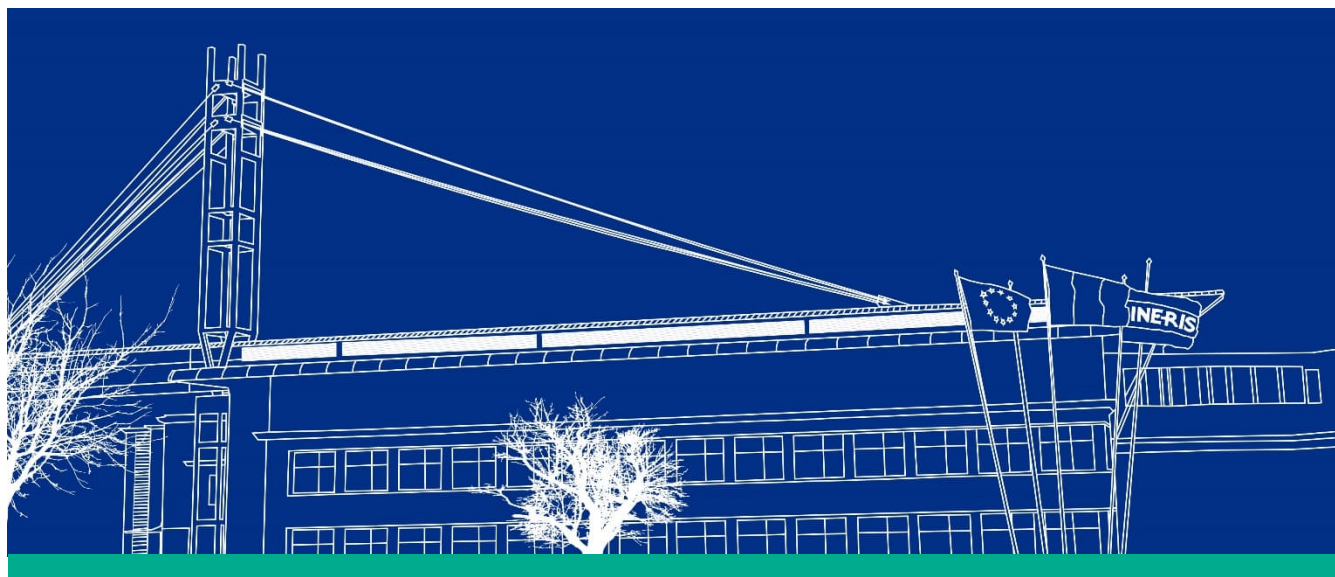




(ID Modèle = 454913)

Ineris - 227099 - 2821453 - v1.0

30/01/2025

Rétroanalyse de l'effondrement de la carrière souterraine de Nérigean

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 : RENAUD Vincent

Vérification : FRANCK CHRISTIAN; LECOMTE AMELIE

Approbation : BAROUDI HAFID - le 30/01/2025

Table des matières

1	Introduction et objectifs.....	6
2	Données disponibles pour la carrière « Le Moulin à Vent »	8
2.1	Contexte et géométrie de la carrière	8
2.2	Géologie locale au lieu-dit « Le Moulin à Vent »	11
2.3	Caractéristiques de la zone effondrée	12
3	Calculs numériques.....	17
3.1	Modélisation numérique 3D	17
3.1.1	Modèle géométrique	17
3.1.2	Paramètres géomécaniques.....	21
3.1.3	Phasage des calculs	22
3.2	Résultats	22
3.2.1	Contraintes verticales (σ_v).....	23
3.2.2	Plasticité	24
3.2.3	Définition du facteur F	27
4	Conclusions	32
5	Références.....	33
6	Annexes.....	34

Table des figures

Figure 1 : Début des travaux de comblement-sécurisation dans le jardin de la propriété impactée par l'effondrement du 10 mars 2024	7
Figure 2 : Bord de l'effondrement de la carrière « Le Moulin à Vent »	7
Figure 3 : Localisation de la carrière « Le Moulin à Vent », à l'ouest de la commune de Nérigean.....	9
Figure 4: Plan de la carrière et position de l'effondrement (établi par le syndicat intercommunal EPRCF33).....	9
Figure 5 : Plan de la carrière et position de l'effondrement (établis par l'EPRCF33) reportés sur l'orthophotographie IGN du 11/05/2024.....	10
Figure 6: Vue de dessus montrant les quelques zones (plus foncées) de superposition (maillage déduit du nuage de points obtenu par le LiDAR de l'EPRCF33).....	11
Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après le site Infoterre BRGM).....	12
Figure 8 : Vue aérienne de l'effondrement (orthophotographie IGN du 11/05/2024).....	13
Figure 9 : Distribution du taux de défrèvement au voisinage de la zone effondrée.	14
Figure 10 : Isovaleurs de profondeur, vue de dessus de la carrière.....	15
Figure 11 : Isovaleurs de profondeur, vue de dessous de la carrière.....	15
Figure 12 : Isovaleurs de profondeur, vue en 3D de la carrière.	16
Figure 13 : Nuage de points final (à partir d'un rééchantillonnage avec une distance inter-points de 20 cm) : en noir = points conservés, en rouge = points ajoutés.....	17
Figure 14 : Maillage des 10 piliers de la zone effondrée et des galeries de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent ».....	18
Figure 15 : Constitution des 10 groupes de mailles relatives aux piliers dans la zone effondrée.....	18
Figure 16 : Topographie au droit de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent »	19
Figure 17 : Maillage du modèle 3D de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent ».....	20
Figure 18 : Représentation des cercles de Mohr définissant le facteur F	23
Figure 19 : Isovaleurs de la contrainte verticale, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers de la carrière.	24
Figure 20 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers de la carrière.	26
Figure 21 : Distribution de la plasticité en traction, atteinte au toit des galeries de la carrière.	26

Figure 22 : Inventaire des désordres souterrains et photographie d'une rupture mécanique (source EPRCF33).....	27
Figure 23 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers de la carrière « Le Moulin à Vent ».....	27
Figure 24 : Isovaleurs de la distance relative au critère de rupture en cisaillement (F) dans les piliers de la zone effondrée et moyenne de F associée à chaque pilier.....	28
Figure 25 : Isovaleurs du facteur F dans la zone effondrée, suppression des piliers n° 6 et 8.....	29
Figure 26 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers n° 2, 5, 6, 8 et 9.....	30
Figure 27 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers n° 1, 2, 3, 5, 6, 8 et 9.....	30
Figure 28 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers effondrés et de leur recouvrement.....	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des calcaires et argiles/limons constitutifs du massif.....	21
Tableau 2 : Valeurs moyennes du facteur F dans 10 piliers de la zone effondrée.....	28
Tableau 3 : Critère de suppression des piliers de la zone effondrée lié aux valeurs moyennes du facteur F.....	31

Résumé

Le 10 mars 2024, un effondrement généralisé est survenu à l'aplomb d'une partie de l'ancienne carrière souterraine dite « Le Moulin à Vent » située sur la commune de Nérigean, en Gironde (33). Cet effondrement a affecté, en surface, une zone elliptique d'environ 20 x 35 m (560 m²) et de 5 à 6 m de profondeur.

Cet effondrement généralisé constitue un retour d'expérience qu'il est intéressant de valoriser au mieux afin d'améliorer la connaissance des facteurs déclenchant de ce type de désordre et de fait la prévention de ce type de phénomène (relativement rares mais d'intensité particulièrement élevée).

Cette démarche a déjà été appliquée en 2023, pour l'effondrement généralisé de la carrière de Bellegarde de Naujan-et-Postiac (à 12,6 km de Nérigean). Elle a servi de point de départ à la présente étude.

Ainsi, cette étude s'intéresse plus spécifiquement à la résistance des piliers de la carrière qui pourrait générer l'effondrement. La première partie présente les données disponibles permettant l'analyse de cet effondrement. La seconde partie est dédiée à l'interprétation des résultats obtenus par la modélisation numérique 3D.

Grâce à ce travail, un mécanisme et un scénario d'effondrement de la carrière « Le Moulin à Vent » (2024) ont été proposés. Le modèle numérique identifie l'intégralité des piliers rompus de la zone effondrée en simulant une dynamique de propagation de ruine des piliers fondée sur la distance au critère de rupture. Un très important taux de défruitement (environ 90 %) du secteur effondré correspondant à un groupe de petits piliers plus chargés, car plus profonds que la moyenne de la carrière, permet d'expliquer cet effondrement.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, , Verneuil-en-Halatte : Ineris - 227099 - v1.0, 30/01/2025.

Mots-clés :

Carrières souterraines – stabilité – effondrement - modélisation numérique, Nérigean, Gironde (33), France, Latitude° : 44,845067, Longitude ° : -0,305399

1 Introduction et objectifs

Le 10 mars 2024, un effondrement généralisé est survenu à l'aplomb d'une partie de l'ancienne carrière souterraine dite « Le Moulin à Vent » située sur la commune de Nérigean, en Gironde (33). Cet effondrement a affecté en surface une zone quasi-elliptique d'environ 20 et 35 m de petit et grand axes (580 m²) et de 4 à 5 m de profondeur. Survenu sur plusieurs parcelles privées, il n'a fait aucune victime mais a affecté les biens de deux propriétés (Figure 1 et Figure 2). En effet, une maison s'est partiellement écroulée en même temps que le garage de la propriété voisine. D'après le propriétaire du garage détruit, l'effondrement se serait produit rapidement (quelques secondes) sans signes précurseurs préalablement visibles en surface. Le dernier effondrement de ce type était survenu trois ans auparavant (13 mars 2021), à Naujan-et-Postiac (à 12,6 km au ESE), également en Gironde, effondrement dont l'Ineris a établi la rétroanalyse (Renaud, 2023).

L'effondrement généralisé d'une partie de la carrière « Le Moulin à Vent » à Nérigean, en 2024, constitue un retour d'expérience qu'il est intéressant de valoriser au mieux afin d'améliorer la connaissance des facteurs déclenchant de ce type de désordre et de fait la prévention de ce type de phénomène (relativement rare mais d'intensité particulièrement élevée).

Dans le cadre de nos travaux d'appui pour le Ministère, une visite de plusieurs géotechniciens a été menée sur site le 9 juillet 2024 afin de constater l'effondrement avant la fin des travaux de mise en sécurité (remblaiement).

De plus, une première analyse des données historiques par l'EPRCF33 a conduit à ces premières réflexions :

- 1) Les configurations géologique et topographiques de la carrière « Le Moulin à Vent » sont identiques à celles de la carrière de Bellegarde de Naujan-et-Postiac, ce qui permet d'adopter les mêmes propriétés géomécaniques que celles déterminées lors de la rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac le 13 mars 2021 (Renaud, 2023) ;
- 2) Les piliers effondrés présentaient des élancements relativement importants, en limite des gammes classiques de sensibilité au phénomène de flambement de structures de ce type. De plus, il est avéré que ce secteur de la carrière était plus défrUIT que le reste de la carrière.

L'évaluation de la stabilité d'une carrière souterraine, utilisant la méthode des chambres et piliers abandonnés, comme celle présentement étudiée, dépend de plusieurs facteurs : la profondeur, la géométrie des chambres et des piliers (et par conséquent le taux de défrUITement), les caractéristiques géomécaniques des formations dans l'influence de l'exploitation. Certains éléments sont facilement identifiables et pris en compte si l'on veut établir un modèle numérique pour évaluer la stabilité et rétroanalyser un effondrement. D'autres facteurs sont moins évidents et nécessitent des hypothèses pour combler l'absence de données géomécaniques, indispensables à cette démarche de modélisation.

Cette étude a pour objectif d'établir une rétroanalyse de l'effondrement afin de représenter au mieux l'état de contraintes réel dans les piliers et leur critère de rupture.

Ce rapport se divise en deux parties. La première partie est consacrée aux données disponibles pour rétroanalyser cet effondrement. La seconde est consacrée à l'analyse des résultats obtenus par la modélisation numérique 3D (modèle continu en différences finies).



Figure 1 : Début des travaux de comblement-sécurisation dans le jardin de la propriété impactée par l'effondrement du 10 mars 2024



Figure 2 : Bord de l'effondrement de la carrière « Le Moulin à Vent ».

2 Données disponibles pour la carrière « Le Moulin à Vent »

Les données et connaissances utilisées dans le cadre de cette étude sont issues principalement :

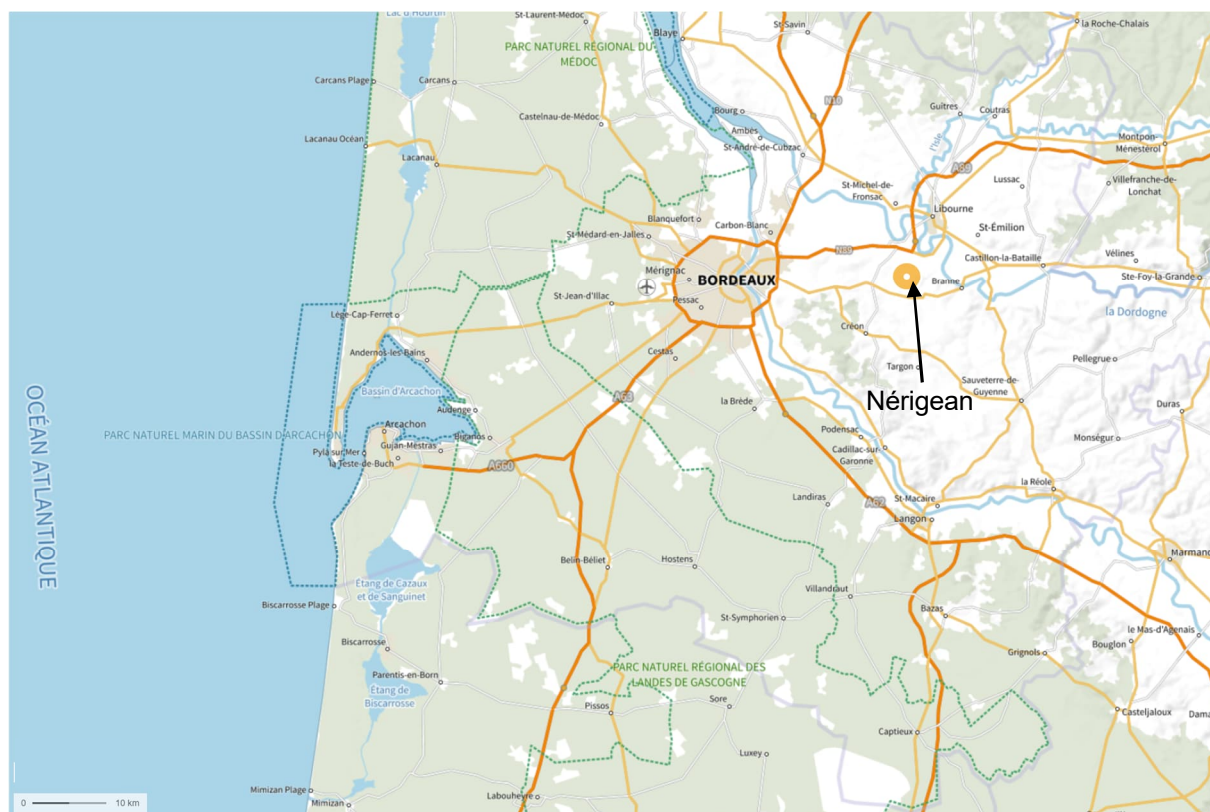
- du rapport d'expertise du Cerema, établi en juin 2024, dans le cadre de la demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans le département de la Gironde, commune de Nérigean (Respaud, 2024). Dans ce rapport, il est notamment mentionné les éléments issus d'un diagnostic géotechnique, réalisé en 2020 par EPRCF 33 et ANTEA Group ;
- du rapport d'expertise de l'EPRCF33, établi en juillet 2024, sur l'analyse de l'effondrement généralisé de carrière survenu au 1410-1452, route de Souloire le 10 mars 2024, lieu-dit Le moulin à Vent, commune de Nérigean (Hauquin & Carponsin, 2024). Dans ce rapport, l'EPRCF33 fait mention de l'état, en 2020, du secteur non encore effondré.

A ces études, s'ajoute la visite de terrain réalisée le 9 juillet avec l'EPRCF33, l'Ineris, et le BRNT¹. Cette visite a permis de constater l'ampleur de l'effondrement tant en surface qu'en souterrain et de visiter une partie de la carrière, à proximité de l'effondrement.

2.1 Contexte et géométrie de la carrière

La commune de Nérigean est située dans le département de la Gironde, à une vingtaine de kilomètres à l'est de Bordeaux. L'exploitation souterraine a été menée au lieu-dit « Le Moulin à Vent », à l'ouest de la commune (Figure 3).

Les travaux d'extraction de pierre se sont déroulés dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème} siècle. Dans l'emprise de l'effondrement, deux habitations ont été construites dans les années 1960 (avec des extensions plus récentes). D'après le rapport du Cerema aucun terrassement, aménagement ou modification récent n'a été réalisé sur les parcelles sinistrées (après recueil des témoignages des propriétaires et de la mairie).



¹ Bureau des Risques Naturels Terrestres de la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) au Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques.

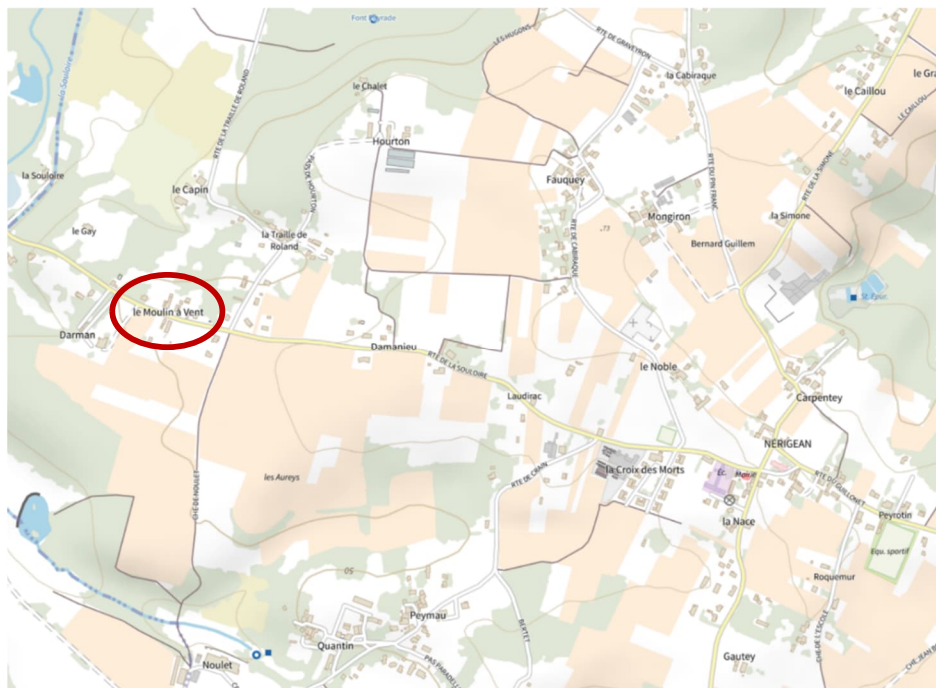


Figure 3 : Localisation de la carrière « Le Moulin à Vent », à l'ouest de la commune de Nérigean

La carrière souterraine a été exploitée principalement sur un niveau, par la méthode des chambres et piliers abandonnés (Figure 4 et Figure 5). Un deuxième niveau est présent en quelques endroits de la carrière.

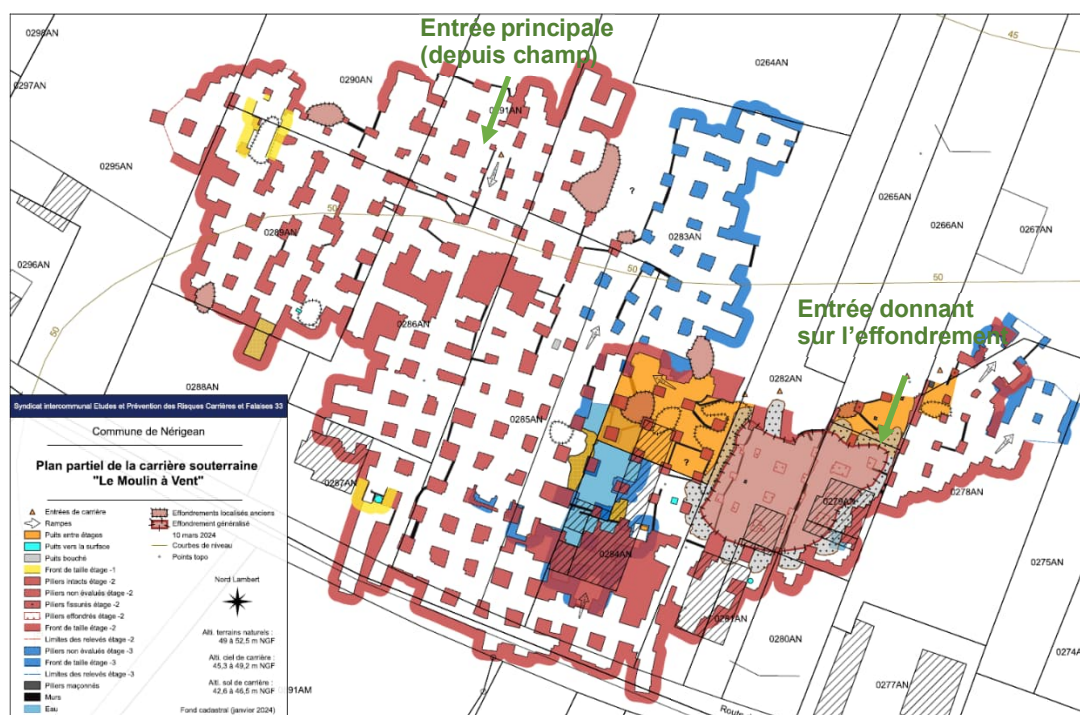


Figure 4: Plan de la carrière et position de l'effondrement (établi par le syndicat intercommunal EPRCF33).

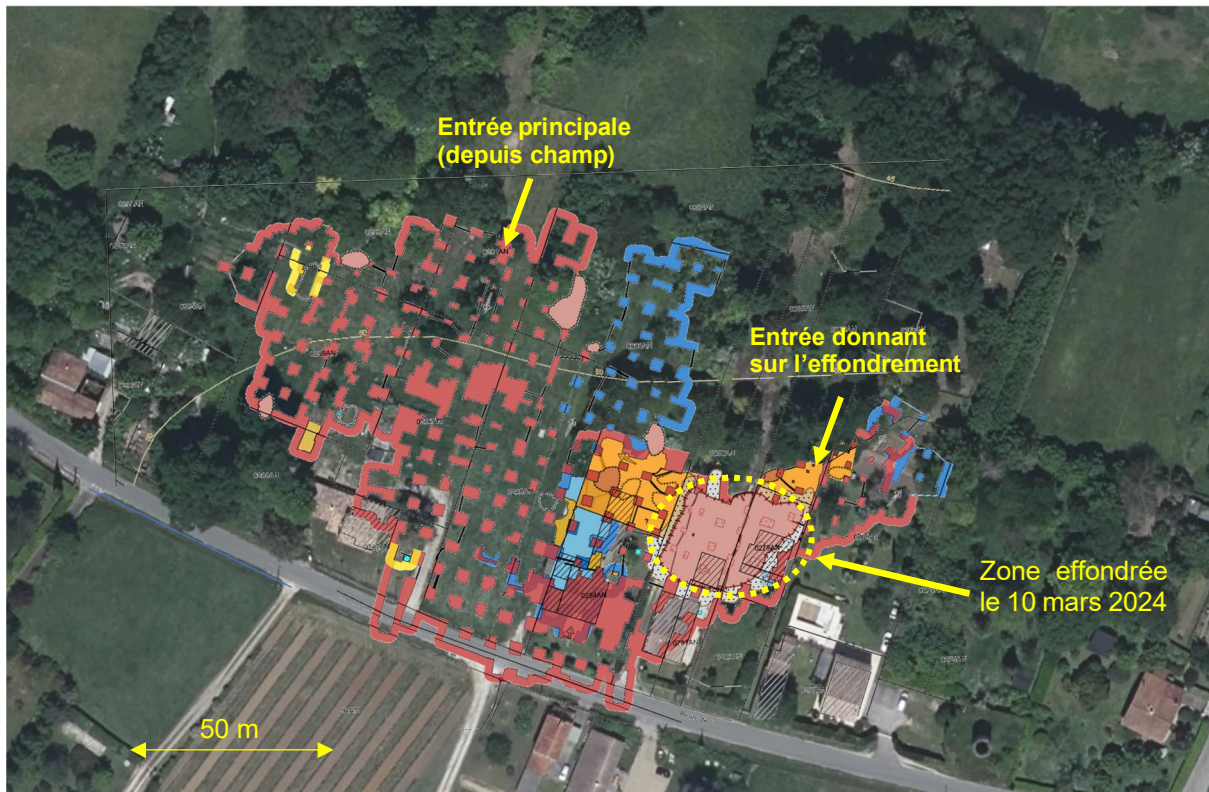


Figure 5 : Plan de la carrière et position de l'effondrement (établis par l'EPRCF33) reportés sur l'orthophotographie IGN du 11/05/2024.

Les caractéristiques d'exploitation de la carrière sont les suivantes :

- le mur de la carrière se situe à une profondeur variant entre 2,5 et 9,7 m ;
- la hauteur des vides varie entre 1 m et 5,2 m ;
- la largeur des galeries est comprise entre 2 m et 5 m et leur superficie horizontale est d'environ 8 200 m² ;
- le taux de défruitement (rapport de la surface de vide et de la surface totale du niveau exploité) est d'environ 84 % ;
- la surface totale des piliers est égale à 1500 m² et ces piliers ont entre 2 m² à 20 m² de section ;
- l'élancement des piliers (hauteur/ plus petite largeur) varie entre 0,9 et 3,6 (moyenne = 1,25) ;
- l'épaisseur du recouvrement est de l'ordre de 1,5 m à 7,5 m (entre 3,5 et 6 m au niveau de la zone effondrée).

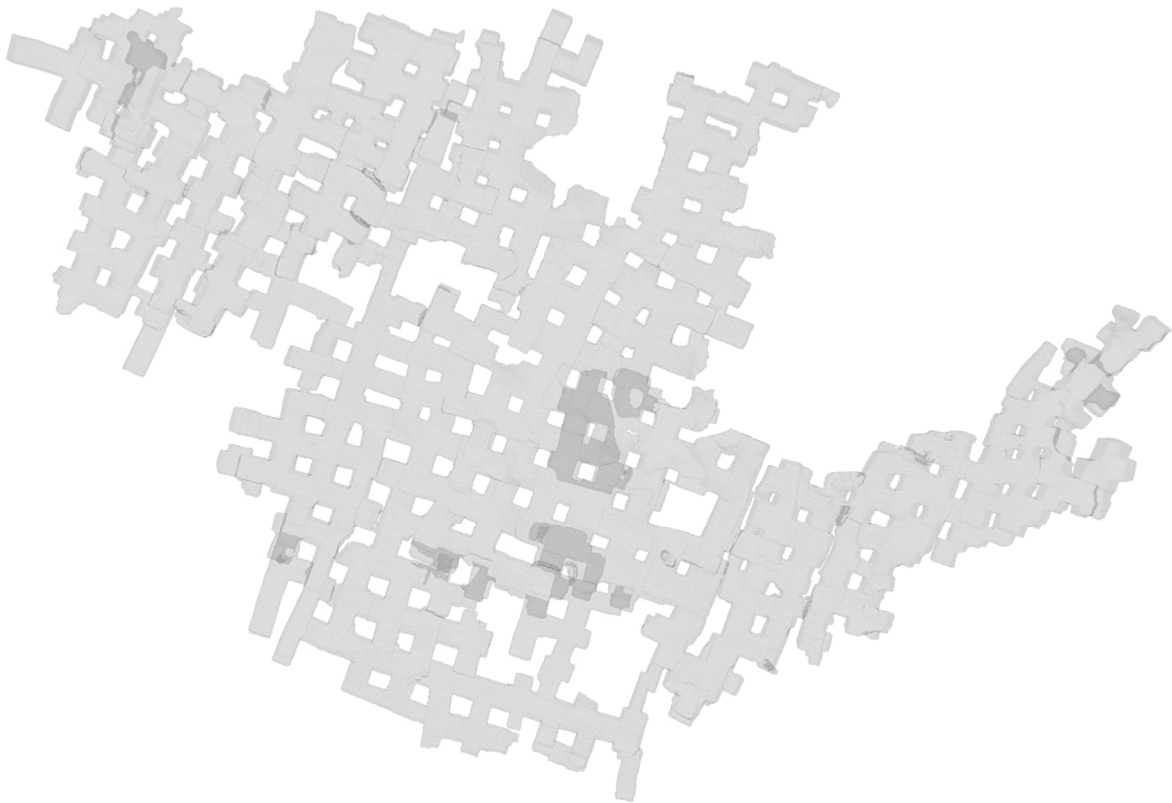


Figure 6: Vue de dessus montrant les quelques zones (plus foncées) de superposition (maillage déduit du nuage de points obtenu par le LiDAR de l'EPRCF33)

L'étude menée en 2020 a permis de dresser un état géotechnique de la carrière. Essentiellement, les désordres relevés étaient :

- une fissuration mécanique particulièrement développée en partie sud-ouest, affectant le toit de la carrière ainsi que les piliers ;
- des infiltrations d'eau au toit de la carrière, en particulier en partie nord-ouest ;
- des lentilles karstiques remplies d'argile de décalcification fragilisant le toit de la carrière.

En 2020, il avait notamment été conclu un « mauvais état » du secteur de carrière concerné par l'effondrement du 10/03/2024 et il avait été recommandé de procéder à des travaux de confortement (par comblement au mortier ciment).

2.2 Géologie locale au lieu-dit « Le Moulin à Vent »

Les terrains affleurants au niveau de l'ancienne carrière souterraine sont constitués par les formations géologiques suivantes (Figure 7) :

- environ 10 à 15 m de calcaire marin à Astéries (Oligocène inférieur, Stampien), notés g2B sur la carte géologique n° 804 du BRGM (Figure 7). Ce calcaire est exploité à la carrière « Le Moulin à Vent » ;
- au nord de la carrière : des alluvions et colluvions argilo-sableuses de vallons secs (notées F-C sur la carte géologique). Cette formation colluviale est récente : elle date du Quaternaire. Ces alluvions et/ou colluvions argilo-sableuses ont une puissance de quelques décimètres, voire quelques mètres localement ;
- une formation résiduelle de surface formée par des phénomènes de pédogenèse des molasses argilo-gréseuses carbonatées et du toit du calcaire à Astéries. Cette formation d'altération se

présente sous la forme de limons de surface de 0,20 m à 1 m d'épaisseur, qui peuvent localement remplir les fissures et poches karstiques affectant le calcaire.

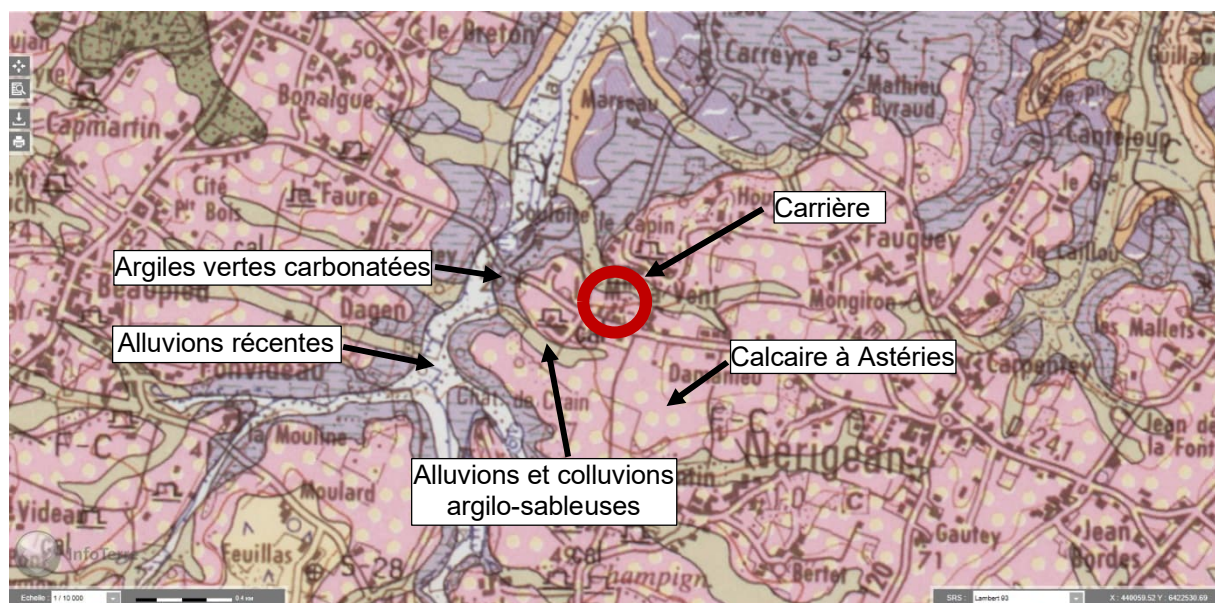


Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après le site Infoterre BRGM).

2.3 Caractéristiques de la zone effondrée

L'effondrement survenu le 10 mars 2024 a affecté la partie est de la carrière, dans un secteur sans superposition de niveaux (Figure 5). Il se présente en surface sous la forme d'un cratère elliptique d'environ 20 et 35 mètres de petit et grand axes respectivement, pour une profondeur de 4 à 5 m (Figure 8). Le secteur étudié est peu vallonné : l'altitude NGF y varie entre 41 m et 56 m.

En souterrain, les limites de l'effondrement sont constituées par un amas d'éboulis compact y empêchant toute progression. De façon similaire au cas de Naujan-et-Postiac (rapport Ineris - 212824 – 2769616), les piliers situés dans l'emprise du cratère se sont tous totalement effondrés. Cet effondrement est clairement délimité dans la carrière : il n'y a pas d'endommagement notable en dehors de la zone effondrée elle-même, notamment les piliers visibles aux abords immédiats de l'effondrement qui sont restés majoritairement intacts. Le personnel de l'EPRCF33 n'a observé aucune nouvelle fissuration mécanique sur les parois de ces piliers.

Les parois du cratère de l'effondrement (Figure 2) ont permis de visualiser sur toute la hauteur, la nature des terrains de recouvrement. Aussi, depuis la surface jusqu'au toit de la carrière, il a été observé :

- une couche de terrains meubles assez hétérogène avec une forte proportion argileuse sur quelques dizaines de centimètres d'épaisseur. Cela correspond à la formation quaternaire des colluvions argilo-sableuses de vallons secs ;
- plusieurs couches de roche calcaire bioclastique d'aspect gréseux jaunâtre d'épaisseur décimétrique à plurimétrique. Ce calcaire micritique passe de la couleur jaune (altéré) près de la surface à une couleur rouille plus en profondeur. Il s'agit du calcaire marin à Astéries (roche carbonatée riche en débris marins : coquilles, coraux, etc.) d'une puissance comprise entre 10 et 15 m. Ces couches peuvent être localement séparées par un inter-banc karstique (cela a pu être observé près de la zone effondrée lors de la visite du 09 juillet 2024).

Sans le voir depuis le bord de l'effondrement, le calcaire marin à Astéries repose sur des argiles carbonatées grisâtres (épaisseur moyenne 15 à 20 m) : les Molasses du Fronsadais. Ces argiles constituent le mur de l'aquifère.

La carrière souterraine a été exploitée avec une épaisseur de recouvrement (Figure 10) variant entre 1 m et 7,5 m, principalement sur un étage, au sein du calcaire bioclastique d'aspect gréseux jaunâtre, à bancs stratigraphiques d'épaisseur moyenne de 1 m, à pendage subhorizontal.



Figure 8 : Vue aérienne de l'effondrement (orthophotographie IGN du 11/05/2024).

Sur la base du nuage de points acquis par l'EPRCF33 avant l'effondrement (Figure 4) et de la visite du secteur, on constate que ce désordre a emporté une quinzaine de piliers de petites sections. En tenant compte des données disponibles et en numérisant le secteur concerné de la carrière (Figure 9), les caractéristiques suivantes peuvent être précisées :

- des hauteurs de vides comprises entre 1,0 m et 5,2 m (moyenne = 2,7 m) ;
- des piliers très élancés (élancement : h/l variant entre 0,9 et 3,6, moyenne = 1,25) ;
- des largeurs de piliers comprises entre 1,4 et 6 m (moyenne = 2,4 m), leur section horizontale varie entre 2 m² et 20 m² (moyenne = 6 m²) ;
- des largeurs de galeries comprises entre 2,0 et 5 m ;
- la surface horizontale exploitée (mur des galeries) cumulée est égale à 8 151 m² pour une surface cumulée de piliers égale à 1 500 m², ce qui équivaut à un taux de défruitement moyen de 84 % ;
- le volume total des vides modélisés de la carrière est égal à 22 159 m³.

Il est à noter qu'au voisinage de la zone effondrée, le taux de défruitement (90 %) est supérieur à la moyenne de la carrière qui est déjà élevé (84 %). De plus, parmi les piliers effondrés, le taux de défruitement (τ) varie entre 84 % et 99 % (Figure 9), ce qui est supérieur au défruitement relevé dans la zone effondrée à Naujan-et-Postiac ($74 < \tau < 85$ %, moyenne = 79,4 %).

Par ailleurs, dans son rapport de juillet 2024, l'EPRCF33 a noté que les piliers de la zone effondrée avaient un élancement moyen ($h/l = 1,4$) plus élevé que ceux du reste de la carrière ($h/l = 1,25$). De plus, l'EPRCF33 avait inspecté ce secteur en février 2020 en constatant que les piliers de la zone effondrée étaient déjà significativement endommagés. Cet endommagement a été jugé relativement ancien puisque de vieux témoins en ciment détériorés étaient positionnés dans certaines fissures. Dans tous les autres secteurs de la carrière qui ont été visités en juillet 2024, l'état apparent des piliers (intacts) n'a pas évolué depuis 2020.

Lors de cette inspection de février 2020 par l'EPRCF33, il a été noté que le toit du secteur maintenant effondré était particulièrement fragile. Cette fragilité est notamment due à la présence de grandes fissures mécaniques induites par la flexion du toit, des formes de dissolution karstiques associées à des éboulements de toit, des insertions de racines dans les fissures et des infiltrations d'eau. Dans le reste de la carrière, autour de la zone effondrée, le toit avait été jugé globalement plus massif et plus résistant, malgré quelques points de fragilité relevés dans certains secteurs particuliers.

Les iso-profondeurs de la carrière ont pu être calculées en interpolant la surface topographique avec une fonction polynomiale (degré 8) à 2 variables $f(x,y)$ dont la forme explicite est $f(x,y) = \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^j a_{i+\frac{j}{2}(j+1)} x^i y^{n-i}$ (avec $n=8$). Cette interpolation à 45 coefficients $a_{i+\frac{j}{2}(j+1)}$ a été réalisée avec Mathematica et permet de reproduire les détails de la surface topographique avec une erreur moyenne de l'ordre de 7 cm, ce qui est suffisant pour afficher les iso-profondeurs dans le modèle numérique (Figure 10 à Figure 12). Ainsi la profondeur de n'importe quel point $M(x,y,z)$ du modèle est $f(x,y) - z$. Dans l'emprise de la zone effondrée, on constate que la hauteur de recouvrement varie entre 4 et 7 m.

L'analyse des Figure 10 et Figure 11 montre que la différence de profondeur entre le toit et le mur de la carrière est compatible avec la hauteur moyenne des galeries (2,7 m), calculée en divisant le volume des vides par la section horizontale exploitée.



Figure 9 : Distribution du taux de défrètement au voisinage de la zone effondrée.

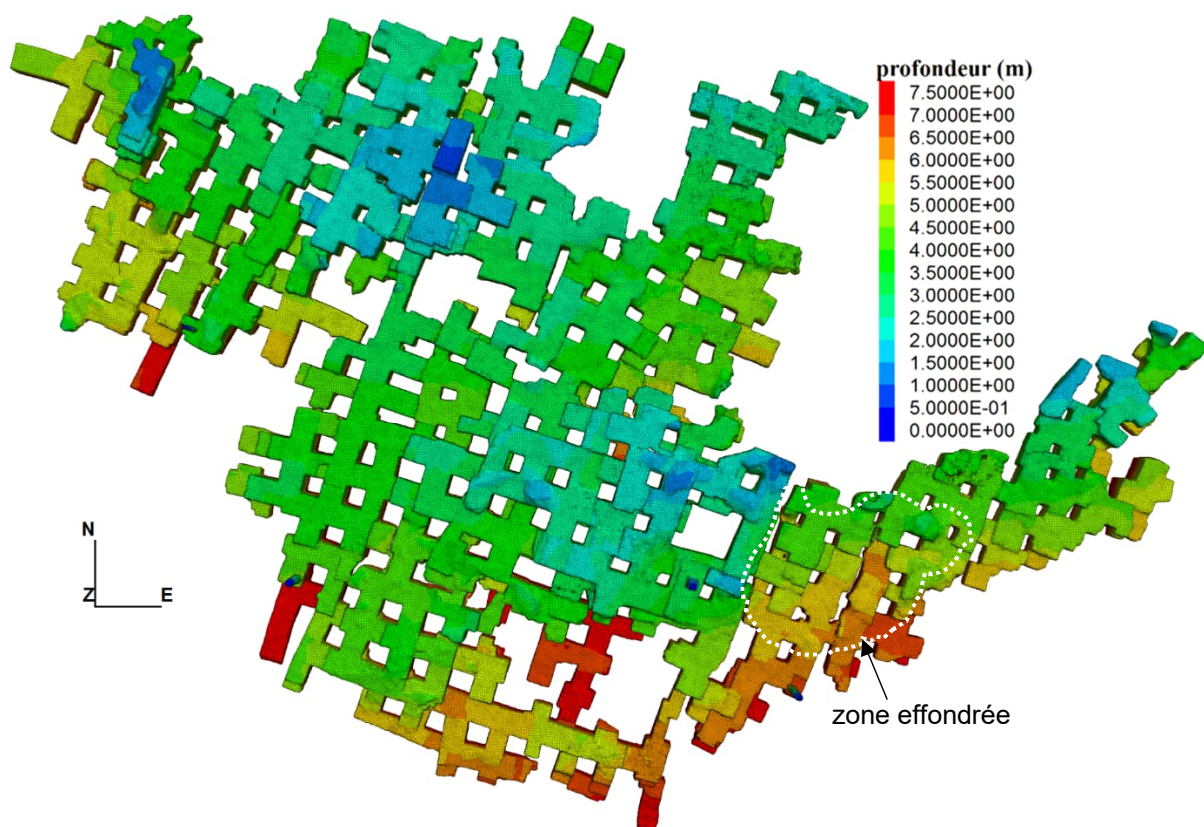


Figure 10 : Isovaleurs de profondeur, vue de dessus de la carrière.

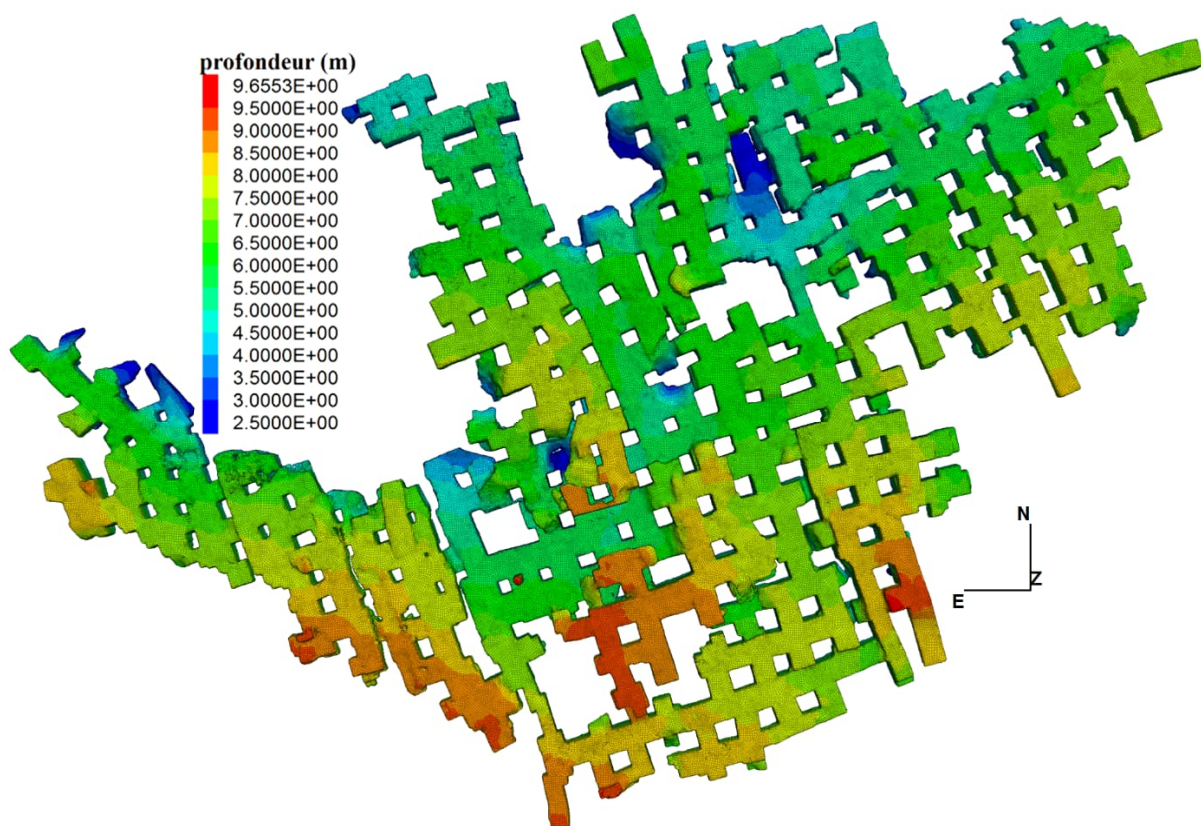


Figure 11 : Isovaleurs de profondeur, vue de dessous de la carrière.

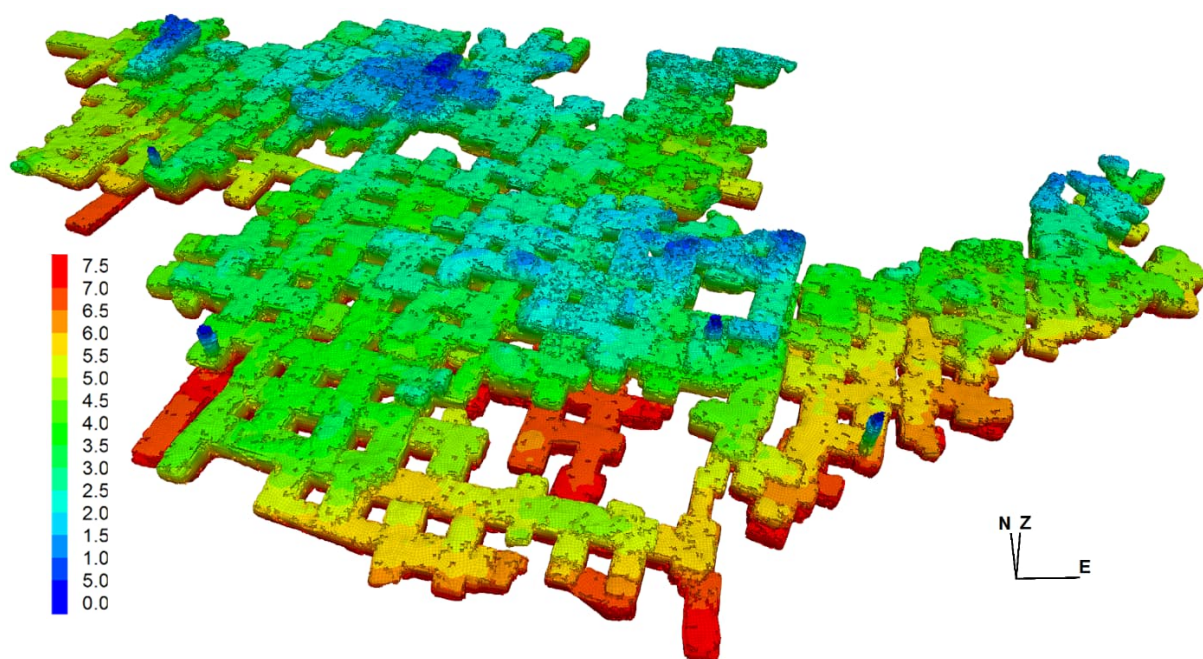


Figure 12 : Isovaleurs de profondeur, vue en 3D de la carrière.

3 Calculs numériques

3.1 Modélisation numérique 3D

A partir d'un certain niveau de complexité géométrique (changement fréquent de pente, toits non plans, grand nombre de piliers, puissance exploitée variable, galeries non linéaires ou piliers non rectangulaires), l'acquisition de la géométrie par scanner laser (ou Lidar) constitue un apport technique important.

A ce titre, le nuage de points acquis par l'EPRCF 33 avec un Lidar constitue dans le cas présent les données d'entrée du modèle géométrique.

3.1.1 Modèle géométrique

La démarche consiste, tout d'abord, à construire un maillage surfacique pour générer à partir de celui-ci un maillage volumique à importer dans le code de calcul géomécanique Flac3D (voir annexe 1 pour plus de détails).

Le souci avec l'algorithme permettant de construire un maillage surfacique est qu'il est très sensible aux défauts dans le nuage de points. Le nettoyage de ces défauts est aussi chronophage que nécessaire pour que la reconstruction de surface fonctionne efficacement. Ainsi 36 848 points ont été manuellement créés, 116 163 ont été manuellement supprimés (Figure 13) pour aboutir à un nuage final de 498 065 points.

Le maillage surfacique homogène final est réalisé avec une finesse de 40 cm (Figure 14). Cette finesse permet de représenter dix piliers de la zone effondrée (Figure 15) avec suffisamment de zones (entre 659 et 2667) pour une bonne précision des résultats. Il est à noter que certains piliers très allongés (au sud du pilier n°3, voir Figure 9) ne sont pas explicitement « surveillés » comme les dix retenus sur la Figure 15. En effet, la forme allongée de ces piliers ne permet pas de les distinguer facilement. Ne pas pouvoir les assimiler à des groupes de zones ne gêne pas l'analyse de l'effondrement, mais empêche les calculs statistiques (moyenne de F dans le pilier par exemple).

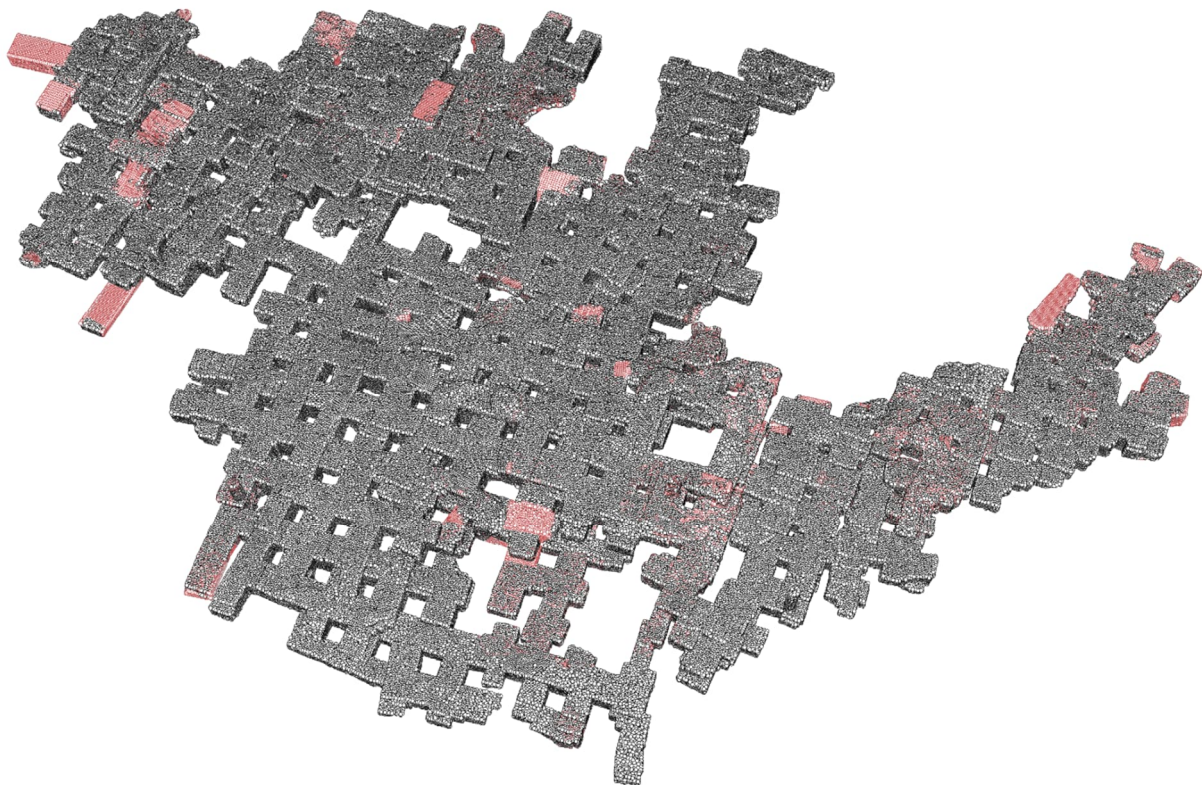


Figure 13 : Nuage de points final (à partir d'un rééchantillonnage avec une distance inter-points de 20 cm) : en noir = points conservés, en rouge = points ajoutés.

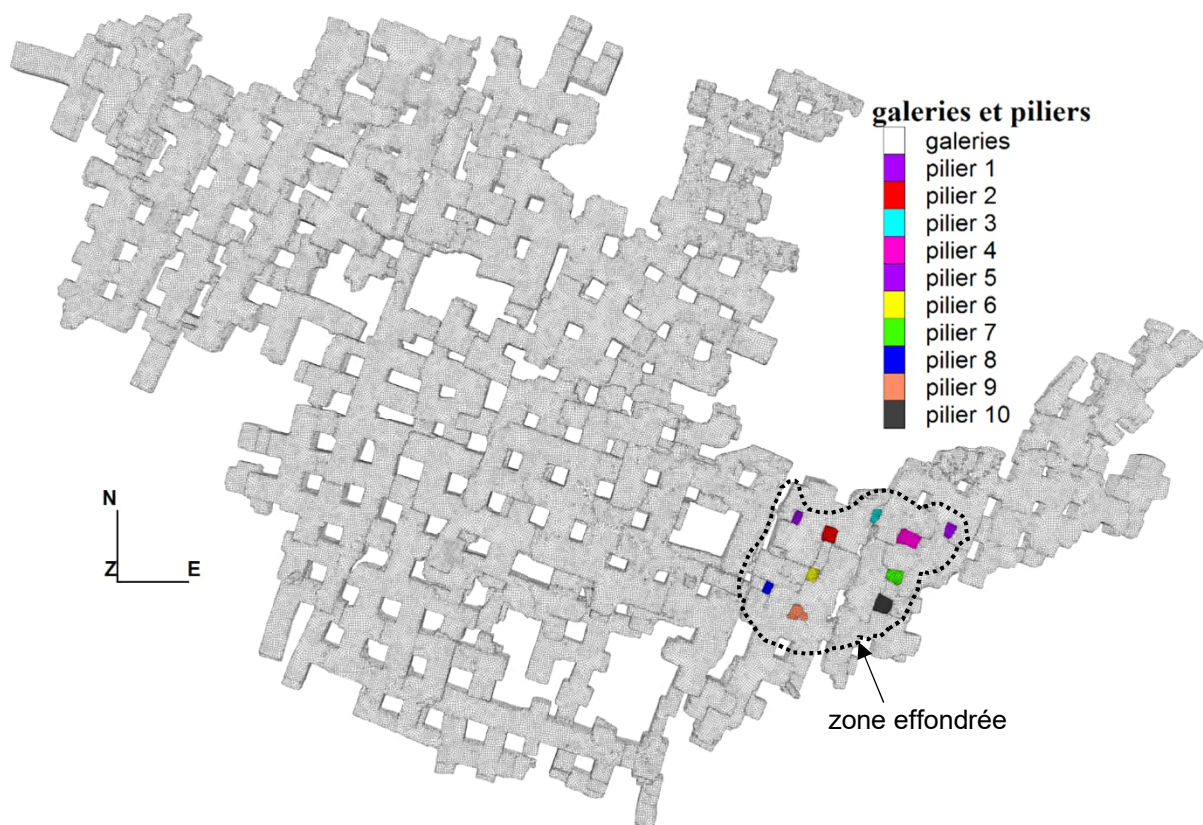


Figure 14 : Maillage des 10 piliers de la zone effondrée et des galeries de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent ».



Figure 15 : Constitution des 10 groupes de mailles relatives aux piliers dans la zone effondrée.

Le modèle numérique 3D final (dont une représentation est proposée à la Figure 17) considère l'intégralité des piliers et galeries de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent », soit environ 160 piliers.

Afin de garantir la validité des résultats du modèle numérique, il est nécessaire de modéliser et de mailler un volume de massif assez étendu autour de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent ». Les

limites verticales du modèle ont été placées à 50 m de tout ouvrage souterrain, soit à plus de 20 rayons (de galerie). Ces distances garantissent l'indépendance mécanique entre la zone influencée par les excavations et les limites du modèle.

La topographie a été créée en important un fichier MNT (Modèle Numérique de Terrain disponible via la BD Alti 1 m du site de l'IGN) défini en coordonnées horizontales Lambert 93. Le nuage de points résultant a ensuite été maillé pour représenter le plus fidèlement possible la « véritable » surface topographique (maille de 2 m d'arête). L'altitude (NGF) du modèle varie entre 40,8 m et 55,5 m (Figure 16). En y adjoignant les 4 frontières verticales et la base du modèle, on obtient ainsi une « boîte » qui est maillée avec une précision de 2 à 5 m (Figure 17).

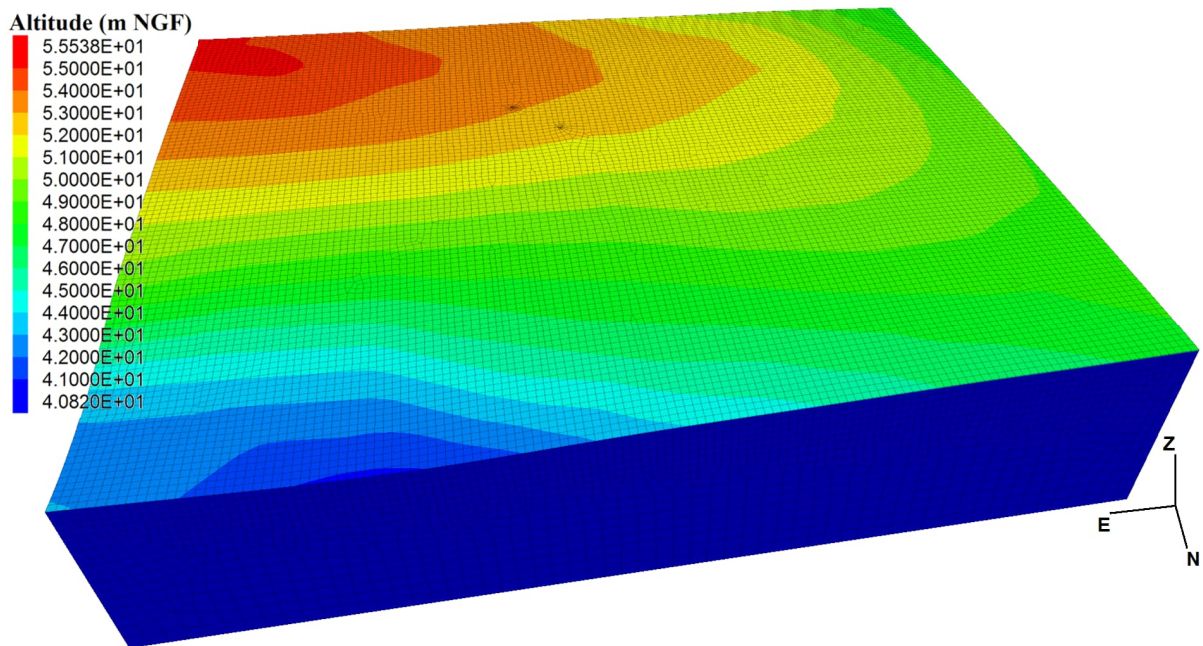


Figure 16 : Topographie au droit de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent »

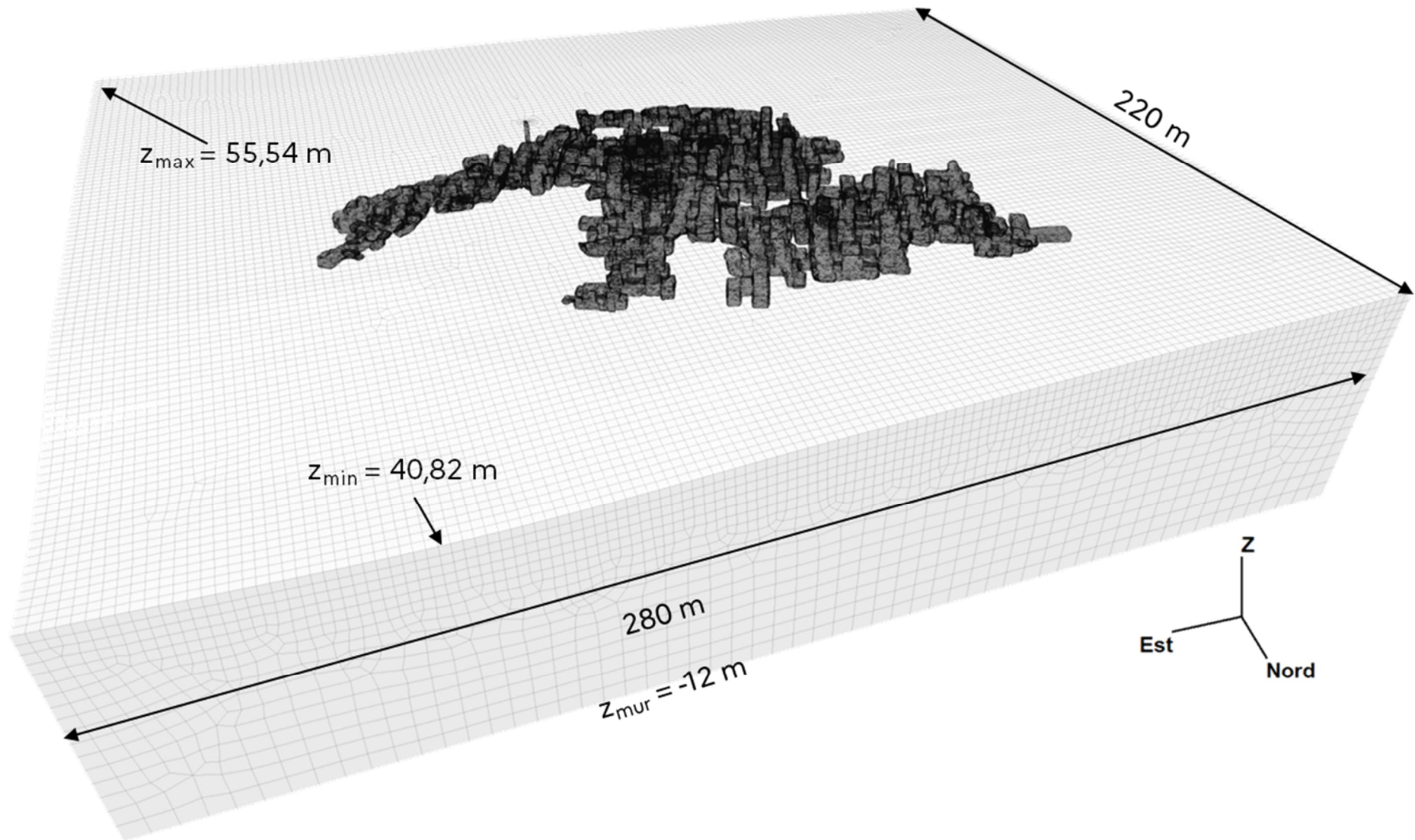


Figure 17 : Maillage du modèle 3D de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent »

Le maillage volumique (Figure 17) utilisé dans cette étude correspond à 8 251 307 zones (dont 91 % du volume en hexaèdres) et 3 678 652 nœuds. Sa génération demande plus de 40 h de calcul.

Le domaine géométrique de ce modèle 3D s'étend sur 280 m dans la direction X (E), 220 m dans la direction Y (N) et sur une hauteur, variant entre 53 m et 68 m (direction Z) pour un volume maillé de 3,81 hm³.

Après l'équilibre des contraintes initiales dans le modèle, les vides sont ensuite creusés en supprimant les mailles² (affectées aux galeries) du maillage.

3.1.2 Paramètres géomécaniques

Comme aucun point de la BSS³ n'est disponible à proximité immédiate du site pour affiner la description de la géologie locale au lieu-dit « Le Moulin à Vent » (§2.2), le modèle numérique 3D comprend donc deux matériaux : le calcaire à Astéries et une formation d'altération (regroupant les argiles, les limons de surface et les alluvions et colluvions argilo-sableuses).

Le Tableau 1, présente la liste des paramètres physiques et mécaniques des deux matériaux retenus pour la modélisation : le calcaire exploité et les argiles/limons du recouvrement. Il s'agit des mêmes données que celles utilisées pour la rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac le 13 mars 2021 (Renaud, 2023). Ces valeurs proviennent du rapport BRGM 73-SGN-135-AQI (Allard, 1973) ou sont des hypothèses (fondées sur le REX de l'Ineris, notamment pour les paramètres des argiles/limons). Les caractéristiques élastoplastiques (4 dernières lignes du Tableau 1) correspondent au critère de rupture de Mohr-Coulomb.

Pour la rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac (Renaud, 2023), la résistance à la compression uniaxiale R_c du calcaire dans le modèle numérique a été dégradée par incréments en partant de la valeur moyenne des essais (1,9 MPa) jusqu'à la valeur finale de $R_c = 1$ MPa. Cette diminution de 47 % correspond à un effet d'échelle couramment rencontré en mécanique des roches. Il s'avère que cette valeur de 1 MPa est celle qui permet d'expliquer au mieux l'effondrement de Naujan-et-Postiac. Nous considérons donc que cette valeur représente la résistance réelle du calcaire à l'échelle du massif de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent » (Tableau 1).

D'autre part, le rapport BRGM montre que le ratio R_c/R_t (R_t résistance à la traction) est égal en moyenne à 5,5 (comparable à d'autres essais réalisés sur des calcaires similaires en Gironde et Charente-Maritime). Les valeurs de R_t dans le Tableau 1, obéissent à cette règle. Cette donnée est importante parce que sans information particulière, le rapport R_c/R_t est souvent défini entre 10 et 12 (tableau 1.2 de Fine 1993).

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des calcaires et argiles/limons constitutifs du massif

Désignation	Symbole	Unité	calcaire	argile/limon
Masse volumique	ρ	[kg.m ⁻³]	1700	2000
Module de Young	E	[MPa]	4000	50
Coefficient de Poisson	ν	[-]	0,3	0,3
Cohésion	C	[MPa]	0,29	0,2
Angle de frottement interne	ϕ	[°]	30	20
Résistance à la traction	R_t	[MPa]	0,18	0,05
Résistance à la compression uniaxiale	R_c	[MPa]	1,0	0,57

Le modèle de comportement utilisé est mécanique, sans couplage hydraulique. Cependant, une analyse météorologique historique a montré que le mois de mars 2024 a été le plus pluvieux depuis 18 ans (+ 164 % par rapport à la moyenne) pour la station de Bordeaux-Mérignac. Les précipitations ont

² Les mailles sont les zones élémentaires constituant le maillage du modèle numérique. A chaque cycle de calcul, différentes grandeurs (contraintes, déplacements, etc.) sont calculées aux nœuds ou au centroïde de ces zones pouvant être hexaédriques, prismatiques, pyramidales ou tétraédriques.

³ Banque de Données du Sous-Sol

été supérieures à plus de deux fois la moyenne pour quatre des six mois précédant ce mois de mars 2024. Le rôle potentiel de la pluviométrie ne peut donc être exclu. Mais avant de dégrader des propriétés mécaniques prenant en compte ce phénomène, le calcul numérique va permettre de vérifier l'état de stabilité de la carrière.

3.1.3 Phasage des calculs

Les calculs réalisés dans le cadre de cette étude se décomposent selon les étapes suivantes :

- 1) équilibre élastique gravitaire sans excavation pour obtenir le champ de contrainte initial ;
- 2) excavation des galeries : équilibre élastique ;
- 3) équilibre élastoplastique (modèle de Mohr-Coulomb) ;
- 4) retraits successifs de groupes de piliers trop plastifiés pour vérifier le scénario et l'extension de l'effondrement.

3.2 Résultats

Cette section présente les résultats du calcul numérique de la stabilité mécanique de la carrière souterraine « Le Moulin à Vent ».

Notons que la méthode analytico-empirique, utilisée pour être comparée aux résultats de modélisation numérique lors de la rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac (Renaud, 2023), n'a pas été mise en œuvre dans la présente étude, car il a été montré que cette méthode n'est pas capable de prendre en compte les phénomènes suivants :

- un pilier peut être influencé par le voisin de son voisin (ce qui est nativement pris en compte avec un modèle numérique), surtout si ce dernier est un pilier plus massif (barrière) ou est un bord ferme (limite d'exploitation) ;
- la plasticité est un processus non linéaire qui peut fortement influencer le chargement d'un pilier : en général, les zones capables de reprendre une charge se trouvent concentrées au cœur du pilier. Cela revient à augmenter le taux de défruitement puisqu'une certaine épaisseur horizontale du pilier ne participe plus mécaniquement à son équilibre.

Ainsi, plus la configuration géométrique de la carrière souterraine est complexe et s'écarte d'un schéma d'exploitation homogène et régulier, moins la méthode analytico-empirique est apte à évaluer la stabilité de cette carrière. C'est pourquoi les résultats qui suivent ne reposent que sur la modélisation numérique.

L'analyse des résultats a permis :

- d'estimer les sollicitations dans les piliers (notamment dans la zone effondrée) ;
- d'affiner l'analyse sur l'état de l'ensemble des galeries souterraines en s'appuyant sur le résultat des inspections visuelles réalisées dans les galeries (Figure 4) ;
- d'estimer l'état de la stabilité mécanique des piliers de la carrière.

L'analyse des résultats de la modélisation numérique a été réalisé autour de trois grandeurs clés afin de quantifier la stabilité (à court et à moyen terme) de la carrière « Le Moulin à Vent » : les contraintes dans les piliers, la plasticité et le facteur F (qui peut être assimilé à un facteur de sécurité, car il correspond à la distance relative au critère à la rupture).

La plasticité (par opposition à l'élasticité) est un état de la matière correspondant à des déformations irréversibles subies par un objet (dans le cas présent une maille du modèle numérique). Ces déformations plastiques se produisent par un réarrangement des éléments constitutifs de la roche. Les zones élastiques sont les zones pour lesquelles aucun état irréversible n'a été atteint au cours des phases d'excavation. Dans le modèle numérique, l'état de contrainte calculé et comparé au critère de plasticité, permet de savoir si la maille correspondante est entrée en plastification ou non. La distribution des valeurs de F dans les piliers ainsi que l'analyse visuelle de la distribution de la plasticité permet de conclure sur la stabilité des piliers analysés.

La valeur de F permet d'évaluer la stabilité des ouvrages. La valeur de 1 indique l'équilibre limite.

Concrètement, plus les contraintes principales majeure et mineure (σ_1 et σ_3 , représentées par un cercle dit de Mohr dans l'espace σ_n, τ sur la Figure 18) d'une zone (dans un massif rocheux) sont distantes du ou des critères de rupture (calculé avec la contrainte principale majeure atteinte sur le critère : σ_1^c), plus cette zone est stable. Le facteur F est calculé de la manière suivante :

$$F = \frac{\text{rayon du cercle de Mohr à la rupture}}{\text{rayon du cercle de Mohr (état actuel)}} = \frac{r_b}{r_a} = \frac{\sigma_1^c - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

avec $\sigma_1^c = \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} \sigma_3 - 2C \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$ ou $\sigma_1^c = \frac{R_c^2}{4C^2} \sigma_3 - R_c$ pour le critère de plasticité de Mohr-Coulomb,

C, R_c et ϕ étant respectivement la cohésion, la résistance à la compression simple et l'angle de frottement du matériau (Tableau 1).

Ainsi, plus F est proche de 1, plus la zone considérée est proche de la rupture (en cisaillement : carré rouge ou en traction : carré vert, Figure 18).

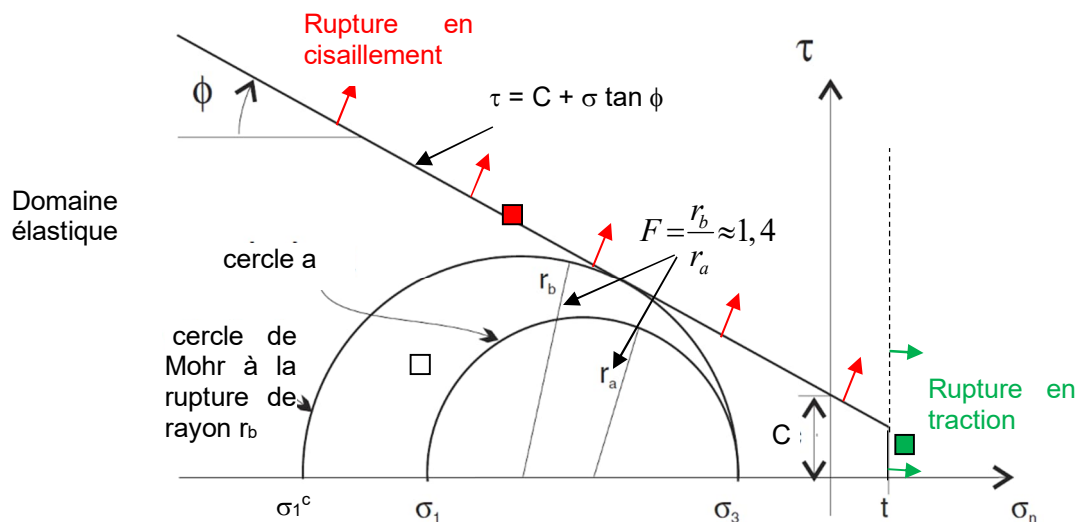


Figure 18 : Représentation des cercles de Mohr définissant le facteur F .

3.2.1 Contraintes verticales (σ_v)

Dans cette section, l'intensité des contraintes verticales (en MPa) calculée pour $R_c = 1,0$ MPa est présentée sur une coupe subhorizontale traversant les piliers de la carrière « Le Moulin à Vent » (Figure 19).

La contrainte verticale dans les piliers est la contrainte principale majeure intervenant surtout dans le critère de rupture en cisaillement qui est lié à la résistance à la compression (R_c).

Dans ce calcul, l'amplitude des contraintes verticales dépasse la valeur de R_c (1,0 MPa) dans trois piliers (entourés en rose sur la Figure 19). Ces piliers sont situés dans la zone effondrée du 10 mars 2024 (délimitation en noir sur la Figure 19) qui est aussi un secteur où l'épaisseur du recouvrement est plus élevée que la valeur moyenne de la carrière.

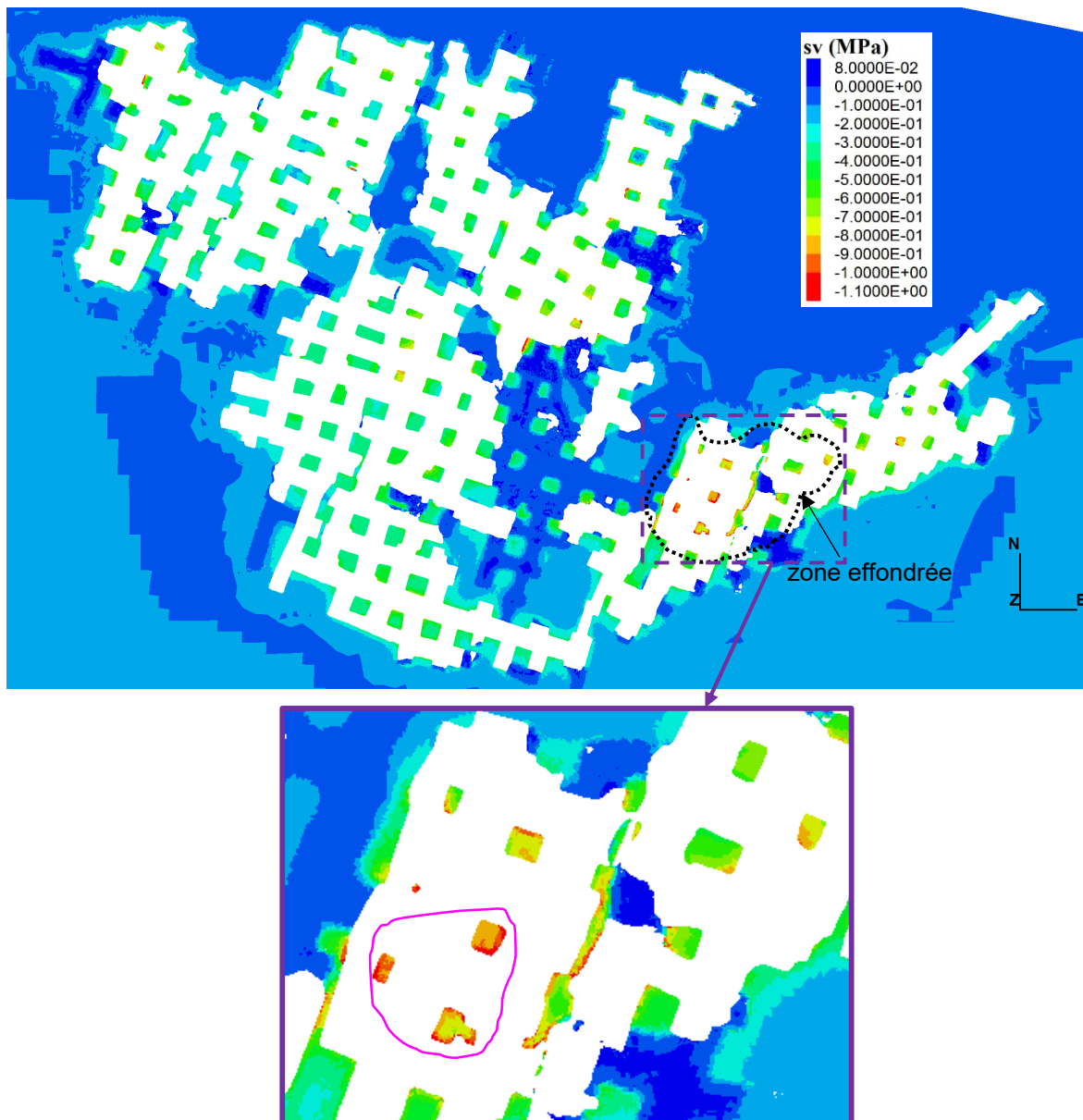


Figure 19 : Isovaleurs de la contrainte verticale, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers de la carrière.

Le seul calcul de σ_v n'apporte pas suffisamment d'informations pour statuer sur la stabilité des piliers. Il est alors nécessaire d'analyser la distribution de la plasticité et du facteur F car ces deux grandeurs tiennent compte des deux contraintes principales (majeure et mineure). En effet, il est probable que le confinement appliqué aux piliers (rôle de la contrainte principale mineure σ_3 , souvent horizontale pour un pilier) joue un rôle stabilisant.

3.2.2 Plasticité

La Figure 20 montre les zones plastiques (cisaillement en rouge et traction en vert) dans un plan de coupe subhorizontal traversant les piliers de la carrière. La zone effondrée est délimitée par une courbe noire. L'analyse de la Figure 20 montre que les piliers qui sont significativement plastifiés sont tous à l'intérieur du périmètre de la zone effondrée. Cependant, on remarque que le taux volumique plastique est relativement faible dans ces piliers et pourrait ne pas expliquer l'effondrement.

Cela souligne le défaut de l'analyse de la plasticité quand les paramètres élastoplastiques ne sont pas connus. Pour cette rétroanalyse, nous avons adopté les mêmes paramètres que ceux de l'effondrement de Naujan-et-Postiac, ce qui amène trois remarques :

- il se peut qu'il y ait une variabilité de résistance (R_c) entre les calcaires de ces deux sites (distants de 12,6 km) ;
- la valeur de R_c déterminée pour l'effondrement de Naujan-et-Postiac est assortie d'une incertitude qu'on peut estimer à au moins 0,1 MPa ;
- le taux volumique plastique augmente exponentiellement (figure 28 de Renaud 2023) avec la réduction de R_c .

Cela signifie qu'une faible réduction de R_c suffirait, dans le modèle numérique, à plastifier les piliers jusqu'au cœur. La plasticité est régie par un critère : cela signifie que si les contraintes d'une zone sont inférieures au seuil défini par le critère, la zone du modèle numérique reste élastique. Mais l'information qui prouverait que l'état de contrainte est très proche du critère de plasticité n'est pas ici disponible.

Plutôt que de relancer plusieurs calculs avec des valeurs plus faibles de R_c , il nous semble plus efficace d'analyser la stabilité de cette carrière avec une approche qui permet de calculer la distance relative au critère de rupture. C'est l'objet de la prochaine section. Avec cette approche, la valeur retenue pour R_c a moins d'importance dans la mesure où il est possible de construire une carte d'isovaleurs qui montrera toujours quelles sont les zones qui sont le plus proches du critère de rupture. Alors que l'analyse plastique est plutôt binaire : une zone est soit élastique, soit plastique.

Lors de son inspection en février 2020, l'EPRCF33 avait noté que le toit du secteur de la carrière (maintenant effondré) était particulièrement fragile. La présence de grandes fissures mécaniques et des formes de dissolution karstiques avaient été remarquées. Alors que dans le reste de la carrière, le toit a été jugé plus massif et plus résistant. Ces constatations pourraient justifier de diminuer localement R_c pour reproduire l'effondrement. Mais cela reviendrait à introduire la solution dans le problème, et occulterait un autre scénario d'effondrement se fondant sur l'analyse de la distance au critère, ce qui est l'objet du sous-chapitre suivant.





Figure 20 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers de la carrière.

En ce qui concerne la fragilité du toit (et les décollements locaux constatés lors de la visite du 09/07/2024), le modèle numérique montre qu'une proportion non négligeable des toits des galeries ont atteint le critère de rupture en traction (Figure 21). En plus du secteur effondré, les ruptures au toit (en traction) sont situées, dans le modèle numérique, au nord-ouest, au centre et à l'est de la carrière. Sur la Figure 21, les zones affichées correspondent à la première maille en paroi, toit ou mur de galerie. De ce fait, les piliers apparaissent ici comme du vide puisque ces structures n'ont pas de toit explicite.

Ces résultats peuvent notamment être comparés avec un plan de l'EPRCF33 qui avait été réalisé en février 2020 pour diagnostiquer l'état de la carrière sous l'vue des propriétés affectées par l'effondrement (Figure 22). On constate sur cette figure que la densité de décollement au toit peut être localement élevée, ce qui est en adéquation avec les densités (de rupture en traction) parfois élevées calculées avec le modèle numérique.



Figure 21 : Distribution de la plasticité en traction, atteinte au toit des galeries de la carrière.

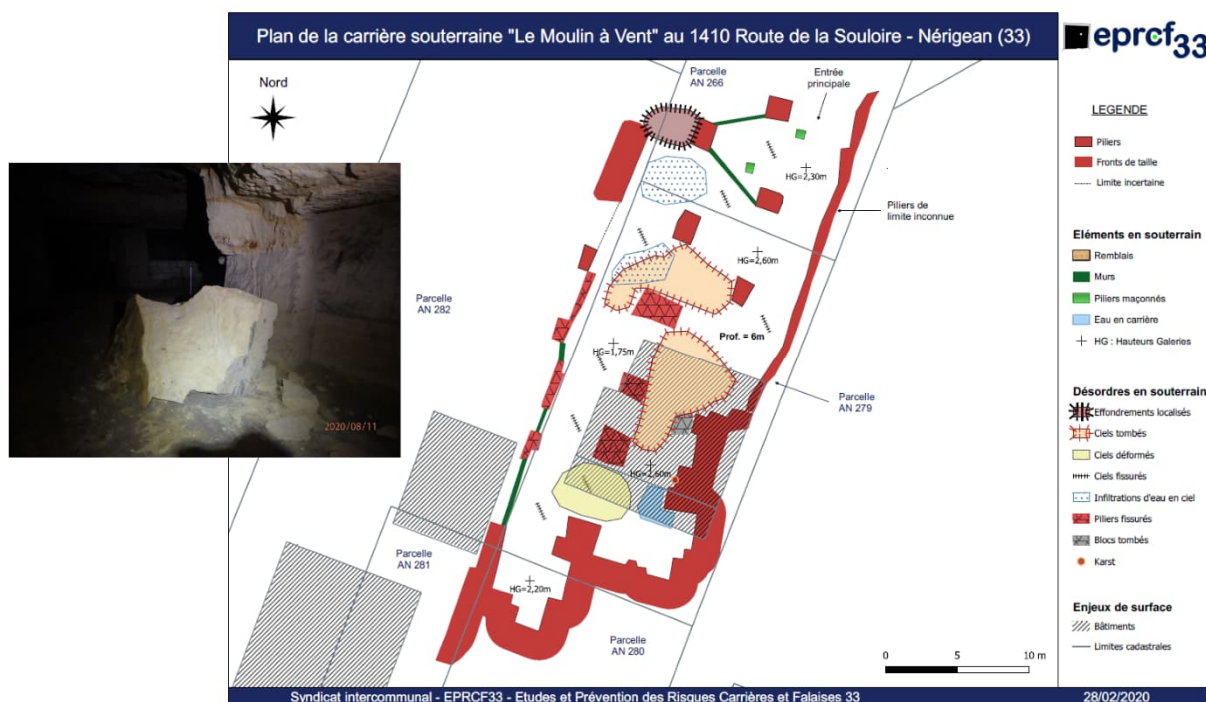


Figure 22 : Inventaire des désordres souterrains et photographie d'une rupture mécanique (source EPRCF33).

3.2.3 Définition du facteur F

La stabilité des piliers est ici évaluée à l'aide d'une approche qui calcule la distance au critère de rupture (voir §3.2). La Figure 23 présente les isovaleurs du facteur F dans les piliers de la carrière « Le Moulin à Vent ».

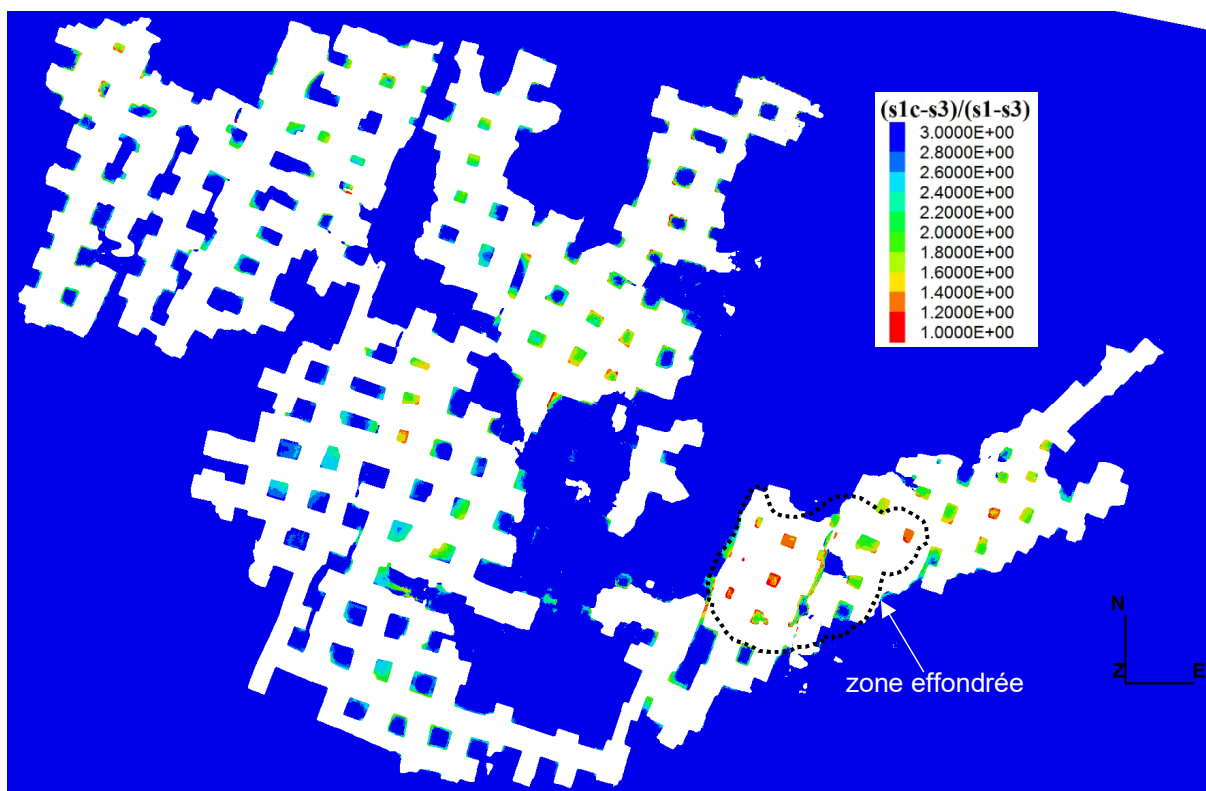


Figure 23 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers de la carrière « Le Moulin à Vent ».

On remarque que les piliers de la zone effondrée ont un facteur F bien plus élevé (en moyenne) que ceux du reste de la carrière. Comme l'analyse est rendue difficile en raison de la variabilité de F à l'intérieur du pilier, une moyenne des facteurs F a donc été calculée dans chaque pilier de manière s'affranchir de cette variabilité. Une analyse statistique des distributions de F dans ces piliers a ensuite été réalisée.

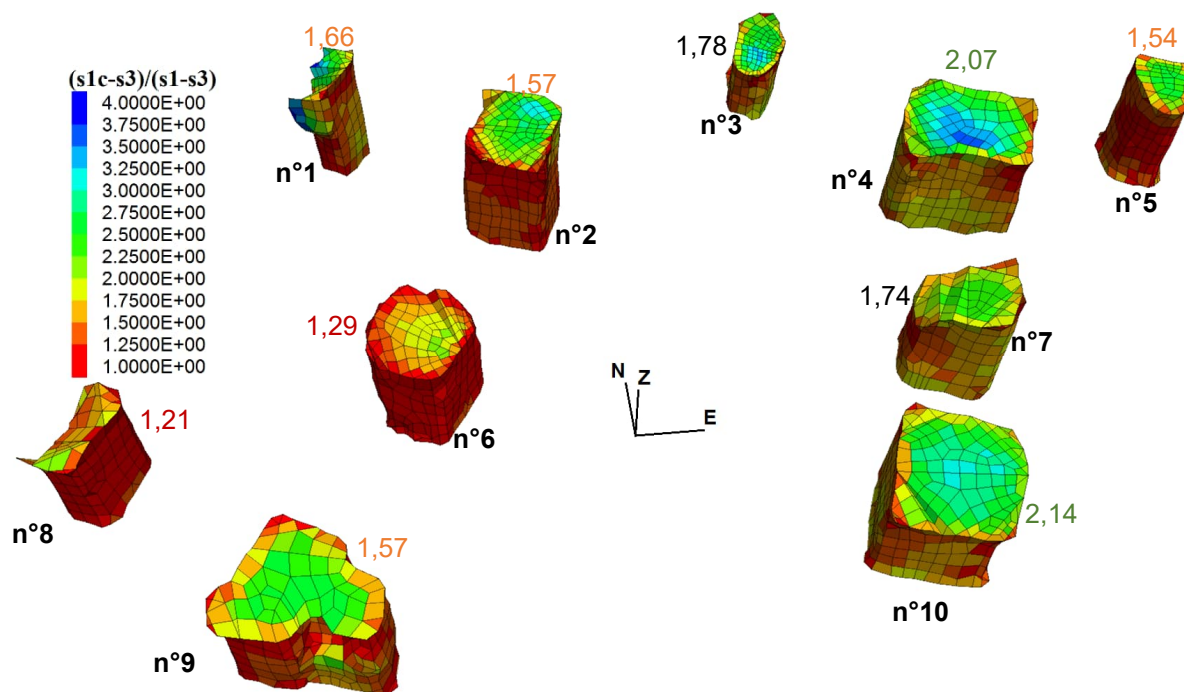


Figure 24 : Isovaleurs de la distance relative au critère de rupture en cisaillement (F) dans les piliers de la zone effondrée et moyenne de F associée à chaque pilier.

Tableau 2 : Valeurs moyennes du facteur F dans 10 piliers de la zone effondrée.

n° pilier	nombre zones	volume pilier	F moyen	% volume $F < 1,1$	% volume $F < 1,5$
1	1015	3,929	1,66	1,2%	35,7%
2	2518	10,474	1,57	1,9%	60,7%
3	1057	3,038	1,78	0,3%	22,0%
4	2758	16,850	2,07	0,2%	5,2%
5	1319	7,226	1,54	0,5%	68,3%
6	1987	7,740	1,29	24,9%	80,8%
7	1481	7,713	1,74	0,5%	15,9%
8	653	3,159	1,21	40,1%	89,2%
9	2050	9,001	1,57	2,0%	57,8%
10	2268	12,046	2,14	0,1%	4,8%

Les valeurs moyennes du facteur F dans les dix piliers numériquement « instrumentés⁴ » de la zone effondrée, ont été reportées dans le Tableau 2. La codification couleur de la valeur moyenne de F est réalisée par classe de F : $1,0 \leq F < 1,35$; $1,35 \leq F < 1,7$; $1,7 \leq F < 2,05$; $2,05 \leq F < 2,4$. En plus des valeurs

⁴ Il s'agit ici d'une instrumentation numérique, où un pointeur positionné spécifiquement enregistre la valeur d'une grandeur à surveiller, comme le ferait un capteur physique.

moyennes de F , le taux volumique pour $F < 1,1$ (valeur indiquant que l'on est très proche du critère de rupture en cisaillement) et pour $F > 1,5$ (représentant la stabilité à long terme) a été renseigné.

On constate qu'il y a deux piliers (n° 6 et 8, Figure 15) pour lesquels 25 % à 40 % du pilier (en volume) possède des mailles avec $F < 1,1$ (ce qui pourrait être assimilé à une rupture du pilier). À cette étape, on remarque qu'il s'agit des seuls deux piliers avec un taux volumique (pour $F < 1,1$) significatif : les huit autres piliers ont en effet des taux inférieurs à 2 %. Par ailleurs, on peut supposer que la rupture de ces deux piliers ait entraîné dynamiquement les piliers restants. Nous avons donc repris le calcul en supprimant les piliers n°6 et 8 (Figure 25).

L'analyse de la Figure 25 montre que les charges se reportent principalement sur les piliers 2 et 9 mais aussi sur le pilier n° 5. Nous avons choisi de supprimer les piliers qui remplissent au moins un des trois critères suivants au cours d'une étape de calcul : $\%F < 1,1 > 40\%$; $F < 1,2$; $\%F < 1,5 > 50\%$. Les valeurs du Tableau 3 qui dépassent un de ces trois critères sont mentionnées en rouge gras.

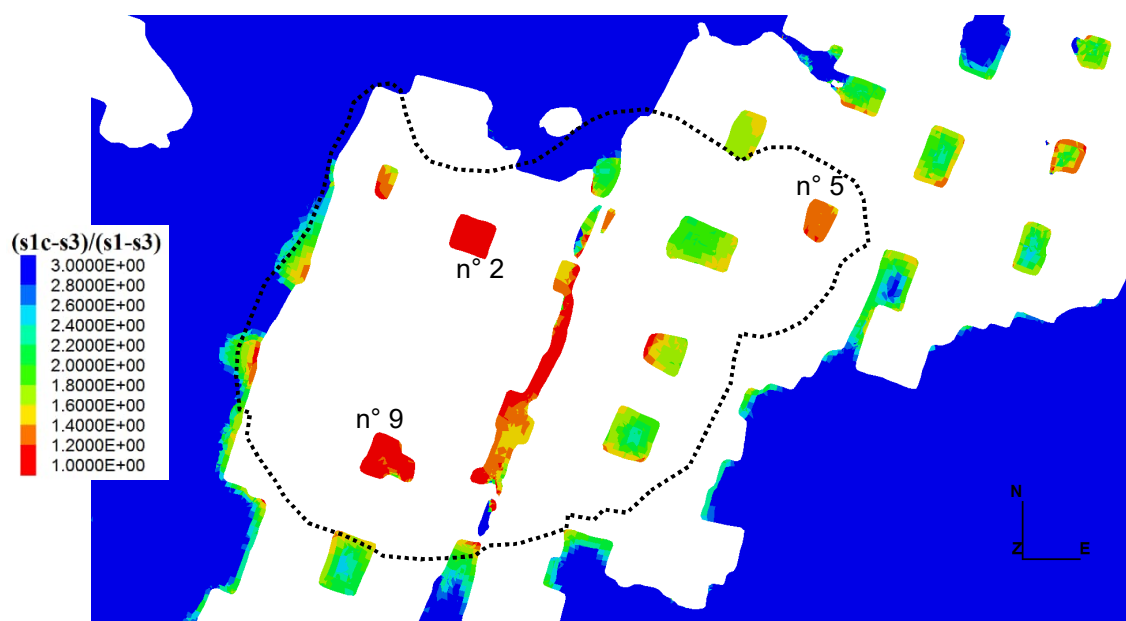


Figure 25 : Isovaleurs du facteur F dans la zone effondrée, suppression des piliers n° 6 et 8.

Nous continuons la démarche de « propagation » de la ruine des piliers en reprenant le calcul précédent et en supprimant maintenant les piliers n°2, 5 et 9 (Figure 26). L'analyse de la Figure 26 montre que les charges se reportent principalement sur les piliers 1 et 3.

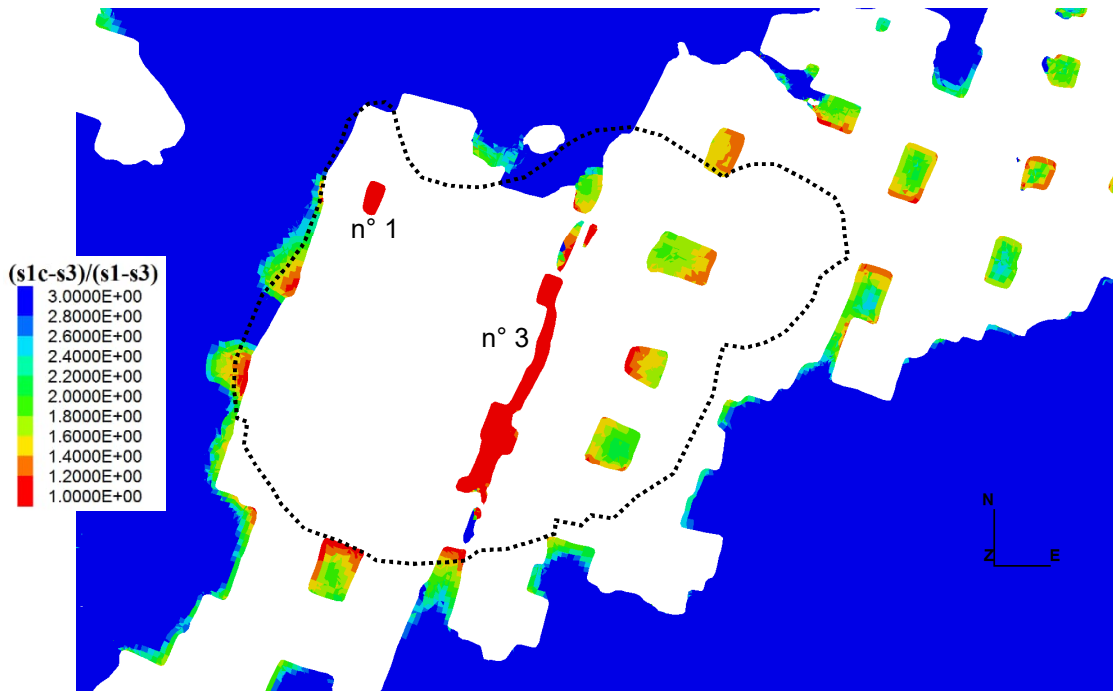


Figure 26 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers n° 2, 5, 6, 8 et 9.

Nous continuons la démarche de « propagation » de la ruine des piliers en reprenant le calcul précédent et en supprimant maintenant les piliers n°1 et 3 (Figure 27). L'analyse de la Figure 27 montre que les charges se reportent principalement sur les piliers n° 4, 7 et 10.

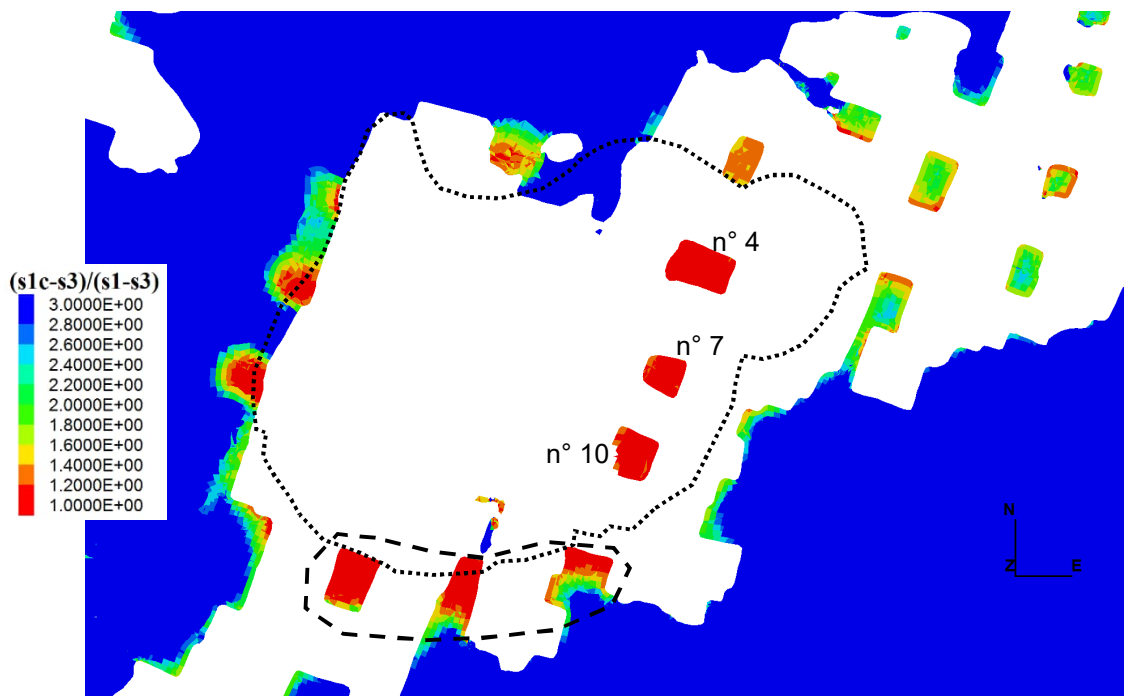


Figure 27 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers n° 1, 2, 3, 5, 6, 8 et 9.

Finalement, après la suppression des piliers n° 4, 7 et 10, on constate que le toit de ce secteur ayant perdu ses supports (piliers) a maintenant une portée minimale de 23 m et est donc entièrement plastifié en traction. Cela justifie donc de supprimer le recouvrement du secteur effondré pour la dernière étape

de calcul (Figure 28). L'analyse de cette dernière figure montre que les piliers au voisinage du secteur effondré sont stables puisque leur facteur F est supérieur à 1,5 en moyenne.

Par ailleurs, on remarque que les trois piliers au sud de la zone effondrée (entourés en pointillés) qui semblaient eux aussi instables sur la Figure 27, sont « redevenus » stables (Figure 28) en supprimant le recouvrement qui participait à leur chargement.

Finalement, en adoptant les paramètres géomécaniques issus de la rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac et en simulant une dynamique de propagation de ruine des piliers fondée sur la distance au critère de rupture (facteur F), il est possible de reproduire un scénario d'effondrement plausible et semblant compatible avec ce qui a été constaté in situ.

Tableau 3 : Critère de suppression des piliers de la zone effondrée lié aux valeurs moyennes du facteur F .

pilier	situation initiale			suppression de 2 piliers			suppression de 5 piliers			suppression de 7 piliers		
	FoS moyen	% F< 1,1	% F< 1,5	FoS moyen	% F< 1,1	% F< 1,5	FoS moyen	% F< 1,1	% F< 1,5	FoS moyen	% F< 1,1	% F< 1,5
1	1.66	1.2%	35.7%	1.49	7.3%	62.0%	1.16	78.1%	93.4%			
2	1.57	1.9%	60.7%	1.38	42.9%	74.2%						
3	1.78	0.3%	22.0%	1.79	0.3%	20.2%	1.52	7.2%	53.6%			
4	2.07	0.2%	5.2%	2.09	0.2%	4.5%	1.87	1.0%	18.5%	1.18	64.0%	88.0%
5	1.54	0.5%	68.3%	1.55	0.5%	68.2%						
6	1.29	24.9%	80.8%									
7	1.74	0.5%	15.9%	1.76	0.5%	16.3%	1.72	1.7%	29.3%	1.18	38.3%	93.8%
8	1.21	40.1%	89.2%									
9	1.57	2.0%	57.8%	1.24	51.7%	81.2%						
10	2.14	0.1%	4.8%	2.14	0.2%	5.1%	2.08	0.3%	10.4%	1.07	58.5%	94.4%

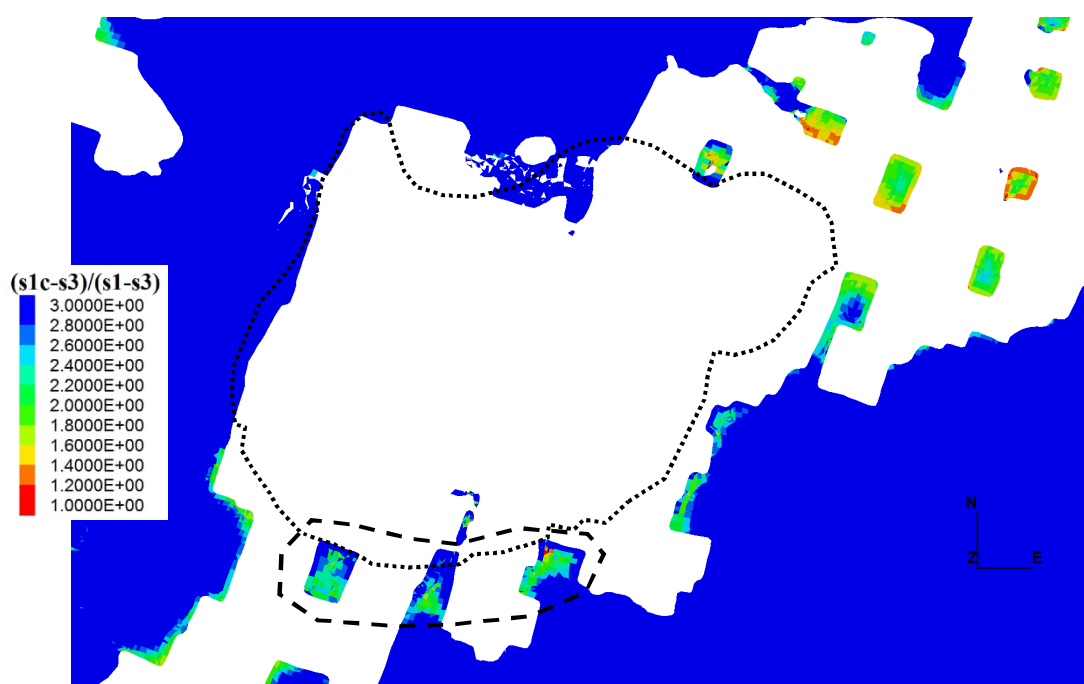


Figure 28 : Isovaleurs du facteur F dans l'emprise de la zone effondrée, suppression des piliers effondrés et de leur recouvrement.

4 Conclusions

Cette étude a été menée pour s'approcher numériquement d'un scénario mécanique plausible conduisant à l'effondrement du 10/03/2024 de la carrière « Le Moulin à Vent » à Nérigean.

L'évaluation de la stabilité des carrières souterraines abandonnées peut être réalisée à partir de solutions analytiques ou empiriques, de modélisation numérique ou à partir de l'analyse des configurations similaires des carrières effondrées ou non. Une précédente étude (Renaud 2023) a montré que l'approche analytique fonctionne bien pour une géométrie régulière sans interaction avec les limites d'exploitation. Comme ce cadre d'application ne correspond au cas de la carrière « Le Moulin à Vent », cette approche analytique n'a pas été utilisée dans la présente étude. Faute de cas similaire, nous avons donc retenu la modélisation numérique. Celle-ci nécessite de calculer la sollicitation mécanique, essentiellement dans les piliers, afin de la comparer au critère de rupture du calcaire composant ces piliers.

Les principales conclusions et remarques issues de ce travail sont :

- la réalisation du maillage de cette carrière a montré le niveau de complexité pouvant être pris en compte dans les études de ce type. Les capacités des stations de calcul actuelles permettent d'envisager de réaliser des calculs pour une carrière souterraine comptant jusqu'à 600 piliers. Mais le facteur limitant de ce type d'étude est plutôt le temps de traitement du nuage de points acquis par Lidar terrestre que le temps de calculs numériques ;
- la modélisation numérique permet de reproduire les mécanismes et l'extension de l'effondrement de la carrière en adoptant la même résistance à la compression du calcaire ($R_c = 1 \text{ MPa}$) que celle obtenue par rétroanalyse de l'effondrement de Naujan-et-Postiac, le 13/03/2021 (carrières aux contextes similaires) ;
- le modèle numérique identifie l'intégralité des piliers rompus de la zone effondrée en simulant une dynamique de propagation de ruine des piliers fondée sur la distance au critère de rupture ;
- le modèle numérique identifie aussi des zones locales de rupture en traction au toit de certaines galeries. Cela est compatible avec les observations réalisées lors de la visite du 9 juillet 2024 ;
- le taux de défrètement élevé (90 % dans le secteur effondré) impliquant des petits piliers plus chargés car plus profonds que la moyenne de la carrière suffit à expliquer cet effondrement.

En termes de facteurs déclenchants (Al Heib et al., 2023), il a été constaté dans le cadre de la demande de reconnaissance de catastrophe naturelle qu'une pluviométrie anormale sur les mois qui ont précédé l'effondrement avait été enregistrée. Nous n'avons pas étudié le rôle de l'eau dans la présente étude, mais celle-ci a pu jouer un rôle (aggravant et/ou codéclenchant) non négligeable. Une étude plus poussée serait nécessaire à ce sujet.

Cette rétroanalyse d'effondrement ainsi que celle de Naujan-et-Postiac montrent que des calculs préventifs peuvent être réalisés en effectuant un premier tri sur les secteurs sous-minés avec enjeu en surface sur la base d'un taux de défrètement critique ($>80 \%$) couplé avec un recouvrement peu épais ($<15 \text{ m}$). Ensuite, pour les carrières avec une géométrie trop hétérogène pour utiliser une approche analytique, la modélisation numérique pourrait préciser l'extension du phénomène en analysant la plasticité du recouvrement et les facteurs de sécurité des piliers.

5 Références

- Al Heib M. (2016): Feedback of the empirical approach to design the room and pillar mines. Application on chalk mines (France). ULUSAY, Resat ; AYDAN, Omer ; GERCEK, Hasan ; HINDISTAN, Mehmet Ali ; TUNCAU, Ergun - Rock Mechanics and Rock Engineering : From the Past to the Future : proceedings of the international symposium EUROCK 2016. NC : CRC Press, 2016, p. 689-694.
- Al Heib M., Conil N. & Gombert P. (2023): Influence of geology and topography on the occurrence of mine massive collapse—back-analysis of a historical collapse of chalk mine (France). Bulletin of Engineering Geology and the Environment. Vol. 82, n° 230. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03234-z>.
- Allard J.-F. (1973) : Expertise d'une champignonnière située à Bellegarde, commune de Naujan-et-Postiac (33). rapport BRGM 73 GSN 135 AQI du 10-04-1973.
- Fine J. (1993) : Le soutènement des galeries minières. Ed. Armines, Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol.
- Hauquin T. & Carponsin J. (2024) : Analyse de l'effondrement généralisé de carrière survenu au 1410-1452, Route de la Souloire, le 10 mars 2024, lieu-dit Le Moulin à Vent, commune de Nérigeau (33750), EPRCF33, Rapport d'expertise n°22 du 31 juillet 2024, 11 pp.
- Ifsttar (2014). Guide technique. Le diagnostic de la stabilité des carrières abandonnées. Guide méthodologique. Collection Environnement. Les risques Naturels.
- Itasca(2019) : FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Three Dimensions) version 7.0, User's Guide and Command Reference. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, USA.
- Martin,C.D. & Maybee W.G. (2000): The strength of hard-rock pillars. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*; Vol. 37, pp. 1239-1246.
- Renaud V. (2023) : Rétroanalyse de l'effondrement de la carrière souterraine de Naujan-et-Postiac. Rapport Ineris - 212824 - 2769616– v1.0 du 28/06/2023, 42 p.
- Respaud C. (2024) : Commune de Nérigeau, demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle dans le département de Gironde. Rapport d'expertise CEREMA n° 14.47.G872 – 22-ME-0106 du 18/06/2024, 16 pp.
- Saptaji K., Faizul M. & Fakhri A. (2021): Construction of low-cost 3D scanner using triangulation and Screened Poisson Surface Reconstruction techniques.IOP Conference Series: *Mater. Sci Eng.*, Vol. 1098. DOI: 10.1088/1757-899X/1098/6/062091

6 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Construction du modèle géométrique
- Annexe 2 : Logiciels utilisés pour une étude

ANNEXE 1 : CONSTRUCTION DU MODELE GEOMETRIQUE

Le nuage de points acquis par l'EPRCF 33 avec un Lidar constitue les données d'entrée du modèle géométrique. La démarche consiste, tout d'abord, à construire un premier maillage surfacique triangulaire (format STL) avec un logiciel dédié, puis à l'importer dans Rhino (logiciel de CAO permettant de manipuler des formes complexes) pour générer à partir de celui-ci un maillage surfacique quadrangulaire homogène (avec le module Griddle d'Itasca qui étend les capacités de maillage de Rhino) qui permet enfin de générer le maillage volumique à importer dans le code de calcul géomécanique Flac3D.

Meshlab (logiciel gratuit de Visual Computing Lab) a été utilisé pour construire le maillage surfacique triangulaire car il possède des options de reconstruction de surface, dont l'algorithme « Screened Poisson » (Saptaji et al., 2021).

Afin de limiter les temps de reconstruction, de diminuer les différences de densité, d'opérer un premier nettoyage automatique, le nuage de points initial a été rééchantillonné avec une distance inter-points de 20 cm (soit une finesse 2 fois plus faible que celle de la finesse cible du maillage des galeries, soit 40 cm). Ainsi, de plus de 172 millions de points, le rééchantillonnage permet de conserver environ 577 000 points régulièrement espacés de 20 cm (sauf dans les zones à densité insuffisante pour atteindre cet objectif de distance inter-points).

Le souci avec l'algorithme « Screened Poisson » est qu'il est très sensible aux défauts dans le nuage de points. Lors de cette étude, au moins 7 types de défaut ont pu être dénombrés, à savoir :

- l'imprécision inhérente à tout matériel de mesure ;
- les points erratiques flottant au milieu des galeries (facile à repérer, mais il y a des centaines de tronçons de galeries, voire de piliers, à inspecter) ;
- la reconstruction de zones effondrées afin d'obtenir la géométrie initiale ;
- le retrait des objets anthropiques (murs, équipement, etc.) qui n'appartiennent pas au massif (n'ayant pas de rôle structurel majeur) ;
- le nettoyage des amas rocheux et autres petits éboulements locaux ;
- l'existence de défauts de densité dans certains secteurs (acquisition sans doute plus rapide dans les galeries éloignées de la zone effondrée) ;
- le retrait des planches intermédiaires (réelles ou virtuelles) dont l'épaisseur (entre 2 niveaux) est trop faible (< 30 cm) pour jouer un rôle structurel.

Toutes ces opérations de nettoyage, de création de points sont aussi chronophages que nécessaires pour que la reconstruction de surface fonctionne efficacement. Sur un total de 577 380 points rééchantillonnés, 36 848 (7,4 % du nuage final) ont été manuellement créés, 116 163 (20 % du nuage initial) ont été manuellement supprimés pour aboutir à un nuage final de 498 065 points.

A partir du maillage surfacique hétérogène réalisé avec Meshlab, une phase de remaillage est nécessaire avec Griddle pour obtenir un maillage surfacique homogène avec des éléments plus fins (précision = 40 cm). La finesse de 40 cm permet de représenter les 10 piliers de la zone effondrée avec suffisamment de zones (entre 659 et 2667) pour une bonne précision des résultats.

Afin d'éviter des erreurs numériques lors de la conception du modèle géométrique (Rhino) et du maillage (Griddle), le système de coordonnées horizontales (Lambert 93) a été modifié par translation afin d'obtenir des coordonnées avec le moins de chiffres significatifs possibles. L'origine de ce nouveau repère local est donc à l'intérieur du modèle numérique.

Ainsi, pour passer du repère géographique RGF93 (X,Y,Z) au repère local de Flac3D (x,y,Z), il faut effectuer la translation suivante :

translation : $x = X - 438\,942,52$; $y = Y - 6\,421\,554,72$.

ANNEXE 2 : LOGICIELS UTILISES POUR UNE ETUDE

Direction opérationnelle : SIT Unité : RNOS

Référence étude / CGR : Ineris 227099

Logiciel	Version	Fichier de configuration	Données de sortie/Résultats
FLAC ^{3D} (64 bits)	v. 7.00.161	Fichiers .DAT et .SAV	Fichiers de résultats (compatibles 32 bits et 64 bits)
Rhino (64 bits)	v. 8 SR2	Fichiers .3DM, .STL, .DWG, .XYZ	Fichiers de modèle géométrique
Meshlab (64 bits)	v2022.02	Fichiers .STL	Fichiers de maillage surfacique
Griddle	v. 2.00.14	Fichiers .3dm et .f3grid	Fichiers de maillage volumique

