

# EVALUATION MULTI-METHODE DU RISQUE DE MOUVEMENT DE TERRAIN LIES AU KARST SUR LE SITE DU CNRS D'ORLEANS

## MULTI-METHOD EVALUATION OF KARST-INDUCED GROUND COLLAPSE HAZARD AT THE CNRS ORLEANS SITE

Gildas NOURY<sup>1</sup>, Jean-Michel BALTASSAT<sup>1</sup>, Thomas JACOB<sup>3</sup>, Adnand BITRI<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> BRGM, Orléans, France

**RÉSUMÉ** – Le BRGM accompagne depuis plusieurs années le CNRS d'Orléans la Source pour évaluer les risques de mouvements de terrain liés au karst présents sur son site. Un état des connaissances a motivé la réalisation d'investigations géophysiques et géotechniques. Cet article décrit les méthodes déployées, les résultats obtenus et détaille l'évaluation de l'aléa et des risques pour un des secteurs les plus concernés.

**ABSTRACT** – The BRGM has been collaborating with the CNRS in Orléans la Source for several years to assess the risks of ground movements associated with karst features on its site. An overview of knowledge prompted the implementation of geophysical and geotechnical investigations. This article describes the methods employed, the results obtained, and provides a detailed assessment of hazard and risks for one of the most affected sectors.

### 1. Introduction

La survenue de plusieurs effondrements et affaissements sur le site du CNRS d'Orléans La Source a motivé la direction de ce site de recherche d'envergure internationale à confier une étude approfondie au BRGM (Figure 1). Un état des connaissances a ainsi été mené pour l'ensemble du site (Noury, 2019) avant d'être poursuivi par un diagnostic approfondi de la stabilité de six secteurs se basant sur une série d'investigations géophysiques et géotechniques (Noury, 2023).

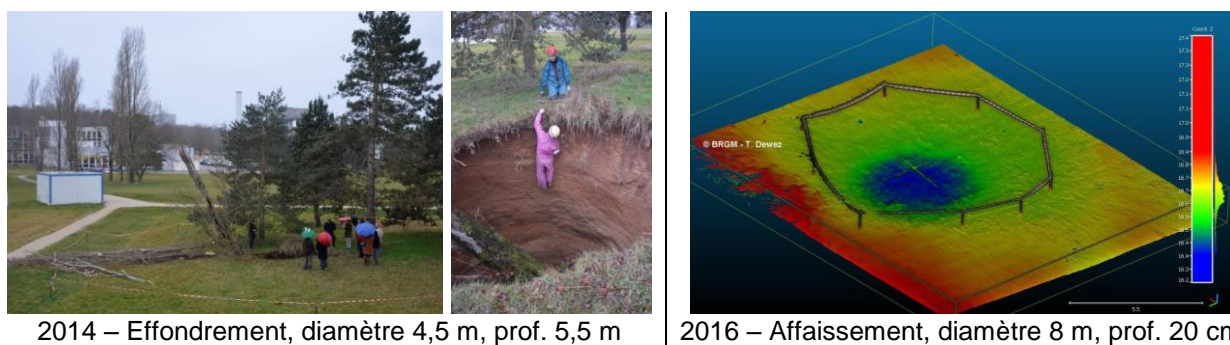


Figure 1. Mouvements de terrain ayant récemment affecté le site du CNRS

### 2. Etat des lieux et des connaissances

#### 2.1. Présentation du site

Le CNRS d'Orléans rassemble seize laboratoires, unités scientifiques et génériques sur un site de 72 ha implanté sur le plateau de Sologne. A cet endroit, les terrains sont constitués d'une couverture épaisse de 8 à 12 m d'alluvions sablo-graveleuses anciennes reposant sur un substratum carbonaté composé des formations du calcaire de Beauce. Le toit de la nappe se situe en moyenne légèrement sous le toit calcaire. Aucune cavité

souterraine d'origine anthropique n'est connue à cet endroit. De nombreux indices karstiques sont en revanche recensés dans le secteur avec plusieurs dolines et les résurgences formant la rivière du Loiret (notamment au niveau du parc floral de la Source situé à 1,5 km au nord).

Ce contexte karstique représente un risque de désordre pour les infrastructures. Cette problématique géotechnique avait été « découverte » au moment de l'aménagement du nouveau quartier dans les années 1950 et 1960. Les bonnes pratiques mises en œuvre à l'époque (approche couplée sismique + géotechnique, avec des sondages profonds au niveau des anomalies repérées en géophysiques) ont semblent-elles été peu à peu oubliées au cours des années 1970 et 1980, ou en tout cas pas respectées partout.

## 2.2. Inventaire des effondrements et des indices karstiques

Suite à l'effondrement de 2014 et à l'affaissement de 2016 (Figure 1), une analyse documentaire (Noury, 2019) a abouti à retenir 27 mouvements karstiques avérés dans un rayon de 1 km autour du CNRS et d'autres indices restant mal compris (Figure 2a). Les deux plus grands effondrements font 10 m de diamètre et 3 à 5 m de profondeur et sont à considérer comme l'aléa de référence.

Les phénomènes en cause sont très certainement le soutirage des alluvions dans le substratum et la rupture de conduits présents dans le calcaire (BRGM, Cerema, 2023).

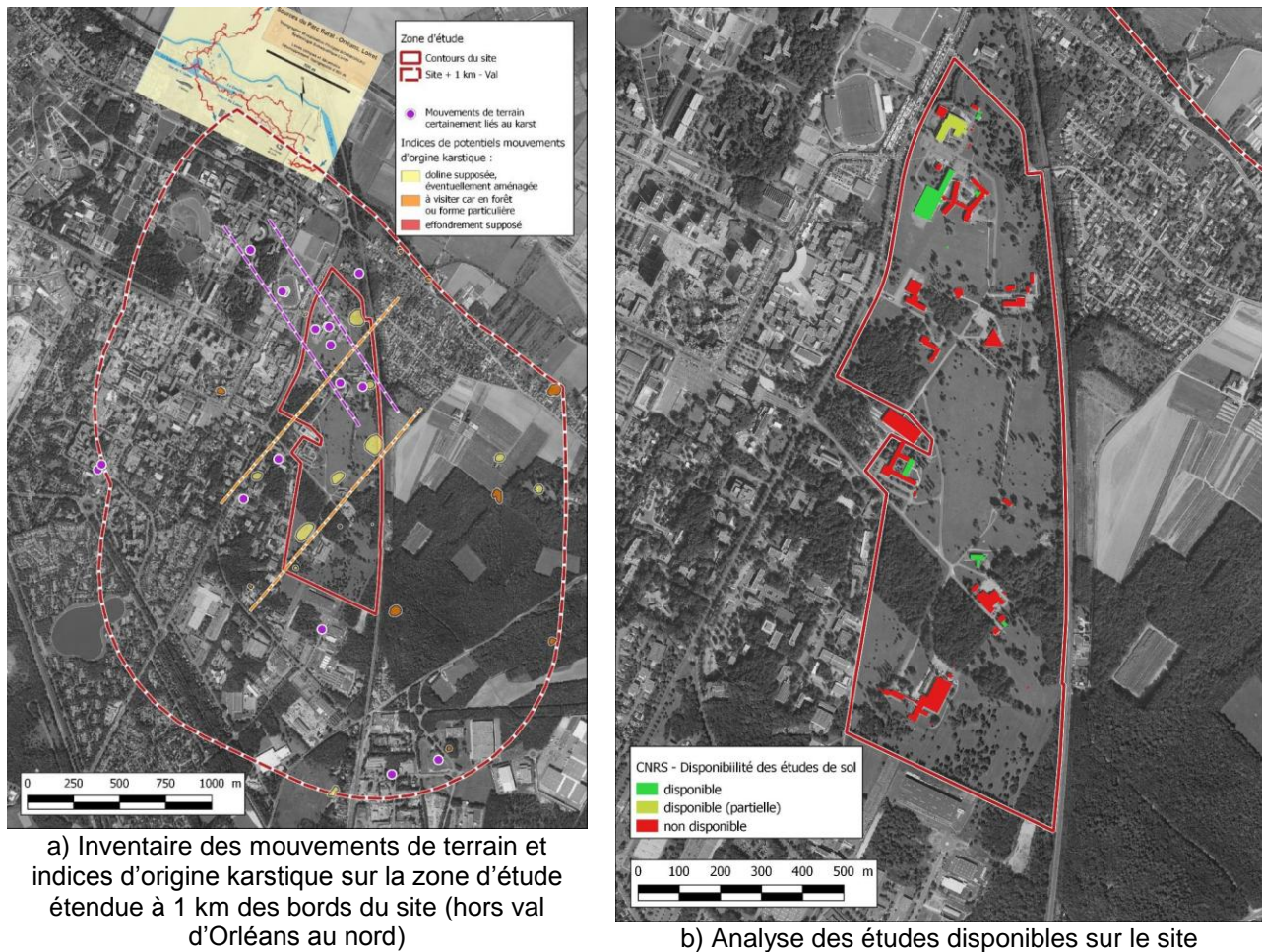


Figure 2. Analyses documentaires globales du site

## 2.3. Diagnostic géotechnique des aménagements CNRS

Une analyse a posteriori des études géotechniques disponibles pour 10 des 40 bâtiments du CNRS indique que ce risque a été pris en considération de manière très variable lors

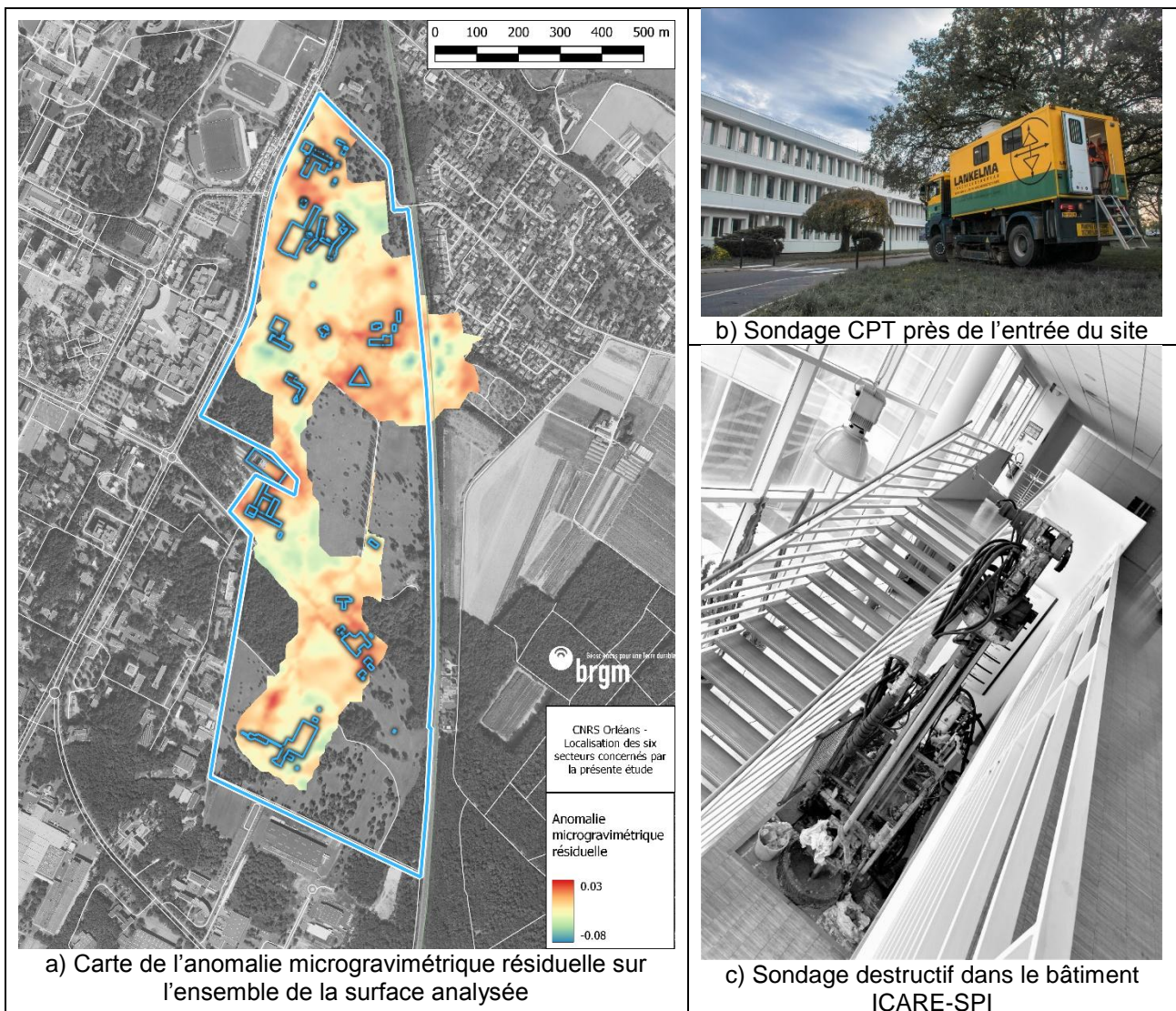
de la construction (Figure 2b) : certaines études n'en parlent pas, les autres ont caractérisé l'aléa de manière souvent incomplète et celles qui le font le mieux divergent sur les adaptations à mettre en œuvre, y compris sur les paramètres les dimensionnant a priori (diamètre de fontis notamment). Ces constats ont incité le CNRS et le BRGM à poursuivre l'analyse en procédant à une série de nouvelles mesures.

### 3. Analyses complémentaires

#### 3.1. Mesures géophysiques

Des mesures géophysiques ont tout d'abord été effectuées sur les sites *a priori* les plus sensibles (ceux présentant des suspicions de désordres et/ou concentrant les enjeux).

Avec 3160 stations, la microgravimétrie a couvert près de 55 % du site (Figure 3a) : elle cartographie les excès et les défauts de masse, ces derniers pouvant être liés à des phénomènes karstiques. Les mesures faites à l'intérieur de deux bâtiments ont fait l'objet d'un soin particulier. Ces mesures ont été complétées par dix-sept profils sismiques (réfraction et/ou MASW – 4100 m cumulés) et six profils électriques (ERT – 1700 m cumulés) qui ont fourni une image physique des terrains jusqu'à globalement une quarantaine de mètres de profondeur (avec une résolution décroissante avec la profondeur). Les références de ces travaux sont données dans le rapport d'évaluation des risques qui intègre les résultats géotechniques décrits ci-après (Noury, 2023).



### 3.2. Mesures géotechniques

Les sondages géotechniques réalisés ensuite se sont concentrés sur six secteurs présentant les anomalies géophysiques *a priori* les plus importantes.

93 Cone Penetration Test (CPT) ont révélé de manière très fine les faiblesses présentes dans les alluvions et jusque parfois plusieurs mètres sous le toit calcaire (Figure 3b). Ces sondages mesurent la résistance des terrains à la pénétration d'une pointe ( $q_c$ ) et fournissent une valeur représentative du comportement granulométrique des matériaux traversés (rapport de frottement : RF).

Dix-sept Sondages Destructifs (SD) « réglés » pour la recherche de vide ont été chercher les passages suspects les plus profonds (Figure 3c). Les paramètres de ces sondages sont enregistrés. Ici, c'est surtout la Vitesse d'Avancement Instantanée (VIA) et la Pression d'Injection qui ont été analysées. Pour comparer les sondages avec ceux d'autres campagnes, la VIA a été normalisée en établissant le rapport  $VIA_n = VIA / VIA_{\text{« au vide »}}$ , cette dernière valeur étant celle obtenue lors d'une calibration (chute d'outil).

Des vides ont été détectés sur plusieurs CPTs, rarement en proche surface, plutôt au toit du substratum (Figure 4a). Les zones faibles descendent parfois jusque 20 m, voire 35 m de profondeur pour un des SD (Figure 4b).

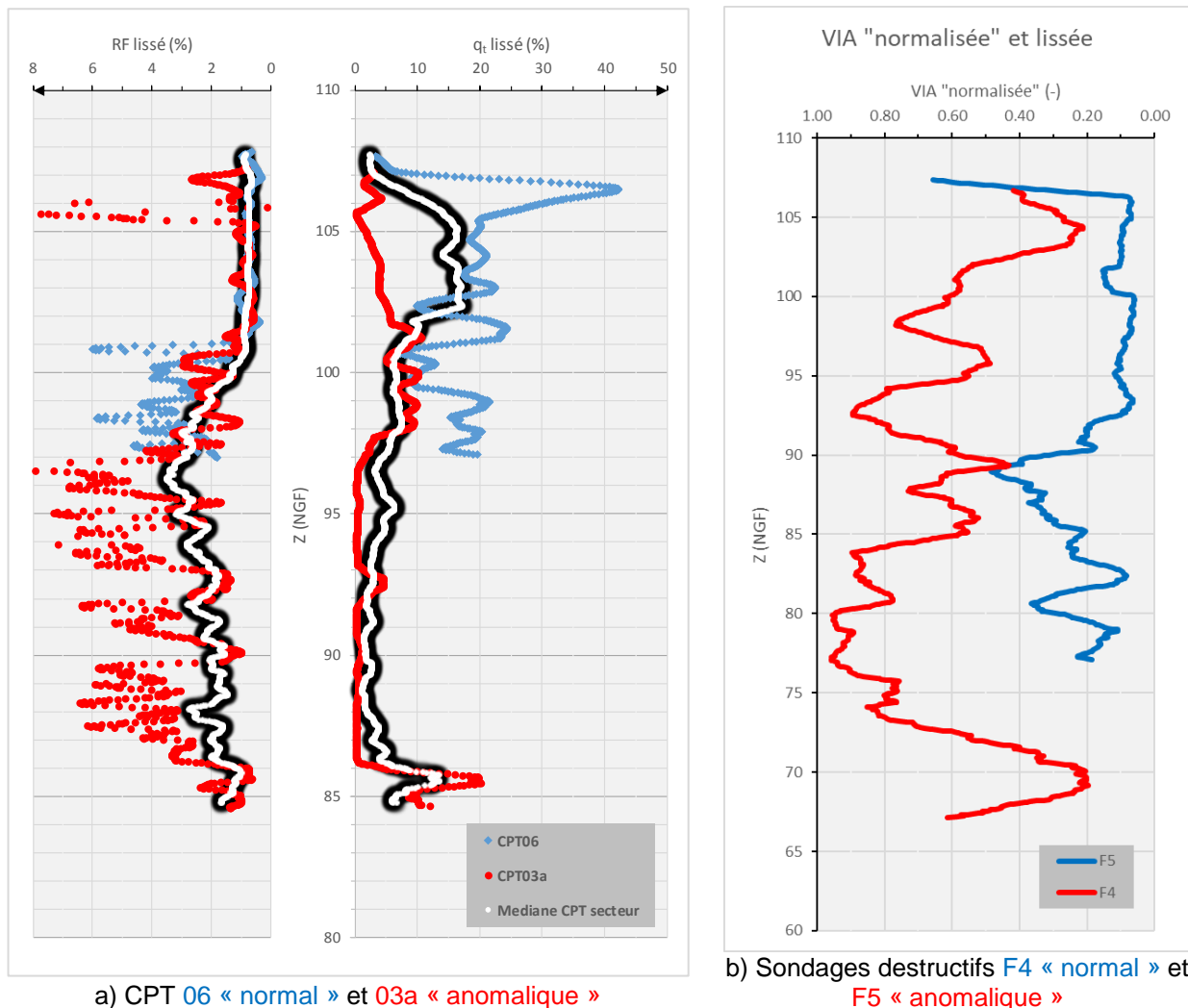


Figure 4. Secteur INCA – Résultats de sondages illustrant les faiblesses liées au karst

Les anomalies géotechniques les plus importantes ont été généralement associées à d'anciens gouffres karstiques, remblayés naturellement par les alluvions anciennes, mais toujours actifs, comme en témoigne les faiblesses dans les alluvions qui seraient donc

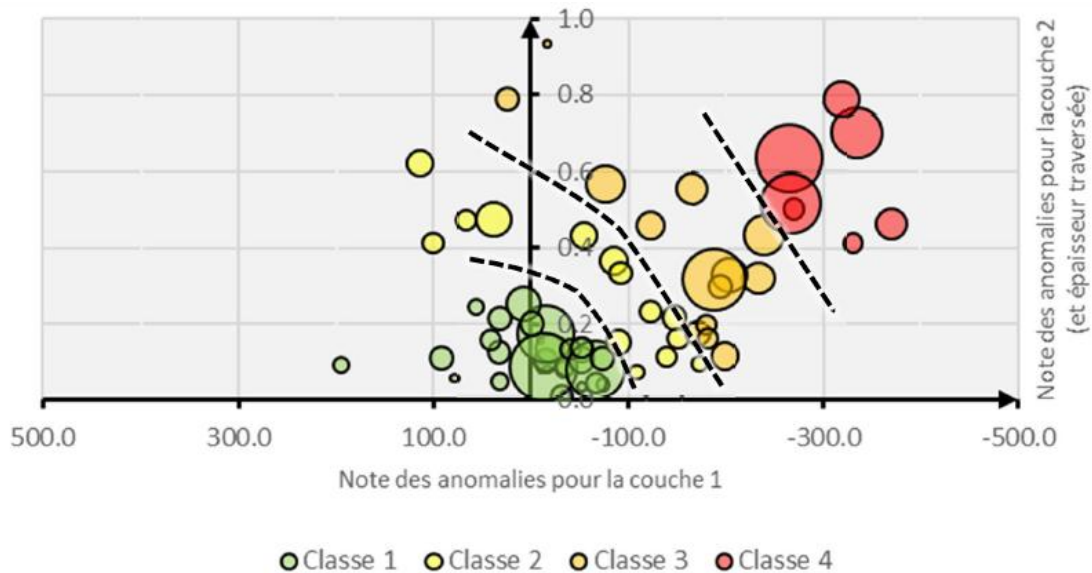
progressivement soutirées « dans le karst ». Sur un autre SD (non présenté ici), un passage très « décomprimé », isolé dans le substratum entre 30 et 38 m de profondeur a été attribué à un grand conduit karstique colmaté, similaire à ce qui déjà été observé dans les réseaux souterrains explorés par les spéléologues au niveau de la source du Loiret.

### 3.3. Evaluation des aléas – résumé de la méthodologie employée

Vérification faite via les calculs de géotechnique « classique » confrontant les charges présentes en surface (voirie, bâtiment) et la résistance des matériaux en place, la seule instabilité imminente a été repérée sur le secteur dit « INCA » (CPT 03a, cf. Fig. 4b et §4).

Partout ailleurs, la stabilité immédiate des terrains n'est actuellement pas remise en cause. La stabilité à moyen terme questionne tout de même car les phénomènes karstiques sont évolutifs : les principaux affaiblissements repérés à plus ou moins grande profondeur sont vraisemblablement les signes précurseurs de futurs mouvements en surface (effondrements et/ou affaissements)

Cet aléa a été évalué et cartographié en considérant l'ensemble des informations disponibles : historiques, géophysiques et géotechniques. Un travail statistique approfondi a permis de comparer aussi objectivement que possible les CPT entre eux. Pour cela, une double note a été donnée pour chaque CPT : une note pour les alluvions (couche 1) et une note pour le toit calcaire karstifié (couche 2). Cette seconde note n'est bien sûr calculable que pour les CPT ayant atteint cette formation (67 sur les 93 effectués). Quatre classes de CPT ont ensuite été définies « à dire d'expert » en fonction de la double note obtenue : pas d'anomalie, anomalie faible, moyenne, forte (Figure 5). La conjonction d'une mauvaise note pour les alluvions et d'une mauvaise note pour le toit calcaire est considérée comme l'état le plus critique. Ce travail n'a pas été effectué pour les SD en raison notamment d'une représentativité statistique moindre liée à un nombre bien moins élevé de sondages.



Le diamètre des bulles est proportionnel à l'épaisseur traversée par les CPT dans la couche 2.

- Plus la note donnée à la couche 1 est faible (à droite suivant les abscisses), plus la couche 1 est faible.
  - Plus la note donnée à la couche 2 est forte (vers le haut suivant les ordonnées), plus la couche 2 est faible.
- Pour résumer : plus le point se trouve en haut à droite du graphique, plus le sondage en question est faible. L'appréciation globale est fournie en distinguant quatre classes (en couleur sur le graphique). Les droites en pointillés représentent les seuils entre ces classes.

Figure 5. Notes obtenues et classement des 67 CPT ayant atteint le toit calcaire

Les zones les plus sensibles concernent trois des six secteurs étudiés en détail : une partie d'un bâtiment de recherche, une voirie (sur une faible surface) et un espace vert (enjeux d'importance moyenne). Des recommandations visant à sécuriser ces secteurs ont été faites au CNRS : analyses complémentaires suivies éventuellement d'un confortement des sols pour le bâtiment et la voirie ; simple surveillance pour l'espace vert. Ce dernier cas est détaillé à titre d'exemple dans ce qui suit.

#### 4. Evaluation des risques - l'exemple du secteur « INCA »

Ce secteur, situé sur la limite est du site, intéresse des enjeux d'importance moyenne (chemin piéton, espace vert) mais est proche de la cantine et de la voie ferrée Paris-Orléans – Limoges – Toulouse. Il présente par ailleurs les signes les plus évidents d'activité karstique pour le site du CNRS, avec une dépression ancienne mais marquée et un affaissement apparu en 2016 (Figure 1b). C'est le premier site à avoir été investigué en détail : il a permis de régler les analyses et constitue donc une référence.

Les sondages présentés plus haut (CPT et SD, cf. Figure 4) illustrent l'intensité des anomalies repérées sur ce secteur. Le profil de synthèse de la Figure 6 développe ce point en présentant une grande partie des investigations réalisées à cet endroit : mesures microgravimétriques, profil électrique, CPT et SD. Sur ce profil, les valeurs mesurées en sondages sont représentées suivant des dégradés de couleurs/teintes : du violet/rouge vers le vert pour  $q_c$  croissant et pour  $VIA_n$  décroissant (équivalents à une résistance/stabilité croissante) ; du blanc vers le noir pour RF et PI croissants (équivalents à une argilosité croissante). On peut retenir de cette synthèse les points suivants :

- Les résultats géophysiques et géotechniques concordent bien entre eux, ce qui permet de valider l'approche multi-méthode choisie.
  - o La zone présentant en sondages les plus importantes faiblesses géotechniques est bien délimitée dans la grande anomalie microgravimétrique résiduelle négative décelée à cet endroit.
  - o De manière plus fine, les sondages réalisés au droit de plus petites anomalies microgravimétriques résiduelles négatives se sont bien révélés comme présentant des résultats particulièrement faibles, avec vraisemblablement un fontis proche de la surface pour l'une d'elle.
  - o La limite alluvions/calcaire, clairement déterminée par les CPT (forte baisse de  $q_c$ , forte hausse de RF), correspond à la limite entre le corps résistant R2' et le corps conducteur C1 repérés par les mesures électriques, y compris pour ce qui concerne l'approfondissement localisé du toit calcaire situé à proximité de la bordure du site.
- Tous les CPT effectués au cœur de l'anomalie ne présentent pas les mêmes faiblesses aux mêmes endroits que ce soit dans les alluvions ou dans le calcaire. La karstification et ses effets sur la couverture agissent ici de manière disparate sur les matériaux présents.

L'évaluation faite ensuite aboutit à retenir un aléa fort à très fort sur une grande partie du secteur (3040 m<sup>2</sup>) et un aléa faible à moyen ailleurs (3330 m<sup>2</sup>). Une carte a été établie (Figure 7). Un chemin de service passe à proximité d'une zone « critique » : il devrait être condamné, ainsi que le cœur de l'anomalie telle que dessinée par les résultats microgravimétriques et géotechniques. La cantine située au nord ainsi que la voie ferrée implantée à l'est sont visiblement préservées : de simples mesures de surveillance y sont préconisées.

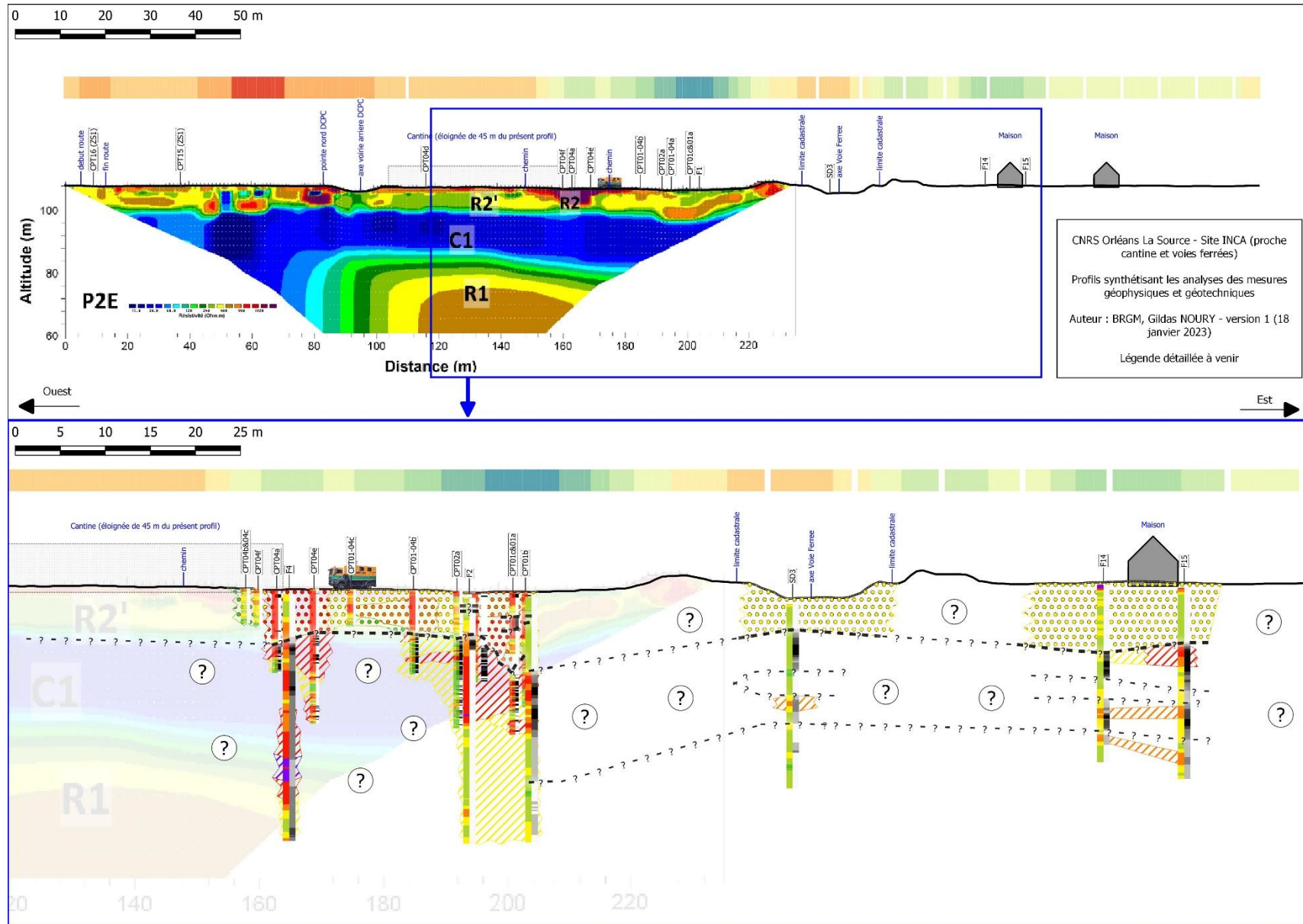


Figure 6. Profil de synthèse des résultats des investigations menées sur le site « INCA »

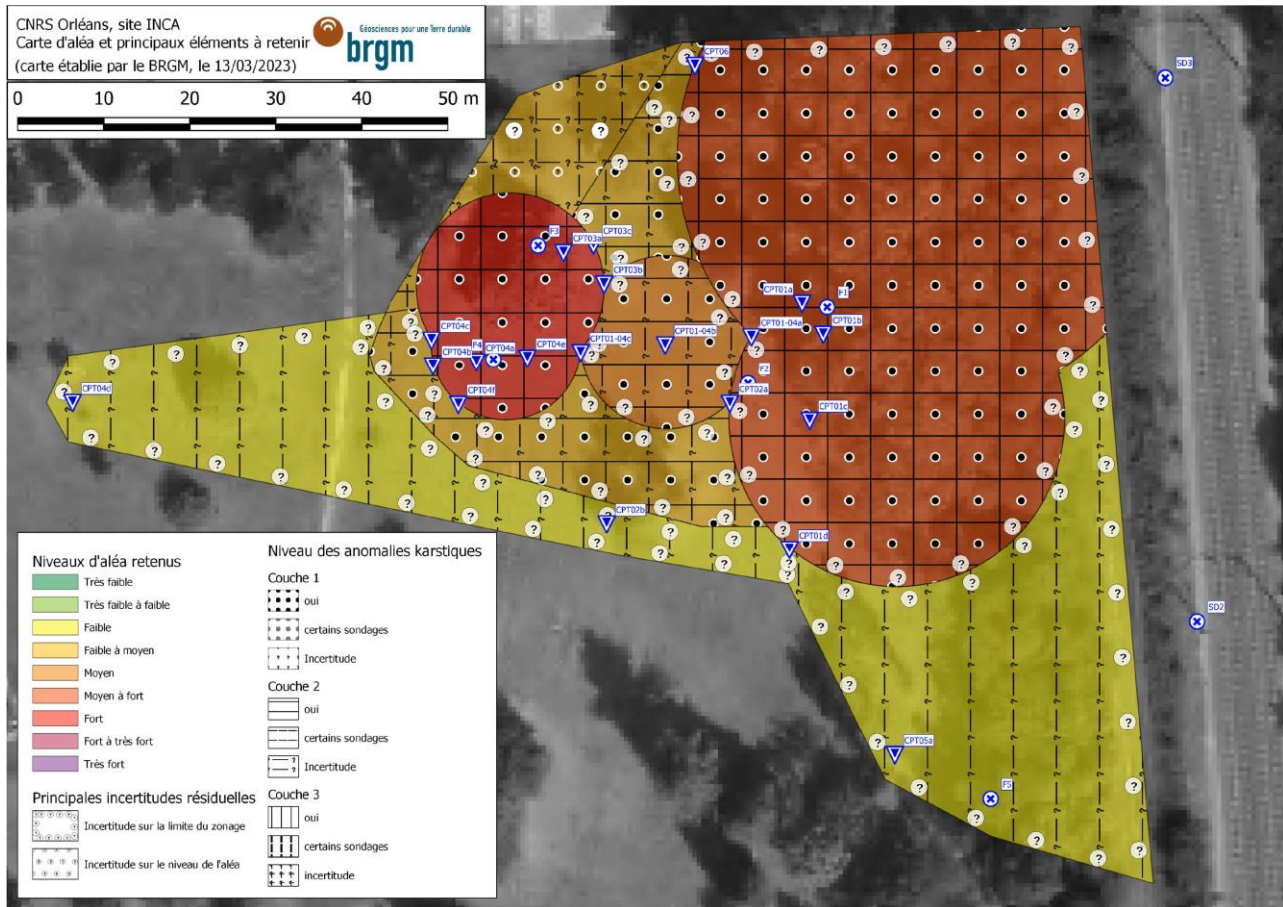


Figure 7. Carte de l'aléa mouvements de terrain liés au karst pour le site "INCA"

## 5. Conclusions

L'approche « multi-méthode » (naturaliste, géophysique, géotechnique) développée pour le site du CNRS d'Orléans La Source a permis d'évaluer efficacement les risques particuliers liés au karst. Ces risques sont complexes à évaluer pour diverses raisons : les phénomènes sont difficilement visibles car masqués sous les terrains de couverture; ils sont difficilement prévisibles car généralement sans signe avant-coureur en surface ; ils sont enfin difficiles à maîtriser pour les aménagements à moins de disposer d'une bonne connaissance des événements antérieurs et des phénomènes en cause. Le sujet est ici décrypté dans la plupart de ses composantes, ce qui permettra au CNRS de se prémunir à l'avenir des risques associés modulo quelques analyses complémentaires, des travaux de confortement sur un ou plusieurs sites et une neutralisation sur le site montré en exemple dans cet article.

## 6. Références bibliographiques

- BRGM, Cerema (2023). Guide méthodologique Aléa mouvements de terrain d'origine karstique en contexte carbonaté – Evaluation et cartographie
- Noury G. (2019) - Synthèse des connaissances et évaluation préliminaire des risques de mouvements de terrain d'origine karstique sur le site du CNRS d'Orléans (45) Rapport d'expertise. BRGM/RC-68057-FR, 48 p., 33 fig.
- G. Noury (2023) – Evaluation des risques de mouvements de terrains d'origine karstiques sur six secteurs du CNRS d'Orléans (45). Rapport final. BRGM/RP-72624-FR, 122 p., 61 fig., 7 tabl.