MODELISATION DU VIEILLISSEMENT DES ANCIENS TUNNELS MAÇONNES

Jamal IDRIS, Thierry VERDEL, Marwan AL HEIB, Jack Pierre PIGUET.
LAEGO - INERIS – Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.

RÉSUMÉ – Les tunnels anciens sont généralement soutenus ou revêtus de structures en maçonnerie qui vieillissent avec le temps. Nous proposons ici une analyse du comportement de ces ouvrages par la technique des plans d'expérience appliquée à des expériences numériques, et en particulier à des modèles numériques avec la méthode des éléments distincts. Cette analyse vise la compréhension de l'évolution du comportement de la maçonnerie dans le temps et l'évaluation de l'influence des propriétés mécaniques des moellons sur le comportement des tunnels maçonnés.

MOTS-CLÉS : Tunnel, maçonnerie, vieillissement, modélisation, plan d'expérience.

1. Introduction

Les ouvrages souterrains anciens, particulièrement les tunnels, présentent des caractères spécifiques au regard de l'évolution de leur comportement dans le temps. L'environnement de l'ouvrage, les terrains encaissants, les matériaux de constructions utilisés, participent à cette évolution. En conséquence, plusieurs types de désordres peuvent se manifester dans ces ouvrages. Bien que les différents processus de vieillissement soient complexes à appréhender, ils entraînent tous une évolution des propriétés mécaniques de la maçonnerie dans les tunnels.

Nous présentons dans une première partie du papier le vieillissement des tunnels, les désordres survenus dans ces ouvrages et l'origine des processus du vieillissement des matériaux de construction et leurs conséquences mécaniques.

Puis, dans une deuxième partie, nous présentons différentes modélisations du comportement d'un tunnel maçonné. La mise en œuvre de ces modèles répond à la technique de plans d'expériences de manière à comprendre mais aussi quantifier l'influence respective de certains paramètres mécaniques de la maçonnerie sur le comportement global de l'ouvrage.

2. Vieillissement des ouvrages souterrains

Comme le montre la figure 1 pour la France, une grande partie des tunnels dans le monde a dépassé l'âge de 100 ans. Depuis leur construction, ces ouvrages ont donc subi les effets d'un vieillissement qui explique en partie certains désordres observés.

La plupart des tunnels anciens sont soutenus ou revêtus d'une structure en maçonnerie. Ce type du soutènement ou de revêtement massif repose sur l'exploitation de la résistance à la compression élevée de la pierre, ce qui explique la forme voûtée de la section des ouvrages maçonnés destinée à former principalement des efforts de compression. Hormis les évolutions des terrains encaissants et en l'absence d'étanchéité efficace dans ces ouvrages, l'eau souterraine peut facilement atteindre la maçonnerie, voire y circuler. Avec le temps et en présence d'autres facteurs agressifs ambiants, plusieurs processus de vieillissement physique, chimique et biologique peuvent alors se manifester dans la maçonnerie. En conséquence, différents types de désordres se manifestent dans ces ouvrages et en particulier des fissures structurelles longitudinales, obliques ou transversales. Même si cette évolution n'a pas d'impact

important sur la stabilité des ouvrages à court terme, en l'absence de contrôle et de maintenance, la stabilité des ouvrages concernés peut être menacée à plus long terme.

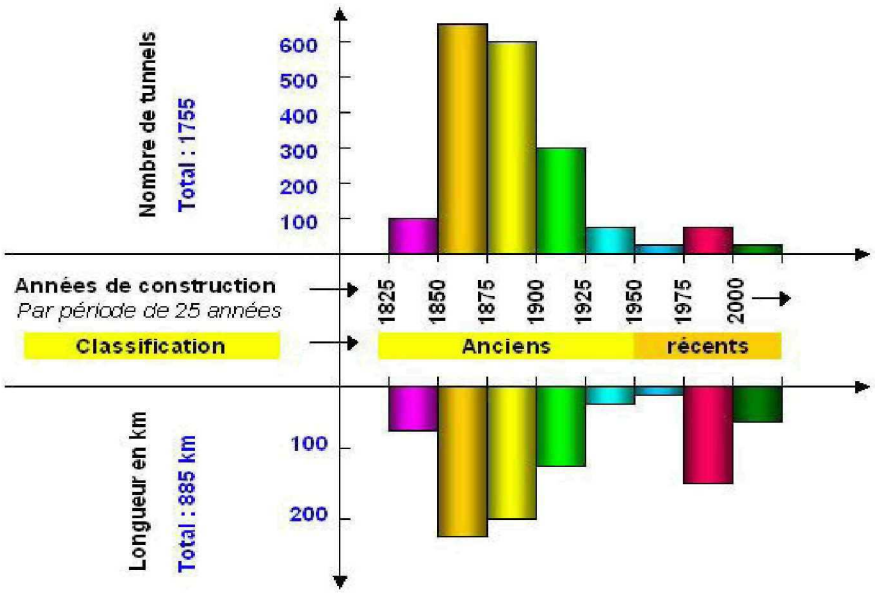


Figure 1. Répartition des tunnels français. Ce diagramme à été développé et reconstitué par l'auteur d'après (Chambron et al. , 1978) et (The world's longest Tunnel page database)

3. Processus du vieillissement

Les matériaux de constructions subissent plusieurs modifications et dégradations dans le temps sous la combinaison de plusieurs facteurs. Ces dégradations résultent de plusieurs transformations ou processus : physiques, chimiques et biologiques.

Les processus physiques traduisent l'ensemble des changements du système de contraintes conduisant à des transformations des propriétés mécaniques du matériau résultant de différents phénomènes : cycles de dilatation-contraction, cycles de gel-dégel et cycles de hydratation-dessiccation.

Les processus chimiques traduisent une série de réactions de surface entre le matériau, l'atmosphère et l'eau. Selon (Loughnan, 1969), le vieillissement chimique est le résultat de trois processus qui peuvent intervenir simultanément : rupture de structure et libération des éléments constituants ; mise en solution et transport d'une partie des éléments ; réaction de la roche altérée avec les composants de l'atmosphère, entraînant la formation de nouveaux minéraux qui peuvent être dans un équilibre stable avec l'environnement.

La fracturation de la roche favorisant la circulation d'eau et d'air, la matière organique produit les acides qui contribuent à l'attaque chimique des roches et en particulier des roches carbonatées. La production de CO_2 et d'acide carbonique implique une augmentation de l'acidité des eaux et de leur agressivité vis-à-vis de l'altération des roches (Carrol, 1970). Différents groupes de microorganismes consomment le carbone et l'azote produit par les plantes et les animaux morts ainsi que l'oxygène présent dans le sol, et augmentent la concentration en CO_2.

Les paramètres physiques et mécaniques des matériaux sont sensibles à ces processus de dégradation et leur évolution dans le temps traduit le vieillissement de ces matériaux. Une analyse bibliographique nous a permis de dresser le tableau 1 qui récapitule l'évolution dans le temps de certains de ces paramètres. Bien entendu cette évolution dépend de la nature des

matériaux et des conditions environnementales et des types de processus de dégradation en oeuvre.

Tableau I. Evolution dans le temps de certains paramètres physiques ou mécaniques

Paramètre	Tendance	Source	Paramètre	Tendance	Source
Module de Young	-	Wiid, 1967 Watelet, 1996	Perméabilité	+	Sorgi et al, 2004
Coefficient de Poisson	+	Hencher et al. 1999, stead et al. 2000	Degré de saturation	+	Sorgi et al, 2004
Résistance à la compression	-	Wiid, 1967 et Watelet,1996	Porosité	+ -	Sorgi et al, 2004
Résistance à la traction	-	Wiid, 1967 et Watelet,1996	Résistance au cisaillement	+	Hencher et al 1999, stead et al 2000
Cohésion	-	Wiid, 1967 et Watelet,1996	Angle du frottement	-	Wiid, 1967 et Watelet, 1996
Masse volumique	+ -	Sorgi et al, 2004		-	
+ : Tendance à augmenter - : Tendance à diminuer					

4. Modélisation du vieillissement dans les tunnels maçonnés

Notre objectif concernant la modélisation du phénomène de vieillissement est la compréhension de l'évolution du comportement de la maçonnerie dans le temps ainsi l'évaluation de l'influence de l'évolution de certaines propriétés mécaniques de la maçonnerie sur le comportement des tunnels. À l'aide du code de calcul *UDEC (Universal Distinct Element Code),* nous avons donc élaboré un modèle représentatif des tunnels maçonnés dont les caractéristiques géométriques et géomécaniques ont été inspirées d'une base de données élaborées par nos soins (Idris et al., 2004) ou d'autres données bibliographiques (Verdel et al. , 1999).

4.1 Le modèle

Il s'agit d'un tunnel situé à 20m de profondeur de section voûtée dont le rayon est de 4m. La maçonnerie se présente en moellons rectangulaires ou carrés. Son épaisseur est de 80 cm et la hauteur du piédroit est de 3m. La figure 2 en donne toutes les caractéristiques géométriques. Du fait de la symétrie de la section, seule une moitié a été modélisée. La figure 2 montre aussi l'insertion de l'ouvrage dans son environnement, le maillage utilisé et les conditions aux limites retenues.

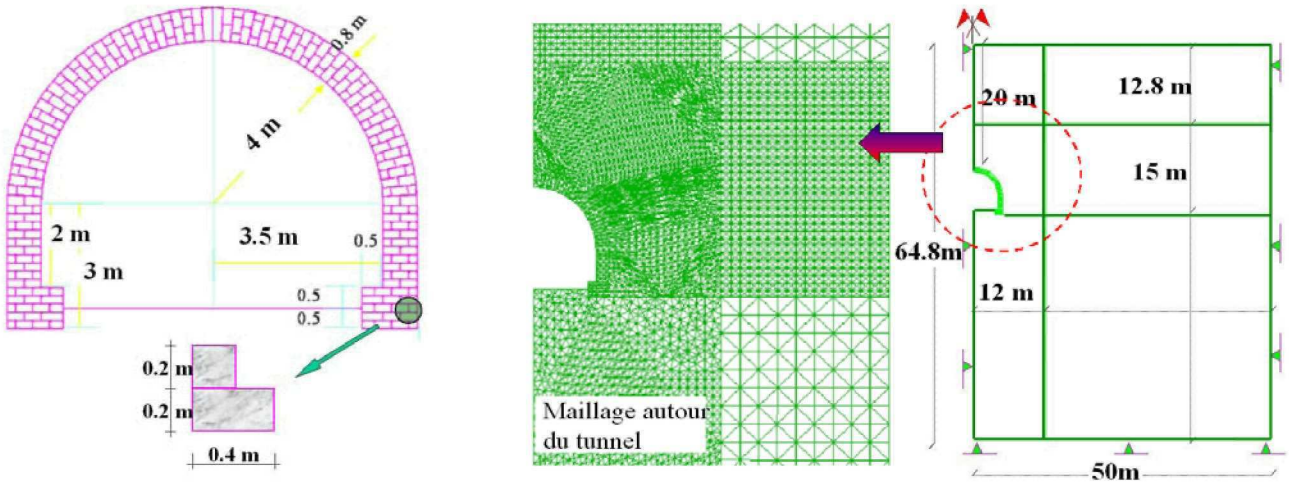


Figure 2. Section du tunnel modélisé, positionnement du tunnel

Le tunnel est excavé dans un terrain homogène. La maçonnerie est constituée de pierres de calcaire et les joints sont simplement considérés comme des interfaces entre ces blocs. Le tableau 2 donne les propriétés mécaniques de base retenues pour le terrain et la maçonnerie.

Tableau 2. Paramètres mécaniques de sol et de maçonnerie

Terrain encaissant			Blocs de maçonnerie			Joints de maçonnerie		
Paramètre	Valeur	Unité	Paramètre	Valeur	Unité	Paramètre	Valeur	Unité
M	1900	Kg/m^3	*M*	2000	Kg/m^3	*Jkn*	150	GPa/m
E	200	MPa	*E*	6000	MPa	*Jks*	69,7	GPa/m
ν	0,3	sans	ν	0,2	sans	*JC*	3	MPa
C	50	KPa	*C*	3	MPa	*JF*	30	°
φ	20	°	φ	30	°	*JTr*	1	MPa
Tr	10	KPa	*Tr*	1	MPa			

M : Masse volumique ; E : Module de Young,ν : Coefficient de Poisson, C :Cohésion ; φ : Angle du frottement ; Tr : Résistance à la traction ; Jkn Rigidité normale ; Jks : Rigidité tangentielle ; JC : Cohésion de joints ; JF : Angle du frottement de joints ; JTr :Résistance à la traction

L'ouvrage est soumis au poids du terrain encaissant. Les calculs sont menés en déformations planes, le terrain et la maçonnerie obéissent à un comportement élasto-plastique parfait avec critère de plasticité de Mohr-Coulomb. Le calcul se déroule en deux étapes principales : (1) consolidation du modèle dans l'état initial des contraintes avant creusement du tunnel ; (2) excavation du tunnel et installation simultanée du soutènement en maçonnerie puis calcul jusqu'à l'équilibre.

4.2 Expérimentation sur l'évolution des propriétés mécaniques de moellons

Dans un premier calcul réalisé avec les données du tableau 2, nous obtenons une distribution de contraintes dans la maçonnerie qui ne conduit à aucune rupture (aucun dépassement du critère de rupture) comme le montre la figure 3 sur laquelle sont reportés les cercles de Mohr correspondant à l'état de contrainte dans chaque zone du maillage (maçonnerie uniquement). Dès lors, à partir de la figure, on peut déduire approximativement les valeurs de la cohésion, de la résistance à la traction et de l'angle de frottement qui entraîneront un dépassement du critère de rupture dans les blocs de la maçonnerie. Cette démarche « à l'envers » nous permet ainsi de définir une gamme de variation pour ces trois paramètres dans laquelle il convient de se placer pour étudier l'effet de ces paramètres sur le comportement global de la structure.

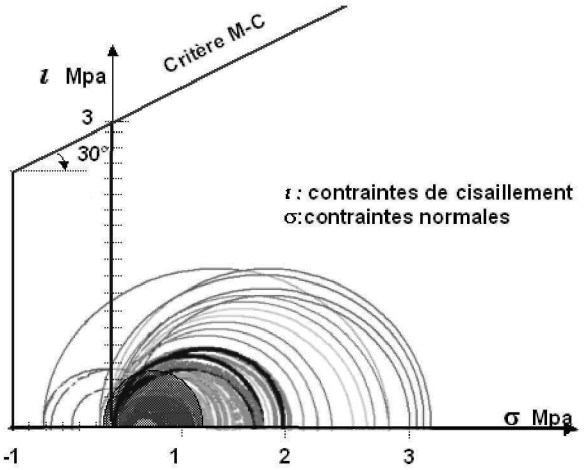


Figure 3. Cercles de Mohr des contraintes induites aux éléments de maçonnerie

Nous voyons par exemple sur la figure 3 que, pour une cohésion de 1 MPa ou inférieure, une diminution de l'angle de frottement entraînera un plus grand nombre de points (zones) plastiques dans la structure

4.3 Plan d'expérience

La méthode des plans d'expériences et des surfaces de réponse combinée à l'analyse de la variance permet d'identifier les facteurs expérimentaux les plus influents dans un processus complexe. Le processus étudié ici est celui de la mise sous contraintes de la structure sous l'effet de la charge des terrains encaissants. Ce processus est potentiellement influencé par la cohésion, la résistance à la traction et l'angle de frottement des blocs de la maçonnerie (entre autres facteurs possibles). Ce sont les facteurs que nous étudions. Pour évaluer l'influence de ces facteurs sur le processus, il convient de caractériser l'état final du processus par une variable d'état. La variable choisie pour cela est le nombre de blocs présentant une ou plusieurs zones plastiques obtenus dans la structure. Notre plan d'expérience consiste donc à définir les combinaisons des paramètres étudiées qui feront l'objet de calculs dans chacun desquels on notera le nombre de blocs plastiques obtenus. Le plan d'expérience choisi est un plan factoriel complet à trois valeurs par facteurs qui donne donc un nombre total d'expériences de 27 comme illustré sur la figure 4.a. Sur cette figure, chaque nœud représente un jeu de valeurs prédéfinies pour chacun des trois facteurs pour lequel un calcul avec Udec est réalisé et à partir duquel on obtient, après calcul, une valeur du nombre de blocs plastiques dans la structure maçonnée.

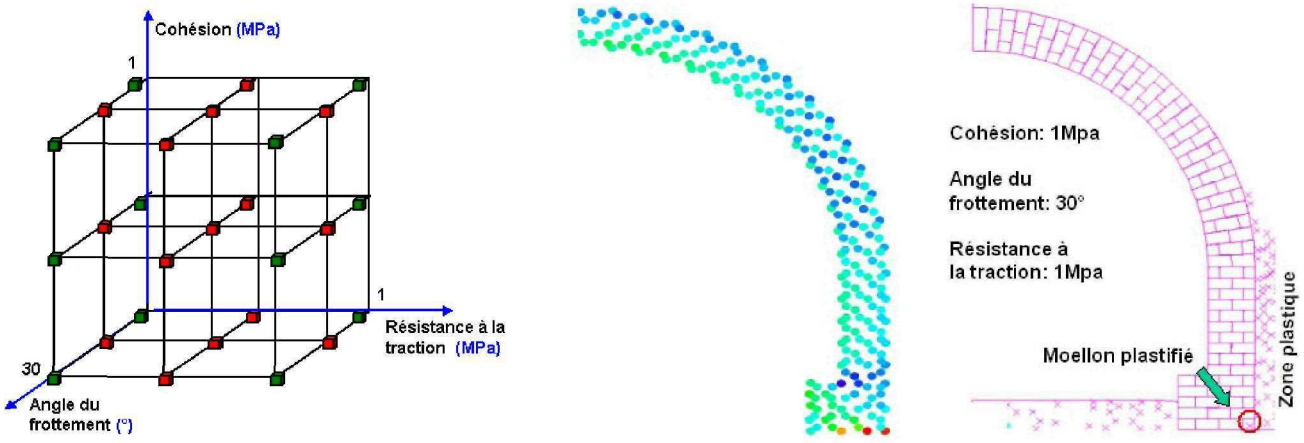


Figure 4. a-Plan d'expérience proposé, b-Valeurs critiques des propriétés mécaniques de moellons

La figure (4-b) montre un exemple de résultat obtenu pour une combinaison donnée des facteurs sur lequel on observe un seul point plastique (moellon plastifié). Il s'agit d'une

combinaison « critique » à partir de laquelle on commence à obtenir des points plastiques. La figure 5 donne l'ensemble des résultats obtenus dans notre plan d'expériences numériques ainsi qu'un autre exemple de résultat de modélisation.

Cohésion (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Angle du frottement °	Moellon plastifié	Cohésion (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Angle du frottement °	Moellon plastifié
1	1	30	1	0,5	0,5	0	112
1	1	15	9	0,5	0	30	47
1	1	0	24	0,5	0	15	96
1	0,5	30	1	0,5	0	0	116
1	0,5	15	9	0,2	1	30	116
1	0,5	0	24	0,2	1	15	116
1	0	30	7	0,2	1	0	116
1	0	15	22	0,2	0,5	30	116
1	0	0	55	0,2	0,5	15	116
0,5	1	30	29	0,2	0,5	0	116
0,5	1	15	76	0,2	0	30	116
0,5	1	0	112	0,2	0	15	116
0,5	0,5	30	29	0,2	0	0	116
0,5	0,5	15	77				

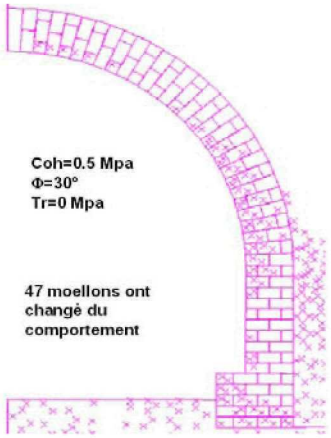
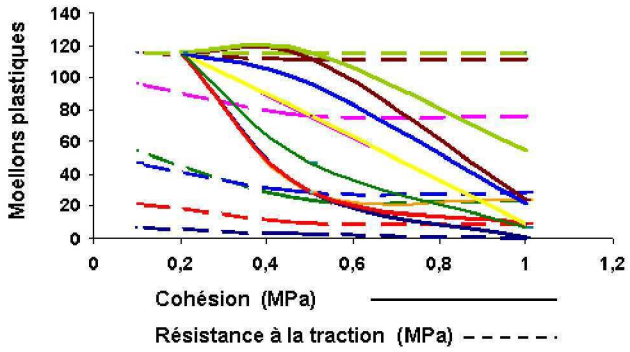
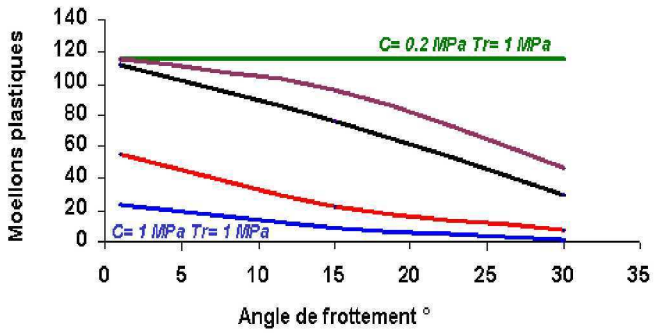


Figure 5. Plan d'expériences numériques et exemple d'une réponse observée correspondant à la ligne du tableau mise en valeur.

L'ensemble des résultats reportés sur la figure 5 permet, dans un premier temps, d'étudier graphiquement l'influence des facteurs sur la réponse de la structure. La figure 6-a montre ainsi que la diminution de la cohésion des blocs entraîne une augmentation du nombre de points plastiques rapide qui dénote d'une influence probablement très significative de ce paramètre, tandis que la variation de la résistance à la traction ne semble pas significative. De même, la figure 6-b montre une influence de l'angle de frottement qui semble significative mais qui est moins forte que celle de la cohésion.



(a)



(b)

Figure 6. Nombre de blocs plastiques en fonction de la cohésion, de la résistance à la traction et de l'angle du frottement

Les surfaces de réponse à deux variables permettent de voir une éventuelle interaction entre les facteurs étudiés. Celles de la figure 7 montrent clairement l'influence de la cohésion (figure 7a et 7b) et celle de l'angle de frottement (figure 7b et 7c) sur la réponse étudiée. Mais on ne relève aucune interaction nette entre ces paramètres (la variation de l'un des paramètres ne change pas la façon dont l'autre influence la réponse) et l'influence de la résistance à la traction ne semble guère significative.

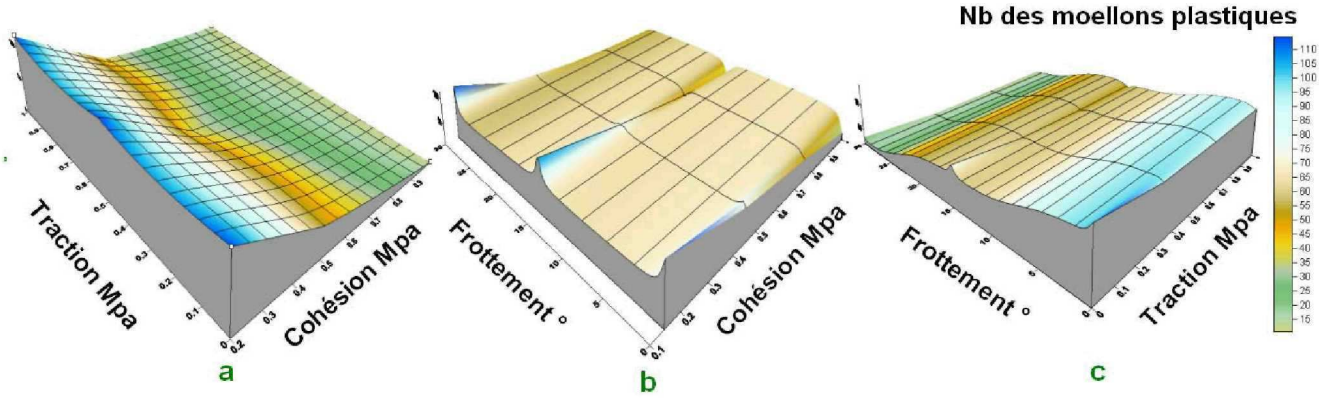


Figure 7. Surface de réponse relie C, Tr et φ avec le nombre des blocs plastifiés

4.4 Analyse de la variance (Multivariate Analysis of Variance, MANOVA)

Afin de quantifier l'influence respective des trois facteurs, une analyse de la variance a été réalisée. L'analyse présentée ici repose sur un modèle de décomposition de la variance totale de la réponse étudiée (celle du nombre de points plastiques) en la somme de trois variances explicatives, celles de chacun des facteurs, et d'une variance résiduelle.

Le tableau 4 donne les résultats de l'analyse comme on l'habitude de les présenter. A l'hypothèse que l'influence des facteurs n'est pas significative, le rapport de la variance de la chaque facteur à la variance résiduelle doit suivre une loi de Snédécor (F-Ratio Distribution). Or les valeurs ainsi obtenues pour l'angle de frottement et la cohésion (respectivement 10 et 81), dépassent largement la valeur de Snédécor qui n'a que 5 chances sur 100 d'être dépassée (3.99). Cela signifie que l'hypothèse de non-influence est à rejeter et que l'influence de l'angle de frottement et de la cohésion sont significatives avec moins de 5 chances sur 100 de se tromper tandis que celle de la résistance à la traction ne l'est pas. Par ailleurs, on peut conclure également à l'influence prépondérante de la cohésion sur celle de l'angle de frottement.

Tableau 4. Résultats de l'analyse de la variance (tableau de MANOVA)

Source	Somme des carrés	DDL*	Variance	F calculé	F Snédécor
EFFETS PRINCIPAUX					5%
Angle de frottement	6021.56	2	3010.78	10.94	3.99
Résistance à la traction	620.222	2	310.111	1,25	3.99
Cohésion	44886.2	2	22443,1	81.52	3.99
RESIDU	5506	20	275.3		
TOTAL (CORRIGE)	57034	26	*DDL : degrés de liberté		

On peut noter à ce stade que la non-influence de la résistance à la traction s'explique aisément par le fait que la structure en maçonnerie est principalement sollicitée en compression, du fait de sa forme voûtée dont c'est la vocation. Par ailleurs, il eut été possible d'établir un premier plan d'expériences sans faire aucun autre calcul que le calcul initial ayant donné lieu aux cercles de Mohr de la figure 3. En effet, à partir de cette figure, on aurait pu estimer le nombre de points plastiques apparaissant lors de la modification du critère de rupture (donc des facteurs étudiés). Mais cela n'aurait pas permis la prise en compte de la redistribution des contraintes induites par l'apparition de blocs plastiques (zones plastiques), c'est pourquoi nous ne l'avons pas finalement présenté ainsi.

5. Conclusions

Le vieillissement des ouvrages souterrains maçonnés résulte de l'ensemble des transformations minéralogiques et des dégradations mécaniques qui surviennent au sein des matériaux au cours du temps. Grâce à la modélisation numérique et à la technique des plans d'expérience et des surfaces de réponse, nous avons étudié l'influence de l'évolution de trois facteurs parmi ceux susceptibles de traduire un tel vieillissement. Nous avons ainsi montré, pour une géométrique typique des tunnels anciens maçonnés que, de la cohésion, l'angle de frottement et la résistance à la traction des blocs de maçonnerie, seuls l'évolution deux premiers pouvaient affecter négativement le comportement de l'ouvrage tout entier et que des deux, la cohésion était le facteur prépondérant.

Bien d'autres facteurs sont susceptibles d'affecter le comportement mécanique de l'ouvrage étudié et il convient de les intégrer dans l'analyse pour tirer des conclusions définitives.

6. Références bibliographiques

Berest P., et Weber P., 1988. La thermomécanique des roches. *Ed. BRGM,* N°16,Coll.Manuels et Méthodes, 327 pages.

Carrol D., 1970. Rock weathering. Plenum Press, New York-London, 203 pages. Chambron

E., Piquand, J.L., ERAUD, J. 1978. La maintenance des tunnels à la SNCF. *Tunnels et ouvrages souterrains*, No.26 pp 201-206.

Loughnan F.C., 1969 Chimical weathering of the silicat minerals. New York, American Elsevier Publishing Company, Inc., New York, 149 pages.

Idris J., Al Heib M., Verdel T., 2004. Base de données des accidents et des incidents survenus dans les ouvrages souterrains. *Tunnels et ouvrages souterrains*, No. 182, pp.363-368.

Idris, J., Al Heib, M. & Verde T., 2004. Feedback from a database created for reporting accidents in tunnels and galleries. Urban Transport and the Environment in the 21st Century. Advances in Transport, Vol 16. *Wessex Institute of Technology, UK and L.C. WADHWA, James Cook University, Australia ISBN: 1-85312-716-7,* pp 41-50.

Hencher S.R., E.J. Ebuk., J.H. Abrams and A.C. Lumsden ,1990. Field description and classification of hydrothermally altered granite from SW England". *10th Southeast Asian geotechnical Conference*, 16-20 April, Taipei, pp 303-308.

Sorgi C., Didier C., Souley M., Auvray C., Homand F., Gennaro V., 2004. Contribution méthodologique et expérimentale à létude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vielliessement, *Rapport INERIS*, 132 pages.

Stead D., J.S. Coggan and J.H. Howe, 2000. Engineering geology and hazard assessment of excavated china clay slopes. *Geoscience in south-west England*, 10,pp72-76.

The world's longest Tunnel page database: http://home.no.net/lotsberg/

Van Eeckhout E. M., 1976. The mechanism of strength reduction due to moisture in coal mines. *Int.J.Rock mech.min.Sci. geomech. Abst.* Vol. 13, pp. 61-67.

Verdel T., Bigarre P., 1999. Modélisation de tunnels anciens avec le logiciel UDEC. *Rapport INERIS, Société SIMECSOL,* pp 1-12.

Watelet J.M., 1996. Méthode d'analyse et diagnostique des conditions des stabilités des carrières souterraines. *Mémoire de diplôme d'ingénieur* ISAM.SNAM, Paris.

Wiid B.L., 1967.The influence of moisture upon the strength behaviour of rock, Ph.D. *Thesis. University of witwatersland*, 184 pages.