



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 212824 - 2769616 - v1.0

28/06/2023

Rétroanalyse de l'effondrement de la carrière souterraine de Naujan-et-Postiac

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 équivalents 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 : CONIL NATHALIE; LECOMTE AMELIE

Approbation : Document approuvé le 28/06/2023 par FRANCK CHRISTIAN

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Table des matières

1	Introduction et objectifs.....	6
2	Données disponibles pour la carrière de Bellegarde	6
2.1	Contexte et géométrie de la carrière	6
2.2	Géologie locale au lieu-dit « Bellegarde »	9
2.3	Caractéristiques de la zone effondrée	10
3	Calculs numériques et analytiques	13
3.1	Calculs analytiques.....	13
3.1.1	Contrainte moyenne « verticale » du pilier	13
3.1.2	Résistance du pilier.....	13
3.2	Modélisation numérique 3D	16
3.2.1	Modèle géométrique	16
3.2.2	Paramètres géomécaniques.....	20
3.2.3	Phasage des calculs	21
3.3	Résultats	21
3.3.1	Contraintes verticales (σ_v).....	22
3.3.2	Plasticité	23
3.3.3	Définition du facteur F	28
3.3.4	Comparaison du facteur F et du ratio R_p/σ_p	29
4	Conclusions	33
5	Références.....	35
6	Annexes.....	36
	Figure 1 : Localisation de la carrière de Bellegarde	7
	Figure 2: Plan des étages inférieur et supérieur de la carrière (d'après le rapport BRGM73 GSN 135 AQI du 10-04-1973).....	7
	Figure 3 : Plan des deux niveaux de la carrière reportés sur l'orthophotographie (d'après le procès-verbal de visite N°21/01 de C. Thomaïdis, Direction générale adjointe chargée des territoires, Direction des infrastructures).....	8
	Figure 4: Vue de dessus dans la zone de superposition des niveaux inférieur et supérieur (maillage déduit du nuage de points obtenu par laser scan 3D).....	9
	Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après le site Infoterre BRGM).....	10
	Figure 6 : Evaluation des taux de défrètement des piliers de la zone effondrée (les 9 piliers n° 1, 3, 4, 5, 10, 16, 38, 39 et 40 ne se sont pas effondrés).....	12
	Figure 7 : Méthode de l'aire tributaire – calcul de la contrainte verticale moyenne en fonction de la dimension des chambres et des piliers.....	13
	Figure 8 : Valeurs de R_p/σ_p reportées sur les piliers idoines du modèle numérique 3D.....	16
	Figure 9 : Ensemble des 372 684 points retouchés dans le nuage de points initial (rééchantillonné avec une distance de 20 cm) : en noir = points créés, en rouge = points supprimés.....	17
	Figure 10 : Maillage des 49 piliers à proximité de la zone effondrée et des galeries des niveaux inférieur et supérieur.....	18
	Figure 11 : Constitution des 49 groupes de mailles relatives aux piliers dans ou au voisinage de la zone effondrée.....	18
	Figure 12 : Maillage du modèle 3D de la carrière souterraine de Bellegarde	19
	Figure 13 : Topographie au droit de la carrière souterraine de Bellegarde	19
	Figure 14 : Isovaleurs des pentes de la topographie au droit de la carrière de Bellegarde.....	20
	Figure 15 : Représentation des cercles de Mohr définissant le facteur F	22
	Figure 16 : Isovaleurs de la contrainte verticale, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).....	23

Figure 17 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).....	24
Figure 18 : Distribution des zones cisillées dans les piliers de la carrière Bellegarde (R_c calcaire = 1,0 MPa).....	24
Figure 19 : Distribution de la plasticité après la suppression des 17 piliers rompus au centre de la zone effondrée, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).	25
Figure 20 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur, groupe de 13 piliers rompus avec $R_c = 1,05$ MPa.....	26
Figure 21 : Distribution de la plasticité après la suppression des 13 piliers rompus au centre de la zone effondrée, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur ($R_c = 1,05$ MPa).....	26
Figure 22 : Distribution de la plasticité aux parements des galeries de la carrière Bellegarde, avec $R_c/R_t = 5,5$	27
Figure 23 : Distribution de la plasticité aux parements des galeries de la carrière Bellegarde, avec $R_c/R_t = 12$	27
Figure 24 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers du niveau inférieur de la carrière Bellegarde.	28
Figure 25 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers du niveau supérieur de la carrière Bellegarde.	28
Figure 26 : Isovaleurs de la distance relative au critère de rupture en cisaillement (F) dans les piliers centrés sur le pilier n° 32 (Figure 6, Figure 8 et Figure 11).....	29
Figure 27 : Valeurs moyennes de F reportées sur les piliers idoines du modèle numérique 3D.	31
Figure 28 : Evolutions du nombre de piliers plastifiés et du volume plastifié (des 49 piliers identifiés) en fonction de la résistance à la compression du calcaire.....	32
Tableau 1. Coefficients utilisés pour l'estimation de la résistance de piliers pour différents matériaux (dans Al Heib, 2016)	14
Tableau 2 : Caractéristiques géométriques et mécaniques de 40 piliers dans ou au voisinage de la zone effondrée (numérotation sur Figure 6)	15
Tableau 3 : Caractéristiques physiques et mécaniques des calcaires et argiles/limons constitutifs du massif.....	21
Tableau 4 : Rapport $F / (R_p/\sigma_p)$ centré réduit : comparaison des méthodes numériques et analytiques	30

Résumé

Le 13 mars 2021, un effondrement généralisé est survenu à l'aplomb d'une partie de l'ancienne carrière souterraine dite de Bellegarde située sur la commune de Naujan-et-Postiac, en Gironde (33). Cet effondrement a affecté en surface une zone quasi-circulaire d'environ 50 m de diamètre et de 5 à 6 m de profondeur.

L'effondrement généralisé d'une partie de la carrière de Bellegarde à Naujan-et-Postiac, en 2021, 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).

En 2022, un premier retour d'expérience a été réalisé sur la base d'une visite de terrain. Les données historiques ont ainsi été analysées et ont permis d'identifier de premières pistes de réflexion.

Ainsi, cette étude s'intéresse plus spécifiquement à la résistance des piliers de la carrière qui pourrait générer l'effondrement ainsi que l'effet de l'exploitation du niveau inférieur.

La première partie de cette étude présente les données disponibles permettant la réalisation d'une rétroanalyse de cet effondrement. La seconde partie est dédiée à l'analyse des résultats obtenus par deux approches différentes dans le cadre de cette rétroanalyse : la méthode analytico-empirique et la modélisation numérique 3D.

Grâce à ce travail, un mécanisme d'effondrement de la carrière de Bellegarde (2021) a été proposé. Il met en exergue un important taux de défrèvement (jusqu'à 84 %) du secteur effondré et la présence d'un groupe de petits piliers suffisamment profonds et éloignés des piliers barrières et des bords d'exploitation pouvant expliquer cet effondrement.

Cette étude montre également que l'approche analytico-empirique ne permet pas de discriminer de façon suffisamment satisfaisante la rupture des piliers (37,5 % de diagnostic de rupture erroné). Cela est dû à la non prise en compte des facteurs de stabilisation comme les piliers barrières ou les bords d'exploitation. Cette approche permet toutefois d'identifier le pilier le plus faible du groupe et donc la « source » de l'effondrement.

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

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 212824 – 2769616 - v1.0, 28/06/2023.

Mots-clés :

Carrières souterraines – stabilité – effondrement - modélisation numérique

1 Introduction et objectifs

Le 13 mars 2021, un effondrement généralisé est survenu à l'aplomb d'une partie de l'ancienne carrière souterraine dite de Bellegarde située sur la commune de Naujan-et-Postiac, en Gironde (33). Cet effondrement a affecté en surface une zone quasi-circulaire d'environ 50 m de diamètre et de 5 à 6 m de profondeur. Survenu sur une parcelle privée, il n'a fait aucune victime et des dégâts relativement limités (champs, et chemins inutilisables et un cheval apeuré). Le dernier effondrement de ce type était survenu en 2011, à Saint-Germain-du-Puch (à 12 km au NO), également en Gironde.

L'effondrement généralisé d'une partie de la carrière de Bellegarde à Naujan-et-Postiac, en 2021, 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).

Afin d'alimenter les réflexions menées dans le cadre du programme d'appui SIT-19 – opération 3.2 « Recensement des carrières souterraines effondrées en France et analyse du rôle des événements climatiques extrême », un premier retour d'expérience a été réalisé, en 2022, sur cet effondrement récent.

Ainsi, la visite de plusieurs équipes de géotechniciens sur le site quelques semaines après cet événement et l'analyse des données historiques ont permis d'identifier de premières pistes de réflexion :

- 1) les éléments disponibles sur la configuration du secteur effondré et les essais réalisés en laboratoire, par le BRGM en 1973, sur certains échantillons de roche de la carrière permettent, en première approche, à partir de formules empiriques, de montrer que la rupture en compression des piliers de la zone effondrée pouvait être redoutée ;
- 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 ;
- 3) même si les conditions de stabilité des piliers n'étaient a priori « pas remplies », la rupture généralisée telle que survenue en 2021 ne peut s'expliquer sans un effet notable des terrains de recouvrement

Pour compléter ces premiers résultats d'analyse, l'Ineris a réalisé une étude approfondie pour représenter au mieux l'état de contraintes réel dans les piliers et leur critère de rupture.

L'évaluation de la stabilité d'une carrière souterraine, utilisant la méthode des chambres et piliers abandonnés, dépend de plusieurs facteurs : la profondeur, la géométrie des chambres et des piliers (taux de défrètement), les caractéristiques géomécaniques des formations dans l'influence de l'exploitation. Certains éléments sont facilement identifiables et pris en compte dans le modèle numérique 3D 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 la démarche de modélisation.

Ce rapport se divise en deux parties. La première partie est consacrée aux données disponibles pour rétroanalyser cet effondrement.

La deuxième partie du rapport est consacrée à l'analyse des résultats obtenus par deux approches différentes : la méthode analytico-empirique et la modélisation numérique 3D (modèle continu en différences finies).

2 Données disponibles pour la carrière de Bellegarde

2.1 Contexte et géométrie de la carrière

La commune de Naujan-et-Postiac est située dans le département de la Gironde, à une quarantaine de kilomètre à l'est de Bordeaux. L'exploitation a été menée au lieu-dit « Bellegarde », au sud de la commune (Figure 1).

Les travaux d'extraction de pierre se sont déroulés, probablement entre la deuxième moitié du 19^{ème} siècle et le début du 20^{ème} siècle (selon les inscriptions observées par l'EPRCF33, Hauquin et Carponsin 2021). La carrière a ensuite été exploitée entre 1920 et 1974 comme champignonnière.

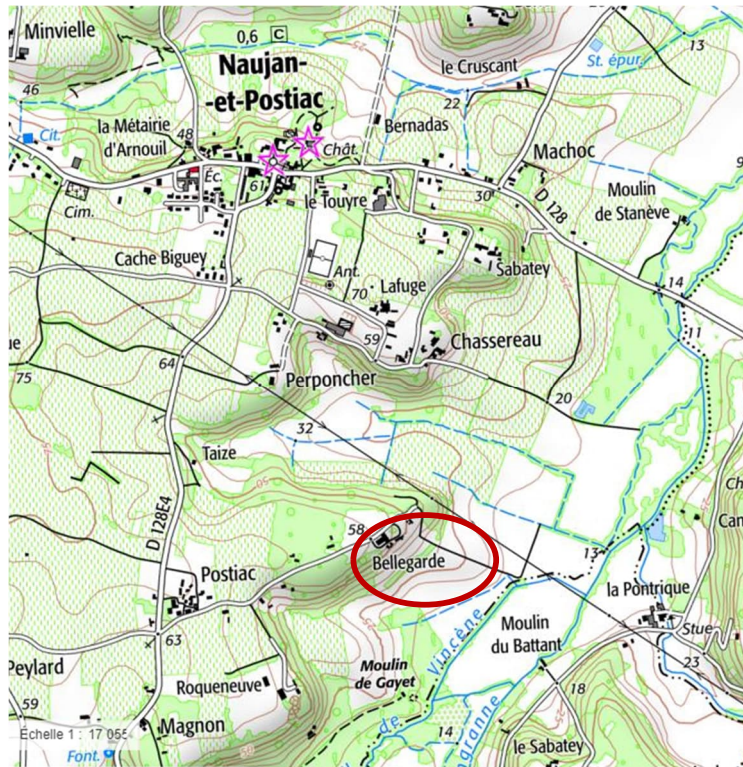


Figure 1 : Localisation de la carrière de Bellegarde

La carrière souterraine a été exploitée, sur deux niveaux, par la méthode des chambres et piliers abandonnés (Figure 2 et Figure 3). Les deux niveaux ne sont superposés que sur un petit secteur situé au sud-ouest de l'étage inférieur et à l'est du niveau supérieur (Figure 3), par un intercalaire calcaire d'environ 1 à 3 m d'épaisseur.

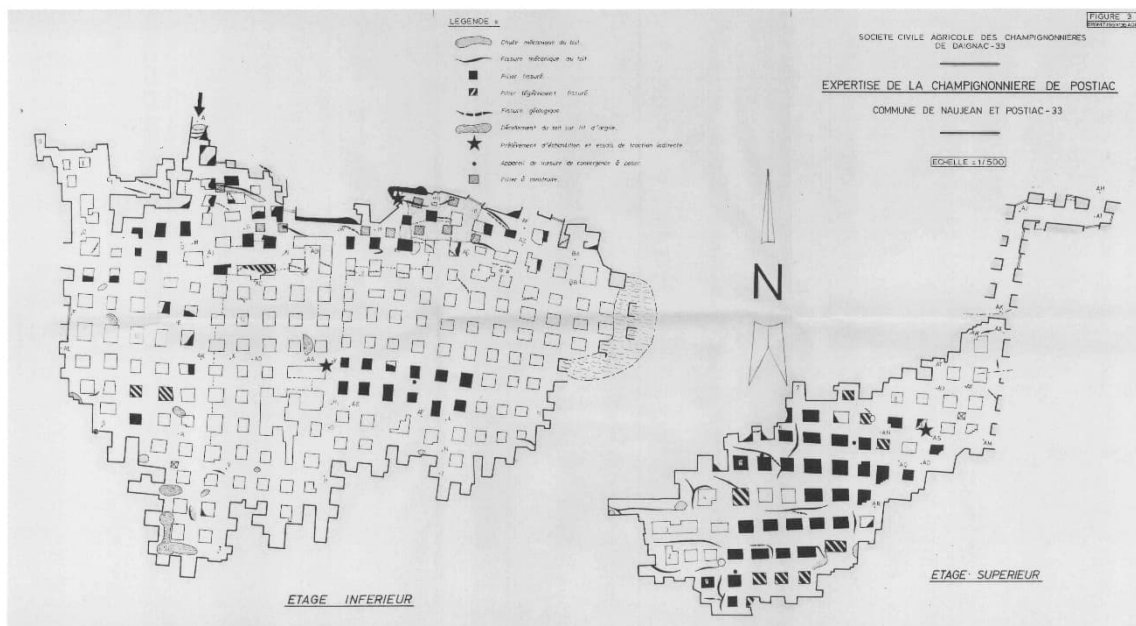


Figure 2: Plan des étages inférieur et supérieur de la carrière (d'après le rapport BRGM73 GSN 135 AQI du 10-04-1973).

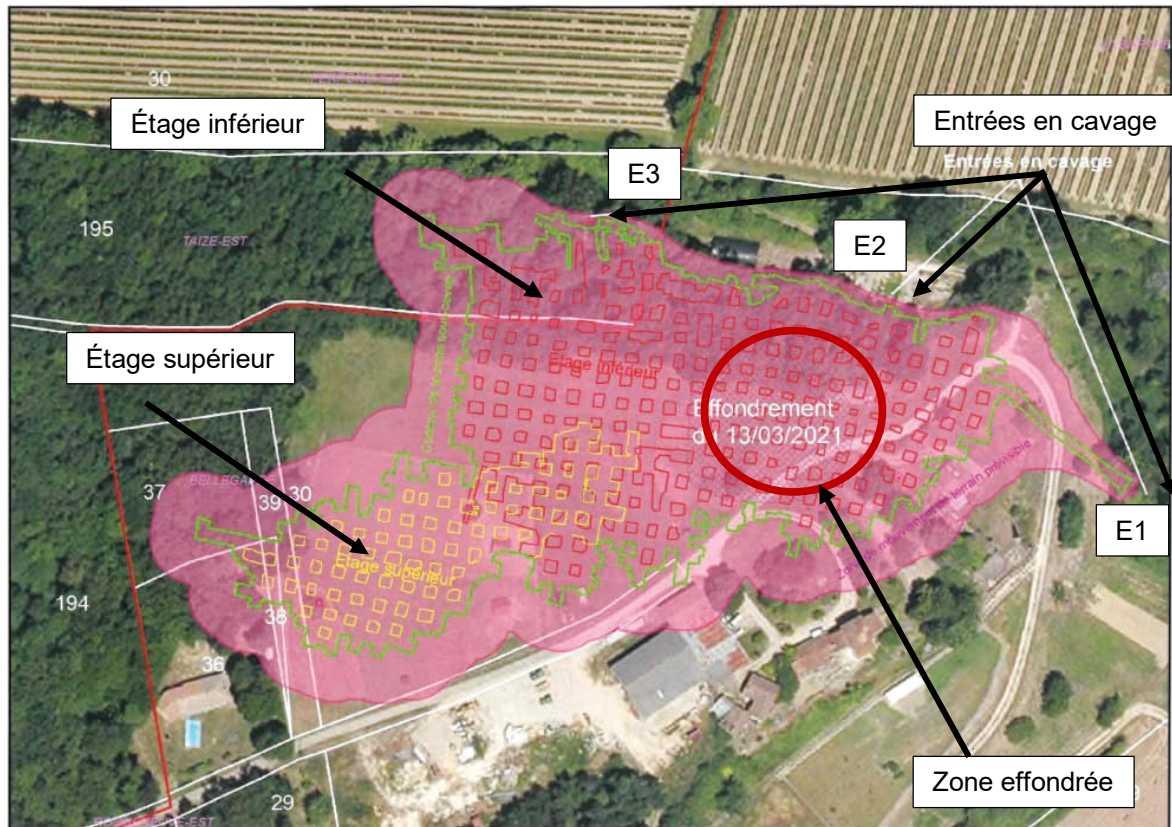


Figure 3 : Plan des deux niveaux de la carrière reportés sur l'orthophotographie (d'après le procès-verbal de visite N°21/01 de C. Thomaidis, Direction générale adjointe chargée des territoires, Direction des infrastructures).

Les caractéristiques des deux niveaux d'exploitation sont les suivantes :

- **étage supérieur** : la cote du mur de ce secteur de carrière se situe entre 19 m et 25 m NGF, la hauteur des vides varie entre 2 m et 3 m, la largeur des galeries est comprise entre 4 m et 5 m et la superficie est d'environ 4 000 m². Le taux de défrèvement est d'environ 70 %, la surface totale des piliers occupe 1200 m² et ces piliers ont entre 15 m² à 20 m² de section. L'accès à ce niveau supérieur se fait par le niveau inférieur ;
- **étage inférieur** : la cote du mur de ce secteur de carrière se trouve entre 16 m et 25 m NGF, la hauteur des vides varie entre 2 m et 8,5 m pour une largeur de galeries entre 4 m et 5 m. La superficie de l'exploitation est d'environ 13 000 m² avec un taux de défrèvement de l'ordre de 75 % mais pouvant atteindre 80 % (notamment dans la zone qui s'est effondrée). La section des piliers de la zone effondrée se situe entre 7,5 m² et 18 m², mais ces derniers sont plus élancés que dans le niveau supérieur du fait de leur hauteur plus importante (élancement moyen de 1,4, variation entre 0,5 et 2,3). L'épaisseur du recouvrement est de l'ordre de 4 m à 24 m (entre 7 et 18 m au niveau de la zone effondrée selon le nuage de points acquis par l'EPRCF33 avec un laser scan 3D).

La superposition des piliers d'un niveau sur l'autre (environ 15 piliers concernés) peut s'apprécier avec le maillage du modèle 3D (dédit du nuage de points obtenu par laser scan 3D, fournit par l'EPRCF33). Cette superposition est relativement bonne, les piliers du niveau supérieur étant quasiment superposés à ceux du niveau inférieur (Figure 4).

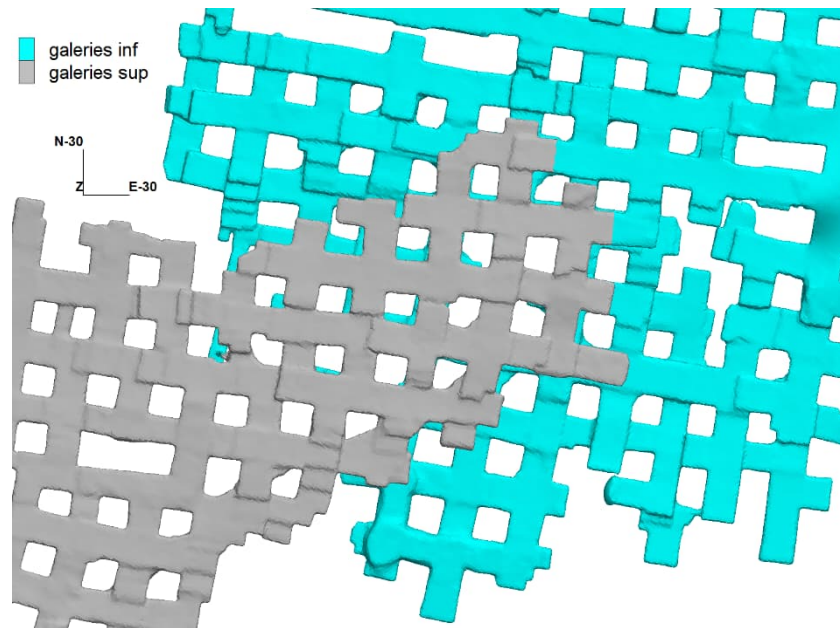


Figure 4: Vue de dessus dans la zone de superposition des niveaux inférieur et supérieur (maillage déduit du nuage de points obtenu par laser scan 3D)

Une visite du site a eu lieu le 17 novembre 2021 réunissant l'EPRCF33, l'Ineris et le propriétaire du site. Le secteur en surface et en souterrain a pu être inspecté et caractérisé. En prenant aussi en compte le relevé de fracturation réalisé en 1973 par le BRGM, un état géotechnique de la carrière a pu être dressé. Essentiellement, les désordres se manifestent par de la fracturation naturelle (décompression du massif calcaire) ou d'origine anthropique (fracturation mécanique, chutes de toit et écaillages de parement). Plus de détails sont disponibles dans le REX de l'effondrement (note Ineris 2002 : Ineris-212824-2769616-v1.0).

2.2 Géologie locale au lieu-dit « Bellegarde »

Les terrains affleurants au niveau de l'ancienne carrière souterraine sont constitués par les formations géologiques suivantes (Figure 5) :

- environ 30 m de calcaire marin à Astéries, notés g1C en Figure 5 (exploité à la carrière de Bellegarde) ;
- 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.

Comme aucun point de la BSS n'est disponible à proximité immédiate du site pour affiner cette description, le modèle numérique 3D comprendra donc 2 matériaux : le calcaire à Astéries et une formation d'altération (regroupant les argiles et les limons de surface).

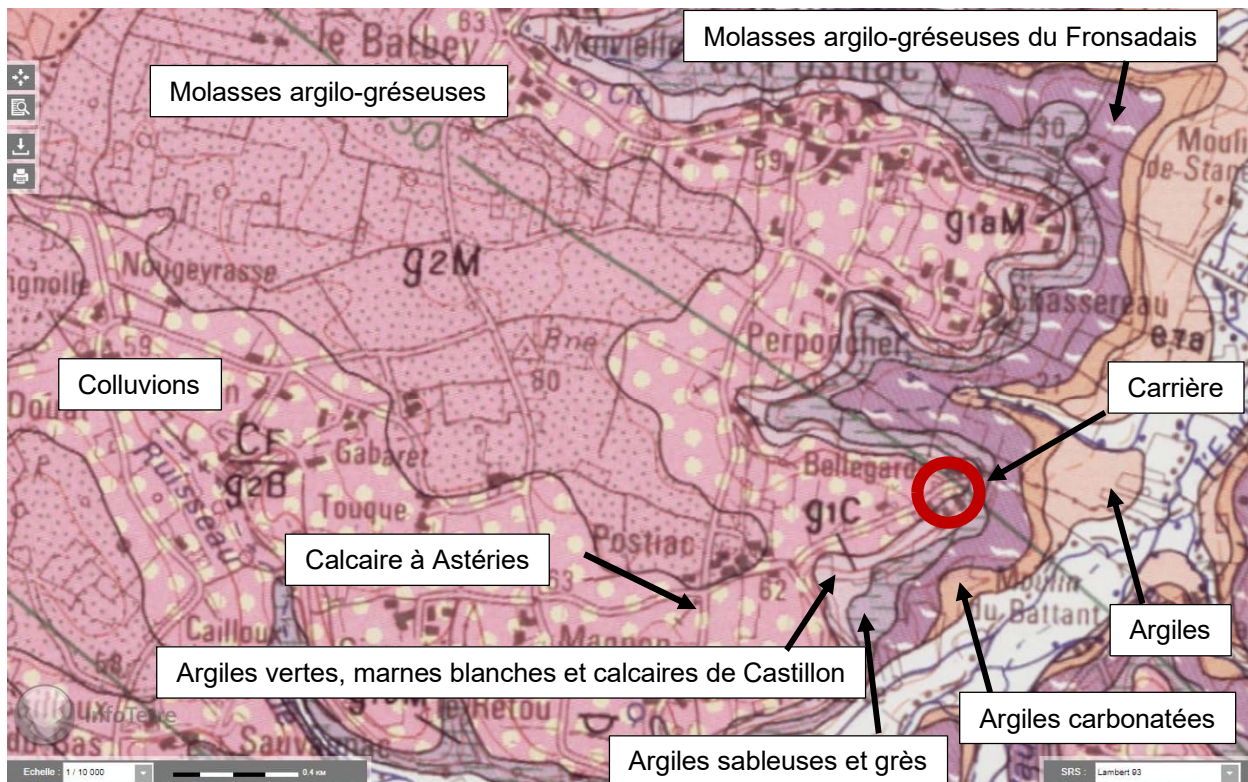


Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude (d'après le site Infoterre BRGM).

2.3 Caractéristiques de la zone effondrée

L'effondrement survenu le 13 mars 2021 a affecté la partie sud-est des travaux du niveau inférieur, dans un secteur sans superposition de niveaux (Figure 3). Il se présente en surface sous la forme d'un cratère circulaire d'environ 50 mètres de diamètre pour une profondeur de 5 à 6 m (Photographie 1). Le centre de la masse effondrée est descendu verticalement, en un seul bloc, avec peu de déformations horizontales et verticales.

Les parois du cratère de l'effondrement 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 ;
- plusieurs couches de roche calcaire d'épaisseur décimétrique à plurimétrique. Les couches sont séparées les unes des autres par de minces interfaces argileuses. L'épaisseur globale de l'empilement est d'environ 5 à 7 m ;
- une couche d'argile gris-foncé dont l'épaisseur varie de 80 cm à 1,5 m environ ;
- une couche de roche calcaire d'environ 3 m d'épaisseur, qui constitue le toit immédiat de la carrière.



Photographie 1 : Vue aérienne de l'effondrement généralisé (cliché A. Methez, CD33-DI)

Sur la base du plan associé à l'expertise de la carrière faite par le BRGM en 1973 (Figure 2) et de la visite du secteur concerné par cet effondrement, on constate que ce désordre a emporté une trentaine de piliers de petites sections. En tenant compte des données disponibles et en numérisant le secteur concerné de la carrière (Figure 6), les caractéristiques suivantes peuvent être précisées (à partir du Tableau 2) :

- des hauteurs de vides comprises entre 1,7 m et 5,6 m (moyenne = 4,2 m) ;
- des piliers très élancés (élancement : h/l variant entre 0,5 et 2,3 ; moyenne = 1,4) ;
- des largeurs de piliers comprises entre 2,8 et 4,5 m (moyenne = 3,05 m) ;
- des largeurs de galeries comprises entre 2,3 et 3,7 m ;
- un taux de défruitement variant entre 74 et 85 % (moyenne = 79,4 %).

À noter qu'en 1973, il était déjà mentionné sur le plan du BRGM, dans ce secteur, deux rangées de piliers très fissurés (Figure 2).

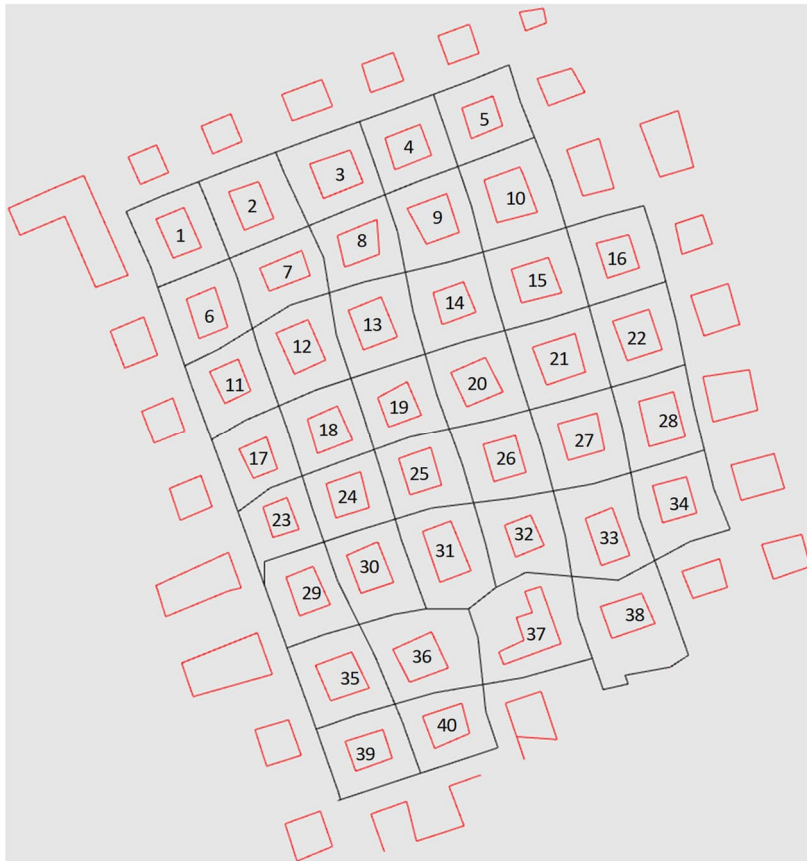


Figure 6 : Evaluation des taux de défrètement des piliers de la zone effondrée (les 9 piliers n° 1, 3, 4, 5, 10, 16, 38, 39 et 40 ne se sont pas effondrés)

3 Calculs numériques et analytiques

3.1 Calculs analytiques

Dans le cas des exploitations souterraines par chambres et piliers abandonnées, les piliers doivent assurer la stabilité globale de la carrière pendant et après l'arrêt de l'exploitation. En conséquence, les contraintes induites doivent être au moins égales ou inférieures à la résistance de la roche.

Le dimensionnement d'un pilier passe par l'estimation de la contrainte moyenne « verticale » du pilier (σ_p) et de la résistance du pilier (R_p) en calculant le rapport : $\frac{R_p}{\sigma_p}$

Le calcul de ce ratio est donc fondé sur l'estimation ou le calcul, plus ou moins précis, de ces deux grandeurs. Ce ratio peut être assimilé à un facteur de sécurité. Un facteur de sécurité supérieur à 1,5 doit être adopté pour assurer la stabilité à long-terme d'une carrière (Ifsttar, 2014). Les piliers ayant un facteur de sécurité inférieur à 1,5 évoluent à terme vers la rupture et par conséquent vers l'effondrement d'une partie ou de la totalité de la carrière.

3.1.1 Contrainte moyenne « verticale » du pilier

La méthode de l'aire tributaire est une méthode analytique simple, la plus utilisée, pour estimer la contrainte verticale. Le principe de la méthode repose sur l'hypothèse que chaque pilier reprend individuellement la contrainte induite par le poids propre de la surface associée à ce pilier. La contrainte verticale dépend de la hauteur de recouvrement (H), du poids volumique du recouvrement (ρg) et du taux de défrèvement (τ) (Figure 7). Le taux de défrèvement local exprime le pourcentage de la surface exploitée (extraite) par rapport à la surface initiale.

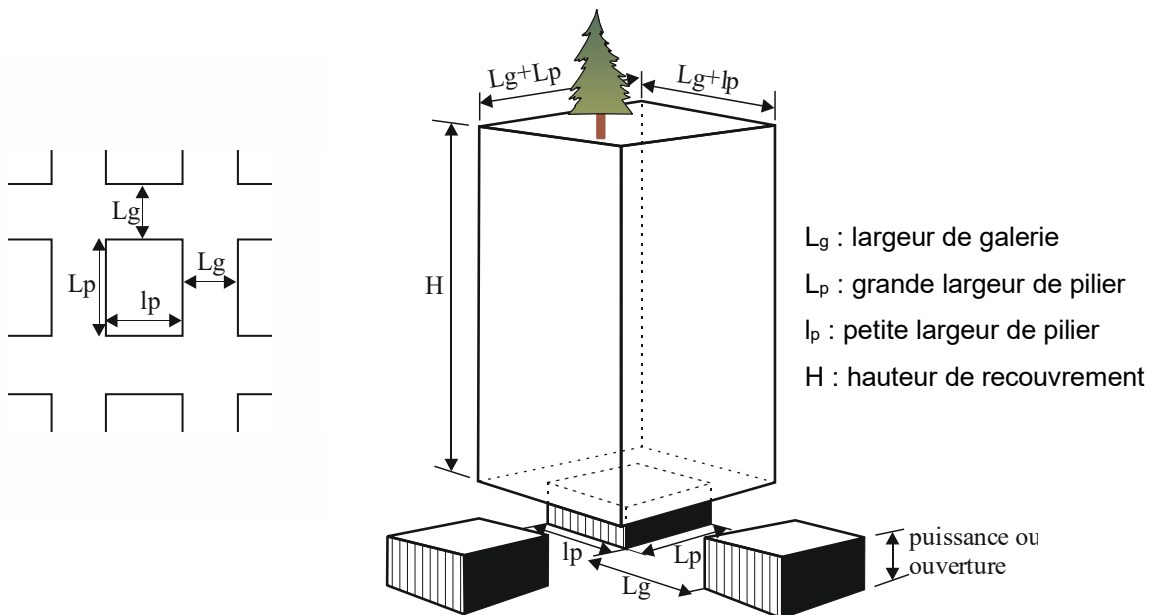


Figure 7 : Méthode de l'aire tributaire – calcul de la contrainte verticale moyenne en fonction de la dimension des chambres et des piliers

Il est à noter que l'utilisation de ce modèle est possible quand l'extension de l'exploitation est supérieure à $1,5 H$ et pour des formations subhorizontales et homogènes (Ifsttar, 2014).

3.1.2 Résistance du pilier

La résistance d'un pilier dépend de la résistance à la compression uniaxiale (R_c) de la roche. Néanmoins, la résistance du pilier diffère de la résistance intrinsèque de la roche déterminée à partir des essais de compression simple ou uniaxiale sur des éprouvettes (Martin & Maybee, 2000). En effet, elle dépend également de la géométrie du pilier : largeur (l_p), et hauteur (h_p) ou plutôt de l'élanement (h_p/l_p). Un élanement élevé fragilise le pilier. Il est pris en compte dans l'évaluation de la résistance de piliers.

Plusieurs relations empiriques ont été proposées, pour estimer la résistance d'un pilier, à partir des observations du comportement des piliers dans des mines et des carrières. La forme la plus générale est la suivante pour un pilier carré d'une largeur l : $R_p = \lambda R_c \frac{l^\alpha}{h^\beta}$

Les valeurs de α et β sont déterminées grâce au retour d'expériences et aux observations in-situ. La valeur de λ permet de tenir compte de l'effet de site et laboratoire (échelle) et de l'hétérogénéité du massif.

Le Tableau 1 fournit les valeurs disponibles dans la bibliographie pour les différents types de roches. On note que l'influence de λ est linéaire, en revanche l'influence de la géométrie du pilier (l_p/h_p) est plus complexe.

Tableau 1. Coefficients utilisés pour l'estimation de la résistance de piliers pour différents matériaux (dans Al Heib, 2016)

Référence	Type de roche	α	β	λ
Martin	Quartzite	0,5	0,75	0,57
Martin	Meta-Sédiments	0,46	0,66	0,69
Gabriel	Calcaire	0,3	0,59	0,92
Salamon & Munro	Charbon	0,75	0,8	0,93
cette étude	calcaire à Astéries	0,75	0,8	0,74

Afin de pouvoir calculer le ratio R_p/σ_p pour les piliers concernés par la zone effondrée, il est nécessaire d'évaluer plusieurs paramètres géométriques caractérisant les 40 piliers retenus sur la Figure 6 :

- La section horizontale des piliers (S_{pilier}) et la section totale (pilier + demi-largeur de galerie = S_{totale}) permet de calculer le taux de défrètement (τ) de chaque pilier (4^{ème} colonne du Tableau 2) ;
- La profondeur permet de calculer la contrainte verticale moyenne dans le pilier (σ_p) en supposant un recouvrement argileux épais de 2 m avec la relation : $(\rho_{\text{calcaire}}(\text{prof}-2) + 2 \times \rho_{\text{argile}}) g / (1-\tau)$;
- La hauteur (h_p) et la petite largeur (l_p) du pilier fournissent la valeur de l'élançement : $\lambda = h_p/l_p$ et permette d'évaluer la valeur de R_p (avec la relation $R_p = \lambda R_c \frac{l^\alpha}{h^\beta}$).

Pour calculer la résistance des piliers de la zone effondrée, nous avons adopté les paramètres α et β de Salamon & Munro (le charbon étant un matériau faiblement résistant, comme le calcaire à Astéries de cette étude). Le paramètre λ a été calé de façon à discriminer au mieux les 31 piliers effondrés des 9 piliers non effondrés (Figure 6). C'est-à-dire déterminer λ tel que R_p/σ_p soit le plus souvent inférieur à 1 pour les piliers effondrés et le plus souvent supérieur à 1 pour les piliers non effondrés. Les résultats avec la valeur optimale ($\lambda = 0,7$) ont été reportés dans l'avant dernière colonne du Tableau 2.

Parmi les 9 piliers non effondrés (en vert dans le Tableau 2), il y en a 4 pour lesquels $R_p/\sigma_p < 1$. De même, pour les 31 piliers effondrés, il y en a 11 pour lesquels $R_p/\sigma_p > 1$. Ces piliers sont ceux dont les valeurs de R_p/σ_p sont soulignées dans le Tableau 2. En utilisant cette méthode analytique (approchée), il y a donc 37,5 % de piliers qui ne sont pas en adéquation avec le constat d'effondrement.

Ces résultats analytiques ont été reportés sur la Figure 8. Celle-ci permettra ensuite une comparaison aisée avec les résultats du modèle numérique 3D.

Tableau 2 : Caractéristiques géométriques et mécaniques de 40 piliers dans ou au voisinage de la zone effondrée (numérotation sur Figure 6)

n°	S _{pilier}	S _{totale}	τ	prof.	σ _p	h _{pilier}	l _{pilier}	λ = h _p /l _p	R _p	R _p /σ _p
1	11,09	54,81	79,8%	7,72	0,71	5,02	2,8	1,79	0,79	<u>1,11</u>
2	10,98	58,43	81,2%	7,19	0,72	5,2	2,93	1,77	0,80	<u>1,10</u>
3	13,15	58,26	77,4%	7,3	0,61	5,34	3,23	1,65	0,84	1,38
4	10,83	51,16	78,8%	7,53	0,67	5,24	3,03	1,73	0,81	<u>1,22</u>
5	9	52,62	82,9%	8,22	0,89	4,88	2,89	1,69	0,83	<u>0,93</u>
6	11,01	52,33	79,0%	9,55	0,83	5,61	2,85	1,97	0,73	0,88
7	9,77	51,21	80,9%	9,01	0,87	5,22	2,3	2,27	0,66	0,76
8	11,15	50,61	78,0%	9,16	0,76	4,81	2,95	1,63	0,85	<u>1,11</u>
9	13,28	57,42	76,9%	9,21	0,73	4,76	3,22	1,48	0,92	<u>1,25</u>
10	15,9	66,47	76,1%	9,3	0,71	5,04	3,51	1,44	0,94	<u>1,31</u>
11	8,94	50,48	82,3%	10,95	1,12	5,54	2,67	2,07	0,71	0,63
12	13,11	58,75	77,7%	10,62	0,86	4,97	3,16	1,57	0,87	<u>1,01</u>
13	13,11	58,88	77,7%	10,6	0,86	4,72	3,27	1,44	0,93	<u>1,08</u>
14	9,59	57,39	83,3%	10,87	1,18	4,6	3,03	1,52	0,90	0,76
15	12,47	61,55	79,7%	11	0,98	5	3,24	1,54	0,89	0,90
16	10,25	55,98	81,7%	11,23	1,11	5,48	3,05	1,80	0,79	<u>0,71</u>
17	7,92	47,06	83,2%	12,15	1,30	5,07	2,38	2,13	0,70	0,54
18	11,07	49,71	77,7%	11,98	0,97	4,56	3,03	1,50	0,91	0,94
19	9,91	50,14	80,2%	12,12	1,10	4,23	2,92	1,45	0,94	0,85
20	12,56	58,34	78,5%	12,49	1,04	4,24	3,51	1,21	1,07	<u>1,03</u>
21	14,71	61,55	76,1%	12,59	0,94	4,54	3,7	1,23	1,06	<u>1,12</u>
22	13,49	57,65	76,6%	12,47	0,96	4,92	3,54	1,39	0,96	1,00
23	7,48	40,42	81,5%	12,74	1,23	4,47	2,39	1,87	0,77	0,63
24	11,02	46,19	76,1%	13,13	0,98	4,07	3,29	1,24	1,06	<u>1,07</u>
25	11,1	50,98	78,2%	13,35	1,09	3,8	3,14	1,21	1,08	0,99
26	11,06	56,65	80,5%	14,08	1,28	3,47	3,12	1,11	1,15	0,90
27	12,84	61,97	79,3%	14,33	1,23	3,48	3,5	0,99	1,25	<u>1,02</u>
28	14,73	56,97	74,1%	14,22	0,98	3,99	3,34	1,19	1,09	<u>1,11</u>
29	10,91	53,72	79,7%	13,75	1,21	4,01	2,68	1,50	0,92	0,76
30	12,26	56,63	78,4%	14,48	1,19	3,87	2,89	1,34	1,00	0,84
31	14,51	65,34	77,8%	15,28	1,22	3,43	2,79	1,23	1,07	0,88
32	8,39	55,04	84,8%	15,98	1,85	2,69	2,58	1,04	1,23	0,66
33	12,75	64,04	80,1%	16,69	1,48	2,33	2,68	0,87	1,42	0,96
34	11,45	57,93	80,2%	16,18	1,44	2,85	3,24	0,88	1,39	0,96
35	13,23	59,06	77,6%	16,14	1,27	4,12	3,55	1,16	1,11	0,87
36	13,67	72,41	81,1%	16,7	1,56	3,37	3,4	0,99	1,26	0,81
37	17,84	83,72	78,7%	17,75	1,46	2,09	3,42	0,61	1,85	<u>1,27</u>
38	12,68	80,46	84,2%	18,15	2,02	1,7	3,12	0,54	2,04	<u>1,01</u>
39	10,31	53,36	80,7%	17,78	1,62	3,39	2,78	1,22	1,08	<u>0,67</u>
40	11,06	50,43	78,1%	18,1	1,45	2,65	2,87	0,92	1,34	<u>0,93</u>

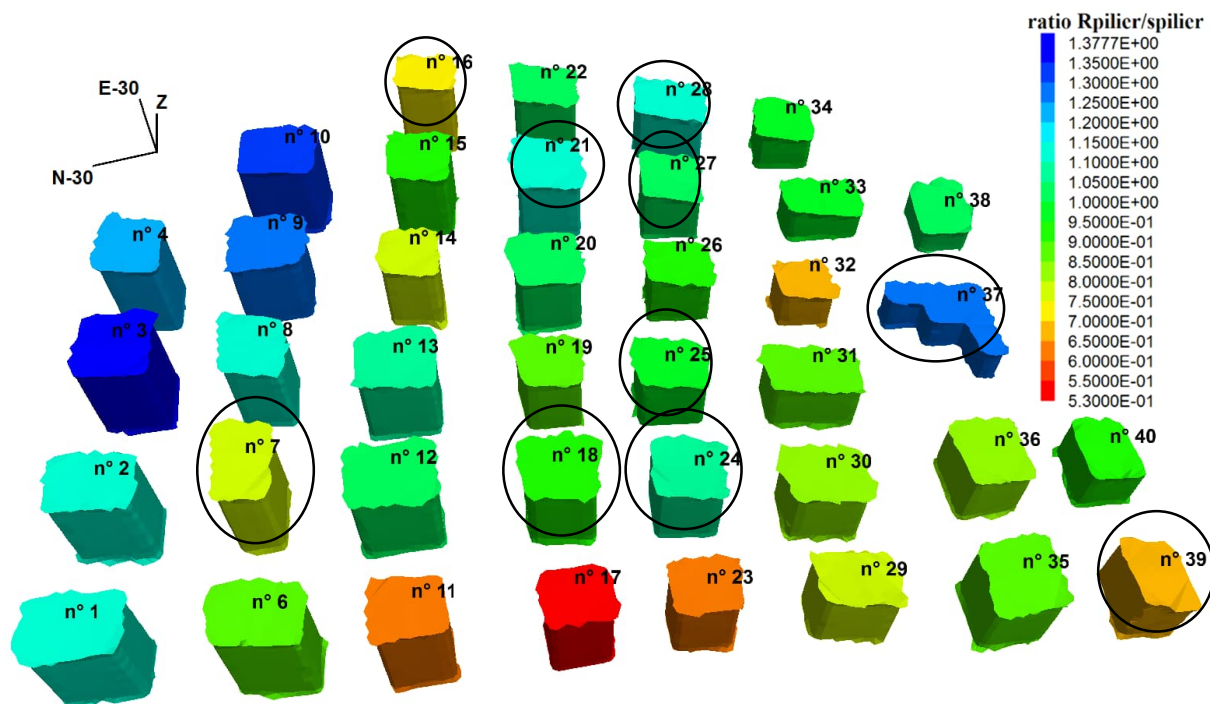


Figure 8 : Valeurs de R_p/σ_p reportées sur les piliers idoines du modèle numérique 3D

3.2 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 laser scan s'impose naturellement.

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.

3.2.1 Modèle géométrique

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 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 14 millions de points, le rééchantillonnage permet de conserver environ 820 000 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 la partie effondrée (extruder un contour des piliers provenant du relevé BRGM pour générer les parois, interpoler des surfaces gauches au toit et au mur avec le voisinage,

découper ces surfaces entre elles, projeter des points sur ces surfaces, nettoyer les débords, etc.) en la connectant avec soin avec le reste de la carrière ;

- 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 821 988 points rééchantillonnés, 372 684 (45 %) ont été manuellement créés, supprimés ou déplacés (Figure 9) pour aboutir à un nuage final de 926 709 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, Figure 10). La finesse de 40 cm permet de représenter les 49 piliers de la zone effondrée (Figure 11) avec suffisamment de zones (entre 1418 et 4430) pour une bonne précision des résultats.

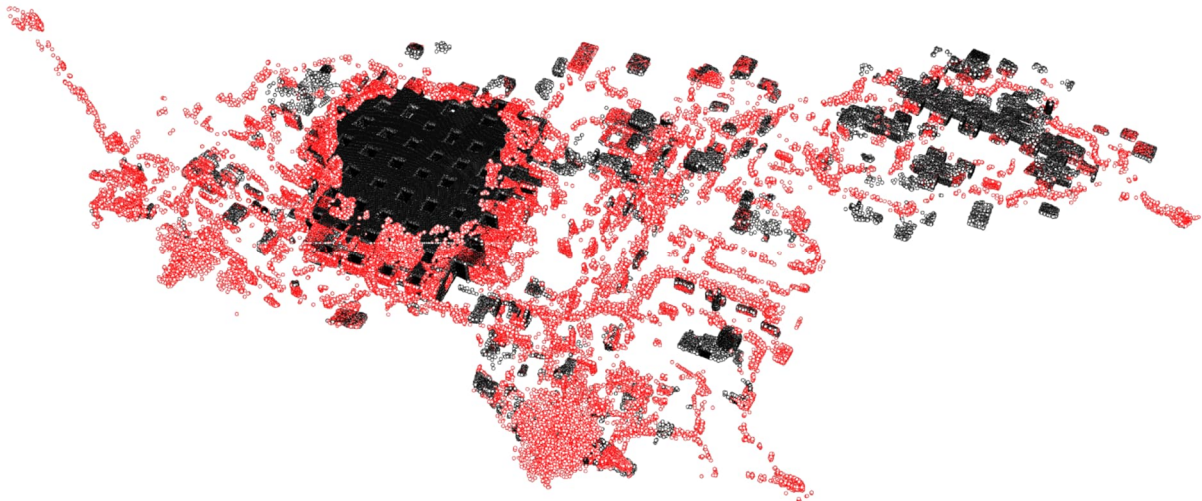


Figure 9 : Ensemble des 372 684 points retouchés dans le nuage de points initial (rééchantillonné avec une distance de 20 cm) : en noir = points créés, en rouge = points supprimés.

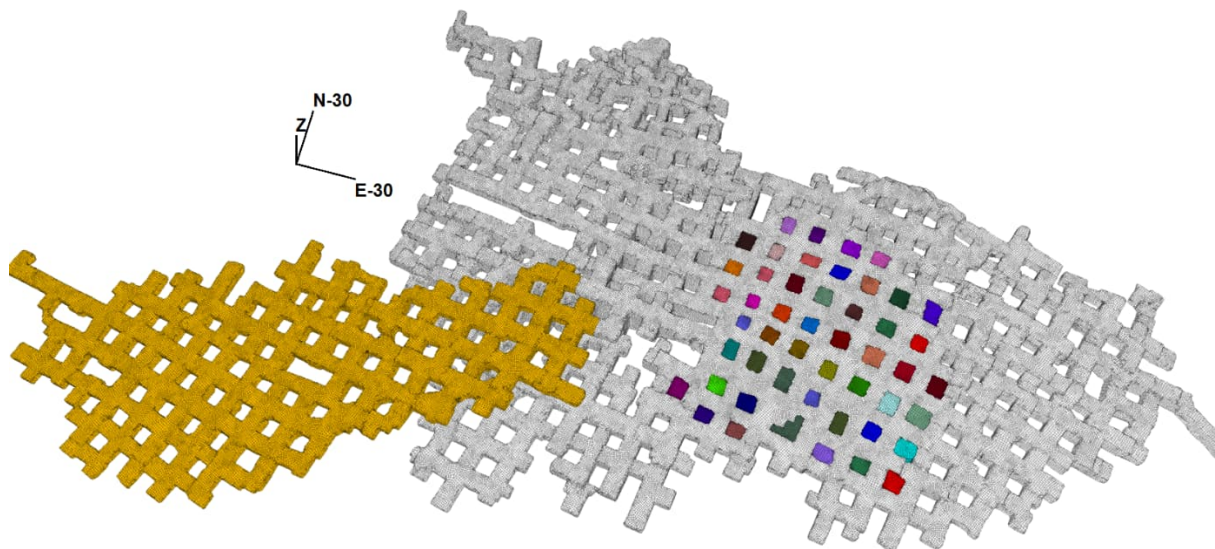


Figure 10 : Maillage des 49 piliers à proximité de la zone effondrée et des galeries des niveaux inférieur et supérieur.

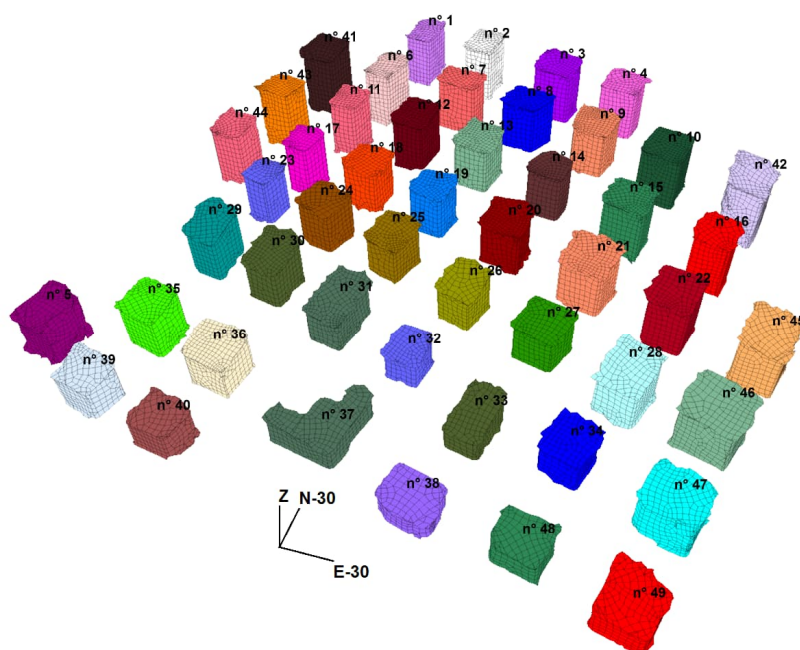


Figure 11 : Constitution des 49 groupes de mailles relatives aux piliers dans ou au voisinage de la zone effondrée.

Le modèle numérique 3D représente l'intégralité des piliers et galeries des 2 niveaux de la carrière souterraine de Bellegarde, soit environ 270 piliers (dont 30 sont comptés une seule fois sur 2 niveaux).

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 de Bellegarde. Les limites du modèle ont été placées entre 17 et 54 rayons (de galerie) de tout ouvrage souterrain, soit entre 33 m à l'est et 50 m au nord. 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 9 m et 47 m (Figure 13).

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 12).

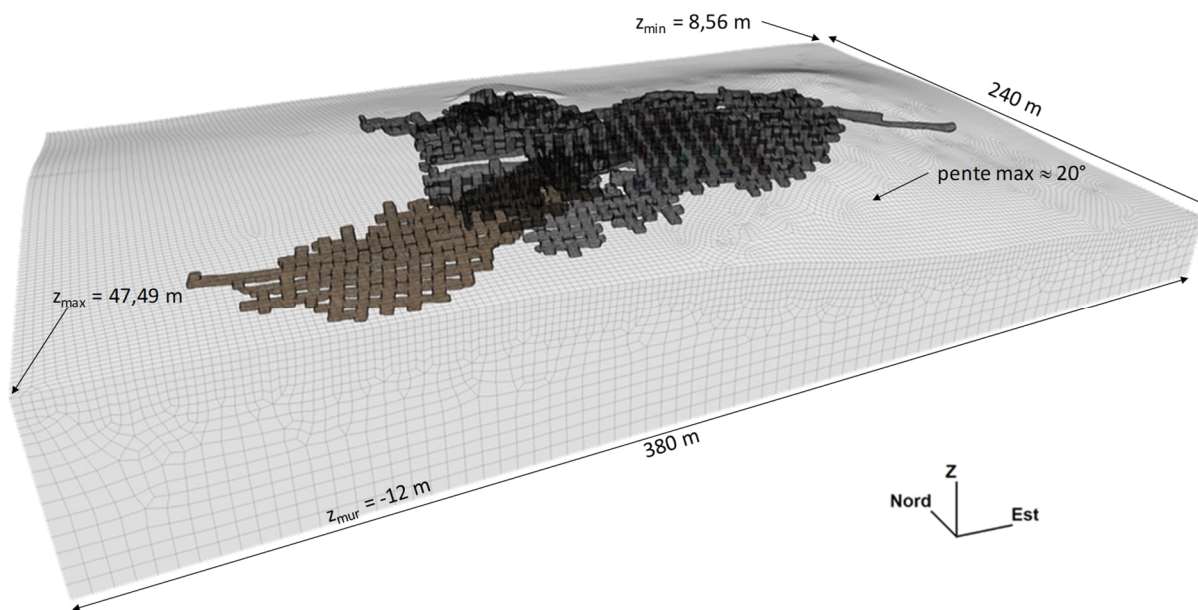


Figure 12 : Maillage du modèle 3D de la carrière souterraine de Bellegarde

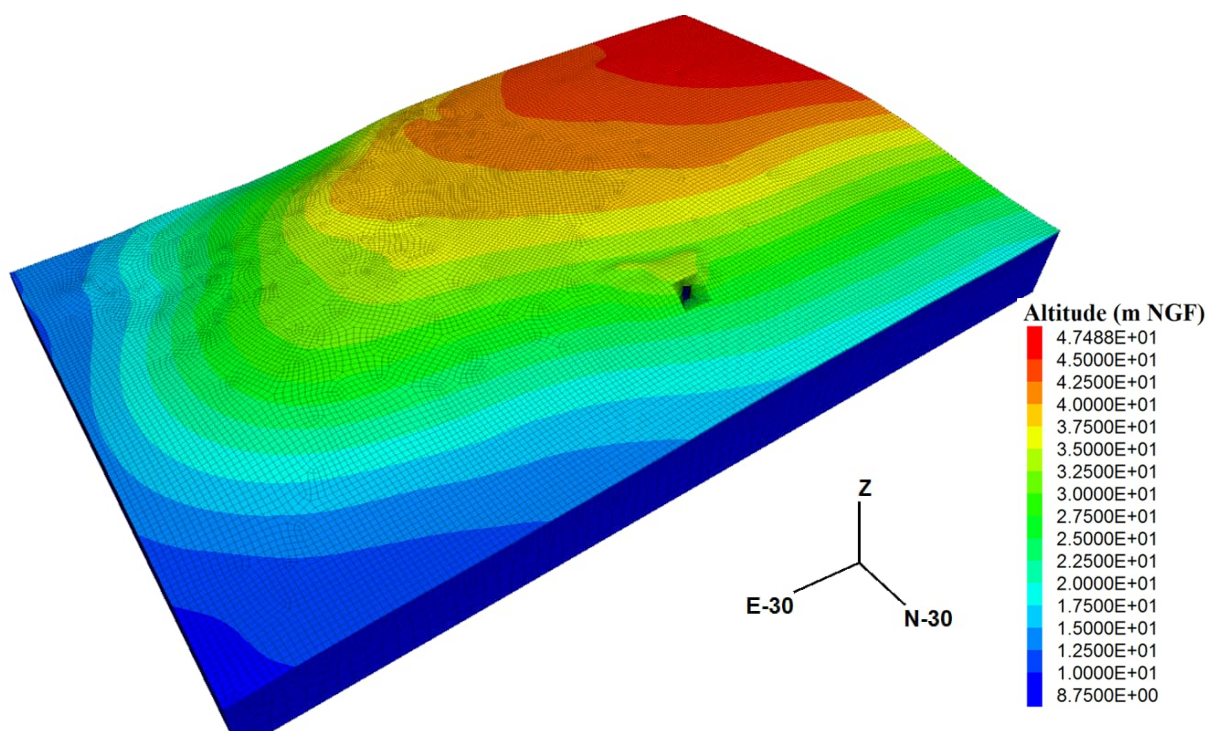


Figure 13 : Topographie au droit de la carrière souterraine de Bellegarde

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. De plus, pour limiter la taille du modèle, et considérant la topographie peu marquée (pas de pentes élevées, pente moyenne = 8,7° ; Figure 14) les limites du modèle ont été orientées de façon à circonscrire au mieux (volume minimal) la carrière souterraine, ce qui correspond ici à une rotation de 30° en sens horaire.

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

centre de rotation : X = 448 730,2 ; Y = 6 413 943,5 ;

angle de rotation : 30° (sens horaire) ;

translation : x = X - 448 730,2 ; y = Y - 6 413 943,5.

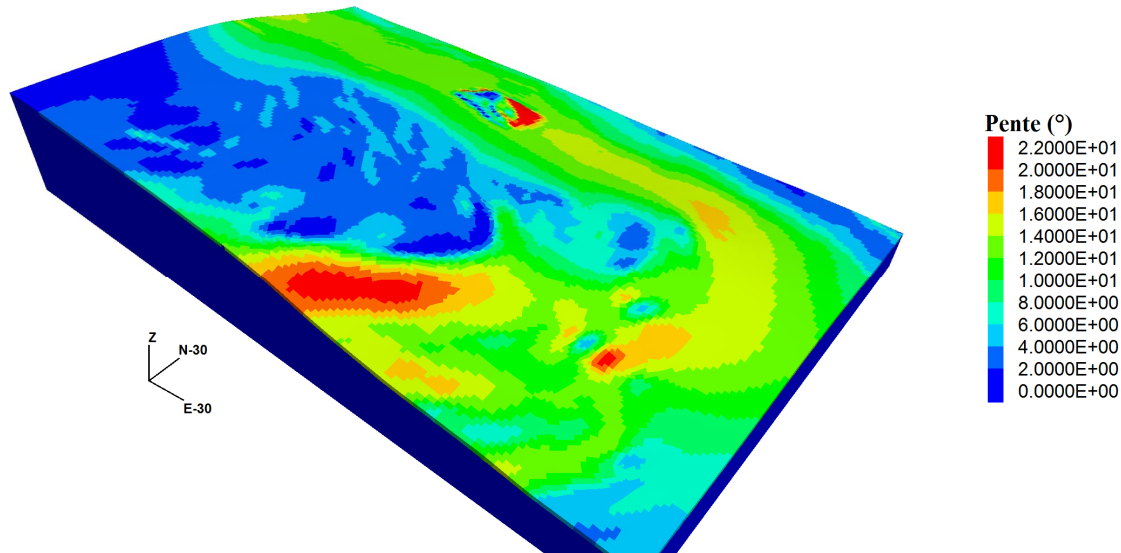


Figure 14 : Isovaleurs des pentes de la topographie au droit de la carrière de Bellegarde

Par ailleurs, pour limiter le nombre de mailles dans le modèle numérique, les 2 puits ainsi que l'entrée à l'est de la carrière n'ont pas été représentés (car ils n'ont aucun impact sur la zone effondrée). En effet, la connexion d'objets à maillage fin (galerie, puits) avec une surface topographique maillée plus grossièrement oblige à générer un grand nombre de mailles de taille intermédiaire. L'augmentation des mailles en 2D est modérée, mais devient significative en 3D.

Le maillage volumique (*Erreur ! Source du renvoi introuvable.*) utilisé dans cette étude correspond à 8 031 894 zones (dont 86 % du volume en hexaèdres) et 3 680 054 nœuds. Sa génération demande plus de 10 h de calcul.

Le domaine géométrique de ce modèle 3D s'étend sur 380 m dans la direction X (E-30), 240 m dans la direction Y (N-30) et sur une hauteur, variant entre 20 m et 60 m (direction Z) pour un volume maillé de 3,92 hm³.

Après l'équilibre des contraintes initiales dans le modèle, les vides sont ensuite creusés en supprimant les mailles¹ (affectées aux galeries) du maillage.

3.2.2 Paramètres géomécaniques

Le Tableau 3, présente la liste des paramètres physiques et mécaniques des 2 matériaux retenus pour la modélisation : le calcaire exploité et les argiles/limons du recouvrement. Ces valeurs proviennent du rapport BRGM 73-SGN-135-AQI 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 3) correspondent au critère de rupture de Mohr-Coulomb.

Dans le rapport BRGM de 1973, la résistance à la compression uniaxiale est déterminée pour 3 échantillons : 1,5 MPa, 1,8 MPa et 2,4 MPa. En considérant que l'effondrement est lié à une dégradation progressive du calcaire, il a été choisi de dégrader par incréments la résistance du calcaire dans le modèle numérique en partant de la valeur moyenne des essais : 1,9 MPa, puis $R_c = 1,5$ MPa (valeur

¹ 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.

minimale des essais). L'étape finale du calcul est réalisée avec $R_c = 1 \text{ MPa}$ ce qui correspond à un effet d'échelle couramment rencontré en mécanique des roches (-47 % par rapport à la moyenne de R_c). Comme la résistance réelle à l'échelle du massif est inconnue (mais sûrement inférieure à 1,9 MPa), ces différentes étapes successives vont permettre de cerner la valeur de résistance permettant de reproduire au mieux le mécanisme d'effondrement.

D'autre part, le rapport BRGM montre que le ratio R_c/R_t (R_t étant la résistance à la traction) a une valeur variant entre 5,2 et 6,0 pour les 3 essais. Les auteurs ont retenu une valeur moyenne de 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 3, obéissent à cette règle. Cette donnée est précieuse 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 3 : 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]	0,55	0,43	0,29	0,2
Angle de frottement interne	ϕ	[°]	30			20
Résistance à la traction	R_t	[MPa]	0,35	0,27	0,18	0,05
Résistance à la compression uniaxiale	R_c	[MPa]	1,9	1,5	1,0	0,57

3.2.3 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 (2 niveaux) : équilibre élastique
- 3) équilibre élastoplastique (modèle de Mohr-Coulomb)

Un 2^{ème} calcul a été réalisé en n'excavant que les galeries du niveau inférieur (en gris sur la Figure 10) en étape 2 puis en exécutant l'étape 3. La comparaison des résultats des 2 calculs à l'étape 3 permettra de renseigner sur l'influence mécanique du niveau supérieur sur les contraintes régnant au voisinage de la zone effondrée.

3.3 Résultats

Cette section présente les résultats du calcul numérique de la stabilité mécanique de la carrière souterraine de Bellegarde.

L'analyse des résultats a permis :

- d'estimer les sollicitations dans les piliers (notamment dans la zone effondrée) en faisant varier les caractéristiques du massif encaissant (résistances à la compression et à la traction du calcaire) afin d'en évaluer la pertinence ;
- 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 2) ;
- 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 3 grandeurs clés afin de quantifier la stabilité (à court et à moyen terme) de la carrière Bellegarde : les contraintes dans les piliers, la plasticité et le facteur F (qui peut être assimilé au facteur de sécurité la différence étant que dans le calcul on prend en compte la contrainte horizontale et qui correspond à la distance 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 (par extension : 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 l'état de contrainte n'a jamais atteint le critère de rupture 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. Le facteur doit être supérieur à 1,5 pour garantir une stabilité à moyen terme. Ces 50 % de marge de sécurité permettent de prendre en compte les incertitudes inhérentes aux variations géologiques, géomécaniques et liées aux potentielles actions externes, ainsi qu'aux limites des modèles de calcul.

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 15) d'une zone (dans un massif rocheux) sont distantes du ou des critères de rupture (calculé avec la contrainte principale 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 3). 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 15).

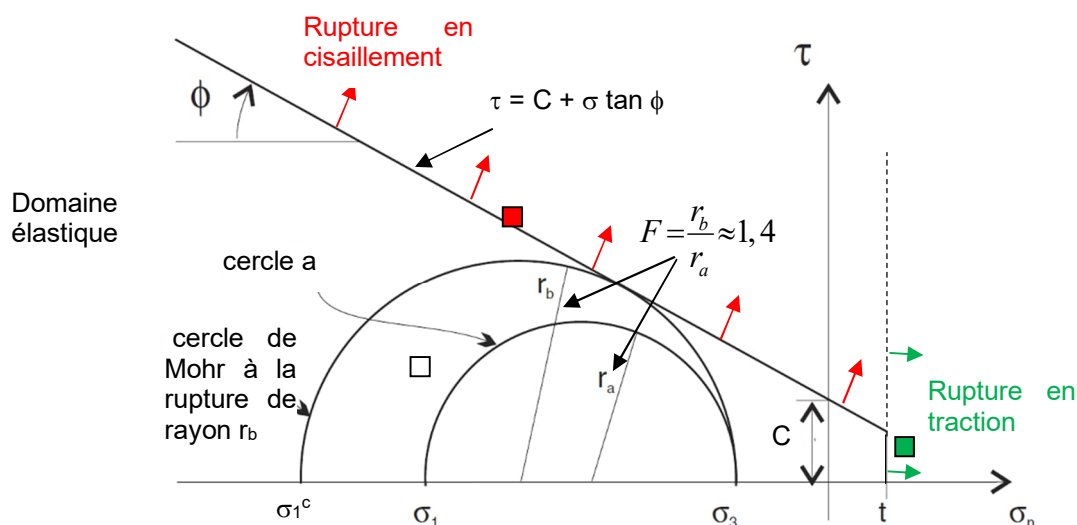


Figure 15 : Représentation des cercles de Mohr définissant le facteur F.

3.3.1 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 subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (Figure 16).

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 est élevée comparativement à R_c : elles peuvent atteindre 1,8 MPa au cœur des piliers les plus chargés. Ces piliers sont situés dans les zones à recouvrement élevé (sud de la carrière). La moitié de ces piliers appartient à la zone effondrée du 13 mars 2021 (délimitation en noir sur la Figure 16), mais l'autre moitié (plus à l'ouest et plus au sud de la zone effondrée) se situe dans une zone qui ne s'est pas effondrée (alors que les contraintes calculées dans ces piliers sont plus élevées que dans la zone effondrée).

Le seul calcul de σ_v n'apporte pas suffisamment d'informations, il est alors nécessaire d'analyser la distribution de la plasticité et le facteur F car ces 2 grandeurs tiennent compte des 2 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.

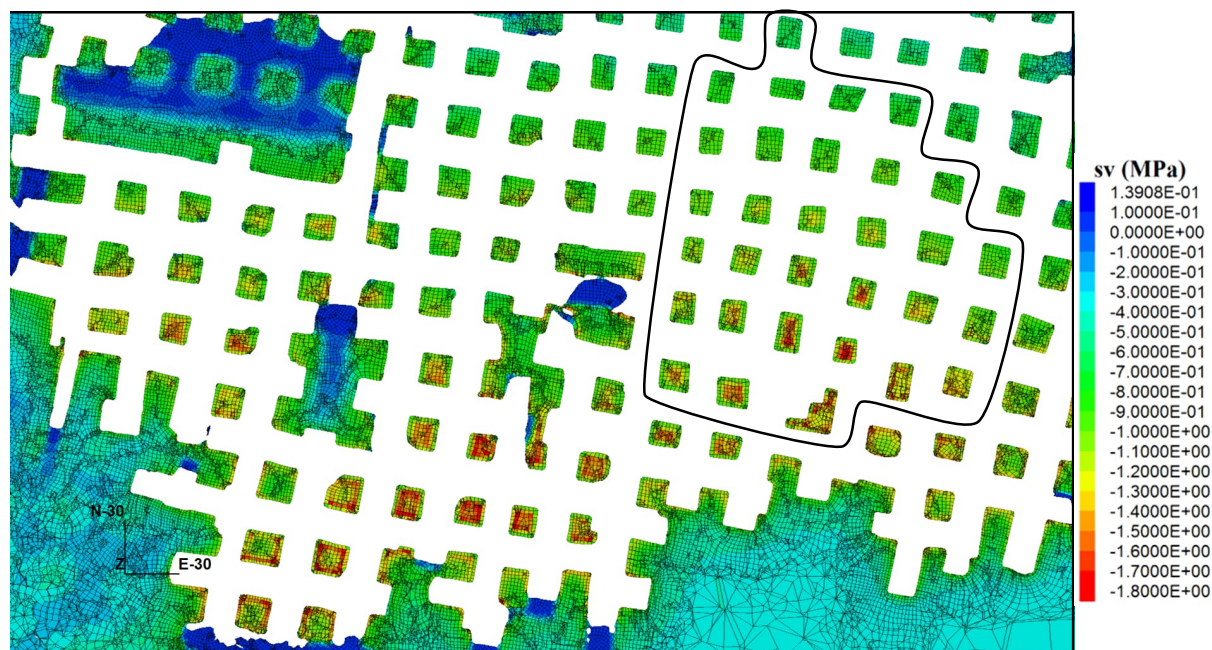


Figure 16 : Isovaleurs de la contrainte verticale, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).

3.3.2 Plasticité

La Figure 17 montre les zones plastiques (cisaillement en rouge et traction en vert) dans un plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur. La zone effondrée est délimitée par une courbe noire. Les piliers de cette zone effondrée dont le taux volumique plastique est élevé (ruine du pilier) sont entourés par une courbe rouge. Les autres piliers (hors zone effondrée) qui présentent aussi un taux volumique plastique élevé sont entourés par une courbe avec des pointillés bleus.

L'analyse de la Figure 17 montre que sur les 31 piliers de la zone effondrée (zone entourée en noir), 17 piliers (zone entourée en rouge) témoignent d'un taux volumique plastique élevé (en rouge, témoignant d'un cisaillement important), synonyme de ruine (soit 55 % des piliers). L'ensemble des zones cisailées dans les piliers de la carrière est reporté sur la Figure 18.

A l'ouest de la zone effondrée, on remarque que parmi les 18 piliers potentiellement rompus (entourés en pointillés bleus), 17 sont à proximité immédiate d'un pilier barrière ou d'un bord d'exploitation. Le seul pilier non concerné est cerclé en bleu.

De même, on constate que sur les 14 piliers de la zone réellement effondrée (en noire sur la Figure 17) n'ayant pas atteint la ruine dans les calculs (taux volumique plastique faible ou modéré), aucun n'est à proximité d'un pilier barrière ou d'un bord d'exploitation. Cela signifie que le 13 mars 2021, il est probable que les 17 piliers rompus aient entraîné dynamiquement les 14 piliers restants. Pour illustrer ce mécanisme, la rupture totale des 17 piliers concernés a été simulée (entourés en rouge sur la Figure 17) par la suppression des mailles relatives à ces 17 piliers dans le modèle. Un nouveau calcul a été lancé dans ces conditions, il montre que la plasticité s'est étendue d'une distance équivalente à 2-3 piliers comme le montre la Figure 19.

Cette simulation permet de reproduire le mécanisme probable d'effondrement. En effet, dans les directions est, ouest et sud, le calcul montre des piliers à fort taux volumique plastique débordant de la zone effondrée. En revanche, on observe qu'au nord de la zone, la plasticité ne peut plus s'étendre parce que le chargement additionnel de ces piliers (peu profonds, auparavant très peu chargés) n'est pas suffisant pour atteindre le critère de rupture en cisaillement.

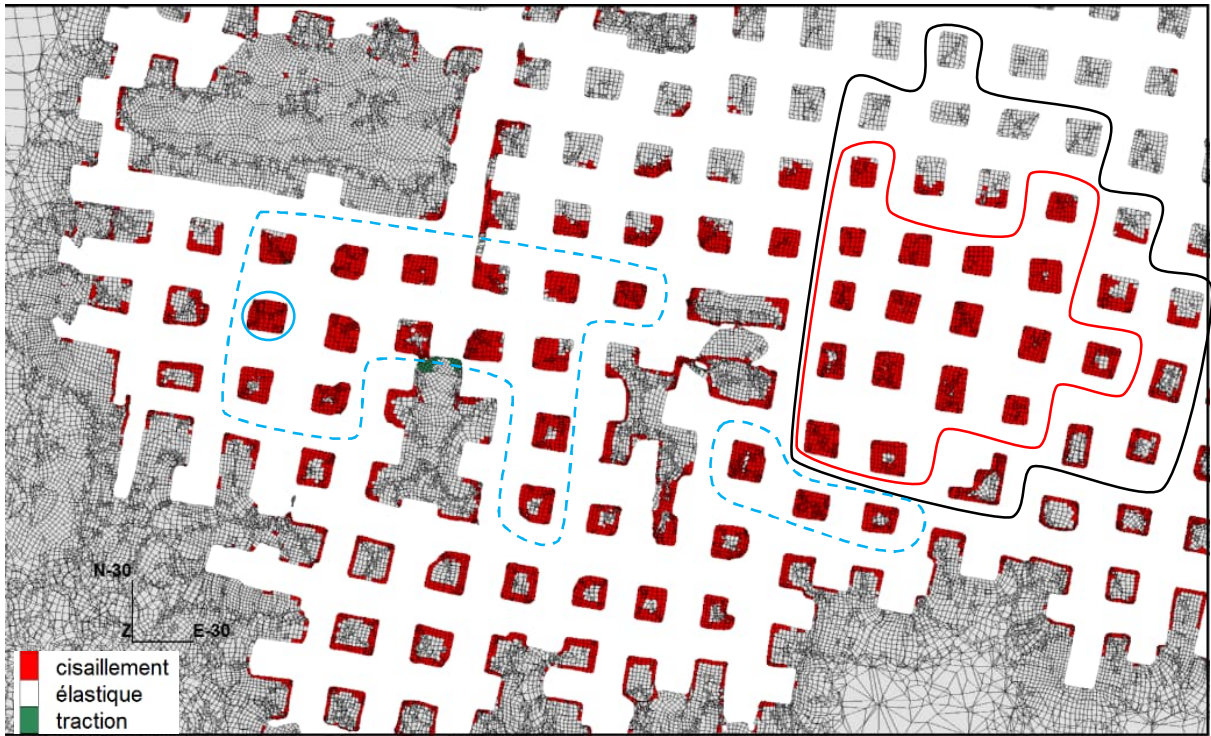


Figure 17 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).

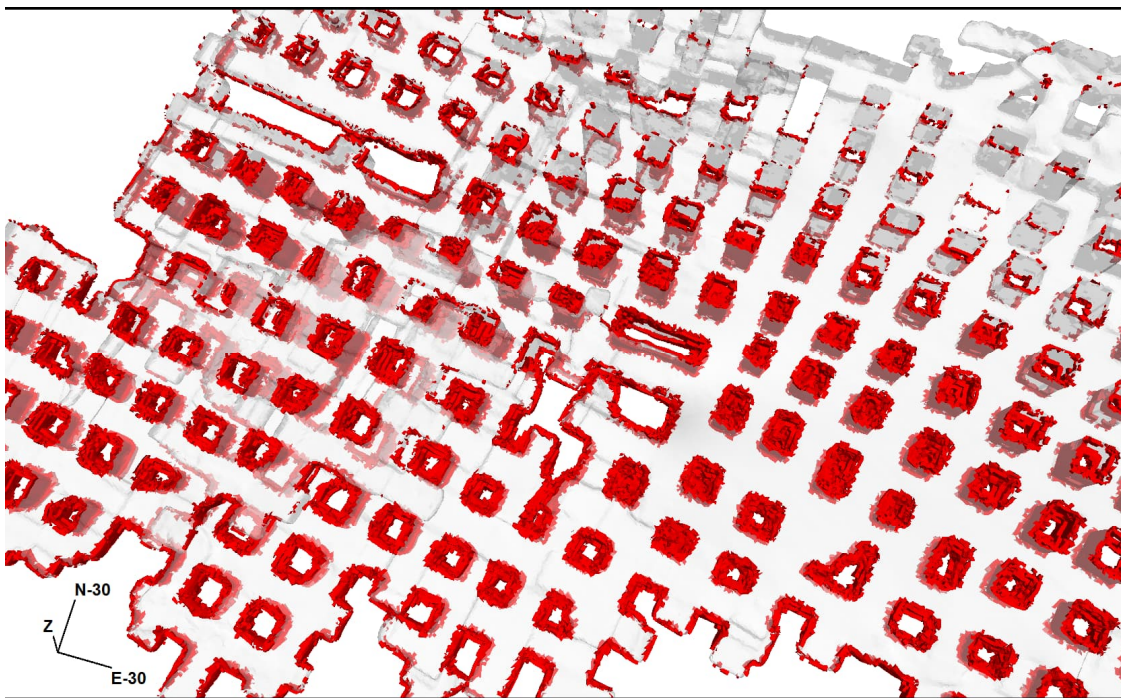


Figure 18 : Distribution des zones cisillées dans les piliers de la carrière Bellegarde (R_c calcaire = 1,0 MPa).

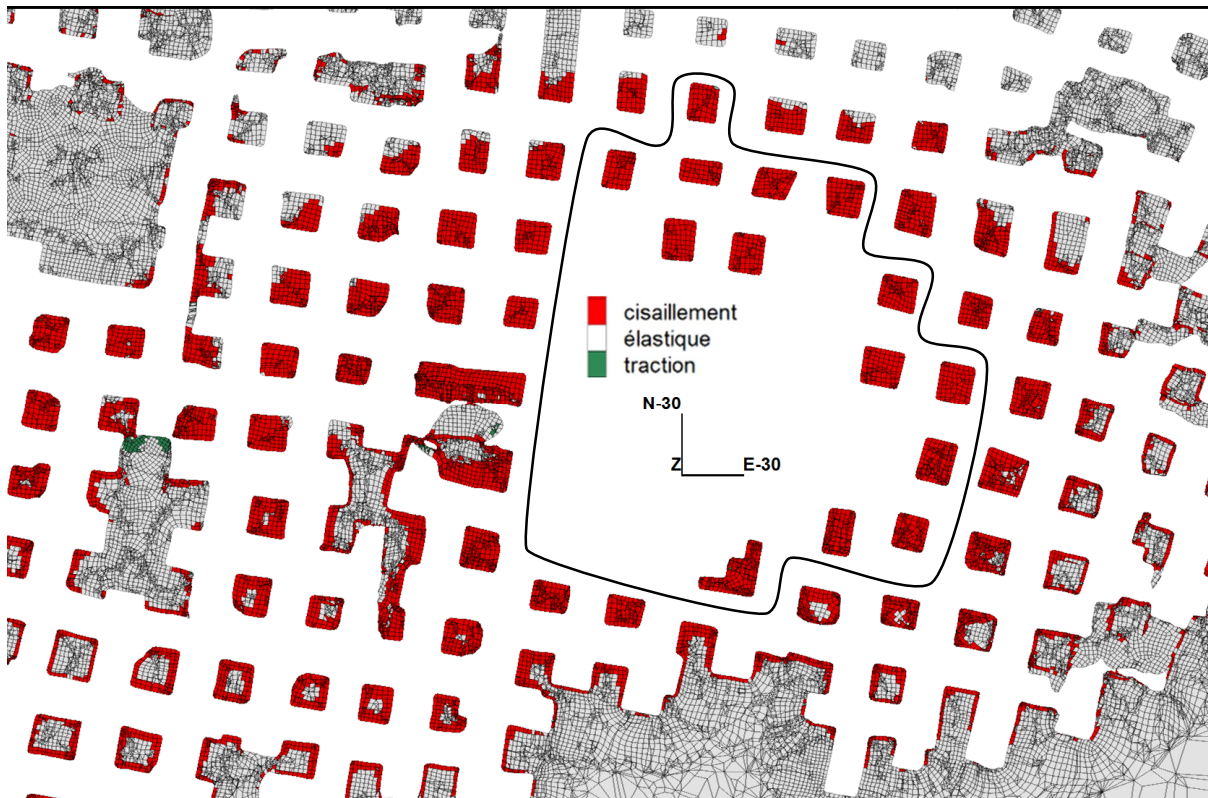


Figure 19 : Distribution de la plasticité après la suppression des 17 piliers rompus au centre de la zone effondrée, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur (R_c calcaire = 1,0 MPa).

Afin de se rapprocher du rayon plastique réel (correspondant à la zone effondrée), il est possible d'affiner ce résultat. Pour ce faire la résistance du calcaire (R_c) a été faiblement augmentée à 1,05 MPa pour diminuer le nombre de pilier rompus au cours de la première phase de calcul. Au vu des résultats du facteur F obtenus (annexe 1, montrant quels sont les piliers rompus ou non), cette valeur de R_c permet de reproduire fidèlement les extensions au nord et à l'est de l'effondrement du 13 mars 2021. Cette valeur permet de reproduire un mécanisme d'effondrement en 2 temps : tout d'abord une rupture d'un groupe de 13 piliers (Figure 20) entraînant dynamiquement les piliers voisins (Figure 21).

Ainsi, nous avons montré que, quel que soit le scénario de rupture (instantané ou en 2 temps), la résistance à la compression à l'échelle du massif permettant de reproduire le mécanisme et l'extension de l'effondrement est proche de 1 MPa.

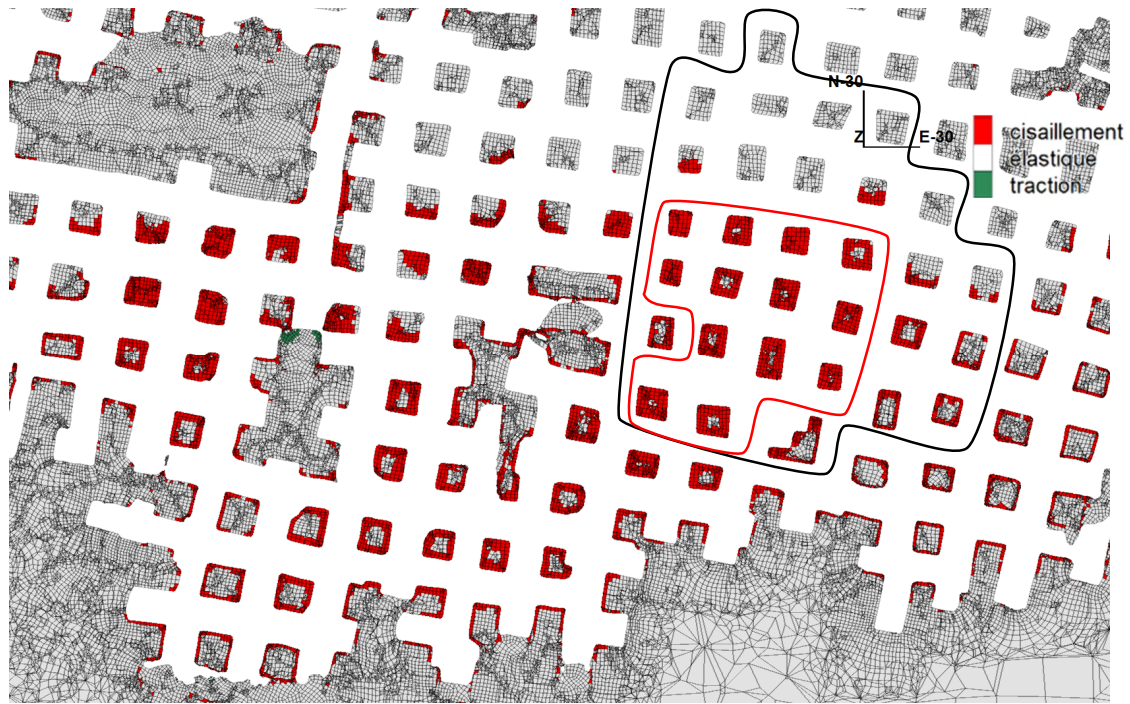


Figure 20 : Distribution de la plasticité, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur, groupe de 13 piliers rompus avec $R_c = 1,05$ MPa.

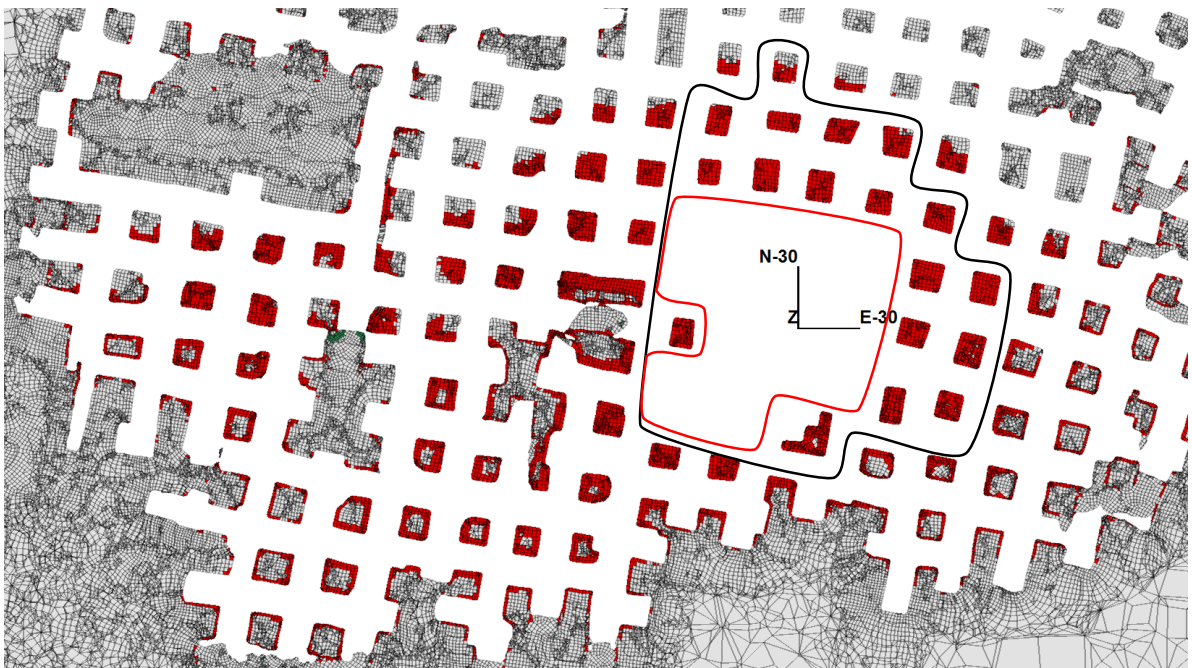


Figure 21 : Distribution de la plasticité après la suppression des 13 piliers rompus au centre de la zone effondrée, plan de coupe subhorizontal traversant les piliers du niveau inférieur ($R_c = 1,05$ MPa).

L'influence du rapport R_c/R_t sur la simulation des zones de chutes de toit a également été étudiée. Deux valeurs ont été testées : la valeur (inhabituelle) de 5,5 mentionnée dans le rapport BRGM de 1973 ainsi qu'une valeur « classique » de 12 (proche de la moyenne des matériaux calcaires, Fine 1993). L'analyse des Figure 22 et Figure 23 montre que le ratio $R_c/R_t = 5,5$ permet effectivement de reproduire les chutes de toit (rupture en traction représentée en vert sur ces 2 figures) se produisant dans le secteur ouest de la carrière (notamment au sud : Figure 2). Avec une valeur plus élevée ($R_c/R_t = 12$), la résistance à la traction du calcaire est trop sous-estimée et conduit à des ruptures de toit (zones en vert) sur l'intégralité de la moitié sud de la carrière.

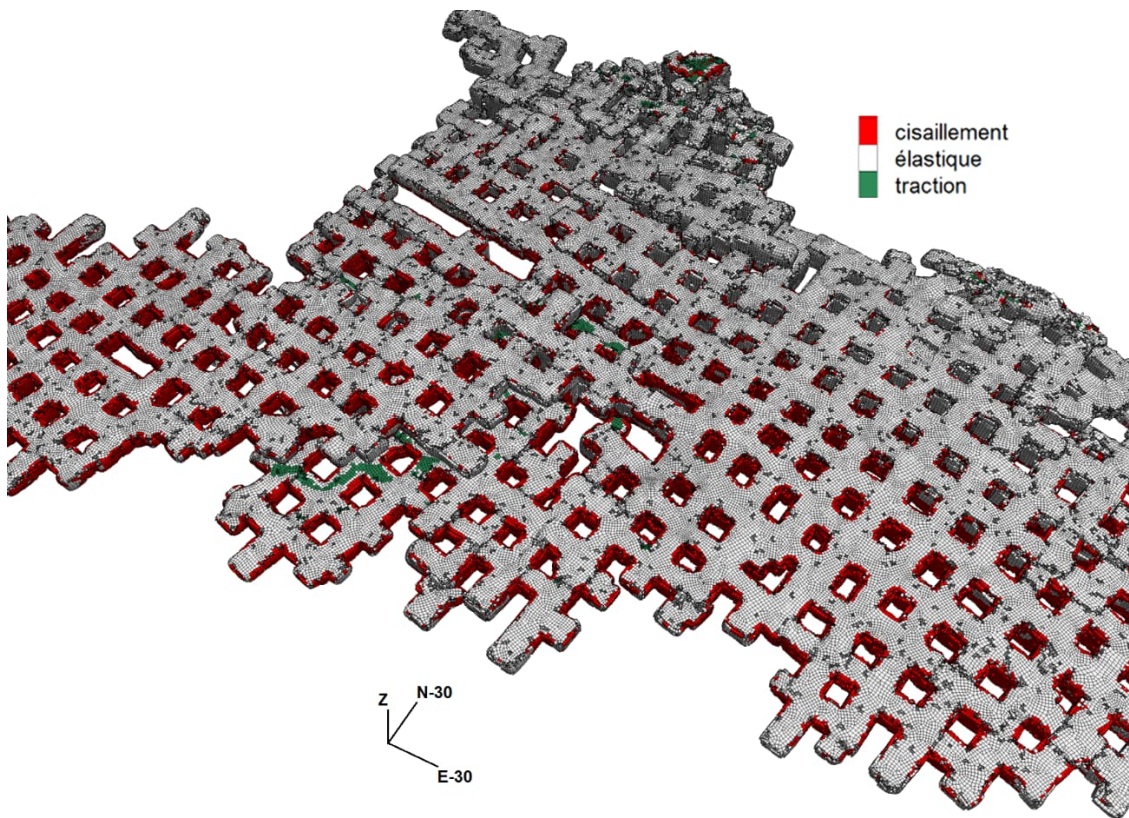


Figure 22 : Distribution de la plasticité aux parements des galeries de la carrière Bellegarde, avec $R_o/R_t = 5,5$.

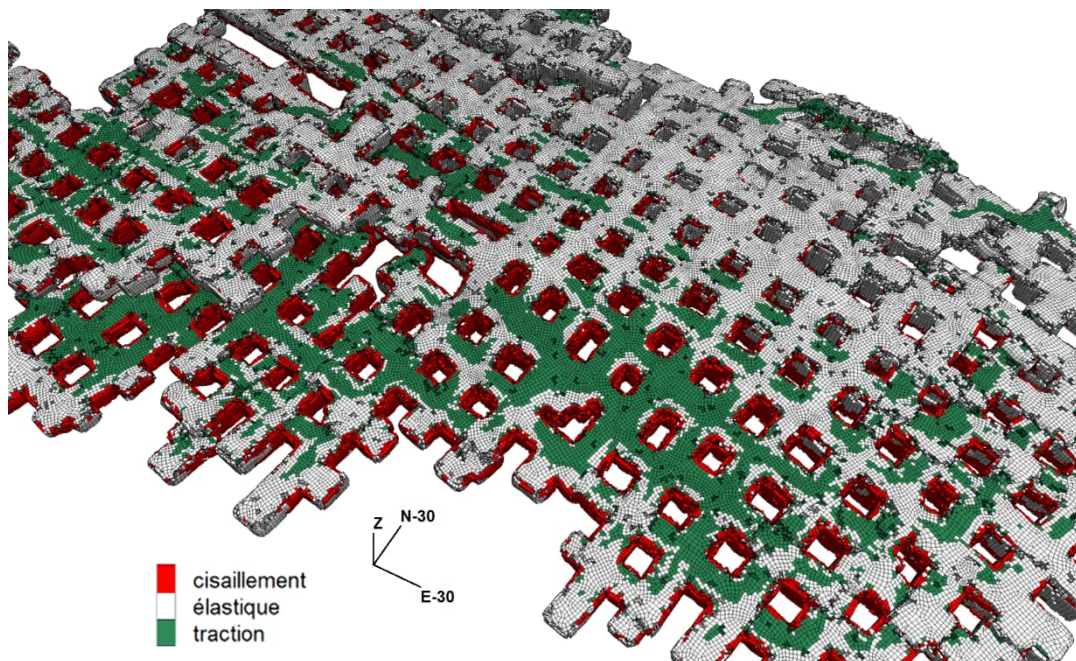


Figure 23 : Distribution de la plasticité aux parements des galeries de la carrière Bellegarde, avec $R_o/R_t = 12$.

3.3.3 Définition du facteur F

La stabilité des piliers est ici évaluée à l'aide d'une approche qui calcule le ratio entre la résistance du calcaire et la sollicitation à laquelle il est soumis. Les Figure 24 et Figure 25 présentent les isovaleurs du facteur F dans les piliers des niveaux inférieur et supérieur de la carrière Bellegarde.

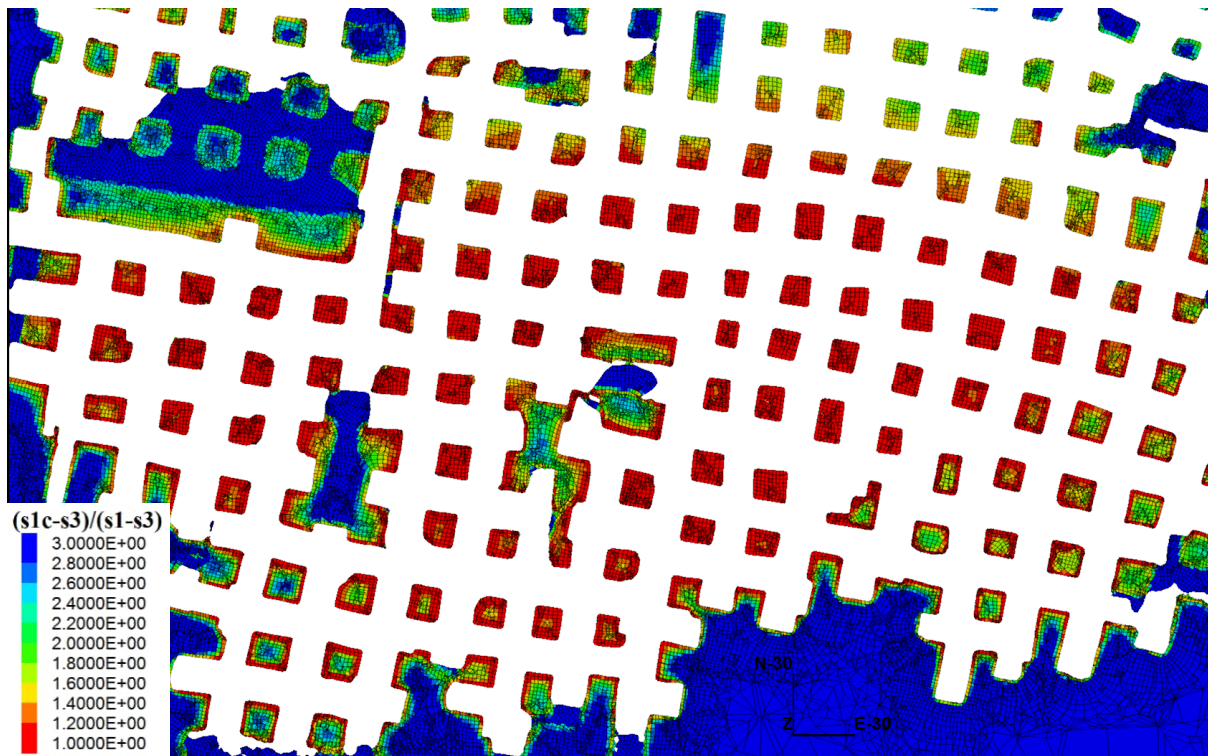


Figure 24 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers du niveau inférieur de la carrière Bellegarde.

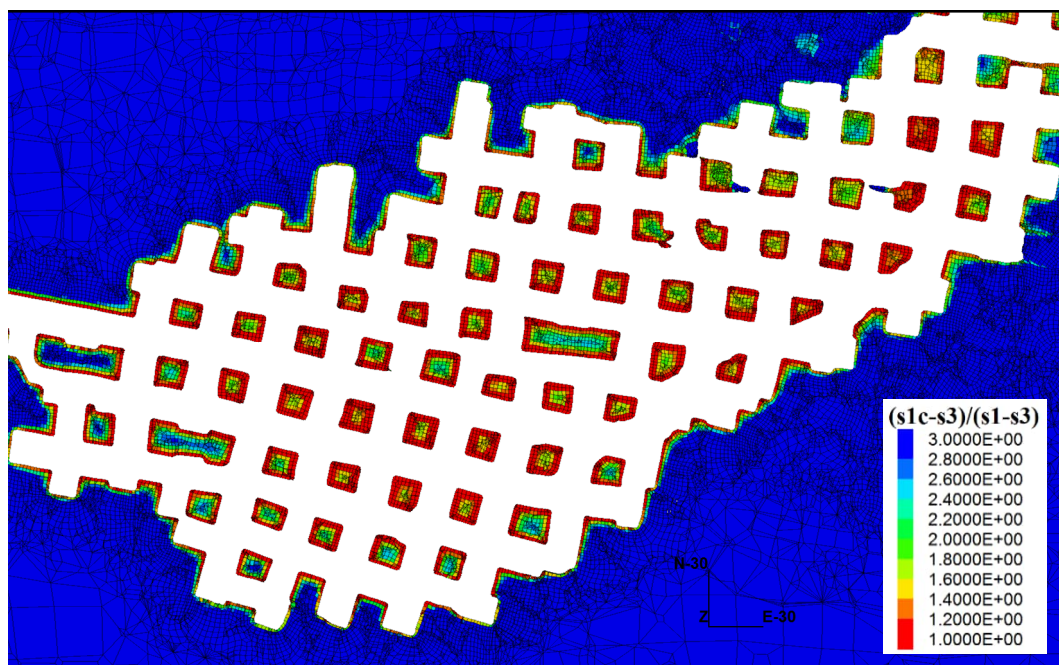


Figure 25 : Isovaleurs du facteur F dans les piliers du niveau supérieur de la carrière Bellegarde.

On remarque que les piliers du niveau supérieur (Figure 25) ont un facteur F bien plus élevé (en moyenne) que ceux du niveau inférieur. Au niveau supérieur, seule la peau des piliers est

plastifiée (c'est-à-dire que F est proche de 1) : le cœur des piliers est sain. En revanche, au niveau inférieur (Figure 24), l'analyse est plus difficile en raison de la variabilité de F . 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 les piliers a ensuite été réalisée.

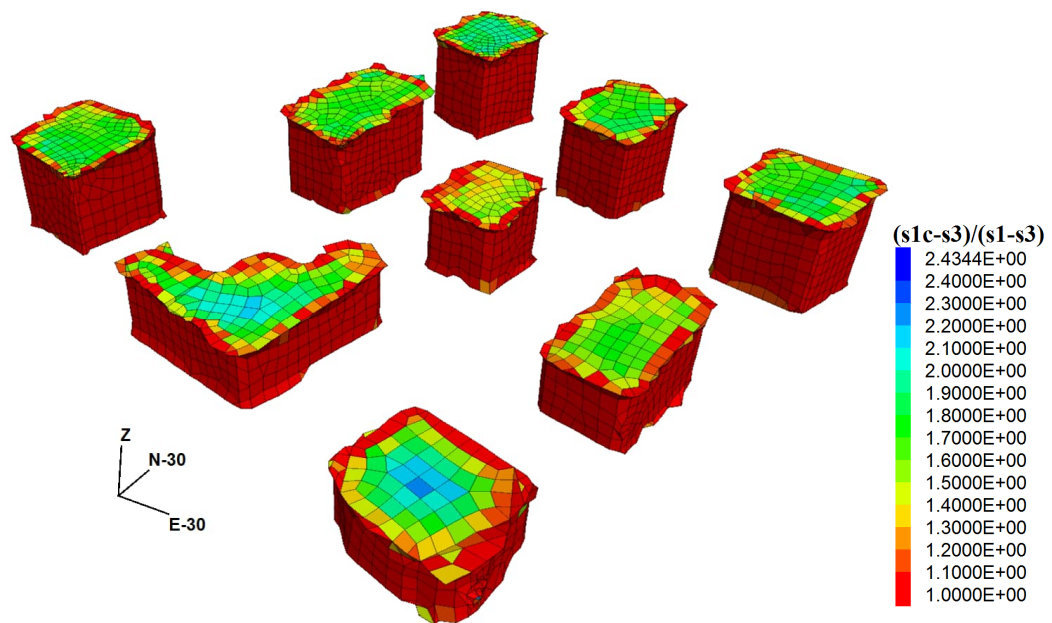


Figure 26 : Isovaleurs de la distance relative au critère de rupture en cisaillement (F) dans les piliers centrés sur le pilier n° 32 (Figure 6, Figure 8 et Figure 11).

Les valeurs moyennes du facteur F dans les 49 piliers de la zone effondrée, ont été reportées dans le premier des 3 tableaux de l'annexe 1 pour chaque R_c . Les piliers y sont classés par F décroissant (cas où $R_c = 1,0$ MPa). En plus des valeurs 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 pour les trois valeurs de R_c . On constate que quand $R_c = 1,9$ MPa, aucun pilier n'est rompu. Avec $R_c = 1,5$ MPa, seul le pilier n°32 donne des signes de défaillance. En revanche, avec $R_c = 1,0$ MPa, il y a 30 piliers pour lesquels plus de la moitié du pilier (en volume) possède des mailles avec $F < 1,1$ (ce qui pourrait être assimilé à une rupture du pilier).

A noter que de nombreux piliers à l'ouest de la zone effondrée présentent aussi des facteurs F faibles (proches de 1,0).

3.3.4 Comparaison du facteur F et du ratio R_p/σ_p

Les valeurs moyennes de F ont été reportées (Figure 27) sur les piliers idoines du modèle numérique 3D afin de pouvoir les comparer avec celles prédites par le modèle analytique décrit au §3.1 (Figure 8).

L'analyse comparative des Figure 8 et Figure 27 montre que l'augmentation graduelle de F centrée sur le pilier n° 32 prédite par la modélisation numérique ne se retrouve pas avec le modèle analytique. Ces deux approches ne sont pas calées de la même façon :

- le modèle analytique a été calé de façon à discriminer au mieux les 31 piliers effondrés des 9 piliers non effondrés (Figure 6) en cherchant la valeur de λ telle que R_p/σ_p soit le plus souvent inférieur à 1 pour les piliers effondrés et le plus souvent supérieur à 1 pour les piliers non effondrés ;
- le modèle numérique a été calé en diminuant progressivement la valeur de R_c du calcaire jusqu'à reproduire le mécanisme d'effondrement (tout en vérifiant que cette valeur de R_c est mécaniquement admissible).

Il est donc plus opportun de centrer-réduire le rapport $F / (R_p/\sigma_p) = X$. La variable aléatoire X représente le ratio numérique/analytique et aurait un écart-type quasi-nul si les 2 méthodes étaient équivalentes.

La variable centrée réduite² $x = \frac{X - \mu}{\sigma}$ permet d'évaluer les piliers présentant le plus gros écart relatif entre les 2 méthodes. Les 12 valeurs de X les plus élevées (celles dont la valeur absolue est supérieure à 1) sont synthétisées dans le Tableau 4 et correspondent aux piliers entourés de la Figure 8.

Tableau 4 : Rapport $F / (R_p / \sigma_p)$ centré réduit : comparaison des méthodes numériques et analytiques

pilier n°	$(X - \mu) / \sigma$
17	2,96
11	1,96
7	1,81
23	1,71
37	-1,56
16	1,56
24	-1,26
28	-1,13
27	-1,08
21	-1,06
39	1,00

Nous avons mentionné précédemment qu'en utilisant la méthode analytique, 15 piliers sur les 40 étudiés ne sont pas en adéquation avec le constat d'effondrement ($R_p / \sigma_p < 1$ pour les piliers effondrés et > 1 pour les piliers non effondrés). En s'intéressant au rapport X 12 piliers présentent un écart très significatif avec la répartition de F obtenu avec le modèle numérique.

Ce constat n'est pas étonnant dans la mesure où la méthode analytico-empirique ne prend pas en compte le comportement des piliers voisins. En effet, la relation empirique permettant d'évaluer la résistance du pilier ne prend en compte que les caractéristiques géométriques du pilier concerné (largeur w et hauteur h), tandis que la relation analytique utilisée pour estimer la sollicitation mécanique dans le pilier tient compte des piliers voisins via le taux de défruitement 2D. C'est-à-dire que seule la largeur de galerie (séparant le pilier concerné d'un autre pilier) est susceptible d'influencer le calcul de σ_p et donc de R_p / σ_p . Cette méthode ne prend pas en compte le fait qu'un pilier voisin peut avoir un élanement différent. Cela pourrait être amélioré en utilisant un taux de défruitement 3D au prix d'efforts conséquents pour évaluer les volumes défruités autour de chaque pilier. Cependant, même avec cette amélioration il subsisterait au moins 2 phénomènes non pris en compte avec cette méthode analytico-empirique :

- 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 trouve concentrée 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.

² μ désigne la moyenne de X et σ l'écart-type de X

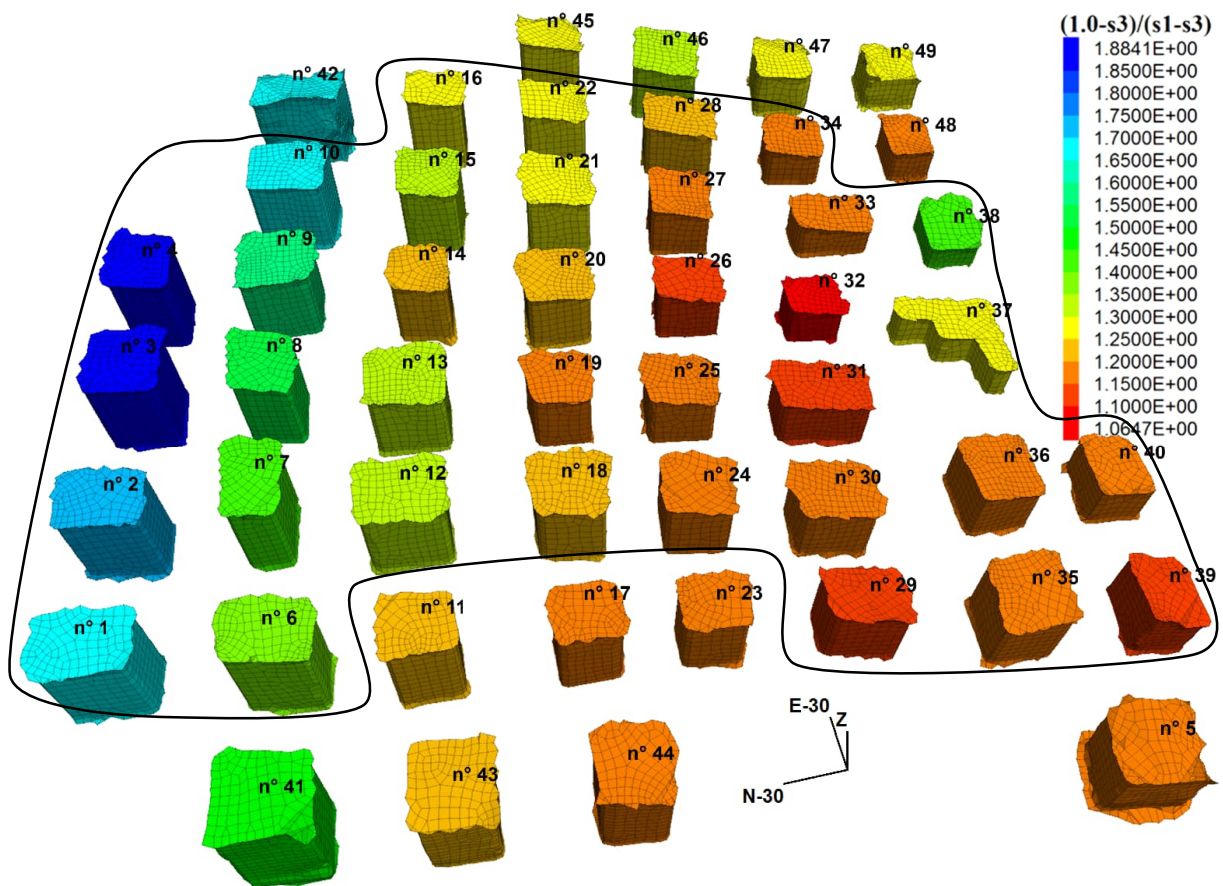


Figure 27 : Valeurs moyennes de F reportées sur les piliers idoines du modèle numérique 3D.

Dans ces conditions, il est aisé de comprendre que, 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.

D'autre part, afin d'illustrer la forte non-linéarité des phénomènes liés à la plasticité, les évolutions du nombre de piliers plastifiés (pilier dont plus de 50 % de son volume a un facteur F tel que $F < 1,1$) et du volume plastifié (des 49 piliers identifiés) en fonction de la résistance à la compression du calcaire ont été représentées sur la Figure 28. L'analyse de cette figure montre que les évolutions sont relativement linéaires tant que $R_c > 1,4$ MPa. Les évolutions deviennent fortement non-linéaires dès que $R_c < 1,2$ MPa. A partir de $R_c \leq 1,05$ MPa, le nombre de piliers considérés comme rompus devient compatible avec le mécanisme d'effondrement. Pour $R_c = 1,05$ et $1,0$ MPa, le pourcentage volumique de piliers rompus (sur les 49 identifiés) est respectivement de 35 % et 43 %. Ce taux est d'autant plus important qu'il englobe 18 piliers qui ne se sont pas effondrés. En effet, pour les 31 piliers effondrés, ce taux volumique devient respectivement 41 % et 50 %, ce qui permet de reproduire le mécanisme d'effondrement.

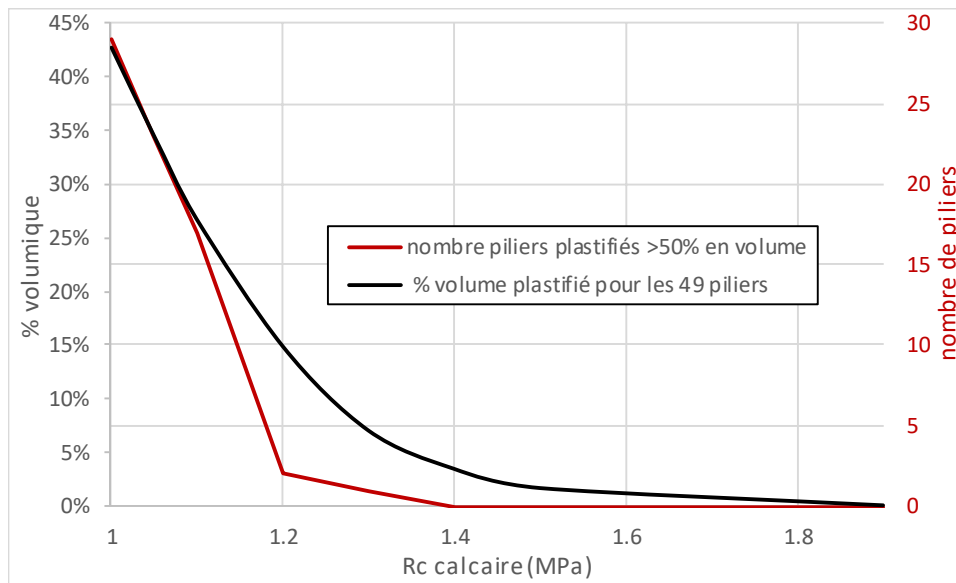


Figure 28 : Evolutions du nombre de piliers plastifiés et du volume plastifié (des 49 piliers identifiés) en fonction de la résistance à la compression du calcaire.

4 Conclusions

Cette étude a été menée pour estimer numériquement la résistance des piliers de la carrière qui pouvait être à l'origine de l'effondrement du 13/03/2021 de la carrière Bellegarde à Naujan-et-Postiac ainsi que l'effet de l'exploitation de son niveau inférieur.

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. Faute de cas similaire, nous avons retenu les 2 premières. Celles-ci nécessitent d'estimer ou de calculer la sollicitation mécanique, essentiellement dans les piliers, ainsi que la résistance des piliers. Dans ce rapport, nous avons comparé une solution analytique aux résultats de la modélisation numérique.

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. Néanmoins les capacités des stations de calcul actuelles permettent d'envisager de réaliser des calculs pour une carrière souterraine comptant jusqu'à 600 piliers ;
- la modélisation numérique permet de reproduire les mécanismes et l'extension de l'effondrement de la carrière en diminuant progressivement la résistance à la compression du calcaire jusqu'à une valeur de $R_c = 1$ MPa (compatible avec les essais en laboratoire et des effets d'échelle) ;
- le modèle numérique identifie des piliers rompus ailleurs que dans la zone effondrée mais 94 % de ces piliers ont la particularité d'être proche de piliers barrières ou de bords d'exploitation (qui ont un effet stabilisant). Ceci tend à montrer qu'un secteur de petits piliers éloignés de ces secteurs est une zone potentiellement plus dangereuse que d'autres si la hauteur de recouvrement engendre un chargement suffisant des piliers ;
- les zones de chutes de toit sont compatibles en extension (rapport BRGM 1973) et en position si le ratio inhabituellement faible de $R_c/R_t (=5,5)$ est introduit dans le modèle (une valeur classique de 12 plastifie l'intégralité des toits de la moitié sud de la carrière) ;
- le fait qu'en prenant la valeur $R_c = 1$ MPa (effet d'échelle = 47 %) dans le modèle, l'effondrement soit correctement reproduit montre qu'il n'est pas nécessaire de dégrader plus cette valeur de R_c . Le taux de défruitement élevé (jusqu'à 84 %) et la présence d'un secteur de petits piliers suffisamment profonds et éloignés des piliers barrières et des bords d'exploitation suffisent à expliquer cet effondrement.

Il est à noter que le modèle numérique montre que 18 piliers (plus à l'ouest) présentent les mêmes caractéristiques d'instabilité (taux volumique plastique élevé) que ceux de la zone effondrée. Lors de l'effondrement de mars 2021 ces piliers ne se sont pas effondrés, peut-être en raison de leur proximité avec un bord ferme ou un pilier barrière, mais le risque de leur effondrement futur ne peut être totalement exclu dans la mesure où la temporalité des processus conduisant à l'effondrement est inconnue. Rappelons que les signes d'instabilités étaient déjà mentionnés en 1973 dans le rapport BRGM. Pourtant il a fallu « attendre » à minima 50 ans pour que l'effondrement se produise. Etant donné que la géométrie n'a pas changé au moins depuis 1973, on peut se demander ce qui a pu déclencher cet effondrement en 2021. C'est donc là que la notion de facteur déclenchant prend tout son sens (Al Heib et al., 2023).

Une comparaison de deux approches a été également réalisée dans ce rapport :

- une approche analytique pour estimer la charge au sein des piliers et une approche empirique pour estimer la résistance des piliers ;
- une approche numérique (modèle continu en différences finies) pour prendre en compte la complexité de la géométrie de la carrière ainsi que de la topographie.

Cette comparaison montre que l'approche analytico-empirique ne permet pas de discriminer de façon suffisamment satisfaisante la rupture des piliers (37,5 % de diagnostic de rupture erroné). Cela est dû à la non prise en compte de l'influence des piliers barrières ou des bords d'exploitation. Cette approche permet toutefois d'identifier le pilier le plus faible du groupe et donc la « source » de l'effondrement.

En perspective de cette étude, il serait intéressant de :

- reprendre ces calculs en intégrant la variabilité des propriétés dans la carrière (mesures à réaliser) ;
- vérifier l'impact de facteurs aggravants (falaise et faille) et/ou de facteurs déclenchants (eau) sur la temporalité de l'occurrence de ces mouvements de terrain.

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. (2021) : Diagnostic de la moitié Est de la carrière de Bellegarde à la suite de l'effondrement généralisé du mois de mars 2021, EPRCF33, Rapport d'étude particulière n°24, décembre 2021.
- 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.
- Lecomte A & Pilch N. (2022) : Effondrement généralisé de Naujan-et-Postiac (33). Observations, données disponibles et premières réflexions. Note externe Ineris-212824-2769616-v1.0, 15 pp.
- 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.
- 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
- Thomaïdis C. (2021) : Procès-verbal de visite N°21/1, Commune de Naujan-et-Postiac, Effondrement de terrain au lieu-dit « Bellegarde », 18-03-2021, Direction Générale adjointe chargée des territoires, Direction des Infrastructures.

6 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Statistiques du facteur F dans les 49 piliers de la zone effondrée en fonction de Rc
- Annexe 2 : Logiciels utilisés pour une étude

ANNEXE 1 : Statistiques du facteur F dans les 49 piliers de la zone effondrée en fonction de R_c (MPa)

Valeurs moyennes

pilier n°	$R_c=1,9$	$R_c=1,5$	$R_c=1,4$	$R_c=1,3$	$R_c=1,2$	$R_c=1,1$	$R_c=1,05$	$R_c=1,0$
32	1,664	1,363	1,292	1,227	1,167	1,112	1,087	1,065
39	1,865	1,512	1,424	1,337	1,252	1,173	1,138	1,107
26	1,898	1,540	1,450	1,360	1,271	1,193	1,157	1,122
29	1,968	1,586	1,490	1,393	1,296	1,200	1,160	1,129
31	1,965	1,601	1,509	1,417	1,324	1,234	1,189	1,144
30	1,996	1,616	1,520	1,424	1,327	1,232	1,188	1,148
27	1,991	1,614	1,519	1,424	1,328	1,235	1,192	1,150
25	2,007	1,623	1,527	1,429	1,331	1,237	1,193	1,151
36	1,970	1,603	1,510	1,418	1,326	1,238	1,195	1,153
23	1,895	1,525	1,433	1,340	1,248	1,189	1,171	1,156
34	1,930	1,578	1,490	1,402	1,316	1,235	1,197	1,159
24	2,070	1,671	1,570	1,469	1,367	1,259	1,208	1,162
40	1,963	1,602	1,511	1,420	1,331	1,246	1,204	1,163
17	1,967	1,580	1,483	1,386	1,288	1,200	1,180	1,164
44	2,064	1,653	1,550	1,447	1,344	1,237	1,192	1,167
35	2,021	1,637	1,540	1,443	1,344	1,248	1,206	1,168
33	1,927	1,587	1,502	1,418	1,336	1,253	1,211	1,169
5	2,058	1,666	1,568	1,468	1,366	1,266	1,220	1,177
19	2,089	1,685	1,584	1,482	1,379	1,274	1,226	1,185
48	1,932	1,587	1,501	1,418	1,338	1,262	1,224	1,187
18	2,153	1,735	1,630	1,525	1,419	1,308	1,249	1,201
11	2,178	1,746	1,638	1,530	1,421	1,311	1,251	1,207
43	2,221	1,779	1,668	1,557	1,446	1,333	1,271	1,210
20	2,161	1,747	1,643	1,538	1,433	1,323	1,269	1,217
14	2,207	1,774	1,666	1,557	1,449	1,339	1,282	1,234
28	2,195	1,777	1,671	1,565	1,457	1,346	1,291	1,237
47	2,179	1,769	1,665	1,561	1,456	1,351	1,300	1,249
22	2,294	1,844	1,732	1,618	1,504	1,387	1,327	1,264
21	2,287	1,845	1,734	1,622	1,509	1,392	1,330	1,268
37	2,087	1,729	1,639	1,549	1,457	1,364	1,317	1,269
45	2,312	1,859	1,746	1,632	1,517	1,401	1,342	1,280
16	2,345	1,878	1,761	1,644	1,527	1,408	1,348	1,285
49	2,178	1,781	1,681	1,581	1,480	1,381	1,334	1,288
15	2,380	1,912	1,795	1,677	1,559	1,439	1,377	1,310
12	2,412	1,938	1,819	1,700	1,581	1,459	1,392	1,316
46	2,360	1,909	1,795	1,681	1,566	1,448	1,387	1,324
13	2,428	1,954	1,835	1,716	1,596	1,474	1,409	1,334
6	2,550	2,041	1,913	1,786	1,659	1,530	1,464	1,390
38	2,285	1,895	1,796	1,696	1,598	1,500	1,450	1,399
7	2,612	2,089	1,959	1,828	1,698	1,566	1,499	1,427
41	2,724	2,175	2,038	1,900	1,763	1,624	1,553	1,475

8	2,748	2,200	2,063	1,926	1,789	1,651	1,581	1,506
9	2,850	2,283	2,142	2,000	1,858	1,715	1,643	1,566
10	2,974	2,383	2,236	2,088	1,940	1,792	1,717	1,639
42	3,022	2,415	2,264	2,112	1,960	1,807	1,731	1,652
1	3,071	2,454	2,300	2,146	1,991	1,838	1,761	1,683
2	3,114	2,488	2,332	2,176	2,019	1,864	1,786	1,709
4	3,373	2,689	2,519	2,348	2,178	2,008	1,923	1,839
3	3,431	2,742	2,570	2,398	2,226	2,054	1,969	1,884

Proportion volumique où $F < 1,1$ (rupture)

pilier n°	Rc=1,9	Rc=1,5	Rc=1,4	Rc=1,3	Rc=1,2	Rc=1,1	Rc=1,05	Rc=1,0
32	1,2%	30,6%	41,6%	54,1%	62,4%	72,5%	77,3%	80,7%
39	0,4%	5,0%	14,9%	29,5%	48,8%	60,9%	67,1%	73,4%
26	0,2%	3,0%	9,8%	28,4%	48,8%	61,7%	67,8%	73,4%
29	0,1%	1,0%	2,8%	8,9%	37,4%	60,2%	67,7%	73,9%
31	0,4%	5,6%	12,8%	28,5%	43,7%	55,2%	61,7%	68,6%
30	0,0%	1,5%	4,2%	14,9%	38,7%	56,7%	64,8%	70,9%
27	0,2%	2,0%	5,4%	16,9%	36,0%	53,4%	58,8%	66,1%
25	0,1%	1,6%	2,9%	12,1%	38,5%	58,0%	65,1%	71,3%
36	0,3%	3,6%	10,3%	24,3%	43,4%	53,4%	60,1%	65,8%
23	0,0%	0,8%	2,2%	16,5%	56,8%	68,5%	73,9%	75,7%
34	0,3%	5,3%	17,5%	31,1%	41,6%	53,4%	57,3%	63,6%
24	0,1%	0,5%	1,1%	3,1%	21,5%	53,8%	61,9%	70,5%
40	0,4%	4,0%	10,5%	28,7%	39,7%	50,9%	55,3%	59,5%
17	0,0%	0,4%	1,1%	3,0%	39,9%	65,3%	70,9%	73,8%
44	0,0%	0,4%	0,8%	1,9%	13,1%	49,5%	61,9%	70,4%
35	0,2%	1,3%	3,1%	11,6%	37,1%	57,0%	63,1%	68,8%
33	0,5%	15,7%	26,4%	34,7%	40,6%	49,3%	53,9%	60,3%
5	0,3%	2,3%	5,8%	11,8%	25,6%	50,6%	60,2%	65,9%
19	0,0%	0,6%	1,2%	2,7%	17,6%	50,4%	62,4%	67,5%
48	0,8%	13,1%	24,5%	33,2%	40,5%	48,1%	52,1%	55,5%
18	0,0%	0,2%	0,8%	1,5%	6,7%	47,1%	59,3%	67,7%
11	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%	2,7%	32,3%	52,2%	64,0%
43	0,0%	0,1%	0,3%	0,7%	1,6%	14,5%	45,3%	62,4%
20	0,1%	0,6%	1,5%	3,3%	12,6%	43,2%	55,5%	63,4%
14	0,0%	0,2%	0,7%	1,2%	4,3%	32,4%	47,3%	59,4%
28	0,1%	0,7%	1,6%	4,0%	13,5%	34,9%	46,1%	56,4%
47	0,1%	1,0%	2,0%	5,4%	21,3%	36,5%	43,2%	49,1%
22	0,0%	0,1%	0,2%	0,7%	2,0%	11,8%	34,0%	51,2%
21	0,0%	0,3%	0,8%	1,4%	5,1%	22,3%	39,0%	52,8%
37	2,5%	17,0%	23,0%	30,7%	38,8%	46,3%	49,5%	54,1%
45	0,0%	0,2%	0,4%	0,8%	2,5%	10,3%	23,2%	42,8%
16	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%	1,2%	4,2%	16,0%	45,8%
49	0,2%	3,2%	7,0%	13,9%	25,2%	36,4%	41,2%	46,6%
15	0,0%	0,2%	0,4%	0,7%	1,7%	5,5%	18,3%	41,6%
12	0,0%	0,1%	0,4%	0,7%	1,2%	4,4%	15,0%	42,8%

46	0,0%	0,2%	0,5%	1,2%	3,5%	15,8%	29,8%	41,3%
13	0,0%	0,2%	0,3%	0,6%	1,5%	5,8%	17,8%	38,6%
6	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%	0,6%	1,4%	2,6%	8,0%
38	0,9%	11,1%	17,8%	23,5%	28,0%	33,4%	36,0%	38,9%
7	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,7%	1,4%	4,8%
41	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,8%	1,5%	4,9%
8	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,5%	1,0%	2,5%
9	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	0,4%	0,6%	1,2%	2,1%
10	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	0,6%	0,9%	1,5%
42	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,5%	0,7%	1,3%
1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%	0,6%
2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,5%
4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
3	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,3%

Proportion volumique où $F > 1,5$ (stable)

pilier n°	Rc=1,9	Rc=1,5	Rc=1,4	Rc=1,3	Rc=1,2	Rc=1,1	Rc=1,05	Rc=1,0
32	54,2%	28,1%	22,3%	18,7%	14,8%	8,5%	3,5%	1,1%
39	82,3%	37,5%	31,7%	26,0%	20,6%	13,6%	11,3%	7,4%
26	86,7%	37,6%	31,4%	26,1%	22,3%	16,7%	14,2%	11,1%
29	96,3%	39,8%	31,2%	25,8%	22,1%	16,8%	14,2%	11,9%
31	84,2%	45,3%	37,6%	32,1%	27,2%	22,0%	17,5%	13,2%
30	94,4%	41,7%	35,4%	29,1%	25,2%	20,3%	17,0%	14,0%
27	92,4%	46,8%	38,4%	29,9%	25,3%	20,1%	16,8%	12,7%
25	95,7%	41,4%	34,4%	29,0%	25,7%	20,0%	17,8%	14,8%
36	87,4%	46,5%	39,6%	31,8%	26,4%	20,9%	17,3%	13,6%
23	97,1%	31,0%	24,7%	20,5%	18,2%	14,9%	14,1%	13,3%
34	78,0%	45,2%	40,4%	32,7%	27,1%	21,8%	18,1%	14,0%
24	98,3%	47,4%	38,0%	29,1%	23,9%	20,3%	17,7%	14,5%
40	85,8%	48,4%	42,2%	36,2%	28,3%	21,4%	17,6%	12,7%
17	98,5%	32,6%	26,2%	21,4%	18,3%	15,7%	14,7%	13,8%
44	99,1%	51,5%	33,4%	23,6%	18,3%	15,2%	14,0%	13,2%
35	95,7%	42,5%	34,9%	30,2%	25,2%	20,8%	19,1%	15,3%
33	69,2%	49,3%	45,1%	38,6%	31,6%	25,0%	19,8%	11,6%
5	92,5%	49,6%	38,8%	33,0%	26,5%	21,7%	18,2%	15,1%
19	98,6%	48,0%	35,1%	28,7%	24,4%	20,3%	18,7%	16,4%
48	72,6%	50,9%	45,9%	39,6%	33,3%	25,6%	20,4%	15,3%
18	98,8%	53,9%	38,2%	30,7%	26,2%	22,5%	19,6%	17,3%
11	99,5%	68,7%	42,9%	29,8%	23,3%	18,4%	16,6%	15,1%
43	99,6%	87,4%	46,9%	30,2%	23,3%	18,8%	16,8%	15,5%
20	97,9%	56,3%	40,9%	34,9%	28,3%	24,4%	22,2%	19,0%
14	99,1%	69,9%	46,4%	34,9%	27,9%	21,8%	20,1%	17,2%
28	97,9%	64,7%	50,0%	38,2%	32,5%	26,5%	23,1%	21,0%
47	97,6%	61,5%	52,9%	45,2%	35,4%	28,9%	25,7%	22,3%
22	99,6%	88,9%	57,3%	39,2%	30,1%	24,4%	21,8%	19,4%
21	99,0%	77,9%	57,1%	41,9%	33,1%	27,4%	24,4%	21,3%

37	74,0%	54,6%	51,2%	46,2%	41,1%	33,3%	29,3%	25,4%
45	99,5%	88,8%	67,4%	46,6%	33,4%	27,0%	23,6%	21,2%
16	99,8%	95,1%	71,6%	44,1%	32,1%	23,8%	21,3%	19,6%
49	91,0%	62,0%	56,2%	49,7%	44,1%	36,4%	31,4%	28,7%
15	99,5%	93,9%	76,1%	48,3%	34,3%	27,3%	24,1%	21,4%
12	99,5%	95,1%	79,4%	49,4%	36,2%	27,5%	24,2%	21,4%
46	99,3%	83,6%	64,7%	52,4%	41,7%	32,4%	29,1%	25,4%
13	99,7%	93,8%	77,8%	52,9%	37,9%	29,3%	26,5%	22,3%
6	99,8%	98,3%	95,8%	75,2%	46,5%	31,2%	26,7%	23,3%
38	80,1%	65,7%	62,7%	58,5%	52,1%	43,4%	41,4%	37,0%
7	100,0%	99,0%	97,0%	86,0%	49,6%	34,8%	30,3%	25,0%
41	99,9%	99,0%	97,4%	90,0%	69,9%	45,7%	36,9%	30,4%
8	100,0%	99,3%	98,1%	94,5%	72,0%	43,7%	36,7%	30,4%
9	99,9%	99,2%	98,6%	96,3%	85,8%	53,8%	43,8%	36,6%
10	99,9%	99,3%	98,7%	97,1%	92,4%	67,8%	54,6%	42,9%
42	99,9%	99,4%	98,7%	97,4%	94,4%	79,5%	64,4%	52,1%
1	100,0%	99,7%	99,2%	98,4%	96,5%	83,1%	67,4%	50,7%
2	100,0%	99,8%	99,4%	99,0%	97,0%	90,4%	73,2%	53,4%
4	100,0%	100,0%	99,9%	99,8%	99,4%	98,2%	96,4%	89,2%
3	100,0%	99,9%	99,8%	99,5%	99,1%	97,6%	94,3%	85,5%

ANNEXE 2 : LOGICIELS UTILISES POUR UNE ETUDE

Direction opérationnelle : SIT Unité : RNOS
Référence étude / CGR : Ineris 212824

Logiciel	Version	Fichier de configuration	Données de sortie/Résultats
FLAC ^{3D} (64 bits)	v. 7.00.156	Fichiers .DAT et .SAV	Fichiers de résultats (compatibles 32 bits et 64 bits)
Rhino (64 bits)	v. 7.5	Fichiers .3DM, .STL, .DWG, .XYZ	Fichiers de modèle géométrique
Griddle	v. 2.00.13	Fichiers .3dm et .f3grid	Fichiers de maillage volumique

