

# Caractérisation des instabilités de blocs lors du creusement des puits de ventilation pour le projet TELT : une approche basée sur la méthode des éléments distincts

## Characterization of block instabilities during the excavation of ventilation shafts for the TELT project: an approach based on the discrete element method.

Etienne LAVOINE<sup>1\*</sup>, Lauriane BOUZERAN<sup>1</sup>, Hélène ROULET<sup>2</sup>

*1 ITASCA France, Lyon, France*

*2 VINCI Construction Grands Projets, Modane, France*

*\*e.lavoine@itasca.fr*

**RESUME :** Dans le cadre du projet TELT (Tunnel Lyon-Turin), LYTO (VINCI / Webuild / Masterdrilling) s'est vu confier la construction de quatre puits de ventilation de 500 mètres de profondeur à Avrieux. Lors du forage des deux premiers puits, des chutes de blocs et des instabilités ont été observées entre 350 et 400 mètres de profondeur, soulevant des inquiétudes quant aux interactions potentielles entre des puits rapprochés. Pour résoudre ce problème, LYTO a fait appel à ITASCA afin de développer un modèle numérique permettant de reproduire les instabilités observées et d'évaluer les risques. Les simulations ont été réalisées à l'aide de 3DEC, un logiciel à éléments distincts permettant de modéliser le comportement mécanique des massifs fracturés. La calibration du modèle a d'abord été effectuée sur un seul puits afin de reproduire les instabilités observées et d'identifier les mécanismes clés. Les résultats ont montré que certaines familles de fractures orientées près de l'axe nord-sud et légèrement inclinées par rapport à la contrainte principale jouent un rôle essentiel dans la formation de zones « déconfinées » permettant des mouvements de blocs. À la suite de cette calibration, un modèle global des quatre puits a été développé en simulant leur excavation séquentielle, reproduisant le phasage de construction et permettant la redistribution progressive des contraintes et de l'endommagement. Les résultats ont révélé que l'excavation d'un puits peut induire des redistributions de contraintes dans les puits voisins, avec des variations de contrainte déviatorique atteignant 1,5 MPa dans certaines zones, ce qui est suffisant pour déstabiliser les blocs proches de la rupture. La manière dont les différentes familles de fractures intersectent les puits, en fonction de leur espacement, de leur orientation et de leur position, a une forte influence sur la propagation et la forme des zones déconfinées. Cette variabilité spatiale explique la gamme d'instabilités observées sur le site.

**ABSTRACT:** As part of the TELT (Lyon-Turin Tunnel) project, LYTO (VINCI / Webuild / Masterdrilling) was awarded the contract to construct four ventilation shafts 500 meters deep in Avrieux. During the drilling of the first two shafts, rock falls and instabilities were observed at depths of between 350 and 400 meters, raising concerns about potential interactions between closely spaced shafts. To resolve this issue, LYTO called on ITASCA to develop a numerical model to reproduce the observed instabilities and be able to assess the risks. The simulations were performed using 3DEC, a discrete element software program that models the mechanical behavior of fractured rock masses. The model was first calibrated on a single well to reproduce the observed instabilities and identify the key mechanisms. The results showed that certain families of fractures oriented near the north-south axis and slightly inclined relative to the principal stress play an essential role in the formation of “deconfined” zones allowing block movements. Following this calibration, a global model of the four wells was developed by simulating their sequential excavation, reproducing the construction phasing and allowing for the gradual redistribution of stresses and damage. The results revealed that the excavation of a well can induce stress redistributions in neighboring wells, with deviatoric stress variations reaching 1.5 MPa in some areas, which is sufficient to destabilize blocks close to failure. The way in which different families of fractures intersect the wells, depending on their spacing, orientation, and position, has a strong influence on the propagation and shape of the deconfined zones. This spatial variability explains the range of instabilities observed at the site.

**Mots-clés :** fractures ; puits ; modélisation numérique ; instabilité ; bloc.

## 1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet TELT, LYTO (VINCI / Webuild / Masterdrilling) réalise actuellement les 4 puits de ventilation d'Avrieux, à proximité de Modane (France). Le projet consiste à creuser quatre puits de ventilation selon la technique du *raise-boring* (Pinchiaroglio, Brino et al. 2025). L'opération débute par le percement depuis la surface d'un trou pilote de 40 cm de diamètre qui débouche 500 m plus bas dans la chambre de pied de puits. La tête de forage est ensuite remplacée par un aléreur (roue de coupe de 5,2 m de diamètre), mis en rotation en remontant pour creuser le puits. Des travaux de soutènements (boulons / béton projeté) sont ensuite réalisés de haut en bas à l'intérieur des puits. La dernière étape consiste à la mise en place d'une étanchéité et d'un revêtement béton par coffrage glissant, du bas vers le haut du puits. En parallèle de ces travaux, le creusement du réseau de galeries du projet TELT se poursuit au pied des puits avec l'excavation d'une partie des voies des tunnels de base et la réalisation de cavernes. Les quatre puits se caractérisent par un diamètre d'excavation de 5,2 m sur 500 m de profondeur, avec une inter-distance minimale entre les axes des puits de 12,5m comme indiqué sur la Figure 1.

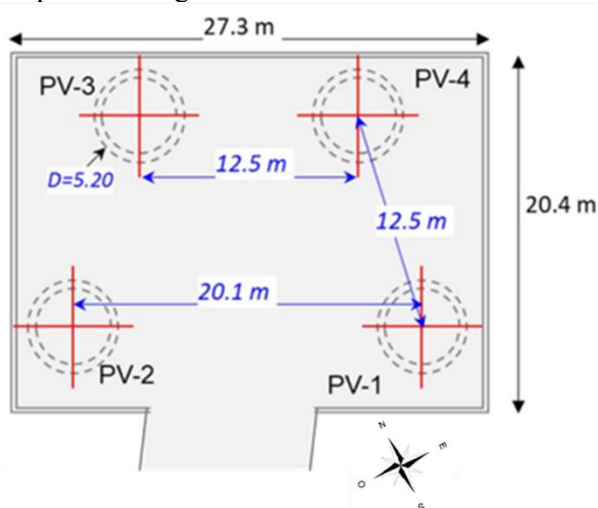


Figure 1 : Position relative des puits entre eux.

Lors de l'alésage des deux premiers puits (PV-1 et PV-2), des difficultés ont été rencontrées, liées à des chutes de blocs créant des cavités importantes. L'examen post-alésage a permis d'identifier les zones d'instabilités en parement à 350-400 m de profondeur. Tous les puits étant très proches, ces instabilités et les cavités associées posent des questions quant au démarrage des autres alésages. Le groupement LYTO a donc missionné ITASCA pour réaliser un modèle 3D de type discret permettant, dans un premier temps, de

reproduire les instabilités observées, puis de qualifier les risques liés à l'interaction entre puits.

Les simulations ont été réalisées à l'aide de *3DEC* (Itasca Consulting Group 2024), un logiciel à éléments distincts permettant de modéliser le comportement mécanique des massifs fracturés. La calibration des propriétés mécaniques et de joints a d'abord été effectuée sur un modèle à un puits afin de reproduire les instabilités observées et d'identifier les mécanismes clés. Un modèle global des quatre puits a ensuite été développé en simulant leur excavation séquentielle, reproduisant le phasage de construction et permettant la redistribution progressive des contraintes et de l'endommagement.

## 2 HYPOTHESES DE MODELISATION

La simulation d'excavation des puits est réalisée avec le code éléments distincts *3DEC*. Ce logiciel permet de simuler la réponse de milieux discontinus, notamment tels que les massifs fracturés ou les structures en maçonnerie soumis à un chargement statique ou dynamique. Les blocs individuels peuvent être traités comme rigides ou déformables, et leur comportement est régi par diverses lois constitutives. L'interaction entre les blocs est contrôlée par des relations forces / déplacements. De grands déplacements entre les blocs le long des discontinuités, ainsi que la rotation des blocs, peuvent être pris en compte.

### 2.1 Propriétés mécaniques et fracturation

Dans cette étude, l'essentiel des mouvements du massif est supposé se produire dans les fractures en raison du déconfinement induit par l'excavation des puits : par simplification, aucune plasticité n'est donc prise en compte dans la matrice rocheuse. La modélisation se focalise sur le comportement d'une couche de micaschistes du socle de Vanoise « dégradée », dite « SV2 », lithologie ayant montré le plus d'instabilité lors de l'excavation des puits. Les propriétés élastiques de la matrice rocheuse sont résumées ci-dessous :

Module d'Young :	$E=10 \text{ GPa}$
Module de Poisson :	$\nu=0.3$
Densité :	$\rho=2500 \text{ kg/m}^3$

LYTO dispose d'une série de données concernant les fractures constatées en paroi des puits qui ont servi à la mise en place d'un modèle numérique pertinent. Il s'agit des familles de fractures principales et de leurs

orientations obtenues avec un relevé par drone. Six familles de discontinuités ont été identifiées et caractérisées pour l'unité SV2, en incluant la schistosité : S0/S1 (schistosité subhorizontale), F1 (subverticale orientée nord-sud), F3 (nord/ouest-sud/est pendant vers le nord-est), F4 (est-ouest pendant vers le nord) et F5 (subverticale orientée nord-sud). Dans la suite de l'article, l'orientation d'une fracture est définie par l'azimut du vecteur pendage (*dip-direction*) et l'angle de pendage (*dip*).

## 2.2 Etat de contraintes initiales

La Figure 2 montre les contraintes entre les côtes 920 et 960 NGF utilisées dans le modèle numérique. Ces valeurs ont été extrapolées à partir des mesures faites entre les cotes 681 et 781 NGF sur le sondage F17 à proximité de l'emplacement des puits. En termes d'orientations, la contrainte principale correspond à la contrainte horizontale majeure ( $\sigma_1 = \sigma_H$ ), la contrainte verticale correspond à la contrainte intermédiaire ( $\sigma_2 = \sigma_v$ ), et la contrainte horizontale  $\sigma_h$  représente la contrainte mineure ( $\sigma_3 = \sigma_h$ ).

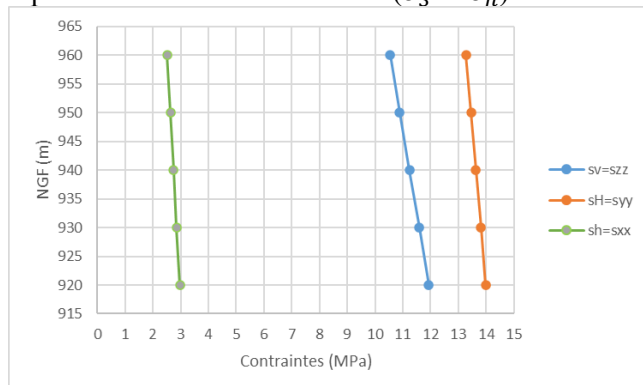


Figure 2 : Evolution des contraintes avec la profondeur (axe Y = axe Nord-Sud dans le modèle)

## 2.3 Phasage

Dans les deux modèles présentés ici, l'excavation de chaque puits est réalisée en diminuant progressivement la pression appliquée en paroi d'excavation sur l'intégralité de la longueur du puits, permettant de tenir compte du déconfinement progressif du massif lié à l'avancée du front d'excavation. A chaque nouveau pas de déconfinement, le calcul itératif va provoquer la redistribution des contraintes due au retrait d'une partie de la roche dans le reste du milieu, permettant de tenir compte de l'évolution progressive de l'endommagement.

Le phasage est donc le suivant :

- Initialisation des propriétés et des contraintes dans le modèle ;
- Mise en l'équilibre du modèle (état initial) ;

- Excavation d'un puits et mise à l'équilibre du modèle.

## 3 MODELE A UN PUIT : CALIBRATION DES PROPRIETES DE JOINTS

Un premier modèle ne contenant qu'un seul puits a été réalisé afin de calibrer les propriétés des joints. L'extension du modèle, ainsi que l'état de la fracturation initiale avant excavation, sont choisies de façon à garder des temps de calcul compatibles avec les délais impartis à la réalisation de l'étude, tout en limitant l'influence des effets de bords sur les résultats du modèle numérique. La géométrie finale du modèle est la suivante (Figure 3) :

- 50 x 50 m dans le plan horizontal ;
- 20 m d'extension verticale : le modèle reproduit donc la présence d'une zone homogène fracturée de 20 m de haut, entre deux couches de meilleure qualité.

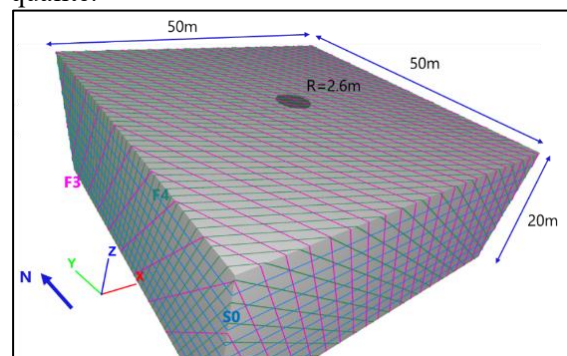


Figure 3 : Géométrie du modèle à un puits.

Théoriquement, il serait possible de modéliser la chute des blocs le long des puits dans 3DEC, mais ces grands déplacements induiraient des temps de calculs considérables. Un algorithme a donc été développé pour identifier les blocs « instables » dans le modèle dès la fin de l'excavation de manière itérative. Il est appliqué en deux étapes se répétant jusqu'à la stabilisation des parois, afin de reproduire « l'effet domino » observé sur site :

- Détection des blocs instables à la fin de l'excavation ;
- Suppression de ces blocs et mise à l'équilibre du modèle. Cette mise à l'équilibre et la redistribution de contraintes associées peut provoquer l'apparition de nouveaux blocs instables ;

Une étude de sensibilité a été menée (près de 80 simulations ont été nécessaires) en faisant varier le nombre de familles de fractures incluses dans le modèle, les paramètres d'orientation et de résistance de chaque famille de fractures, de manière à calibrer ces paramètres afin de reproduire les instabilités

observées sur le terrain en termes de géométrie et de profondeur. En effet, la profondeur et la direction des zones d'instabilité autour du puits sont le résultat d'une interaction complexe entre les différentes familles de fractures – dans certains cas un pendage plus élevé peut favoriser les instabilités, dans d'autres les limiter. Afin de favoriser le mouvement des blocs dans la zone « déconfinée », il est nécessaire de considérer un pendage de 90° pour les familles F3/F5 afin d'éviter les « effets de voûte » : en effet, comme les blocs rocheux sont modélisés comme élastiques, ils doivent être libres de se déplacer vers l'intérieur du puits.

La Figure 4 montre les déplacements sur les fractures et les blocs instables identifiés dans le modèle en appliquant l'algorithme décrit précédemment, pour une série de modèles faisant varier l'orientation et l'espacement entre fractures de la famille F4, ainsi que l'angle de friction considéré pour la famille F5, les deux familles identifiées comme critiques pour reproduire la géométrie des instabilités observées sur site. On peut observer que :

- Le cas A0 produit des instabilités de 2 à 3m, proche des valeurs cibles ;
- Augmenter l'azimut du pendage de la famille F4 de 20° (cas A1) impacte légèrement la forme des instabilités mais n'a pas d'impact majeur sur leur profondeur ;
- Augmenter l'espacement des fractures de la famille F4 (de 1 m à 2m, cas A2) tend à réduire significativement la profondeur des instabilités (< 1m) ;
- Augmenter l'angle de frottement des fractures de la famille F5 de 10 à 20° (cas A3) réduit également significativement la profondeur des instabilités (1 à 2 m).

Déplacement des fractures

Blocs instables

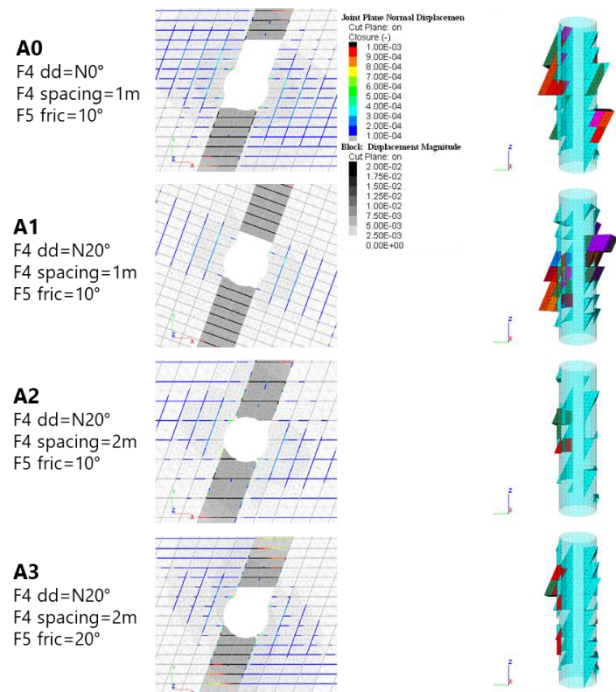


Figure 4 : Etude paramétrique du modèle à un puits (dd=azimut du pendage, spacing = espacement, fric=friction).

La calibration issue du modèle à 1 puits a permis d'identifier les familles de fractures F4, F5 et S0/S1 comme critiques et de définir un jeu de paramètres final pour ces familles pour le modèle à 4 puits (Tableau 1 et Tableau 2).

Tableau 1 : Propriétés géométriques des fractures issues de la calibration du modèle à 1 puits

Famille	Orientations azimut / pendage	Espacement
F5	N110° / 90°	2 m
F4	N0° / 65°	1 m
S0/S1	N0° / 0°	2 m

Tableau 2 : Propriétés mécaniques des fractures issues de la calibration du modèle à 1 puits

Famille	Raideur normale / tangentielle [GPa/m]	Angle de frottement [°]	Cohésion [kPa]
F5	10.7 / 7.7	10	0
F4	10.7 / 7.7	30	0
S0/S1	10.7 / 7.7	30	0

#### 4 MODELE A QUATRE PUITES : ANALYSE DES INTERACTIONS MECANIQUES

Cette section détaille les hypothèses de modélisation et les résultats du modèle d'excavation séquentielle à 4 puits. Le but de ce modèle est de comprendre et quantifier les interactions mécaniques entre puits ayant lieu lors de leur excavation. La séquence d'excavation est la suivante : PV1, PV2, PV4, PV3.

Afin de conserver une distance raisonnable entre les puits et les limites du modèle permettant de limiter les effets de bords, l'extension latérale du modèle à quatre puits est élevée à 80 mètres (Figure 5). Le domaine défini est un parallélépipède dont les bords sont perpendiculaires aux directions des contraintes principales. La taille de maille ciblée est de 0,5m à proximité des puits contre 1m au loin, afin de bénéficier d'une meilleure résolution des valeurs de contraintes dans la zone d'intérêt. Le modèle est alors constitué de 36 478 blocs et 2 267 128 zones.

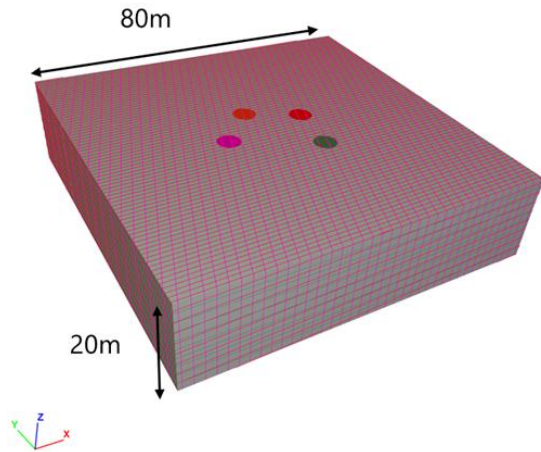


Figure 5 : Géométrie du modèle à quatre puits.

La Figure 6 montre la redistribution des contraintes principales majeure et mineure après excavation des quatre puits. Pour comparaison, et pour montrer l'impact de l'orientation des fractures sur la redistribution des contraintes autour des puits, celles-ci sont également montrées pour un cas sans fractures (masse rocheuse élastique).

La présence de fractures tend à créer un couloir de déconfinement très allongé entre les puits PV2 et PV3 selon une largeur de l'ordre de deux diamètres de puits, étant donné l'alignement de l'axe reliant ces deux puits avec la famille de fracture F5. En effet, la contrainte principale majeure est réduite dans cette zone en raison de la présence des puits et de la famille de fractures F5. La contrainte majeure se concentre ainsi sur les bords Est et Ouest de cette zone déconfinée. Un phénomène similaire est observé sur l'axe reliant les puits PV1 et PV4.

Concernant la contrainte mineure, dont la direction in-situ est est-ouest, on observe une interaction globale

entre tous les puits qui tend à produire une zone déconfinée au centre des 4 puits où la contrainte principale mineure est fortement diminuée. Par rapport au modèle élastique, on observe que c'est bien la présence des fractures qui favorise la présence de cette zone déconfinée entre les quatre puits.

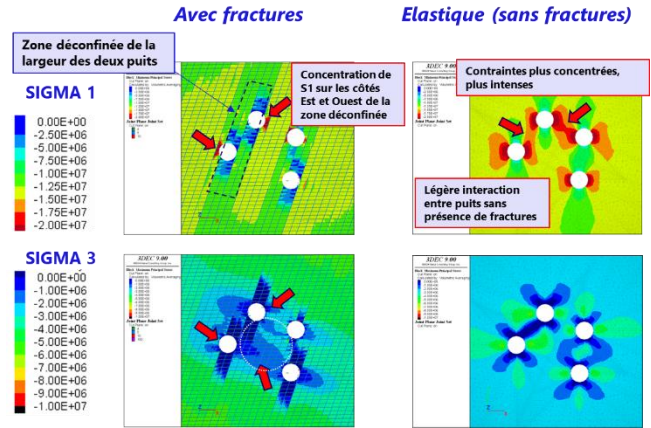


Figure 6 : Contours des contraintes principales majeure  $\sigma_1$  et mineure  $\sigma_3$  pour les cas avec fractures et sans fracture (vue en plan au centre du modèle).

Cette interaction mécanique est également visible en termes de déplacements. La Figure 7 montre la magnitude des déplacements de la masse rocheuse et des joints, avant et après excavation du puits PV3. On constate que l'excavation du puits PV3 augmente fortement l'extension de la zone où les déplacements sont supérieurs à l'échelle du centimètre autour du puits PV2. On constate également une évolution minimale des déplacements autour des autres puits.

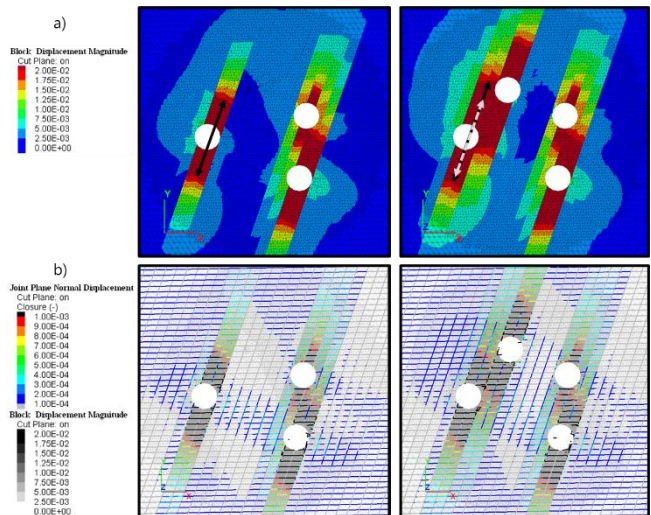


Figure 7 : a) Contour des déplacements dans la matrice avant (gauche) et après excavation du puits PV3 (droite). b) Contour des déplacements normaux dans les joints avant (gauche) et après (droite) excavation du puits PV3.

Afin de quantifier les interactions mécaniques et l'impact de l'excavation d'un puits sur les autres, les

contraintes principales majeure et mineure sont mesurées au centre de chaque puits à chaque étape du phasage (Figure 8 et Figure 9). Chaque graphique représente l'état de contrainte le long de l'axe central d'un puits, à différentes étapes du phasage : il suffit donc de comparer les différentes courbes dans un même graphique pour identifier et quantifier l'impact de l'excavation d'un puits sur un autre.

Le puits PV1 étant le premier excavé, le graphique correspondant ne contient donc qu'une seule courbe caractérisant l'état de contrainte à l'équilibre, puisque une fois excavé il n'est plus possible de mesurer une contrainte en son centre. On rappelle ici que la convention utilisée est celle des contraintes compressives négatives. On observe ainsi que la contrainte principale majeure  $\sigma_1$  au niveau de l'emplacement de PV2 est très faiblement augmentée par l'excavation de PV1, tandis que la contrainte mineure est plus sensiblement diminuée.

De même, la contrainte  $\sigma_1$  au niveau de l'emplacement de PV4 est diminuée de manière significative par l'excavation de PV1, ce qui n'est pas le cas de la contrainte principale mineure. Enfin, au niveau de l'emplacement de PV3, les excavations de PV2 et PV4 ont tendance à augmenter la contrainte principale majeure (en particulier lors de l'excavation de PV2) et à diminuer la contrainte mineure (en particulier lors de l'excavation de PV4).

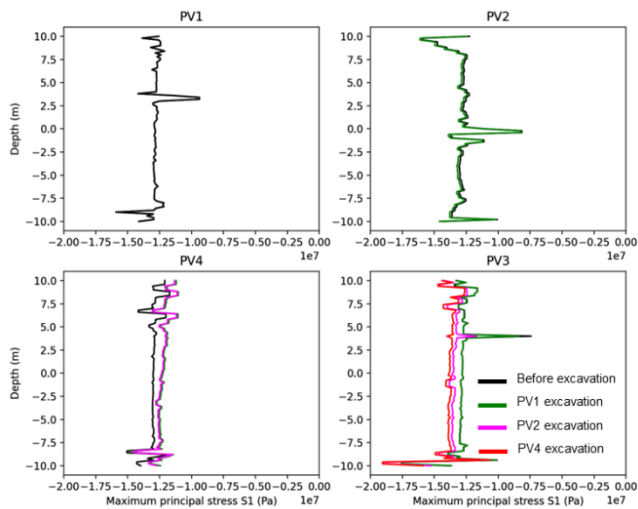


Figure 8 : Profils verticaux de la contrainte principale majeure  $\sigma_1$  au centre de chaque puits après excavation de chacun d'entre eux.

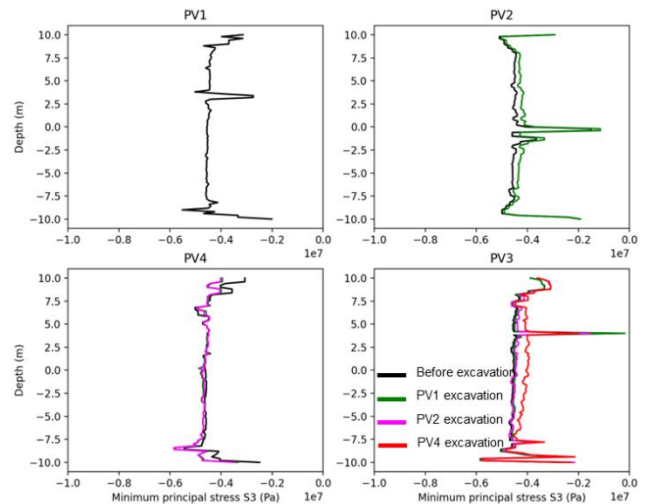


Figure 9 : Profils verticaux de la contrainte principale majeure  $\sigma_3$  au centre de chaque puits après excavation de chacun d'entre eux.

Les valeurs moyennes de contraintes principales  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  au centre de chaque puits à chaque étape du phasage sont synthétisées dans les Tableau 3 et Tableau 4. De manière générale, on constate que les interactions mécaniques se font principalement entre les puits PV1/PV4 et PV2/PV3. En effet, la contrainte  $\sigma_1$  a été réduite de 0,7 MPa au niveau de PV4 (après excavation de PV1). De plus, le déviateur de contraintes au niveau des puits PV2 et PV3 a subi une augmentation de l'ordre de 1,5 MPa dont une diminution de la contrainte  $\sigma_3$  de 0,5 MPa. L'excavation de chaque puits a donc tendance à changer les conditions de contraintes environnantes, pouvant potentiellement favoriser le déconfinement et l'instabilité des puits suivants.

Tableau 3 : Contrainte principale majeure  $\sigma_1$  moyenne, en MPa, au centre de l'emplacement de chaque puits (avant que le puits soit excavé) après chaque étape du phasage.

	Equilibre	Après PV1	Après PV2	Après PV4
PV1	-12,9	Puits excavé	Puits excavé	Puits excavé
PV2	-12,9	-13,0	Puits excavé	Puits excavé
PV3	-12,9	-12,9	-13,5	-13,8
PV4	-12,9	-12,2	-12,2	Puits excavé

Tableau 4 : Contrainte principale majeure  $\sigma_3$  moyenne en MPa au centre de l'emplacement de chaque puits (avant que le puits soit excavé) après chaque étape du phasage.

	Equilibre	Après PV1	Après PV2	Après PV4
PV1	-4,5	Puits excavé	Puits excavé	Puits excavé
PV2	-4,5	-4,2	Puits excavé	Puits excavé
PV3	-4,5	-4,5	-4,5	-4,0
PV4	-4,5	-4,5	-4,5	Puits excavé

Cependant, il est important de noter que pour un même jeu de paramètres géométriques donnés (espacement, azimuth, pendage, persistance), il est possible de générer une infinité de configurations différentes de réseaux de fractures en faisant varier la position des fractures dans l'espace (chaque configuration est alors appelée « réalisation »). La manière dont les familles s'intersectent entre elles, et intersectent chaque puits, va donc varier d'une réalisation à l'autre. La Figure 10 montre les redistributions de contraintes pour deux réalisations supplémentaires pour lesquelles la famille de fracture F5 a été traduite respectivement de 0,5m et 1m à l'Est. Il peut être observé que :

- Le nombre de fractures intersectant les puits dépend de la réalisation et ce nombre varie entre deux et trois (l'espacement entre fractures de la famille F5 étant de 2 m). La réalisation 2 (F5 à +0.5m) montre par exemple seulement deux puits intersectés par trois fractures, contre trois puits intersectés par trois fractures pour d'autres réalisations.
- L'amplitude des interactions mécaniques entre puits dépend du nombre de fractures les intersectant. De manière générale, plus un puits est intersecté par un nombre important de fractures, plus les redistributions de contraintes associées à son excavation sont grandes (notamment la zone déconfinée), et plus cette excavation est susceptible d'influencer mécaniquement les autres puits.

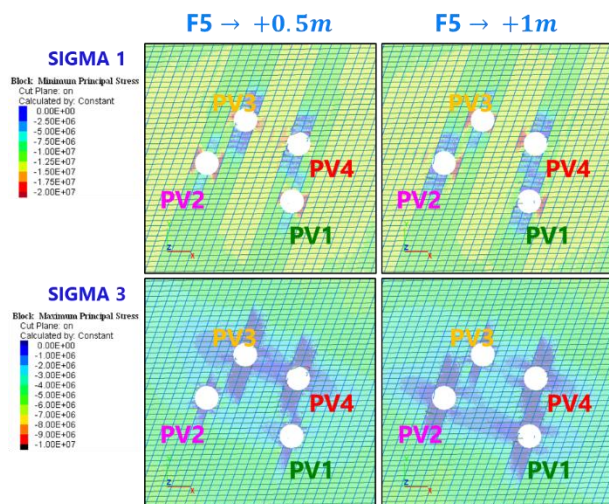


Figure 10 : Contours des contraintes principale majeure  $\sigma_1$  et mineure  $\sigma_3$  mesurée au centre de chaque puits après chaque étape du phasage pour les deux réalisations supplémentaires étudiées.

## 5 CONCLUSION

Sur le terrain, la masse rocheuse se caractérise par des discontinuités finies, souvent incurvées ou ondulées, et

par une matrice élasto-plastique dont les propriétés varient spatialement à différentes échelles ; l'endommagement est susceptible d'affecter à la fois la matrice et les discontinuités, le glissement le long de ces dernières impliquant vraisemblablement la rupture de ponts rocheux peu résistants, avec une possible influence de l'eau sur la dégradation des conditions de discontinuités avec le temps. Enfin, les contraintes, varient localement en fonction du comportement couplé de la matrice et des fractures.

Les modèles numériques ont été conçus ici comme une représentation simplifiée des conditions de site, afin d'identifier et de mieux comprendre les facteurs clés à l'origine des instabilités observées et d'éclairer les travaux restant à réaliser au moment de sa mise en œuvre. Il repose ainsi sur des hypothèses simplificatrices et conservatrices, visant à représenter un scénario « moyen » d'instabilité correspondant à une profondeur d'endommagement de l'ordre de 1,5 à 2,5 m, cohérente avec la profondeur moyenne des cavités observées sur les premiers puits. La matrice est modélisée homogène et purement élastique ; les discontinuités sont planes et entièrement persistantes, à cohésion nulle et à angle de frottement constant, capables néanmoins de s'ouvrir ou de cisailer de manière irréversible lorsque leur résistance est atteinte. La variabilité spatiale du modèle est ainsi uniquement liée à l'intersection tridimensionnelle des familles de fractures au droit du puits, dans la tranche modélisée de 20 m et encadrée par des niveaux de roche intacte. Ces choix conduisent à la formation de blocs élastiques anguleux indéformables, facilement stabilisés par des effets de voûte géométriques, ce qui a nécessité d'augmenter artificiellement le pendage de certaines fractures pour favoriser leur déplacement vers les puits. A l'échelle du modèle, la variabilité de l'endommagement le long du puits reste limitée par rapport à la réalité, et l'absence de plasticité de la matrice ainsi que des effets de l'eau et du temps a conduit à considérer des propriétés de joints faibles au regard de valeurs réalistes attendues.

Les mécanismes principaux à l'origine des instabilités observées ont pu être simulés à l'aide du logiciel 3DEC, à la suite d'une calibration des propriétés des fractures sur un modèle à un puits.

Ces modèles numériques ont permis d'identifier les mécanismes principaux à l'origine des instabilités observées, et notamment de :

- Identifier les structures dominant les interactions mécaniques entre puits, notamment les couloirs de déconfinement selon la famille de fractures F5.
- Quantifier les interactions mécaniques entre puits lors de leurs excavations successives. On enregistre en effet des variations du déviateur de contrainte de

l'ordre de  $\sim 1,5$ MPa au sein de certains puits, l'excavation de chaque puits ayant tendance à favoriser le déconfinement autour des autres puits. Cette variation du déviateur bien que modérée peut être suffisante pour qu'un bloc proche de l'instabilité, en paroi de puits, devienne instable ; nécessitant de prendre en compte l'interaction possible entre puits lors des phases travaux à venir.

- Analyser la variabilité des résultats en effectuant plusieurs réalisations (pour un même jeu de paramètres de famille de fractures). Les modèles numériques montrent que la façon dont chaque famille intersecte les puits a un impact significatif sur l'extension des couloirs de déconfinement générés, pouvant influencer de manière significative l'amplitude des interactions mécaniques entre puits.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des intervenants du projet, et en particulier Morgane Sifre et Nanni Bianchi pour leurs apports sur l'analyse géologique et structurale ainsi que les échanges et retours tout au long de la réalisation de cette étude.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Itasca Consulting Group, I. (2024). 3DEC - Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 9.0.

Pinchiaroglio, L., et al. (2025). Drilling parameter analysis in deep and large diameter shaft excavation: The Avrieux ventilation shafts case. Tunnelling into a Sustainable Future—Methods and Technologies, CRC Press: 1132-1139.