

Table des matières

1.	Introduction.....	4
2.	Modèle physique	7
2.1.	<i>Cinématiques</i>	7
2.2.	<i>Constitutives</i>	7
2.3.	<i>Conservatives</i>	8
2.4.	<i>Second invariant du tenseur de contrainte</i>	9
3.	Modèle numérique.....	10
3.1.	<i>Staggered grid</i>	10
3.2.	<i>Conditions de bord</i>	11
3.3.	<i>Configuration du modèle</i>	12
4.	Résultats	14
4.1.	<i>Nombre d'Argand</i>	15
4.2.	<i>Forme et renforcement du tunnel</i>	17
4.3.	<i>Technique de forage</i>	18
4.4.	<i>Influence du milieux géologique</i>	21
4.5.	<i>Faille et Interface</i>	23
4.6.	<i>Diaclases</i>	25
5.	Discussion	26
6.	Conclusion.....	27
7.	Codes et Annexes	28
8.	Sources	33

Table des Illustrations

Page de titre : <i>Front de taille, gneiss du tunnel du Gothard (Géologie et mensurations, 2005)</i> ...	3
Fig. 1 : <i>Mineurs valaisans, vers 1940 (Papilloud, 1987)</i>	4
Fig. 2 : <i>Staggered grid (Halter et al., 2022)</i>	10
Fig. 3 : <i>Exemple de simulation et résultats basiques</i>	14
Fig. 4 : <i>Variation du champ de contrainte selon le nombre d'Argand</i>	15
Fig. 5 : <i>Évolution des contraintes en deux points avec le nombre d'Argand</i>	16
Fig. 6 : <i>Géométrie et champ de viscosité de différentes galeries</i>	17
Fig. 7 : <i>Champ de contrainte autour de différentes galeries</i>	18
Fig. 8 : <i>Champ de contrainte autour de plusieurs galeries ayant différents types de renforcement</i>	19
Fig. 9 : <i>Voûte en parapluie ; en 3D (gauche, (Chaubert, 2012)) et modélisation des contraintes (droite)</i>	19
Fig. 10 : <i>Champ de contrainte avec certaines structures avoisinantes à la galerie principale</i>	20
Fig. 11 : <i>Coupe géologique de la partie valaisanne (Sud) du tunnel de base du Lötschberg (Office fédéral de topographie Swisstopo, 2013)(Annexe 3, page 30)</i>	21
Fig. 12 : <i>Changement des contraintes avec le rapport de viscosité</i>	22
Fig. 13 : <i>Intersection avec une interface entre deux milieux</i>	23
Fig. 14 : <i>Interfaces entre les couches rencontrées lors du percement du tunnel Ouest, vue du Nord</i>	24
Fig. 15 : <i>Changement du champ de contrainte selon l'angle de l'interface</i>	24
Fig. 16 : <i>Évolution du champ de contrainte selon l'espacement entre les diaclases, valeur de plongement des diaclases = 25° et 135°</i>	25

1. INTRODUCTION

La géologie n'est pas une science toute nouvelle, mais elle bénéficie d'amélioration constante. Dès les années 1970, c'est l'implémentation de la géomodélisation, motivé par la recherche de pétrole et gaz et le besoin de représenter les champs pétrolifères qui apparaît. D'abord utilisée de manière simple pour la représentation des données de terrain, son rôle a rapidement évolué avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs pour apporter une réponse mathématique à un phénomène géologique, et permettre d'en comprendre son fonctionnement.

C'est donc fondamentalement à cet effet que le travail que vous avez entre les mains existe : si, en n'utilisant uniquement des équations d'états géophysiques connues on arrive à modéliser correctement un mécanisme existant dans la nature, alors on aura une meilleure compréhension dudit mécanisme et on pourra ensuite l'appliquer à une situation réelle, premièrement pour évaluer notre travail, secondement pour essayer de prévoir le comportement. Le but ultime, au-delà de la compréhension et satisfaction personnelle, est finalement ce qui a également poussé l'Homme à s'intéresser à ce qui se passait dans son environnement en tout premier lieu : pouvoir prévenir, se protéger, être maître de son milieu.



Fig. 1 : *Mineurs valaisans, vers 1940 (Papilloud, 1987)*

Ce travail s'appuie donc sur cette philosophie. On s'intéresse ici à la multitude de tunnels qui traverse notre région des Alpes. L'histoire de la Suisse primitive (Waldstätten) a une étroite corrélation avec le passage alpin du Saint-Gothard, et la Suisse moderne a gardé cette relation en facilitant le passage en souterrain au moyen de nombreux tunnels (tunnels de base), qu'ils soient ferroviaires ou routier. Le creusement des galeries

minières jusqu'au seins des montagnes, rejoins aussi ce désir d'exploitation des ressources naturelles (Fig. 1). Plus tard, ce sont les galeries d'amenée d'eau utiles à l'exploitation hydroélectrique qui perforent les massifs. Il n'est donc pas étonnant que la géologie se soit développée en parallèle avec les chantiers et intérêts de chaque siècle, particulièrement dans la subsurface.

De nos jours, la géotechnique est une science à part entière, mais la recherche continue. Et comme le raisonnement académique est une des conditions indispensables au succès de la recherche, on s'emploie dans ce travail à comprendre et visualiser la réaction d'un tunnel soumis à un taux de déformation au moyen d'un modèle numérique simple (Chap. 3). Réussir à modéliser correctement les contraintes et la déformation d'une telle structure n'est pas le seul objectif : il s'agira surtout de comprendre la mise en œuvre de la partie modélisation numérique, ainsi que les effets qu'ont divers paramètres externes ou internes sur un tunnel (Chap. 4). Puis, une fois que cela est bien maîtrisé, il sera possible de tester ces résultats avec une situation réelle (ou plusieurs) ou même de les appliquer à un projet futur.

Pour ce qui est d'application pratique, la Suisse regorge de projets pharaoniques : Les tunnels de base du Gothard, du Ceneri ou du Simplon ne sont que quelques-uns des derniers « chantiers du siècle ». La littérature géologique est donc abondante, c'est d'ailleurs grâce à ces ouvrages d'art que la compréhension des massifs alpins a pu progresser. Un cas particulièrement intéressant est celui du tunnel du Lötschberg, reliant la ville de Viège en Valais à Frutigen et plus loin Spiez, Thoune dans le canton de Berne. Cet axe important a été construit sur une période de 10 ans de 1994 à 2005, et mis en service en 2007. Initialement prévu en double tube sur toute la longueur du tracé, la galerie entre Ferden (Lötschental, VS) et Frutigen (BE) ne comporte qu'une seule galerie aménagée, faute à un manque de moyen financier. Sa construction a permis au Valais de sortir un peu de son isolement géographique en coupant drastiquement les temps de transit (-45 minutes pour Berne (vs.ch, 2007)), grâce également à la vitesse de pointe de 250km/h atteinte à l'intérieur.

Le tracé recoupe de nombreuses unités géologiques (Fig. 11), et son percement a permis l'émergence de nouvelles études concernant notamment le massif de l'Aar. La succession des couches est globalement la suivante : on traverse tout d'abord la couverture sédimentaire autochtone Jurassique / Triassique avant d'arriver dans le massif de l'Aar. Celui-ci est composé principalement de granodiorite et gneiss dans sa partie externe, de granite dans sa partie interne. Une petite écaille sédimentaire est quand même parvenue à s'intégrer dans l'édifice au sud du massif central de l'Aar lors

du plissement, la « Jungfrauail » (coin de la Jungfrau). C'est la même chose pour deux petites zones de métapélite schisteuse retrouvées directement sous le Lötschental. Dans la partie nord du tunnel, on traverse ensuite les nappes Helvétiques (Morcles-Doldenhorn) puis Ultra-Helvétiques (Wildhorn).

Ces informations nous seront plus tard utiles pour tester certaines variables dans la modélisation. Commençons donc sans plus tarder.

2. MODÈLE PHYSIQUE

Le modèle utilisé est en grande partie fourni par Halter et al. (2022). Originellement, celui-ci caractérise le comportement d'inclusions dans une matrice 2D soumise à un taux de déformation. Or, dans notre cas, on peut considérer le tunnel comme une inclusion faible à l'intérieur d'une matrice plus dure, le massif. L'angle d'attaque pour modéliser les contraintes et la déformation est le suivant : on détermine un cisaillement pur instantané qui déforme la matrice avec le tunnel, puis on calcule les contraintes, les pressions, etc. résultantes de ce mouvement.

On utilise ici la méthode des différences finies dans laquelle on résout les équations de manière itérative. Ainsi, chaque itération s'approche un petit peu plus de la solution finale, et lorsque la différence entre chaque itération devient plus petite qu'une certaine tolérance ou erreur, on a un modèle stable et « juste ». Les équations que l'on résout peuvent être assemblées dans un système d'équation, ou il y a autant d'inconnue que d'équations. Il est possible de les séparer en trois parties, selon les fonctions qu'elles remplissent.

2.1. CINÉMATIQUES

Ces équations déterminent le taux de déformation à l'intérieur du modèle. On en calcule le taux de déformation horizontal D_{xx} , le taux de déformation vertical D_{yy} , et le taux de déformation cisailant nommé D_{xy} . Ceux-ci sont le rapport du gradient de vitesse V sur la distance dans le modèle 2D. Ils ont donc une unité de s^{-1} :

$$D_{xx} = \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (1)$$

$$D_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y} \quad (2)$$

$$D_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \quad (3)$$

Ces trois taux sont en fait des tenseurs de déformation, cela veut dire qu'ils n'effectuent pas de variation de volume, ce qui est la définition d'une déformation pure.

2.2. CONSTITUTIVES

Une fois que le taux de déformation est déterminé, il faut connaître le comportement des milieux modélisés. Pour cela, il convient de relier la déformation à la contrainte selon la loi de Hooke. La relation donnée fait appel à deux types de déformation : la contrainte

est donnée en fonction de la viscosité effective du milieu, mais est aussi fonction de l'incompressibilité. Pour cette dernière, on utilise la relation suivante :

$$\sigma = \lambda * \sum_i \varepsilon_i \quad (4)$$

Où : $\lambda = 1^{\text{er}}$ coefficient de Lamé

$\varepsilon_i =$ taux de déformation selon $i =$ la dimension

La contrainte est ensuite simplement l'addition des deux déformations. On a donc :

$$\sigma_{xx} = 2\mu D_{xx} + \lambda(D_{xx} + D_{yy}) \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu D_{yy} + \lambda(D_{xx} + D_{yy}) \quad (6)$$

$$\sigma_{yx} = 2\mu D_{xy} \quad (7)$$

Où : $\eta =$ viscosité effective [$Pa \cdot s$]

On remarque que l'incompressibilité ne change pas qu'importe la direction du tenseur, et est inexistant lors du cisaillement.

2.3. CONSERVATIVES

Puis, afin de s'assurer que le modèle soit en équilibre il faut quelques équations conservatives. Ces équations sont là pour s'assurer que les forces s'équilibrent au sein du modèle. On en a ici deux, une pour chaque axe :

$$\text{Axe } x : \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\text{Axe } y : \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho g \quad (9)$$

Où : $\rho =$ densité [-]

On a ici décidé d'incorporer la gravité dans l'axe vertical, sachant que la modélisation se passe dans le sens de la coupe du tunnel, perpendiculairement au sens de la galerie. Ainsi, et contrairement au code de Walter, la surface sera toujours plus haut que le modèle.

Ces équations sont ce que l'on appelle des équations différentielles partielles, ce sont elles qu'il faut résoudre grâce à la méthode des différences finies. Une fois la valeur de V_x connue, respectivement V_y , il est possible de déterminer la valeur de toutes les autres inconnues (équations 1 à 10). Ce processus se répète itérativement jusqu'à la valeur jugée suffisamment correcte.

2.4. *SECOND INVARIANT DU TENSEUR DE CONTRAINTE*

Enfin, il est possible de calculer ce que l'on appelle la racine carrée du second invariant du tenseur de contraintes (T_{II}). Cet invariant nous donne une valeur des contraintes indépendante, et nous permet de mieux comprendre la déformation. En effet, un milieu avec un grand second invariant T_{II} , donc une plus grande contrainte, a une plus faible viscosité. On le calcule de la façon suivante :

$$T_{II} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 2\sigma_{xy}^2)} \quad (10)$$

3. MODÈLE NUMÉRIQUE

3.1. STAGGERED GRID

Pour pouvoir implémenter ces équations dans le modèle, il nous faut discrétiser l'espace en une grille ayant la résolution voulue (Fig. 2). Cette grille présente donc des cellules de taille dx sur dy , définies à leurs coins par ce que l'on appellera les nœuds. Prenons donc une grille de 3x3 nœuds :

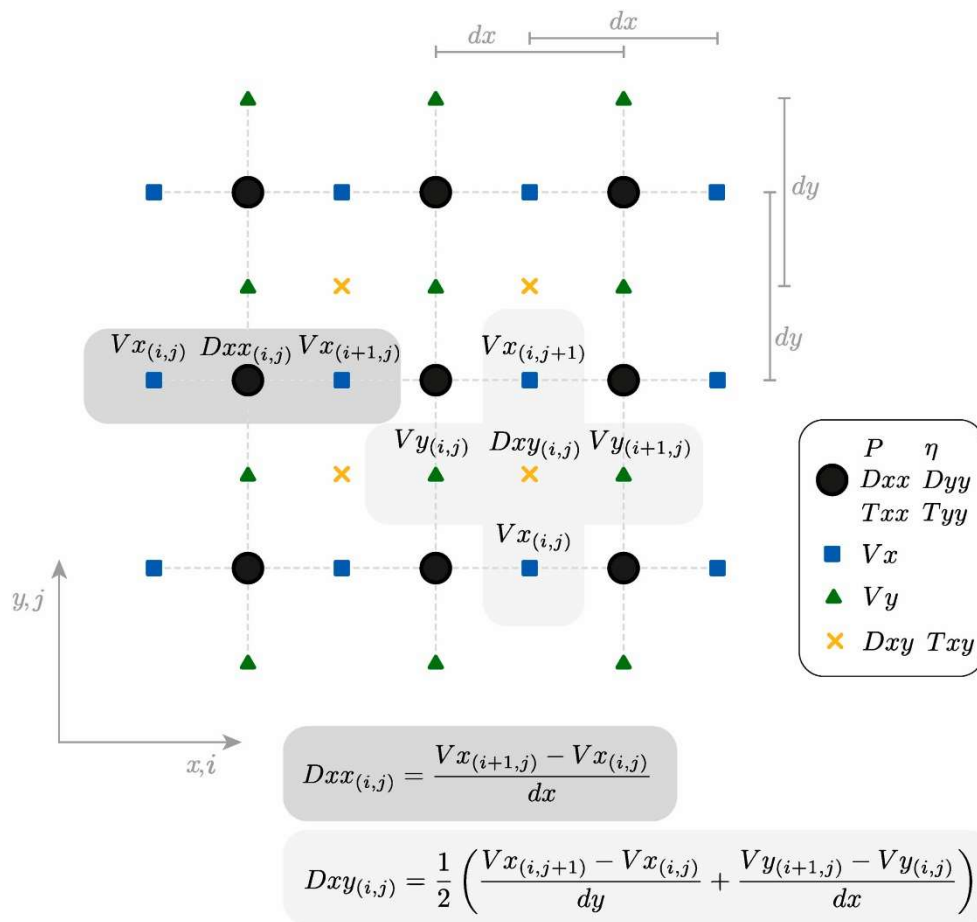


Fig. 2 : Staggered grid (Halter et al., 2022)

(Figure du staggered grid). Avec équation de V_x et une en croix avec TXY . Sinon essayer de reprendre la même disposition que Walter.

Les valeurs de taux de déformation, viscosité, ... sont définies sur ces nœuds, tandis que les valeurs de V_x , représentées par des triangles, sont systématiquement de part et d'autre des nœuds sur l'axe horizontal. Cela fait sens quand on se souvient que le taux de déformation en x est défini comme la dérivée de la vitesse sur la distance. En effectuant la dérivée, on réduit la taille de la matrice d'un élément dans la direction de calcul, et on se retrouve au milieu des deux vitesses, sur le nœud. C'est le même

raisonnement dans la direction y , ainsi que pour le tenseur de cisaillement. Pour ce dernier, puisque l'on effectue la dérivée une fois dans l'axe x , une fois dans l'axe y , sa valeur se retrouve sur le centroïde.

Cette grille est utile lorsqu'il faut exprimer les équations mathématiques dans le modèle : deux variables qui n'ont pas la même taille ne peuvent en aucun cas s'additionner ou se multiplier, c'est pourquoi il est utile de créer un tel « staggered grid ». Afin de faciliter les opérations d'extrapolation ou d'interpolation entre nœuds et centroïdes, on crée plusieurs fonctions, retrouvées à la fin du code sous l'appellation $n2c$ pour nœud au centre et $c2n$ pour l'inverse. Par exemple, pour exprimer l'équation (7) dans le modèle numérique, on écrit :

$$TXY = 2.*n2c(ETA).* DXY; \quad (11)$$

Ce faisant, sachant que ETA est une matrice de taille n_x par n_y et DXY $n_x - 1$ par $n_y - 1$, on fait appel à la fonction $n2c$ pour réduire la taille d' ETA afin de la faire coïncider avec DXY , autrement le calcul matriciel ne s'effectuerait pas.

3.2. CONDITIONS DE BORD

Afin que la gravité puisse correctement s'exprimer, il est important de donner les bonnes conditions de bords. En s'assurant que le champ de vitesse reste égal à 0 au sommet du modèle, on permet au milieu de se faire influencer par la gravité au lieu de rester « collé au plafond ». De même, imposer une différence entre la dernière et l'avant-dernière ligne de ce même champ de vitesse impose que la dérivée de la vitesse, c'est à dire le taux de déformation dans nos calculs, se voit réduire à 0, et le milieu ne peut pas s'échapper du modèle par le bas.

$$VY(:,end) = VY(:,end - 1); \quad (12)$$

$$VY(:,1) = 0 * VY(:,2); \quad (13)$$

$$VY([1 end],:) = VY([2 end - 1],:); \quad (14)$$

$$VX(:,1) = VX(:,2); \quad (15)$$

Ces considérations sont importantes lors de la mise en service du code, car ils ont une très grande influence par répercussion sur l'intérieur du modèle.

3.3. CONFIGURATION DU MODÈLE

Finalement, il nous faut implémenter dans le code la situation de départ, la configuration du modèle. Comme indiqué plus haut, on représente basiquement une inclusion faible dans une matrice forte, on doit donc modifier le champ de viscosité de départ. On définit ainsi la viscosité de base η_B qui est celle de la matrice, et la viscosité à l'intérieur du tunnel qui est celle de l'air. Aussi, un tunnel moderne possède une paroi en béton qui sert à la protéger contre les dangers géologiques, la rendre étanche et plein d'autres applications. Il faut donc donner une valeur de viscosité à cette couche aussi puisqu'elle oppose une résistance non négligeable à la déformation du massif.

Puis, une fois que cela est fait, on peut déterminer la forme du tunnel. La forme la plus simple étant le cercle, c'est ce qui est utilisé tout au long de ce travail. Il est pourtant utile de se rappeler qu'une galerie peut se décliner sous tout un éventail de forme et taille, selon son utilisation. On crée donc une fonction qui nous permet de choisir la forme avec laquelle travailler, et qui nous permettra d'investiguer son influence sur les résultats. En pratique, on détermine une relation logique (0-faux / 1-vrai) que l'on utilise pour donner une valeur à la matrice souhaitée sous la forme Matlab suivante :

$$\text{matrice}(\text{relation logique}) = \text{valeur du milieu} \quad (16)$$

À noter que l'on applique un traitement artificiel de lissage sur le champ de viscosité η afin de gommer les erreurs liées à la résolution du modèle.

Toujours avec la viscosité, il est tout à fait possible de traverser différents milieux avec leur viscosité propres. Géologiquement, cela se traduit communément par la limite entre deux nappes. Dans ce même contexte, certaines failles ou diaclases peuvent exister à l'intérieur d'un même massif. Ces deux types de discontinuités varient selon un angle α [°], une ouverture o [mm] et un espacement e [m] que l'on définit dans les paramètres physiques. Il ne reste ensuite qu'à « combler » les discontinuités par une viscosité correspondante à leurs remplissages.

Parmi les autres variables données et qui sont intéressantes à modifier, on peut citer le taux de déformation dans la matrice D_B et le nombre d'Argand. Ce nombre exprime le rapport entre contrainte causée par la gravité et la déformation horizontale, il permet donc de moduler l'influence de ces deux contraintes sur le modèle. On l'exprime de la manière suivante :

$$Ar = \frac{\rho g \cdot L_y}{2 \cdot \eta_B \cdot D_B} \quad (17)$$

Où : L_y = hauteur du modèle, ou encore la profondeur du fond du modèle

Lorsque la gravité domine, le nombre d'Argand augmente, et réciproquement. Si la déformation horizontale augmente cette fois-ci, alors le nombre d'Argand diminue. En remaniant un peu l'équation, on peut exprimer le facteur ρg en fonction du nombre d'Argand :

$$\rho g = \frac{Ar}{L_y} \cdot 2 \cdot \eta_B \cdot D_B \quad (18)$$

On obtient ainsi des commandes qui nous permettent d'avoir un grand contrôle sur la façon dont on veut que la simulation se déroule. Puis, finalement, les résultats sont donnés sans dimensions, de telle façon à ce qu'ils soient facilement convertissables en valeurs réelles au besoin.

4. RÉSULTATS

Maintenant que les bases du modèle ont été posées, il est temps de le faire tourner. Commençons par une simulation simple, avec une galerie circulaire dans une matrice homogène :

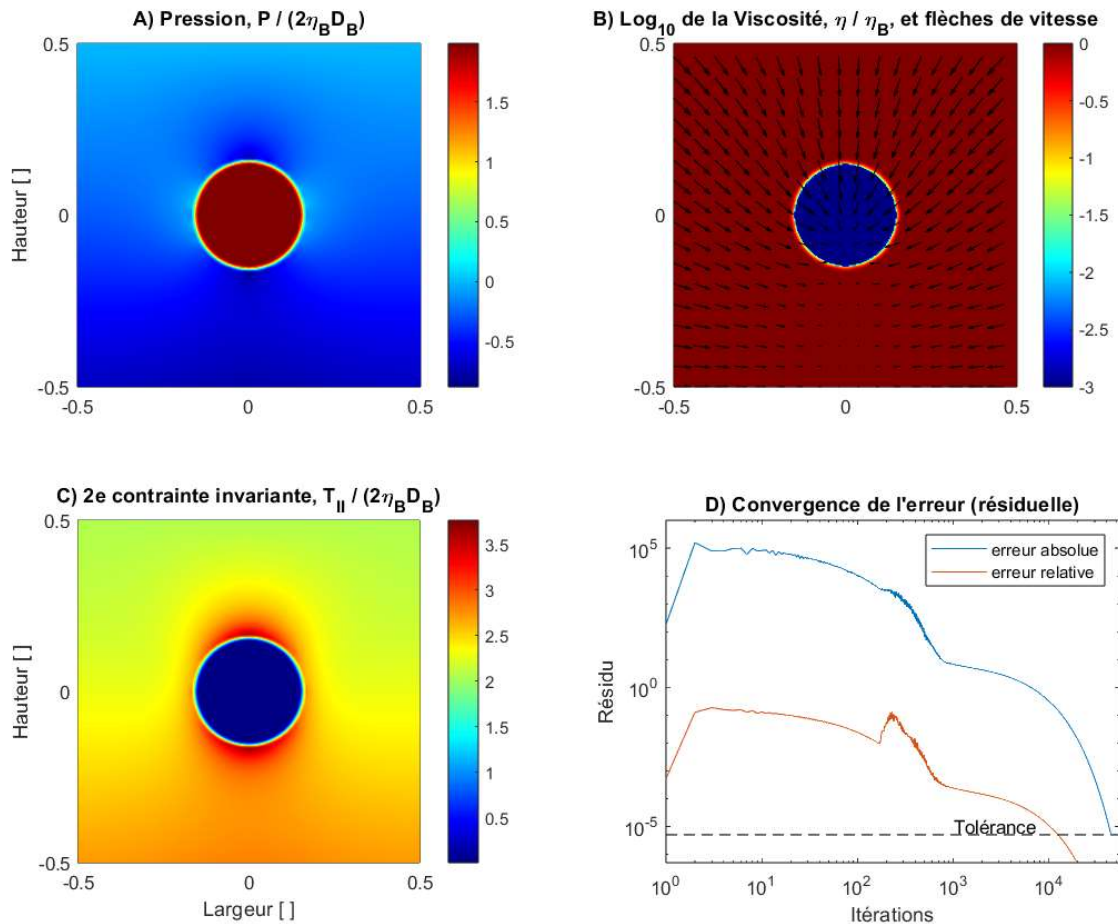


Fig. 3 : Exemple de simulation et résultats basiques

Comme on le voit sur la figure ci-dessus (Fig. 3), on représente 4 sous-figures : la première représente le champ de pression, la deuxième la viscosité avec le sens de déformation, la troisième est celle du second invariant du tenseur de contraintes. À nouveau, il faut noter que tous les résultats ont été rendu sans dimensions en les normalisant avec la matrice. On remarque qu'autour du cercle de la galerie, une ellipse apparaît. Cette ellipse verticale et rougeâtre indique une contrainte plus forte que dans la matrice, donc une viscosité effective plus faible et où la déformation sera localement plus forte.

Le 4^e sous-graphique en bas à droite nous montre la convergence du modèle. On représente ici les deux erreurs, relatives et absolues, ainsi que la tolérance au-dessous

de laquelle la modélisation s'arrête, sur le nombre d'itérations représenté sur une échelle logarithmique. On remarque qu'originellement l'erreur s'envole, mais redescends assez vite de manière plus ou moins constante en direction du seuil de tolérance.

4.1. NOMBRE D'ARGAND

Commençons par modifier le nombre d'Argand : en faisant varier la variable Ar entre $1e^{-2}$ et $1e^1$, on couvre les deux extrêmes entre uniquement la gravité et uniquement une contrainte horizontale :

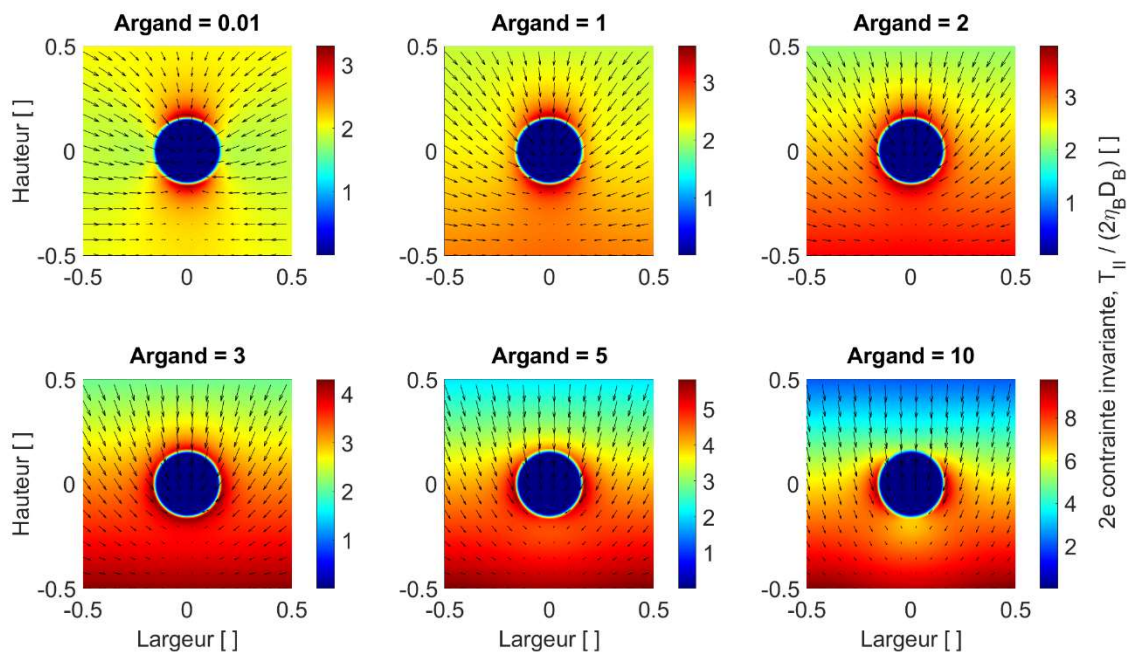


Fig. 4 : Variation du champ de contrainte selon le nombre d'Argand

On remarque bien que le champ de contraintes change avec le nombre d'Argand et que l'ellipse de contrainte principale change de direction. Lorsque on est en régime déformation horizontale, l'ellipse est verticale, tandis qu'en régime de déformation gravitaire, celle-ci est orientée horizontalement : elle est donc perpendiculaire à la déformation principale. On peut le justifier de la façon suivante : dans le tunnel, la viscosité est très faible, de sorte qu'elle n'oppose que peu de résistance à la déformation. Autour de la galerie cependant, la viscosité est celle de la matrice, c'est donc là que l'on doit accommoder la déformation, d'où la contrainte plus élevée.

Pour cela, on peut déterminer le chemin de contrainte qu'empruntent deux points situés à la limite entre la galerie et la matrice (Fig. 5). Le premier point est au plafond (A), le

deuxième est sur le mur de droite (B), et leur chemin est représenté sur le graphique ci-dessous :

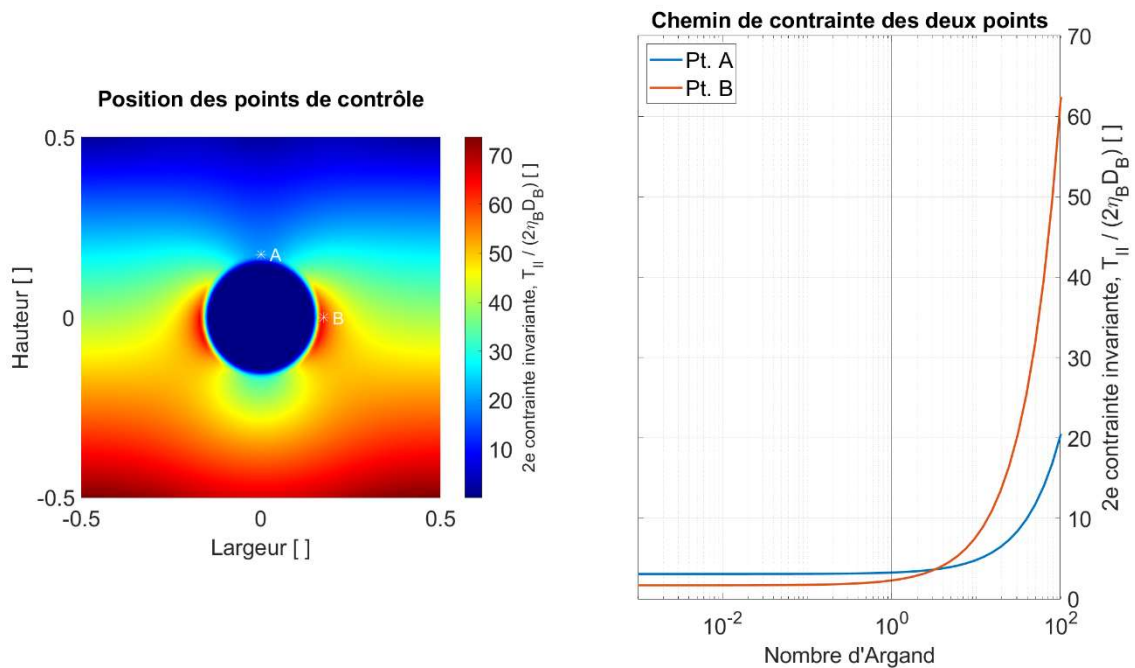


Fig. 5 : Évolution des contraintes en deux points avec le nombre d'Argand

On aperçoit distinctement le croisement aux alentours de $Ar = 1$ des deux courbes, signe que les contraintes principales changent de sens. Ce point d'équilibre entre les deux contraintes n'est ici pas exactement au point $Ar = 1$ (point d'équilibre théorique), cela est dû au choix des points de contrôle : en effet, on prend ici les points aux positions A(0, 0.18) et B(0.18, 0) soit pile dans les axes. Or, si on observe comme il faut la Fig. 5 de gauche, on remarque que les ellipses ne sont pas exactement droites, elles sont un peu plus dirigées vers le bas. Ainsi, le point du mur de droite n'est pas représentatif de l'axe de contrainte horizontal maximal et point d'équilibre est décalé.

Pour la suite du travail, on utilisera $Ar = 1$. Ainsi, on s'assure de ne pas biaiser les résultats avec un assemblage de contraintes invraisemblable.

4.2. FORME ET RENFORCEMENT DU TUNNEL

La forme du tunnel joue aussi un rôle dans la répartition des contraintes et de la déformation, il existe certains profils plus résistants que d'autres. On rassemble sur la Fig. 6 ci-dessous les formes les plus courantes de galerie :

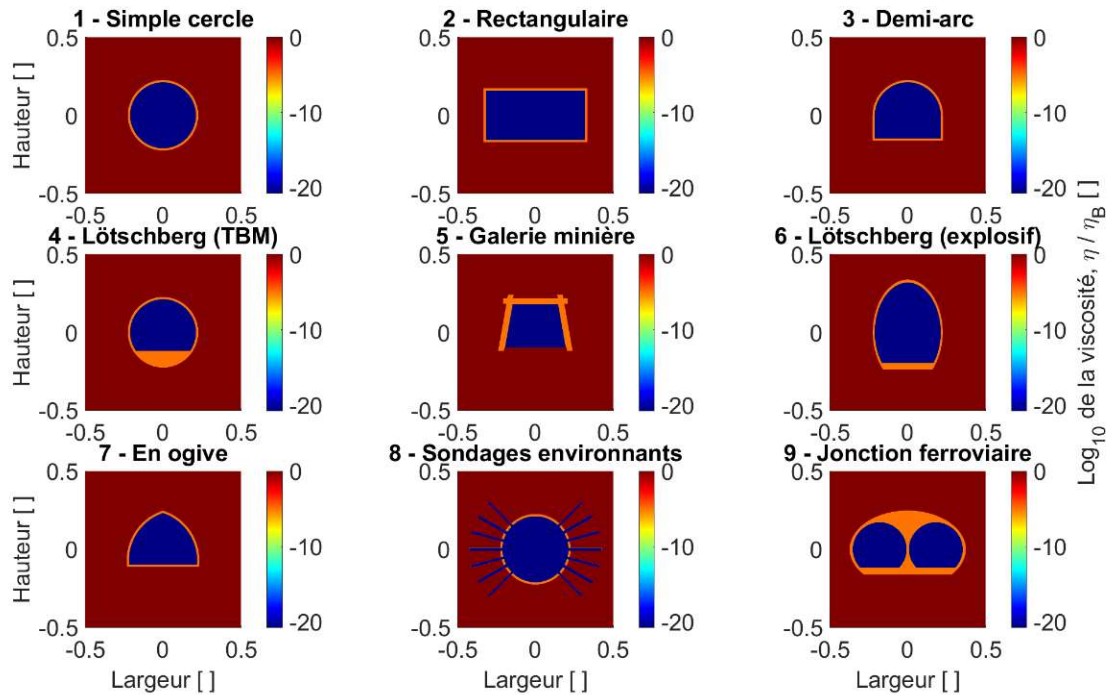


Fig. 6 : Géométrie et champ de viscosité de différentes galeries

Les différents profils ci-dessus dépendent également du type d'utilisation : par exemple, pour faire passer une autoroute double voie + bande d'arrêt d'urgence, un profil « large » est préféré. Au contraire, un tube ne faisant passer qu'une route de montagne aura tendance à préférer une structure en « demi-arc ». L'image que l'on se fait d'une galerie minière, avec ses étais en bois, est aussi une autre proposition de profil.

La forme différera aussi selon la technique de forage utilisée : pour le tunnel du Löttschberg, la partie avant le km 39 a été forée à l'explosif et ressemble à celle en position 6, tandis que pour le reste du tunnel en direction du Valais on a utilisé un TBM (Tunnel Boring Machine) et la section est parfaitement ronde (Fig. 6.4). On l'aura compris, il est impossible d'essayer de tout représenter, mais il est toujours utile de garder à l'esprit que d'autres solutions existent.

Reste à savoir s'il y a effectivement une différence dans le champ de contrainte :

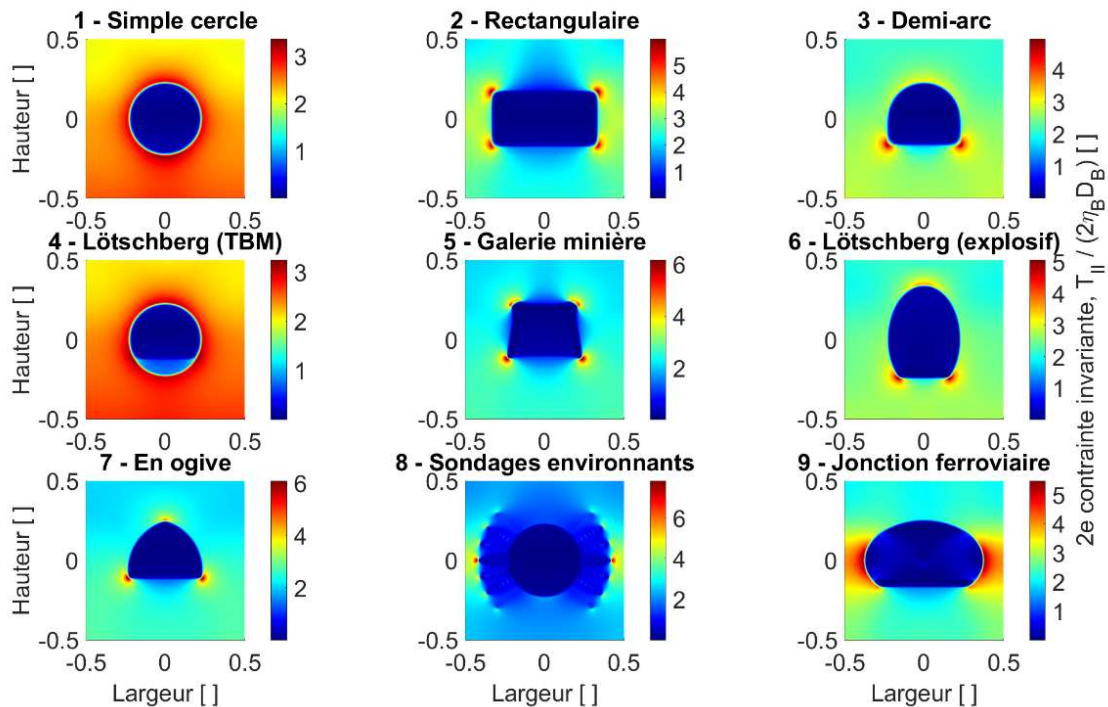


Fig. 7 : Champ de contrainte autour de différentes galeries

Comme on s'y attendait, la forme répartit différemment les contraintes. On observe que si une forme possède des angles ou une rupture dans la courbure, ces points attirent une grosse partie de la contrainte qui vient alors se concentrer. Au contraire, une forme beaucoup plus ronde répartira mieux les forces, le champ de contrainte sera plus diffus et la déformation aussi. Il faut ainsi faire bien attention lorsque l'on analyse les graphiques ci-dessus : la barre de couleur n'est pas fixe, elle s'adapte en fonction des valeurs minimales et maximales, et une galerie qui paraît ne plus subir de contraintes sur ses flans (Fig. 7.5 par exemple) est en fait soumise aux mêmes que s'il s'agissait d'un simple cercle. La couleur est faussée car la contrainte est très importante en un point, ce qui par contraste fait apparaître le reste de la matrice comme peu influencé.

4.3. TECHNIQUE DE FORAGE

En plus de la forme du tunnel, la technique de renforcement de la galerie influence sa bonne tenue. Si l'on rajoute des arcs de soutènement, on augmente la résistance de l'ensemble. Pareillement, une paroi bétonnée et clouée n'a pas le même effet qu'un simple coup de gunite : on voit bien sur la figure ci-dessous que la 2^e contrainte

invariante n'a pas la même distribution si l'on cloue la paroi, ou si l'on rajoute des arcs de soutènement.

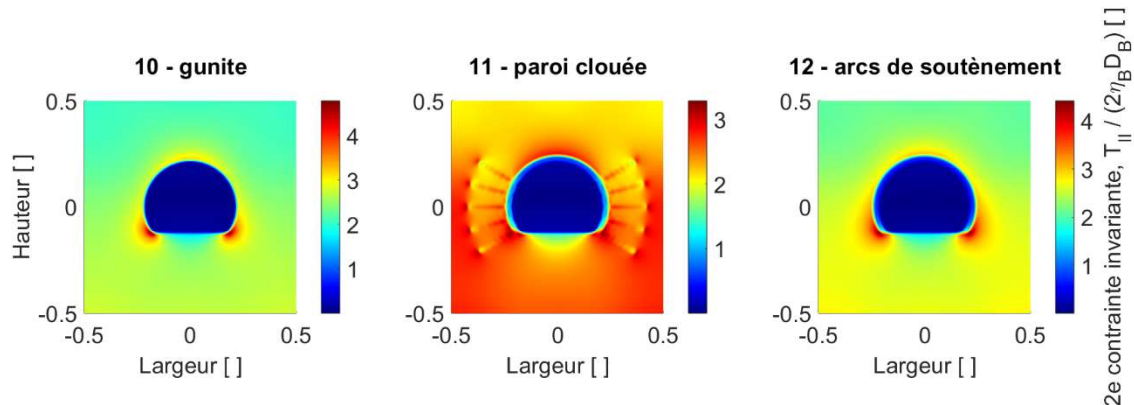


Fig. 8 : *Champ de contrainte autour de plusieurs galeries ayant différents types de renforcement*

La technique avec laquelle on avance dans la construction du tunnel exerce une influence aussi. Par exemple, lors d'une construction selon la méthode de voûte en parapluie (mise en œuvre dans le tunnel sous les pyramides d'Euseigne (VS)), on introduit des tubes en acier tout autour de la section que l'on désire creuser afin de renforcer le soutènement, puis on creuse et on répète plus loin :

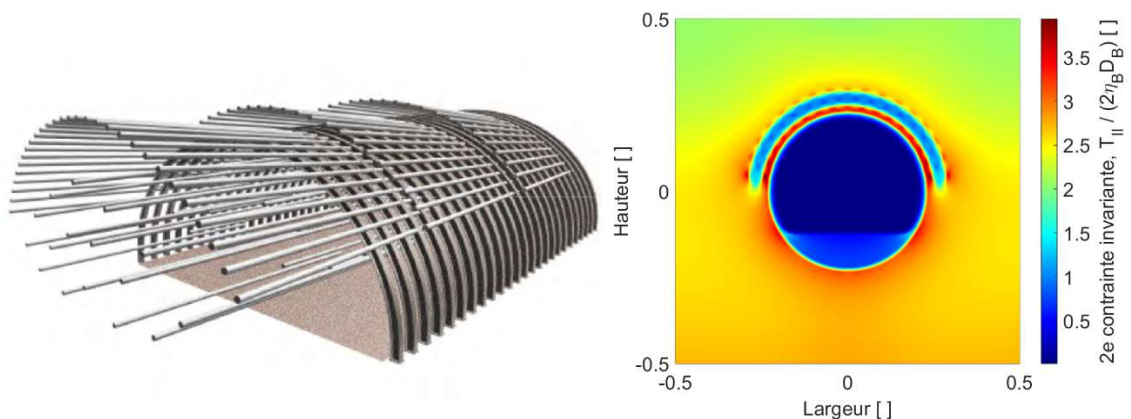


Fig. 9 : *Voûte en parapluie ; en 3D (gauche, (Chaubert, 2012)) et modélisation des contraintes (droite)*

Dans ce cas, on voit bien que le renforcement avec les câbles en acier forme une protection efficace contre la 2^e contrainte invariante T_{II} , qui se voit ainsi redistribuée dans toute la matrice.

De même, la technique propre de forage pourrait changer les paramètres de contraintes. Que ce soit par TBM ou par explosif, on n'attaque pas le rocher de la même façon. Comme mentionnée auparavant, le TBM creuse toute la section d'un coup circulaire, cela ressemble donc à une section de tunnel normale mais mise à nue, avant d'être

renforcée par des éléments bétonnés. Pour l'utilisation des explosifs par contre, on fore d'abord un trou dans la roche pour disposer de la charge et faire exploser la section. Ces trous sont cependant bien trop petits pour exercer une vraie influence sur le champ de déformation global.

Enfin, on peut investiguer l'effet qu'ont d'autres structures attenantes à la galerie principale. Par exemple, que se passe-t-il si une issue de secours est forcée à proximité ? qu'en est-il d'un forage de reconnaissance, ou un puit de ventilation exactement au-dessus ? La modélisation suivante (Fig. 10) permet de répondre à ces questions :

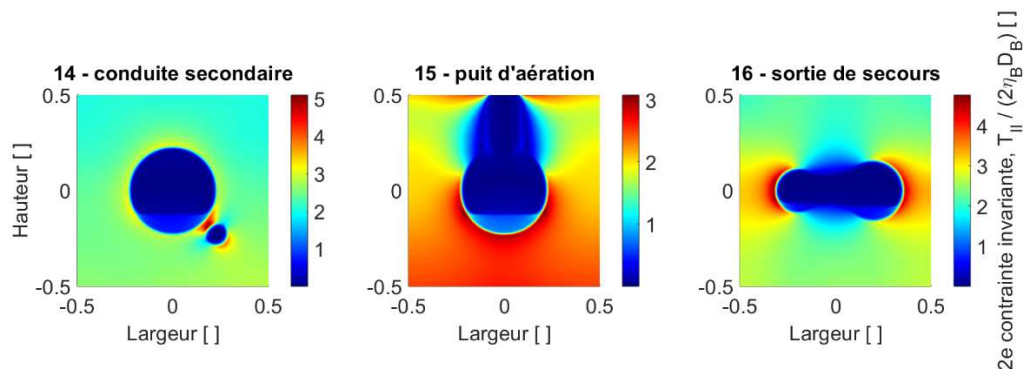


Fig. 10 : *Champ de contrainte avec certaines structures avoisinantes à la galerie principale*

Ces structures additionnelles ont visiblement un fort effet sur le champ de contrainte autour de la galerie principale. La proximité de la conduite secondaire (Fig. 10.14) provoque une forte contrainte dans le milieu situé entre les deux structures : les ingénieurs incorporent d'ailleurs la conduite secondaire directement dans l'ouvrage principal pour éviter que cela se produise. Il faut prendre la modélisation avec le puit d'aération (Fig. 10.15) avec des pincettes : on le fait ici déboucher au sommet de notre modèle, traversant ainsi les conditions de bords. Comme expliqué plus haut, ces conditions de bords sont importantes pour réguler les résultats que l'on obtient à l'intérieur même de la modélisation. Ce qu'il faut en retenir cependant, c'est qu'avec une telle structure verticale, on diminue fortement l'influence de la gravité sur le modèle entier. Finalement, On représente sur la sous-figure 16 une sortie de secours qui connecte la galerie principale avec une galerie plus petite d'évacuation ou de service. Ces deux galeries agissent comme une protection sur la sortie de secours, car l'ensemble est connecté. L'ensemble est par contre soumis à de plus grandes contraintes.

4.4. INFLUENCE DU MILIEUX GÉOLOGIQUE

Prenons comme exemple la partie Sud du tunnel de base du Lötschberg, la partie valaisanne donc. Le rapport préparé par (Ziegler & Isler, 2013, (Fig. 11)) présente certaines coupes intéressante rencontrées lors du percement :

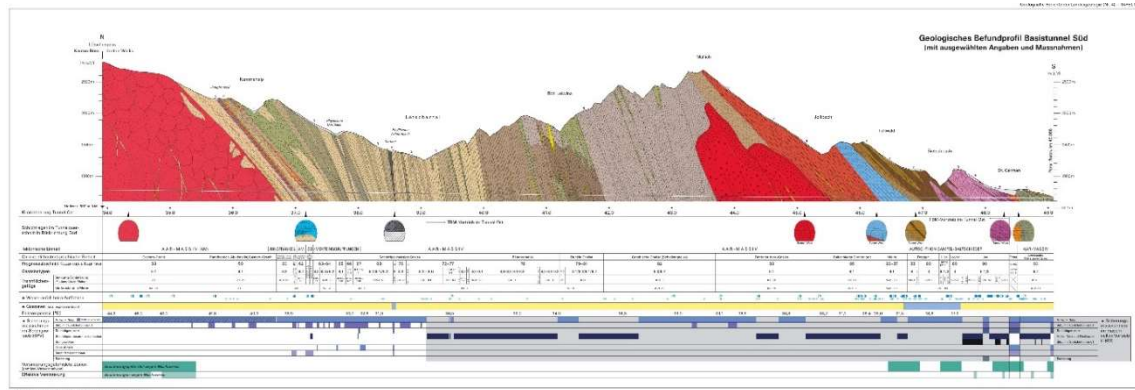


Fig. 11 : Coupe géologique de la partie valaisanne (Sud) du tunnel de base du Lötschberg (Office fédéral de topographie Swisstopo, 2013)(Annexe 3, page 30)

Dans cette région, les couches ont un certain plongement vers l'Ouest, c'est la continuation de la dépression du Rawyl. On se pose donc deux questions : quelle est l'influence du matériel géologique, et quelle est l'influence du contact entre deux unités et son orientation. Pour y répondre, on ne fait que changer le rapport de viscosité $\eta_{taRatio}$ entre matrice et inclusion (Fig. 12). Plus ce rapport est grand, plus la roche encaissante est dure, comme le granite du massif de l'Aar ou le gneiss du Lötschental. Si au contraire le rapport est faible, alors la matrice n'est plus aussi dure, typiquement une zone d'anhydrite ou de schiste carbonifère (Faldumbach).

Selon ces résultats, la variation de ratio de viscosité n'a pas d'influence sur les contraintes à proximité immédiate du tunnel lorsqu'il dépasse 10^3 . Ce seuil est facilement atteint : le « pire » milieu géologique rencontré dans le tunnel du Lötschental est la zone phyllite de Faldumbach, et même elle a une viscosité estimée à 10^{10} , soit 7 ordres de grandeurs plus élevé que le seuil établi. Bien entendu, sur le terrain, l'orientation de la schistosité de cette métapélite est parfois bien plus défavorable que la théorie exposée ici et l'excavation devient bien plus dangereuse.

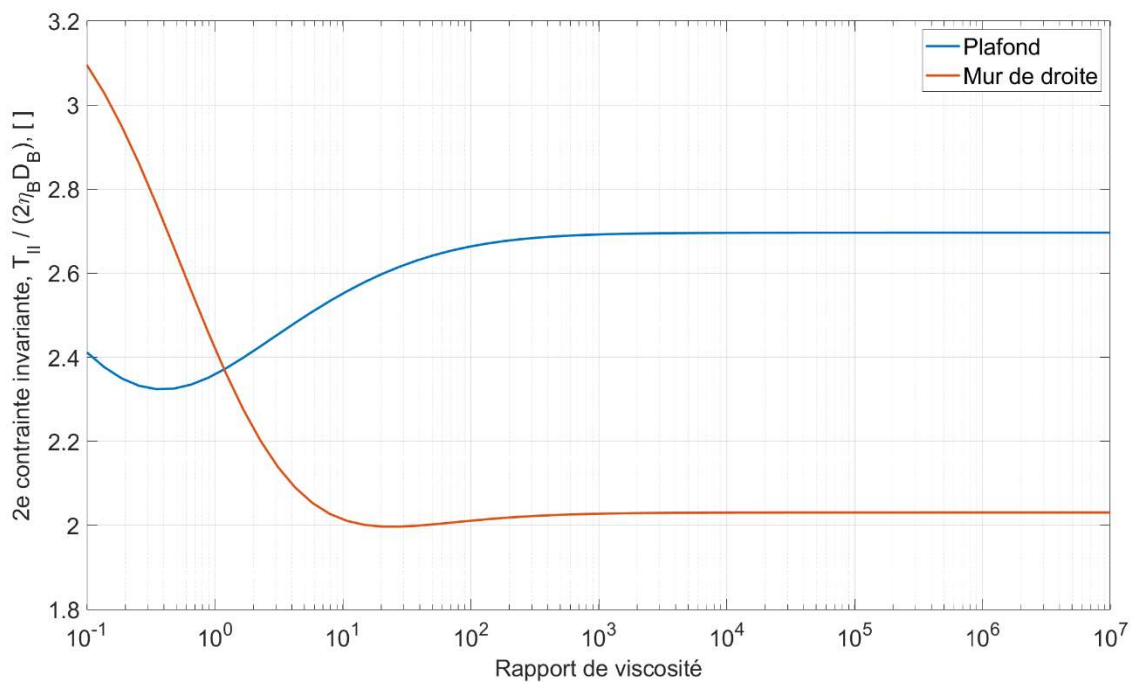


Fig. 12 : *Changement des contraintes avec le rapport de viscosité*

4.5. FAILLE ET INTERFACE

Comme notre modèle ne représente que 2 dimensions, il n'est pas possible de représenter les orientations des failles ou contacts telles qu'elles se retrouvent dans la nature, en 3D. Cependant, si on part du principe que l'on n'excave qu'une infime portion en profondeur, on peut faire l'hypothèse que l'orientation de ces accidents géologiques dans la direction de la galerie n'a que peu d'influence et la simulation 2D devient correcte. Ça n'est bien sûr qu'un argument théorique, pas du tout applicable sur le terrain. Dans notre cas, on est « chanceux » : le pendage des couches traversées sont plus moins perpendiculaires à la direction d'excavation, ce qui offre une bonne tenue.

Néanmoins, toujours dans le tunnel de base du Lötschberg, on traverse plusieurs unités tectoniques ayant chacune une viscosité différente. L'écart n'étant en principe jamais plus grand que quelques ordres de grandeurs, on réajuste le compartiment tantôt avec une viscosité plus élevée que le base, tantôt plus faible (Fig. 13) :

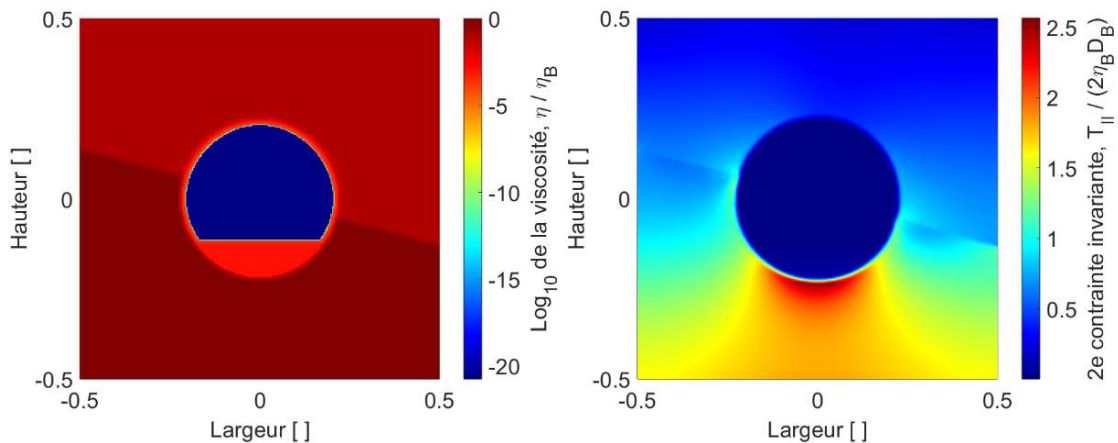


Fig. 13 : Intersection avec une interface entre deux milieux

Outre ce fait, l'orientation de l'interface peut elle aussi changer, soit selon la direction que l'on prend avec la galerie (en fonction de l'angle d'intersection du pendage), soit naturellement au travers des différentes unités. Selon le rapport disponible (Fig. 14), le pendage oscille entre 0 et 45°, mais rien ne nous empêche d'aller plus loin.

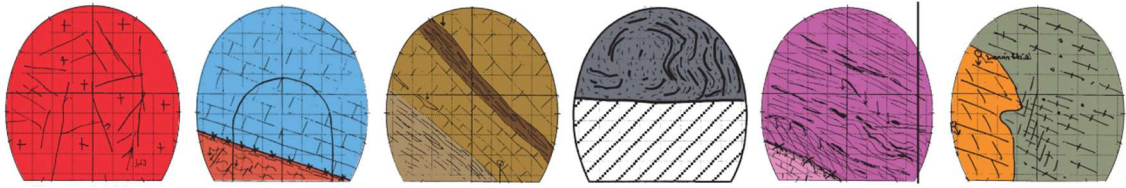


Fig. 14 : Interfaces entre les couches rencontrées lors du percement du tunnel Ouest, vue du Nord

Pour cela, et comme pour Argand (Chap. 4.1), on pose des points de contrôles à la limite entre la matrice et la galerie, et on regarde l'effet qu'a un changement d'orientation de l'interface. ci-dessous, on aperçoit clairement le passage entre les deux milieux, le moment où la courbe originellement horizontale (milieu compétent) s'infléchit soudainement et la 2^e contrainte invariante augmente rapidement (milieu plus visqueux).

À l'exception de la courbe rouge ??

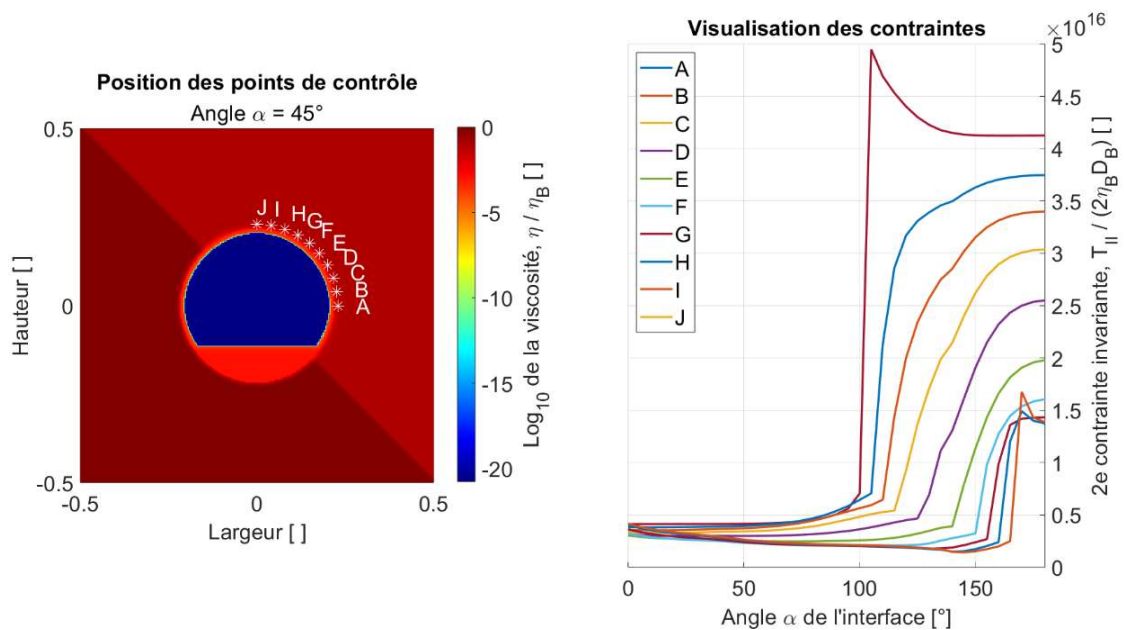


Fig. 15 : Changement du champ de contrainte selon l'angle de l'interface

4.6. DIACLASES

Les diaclases ne sont pas des interfaces à part entières ni même des failles car elles ne sont pas le produit d'un déplacement, mais leur présence fragilise souvent le massif, notamment en le séparant en plus petits blocs. Deux variables sont importantes à connaître : la première que nous venons d'étudier est l'orientation, la deuxième est l'espacement entre chaque diaclase. Reportons-nous une fois de plus à la coupe du Lötschberg : la ligne nommée « Trennflächengefüge » (litt. : structure des plans de séparation, i.e. diaclase) nous donne des valeurs approximatives fluctuant entre 0.002 et $> 1\text{m}$ et on leur donne des inclinaisons moyenne de 25° et 135° . Rapportée à la taille du modèle, on modélise des diaclases avec un espacement de 0.02, 0.16 et 5m (Fig. 16). On ne descend pas plus bas, car autrement la simulation n'est pas concluante, cela serait dû à la trop grande proximité des interstices, qui fusionnent alors ensemble et créent une matrice de vide. La solution serait alors d'augmenter la résolution du modèle, chose que la plupart des ordinateurs ne supporterait pas.

Les résultats obtenus sont surprenants : en effet, on s'attendait à ce que les diaclases aient une influence nette sur la tenue de massif, l'occurrence de ses fractures permettant aux contraintes de mieux se transmettre. Il en est tout autre ici, le champ de contrainte reste le même ou tout du moins le changement n'est pas visible : au sommet du tunnel, il est de respectivement 2.1521, 2.4723 et 2.5741 pour les 3 simulations.

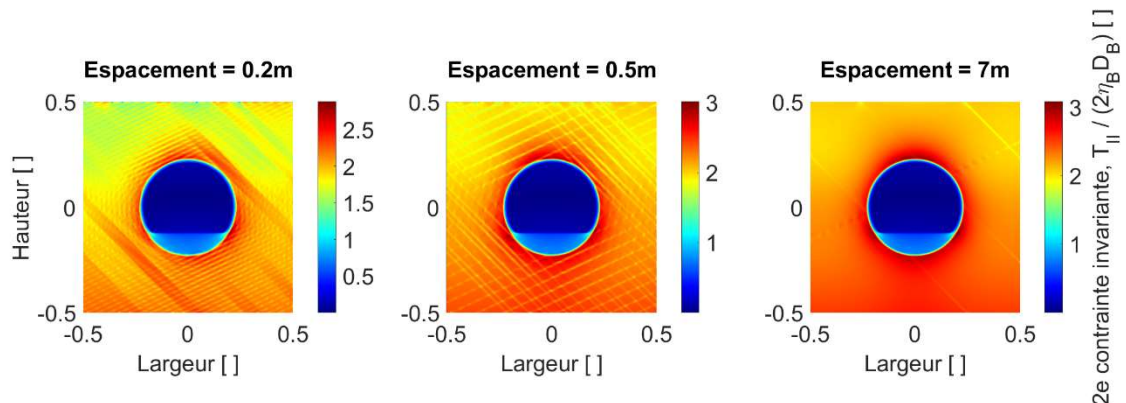


Fig. 16 : Évolution du champ de contrainte selon l'espacement entre les diaclases, valeur de plongement des diaclases = 25° et 135°

5. DISCUSSION

L'application de différentes situations dans le code nous permet d'évaluer la réaction d'un tunnel à une variable donnée. C'est ce qui a été fait ici, variable par variable. Grâce à cette structure de travail, il a été possible d'implémenter et de comprendre au fur et à mesure comment les contraintes se répartissaient autour d'une galerie. Les résultats présentés sont parfois logiques, parfois étonnants. Par exemple, bien que l'on comprenne tous comment les contraintes et déformations s'organise autour du cercle de base (Fig. 3), il a été étonnant de découvrir des grandes différences dans la magnitude et le positionnement des ellipses de déformation lorsque la forme de la galerie changeait (Fig. 7). C'est ce genre de réflexion qui permet ensuite aux ingénieurs d'avoir une meilleure base pour la conduite de leurs chantiers.

Le modèle ici présenté fait surtout réfléchir à la relation entre viscosité et contrainte / déformation. Ainsi, bien que la solution trouvée soit influencée par d'autres facteurs, le modèle est surtout dépendant du contraste de viscosité entre tunnel et matrice, voir même l'enveloppe du tunnel. La Fig. 12 montre clairement un changement important lorsque la différence est faible, plus du tout lorsque cette différence augmente. Or, on sait aussi qu'une matrice de schiste n'aura pas le même comportement qu'une matrice gneissique, car les plans de faille, de diaclases ou la schistosité même n'ont pas la même densité de l'un à l'autre. Cela nous pousse à nous demander si ces hétérogénéités sont ce qui influence vraiment la viscosité totale du massif, autre que sa composition géologique.

L'implémentation de la gravité et du nombre d'Argand n'a par contre pas autant d'effet qu'escompté, au-delà de modifier la direction de la contrainte principale. Elle est en revanche d'une grande aide pour comprendre certains profils de galerie : soumis à une contrainte horizontale, ces même profils résistants à la contrainte de gravité enregistrent une forte déformation (exemple : demi-arc, œuf). Sous ce même angle, la présence d'une autre structure ou hétérogénéité dans l'axe de contrainte principale augmente la déformation aux alentours de ces galeries, comme il a été montré sur la Fig. 10.

Ceci n'est cependant pas toujours possible : comme tout code, celui-ci a ces limites. Ici, outre les capacités propres à l'ordinateur où le programme tourne, le problème principal est la simplicité du code. Il faut au code MATLAB de nombreuses itérations pour arriver à un résultat sous la barre de tolérance ce qui résulte en un temps de traitement rallongé. La deuxième difficulté rencontrée est lorsque l'on veut appliquer des valeurs réelles de viscosité mais que celles-ci ont plusieurs ordres de magnitude de différence, alors les

valeurs divergent trop et la modélisation n'arrive jamais à sa fin. Ce qu'il faut alors faire est soit tricher avec les valeurs en réduisant cet écart, ce qui a souvent été fait ici mais qui n'entrave en aucun cas la compréhension des processus ; soit ajuster le coefficient CFLV : plus celui-ci est petit, plus la modélisation sera stable mais prendra du temps pour trouver une solution. Cette astuce ne marche d'ailleurs pas toujours.

Faut-il alors changer de manière de résoudre ce problème ? Parmi les candidats possibles, on peut citer la méthode pseudo-transient, plus robuste. Celle-ci aurait été parfaite si l'on s'intéressait au changement dans le temps de l'état du tunnel, ce que l'on ne fait pas ici. La méthode des différences finies est dans le cadre académique plus simplement applicable, car les équations théoriques se retrouvent dans le code et il devient bien plus intuitif de les modifier (chapitre 3).

6. CONCLUSION

En conclusion, la mise en œuvre de ce code et son application à un profil de tunnel en 2D a permis de mieux comprendre les forces, contraintes et déformations en jeux au cœur des montagnes. Le parallèle avec le tunnel de base du Lötschberg a pour but d'apporter un peu de concret au travail, et de raccrocher la théorie avec le terrain. À cet effet, ayons une petite pensée aux générations passées de géologues, ingénieurs et mineurs qui permettent aujourd'hui de mieux comprendre et travailler dans l'accomplissement des grands chantiers alpins à venir. Comme note de fin, on précisera que les fonds viennent d'être débloqués pour la construction du second tube dans le Lötschberg, ce qui permettra dans quelques années de traverser encore plus facilement la chaîne alpine avant le démarrage, qui sait, d'un autre chantier du siècle.

7. CODES ET ANNEXES

Le code principal, les différents codes MATLAB utilisés pour la création des différentes figures ainsi que les fonctions non reportées dans le code principal sont disponibles sur GitHub à l'adresse :

https://github.com/rschindf/TB_Une_Modelisation_Des_Contraintes_Et_Deformation_Dans_Un_Tunnel

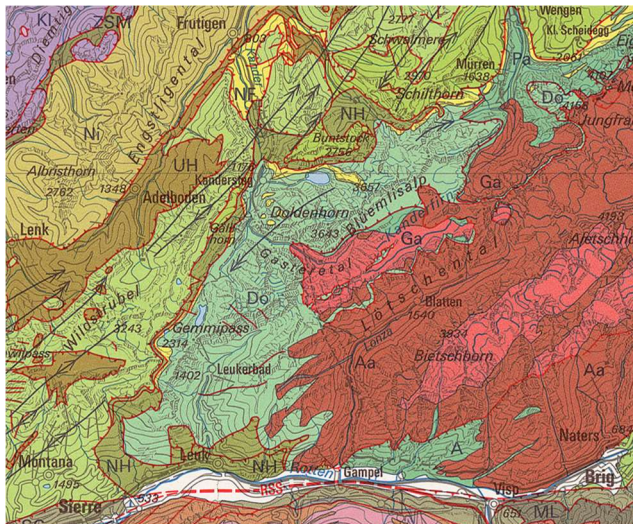
Les pages suivantes contiennent quelques annexes intéressantes, notamment :

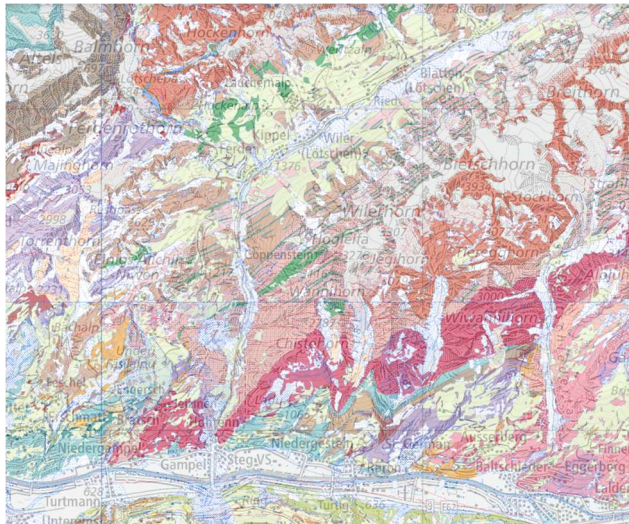
Page 28 : *Carte tectonique au 1:200'000 au-dessus du tracé du tunnel de base du Lötschberg (Swisstopo, 2024).*

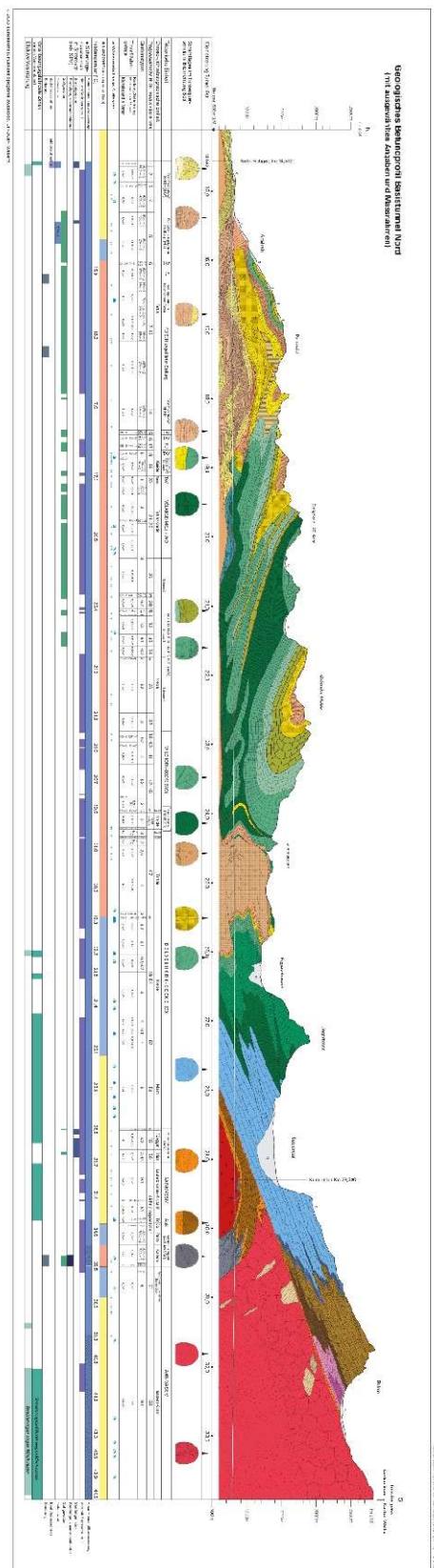
Page 29 : *Carte géologique au 1:200'000 au-dessus du tracé du tunnel de base du Lötschberg (Swisstopo, 2024).*

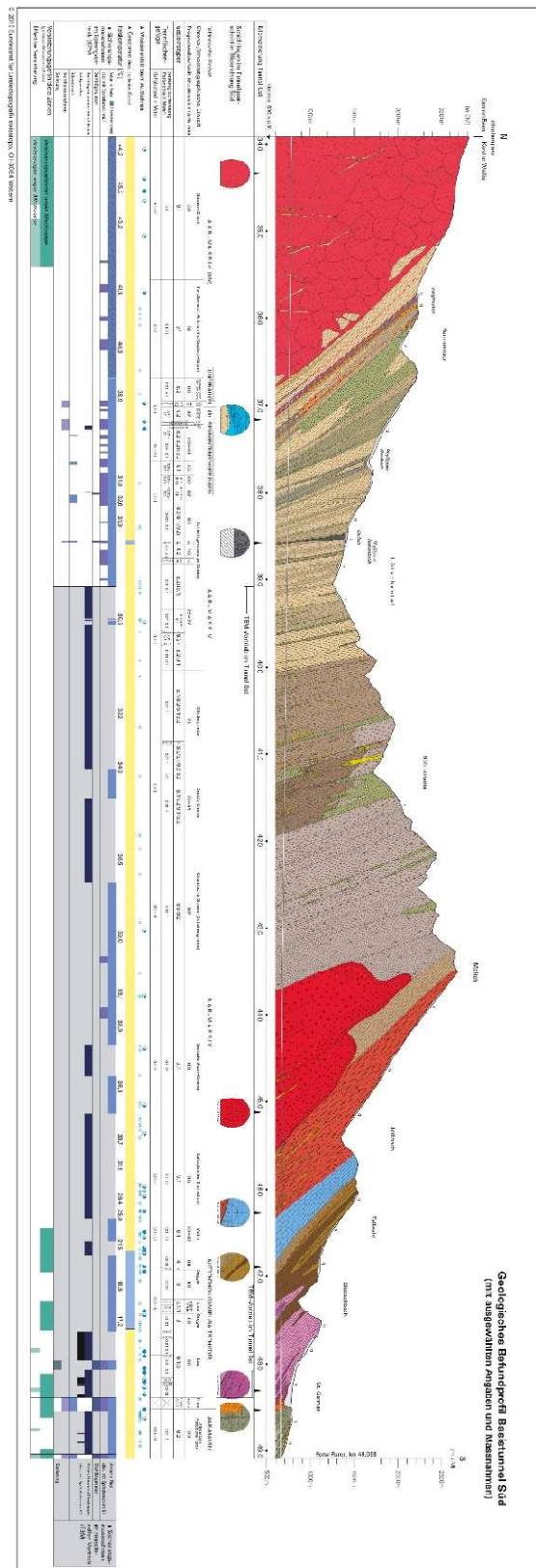
Page 30 : *Coupe géologique de la partie valaisanne (Sud) du tunnel de base du Lötschberg (Swisstopo, 2013).*

Page 31 : *Coupe géologique de la partie bernoise (Nord) du tunnel de base du Lötschberg (Swisstopo, 2013).*









8. SOURCES

Calais, E., Nocquet, J.-M., Jouanne, F., & Tardy, M. (2002). Current strain regime in the Western Alps from continuous GPS measurements, 1996-2001.

Géologie et mensurations (Lötschberg). (s. d.). Consulté 21 mai 2024, à l'adresse <https://www.alptransit-portal.ch/fr/aperçu/construction/evenements/ereignis/geologie-et-mensurations/true>

Gotthard profil—Gotthard-roehre.jpg (800×550). (s. d.). Consulté 19 mai 2024, à l'adresse https://www.gotthard-strassentunnel.ch/fileadmin/_migrated/pics/gotthard-roehre.jpg

Gotthard Strassentunnel: Disposition du tunnel. (s. d.). Consulté 19 mai 2024, à l'adresse <https://www.gotthard-strassentunnel.ch/fr/l'installation/disposition-du-tunnel/?type=1>

Halter, W. R., Macherel, E., & Schmalholz, S. M. (2022). A simple computer program for calculating stress and strain rate in 2D viscous inclusion-matrix systems. *Journal of Structural Geology*, 160, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104617>

Li, J., He, X., Shen, C., & Zheng, X. (2022). A Proposed Algorithm to Compute the Stress-Strain Plastic Region and Displacement of a Deep-Lying Tunnel Considering Intermediate Stress and Strain-Softening Behavior. *Applied sciences*, 12(1), 85. <https://doi.org/10.3390/app12010085>

Lombardi, G. (1988). Les tassements exceptionnels au barrage du Zeusier. *Société suisse de mécanique des sols et des roches*, tirage à part, 10.

Lötschberg basis coupe transversale. (s. d.).

LÖTSCHBERG-BASISTUNNEL LOS STEG/RARON - PDF Kostenfreier Download. (s. d.). Consulté 22 mai 2024, à l'adresse <https://docplayer.org/23509887-Loetschberg-basistunnel-los-steg-raron.html>

Martin, C. D., & Lanyon, G. W. (2003). Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7), 1077-1088. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00113-8)

Means, W. D. (1976). *Stress and strain: Basic concepts of continuum mechanics for geologists*. Springer-Verlag.

Morgan, E. K. (2004). Parameters of the Norwegian Q-system and geological conditions correlated with grout take in the JA1 Skaugum railroad tunnel [Master thesis]. <https://www.duo.uio.no/handle/10852/12346>

Mukherjee, S., & Mulchrone, K. F. (2012). Estimating the viscosity and Prandtl number of the Tso Moriri crystalline gneiss dome, Indian western Himalaya. *International Journal of Earth Sciences*, 101(7), 1929-1947. <https://doi.org/10.1007/s00531-012-0758-3>

Panthi, K. K., & Shrestha, P. K. (2018). Estimating Tunnel Strain in the Weak and Schistose Rock Mass Influenced by Stress Anisotropy : An Evaluation Based on Three Tunnel Cases from Nepal. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(6), 1823-1838. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1448-7>

Schmalholz, S., Podladchikov, Y., & Burg, J.-P. (2002). Control of folding by gravity and matrix thickness : Implications for large-scale folding. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107, 2005. <https://doi.org/10.1029/2001JB000355>

Stiros, S., & Kontogianni, V. (2009). Mean deformation tensor and mean deformation ellipse of an excavated tunnel section. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(8), 1306-1314. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.02.013>

Table 2. Published viscosity values for various materials. (s. d.). ResearchGate. Consulté 6 mai 2024, à l'adresse https://www.researchgate.net/figure/Published-viscosity-values-for-various-materials_tbl1_229623622

Technical Report 2014-08. (s. d.). Consulté 25 avril 2024, à l'adresse https://www.mont-terri.ch/en/documentation/technical-reports.detail.document.html/mont-terri-internet/en/documents/technical-reports/TR2014_08.pdf.html

Technical reports 2009-07. (s. d.). Consulté 25 avril 2024, à l'adresse <https://www.mont-terri.ch/en/documentation/technical-reports.html>

Technical reports 2014-06. (s. d.). Consulté 25 avril 2024, à l'adresse <https://www.mont-terri.ch/en/documentation/technical-reports.html>

Weijermars, R., & Jackson, M. P. A. (2014). Predicting the depth of viscous stress peaks in moving salt sheets : Conceptual framework and implications for drilling. *AAPG Bulletin*, 98(5), 911-945. <https://doi.org/10.1306/09121313044>

Xypolias, P. (2001). The rheological properties of rocks in a compressional ductile shear zone, pyllite-quartzite series, Péloponnèse. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 34, 353. <https://doi.org/10.12681/bgsg.17034>

Yang, Z., Lan, H., Zhang, Y., Gao, X., & Li, L. (2013). Nonlinear dynamic failure process of tunnel-fault system in response to strong seismic event. *Journal of Asian Earth Sciences*, 64, 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.006>

Ziegler, H.-J., & Isler, A. (2013). Lötschberg-Basistunnel: Zusammenfassender geologischer Schlussbericht. Swisstopo.