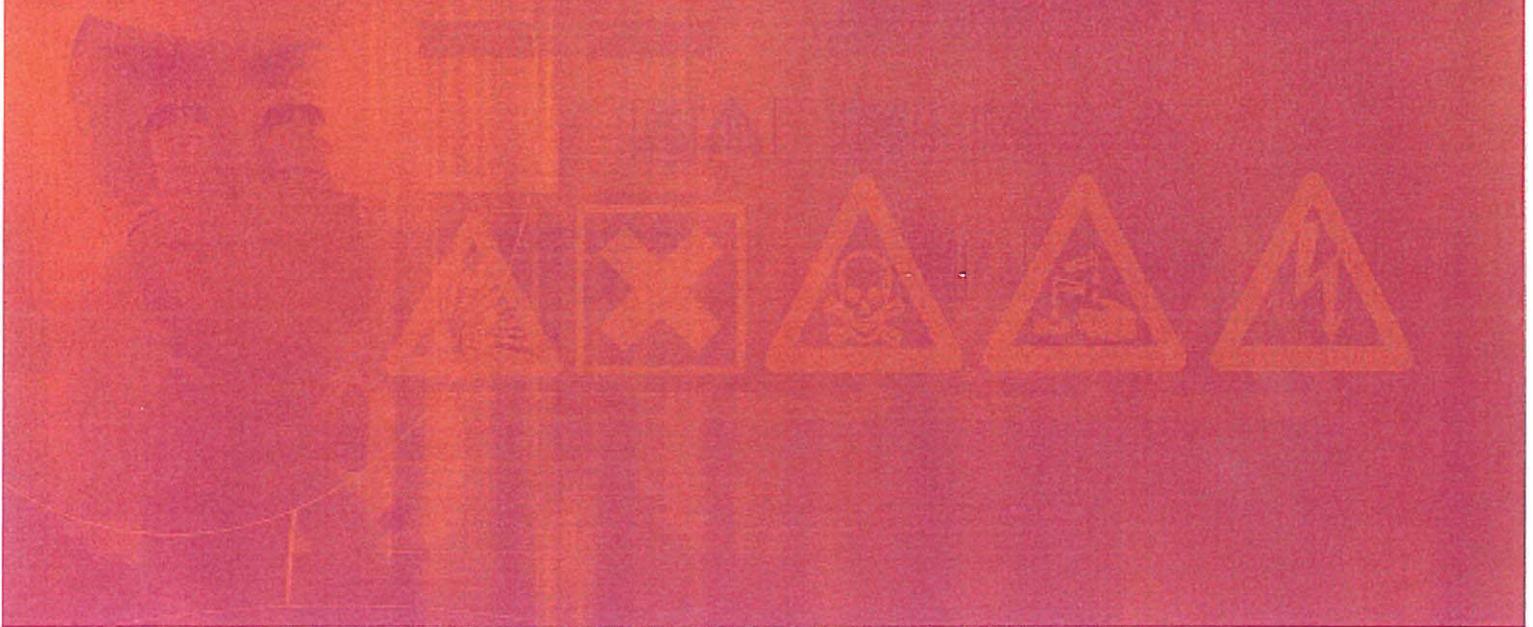


## ANNEXE 2 : ETUDE DE STABILITE DE L'INERIS





RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-13-134365-04401A

11/12/2013

**Carrière de Voutré (Mayenne)**  
**Analyse de la stabilité de plusieurs fronts de la  
carrière de Voutré.**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



## **Carrière de Voutré (Mayenne)**

**Analyse de la stabilité de plusieurs fronts de la carrière de Voutré.**

**SOCIÉTÉ DES CARRIÈRES DE VOUTRÉ**

## PREAMBULE

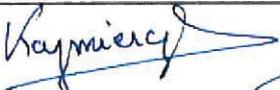
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Jean-Bernard KAZMIERCZAK	Jean-Claude PINTE	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Responsable de l'unité Risques Naturels, Ouvrages et Stockages de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Géotechnicien sénior et Délégué aux prestations à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>2. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>7</b>
2.1 Zone du « glacis de pierre violette ».....	7
2.2 Zone ouest .....	8
<b>3. RESULTATS DE L'ETUDE .....</b>	<b>11</b>
3.1 Etude de la zone du « glacis de pierre violette ».....	11
3.1.1 Zone d'étude.....	11
3.1.2 Paramètres géomécaniques du glacis de pierre violette .....	13
3.1.3 Approche analytique du risque de flambement.....	14
3.1.4 Approche aux éléments finis.....	15
3.1.5 Recommandations spécifiques à la zone de décalage du front.....	24
3.1.6 Enseignements tirés de l'incident du 2 octobre 2013.....	25
3.1.7 Conclusion concernant la stabilité du banc de pierre violette .....	25
3.2 Etude de la zone ouest.....	26
3.2.1 Zones d'étude .....	26
3.2.2 Zone ouest - Tuffites.....	27
3.2.3 Zone ouest - lahar.....	29
3.2.4 Synthèse sur les zones ouest tuffites et lahar .....	31
<b>4. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>33</b>

### Figures

Figure 1 – Photographie aérienne de la carrière de Voutré (© Google-Earth 2012)5	
Figure 2 – Photographies illustratives des zones du front nord.....	8
Figure 3 – Coupe géologique des bancs du front nord.....	9
Figure 4 : Scan 3D de la carrière (Face Nord).....	11
Figure 5 : <i>Scan 3D de la zone du Glacis Pierre Violette et localisation des plans de coupe .....</i>	<i>11</i>
Figure 6 : <i>Domaine d'étude (à gauche, le Lahar (en vert), au centre le banc de pierre violette, à droite - Les brèches (en bleu) .....</i>	<i>15</i>
Figure 7 : <i>Déformée amplifiée de la dalle pour l'excavation à 216 NGF.....</i>	<i>17</i>
Figure 8 : <i>Représentation des liaisons rotules dans la dalle de pierre violette .....</i>	<i>19</i>

Figure 9 : Estimation de la déformée du banc de pierre violette pour les différentes cotes d'excavation.....	23
Figure 10 : Déformée amplifiée de la dalle rotulée + positionnement des profils d'extensométrie.....	23
Figure 11 – Zone de décalage de banc dans le front nord .....	24
Figure 12 – Lahar zones ouest (rouge) et est (vert) .....	26
Figure 13 – Position des profils P1 et P2 .....	27
Figure 14 – Tracé des profils P1 et P2 .....	27
Figure 15 – Photographies du front au droit du profil P1 .....	28
Figure 16 – Photographies du front au droit du profil P2 .....	28
Figure 17 – Base du profil P2 vue du sud-ouest.....	29
Figure 18 – Position des profils types de la zone « lahar » est.....	29
Figure 19 – Tracé des profils P3 et P4 .....	30
Figure 20 – Photographies de la zone du « lahar » est.....	30
Figure 21 – Limite ouest de la zone du « lahar » est.....	31

## Tableaux

Tableau 1 : Propriétés mécaniques court et long termes pour le banc de pierre violette.....	14
Tableau 2 : Différentes cotes de creusement considérées dans le calcul aux éléments finis .....	16
Tableau 3 : Illustrations des points plastiques de rupture en traction pour les différentes cotes de creusement .....	18
Tableau 4 : Déformation amplifiée de la dalle de pierre violette aux différents niveaux d'excavation .....	21

## 1. INTRODUCTION

La société des Carrières de Voutré exploite à Voutré (53) un complexe volcanique (Formation des Pyroclastites de Voutré) sur une longueur de près de 3 km ; seule la partie est, de 1,5 km environ, est encore en exploitation. Le gisement exploité est penté vers le sud à environ 45°.

Aujourd'hui, la partie est de l'exploitation s'arrête sur une couche de tuffites et cinérites appelée « pierre violette » laissant un glacis de plus de 100 m de longueur. Antérieurement, l'exploitation a pénétré cette couche et s'est arrêtée dans le banc dit « lahar » soit en y installant des banquettes, soit en suivant le pendage. Le front nord de l'exploitation présente donc 3 faciès différents ayant chacun ses particularités sur le plan stabilité.

L'exploitant envisage de poursuivre l'exploitation par la création de 3 nouveaux fronts qui abaisseraient donc le niveau du carreau inférieur de 60 mètres ce qui l'amènerait à la cote +125 NGF. C'est pour ce projet que la Société des Carrières de Voutré a sollicité l'assistance de l'INERIS pour en examiner la stabilité.



Figure 1 – Photographie aérienne de la carrière de Voutré (© Google-Earth 2012)

Outre la visite du site, les documents mis à disposition, comprennent une coupe géologique sommaire, une coupe de l'approfondissement envisagé et le fichier DWG du relevé des fronts de 2012. Un scan 3D a également été transmis. Il a été complété par plusieurs sections.



## **2. DÉMARCHE DE L'ÉTUDE**

La réalisation de la prestation est scindée en 2 parties correspondant, géométriquement :

- au front nord dans la zone du « glacis de pierre violette » ;
- au front nord dans la zone dite « lahar » ;

Chaque zone fait l'objet d'une approche spécifique qui en fixe les objectifs et les limites en fonction des informations disponibles et propose l'acquisition d'informations particulières ou leur transmission si elles existent par ailleurs.

Les fronts sud et est, dont la géométrie est plus courante pourraient faire l'objet d'un examen ultérieur.

Durant l'étude, un incident s'est produit dans la zone du glacis de pierre violette, au droit de la banquette +225 m NGF. Cet incident a fait l'objet d'une note spécifique sous la référence INERIS-DRS-13-134365-11760A transmise fin novembre 2013 à l'exploitant. Les enseignements tirés de cet incident ont été intégrés à ce rapport.

### **2.1 ZONE DU « GLACIS DE PIERRE VIOLETTE »**

L'objet principal de cette zone est la stabilité du banc sur lequel l'exploitation est arrêtée (Figure 2). Il s'agit de vérifier la stabilité de ce banc en fonction de sa géométrie, notamment au flambement. Pour cela, outre la topographie de la partie supérieure de la couche, son épaisseur, sa fracturation et ses caractéristiques mécaniques sont nécessaires.

Il n'existait a priori pas de nappe au sein des couches situées sous cette formation mais les reconnaissances ont révélé de l'eau dans les sondages. Son effet a donc été intégré à l'étude.

L'examen de la stabilité de cette zone a été réalisé en deux phases :

- 1<sup>ère</sup> phase – examen de la stabilité (par une approche analytique) de la couche sur la base de caractéristiques mécaniques estimées via l'expérience propre de l'INERIS et une recherche bibliographique sur des roches similaires ;
- 2<sup>ème</sup> phase – l'analyse de stabilité de la phase 1 donnant des résultats proches de l'équilibre, il a été nécessaire de réaliser des essais de mécanique des roches pour mesurer les caractéristiques réelles de la couche ; pour cela, l'INERIS a donné les indications nécessaires pour réaliser les essais. Une fois les résultats obtenus, une évaluation plus fine de la stabilité a pu être réalisée.

Une visite préalable a eu lieu le 7 mars 2013 afin de disposer d'une vision précise de la situation et de l'état de la roche.

## 2.2 ZONE OUEST

Cette zone du front nord présente des faciès différents en fonction des couches que l'exploitation a mises à nu. On observe soit des couches au pendage, soit des fronts ; dans les deux cas, la visite sur le site a montré des zones instables, soit par glissement de reliquats d'exploitation sur les interfaces, soit par des fronts paraissant en aval pendage. Un exemple des observations est donné à la Figure 2 ci-après.



Figure 2 – Photographies illustratives des zones du front nord

Pour ces deux zones, l'hétérogénéité des fronts est telle, qu'une visite complémentaire a été nécessaire pour visualiser les fronts, tenter un zonage pour le traitement des parties est et ouest et proposer une ou plusieurs solutions de mise en sécurité des fronts mais aussi de l'exploitation future.

Les opérations se sont déroulées de la manière suivante :

- examen du scan 3D, comparaison avec les photographies, évaluation des traitements potentiels ;

- visite du site et examen détaillé de la partie ouest du front nord, formalisation du zonage, réunion de discussion avec l'exploitant pour présenter et valider les traitements par zone en fonction des contraintes locales et d'exploitation.

Le présent rapport synthétise les informations et discussions qui ont permis d'aboutir aux solutions qui sont présentées. Ces solutions prennent en compte les données complémentaires acquises, sur les formations concernées, par Christian SINELLE décrites dans le rapport Ségée d'août 2013 intitulé « Carrières de Voutré – Relevé partiel des fronts nord de la carrière de la Massoterie – Partie centrale » et dont une illustration est donnée ci-dessous.

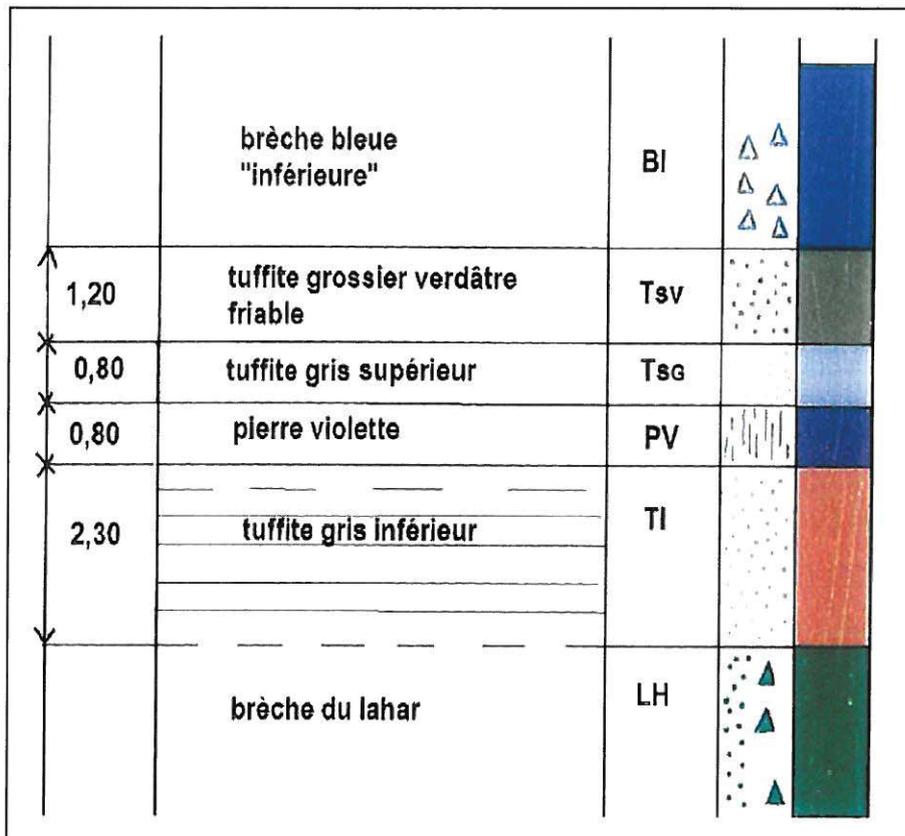


Figure 3 – Coupe géologique des bancs du front nord



### 3. RESULTATS DE L'ETUDE

#### 3.1 ÉTUDE DE LA ZONE DU « GLACIS DE PIERRE VIOLETTE »

##### 3.1.1 ZONE D'ÉTUDE

Le glacis de Pierre Violette a été utilisé comme banc d'arrêt de l'exploitation de Brèches et Ignimbrites dans le secteur est de la face nord de l'exploitation. Ce glacis est localisé dans la zone délimitée en rouge sur la Figure 4.

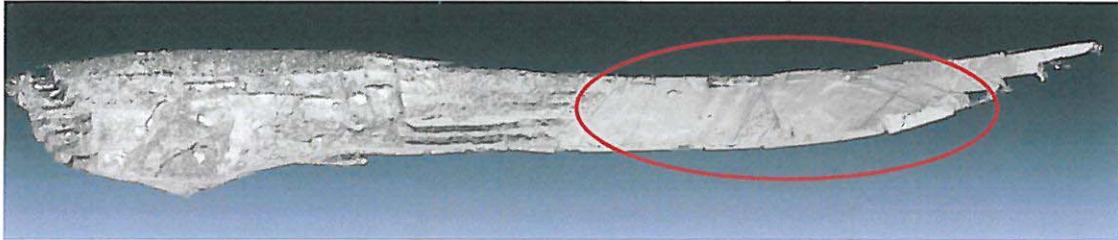


Figure 4 : Scan 3D de la carrière (Face Nord)

Trois sections d'étude ont été considérées pour évaluer la stabilité du glacis. Il s'agit de Pe1, Pe2 et Pe3 (Figure 5). Les trois secteurs concernés par ces sections sont visibles sur les photos 1 à 3.

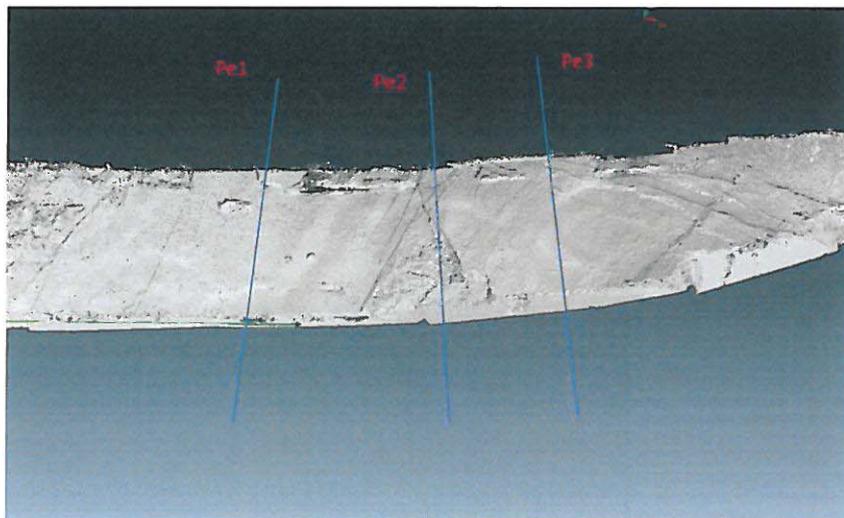


Figure 5 : Scan 3D de la zone du Glacis Pierre Violette et localisation des plans de coupe



Photo 1 : *Vue de la zone contenant le plan de coupe Pe1*



Photo 2 : *Vue de la zone contenant le plan de coupe Pe2*



Photo 3 : vue éloignée de la zone contenant les plans de coupe Pe2 et Pe3

### 3.1.2 PARAMÈTRES GÉOMÉCANIQUES DU GLACIS DE PIERRE VIOLETTE

#### Informations relatives aux prélèvements et aux forages destructifs

10 prélèvements de roche ont été réalisés à l'aide d'un brise-roches le 28 mars 2013, en complément du creusement de 5 forages destructifs.

Le détail de ces deux opérations figure en annexe A. Les prélèvements ont donné lieu à des essais de laboratoire (AnteaGroup – Orléans) dont les résultats sont détaillés en annexe B et synthétisés ci-après.

Il faut retenir de ces opérations de reconnaissance les éléments importants suivants :

- La présence d'eau au fond (vers 7 à 8 m) des forages destructifs au moment du percement puis un remplissage partiel ou total des forages par l'eau sur 4 à 7 m (inclinaison à 45 °), soit une charge d'eau d'au moins 4 m à la cote 216 NGF.
- A deux mètres de profondeur dans 4 des 5 forages, la présence d'une zone de fracturation qui pourrait être le marqueur de l'interface entre les deux bancs considérés (2+3 m) de pierre violette.
- La réaction instantanée de faïençage du banc supérieur (sur une centaine de mètres carrés) lors de l'attaque par le brise-roches, très probablement révélateur de contraintes de traction sur la partie extérieure du banc.

## Résultats des essais de laboratoire

Les différents essais de laboratoire (Voir annexe B), qui ont été menés sur les prélèvements, révèlent deux familles de résultats en fonction de la zone de prélèvements. Leur analyse permet de retenir les paramètres géomécaniques suivants pour le glacis de pierre violette :

	A court terme	A long terme
Module de Young (GPa)	20	20
Angle de frottement $\phi$ (°)	35	35
Cohésion C (MPa)	20	8
Résistance à la traction $R_{tb}$ (MPa) <sup>1</sup>	11	4,4

*Tableau 1 : Propriétés mécaniques court et long termes pour le banc de pierre violette*

La cohésion a été calculée selon la formule :  $C = R_c \cdot (1 - \sin \phi) / (2 \cos \phi)$ .

Les deux chapitres suivants illustrent les résultats de l'évaluation de la stabilité du banc de pierre violette selon deux approches complémentaires : une approche analytique basée sur une formulation type résistance des matériaux (RDM) et, une approche aux éléments finis permettant de tenir compte de la complexité du site et d'un comportement plus réaliste des matériaux en jeu.

### 3.1.3 APPROCHE ANALYTIQUE DU RISQUE DE FLAMBEMENT

Cette approche préliminaire a été réalisée dans l'attente des résultats des essais de laboratoire. Elle a permis de préparer les calculs aux éléments finis et ne présente à ce stade plus d'intérêt à figurer dans le corps du texte. Elle a été renvoyée en Annexe C.

---

<sup>1</sup> Toutefois, compte tenu du comportement des échantillons lors de la découpe des cylindres en laboratoire et du fait que la dalle est très fortement fissurée à l'échelle du glacis, nous avons choisi de retenir une résistance à la traction de calcul de 1 MPa, plus représentative du comportement en grand de la dalle.

### 3.1.4 APPROCHE AUX ÉLÉMENTS FINIS

L'approche aux éléments finis autorise une analyse plus fine du problème, ce qui permet de mettre en lumière les mécanismes importants impliqués dans la stabilité du banc de pierre violette. Cette approche concerne les zones représentatives des plans de coupe Pe1 et Pe3 uniquement, hors zone de décalage des bancs (Figure 5).

Les calculs sont réalisés avec le logiciel PLAXIS 2010.01 de la société Plaxis BV.

Les hypothèses principales retenues pour ce calcul sont les suivantes :

- 3 géomatériaux sont modélisés : le Lahar ( $E = 15 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,2$  - Vert) – La Pierre Violette (Voir Tableau 1) – Les Brèches ( $E = 20 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,2$  - Bleu)
- Le Banc de Pierre Violette est constitué de deux couches de 3 m et 2 m avec une interface faiblement adhérente ;

Les comportements géomécaniques des matériaux sont tous élastiques sauf le banc de pierre violette dont les propriétés figurent dans le Tableau 1. Elles sont considérées à long terme.

#### Domaine d'étude et phasage du creusement

Le domaine d'étude permettant d'évaluer la stabilité du banc de pierre violette est représenté sur la Figure 6. On y distingue à gauche le Lahar - en vert, au centre le banc de pierre violette et à droite, les brèches - en bleu.

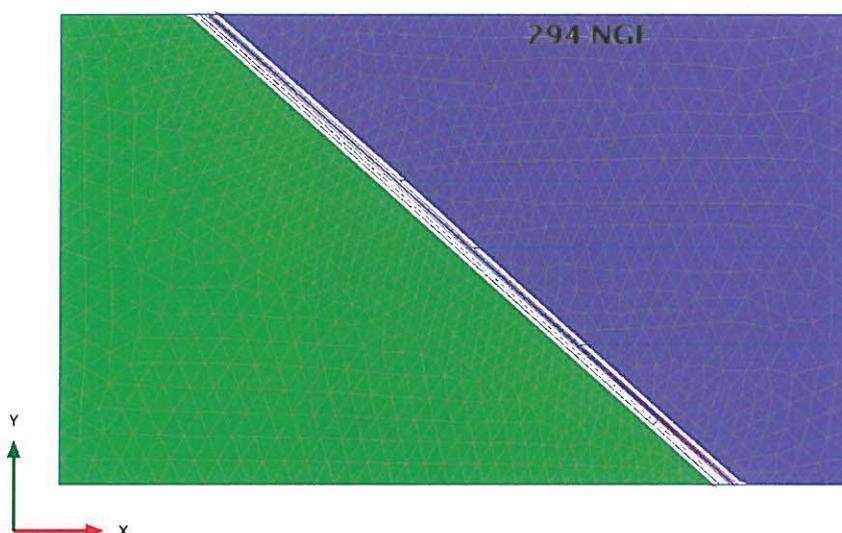


Figure 6 : *Domaine d'étude (à gauche, le Lahar (en vert), au centre le banc de pierre violette, à droite - Les brèches (en bleu)*

Le phasage du calcul est décrit dans le tableau ci-après. Il représente les différentes cotes de l'exploitation des brèches, à savoir : 216, 185, 140, 125 NGF. Il est à noter qu'une charge d'eau a été modélisée à partir de la cote 212 NGF à l'arrière de la dalle de pierre violette.

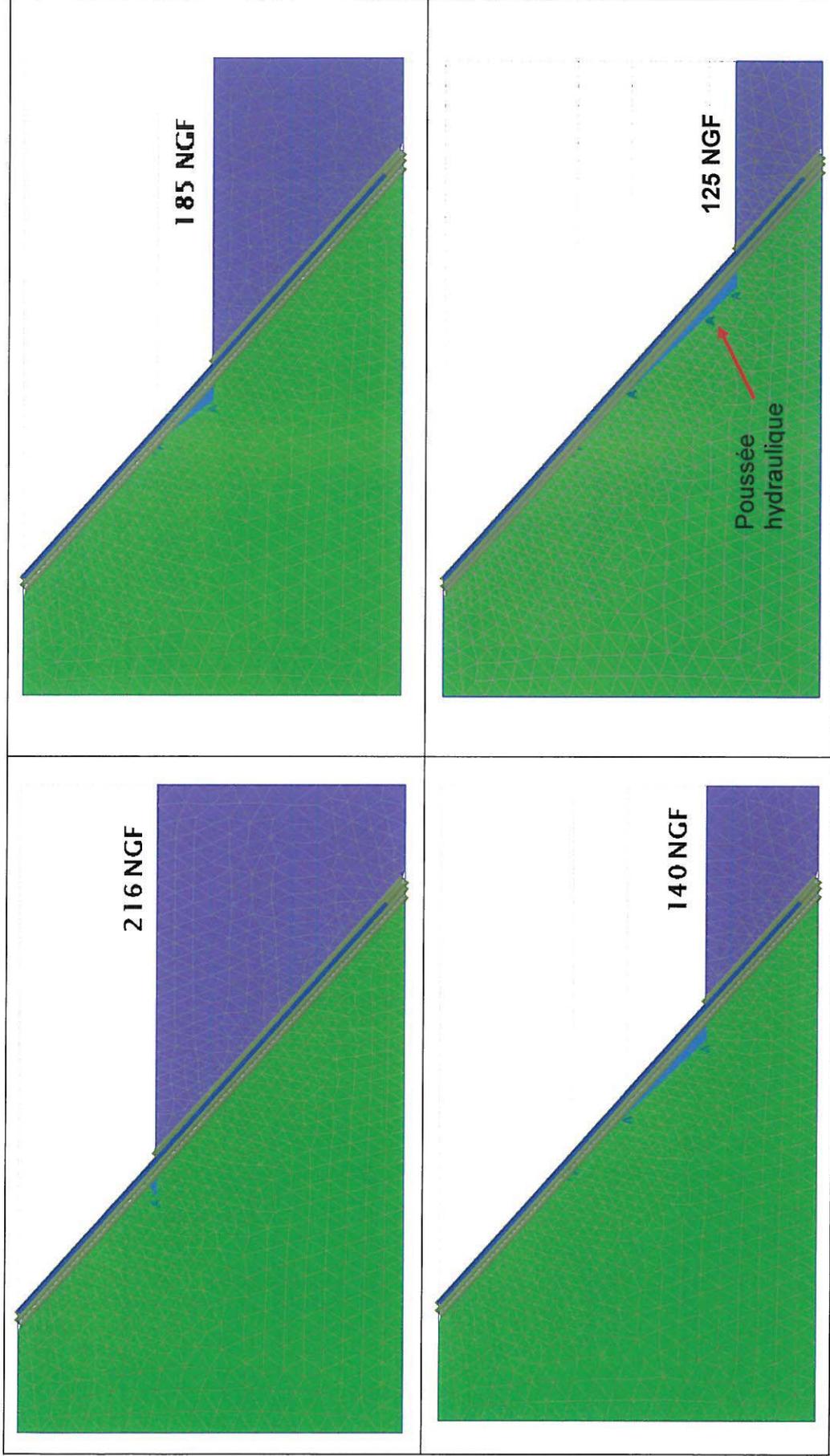


Tableau 2 : Différentes cotes de creusement considérées dans le calcul aux éléments finis

## Résultats des calculs aux éléments finis

Le Tableau 3 représente les zones de plastification dans le banc de pierre violette pour les différentes cotes de creusement.

Dès la cote d'excavation 216 NGF (actuelle), on commence à voir apparaître des zones de rupture en traction (carrés blancs) en pied du banc de pierre violette. Cette zone de rupture en traction est cohérente avec la déformée calculée de la dalle (Figure 7), égale à environ 3 cm maximum pour cette phase d'excavation.

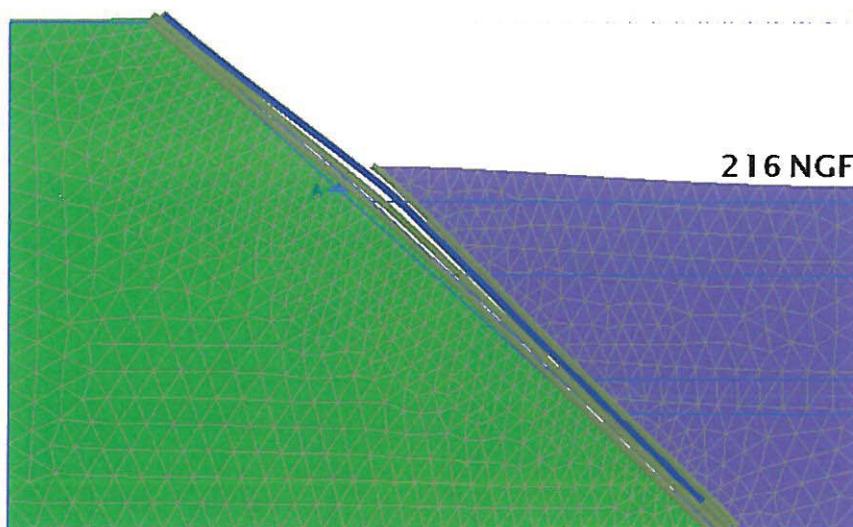


Figure 7 : Déformée amplifiée de la dalle pour l'excavation à 216 NGF

Pour les cotes suivantes d'excavation, une zone de rupture en traction plus marquée apparaît dans le banc de pierre violette sur plusieurs mètres sous la cote d'excavation.

Ces zones de rupture en traction peuvent représenter physiquement plusieurs phénomènes :

- Une libération de contraintes sur la partie concernée du banc, induisant une redistribution des efforts en périphérie de cette zone de rupture. Compte tenu du caractère résistant mais fragile de ce matériau, cette libération de contraintes pourrait s'accompagner d'un déplacement centimétrique à pluricentimétrique ;
- Une fissuration/fracturation superficielle (profondeur centimétrique) sur une étendue pouvant atteindre quelques mètres carrés autour de la zone plastifiée. Cette zone peut devenir le siège de chute de blocs ou de plaques.

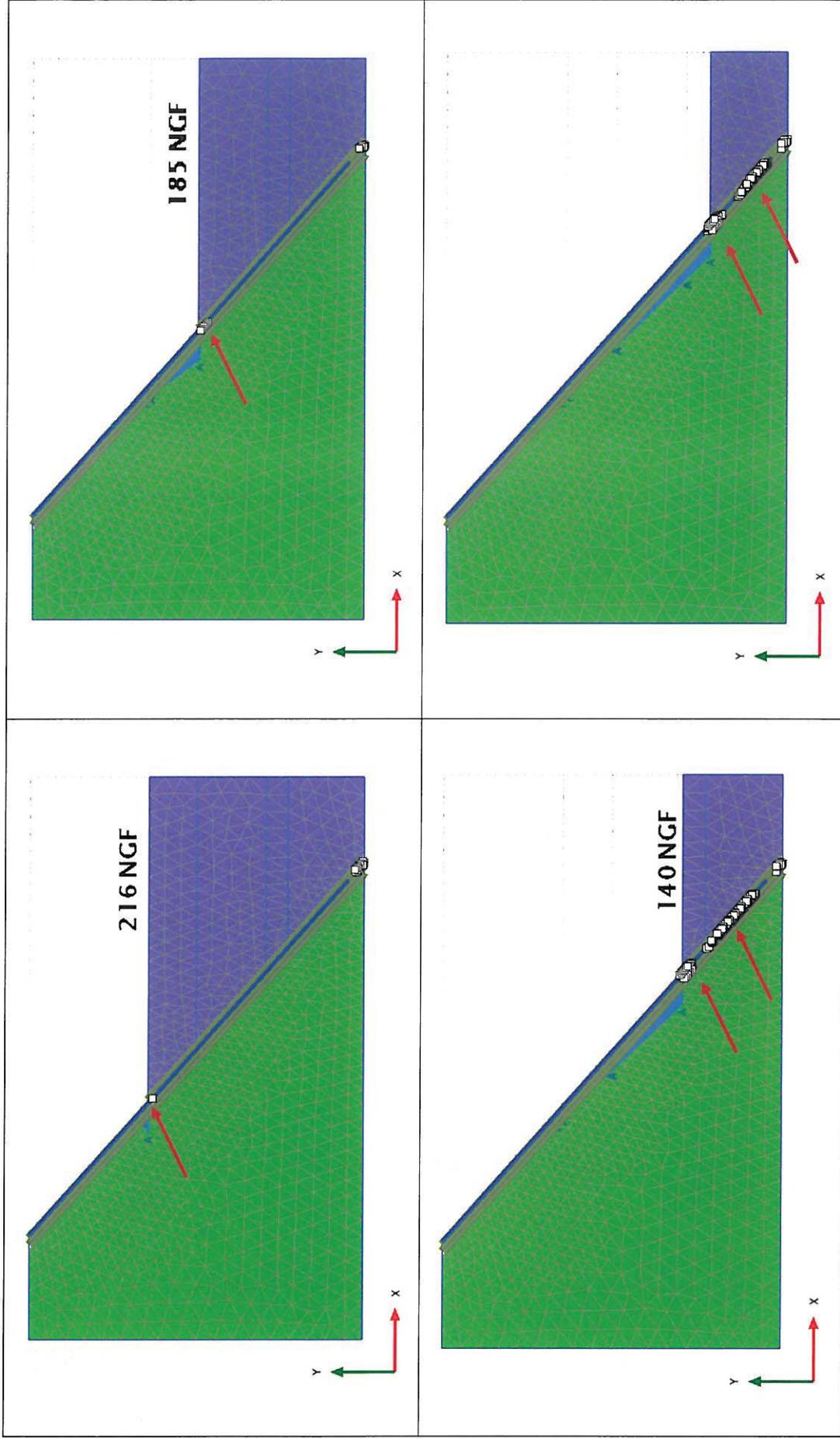


Tableau 3 : Illustrations des points plastiques de rupture en traction en fonction des différentes cotes de creusement

Compte tenu de l'hétérogénéité des différents matériaux impliqués dans ce mécanisme (et du caractère théorique des calculs), il n'est pas possible de dire à partir de quelle cote d'excavation ce phénomène de rupture apparaîtra.

Pour s'en prémunir, plusieurs solutions peuvent toutefois être envisagées :

1. La première consisterait à maintenir la dalle de pierre violette plaquée sur le Lahar, par clouage ou par mise en place de tirants ;
2. La seconde pourrait s'appuyer sur un pré-découpage de la dalle pour faciliter la libération de contraintes ;
3. La dernière enfin pourrait mettre en œuvre la méthode dite « observationnelle » qui consiste à instrumenter la dalle pour observer son comportement et réagir en fonction du résultat des mesures.

Ces trois solutions sont abordées ci-après avec un degré d'exploration dépendant de l'intérêt technico-économique que l'on peut en attendre.

#### ***Evaluation de la solution Clouage (ou tirants) de la dalle***

L'épaisseur de la dalle, sa surface et sa raideur impliquent de mettre en œuvre des moyens très importants pour maintenir plaquée la dalle sur le Lahar. Cette solution, techniquement réalisable, nécessiterait la mise en place d'un nombre très important d'ancrages ; que ce soit des « clous » ou des tirants. Elle ne paraît pas économiquement viable et ne sera pas plus détaillée ici.

#### ***Evaluation de la solution pré-découpage de la dalle***

Cette approche consiste à créer une zone de fragilité horizontale dans la dalle à chaque niveau d'excavation (tous les 15 m) par la réalisation de forages destructifs espacés de 5 m. Elle présente l'intérêt d'assurer également un drainage de l'eau susceptible d'être piégée derrière la dalle, et donc de réduire significativement le phénomène de poussée hydraulique.

Cette solution a été modélisée en considérant des contacts de type « rotules » dans la dalle de pierre violette à chaque changement de niveau d'excavation (Figure 8) à partir de la cote +216 NGF.

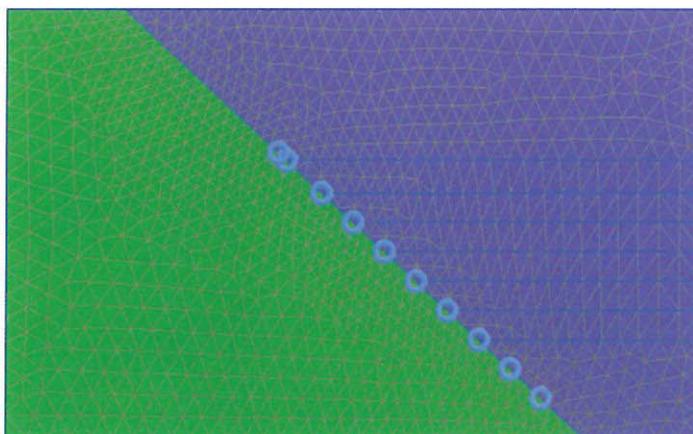
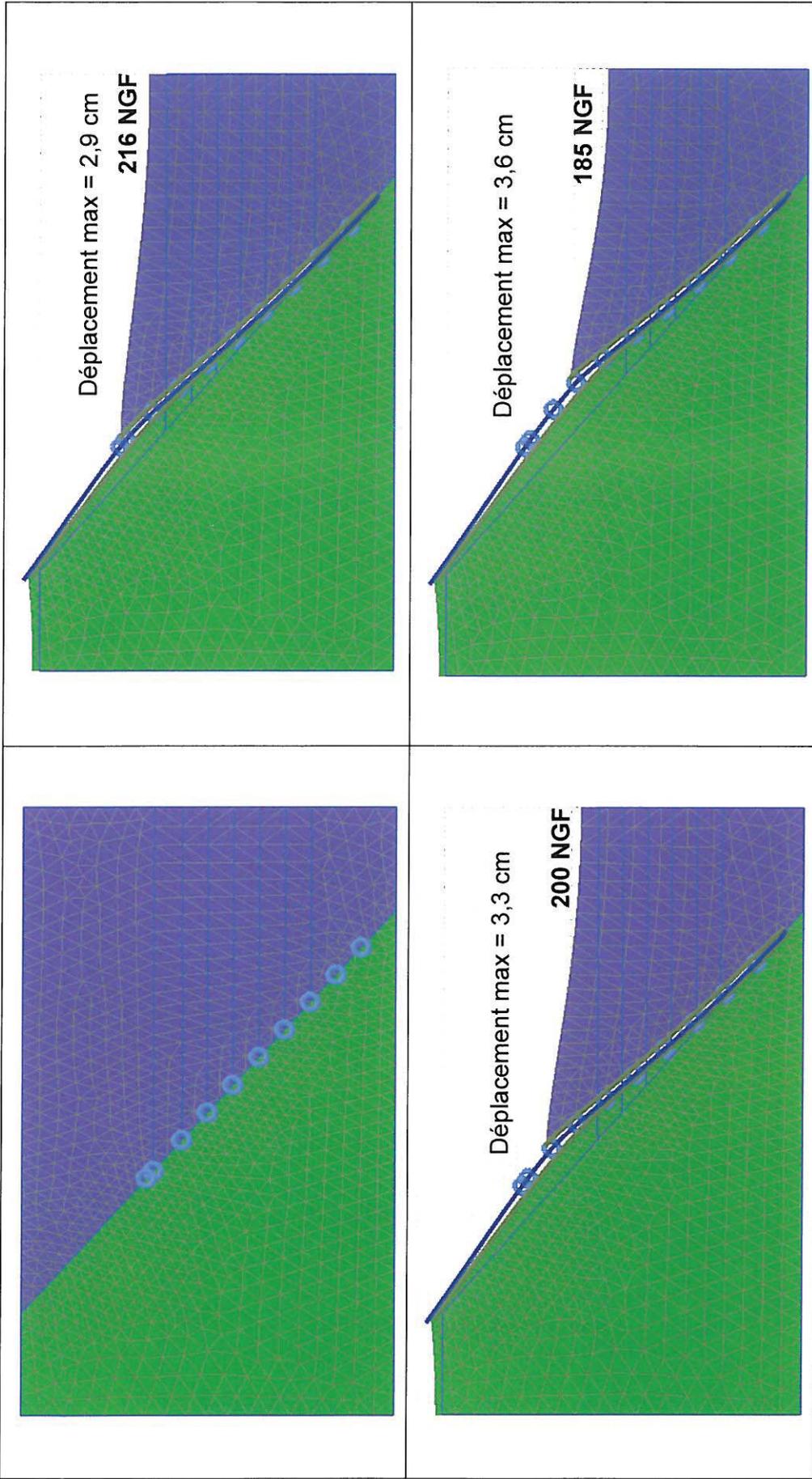


Figure 8 : Représentation des liaisons rotules dans la dalle de pierre violette

Le résultat de cette simulation est illustré dans le Tableau 4 qui représente la déformée (amplifiée) de la dalle de pierre violette.



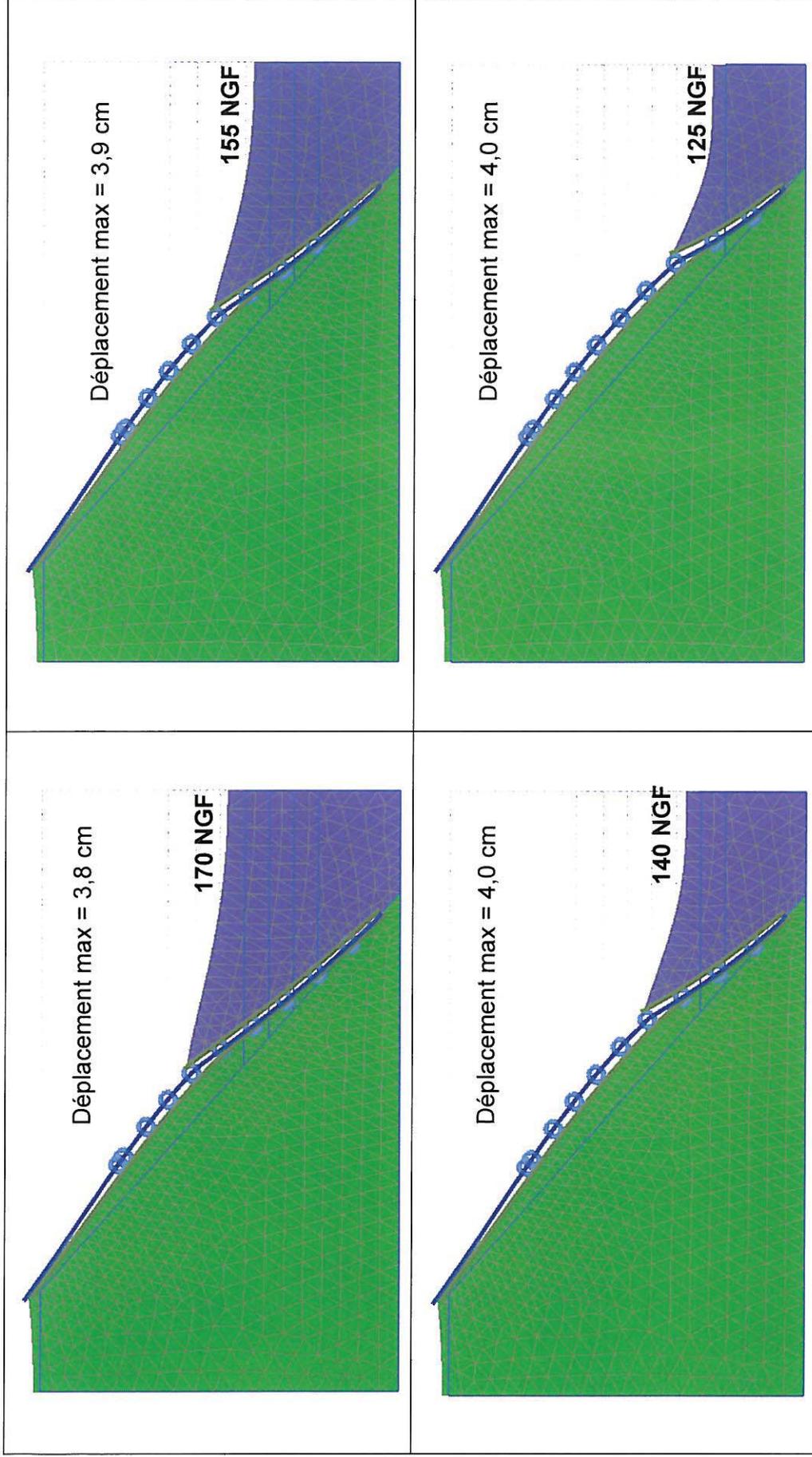


Tableau 4 : Déformation amplifiée de la dalle de pierre violette aux différents niveaux d'excavation

On constate que la présence des rotules confère à la dalle une déformation continue qui peut présenter des changements de pente plus brutaux. L'amplitude des déformations ne dépasse toutefois pas quelques centimètres.

### ***Evaluation de la solution « Méthode observationnelle »***

Depuis maintenant une vingtaine d'années, des solutions alternatives visant à optimiser, par itérations, les projets durant leur phase de réalisation ont été explorées. Ces solutions ont débouché sur une méthode dite « Méthode Observationnelle » que l'on peut résumer de la manière suivante :

1. prédire un comportement d'ouvrage par modélisation ;
2. réaliser les travaux par étapes ;
3. observer le comportement réel de l'ouvrage à chaque étape ;
4. mettre en place des solutions techniques en fonction de la différence qui existe entre le modèle et la réalité ;
5. affiner l'approche numérique pour prédire le comportement de l'ouvrage dans les étapes suivantes ;
6. passer à l'étape suivante des travaux et itérer à partir du point 3.

Dans le cas de la dalle de pierre violette, deux grandeurs pourraient être retenues pour l'observation. Il s'agit d'une part de la déformée propre de la dalle et de son interface (entre les deux parties de 2 et 3 m) et, d'autre part des contraintes de tractions induites sur sa partie mise à nu.

L'état de fracturation préexistant sur la face externe de la dalle (voir photographies 1 et 2 par exemple) n'incite pas à retenir la grandeur contrainte qui risque d'être fortement dépendante de cette fracturation. La grandeur « déformée » représente quant à elle une option exploitable pour peu qu'une instrumentation adaptée soit mise en place et suivie au fur et à mesure de l'exploitation de la carrière.

L'exploitation se situe actuellement à la cote +216 m NGF. La dalle a donc déjà subi une déformation correspond à la courbe bleue de la Figure 9. La méthode observationnelle nécessiterait soit :

- de poser des extensomètres multipoints perpendiculairement à la face externe de la dalle au droit des profils Pe1 et Pe3 (Figure 10) à la cote +216 NGF, représentés par le trait orange sur les deux figures suivantes.
- de procéder à un scan 3D de la dalle de pierre violette à intervalle d'exploitation régulier (et avec une précision inférieure au centimètre) afin de s'assurer que la forme générale de la dalle reste cohérente avec les prévisions du modèle.

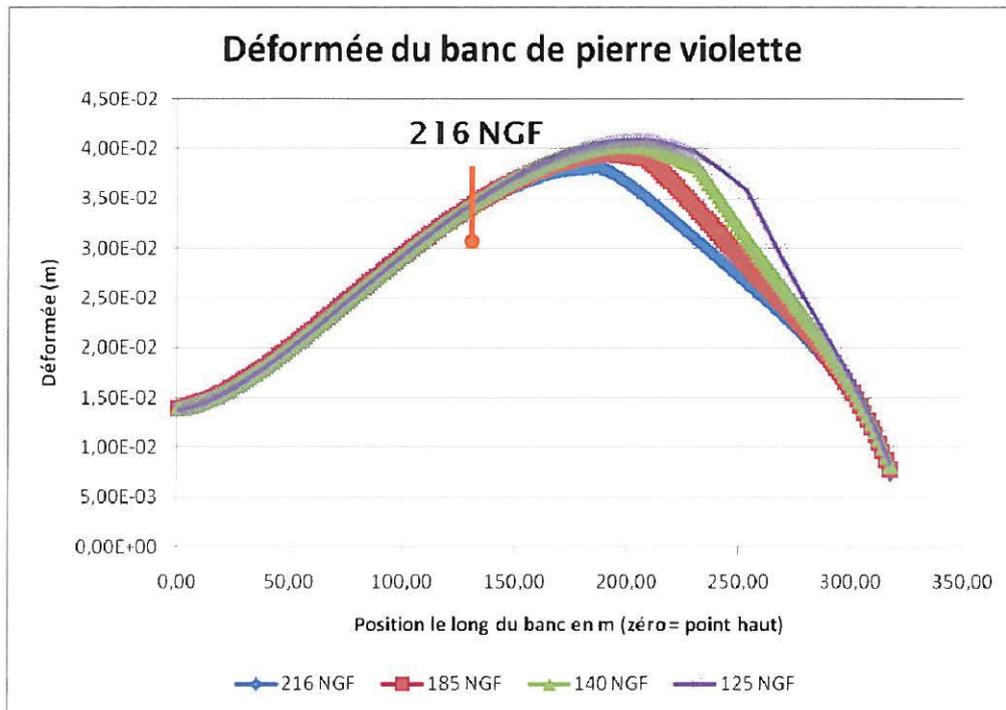


Figure 9 : Estimation de la déformée du banc de pierre violette pour les différentes cotes d'excavation

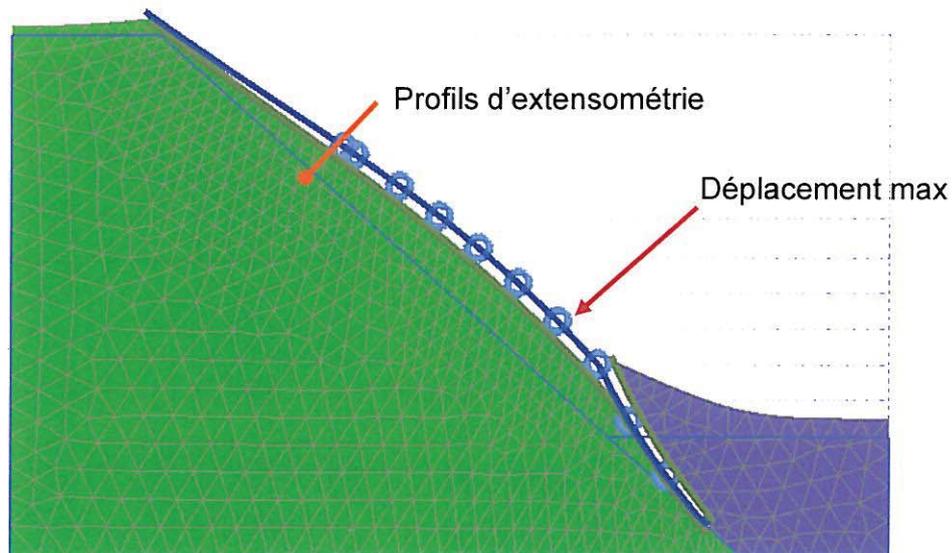


Figure 10 : Déformée amplifiée de la dalle rotulée + positionnement des profils d'extensométrie

Pour ce qui est des extensomètres, on constate qu'à cette profondeur de pose (+216 NGF), les excavations suivantes (Figure 9 - courbes rouge, verte et mauve et Figure 10) ne vont produire que des déformations très faibles, de l'ordre du millimètre. Celles-ci ne seront pas suffisamment « marquées » pour constituer un critère d'actions vis-à-vis de la méthode observationnelle. La pose d'extensomètre ne peut donc pas être utilisée dans ce cas.

L'observation par scan 3D peut constituer une solution viable en se basant, d'une part sur les amplitudes des déplacements et déformations de la dalle mais surtout sur l'apparition ou non de discontinuités qui seraient visibles sur les plans définis par les forages servant de pré-découpage à la dalle.

En conclusion de l'analyse des trois solutions envisageables, la combinaison de la solution qui consiste :

1. à prédécouper la dalle, tous les 15 m, via une rangée de forages espacés de 5 m et
2. à procéder à un scan 3D de la dalle de pierre violette à intervalle d'exploitation régulier (et avec une précision inférieure au centimètre) pour s'assurer que la forme générale de la dalle reste cohérente avec les prévisions du modèle,

constitue une méthode qui permettra de s'adapter à la réponse du massif en fonction du niveau d'exploitation.

Pour caler la surveillance, quelques campagnes de mesures devront permettre d'apprécier la précision de lecture (déplacement volontaire de blocs) et l'influence des conditions météorologiques sur cette dernière (notamment la température). L'exploitation devra se faire par comparaison de Modèles Numériques de Terrain (MNT) successifs mais aussi par rapport à un scan de référence à réaliser dès que possible.

Cette méthode doit s'accompagner de la mise en place d'un merlon de protection des travailleurs en pied de dalle violette. Ce merlon de protection devra être reconstruit à chaque niveau d'exploitation.

### **3.1.5 RECOMMANDATIONS SPÉCIFIQUES À LA ZONE DE DÉCALAGE DU FRONT**

Cette partie du front nord présente un décalage du front suivant une ligne pentée d'ouest en est (profil Pe2 de la Figure 5). A ce jour, il n'est pas possible de dire si ce décalage est attribuable à un accident géologique (faille) ou à un problème d'exploitation (attaque d'un banc supplémentaire) ; une reconnaissance spécifique pourrait répondre à cette incertitude (carottage de part et d'autre du décalage par exemple).



*Figure 11 – Zone de décalage de banc dans le front nord*

Cette zone présente des risques particuliers qui doivent être gérés de la manière suivante :

- procéder, par le haut, à une purge des blocs instables avant toute reprise d'exploitation dans la zone de décalage ;
- dans le cas d'un accident géologique, placer un profil extensométrique le long du profil Pe2 à la cote 216 NGF pour enregistrer tout mouvement de la dalle dans ce secteur. Ces mouvements peuvent être significativement différents de ceux estimés précédemment ;
- exploiter la carrière selon les préconisations du chapitre précédent.

Les mesures extensométriques devront être réalisées (et analysées) selon une périodicité mensuelle pour s'assurer de l'absence d'évolution de la zone de décalage. En cas d'accélération de la déformation dans ce secteur, des dispositions techniques adaptées devront être mise en œuvre.

### **3.1.6 ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE L'INCIDENT DU 2 OCTOBRE 2013**

Le compte rendu INERIS-DRS-13-134365-11760A relatif à l'incident du 2 octobre met en évidence une certaine sensibilité des différentes couches constituant la « peau » du glacier de pierre violette.

En effet, les différents éléments acquis lors de la recherche des causes probables de cet incident montrent qu'une « engravure » au sein de la couche supérieure de cette « peau » peut entraîner, dans une zone de fracturation plus intense, une dislocation de la partie située au dessus de cette « engravure » telle que celle-ci contribue au glissement de la partie de couche située en amont.

L'origine probable de cette engravure peut être liée au minage ou à une reprise de matériau en pied de front trop « agressive ». Il en ressort qu'il est important, lors de l'exploitation, de faire en sorte que la « peau » conserve son intégrité ; on peut également envisager d'avoir à « reconstituer » les zones engravées qui apparaîtraient malgré les précautions prises pour les éviter.

### **3.1.7 CONCLUSION CONCERNANT LA STABILITÉ DU BANC DE PIERRE VIOLETTE**

Le banc de pierre violette peut être considéré comme une « peau » qui couvre le Lahar sous-jacent. Toutefois, cette « peau » présente un risque d'endommagement dès lors que la cote d'excavation sera inférieure à +216 m NGF (état actuel). Il convient donc de prendre certaines précautions pour maintenir un volume d'exploitation optimal en garantissant la sécurité.

Plusieurs solutions techniques ont été explorées. L'accrochage de la dalle sur le Lahar, par des tirants ou des clous, ne paraît pas économiquement réaliste compte tenu de l'étendue de la surface (et du volume) à traiter.

La seconde approche qui consiste à prédécouper, via des forages, la dalle tous les 15 m de manière à supprimer le risque de ruptures brutales permet d'assurer la stabilité globale de la dalle et d'améliorer son drainage. Des décrochements de blocs ou de plaques sont toutefois attendus. Ils devront être arrêté par la présence d'un merlon édifié à proximité du pied de la dalle violette et ce, à chaque niveau d'exploitation.

La méthode observationnelle est utile dans cette configuration particulière à condition d'observer la déformation de la dalle dans son ensemble via un scan 3D réalisé périodiquement. Cette approche devra être combinée au prédécoupage de la dalle pour s'assurer que son comportement est conforme aux estimations du calcul numérique.

Lors de l'analyse de l'incident du 2 octobre 2013, une solution de mise en sécurité par reprise de l'exploitation de la partie supérieure de la « peau » et du lahar a été proposée. Cette solution pourrait s'appliquer à l'ensemble du front du glacis de pierre violette ce qui permettrait de réduire la hauteur de la « peau », le lahar, d'une épaisseur de 15 mètres, permettant la constitution de piste d'exploitation et/ou de piège à cailloux.

Dans la zone de décalage du front (autour du profil Pe2) une instrumentation complémentaire permettra d'indiquer de manière plus continue si la dalle présente des mouvements plus importants. Dans ce cas, des mesures particulières tenant compte de ce comportement devront être prises (à définir selon les cas).

Enfin, bien que les aspects hydrauliques aient été pris en compte par la présence des drains, il faudra rester vigilant à l'apparition des circulations soutenues d'eau et de leurs éventuels effets sur la déformation de la dalle. Dans cet esprit, une gestion rigoureuse des écoulements devra être mise en place en favorisant le ruissellement en crête d'exploitation. Si la solution consistant à reprendre en partie la « peau » et le lahar était adoptée, une attention particulière devra être portée à la collecte des eaux de ruissellement de la partie supérieure du front.

## 3.2 ÉTUDE DE LA ZONE OUEST

### 3.2.1 ZONES D'ÉTUDE

La partie ouest du front nord se divise en deux zones en fonction des horizons qui ont été exploités et de ceux laissés en place. En progressant d'ouest en est, l'exploitation laisse en place les tuffites sous le lahar et les couches visibles sur le front sont au pendage, de la crête jusqu'à la piste soit jusqu'à la cote +196 à +216 m NGF. On observe de vastes surfaces sur lesquelles des bancs rocheux pluri-décimétriques peuvent se détacher en blocs et glisser sur le banc sous-jacent. Cette zone est repérée en rouge sur la Figure 12. Les profils 1 et 2 en donnent une représentation synthétique.

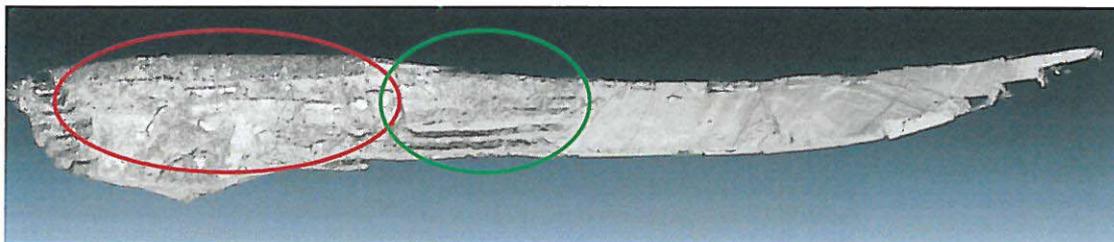


Figure 12 – Lahar zones ouest (rouge) et est (vert)

En allant vers l'est, en deçà de la cote +241/243 m NGF, deux fronts séparés par une banquette ont été laissés en place ; ils sont dans le lahar. Les profils P3 et P4 illustrent cette géométrie. Ces deux zones sont examinées successivement ci-dessous.

### 3.2.2 ZONE OUEST - TUFFITES

La description de la zone, les phénomènes redoutés et le moyen de s'en protéger ou d'en diminuer les conséquences sont fondés sur la topographie levée par le cabinet de géomètre Legendre, et sur les profils qui en sont déduits ainsi que les observations et photographies des deux visites.



Figure 13 – Position des profils P1 et P2

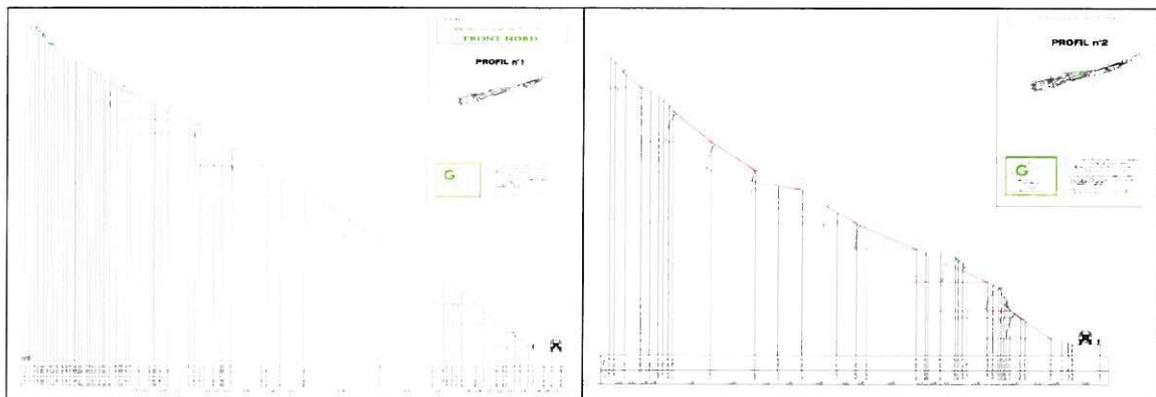
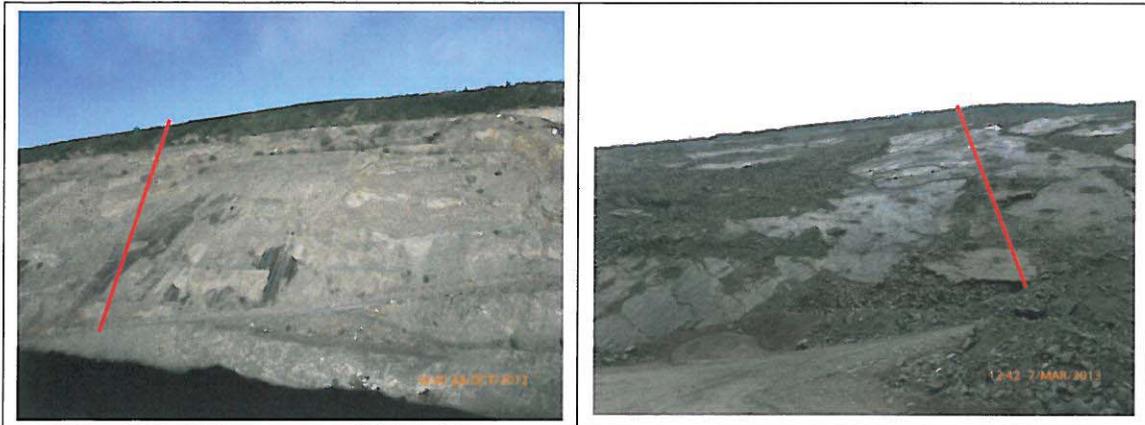


Figure 14 – Tracé des profils P1 et P2

Ces deux profils ont été implantés dans des zones assez différentes sur le plan géométrie.

Le P1 est implanté dans une partie assez peu perturbée comme l'indiquent bien la Figure 13 et la coupe de la Figure 14. Le profil est assez continu avec peu d'aspérités hormis dans la partie sommitale, mais vraisemblablement due à la végétation ; à la base du profil, on remarque la trace de deux bancs rocheux en appui du pied. Mécaniquement, on remarque que, outre le glissement de fragments issus de la partie sommitale, ce profil ne présente pas, à ce stade de l'exploitation, de prédisposition à l'apparition d'un phénomène global dangereux, malgré un léger bombement de la partie centrale.

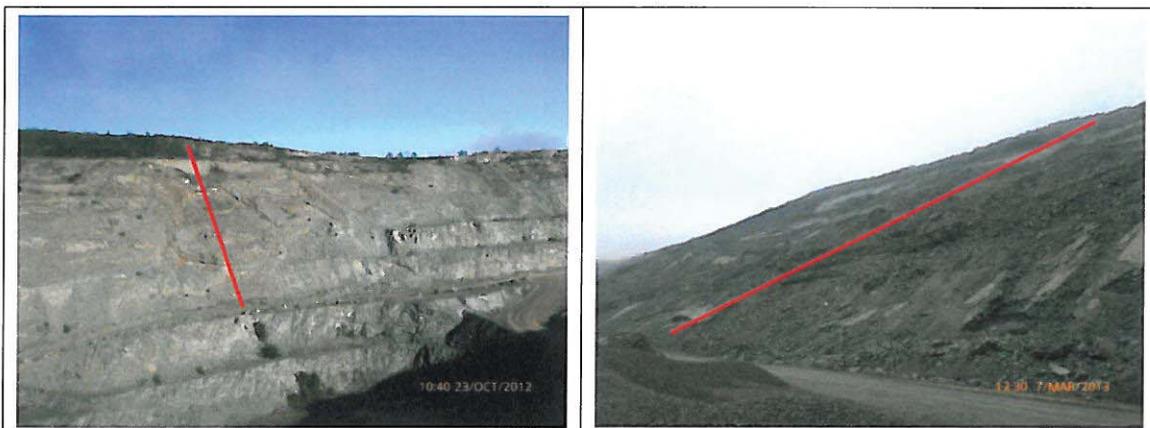


*Figure 15 – Photographies du front au droit du profil P1*

Les photographies de la Figure 15, prises à deux périodes assez différentes sur le plan météorologique, confirment que les phénomènes redoutés sur ce profil ne sont que de faible ampleur, comme le montre l'absence de mouvement volumineux et la densité moyenne de blocs en pied.

Les moyens de protection envisageables sont alors, dans ce cas et à ce niveau d'exploitation, outre le nettoyage du front, la mise en place d'un piège à blocs en pied, avec les contraintes afférentes (emprise, nettoyage...) de manière à permettre la circulation du personnel et des engins en sécurité.

Le profil P2 présente une géométrie assez calme de la crête jusqu'à l'altitude + 246 m NGF. En deçà sa forme présente des bombements et des pentes qui laissent présager, si ce n'est des instabilités, une plus forte prédisposition à l'apparition de tels phénomènes.



*Figure 16 – Photographies du front au droit du profil P2*

La Figure 16 met bien en évidence que le phénomène redouté en partie basse du profil est d'une plus grande ampleur que sur le profil précédent ; les masses en jeu sont plus volumineuses, même si l'on n'observe pas une densité de blocs beaucoup plus importante en pied. La photographie de la Figure 17, prise d'un autre angle, est plus révélatrice de l'ampleur du phénomène redouté.



Figure 17 – Base du profil P2 vue du sud-ouest

Ces formes différentes d'une zone à l'autre de ce secteur ne sont pas nécessairement dues à un problème d'exploitation mais à la forme « ondulantes » des couches, parfois compliquée par des mouvements tectoniques.

On peut aussi envisager de sécuriser la piste comme sous le profil P1 mais, soit après un « nettoyage » plus important, soit par la mise en place d'un piège de plus grande hauteur, soit en jouant sur les deux facteurs. Au préalable, une analyse plus fine de la forme des couches géologiques devra être entreprise pour mieux définir la phase de « nettoyage ».

### 3.2.3 ZONE OUEST - LAHAR

L'approche sur cette zone est la même que sur la précédente, à savoir une analyse des données topographiques recoupée par les observations de terrain illustrées par les photographies des deux visites.

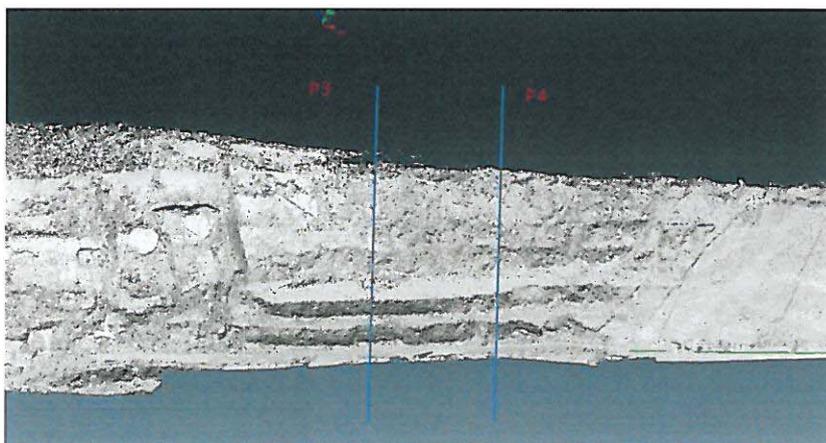


Figure 18 – Position des profils types de la zone « lahar » est

Sur la Figure 18 on remarque que la géométrie de cette zone est assez homogène et composée d'une pente allant de la crête jusqu'à mi-pente puis de deux fronts précédés de banquettes de largeur variable.

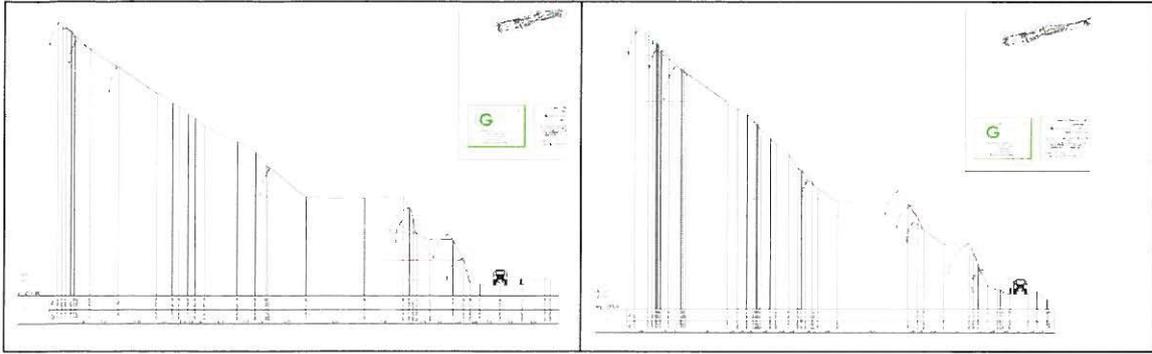


Figure 19 – Tracé des profils P3 et P4

Les profils de la Figure 19 permettent de préciser la géométrie ; de la crête à la cote +242 m NGF, la pente est continue et de 38 à 42° par rapport à l'horizontale ; suit, jusqu'à la piste, une banquette de 20 à 30 m de largeur surplombant deux fronts de 12 à 13 m de hauteur environ, inclinés à 75/85°, séparés par une banquette de 5 à 7 m de largeur.



Figure 20 – Photographies de la zone du « lahar » est

Les photographies de la Figure 20 positionnent le profil P3 sur une vue des deux zones dites « lahar » et montrent la base de la zone vue de la piste. La première remarque concerne le pendage des couches ; autant les tuffites sous-jacentes au lahar et la « pierre violette » présentent des couches stratifiées dont le pendage a été suivi par l'exploitation, autant le « lahar » ne présente pas de pendage préférentiel mais un ensemble assez compact dont les discontinuités apparentes correspondent à des mouvements complexes lors de sa mise en place.

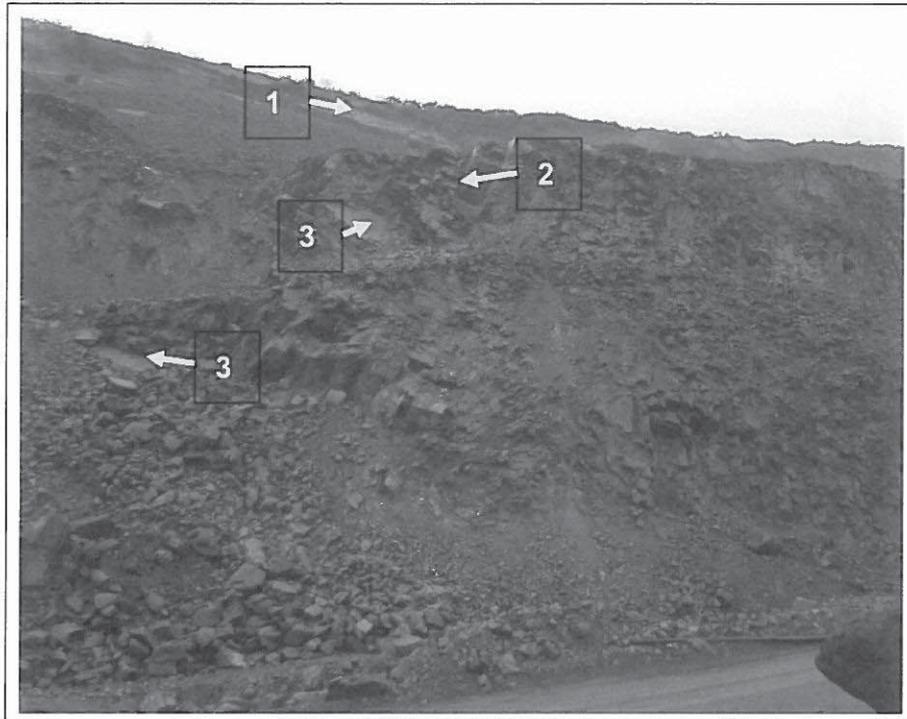


Figure 21 – Limite ouest de la zone du « lahar » est

Cette photographie (Figure 21) prise vers le nord-est à la limite entre les deux zones l'illustre bien ; on y observe :

1. en partie supérieure, à l'arrière des deux fronts, un pendage assez homogène vers le sud, marqué par la présence de surface de bancs affleurants ;
2. sur les fronts, des structures beaucoup plus bouleversées avec des orientations très redressées vers le nord-ouest,
3. mais également des formes de pendage vers le sud.

Ces fronts ont été laissés en place lors de l'exploitation pour stabiliser le front qui a présenté des désordres en partie supérieure. On se retrouve dans une configuration plus courante avec un aléa chute de blocs marqué dont il est nécessaire de se protéger.

L'application de solutions de mise en sécurité de même type que sur la partie ouest est possible.

### 3.2.4 SYNTHÈSE SUR LES ZONES OUEST TUFFITES ET LAHAR

A l'issue de la réunion de synthèse concernant l'incident sur le front à +225 m NGF, l'exploitant a fait part de l'abandon des pistes de circulation sur le front nord. Dans ces conditions, nous proposons de mettre à profit l'existence des pistes actuelles pour les transformer en piège à cailloux qui permettront la protection du personnel en exploitation sous ces fronts.

S'agissant de la zone de tuffites, pour laquelle le front est au pendage, l'aléa principal concerne le glissement de blocs ou de plaques potentiellement instables sur les couches inférieures. Il sera donc nécessaire de procéder au « nettoyage » du front de manière à y enlever toutes les masses jugées actuellement instables.

Pour la zone est, les fronts du lahar devront également faire l'objet d'une purge ou abattage contrôlé de manière à le débarrasser des blocs et masses instables.

Dans les deux cas, nous conseillons l'élimination des masses potentiellement instables les plus importantes avant approfondissement de l'exploitation dans ce secteur.

En résumé, les principes de sécurisation des deux zones à l'ouest du front nord peuvent faire l'objet de solutions courantes de type nettoyage de front et mise en place de piège à blocs. La circulation sur le front nord sera abandonnée à terme ce qui permettra la transformation des pistes en piège à blocs. Elles devront donc permettre l'arrêt du glissement des blocs sur le front au pendage et la chute sur les fronts du lahar et donc comporter sur leur largeur une zone de réception qui devra être régulièrement nettoyée pour pérenniser son rôle et surtout un merlon sur le bord aval pour renforcer la sécurité.

Les pistes de cette partie du front fonctionnent déjà de cette manière ; on pourra donc s'appuyer sur les observations pour évaluer le dimensionnement du système.

#### 4. LISTE DES ANNEXES

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe A	Fiche d'information des prélèvements par brise-roches - Fiche d'information des forages destructifs	3 A4
Annexe B	Résultats des essais de laboratoire sur la pierre violette	13 A4
Annexe C	Approche analytique pour le flambage du banc	5 A4
Annexe D	Logiciel utilisé pour l'étude	2 A4



## **ANNEXE A**

**Fiche d'information des prélèvements par brise roches**

**Fiche d'information des forages destructifs**



CARRIERE DE VOUTRE (53) - INERIS-DRS-13-1344365-03480A  
**PRELEVEMENTS PAR BRISE ROCHES**

**Généralités**

- Nombre : 10 blocs
- Profondeur : surface parole
- Disposition : sur 3 hauteurs (banquettes) du front nord
- Operation : - front bas : 2 échantillons en 2 points = 4 prélèvements  
 - front intermédiaire : 2 échantillons en 2 points = 4 prélèvements  
 - front haut : 2 échantillons en 1 point = 2 prélèvements

**Information pour le prélèvement**

Numéro	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
<b>Date de prélèvement</b>	28/03/2013 (matinee)	28/03/2013 (matinee)	28/03/2013 (apres midi)	28/03/2013 (apres midi)	28/03/2013 (apres midi)	28/03/2013 (matinee)	28/03/2013 (matinee)	28/03/2013 (apres midi)	28/03/2013 (apres midi)	28/03/2013 (apres midi)
<b>Photographie S:\DRS\Public\BAL-DRS\Thiers\VOUTRE\Photos</b>	RIMG0013 à RIMG0014 RIMG0030 RIMG0034	RIMG0013 à RIMG0014 RIMG0030 RIMG0034	RIMG0020 à RIMG0023 RIMG0030	RIMG0020 à RIMG0023 RIMG0030	RIMG0024 à RIMG0025 RIMG0028 RIMG0037 RIMG0046	RIMG0024 à RIMG0025 RIMG0028 RIMG0037 RIMG0046	RIMG0026 à RIMG0027 RIMG0036	RIMG0026 à RIMG0027 RIMG0036	RIMG0045 RIMG0051 à RIMG0052	RIMG0045 RIMG0051 à RIMG0052
<b>Niveau de la banquette</b>	210	210	195	195	240	240	255	255	270	270
<b>Direction de la parole</b>	Ng 74° E	Ng 74° E	Ng 75° E	Ng 75° E	Ng 62° E	Ng 62° E	Ng 64° E	Ng 64° E	Ng 60° E	Ng 60° E
<b>Pendage de la parole</b>	42° S	42° S	42° S	42° S	46° S	46° S	50° S	50° S	56° S	56° S
<b>X (Lambert I Nord)</b>	407675	407675	408215	408215	408419	408419	408463	408463	408555	408555
<b>Y (Lambert I Nord)</b>	54213	54213	54396	54396	54517	54517	54542	54542	54616	54616
<b>Z (m)</b>	211	211	217	217	247	247	260	260	274	274
<b>H depuis le sol (m)</b>	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m	1 m 2 m
<b>Observation</b>	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques	Echantillons déposés le 29/03/2013 chez ANTEA Orléans pour essais géomécaniques

CARRIERE DE VOUTRE (53) - INERIS-DRS-13-1344365-03480A  
**FORAGES DESTRUCTIFS**

**Généralités**

Nombre : 5  
 Profondeur : 8 m  
 Diamètre : 114 mm  
 Disposition : perpendiculaires à la dalle, à quelques mètres de hauteur depuis le niveau actuel d'excavation  
 Opération : enregistrement des paramètres de foration (vitesse d'avancement)

**Information pour le point de foration**

Numéro	F1	F2	F3	F4	F5
Date de foration	28/03/2013 (matinée)	28/03/2013 (matinée)	28/03/2013 (matinée)	28/03/2013 (matinée)	28/03/2013 (matinée)
Photographie	RIMG0008 à RIMG0012 RIMG0034	RIMG0002 à RIMG0007 RIMG0011 à RIMG0012 RIMG0034	RIMG0015 à RIMG0016 RIMG0030 RIMG0034	RIMG0017 à RIMG0019 RIMG0030 RIMG0034	RIMG0030 RIMG0034
Direction de la paroi	Ng 74°E	Ng 77°E	Ng 70°E	Ng 70°E	Ng 70°E
Pendage de la paroi	40° S	42° S	40° S	40° S	40° S
X (Lambert I Nord)	407949	407983	408161	408187	408207
Y (Lambert I Nord)	54299	54306	54376	54385	54392
Z (m)	220	218	215	216	214
H depuis le sol (m)	1,5 m - 2 m	1,5 m - 2 m	1,5 m - 2 m	1,5 m - 2 m	1,5 m - 2 m
Profondeur (m)	8	8	8	8	8
Observations	- Foration à 45° - Changement de vitesse de foration à 1,6 m de l'orifice sur 20 cm, puis vitesse continue - Eau au fond du trou à la fin du forage ; en fin de journée, l'eau est arrivée à moins de 1 m de l'orifice	- Foration à 45° - Changement de vitesse de foration à 7 m de profondeur sur 10 cm - Arrivée d'eau à 7 m ; en fin de journée, l'eau est arrivée à moins de 2 m de l'orifice	- Foration à 45° - Changement de vitesse de foration à 1,2 m et 1,8 m - En fin de journée, eau à 5 m de l'orifice	- Foration à 45° - Changement de vitesse de foration à 1,2 m et 1,8 m - En fin de journée, eau à 4 m de l'orifice	- Foration à 45° - Changement de vitesse de foration à 1,3 m et 1,8 m - En fin de journée, eau à 4 m de l'orifice

**FORATION (Pression appliquée : 50)**

Profondeur (m)	V. moyenne				
1	1,30	0,94	0,82	1,00	0,82
2	0,78	0,99	0,9	1,3	1,2
3	0,80	0,86	0,87	0,98	0,94
4	0,70	0,90	0,90	0,90	0,88
5	0,76	1,3	0,83	0,88	0,98
6	0,79	1,10	0,70	0,90	0,90
7	0,78	1,15	0,66	0,88	0,94
8	0,66	1	0,60	0,78	0,86

Arrivée d'eau  
 Fracturation

## **ANNEXE B**

### **Résultats des essais de laboratoire AnteaGroup - Orléans**





Laboratoire d'essais géomécaniques  
Tél. : 02 38 23 23 41 - Fax : 02 38 23 23 78

## RAPPORT D'ESSAIS

<b>Client : Nom et adresse</b>	
INERIS Rue Jacques TAFFANEL 60550 VERNEUIL-EN-HALATTE A l'attention de M. J.B. KAZMIERCZAK <a href="mailto:Jean-Bernard.KAZMIERCZAK@ineris.fr">Jean-Bernard.KAZMIERCZAK@ineris.fr</a>	
<b>Unité de production Antea Group responsable du projet</b>	<b>Numéro de projet</b>
Antea Group – LABORATOIRE – C. POINCLOU	CENP130166

### Echantillons

Date de réception	Quantité	Origine
29/03/2013	10 échantillons rocheux intacts en sac plastique	Carrière de Voutré (53)
Description		
Roche microgrenue, roche grenue et grès.		

Ce rapport comporte 2 page(s) et 11 pages d'annexes.

### Sommaire du rapport

1 tableau de résultats d'essais en laboratoire

### Annexes :

Bordereaux d'essai de déformabilité (10 pages).  
Bordereau d'essai brésilien (1 page).

Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais. Sauf accord écrit préalable, le présent rapport ne peut être reproduit que dans son intégralité. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons ne sont pas conservés au delà de un mois après l'envoi du rapport. L'attention est attirée sur le fait que les résultats mentionnés par le présent rapport ont été obtenus avec les échantillons définis ci-dessus, mais que la portée et les conclusions à tirer de ces résultats font l'objet d'un document séparé ou n'ont pas été demandés par le donneur d'ordre.	<b>Le responsable des essais</b> C. POINCLOU	<b>Le responsable technique</b> E. ANTOINET
		

**Sites et sols pollués - Eau - Infrastructures - Déchets - Risques industriels**  
**Agence Paris - Centre - Normandie - Implantation Orléans**

Siège social : ZAC du Moulin - 803 boulevard Duhamel du Monceau - CS 30602 - 45166 OLIVET CEDEX - France  
Tél. 02 38 23 22 20 - Fax 02 38 23 22 30 ou 02 38 23 23 79

## Carrière de Voutré (53)

Tableau 1 : essais mécaniques

Référence éprouvette	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Rc (MPa)	E <sub>tan</sub> (GPa)	E <sub>sec</sub> (GPa)	Rtb (MPa)	Orientation Eprouvette/ échantillon
<b>B1</b> Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).	2.70 2.72	119.7	20.8	30.4	17.0	//
<b>B2</b> Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).	2.69 2.72	204.9	28.8	30.9	18.3	⊥
<b>B3</b> Roche grenue à grains anguleux et arrondis, orientation visible (foliation ?), très riche en minéraux verts type amphibole et chlorite	2.67 2.67	63.4	12.9	20.0	11.5	⊥
<b>B4</b> Roche grenue à grains anguleux et arrondis, orientation visible (foliation ?), très riche en minéraux verts type amphibole et chlorite	2.68 2.67	66.8	12.2	19.0	10.2	⊥
<b>B5</b> Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).	2.67 2.67	222.6	30.5	27.1	18.7	⊥
<b>B6</b> Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).	2.69 2.68	114.2	20.7	30.4	11.0	⊥
<b>B7</b> Grès très silicifié marron beige, localement rouille.	2.63 2.62	93.4	14.7	25.9	9.9	⊥
<b>B8</b> Grès très silicifié marron beige, localement rouille.	2.62 2.64	31.8	13.8	26.3	8.6	⊥
<b>B9</b> Grès très silicifié marron beige, localement rouille.	2.63 2.65	30.6	15.8	29.8	12.8	⊥
<b>B10</b> Grès très silicifié marron beige, localement rouille.	2.67 2.61	129.4	22.7	25.9	11.5	45°

**LEGENDE :**

- $\rho$  :** *masse volumique humide.*  
**Rc :** *résistance à la compression uniaxiale.*  
**E<sub>tan</sub> :** *module de déformation tangent à la courbe de chargement de l'éprouvette.*  
**E<sub>sec</sub> :** *module de déformation sécant, à la boucle de décharge/charge de l'éprouvette.*  
**Rtb :** *résistance à la traction indirecte (essai brésilien).*  
**//** *orientation de l'axe normal de l'éprouvette avec la verticale notée sur l'échantillon prélevé.*  
**⊥** *orientation de l'axe normal de l'éprouvette avec la verticale notée sur l'échantillon prélevé.*  
**45°** *angle de l'axe normal de l'éprouvette avec la verticale notée sur l'échantillon prélevé.*

**Annexes :**

Bordereaux d'essai de déformabilité (10 pages).  
 Bordereau d'essai brésilien (1 page).

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 16/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

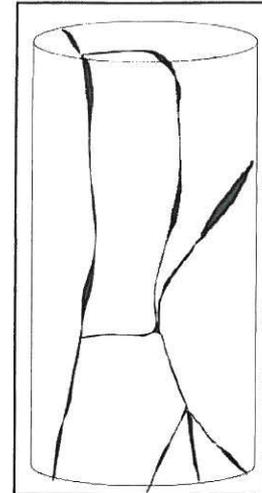
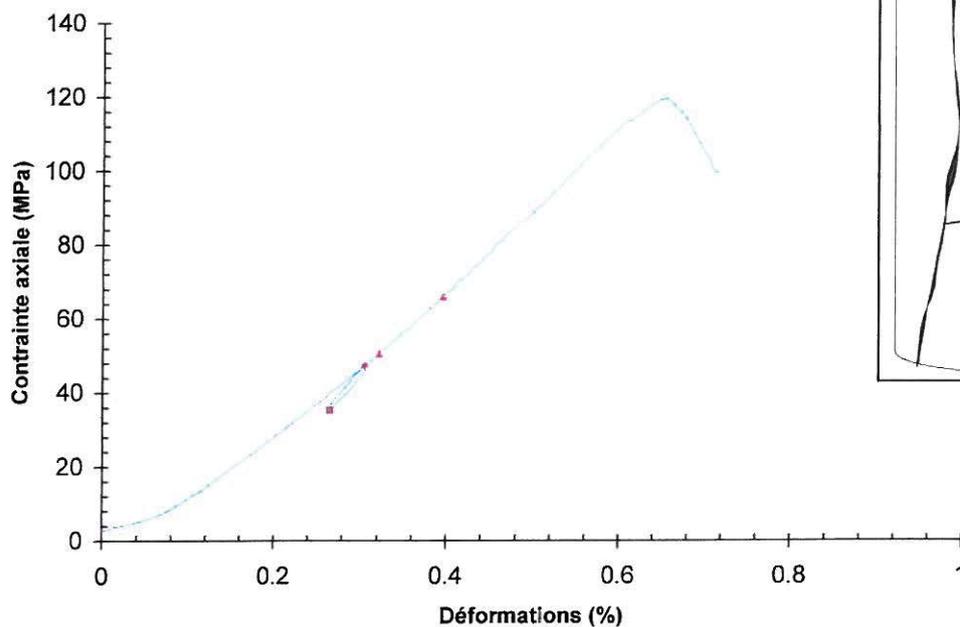
Sondage : B1

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).

Observation : Eprouvette présentant des fissures recristallisées.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B1	4.95	10.49	19.2	544.12	2.70	0.0	2.70	230	119.7

Module de déformation tangent (GPa)	E <sub>tan</sub> = 20.84 GPa	Calculé entre 0.32 et 0.39 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	E <sub>sec</sub> = 30.36 GPa	Calculé entre 0.26 et 0.3 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0033	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE**  
(+ courbe de déformabilité)

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 16/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

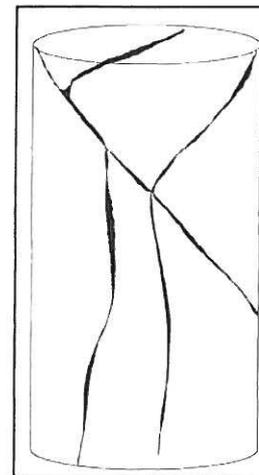
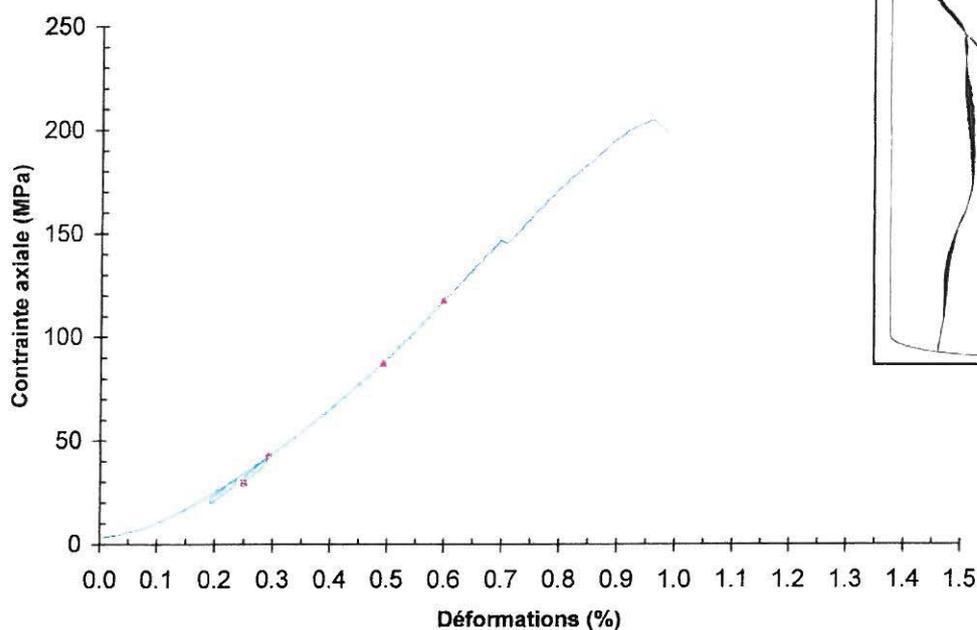
Sondage : B2

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche microgrenue hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).

Observation : Eprouvette présentant des fissures recristallisées. Rupture de l'éprouvette en cisaillement à 45° suivant une fissure naturelle.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρh (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρd (g/cm <sup>3</sup> )	Force (kN)	Rc (MPa)
B2	4.98	10.54	19.5	553.08	2.69	0.0	2.69	399	204.9

<b>Module de déformation tangent (GPa)</b>	Etan = 28.77 GPa	Calculé entre 0.49 et 0.6 % de déformation
<b>Module de déformation sécant (GPa)</b>	Esec = 30.94 GPa	Calculé entre 0.25 et 0.29 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 kN	0.0035	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 16/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

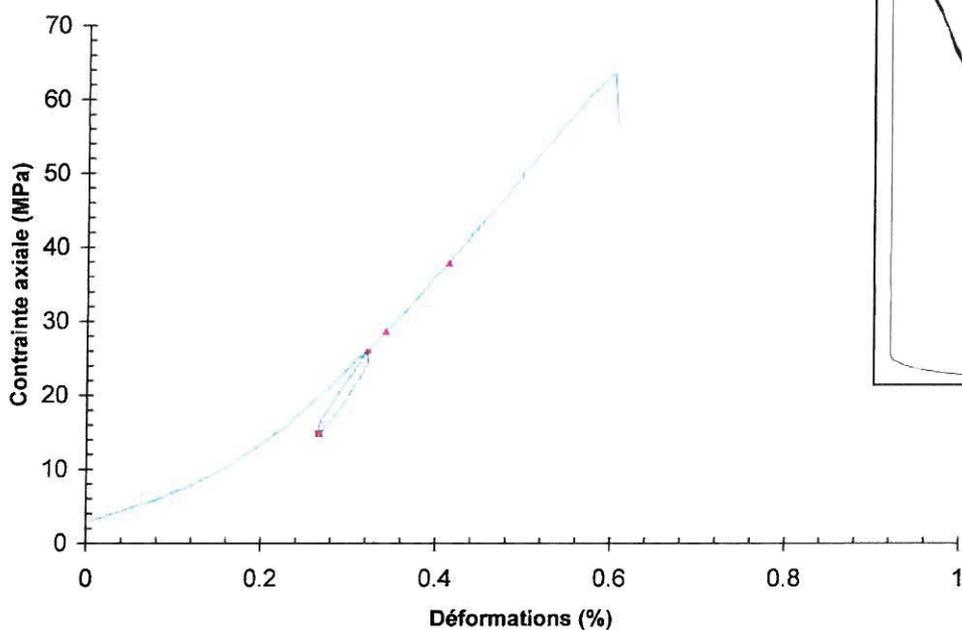
Sondage : B3

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche grenue à grains anguleux et arrondis, orientation visible (foliation ?), très riche en minéraux verts type amphibole et chlorite.

Observation : Rupture en cisaillement à 60°.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B3	4.96	10.74	19.3	553.65	2.67	0.0	2.67	122	63.4

Module de déformation tangent (GPa)	Etan = 12.88 GPa	Calculé entre 0.34 et 0.41 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	Esec = 20.01 GPa	Calculé entre 0.27 et 0.32 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0040	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 16/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

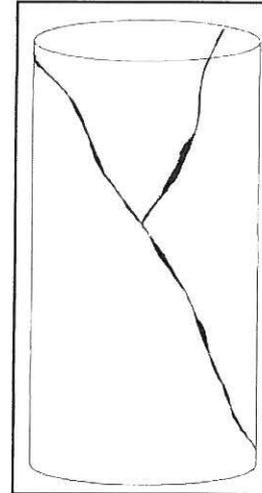
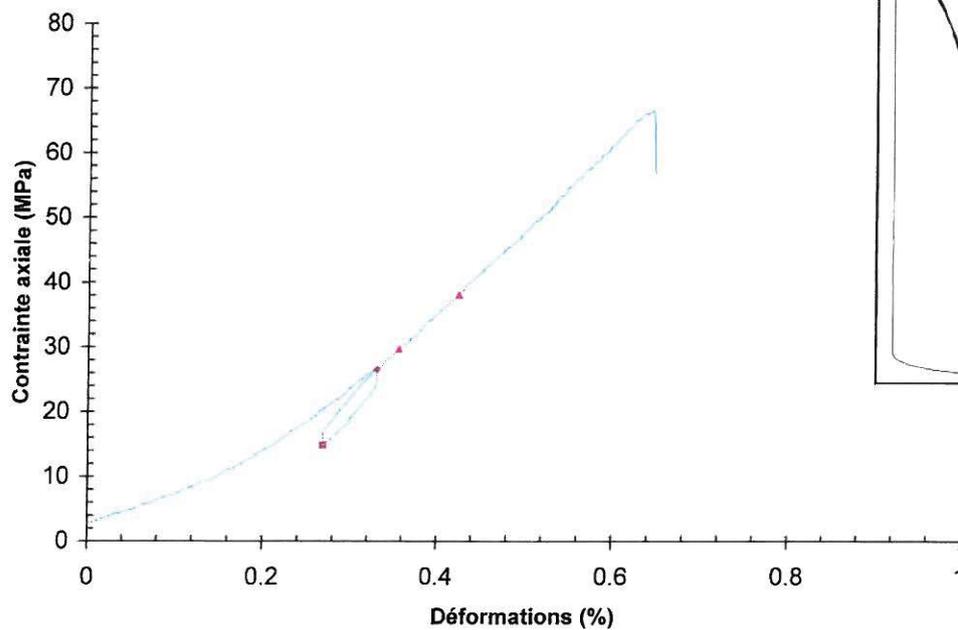
Sondage : B4

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche grenue à grains anguleux et arrondis, orientation visible (foliation ?), très riche en minéraux verts type amphibole et chlorite.

Observation : Rupture en cisaillement à 60°.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B4	4.97	10.06	19.4	523.19	2.68	0.0	2.68	130	66.8

Module de déformation tangent (GPa)	E <sub>tan</sub> = 12.22 GPa	Calculé entre 0.36 et 0.42 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	E <sub>sec</sub> = 18.97 GPa	Calculé entre 0.27 et 0.33 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0043	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 16/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

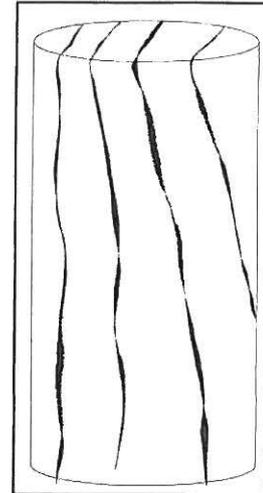
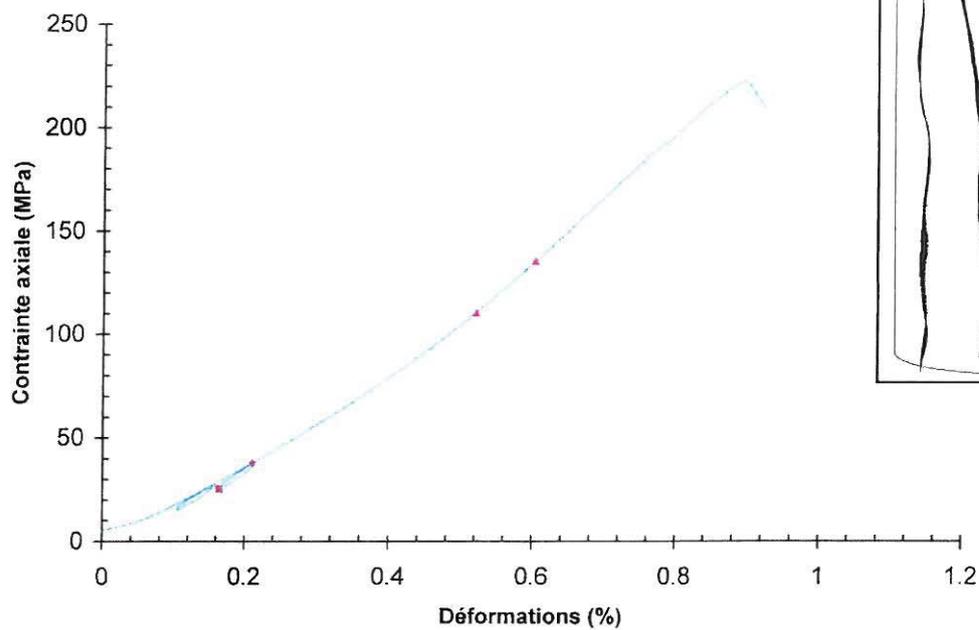
Sondage : B5

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche microgrenue, hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).

Observation : Eprouvette présentant des fissures recristallisées.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B5	4.93	10.24	19.1	521.10	2.67	0.0	2.67	425	222.6

Module de déformation tangent (GPa)	E <sub>tan</sub> = 30.54 GPa	Calculé entre 0.52 et 0.6 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	E <sub>sec</sub> = 27.11 GPa	Calculé entre 0.16 et 0.21 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0033	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 17/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

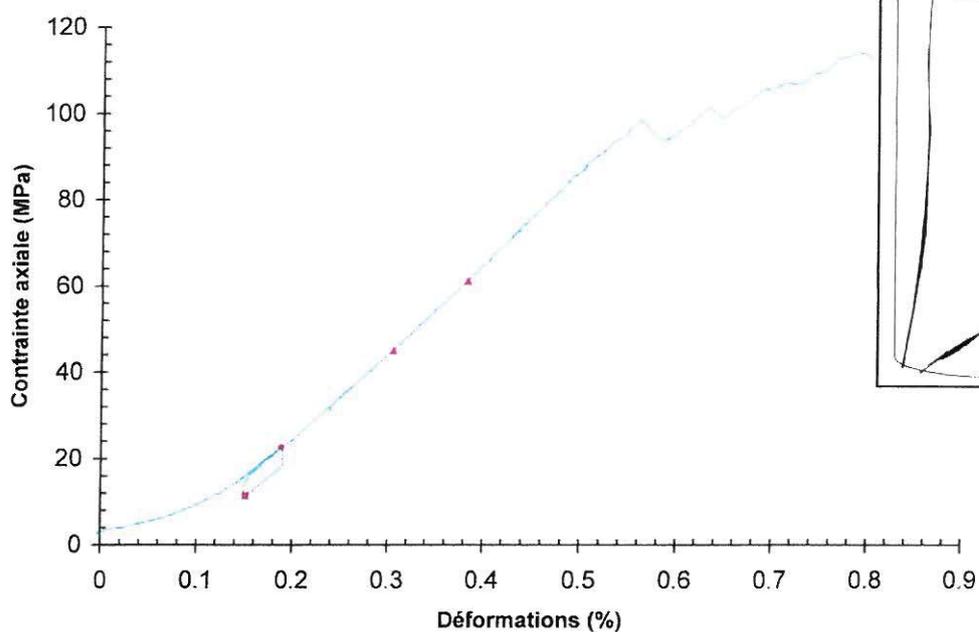
Sondage : B6

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Roche microgrenue, hyper silicifiée gris bleuté à verdâtre (microdiorite ?).

Observation : Epruvette présentant de nombreuses fissures plus ou moins ouvertes. Rupture après plusieurs écaillages successifs.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B6	4.96	10.18	19.3	529.94	2.69	0.0	2.69	221	114.2

Module de déformation tangent (GPa)	Etan = 20.74 GPa	Calculé entre 0.31 et 0.38 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	Esec = 30.40 GPa	Calculé entre 0.15 et 0.19 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0038	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 17/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

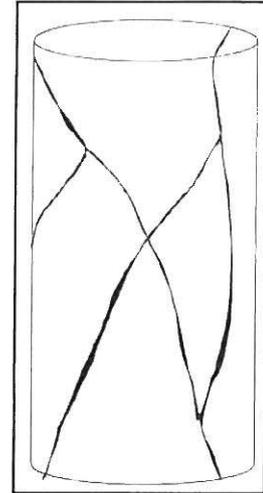
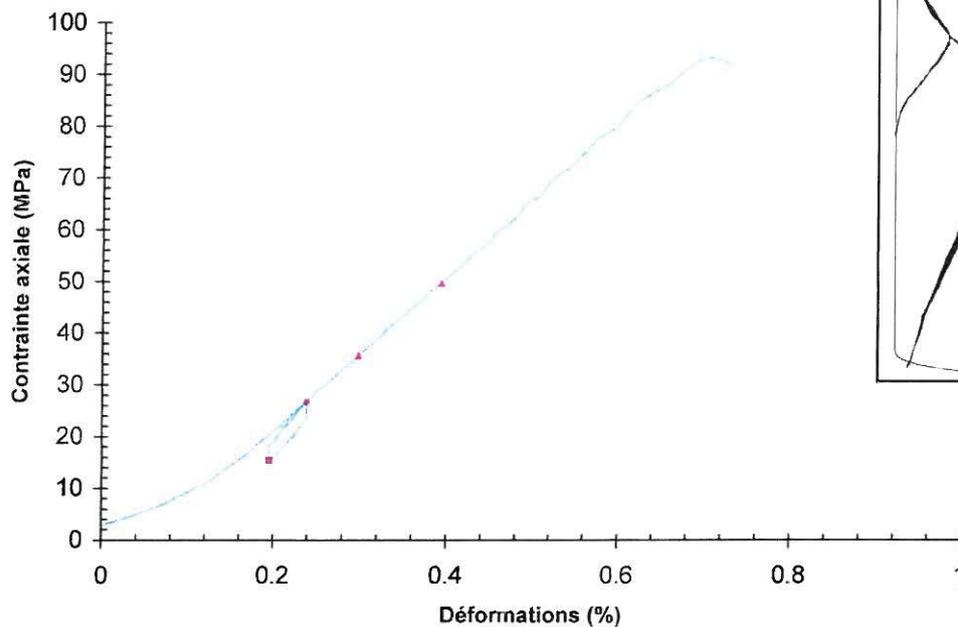
Sondage : B7

Elat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Grès très silicifié marron beige, localement rouille.

Observation :



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρh (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρd (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B7	4.89	9.67	18.8	477.05	2.63	0.0	2.63	175	93.4

Module de déformation tangent (GPa)	<b>Etan = 14.69 GPa</b>	Calculé entre 0.3 et 0.39 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	<b>Esec = 25.88 GPa</b>	Calculé entre 0.19 et 0.24 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0023	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 17/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

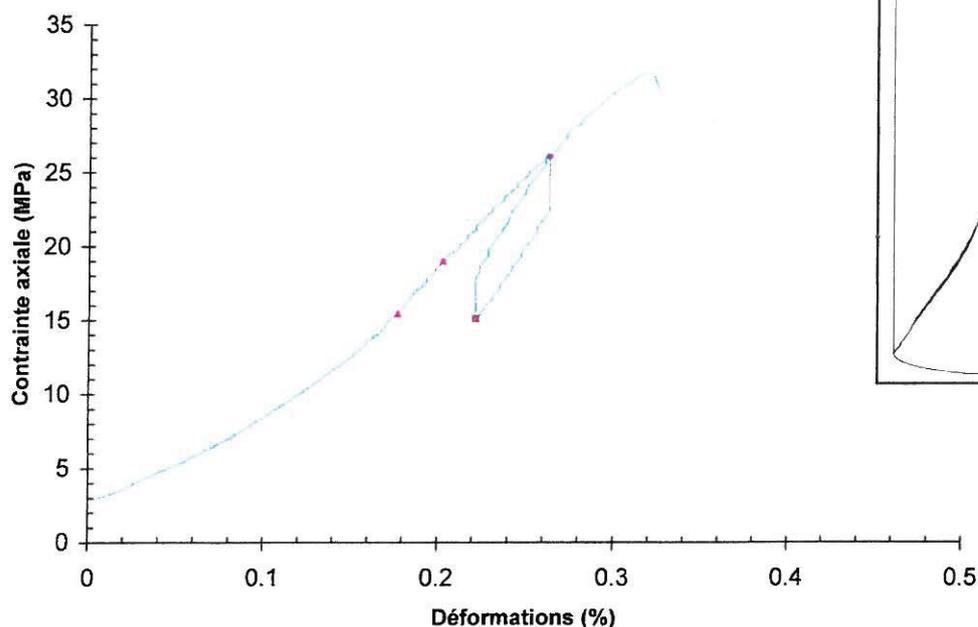
Sondage : B8

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Grès très silicifié marron beige, localement rouille.

Observation : Eproutette présentant des fissures recristallisées. Rupture prématurée suivant une fissure naturelle.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρh (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρd (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B8	4.96	10.65	19.3	539.02	2.62	0.0	2.62	61	31.8

Module de déformation tangent (GPa)	Etan = 13.83 GPa	Calculé entre 0.18 et 0.2 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	Esec = 26.35 GPa	Calculé entre 0.22 et 0.26 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0024	Déplacement

Opérateur

P. BROUARD

Contrôleur

C. POINCLOU

Fichier : Rc+E\_CENP130166\_B8.xls

## ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE (+ courbe de déformabilité)

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 17/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

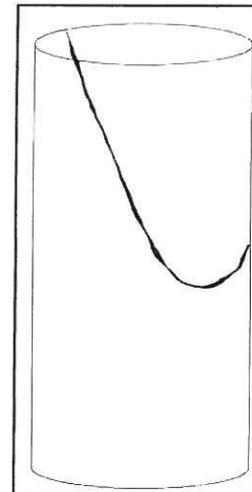
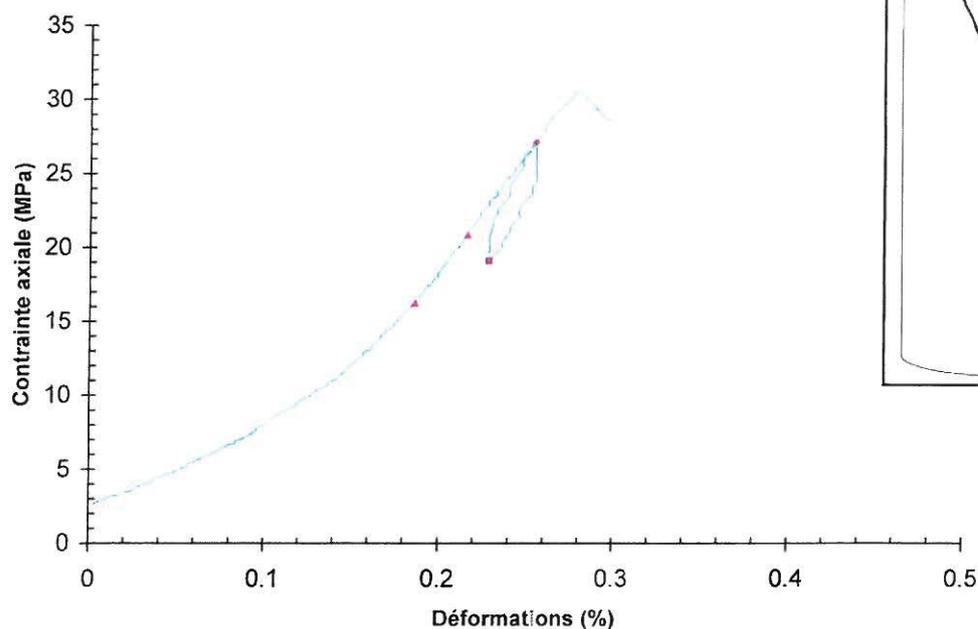
Sondage : B9

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Grès très silicifié marron beige, localement rouille.

Observation : Eprouvette présentant des fissures recristallisées. Rupture prématurée suivant une fissure naturelle.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rc (MPa)
B9	4.96	10.11	19.3	513.95	2.63	0.0	2.63	59	30.6

Module de déformation tangent (GPa)	E <sub>tan</sub> = 15.77 GPa	Calculé entre 0.19 et 0.22 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	E <sub>sec</sub> = 29.83 GPa	Calculé entre 0.23 et 0.25 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0025	Déplacement

	<b>Opérateur</b>	<b>Contrôleur</b>
	P. BROUARD	C. POINÇLOU

Fichier : Rc+E\_CENP130166\_B9.xls

**ESSAI DE COMPRESSION UNIAXIALE  
(+ courbe de déformabilité)**

NF P 94 - 425

Mode opératoire LMO 201

Date de l'essai : 17/04/2013

Chantier : Carrière de Voutré (53)

N° de projet : CENP130166

Client : INERIS

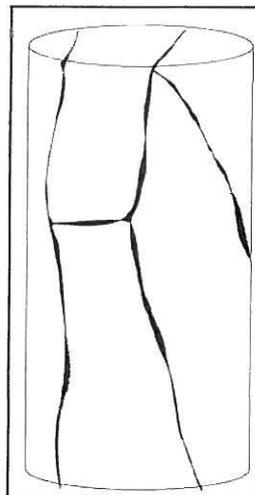
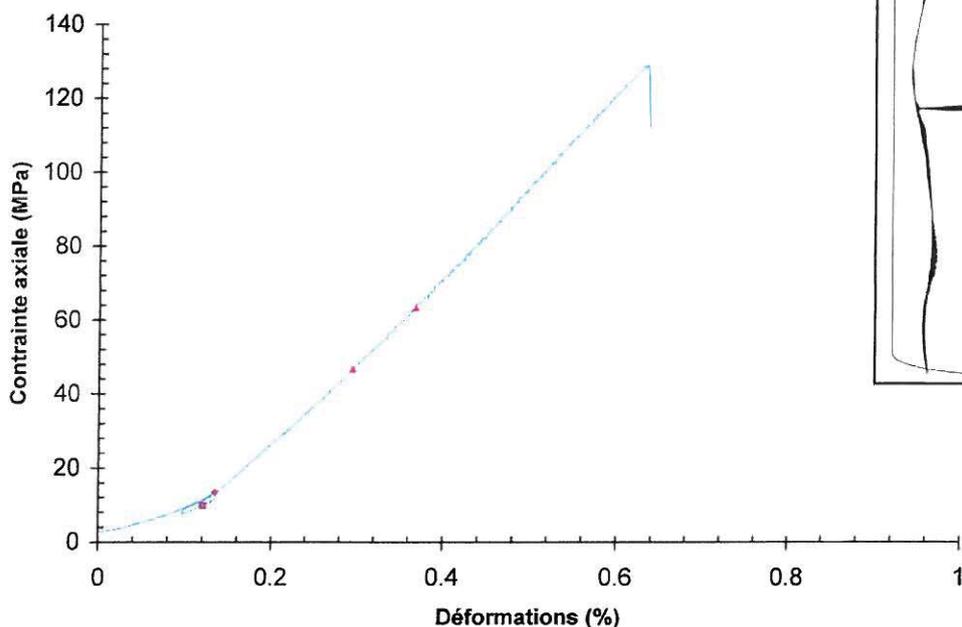
Sondage : B10

Etat : Intact

Profondeur : Non communiquée

Nature : Grès très silicifié marron beige, localement rouille.

Observation : Eprouvette présentant de nombreuses fissures plus ou moins ouvertes. Rupture suivant les fissures naturelles.  
Les cycles de charge-décharge ont été réalisés prématurément par rapport à la rupture.



N° échantillon	D ou Coté (cm)	H (cm)	S (cm <sup>2</sup> )	Masse (g)	ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	R <sub>c</sub> (MPa)
B10	4.97	10.47	19.4	542.33	2.67	0.0	2.67	251	129.4

Module de déformation tangent (GPa)	E <sub>tan</sub> = 22.75 GPa	Calculé entre 0.37 et 0.29 % de déformation
Module de déformation sécant (GPa)	E <sub>sec</sub> = 25.88 GPa	Calculé entre 0.12 et 0.13 % de déformation

Presse utilisée	Vitesse de chargement (%/s)	Asservissement
LGC 2000 KN	0.0015	Déplacement

Opérateur	Contrôleur
P. BROUARD	C. POINCLOU

Fichier : Rc+E\_CENP130166\_B10.xls

ECHANTILLON		AFFAIRE
Echantillon :	/	Méca roche pour l'INERIS Carrière de Voutré
Profondeur :	/	
Nature :	/	

n° ech.	D (cm)	L (cm)	Masse (g)	$\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Force (KN)	Rtb (MPa)	Observations
B1	4.96	5.05	265.22	2.72	0.0	2.72	66.9	17.0	
B2	4.97	5.21	274.90	2.72	0.0	2.72	74.5	18.3	
B3	4.94	5.77	295.59	2.67	0.0	2.67	51.5	11.5	
B4	4.98	5.58	289.68	2.67	0.0	2.67	44.7	10.2	
B5	4.95	5.62	288.80	2.67	0.0	2.67	81.6	18.7	 (1) et (2)
B6	4.97	5.67	294.73	2.68	0.0	2.68	48.6	11.0	 (1) et (3)
B7	4.89	5.41	266.08	2.62	0.0	2.62	41.2	9.9	
B8	4.97	5.56	284.93	2.64	0.0	2.64	37.3	8.6	
B9	4.96	5.69	291.78	2.65	0.0	2.65	56.7	12.8	 (1) et (2)
B10	4.95	5.45	273.23	2.61	0.0	2.61	48.6	11.5	 (1) et (4)

## OBSERVATIONS :

Les fissures naturelles apparaissent en pointillés sur les schéma.

- (1) : Eprouvette présentant des fissures naturelles.
- (2) : Ouverture d'une fissure perpendiculaire après la rupture en traction.
- (3) : Double rupture en traction, en relais sur une fissure naturelle perpendiculaire.
- (4) : Double rupture en traction, dont une suivant une fissure naturelle.

	Opérateur	Contrôleur
	P. BROUARD	C. POINCLOU



## **ANNEXE C**

### **Approche analytique pour le flambage du banc**



Avant de décrire les différentes formulations utilisées pour évaluer la stabilité au flambement des bancs de roche, il convient d'en préciser la définition et quelques éléments scientifiques<sup>2</sup>.

**Définition du flambement (ou flambage) :** en résistance des matériaux (RDM), le flambage est un phénomène d'instabilité élastique mis en évidence lorsqu'une poutre est comprimée. Il se développe un moment de flexion parasite amplifié par les déformations et les déplacements de la poutre chargée.

Le flambage se produit d'autant plus facilement que la poutre est longue et de faible section. Il dépend aussi du type de liaisons des extrémités de la poutre.

Le modèle de RDM qui doit être employé n'est pas linéaire. Sa résolution se fait par itérations successives jusqu'à convergence éventuelle du résultat. Ce modèle met en évidence des instabilités dont la charge critique d'Euler est un exemple simple.

Ainsi, pour une poutre d'inertie constante soumise à un effort normal de compression simple, la

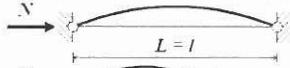
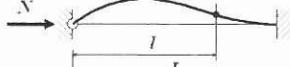
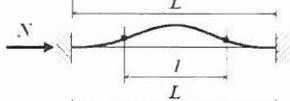
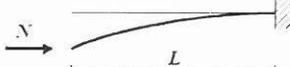
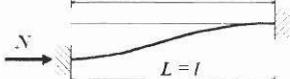
charge critique de flambage théorique est donnée par la formule d'Euler : 
$$F = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2}$$

où

- $E$  est le module d'Young du matériau ;
- $I$  est le moment quadratique de la poutre ;
- $l_k$  est la longueur de flambement de la poutre.

Cette charge critique est évidemment limitée par la résistance en compression de la poutre (à partir d'un certain élancement, la ruine est atteinte avant l'apparition du flambage). Dans le cas réel, la ruine par flambage est atteinte encore plus précocement en raison notamment des imperfections (voir ci-après).

Le facteur  $l_k$  représente une longueur équivalente à celle, par exemple, d'une poutre rotulée-rotulée. Il s'agit de la distance séparant deux points d'inflexion de la déformée de la poutre. Le tableau suivant représente quelques cas simples de liaisons parfaites :

Conditions d'appuis	Longueur de flambement $l_k$	
Sans déplacement des extrémités (nœuds fixes)		$L$
		$0,7L$
		$0,5L$
Avec liberté de déplacement aux extrémités (nœuds déplaçables)		$2L$
		$L$

*Longueurs de flambement pour quelques cas simples*

<sup>2</sup> Sources nombreuses dont Wikipédia

Pour cette étude, nous avons retenu deux cas de figures qui correspondent à deux états possibles du banc de roche :

- Le banc est rotulé aux deux bouts, ce qui correspond à  $l_k = L$  ;
- Le banc est encastré en pied et libre en tête, ce qui correspond à  $l_k = 2 L$ .

On définit habituellement un paramètre géométrique  $\lambda$ , appelé coefficient d'élanement (sans

dimension) :

$$\lambda = \frac{l_k}{\rho}, \quad \text{avec} \quad \rho^2 = \frac{I}{S}$$

où  $\rho$  est le rayon de giration de la poutre et  $S$  la section de cette poutre.

On peut alors définir un coefficient d'élanement critique  $\lambda_c$  (sans dimension), qui ne dépend

que des propriétés du matériau :

$$\lambda_c^2 = \frac{\pi^2 E}{\sigma_e}$$

où  $\sigma_e$  est la limite d'élasticité du matériau, puis le coefficient d'élanement relatif  $\lambda_{rel}$  (sans

dimension) :

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_e}{E}}$$

En pratique, la formule d'Euler n'est pas directement utilisée pour dimensionner une poutre. En effet, la charge critique de flambage d'Euler ne pourrait être atteinte que dans le cas idéal d'une barre parfaitement rectiligne et homogène, sans aucune imperfection géométrique et chargée sans aucune excentricité. Dans la réalité, ces imperfections ont pour conséquence de mener à un flambage précoce de la barre, sous-estimé par la formule d'Euler. Enfin, la charge ultime est évidemment bornée par la résistance de la section en compression pure ( $\sigma_e S$ ).

Pour tenir compte de manière unifiée de ces différentes considérations, la pratique développée habituellement consiste à introduire un facteur de flambage  $\chi$  servant à réduire la résistance en section de la barre (compression simple)  $F_R = \sigma_e S$  pour arriver à sa résistance globale en compression  $F_{R,k} = \chi \cdot F_R = \chi \cdot \sigma_e \cdot S$ .

Ce facteur de flambage, issu de simulations numériques et de résultats expérimentaux, est généralement défini comme suit :

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_{rel}^2}} \leq 1$$

où  $\Phi$  est un facteur défini selon le matériau utilisé et le type d'imperfections. Ce facteur peut

s'écrire :

$$\Phi = \frac{1 + \alpha(\lambda_{rel} - 0,2) + \lambda_{rel}^2}{2}$$

Dans cette formule,  $\alpha$  est le facteur d'imperfection du matériau ; il dépend de la direction de flambage considérée et du matériau. Ce coefficient n'est pas défini pour les roches mais il vaut 0,49 dans le cas d'une section pleine d'acier, cas qui se rapproche le plus de la situation étudiée.

Pour le cas qui nous intéresse, les différentes données du problème ont été définies comme suit pour représenter la situation actuelle (cote 216 NGF) :

- L'épaisseur, la longueur et l'inclinaison de la dalle sont des données géométriques imposées par le projet. On considère que la couche supérieure de la dalle fait 2 m d'épaisseur, 110 m maximum de longueur, pour une inclinaison de l'ordre de 50° (profils n°5, 6 et 7).
- La masse volumique de la dalle a été estimée à 24 kN/m<sup>3</sup> (valeur classique pour une roche, proche de celle du béton) ;
- Le module d'Young et la limite élastique de la dalle de roche sont estimées par calage, en cohérence avec des valeurs<sup>3</sup> classiquement employées pour des matériaux similaires.

Une feuille de calcul Excel a été réalisée pour faciliter le calcul de ces différentes grandeurs.

Bien que cette approche soit clairement inadaptée pour une poutre inclinée sur appuis continus, elle donne toutefois des ordres de grandeurs minimaux pour l'évaluation du module de Young et de la résistance à la compression. Cette première approche a permis d'estimer les valeurs suivantes :  $E = 30 \text{ GPa}$  et  $Re = 5 \text{ MPa}$  (limite élastique).

Elles ont été utilisées pour réaliser un calcul préliminaire aux éléments finis, en attendant de disposer des résultats des essais de laboratoire (calculs non présentés dans ce rapport).

---

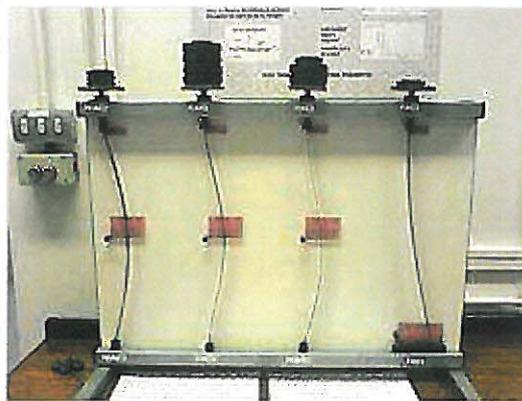
<sup>3</sup> Modules d'Young du béton : de 20 à 50 GPa – du Marbre : 26 GPa – du granite : 60 GPa.

### Estimation du risque de Flambement de la dalle de pierre violette

Module de young E :	3,00E+07 kPa
épaisseur de la dalle e :	2 m
Longueur de la dalle L :	110 m
Inclinaison de la dalle $\beta$ :	50 °
Masse volumique dalle $\gamma$ :	24 kN/m <sup>3</sup>
Limite élastique $\sigma_e$ :	5,00E+03 kN/m <sup>2</sup>
Facteur d'imperfection $\alpha$ :	0,49

Moment quadratique I =	0,67 m <sup>4</sup>	
Ro =	0,58 m	rayon de giration
longueur équivalente lk1 =	110 m	poutre rotulée au deux bouts
lambda 1 =	190,53	
longueur équivalente lk2 =	220 m	poutre encastree-libre
lambda 2 =	381,05	
lambda <sub>cr</sub> =	243,35	
lambda rel 1 =	0,78	
lambda rel 2 =	1,57	
Phi 1 =	0,95	
khi 1 =	0,67	
Phi 2 =	2,06	
Khi 2 =	0,29	
Flk1 =	16,31 MN	poutre rotulée au deux bouts
Flk2 =	4,08 MN	poutre encastree-libre
Fr1 =	6,73 MN	
Fr2 =	2,94 MN	

		sans	avec frottement
Force F liée au poids de la dalle Fp :	4,04 MN		3,03
	max	min	
coefficient de sécurité (F/Flk) Euler :	4,03	1,01	1,35
coefficient de sécurité (F/Fr) imperfection :	1,66	0,97	0,97



Approche basée sur la formulation d'Euler + Prise en compte d'un facteur d'imperfection du matériau

## **ANNEXE D**

### **Logiciel utilisé pour l'étude**



Direction opérationnelle : DRS      Unité : RNOS

Référence étude / CGR : DRS-13-134365-04401A

<b>Logiciel</b>	<b>Version</b>	<b>Fichier de configuration</b>	<b>Données de sortie/Résultats</b>
PLAXIS	2010.01	Fichiers .plx	Tous les fichiers de résultats

