

BENEFICE-RISQUE DE RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES SUR BÂTIMENT SINISTRE PAR L'EFFONDREMENT DE CAVITES

GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS ON BUILDING DAMAGED BY COLLAPSE OF UNDERGROUND CAVITIES

Alexandre PHILIPPE¹, Guillaume LITOU¹, Ludovic DORE¹, Gildas NOURY²,
Mohja ATALLAH³

¹ Cerema Direction Territoriale Normandie-Centre, Blois, France

² Brgm, Orléans, France

³ Sixense Geophysics, Nanterre, France

RÉSUMÉ – Le 10 novembre 2020, un effondrement de terrain a conduit à la déstabilisation d'un bâtiment dans le centre-ville d'Orléans. Une phase d'étalement provisoire est décidée avec au préalable une campagne d'investigations géotechniques. Si les sondages effectués apportent des éléments précieux d'aide à la décision, ils ont toutefois conduit à une accélération temporaire des mouvements à l'œuvre. Le cas d'étude rappelle l'importance d'étudier le bénéfice-risque de l'opération de reconnaissance au préalable à son exécution.

ABSTRACT – On November 10, 2020, a sinkhole damaged a building in downtown Orleans. A provisional shoring phase was decided, for which a preliminary geotechnical investigations campaign was carried out. While the drillings provided valuable information, they also led to a temporary acceleration of the displacements measured on the building.

1. Introduction

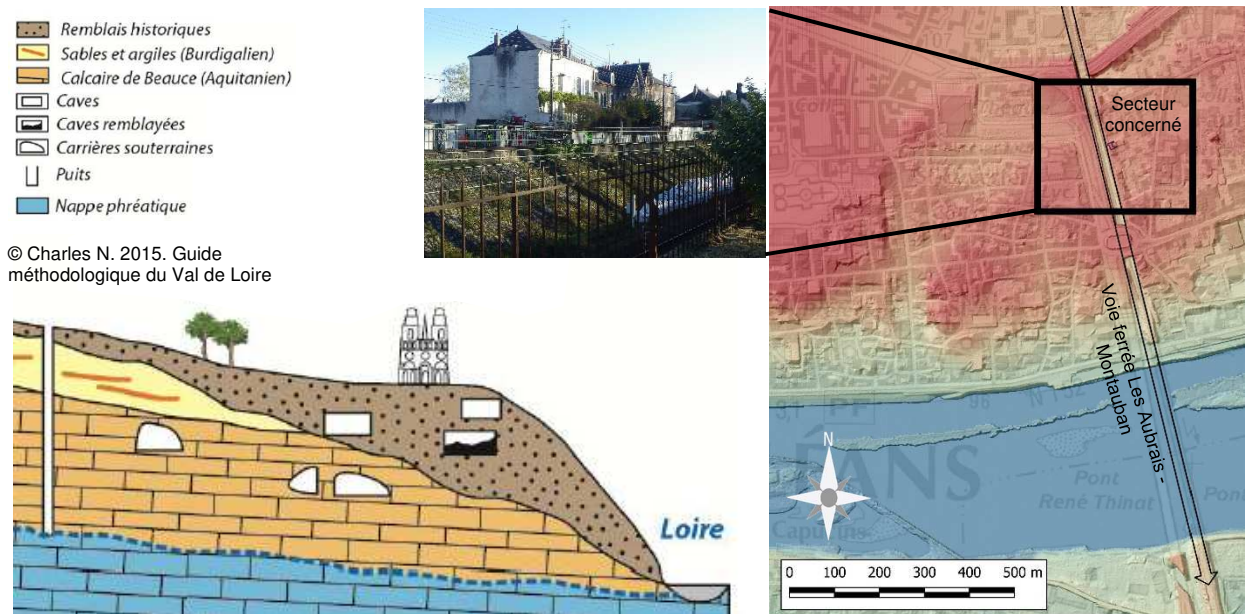
Le 10 novembre 2020, un effondrement de terrain est survenu dans le centre-ville d'Orléans en lien avec l'évolution de cavités souterraines anthropiques. Cet effondrement s'est produit dans un contexte urbanisé et a engendré des dégradations sur un bâtiment d'habitation, amorçant un phénomène de basculement d'un des pignons de la structure vers la voie ferrée voisine. Les premières expertises ont conduit à orienter les mesures de prévention vers des systèmes d'étalement provisoires. Préalablement à leur pose, une campagne de reconnaissance géotechnique a été diligentée sous monitoring du bâtiment.

Le suivi automatisé des structures au cours de la campagne de reconnaissance géotechnique a permis d'apprécier précisément l'impact de l'exécution des sondages sur la stabilité du bâtiment sinistré. Le retour d'expérience de cette campagne de reconnaissance peut apporter des éléments précieux d'aide à la décision pour traiter des situations périlleuses similaires.

2. Contexte général et effondrement du 10 novembre 2020

2.1. Contexte général

Sur le territoire orléanais (45), le calcaire de Beauce a été largement exploité comme matériau de construction. Cette exploitation s'est effectuée par le biais de carrières souterraines dont l'accès s'effectue par des descenderies ou des puits verticaux. La partie nord du territoire communal est ainsi impactée par un fort aléa cavité souterraine en lien avec des vides anthropiques (Figure 1). Cet aléa est bien connu sur Orléans et notamment dans le secteur de la tranchée Saint-Vincent, un déblai réalisé pour permettre le passage de la voie ferrée Les Aubrais-Montauban.



2.2. Effondrement et déstabilisation d'un bâtiment d'habitation

Le 10 novembre 2020, un effondrement de terrain est survenu au niveau d'un bâtiment jouxtant la tranchée Saint-Vincent et une voie publique adjacente. Il vient se positionner à l'aplomb des fondations du pignon du bâtiment. L'effondrement présente une forme pseudo-circulaire d'un diamètre de l'ordre de 4 m. La profondeur de l'effondrement est difficile à déterminer en raison de la présence de reliquats de la dalle béton disloquée. Elle est vraisemblablement pluri-décimétrique.

L'effondrement implique la disparition du sol d'assise des fondations du pignon, amorçant un phénomène de basculement du mur porteur vers la voie publique et la voie ferrée. Le mouvement s'est répercuté à l'ensemble de l'habitation et s'est traduit par l'apparition de nombreux désordres sur les structures porteuses et équipements de l'habitation (Figure 2). L'évènement a par ailleurs impacté un transformateur et un support électrique Enedis qui alimentent une large partie du quartier. Les indices recensés dans l'environnement du sinistre laissent présager une origine de l'effondrement liée à une ou plusieurs cavités souterraines oubliées.



Figure 2 : Effondrement et dégradation du mur du pignon nord du bâtiment

2.3. Premières mesures de prévention

Les premières mesures de prévention ont été prises dans le cadre d'un groupe de travail piloté par la Direction Départementale des Territoires du Loiret (DDT45). Après évacuation du bâtiment sinistré et coupure de la voie publique immédiatement adjacente, un périmètre de sécurité de 18 m de largeur a été appliqué en ceinture du pignon impacté (1,5 fois la hauteur du bâtiment). La présence d'un perré maçonné en bordure de la voie ferrée laisse craindre des rebonds de blocs de maçonnerie en direction des trains en cas de ruine du bâtiment. Des mesures de prévention ont ainsi également été prises pour sécuriser la circulation des trains : pose d'un écran provisoire en bordure de la voie et réduction de la vitesse nominale des trains à 40 km/h à la place de 110 km/h.

2.4. Que faire ? Etayer ?

A l'issue de la phase d'urgence, aucune décision n'est encore prise sur les questions de conservation ou de démolition du bâtiment. Sur des situations similaires dans l'agglomération orléanaise, les bâtiments sinistrés font l'objet d'opérations d'étalement provisoires de manière à permettre la stabilisation temporaire des mouvements et d'affiner la nature des opérations de reprises. Si, dans ce cas présent cette solution peut avoir l'avantage de permettre le rétablissement de la vitesse nominale des trains, elle doit s'étudier précisément de manière à s'assurer que l'assise des contreventements en équerre ne viendra pas se positionner à l'aplomb de vides évolutifs. Dans ce but, une campagne de reconnaissance géotechnique est confiée au Cerema.

3. Contenu de la campagne d'investigations et de mesures

3.1. Campagne de reconnaissance géotechnique

3.1.1. Choix de la technique de sondage la plus appropriée

La campagne de reconnaissance géotechnique a pour objectif d'une part de confirmer l'origine du sinistre et d'autre part de vérifier l'absence de vides significatifs évolutifs à l'aplomb du futur système d'étalement du bâtiment. Dans un contexte d'effondrement, où la présence de cavités souterraines anthropiques est suspectée, les sondages destructifs sont généralement à privilégier (Bénot et al., 2021). Néanmoins, un effondrement étant par nature évolutif, et sensible à des venues d'eau parasites ou des vibrations, les différentes techniques de sondages existantes peuvent présenter des aléas significatifs. Les plus importants sont donnés dans le Tableau 1. Une solution d'investigations mixte est choisie en privilégiant la réalisation de la partie supérieure des sondages à la tarière hélicoïdale et en les poursuivant au tricône.

Tableau 1: Aléas des techniques de sondages

Outil	Technique	Fluide de forage	Aléas de la technique
Tarière hélicoïdale	Semi-destructif – rotation pure	-	Difficultés à traverser les niveaux indurés
Tricône	Destructif – rotation pure	Eau/Boue de forage	Apport d'eau dans l'environnement du mouvement de terrain déclaré
Marteau fond de trou	Destructif - rotopercussion	Air comprimé	Vibrations potentielles dans l'environnement de l'assise du bâtiment sinistré et problème de colmatage de l'outil dans les marnes

3.1.2. Détails et contenu de la campagne d'investigations

La conception de la campagne d'investigations repose sur 20 sondages de reconnaissance géotechnique (SD1 à SD20) répartis en quinconce selon une maille de 1,5 x 1,5 m à l'aplomb des futurs systèmes d'étalement le long des façades et pignons les plus évolutifs du bâtiment sinistré.

Les sondages sont descendus à 20 m de profondeur au regard des éléments de contexte disponibles (Figure 3). Pour les sondages positionnés dans l'environnement proche de l'effondrement, un phasage spécifique est adopté de manière à limiter au maximum l'impact des sondages sur la stabilité du bâtiment :

- 1°) partie supérieure des sondages réalisée à la tarière hélicoïdale Ø140 mm ;
- 2°) inspection caméra des parois et du fond du sondage;
- 3°) tubage de la partie supérieure du sondage Ø125 mm avec scellement aux parois ;
- 4°) poursuite du sondage au tricône en Ø116 mm ;
- 5°) pose d'un tube PVC en Ø110 mm pour inspections vidéoscopiques ultérieures.

Les sondages éloignés de l'effondrement sont réalisés au tricône Ø116 mm.

La campagne d'investigations est conduite entre le 23 novembre et le 1^{er} décembre 2020.

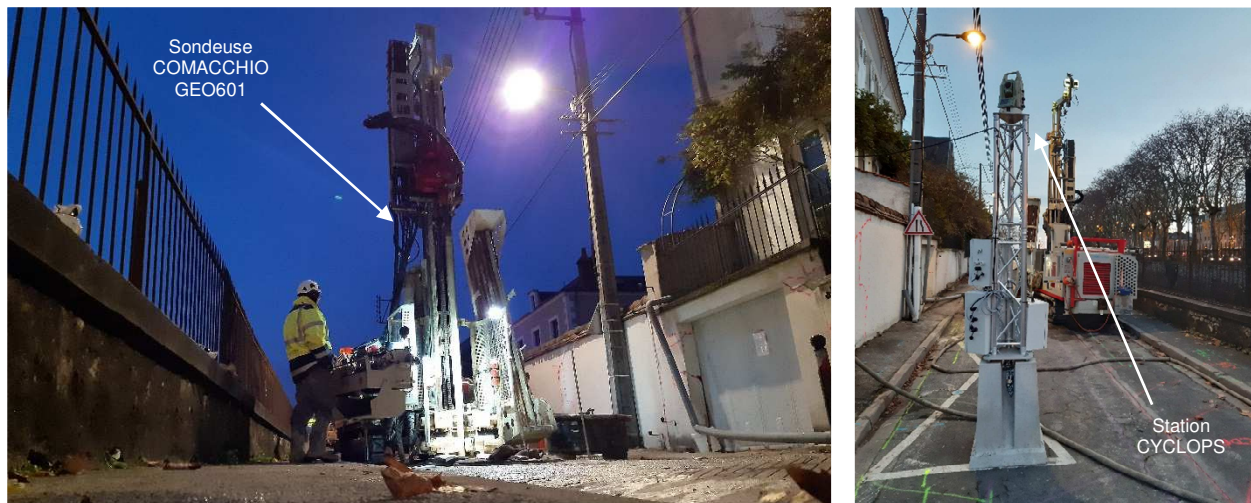


Figure 3 : Investigations géotechniques et monitoring du bâtiment sinistré

3.2. Monitoring du bâtiment sinistré

3.2.1. Principe de mesures

Afin de prévenir les risques d'effondrement du bâtiment et de garantir la sécurité des opérations de reconnaissance géotechnique, un suivi topographique automatisé CYCLOPS a été mis en place par Sixense Geophysics. Le système mis en place permet de suivre la géométrie du bâtiment. Le système comprend une station totale robotisée installée sur un mât de 2 m de hauteur (Figure 3). La station totale vise successivement 35 prismes de mesures répartis sur les ouvrages environnant l'effondrement. 8 prismes de référence ont été placés dans l'environnement éloigné de l'effondrement.

La station CYCLOPS réalise des cycles de mesures en continu. Chaque prisme est visé un à un de manière automatique. A la fin d'un cycle de mesures, un nouveau recommence. La durée d'un cycle est de 20 minutes. A la suite d'un cycle de mesures, les données sont envoyées sur des serveurs dédiés où un calcul de compensation par la méthode des moindres carrés est réalisé. Celui-ci permet 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 le système et, par extrapolation, le vecteur vitesse. La précision du dispositif est de ± 1 mm.

3.2.2. Intégration à un dispositif d'alerte

Le système CYCLOPS est équipé d'un module de gestion dédié qui déclenche des alertes (sonore et lumineuse) en cas de dépassement de seuils prédéfinis. Les seuils d'alerte ont été définis sur la base de données issues de la littérature.

Plusieurs recommandations simples existent (Frank R., 1998). Le bâtiment ayant d'ores et déjà subi des déplacements du fait de la survenue de l'effondrement, les seuils d'alerte appliqués ont été volontairement restrictifs. Ils sont donnés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : seuils d'alarme appliqués sur chantier

Seuil	Valeur	Mesures à prendre
Pré-vigilance	1/2000 ^e de la portée du bâtiment = 5 mm	Interruption temporaire du chantier
Vigilance	Seuil intermédiaire fixé à 7,5 mm	Interruption temporaire du chantier
Alerte	1/1000 ^e de la portée du bâtiment = 10 mm	Arrêt définitif du chantier de sondages
Alerte renforcée	Seuil fixé à seuil d'alerte x 125% = 12,5 mm	Evacuation d'urgence

La station CYCLOPS effectuant un cycle de mesures en 20 minutes, et des mouvements rapides pouvant se déclencher au niveau du bâtiment, le système d'alerte du monitoring est complété par un protocole de sécurité strict appliqué sur chantier (vigie, suivi des mesures en temps réel, analyse des mesures prises pendant la nuit...).

3.3. Mesures de vibrations

Des mesures de vibrations ont été réalisées par le Cerema de manière à déterminer les vibrations provoquées par la circulation ferroviaire sur le bâtiment sinistré. Les mesures ont été interprétées de manière à donner des préconisations à la SNCF en matière de reprise du trafic ferroviaire. Le protocole de mesures mis en place en concertation avec la SNCF s'appuie sur une première série de mesures vibratoires pour une vitesse maximale de circulation des trains de 40 km/h. Une deuxième série de mesures a été réalisée pour des trains circulant à 80 km/h. 4 types de convois ont été analysés (TER, FRET, Corail, motrice).

Les mesures vibratoires ont été réalisées conformément à la norme NF E90-020-1. Les mesures ont été réalisées au passage d'une dizaine de trains entre les 9 et 10 décembre 2020. Durant cette période, aucune source perturbatrice n'était présente (voie publique fermée à la circulation et aucune opération de travaux en cours). Le bâtiment sinistré a été instrumenté sur des éléments porteurs de sa façade ouest à l'aide de 4 capteurs tri-directionnels dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3: Caractéristiques des capteurs utilisés

Capteur	Type	Implantation	Pose	Centrale	Déclenchement
C1	2 Hz – L22	Seuil garage	Plâtre	IDETEC ATV 15	Manuel
C2	2Hz – L22	Seuil porte d'entrée	Plâtre	IDETEC ATV 15	Manuel
C3	4,5 Hz – L4	Appui fenêtre 1 ^{er} étage	Plâtre	IDETEC ATV 15	Manuel
C4	8 Hz corrigé 1 Hz	Appui fenêtre 1 ^{er} étage	Plâtre	NOMIS	Sur seuil à 0,3 mm/s

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 les logiciels Supergraphics et ACAP. L'incertitude de la chaîne de mesure n'excède pas 8% dans la gamme de fréquence de 2 à 80 Hz.

4. Résultats de la campagne d'investigations géotechniques

4.1. Découverte de vides francs

Les sondages de reconnaissance ont été interprétés sur la base de l'analyse des diagraphies de paramètres de forage enregistrées lors de l'exécution des sondages destructifs et des essais de chute libre (ECL), de l'évolution de la pression d'injection PI et du résultat des inspections vidéoscopiques.

L'interprétation des résultats confirme la présence d'anomalies dans le sous-sol. Entre les altitudes de 102 et 97 mNGF, une augmentation significative du nombre d'anomalies est constatée (Figure 4). Les hauteurs d'anomalies mises en évidence ont pu être classées en plusieurs catégories :

- 6% correspondent à des vides francs (reliques de carrière souterraine) ;
- 82% correspondent à des vides supposés remblayés et/ou effondrés ;
- 12% correspondent à des variations de la lithologie.

Le bâtiment est ainsi positionné à l'aplomb d'anciens vides de carrière souterraine partiellement remblayés, effondrés et évolutifs.

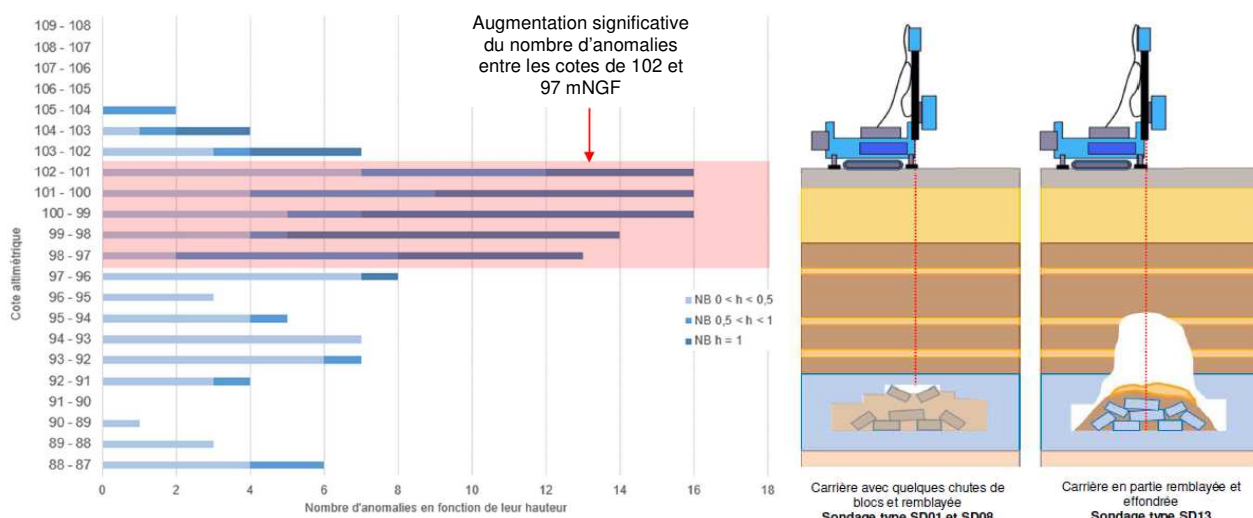


Figure 4 : Distribution des anomalies en fonction de leur hauteur et de leur profondeur

4.2. Décisions sur l'avenir du bâtiment

La découverte de vides francs à l'emplacement des futurs étais provisoires du bâtiment sinistré conduit à des adaptations au niveau de leur conception (injection préalable ou chevêtre avec conditions de fontis). La solution d'étalement, après chiffrage, représente 25% de la valeur vénale du bien d'habitation. Par ailleurs, l'estimation de l'ensemble des travaux de reprise dépasse la valeur vénale du bien. Les propriétaires et leurs représentants décident de privilégier une solution de démolition du bien le 10 décembre 2020. Le système de monitoring est laissé en place jusqu'au 21 décembre 2020, veille des opérations de démolition, de manière à permettre les opérations d'effacement des réseaux aériens et la réflexion sur les opérations de désamiantage en toute sécurité.

5. Impact de la campagne d'investigations sur le bâtiment sinistré

5.1. Nature des mouvements

Les données issues du monitoring permettent de calculer la norme du vecteur déplacement au niveau de chacun des prismes de mesures visés par la station CYCLOPS. Le tracé des courbes de déplacement vertical en fonction du déplacement horizontal permet d'apprécier la nature du mouvement subi par chacun des 35 prismes de mesures.

Les déplacements mesurés, sur la période allant du 20 novembre au 21 décembre 2020, sont supérieurs à la marge d'erreur du système de monitoring. Les déplacements mesurés ont dépassé le seuil de pré-vigilance au cours de la période de sondage. Ils n'ont pas dépassé le seuil de vigilance fixé à 7,5 mm. L'analyse des mouvements subis par le bâtiment sur la durée du monitoring confirme un phénomène de tassement de la moitié nord du bâtiment sinistré et le basculement progressif du pignon vers le nord (Figure 5).

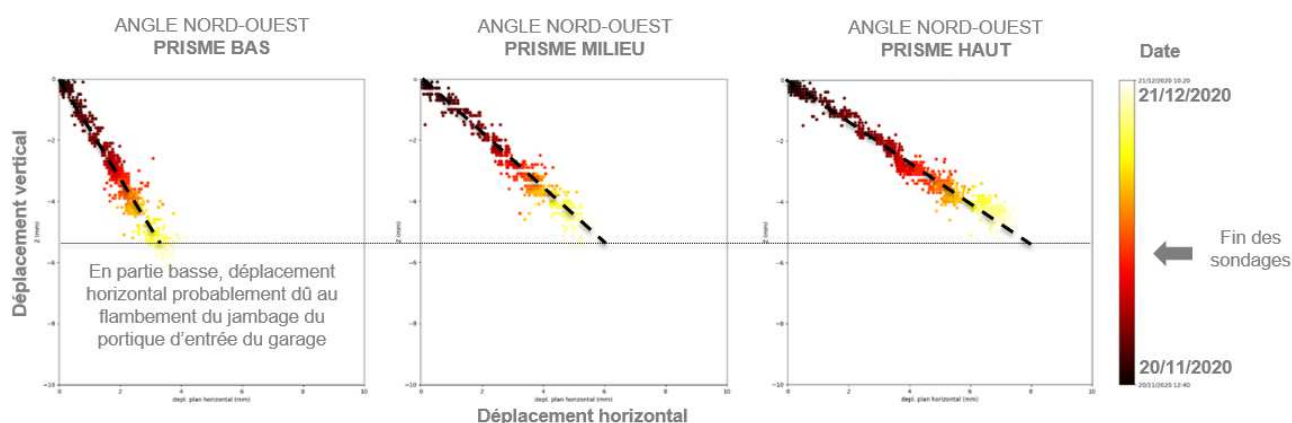


Figure 5 : Déplacement constaté dans l'angle nord-ouest du bâtiment à différentes hauteurs

5.2. Impact de la circulation ferroviaire

Sur la période couverte par le monitoring, plusieurs sources vibratoires sont actives : les sondages de reconnaissance géotechniques, la circulation ferroviaire régulière sur la voie ferrée Les Aubrais-Montauban.

Les mesures de vibrations effectuées pour contrôler l'impact de la circulation ferroviaire ont été interprétées sur la base de la circulaire du Ministre de l'Environnement du 23 juillet 1986 pour le risque de dommages aux structures. Le seuil d'alerte retenu dans le cadre du présent cas d'étude est de 2 mm/s en assimilant les circulations ferroviaires à une source vibratoire continue. Il s'agit du seuil le plus bas de la circulaire du 23 juillet 1986. En deçà de ce seuil, la probabilité de dommages peut être qualifiée de négligeable.

Sur l'ensemble des trains ayant circulé sur la période de mesures, celui ayant engendré les vibrations les plus élevées est un train de fret de 700 tonnes circulant à une vitesse de l'ordre de 60 km/h. Lors de ce passage, la vibration maximale mesurée sur le capteur C4 est de 0,51 mm/s à une fréquence dominante de 20 Hz. Le niveau de vibration atteint ainsi 26% du seuil de dommage préconisé de 2 mm/s. L'effet de la circulation ferroviaire est ainsi considéré comme négligeable en termes de risques de dommages à la structure du bâtiment.

5.3. Réponse du bâtiment pendant la phase de reconnaissance géotechnique

L'analyse des graphiques de l'évolution des déplacements horizontaux et verticaux au niveau des prismes de mesures en fonction du temps montre plusieurs tendances détaillées dans le Tableau 4 et en Figure 6.

Tableau 4 : Vitesse moyenne de déplacement des prismes sur la période du monitoring à l'angle nord-ouest du bâtiment

Période	Du 21 au 23/11	Du 23 au 27/11	Du 27/11 au 07/12
Prisme BAS	0,1 mm/j	0,6 mm/j (x6)	0,1 mm/j
Prisme MILIEU	0,2 mm/j	0,6 mm/j (x3)	0,1 mm/j
Prisme HAUT	0,3 mm/j	0,6 mm/j (x2)	0,2 mm/j

Il ressort que sur la période où les sondages de reconnaissance ont été exécutés, la vitesse moyenne de déplacement des prismes a été multipliée par un facteur compris entre 2 et 6. Cette augmentation de la vitesse est réversible puisqu'à l'issue de la phase de sondage, elle revient à des valeurs équivalentes à celles mesurées sur la période du 21 au 23 novembre 2020 avant investigation. Néanmoins, les déplacements acquis sur la période de sondages sont eux irréversibles.

Dans la mesure où l'impact de la circulation ferroviaire a été défini comme négligeable au regard des mesures de vibrations effectuées, cette augmentation de la vitesse moyenne d'apparition des déplacements est attribuée aux opérations de sondages (venues d'eau, vibrations, et opérations préliminaires nécessaires au repérage des réseaux).

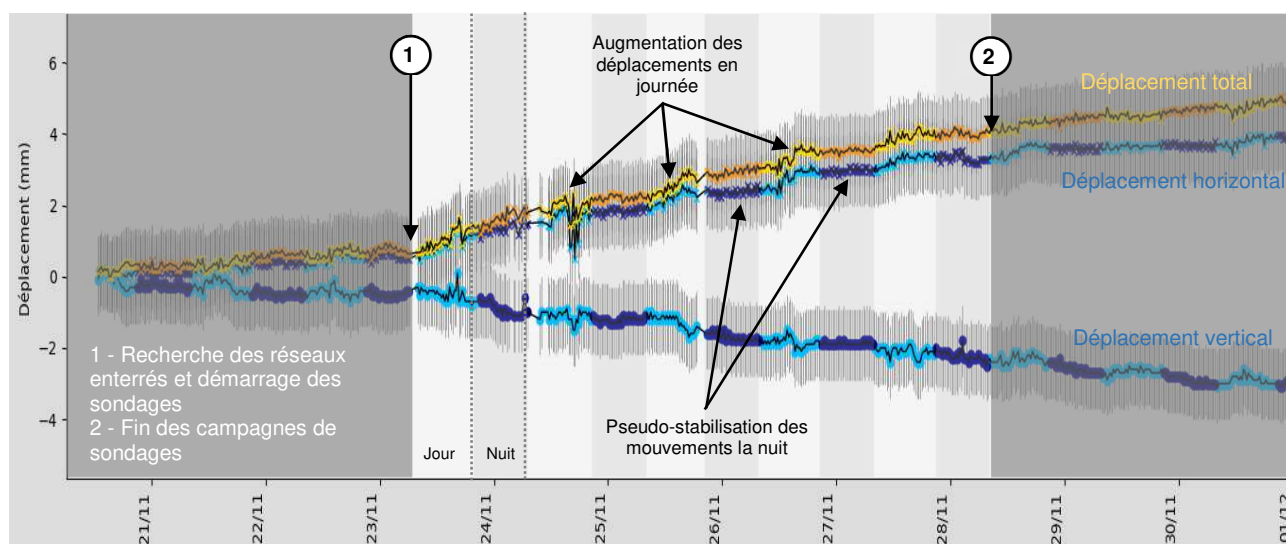


Figure 6 : Evolution des déplacements du bâtiment au cours du temps à son angle nord-ouest

5.4. Bénéfice-risque des opérations de sondages

Au regard de l'augmentation de la vitesse moyenne des déplacements pendant la période de sondage, il convient de s'interroger sur le bénéfice-risque de la campagne d'investigations. En termes de bénéfice, la campagne d'investigations a permis d'éviter de poser des étais à l'aplomb de vides évolutifs. Les éléments complémentaires ont pu être obtenus rapidement ce qui a favorisé une prise de décision rapide des propriétaires sur l'avenir du bâtiment (moins de 2 mois entre la survenue du sinistre et la démolition du bâtiment). Les sondages ont par ailleurs permis de confirmer la présence de carrières souterraines dans le secteur. Cette campagne de sondages a néanmoins conduit à une aggravation temporaire des mouvements affectant le bâtiment sinistré, ce qui génère un risque pour la pérennité du bâtiment et un risque maîtrisé pour les opérateurs (le protocole de sécurité mis en œuvre devant permettre d'éviter un accident humain).

Le retour d'expérience fait s'interroger sur la nécessité de procéder à la campagne de sondages préliminaires. Aurait-il fallu préconiser dès la survenue de l'effondrement une opération de démolition ? Les propriétaires l'auraient-ils accepté ? Sur ce cas d'étude, le bénéfice-risque de l'opération de sondages apparaît positif. Pour des situations périlleuses similaires, il convient de l'étudier au cas par cas pour définir au mieux les mesures de prévention à mettre en place.

6. Conclusions

Ce cas d'étude apporte des éléments nouveaux sur la caractérisation de l'impact de l'exécution de sondages de reconnaissance sur la stabilité des structures avoisinantes. Lorsque des structures sont d'ores et déjà sinistrées, et a fortiori par des fontis évolutifs, l'exécution des sondages n'est pas sans risques. En effet, les sondages peuvent conduire temporairement à une multiplication par 6 de la vitesse moyenne des déplacements. Le bénéfice-risque de l'opération doit être étudié précisément au préalable.

7. Bibliographie

Bénot R., Azémard P., Cote P. (2021). Méthodes de reconnaissance des cavités. Synthèse des connaissances actuelles. Cerema. ISBN : 978-2-37180-486-9. 72 pages.
 Frank R. (1998). Fondations superficielles. Techniques de l'ingénieur- traité construction. Réf : C246v1. 30 pages.