

Interaction entre la zone endommagée autour d'un tunnel et son soutènement – Simulation numérique.

R. Charlier¹, X Sillen², XL Li³, et F Salehnia⁴

¹Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : Robert.Charlier@ulg.ac.be

²Belgian Agency for Nuclear Waste and Fissile Materials (ONDRAF/NIRAS), mail : x.sillen@nirond.be

³European Underground Research Infrastructure for Disposal of Nuclear Waste in Clay Environment (EIG EURIDICE), mail : xiang.ling.li@euridice.be

⁴Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : f.salehnia@alumni.ulg.ac.be

RÉSUMÉ. Cet article porte sur la modélisation numérique de la localisation des déformations en bande de cisaillement autour d'une galerie creusée à Mol, dans le laboratoire souterrain d'EURIDICE. La simulation numérique a permis la mise en évidence d'un réseau de bandes de cisaillement en bon accord avec les observations sur site. La déformabilité de l'argile de Boom impose le placement d'un soutènement, qui limite la convergence et le développement de la zone plastique. L'anisotropie de contrainte initiale et de comportement ainsi que la localisation des déformations en bandes de cisaillement influencent fortement la répartition des pressions sur le soutènement. Il apparaît que celles-ci sont fortement couplées à la structure en bande de cisaillement et donc fort hétérogènes. Ceci devrait avoir des conséquences sur le dimensionnement du soutènement, qui doit être capable de reprendre une telle distribution d'efforts.

ABSTRACT. This paper deals with the numerical modelling of strain localisation and focuses on a gallery in the EURIDICE underground laboratory in Mol. The simulation evidences a shear bands network very similar to the on-site observations. The Boom clay is as deformable as a lining is strictly needed, in order to limit the convergence and the plastic zone extension. The material anisotropy, the initial stress anisotropy and the strain localisation strongly influence the rock pressure on lining, which is very heterogeneous and coupled to the shear bands network. This could explain a complex scheme of strain in the lining and should induce a specific design.

MOTS-CLÉS : tunnels, bandes de cisaillement, anisotropie, soutènement, modélisation numérique.

KEY WORDS: tunnelling, shear bands, anisotropy, lining, numerical modelling.

1. Introduction

Lors du creusement d'un tunnel, le placement d'un soutènement permet d'une part de limiter le développement de l'EDZ, la zone plastique endommagée lors de l'excavation, et d'autre part de limiter la convergence de la galerie. Le laboratoire souterrain de Mol a pour objectif l'étude du stockage géologique de déchets nucléaires de haute activité. Dans cet article nous étudierons la galerie de connexion de ce laboratoire, creusée dans l'argile de Boom [Bas 03], qui a fait l'objet de nombreuses mesures : pressions de pore, convergence, contraintes dans le soutènement. De plus, des fractures ont été clairement observées lors du creusement. L'objectif de ce travail est de modéliser le creusement de la galerie, le placement du soutènement et d'étudier l'effet de bandes de cisaillement sur celui-ci.

La simulation du creusement de la galerie est réalisée à l'aide du code aux éléments finis non linéaire LAGAMINE, développé à l'Université de Liège [Cha 87, Col 03]. Il permet la prise en compte du comportement non linéaire des matériaux, des couplages multi physiques et des ruptures. Une loi de comportement de type frottement interne, avec écrouissage et adoucissement est utilisée. Le développement de fractures est étudié sur base de la localisation des déformations en bandes de cisaillement. Un formalisme avec second gradient (Collin 2006) est utilisé pour régulariser le problème et contrôler l'épaisseur des bandes de cisaillement. L'anisotropie des contraintes in situ et du matériau contrôle la forme de la zone endommagée. Les écoulements dans la roche argileuse sont couplés à la mécanique et impliquent un développement progressif de la convergence du massif.

L'interaction de la roche dans l'EDZ avec le soutènement est étudiée à l'aide d'éléments d'interface compatibles avec les éléments solides. Ils permettent la prise en compte du contact unilatéral et du frottement entre la roche et le soutènement en béton. Le contact unilatéral est pris en compte par une technique de pénalisation. L'anisotropie des contraintes implique que le contact roche – béton apparaît d'abord dans la direction horizontale, avant de s'étendre à toute la structure. Les bandes de cisaillement modifient très significativement le champ des pressions de la roche sur le soutènement, qui est très hétérogène, contrairement à ce qui est pris en compte, par exemple dans la méthode convergence – confinement [Pan 95].

2. Modèles constitutifs

Un modèle de frottement interne est utilisé. Pour garder une continuité de la surface de plasticité, tout en prenant en compte la différence de comportement entre des chemins de compression et d'extension, nous utilisons la surface de plasticité de Drucker-Prager, enrichie par le modèle de Van Eekelen [Dru 52, Cha 87, Bar 98, Sal 15a, Sal 15b]. La plasticité est non associée, et on considère ici un matériau non dilatant. Un écrouissage de l'angle de frottement et un adoucissement de la cohésion sont tous deux représentés par des lois hyperboliques en fonction de la déformation déviatorique. Cet adoucissement joue un rôle majeur dans le développement de la localisation des déformations en bandes de cisaillement. L'élasticité est linéaire. L'argile de Boom à la profondeur du laboratoire souterrain (220 m) présente un comportement anisotrope, avec une isotropie transverse dans le plan de stratification [Fra 12, Diz 11]. Le comportement élastique prend en compte cette anisotropie. Dans le domaine plastique, l'angle de frottement interne est supposé indépendant de la stratification, par contre la cohésion est fonction de la direction de la facette [Fra 12], comme les essais de compression l'indiquent.

L'argile de Boom au niveau du laboratoire souterrain est initialement saturée, et le reste lors du creusement de la galerie. Il faut donc prendre en compte le couplage hydromécanique. Le postulat de Terzaghi est utilisé. La perméabilité est anisotrope.

La localisation des déformations produit, dans un formalisme aux éléments finis basé sur la mécanique du solide classique, des bandes de cisaillement dont l'épaisseur dépend uniquement de la taille des mailles. Pour éviter cette dépendance pathologique, il est nécessaire d'enrichir le modèle de milieu continu. Plusieurs solutions sont proposées dans la littérature. Nous avons choisi d'enrichir le milieu par la méthode du second gradient [Min 64, Ger 73], qui ajoute au formalisme habituel une relation élastique linéaire entre des tenseurs additionnels d'ordre 3 de micro déformation et de micro contrainte [Cha 98, Cha 01, Kot 07, Col 06].

Le contact progressif entre la roche et le soutènement est au cœur de ce travail. Dans l'état initial, les deux matériaux ne se touchent pas. Le creusement, le déconfinement de la roche provoque une convergence qui sera limitée par le contact avec le soutènement. Pour modéliser cet effet, nous utilisons des éléments finis d'interface spécifique [Cur 84, Cer 15]. Il s'agit d'éléments d'épaisseur nulle. Le contact unilatéral est approché par une technique de pénalisation, qui permet une interpénétration modérée des deux corps. Les échanges hydriques sont

possibles entre les deux épontes, un coefficient de transmissivité qui multiplie le saut de pression de pore contrôle le débit [Cer 15].

3. Galerie étudiée

Nous avons étudié le cas particulier de la galerie de connexion du laboratoire souterrain d'EURIDICE à Mol (Figure 1). Cette galerie a été creusée avec un tunnelier comportant un bouclier, une tête d'excavation de type haveuse, et un système de mise en place d'un soutènement par voussoirs.

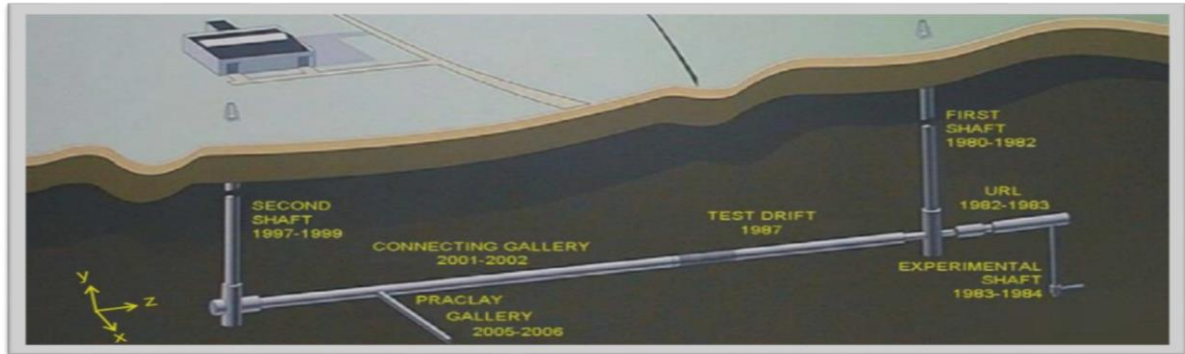


Figure 1. Laboratoire souterrain HADES et galerie de connexion [Bas 03].

La simulation (Figure 2) reproduit le comportement d'un quart de section en état plan de contrainte, sur base des symétries, et en tenant compte d'une contrainte initiale in situ anisotrope. Le soutènement est modélisé par un anneau continu (ne prenant pas en compte les joints entre voussoirs) en béton armé [Bas 03], avec un comportement élastique linéaire. Le rayon de la galerie est de 2.49 m, l'épaisseur de l'anneau de soutènement est de 40 cm, et un espace de 9 cm est laissé initialement vide entre la roche hôte et le soutènement, ce qui correspond aux conditions réelles de creusement, avec un bouclier de diamètre supérieur à celui de l'anneau de voussoirs et donc une sur-excavation [Bas 03].

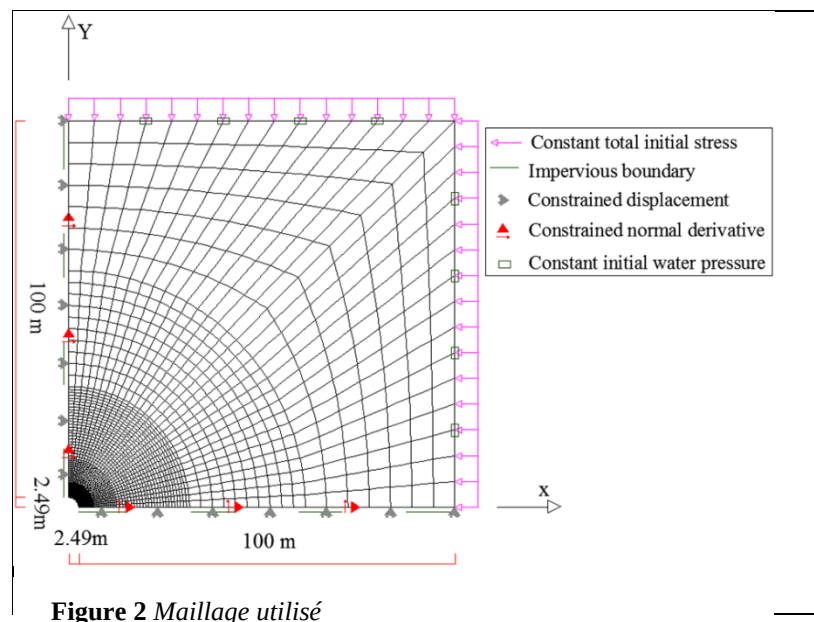


Figure 2 Maillage utilisé

Les conditions aux limites sont indiquées sur la Figure 2, et représentent les symétries. Des conditions spécifiques sont ajoutées pour la partie second gradient. Les contraintes initiales dans la roche sont anisotropes :

$$\sigma_{yy} = 4.5 \text{ MPa} \text{ et } \sigma_{xx} = 3.8475 \text{ MPa avec } K_0 = 0.855$$

En paroi rocheuse, elles sont réduites à la pression atmosphérique (100 kPa) en 6 jours pour simuler le déconfinement, puis restent constantes. La pression de pore initiale de 2.25 MPa est également réduite à 100 kPa durant le même laps de temps. La dépendance temporelle est induite par les couplages hydromécaniques. La convergence du massif et la variation des pressions de pore sont en effet intimement liés.

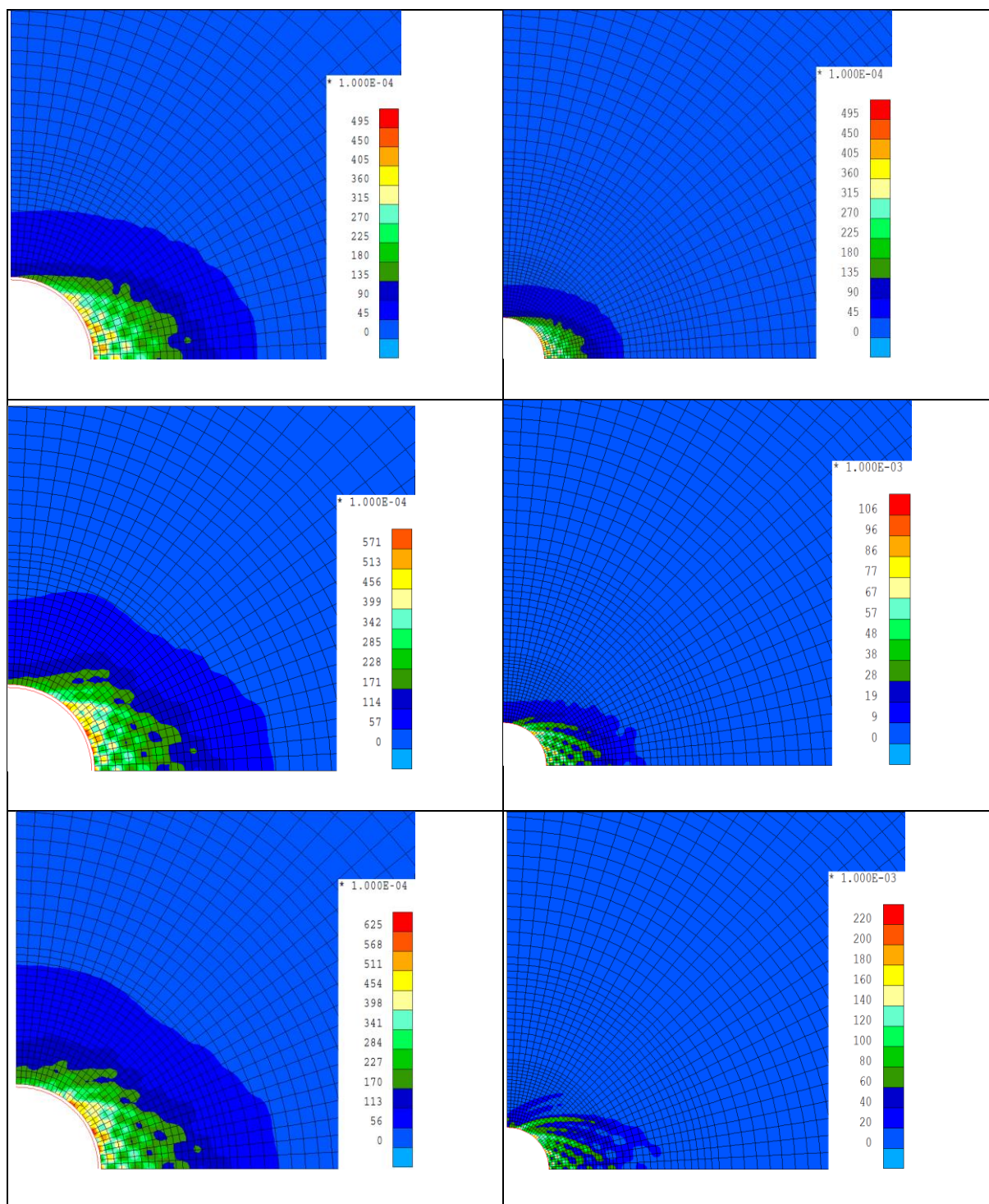
Les paramètres du modèle sont donnés au Tableau 1. Ils sont extraits des nombreuses études réalisées sur le comportement de l'argile de Boom [Sck 97, Ond 01, Tim 10, Diz 11, Sal 13b, Sal 15a, Sal 15b, Ber 07].

Tableau 1. Paramètres matériels

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Argile de Boom – paramètres mécaniques			
Module de Young	$E_{\parallel}$	400	MPa
	$E_{\perp}$	200	MPa
Coefficient de Poisson	$\nu_{\parallel\parallel}$	0.125	-
	$\nu_{\perp\parallel}$	0.0625	-
Module de cisaillement	G	178	MPa
Angle de frottement initial	φ_{c0}	8	°
Angle de frottement final	φ_{cf}	18	°
Coefficient d'écrouissage	B_{ϕ}	0.001	-
Cohésion initiale	$c_0(0^\circ)$	255	kPa
	$c_0(45^\circ)$	240	kPa
	$c_0(90^\circ)$	330	kPa
Cohésion finale	$c_f(0^\circ)$	23.18	kPa
	$c_f(45^\circ)$	21.8	kPa
	$c_f(90^\circ)$	30	kPa
Coefficient d'écrouissage/ adoucissement	B_c	0.05	-
Angle de dilatance	ψ	0	°
Module élastique de 2 ^d gradient	D	2000	N
Béton – paramètres mécaniques			
Module de Young	E	43305	MPa
Coefficient de Poisson	ν	0.25	-
Argile de Boom – paramètres hydrauliques (eau)			
Perméabilité horizontale	$k_{w,x}$	$5.06 \cdot 10^{-19}$	m ²
Perméabilité verticale	$k_{w,x}$	$2.3 \cdot 10^{-19}$	m ²
porosité		0.39	-
Compressibilité		$5 \cdot 10^{-10}$	Pa ⁻¹
Béton – paramètres hydrauliques (eau)			
Perméabilité	k_w	$4 \cdot 10^{-17}$	m ²
porosité		0.15	-
Interface			
Coefficient de pénalisation normale	K_N	$3 \cdot 10^9$	N/m ³
Coefficient de pénalisation tangentielle	K_T	$3 \cdot 10^9$	N/m ³
Coefficient de frottement de Coulomb	ϕ	0.2	-
Transmissivité	T	10^{-8}	m/Pa.s

Une étude de sensibilité a montré la forte influence de la cohésion et de son adoucissement sur les résultats de simulation, en particulier sur la localisation des déformations dans l'anneau plastique [Sal 13a, Sal 15a]. Il s'agit donc d'un élément important pour bien représenter les bandes de cisaillement.

4. Contraintes et déformations dans l'anneau plastique



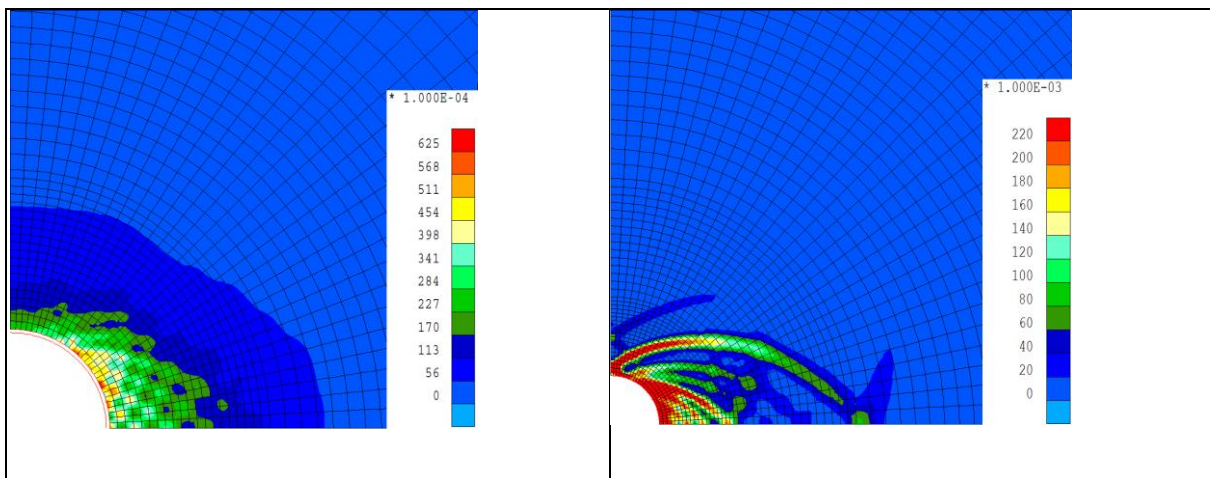


Figure 3 Déformation déviatorique totale, après (de haut en bas) 4, 5, 6 jours et 3.5 ans, sans soutènement (à droite) et avec soutènement (à gauche). Zoom sur une portion de roche proche de la paroi. L'échelle est adaptée à la zone localisée : zone de 10m à partir de la paroi dans le cas avec soutènement, à gauche ; zone de 20m à partir de la paroi dans le cas sans soutènement, à droite

Pour mettre en évidence la localisation des déformations, plusieurs indicateurs sont possibles : déformation déviatorique, incrément de la déformation déviatorique, plasticité, directions de bifurcation prédites par le critère de Rice ... Par manque de place nous nous limitons ici à des cartes de la déformation déviatorique totale, à plusieurs moments successifs, pour en montrer l'évolution (**Figure 3**). Cet indicateur cumule et synthétise l'histoire de déformations dans les bandes de cisaillement. Dès le 4^{ème} jour, soit aux 2/3 du déconfinement, une part importante de la localisation est apparue, mais elle continue à évoluer jusqu'au 6^{ème} jour, fin du déconfinement. Dans le cas avec soutènement (**Figure 3**, colonne de gauche), la situation n'évolue plus au-delà de ce moment, et reste limitée à environ un rayon de galerie dans la roche. Par contre, en l'absence de soutènement, la zone plastique et la localisation évoluent jusqu'à la fin de la simulation, après 3.5 ans et s'étend à plusieurs rayons de galerie dans la roche. La convergence est alors fort importante (pour plus de détails, voir [Sal15a]). Ceci justifie le mode de creusement et la mise en place d'un soutènement. L'amplitude des déformations est près de 4 fois plus grande sans soutènement ; on ne peut donc pas utiliser la m

La zone plastique et la localisation des déformations sont nettement anisotropes, avec une extension importante dans la direction horizontale. Ceci est dû principalement à l'anisotropie de contrainte, mais aussi à l'anisotropie plastique, exprimée par la dépendance de la cohésion sur la direction de la facette. L'extension de cette zone reproduit bien les observations sur site [Mer 04, Bas 03].

5. Pressions de contact de la roche sur le soutènement

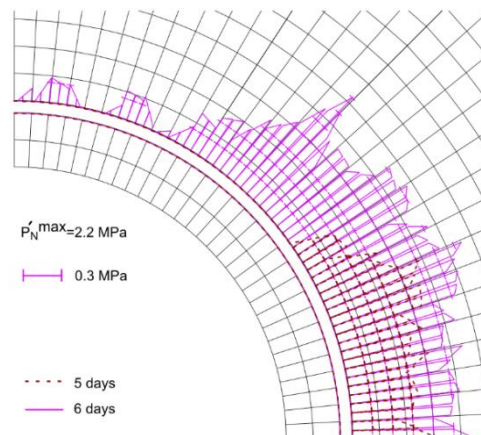


Figure 4 Diagramme des pressions de contact roche – soutènement après 5 et 6 jours (géométrie initiale).

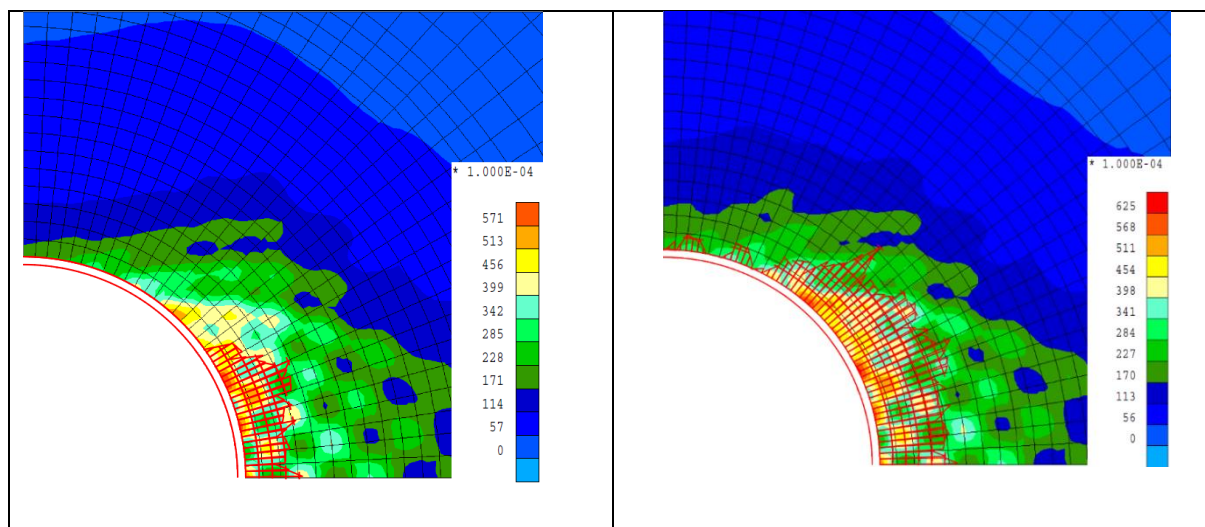


Figure 5 Superposition des bandes de cisaillement dans la roche et des pressions de contact sur le soutènement, après 5 (à droite) et 6 jours (à gauche) [Sal 15b].

Le soutènement limite nettement l'extension des déformations, comme l'indique la **Figure 3**. Après 5 jours de déconfinement, la roche entre en contact avec le soutènement. La convergence dans la direction horizontale a comblé le vide technique initial de 9 cm. La zone de contact s'étend progressivement à tout le soutènement et les pressions de contact croissent (**Figure 4** et **Figure 5**). Elles resteront plus fortes dans la direction horizontale que dans la direction verticale.

La Figure 5 met nettement en évidence des oscillations spatiales de la pression de contact. Une origine numérique pourrait être évoquée. Toutefois, des essais numériques ont montré que ces oscillations ne dépendent ni du schéma d'intégration spatiale (de Gauss), ni du coefficient de pénalisation (dans une gamme de variation modérée, sinon, la solution est fortement altérée). Par contre, les oscillations concordent remarquablement bien avec la structure des bandes de cisaillement (Figure 5) [Sal 15a], ce qui est logique : la structuration de l'anneau plastique en bandes de cisaillement organise les déplacements et les pressions sur le soutènement, dont la fonction est de limiter les déplacements.

6. Conclusions

Cet article porte sur la modélisation numérique de la localisation des déformations en bande de cisaillement autour d'une galerie creusée à Mol, dans le laboratoire souterrain d'EURIDICE. Le code aux éléments finis a permis la mise en évidence d'un réseau de bandes de cisaillement en bon accord avec les observations sur site. Il est bien connu que la localisation des déformations induit des pertes de symétrie. La simulation d'un quart de galerie est de ce point de vue limitative. Toutefois, des simulations de la totalité de l'ouvrage ont donné des résultats très proches [Sal 15]. Les pressions générées sur le soutènement ont également été modélisées. Il apparaît qu'elles sont fortement couplées à la structure en bande de cisaillement et donc fort hétérogènes. Ceci devrait avoir des conséquences sur le dimensionnement du soutènement, qui doit être capable de reprendre une telle distribution d'efforts.

7. Bibliographie

- [Bar 98] Barnichon JD. Finite element modelling in structural and petroleum geology. Ph.D. thesis; Université de Liège; 1998.
- [Bas 03] Bastiaens W, Bernier F, Buyens M, Demarche M, Li XL, Linotte JM, et al. Euridice report: The connecting gallery. Tech. Rep.; EIG EURIDICE; 2003.

- [Ber 07] Bernier F, Li XL, Bastiaens W. Twenty-five years' geotechnical observation and testing in the tertiary Boom clay formation. *Géotechnique* 2007;57(2):229–37.
- [Cha 87] Charlier R. Approche unifiée de quelques problèmes non linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. Ph.D. thesis; Université de Liège; 1987.
- [Cha 98] Chambon R, Caillerie D, El Hassan N. One-dimensional localisation studied with a second grade model. *European Journal of Mechanics-A/Solids* 1998;17(4):637–56.
- [Cha 01] Chambon R, Caillerie D, Matsushima T. Plastic continuum with microstructure, local second gradient theories for geomaterials: localization studies. *International Journal of Solids and Structures* 2001;38(46):8503–27.
- [Col 02] Collin F, Li XL, Radu JP, Charlier R. Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers. *Engineering Geology* 2002;64(2–3):179–93. *Key Issues in Waste Isolation Research*.
- [Col 03] Collin F. Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les sols et les roches tendres partiellement saturés. Ph.D. thesis; Université de Liège; 2003.
- [Col 06] Collin F, Chambon R, Charlier R. A finite element method for poro mechanical modelling of geotechnical problems using local second gradient models. *International journal for numerical methods in engineering* 2006;65(11):1749–72.
- [Cer 15] Cerfontaine B, Dieudonné AC, Radu JP, Collin F, Charlier R. 3D zero-thickness coupled interface finite element: Formulation and application. *Computers and Geotechnics* 2015;69:124–40.
- [Cur 84] Curnier A. A theory of friction. *International Journal of Solids and Structures* 1984;20(7):637–47.
- [Diz 11] Dizier A. Caractérisation des effets de températures dans la zone endommagée autour de tunnel de stockage de déchets nucléaires dans des roches argileuses. Ph.D. thesis; 2011.
- [Dru 52] Drucker DC, Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of applied mathematics* 1952;10(2):157–65.
- [Ger 73] Germain P. The method of virtual power in continuum mechanics. part 2: Microstructure. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 1973;25(3):556–75.
- [Fra 12] François B, Labieuse V, Dizier A, Marinelli F, Charlier R, Collin F. Hollow cylinder tests on Boom clay: Modelling of strain localization in the anisotropic excavation damaged zone. *Rock mechanics and rock engineering* 2012;47(1):71–86.
- [Kot 07] Kotronis P, Collin F, Bésuelle P, Chambon R, Mazars J. Local second gradient models and damage mechanics: 1d post-localization studies in concrete specimens. In: *Bifurcations, Instabilities, Degradation in Geomechanics*. Springer; 2007, p. 127–42.
- [Mer 04] Mertens J, Bastiaens W, Dehandschutter B. Characterisation of induced discontinuities in the Boom clay around the underground excavations (url, Mol, Belgium). *Applied clay science* 2004;26(1):413–28.
- [Min 64] Mindlin R. Micro-structure in linear elasticity. *Archive for Rational Mechanics and Analysis* 1964;16(1):51–78.
- [Ond 01] ONDRAF/NIRAS . Technical overview of the safir 2 report: Safety assessment and feasibility interim report 2. Tech. Rep. NIROND 2001–05 E; 2001.
- [Pan 95] Panet, M. *Calcul des tunnels par la méthode convergence – confinement*. Presses de l'ENPC. 1995
- [Sal 13a] Salehnia F. Geomechanics applied to nuclear waste disposal; strain localization in Boom clay. Tech. Rep.; Université de Liège; 2013. Annual report to ONDRAF/NIRAS.
- [Sal 13b] Salehnia F, Charlier R., Levasseur S. Modeling of strain localization around the radioactive waste disposal galleries. In: *Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*. CRC Press; 2013, p. 443.

- [Sal 15a] Salehnia F. From some obscurity to clarity in Boom clay behavior: Analysis of its coupled hydro-mechanical response in the presence of strain localization. These de doctorat, Université de Liège, 2015. <http://hdl.handle.net/2268/187126>
- [Sal 15b] Salehnia, F., Collin, F., Li, X. L., Dizier, A., Sillen, X., & Charlier, R. (2015). Coupled modeling of Excavation Damaged Zone in Boom clay: Strain localization in rock and distribution of contact pressure on the gallery's lining. *Computers and Geotechnics*, 69, 396-410. <http://hdl.handle.net/2268/183110>
- [Sck 97] SCK-CEN . HADES TOUR GUIDE. Notebook; 1997.
- [Tim 10] TIMODAZ . THM characterisation and input for simulation. Tech. Rep. WP 3.1, D5; Commission of the European Communities; 2010. Editor: Delage, P.