminée au cours des plots d'essais permet d'estimer la vitesse de vibration attendue sur élément de fondations en fonction de la distance à la source. Les forages d'injections étant réalisés uniquement sous voirie (les trottoirs n'étant pas traités), les forages sont

distants à minima de 2 m des façades des bâtiments, ce qui conduit à des vitesses de vibrations continues de l'ordre de 2 mm/s pour une gamme de fréquence de 10 à 100 Hz. Ceci constitue des niveaux de vibration acceptables pour des constructions très sensibles au sens de la circulaire de 1986.

L'apport important de fluide lors de la traversée des terrains superficiels apparaît problématique et conduit à adapter la procédure de travaux pour limiter les apports. Des avant-trous à la tarière ont été préconisés jusqu'à l'atteinte du substratum calcaire.

7. Conclusions

Au cours des phases d'investigations et de travaux spéciaux en géotechnique, le déploiement de la méthode observationnelle a permis d'apprécier l'impact des différentes techniques mises en œuvre sur chantier. Le rôle du fluide injecté lors des forages d'injections solides a été mis en évidence, permettant d'adapter à l'issue du plot d'essai, les principes d'exécution des forages d'injections solides. Si les niveaux vibratoires mesurés au cours des opérations sont restés sous les seuils préconisés, la réalisation de mesures de vibration dès la phase d'investigations géotechniques préalable a permis de fiabiliser les lois d'amortissement des vibrations continues ou impulsives. Ces dernières ont pu être utilisées pour étudier l'impact de travaux susceptibles de générer des vibrations, en particulier les opérations de démolition. Ceci a permis, sans attendre les mesures de contrôle en phase chantier, d'orienter les principes d'exécution de ces opérations au lourd impact vibratoire. La multiplication des contrôles vibratoires en phase d'investigations géotechniques, sur d'autres sites, suivis de contrôles en phase chantier pour d'autres techniques de travaux pourrait permettre de confirmer la possibilité d'utiliser les lois d'amortissement obtenues en phase d'investigations pour estimer l'impact des travaux en phase chantier.

8. Références bibliographiques

- AFNOR. (2015). NF E90-20-1. Vibrations et chocs mécaniques. Méthodes de mesurage et d'évaluation. Partie 1 : Mesurage et évaluation des réponses des structures aux vibrations générées par les activités humaines. ICS : 17.160 – 91.120.25. 21 pages.
- Bénot R., Azémard P., Cote P. (2021). Méthodes de reconnaissance des cavités. Synthèse des reconnaissances actuelles. Cerema. ISBN : 978-2-31780-489-9. 72 pages.
- Briançon L., Liausu P., Plumelle C., Simon B. (2018). Amélioration et renforcement des sols. Tome 2. 620 pages.
- Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand (LRPC). (2004). Vibrations Générées par les Engins Mécaniques. Programme F – Opération 11F021. Auvergne Limousin. 130 pages.
- Lukas R-G. (1986). Dynamic Compaction For Highway Construction. Volume i : Design and Construction Guidelines. Report FHWA/RD-86/133. Federal Highway Administration. 242 pages.
- Ministère Chargé de l'Environnement (ME). (1986). Règlementation relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement. Règles annexées à la circulaire du 23/07/1986. 56 pages.
- Noury G., Ksibi I., Froidevaux M. (2018). Apport de la collaboration entre le Brgm et le service Prévention des Risques d'Orléans-Métropole : Intégration de la géologie et évaluation des risques d'effondrement via, un nouvel outil de cartographie souterraine en 3D. Acte du colloque « caves et celliers du Moyen Age à l'époque moderne ».
- Philippe A., Litou G., Dore L., Noury G., Atallah M. (2022). Bénéfice-risque de reconnaissances géotechniques sur bâtiment sinistré par l'effondrement de cavités. 11èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Lyon 2022.