

**J.-A. FLEURISSON
R. COJEAN**

Mines ParisTech
Centre de Géosciences
35, rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau
jean-alain.fleurisson@mines-
paristech.fr

Prise en compte des discontinuités dans l'élaboration d'un modèle mécanique de massif rocheux. Application au creusement de l'écluse à bateaux du barrage des Trois Gorges (Chine)

Résumé

Cet article est relatif à l'analyse de la stabilité et à l'évaluation des déformations à long terme des parois de l'écluse à bateaux du barrage des Trois Gorges en Chine. Dans un premier temps, une étude détaillée de stabilité a été réalisée avec le logiciel DEGRÉS (Mines ParisTech-Centre de Géosciences) en prenant en compte les différentes caractéristiques géométriques et géologiques du massif rocheux et ses paramètres géomécaniques, hydrogéologiques et sismiques. Les volumes potentiellement instables et les coefficients de sécurité correspondants ont ainsi pu être calculés conduisant à des recommandations sur le drainage et les renforcements mécaniques. Dans un second temps, une méthodologie spécifique a été mise en œuvre pour analyser le comportement mécanique du massif rocheux en réponse à l'excavation, et surtout évaluer les déplacements à long terme plusieurs années après la fin de l'excavation. Elle est fondée sur la comparaison de résultats de calculs obtenus avec le logiciel FLAC (Itasca) et de données d'instrumentation obtenues alors que les travaux d'excavation de l'écluse à bateaux permanente progressaient. Plusieurs modèles de comportement, relevant en partie des techniques d'homogénéisation, mais intégrant les éléments structuraux majeurs ont ainsi été progressivement mis au point et confrontés aux données de l'instrumentation mise en place sur le site au fur et à mesure de la progression de l'excavation. Par ailleurs, la référence à des travaux de même nature précédemment réalisés dans le même massif (pour une écluse à bateaux provisoire) a permis de disposer de données relatives à des comportements fonction du temps, sur quelques années, et de caler des paramètres de viscosité. En conséquence, le modèle élaboré a permis de simuler numériquement l'évolution au cours du temps des déformations à long terme de l'écluse à bateaux permanente, ouvrage de près de 160 m de profondeur dans sa section la plus profonde.

Mots-clés : déformation de massif rocheux, comportement viscoélastoplastique, simulation numérique, instrumentation, barrage des Trois Gorges.

Numerical modelling of rock masses mechanical behaviour taking into account discontinuities. Application to the excavation of the three Gorges Dam shiplock (China)

Abstract

This paper is related to the stability analysis and evaluation of the long term deformability of the permanent shiplock rock slopes at the Three Gorges Dam site. On the one hand, a detailed stability analysis was performed using the DEGRÉS software (Mines ParisTech-Centre de Géosciences) considering various calculation conditions related to geometrical and geological rock mass features, as well as geomechanical, hydrogeological and seismic parameters. Potential unstable volumes and corresponding safety factors were calculated and resulted in drainage and reinforcement recommendations. On the other hand, a specific methodology was implemented to analyze the mechanical behaviour of the rock mass in response to the excavation and especially to evaluate long term displacements several years after the end of the excavation. It is based on comparisons between calculation results using the software FLAC (Itasca) and monitoring data obtained while the excavation process was progressing. Several geomechanical models resulting partially from homogenization techniques and partially from the integration of the main rock mass structural features were progressively implemented and their results were compared with the monitoring data. Moreover, monitoring data over several years after similar excavation works (temporary shiplock) in the same rock mass gave viscosity parameters related to the time dependant behaviour of the rock mass. Therefore, the final geomechanical model allowed the numerical simulation within the time of long term deformations of the permanent shiplock walls with a height of 160 m in the deepest section.

Key words: rock mass deformability, viscoelastoplastic behaviour, numerical simulation, monitoring data, Three Gorges Dam.

1

Introduction

Le barrage des Trois Gorges (BTG) dont la construction a été totalement achevée en 2006 est le plus grand projet de retenue d'eau jamais construit en Chine. A 5 000 km de la source du Yangtze au Tibet et à 1 300 km de Shanghai, le site du BTG se présente immédiatement à l'aval des Gorges de Xiling, à proximité de la ville de Sandouping située dans le comté de Yichang (province de Hubei). Le barrage est à environ 40 km en amont du barrage de Gezhouba achevé en 1988.

C'est un barrage poids en béton d'une hauteur de 175 m et d'une longueur totale en crête de 2 309 m représentant 27.10^6 m³ de béton. Son rôle est triple : assurer la protection contre les crues, produire de l'électricité et faciliter la navigation du fleuve.

La capacité totale du réservoir, qui s'étend sur près de 700 km², est de $39,3.10^9$ m³ dont $22,15.10^9$ m³ sont affectés à la rétention des crues grâce à des procédures de gestion du niveau d'eau dans le réservoir. Pour un débit maximal du fleuve de 116 000 m³/s, le BTG serait

en mesure de réduire la fréquence des crues destructrices de une tous les 10 ans à une tous les 100 ans.

Le BTG est équipé de 26 turbines de 700 MW chacune pouvant générer une puissance de 18 200 MW, soit l'équivalent de 10 grands barrages hydroélectriques ou de 20 tranches de centrales nucléaires standard.

Deux installations localisées sur la rive gauche du fleuve ont pour but de permettre le transit des navires entre les parties amont et aval du fleuve :

– l'ascenseur à bateaux. Il est constitué d'un bac à déplacement vertical, mesurant 120 m × 18 m × 3,5 m (longueur × largeur × profondeur d'eau) permettant aux bateaux de capacité inférieure à 3 000 tonneaux de franchir les 113 m de dénivelé entre les bassins amont et aval ;

– l'écluse à bateaux permanente. Cette structure consiste en une double ligne de chambres d'écluses en série, avec pour chaque ligne, cinq chambres d'écluse successives de 280 m de long chacune permettant de rattraper les 113 m de dénivelé total entre l'amont et l'aval du barrage (Fig. 1). Les deux lignes sont séparées par un plot rocheux bétonné de 60 m de large.

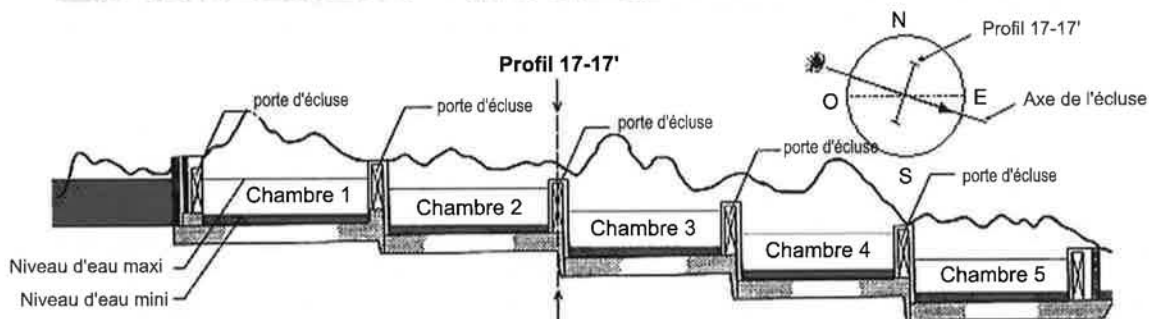
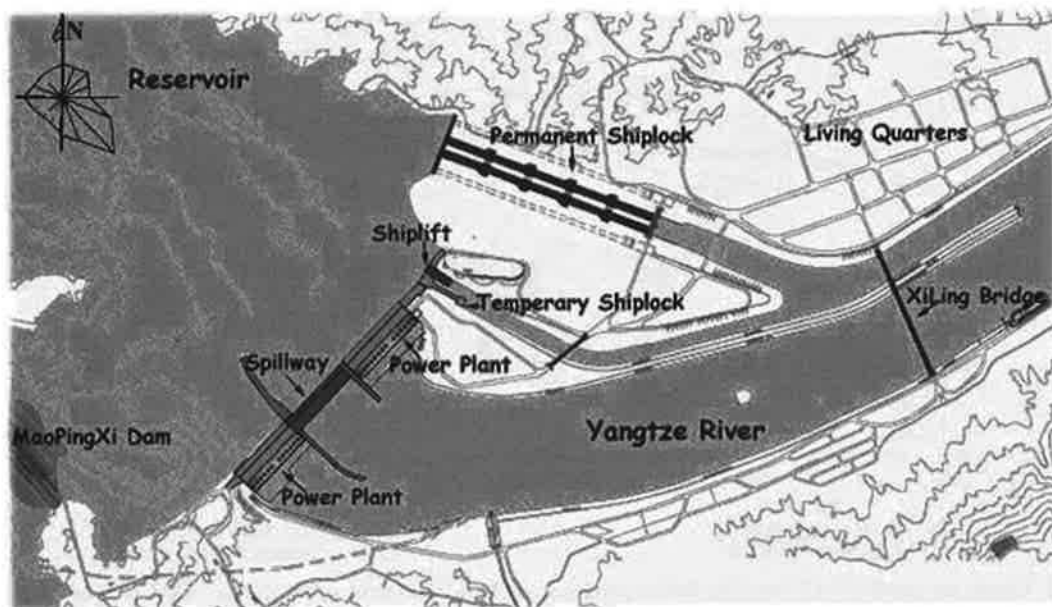


FIG. 1 Vue générale du site du barrage des Trois Gorges et profil de l'écluse à bateaux (d'après CTGPC).
General view of the Three Gorges Dam site and navigation shiplock facilities (from CTGPC).

L'écluse à bateaux permanente est désolidarisée du barrage en rive gauche. L'axe de l'écluse fait un angle de 110 degrés par rapport au nord, et sa longueur totale est de 1 617 m. L'écluse est excavée dans un massif granitique, et entaille une colline conduisant, dans la partie centrale, à une excavation de près de 160 m de haut dont les 60 à 70 m inférieurs correspondant aux chambres d'écluse sont verticaux.

La stabilité ainsi que la déformation à long terme des parements de l'écluse à bateaux ont constitué un point clé de la construction du BTG pour la sécurité générale de l'ouvrage, la garantie du trafic fluvial, et plus spécialement la fermeture des portes d'écluse qui pourraient être affectées par des déformations excessives du massif rocheux à leur niveau.

2

Caractéristiques principales de l'écluse à bateaux

2.1

Cadre géologique général

Le *bedrock* du site du barrage est constitué d'un granite à hornblende, biotite et plagioclase datant du Présinien (Précambrien), parcouru de filons acido-basiques et contenant localement des xénoschistes. La

masse rocheuse présente un profil d'altération classique bien développé : arènes granitiques en surface (zone IV), granite fortement altéré avec phénomènes d'altération en boule localement (zone III), granite modérément altéré subdivisé en une zone supérieure (zone II₂) et une zone inférieure (zone II₁), puis la roche légèrement altérée et saine (zone I). L'épaisseur des niveaux très altérés varie entre 20 et 40 m (Chen Deji, 1986 ; Chen Deji, 1999).

Les pentes de l'écluse à bateaux sont excavées dans des roches extrêmement altérées sur la partie haute, tandis que dans la partie basse, les parements verticaux et le plot central sont constitués d'un granite sain ou légèrement altéré, avec une structure massive. Le massif est affecté par quelques failles à proximité desquelles la fracturation est plus intense.

2.2

Données spécifiques au profil 17-17'

L'étude a été menée principalement sur le profil 17-17' situé dans la partie centrale de l'ouvrage à la jonction des chambres 2 et 3 (Fig. 1). A cet endroit, les parois de l'excavation sont les plus hautes avec une hauteur totale de 155 m : la hauteur du talus au-dessus des chambres d'écluse est de 85 m avec un angle moyen de 63 degrés ; les parois verticales des chambres d'écluse mesurent 70 m de haut (Fig. 2).

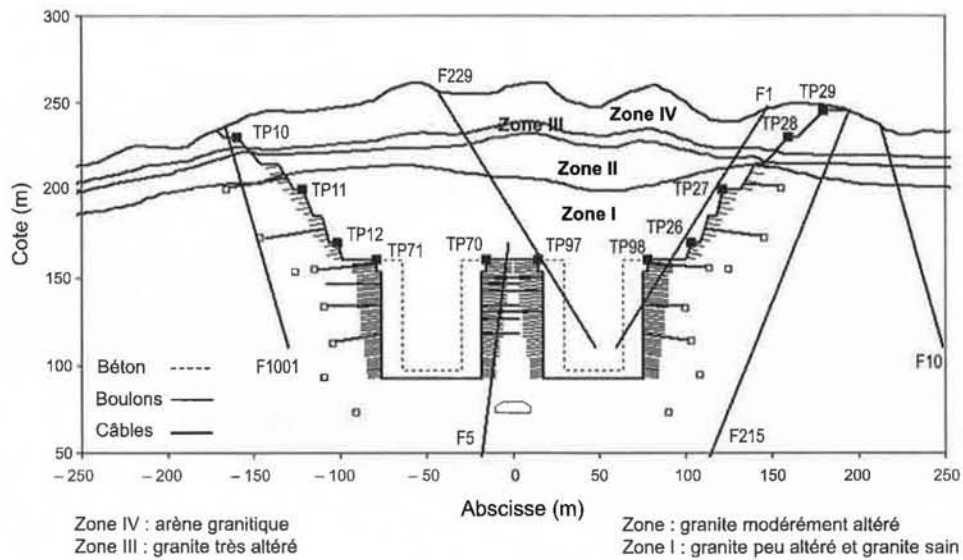


FIG. 2

Coupe du profil 17-17' avec les failles principales (F), les galeries de drainage, les dispositifs de renforcement mécanique et les repères topographiques (TP).

Cross section of the profile 17-17' with main faults (F), drainage galleries, mechanical reinforcements and benchmarks (TP).

Plusieurs dispositifs de renforcement ont été mis en place de manière systématique sur les pentes de l'excavation.

Pour les deux premiers gradins dans la partie supérieure du talus (cote supérieure à 200 m) excavés dans le granite fortement altéré en surface puis moyennement altéré, des angles de pente de 45 degrés ont été adoptés. Du béton projeté (12 cm d'épaisseur) et des boulons d'ancrage (longueur 150 cm, espacement 300 cm x 300 cm) ont été utilisés afin de protéger la surface des gradins.

Dans la partie inférieure du talus (entre les cotes 200 et 160 m), dans le granite légèrement altéré puis sain, on trouve des pentes plus raides (de 60 à 70 degrés au niveau des gradins). Du béton projeté a été mis en œuvre sur une épaisseur de 10 cm environ et des boulons d'ancrages (longueur : 500 à 800 cm) ont été installés avec un espacement régulier de 300 cm latéralement par 600 cm verticalement.

Pour les chambres d'écluse, un système de câbles en acier de haute qualité (800 à 1 400 cm de long, espacement de 130 cm x 130 cm à 160 cm x 160 cm) précontraints à une tension de service de 3 000 kN, assure le maintien des murs verticaux. Ponctuellement, les volumes instables de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de mètres cubes, identifiés à l'avancement des travaux ont été stabilisés par des systèmes d'ancrages et de câbles précontraints supplémentaires.

Un système de surveillance a été installé dès le début des travaux et au fur et à mesure de la progression de l'excavation. Il a fonctionné pendant toute la durée de la construction de l'écluse. Il est constitué de différents instruments de mesure (Fig. 3) :

- des bornes topographiques (TP), qui permettent de suivre la déformation des parois de l'excavation ;
- des inclinomètres (IN), qui renseignent sur les déplacements au niveau des failles et les déformations plus profondes du massif ;

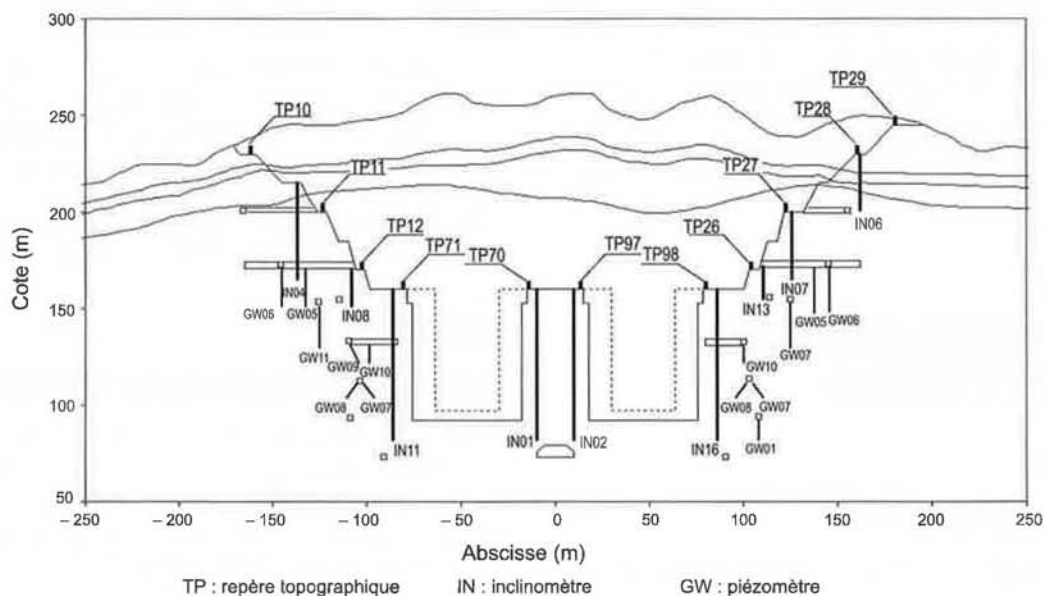


FIG. 3

Systèmes d'auscultation et de surveillance installés sur le profil 17-17'.

Monitoring systems on the profile 17-17'.

- des piézomètres (GW), qui mesurent le niveau de l'eau interstitielle dans le massif rocheux ;
- des extensomètres, qui permettent d'évaluer la déformation au sein du massif rocheux.

3

Analyse de stabilité des parois de l'écluse à bateaux

Une analyse préalable de la stabilité des parois a été menée à l'échelle du gradin, d'un ensemble de gradins et du flanc entier avec le logiciel DEGRÉS (Mines Paris-Tech-Centre de Géosciences). L'objectif était d'identifier les risques d'instabilités contrôlées principalement par les failles majeures et le réseau de discontinuités présents dans le massif.

Le logiciel DEGRÉS permet l'analyse de différents mécanismes de rupture concernant des massifs rocheux constitués de blocs rigides délimités par des discontinuités (Fleurisson *et al.*, 1992, 1996).

Dans un premier temps, ce logiciel permet de générer automatiquement un modèle géométrique des pentes à partir d'un contour initial représentant le sommet ou le bas des pentes et des paramètres géométriques des flancs et des gradins. Les pentes constituées alors d'un ensemble de facettes de caractéristiques géométriques données (orientation, pente enveloppe, hauteur de gradin, largeur de banquettes) sont ainsi créées.

Dans un second temps, l'analyse de la stabilité peut être conduite en deux étapes successives : la première concerne l'identification d'occurrence cinématique de différents mécanismes de rupture prédéfinis - rupture plane, en dièdre, en escalier, bilinéaire et par basculement - en analysant, de manière automatique, les relations géométriques entre les différentes discontinuités et les objets géométriques considérés, gradin ou ensemble de gradins. Dans une seconde étape, des calculs à l'équilibre limite permettent de définir les volumes et les coefficients de sécurité des masses rocheuses potentiellement instables en fonction des paramètres mécaniques et hydrauliques des discontinuités mises en jeu.

Cette analyse s'est appuyée sur des données géologiques et géotechniques générales fournies par le bureau d'études chinois CWRC et complétées par des observations de terrain et des mesures de discontinuités le long des parois de l'excavation à proximité du profil 17-17'. La plupart des informations recueillies représentent donc des valeurs moyennes des différents paramètres géométriques et géomécaniques du réseau de discontinuités. Sur cette base, l'analyse de stabilité n'a pu donner que des résultats généraux, mais plusieurs études paramétriques ont été réalisées pour mettre en évidence les principaux paramètres contrôlant la stabilité, analyser leur influence sur les résultats et enfin évaluer ce qui pourrait arriver dans des situations spécifiques où certains paramètres auraient des valeurs éloignées de leurs valeurs moyennes.

Ces études paramétriques ont concerné le nombre de familles de discontinuités et leurs caractéristiques géométriques (orientation, extension) et mécaniques. L'influence des failles principales sur les résultats de stabilité a également été étudiée. Une analyse spécifique du rôle des conditions hydrauliques et sismiques a également été réalisée, afin de prendre en considéra-

tion l'ensemble des facteurs influençant la stabilité au niveau des talus constituant le profil 17-17'.

D'un point de vue général, les pentes de l'écluse à bateaux, à proximité du profil 17-17', ne présentent pas de risques majeurs d'instabilité. Les résultats ont cependant montré que le versant sud de l'écluse (particulièrement le mur vertical) et le mur vertical nord du noyau central constituaient les zones les plus critiques, le réseau de discontinuités et les failles y étant particulièrement bien développés.

Étant donnée l'orientation moyenne des familles de discontinuités, la principale occurrence cinématique de mécanismes de rupture concerne des ruptures en dièdre, même si des ruptures planes ne peuvent pas être exclues complètement, certaines discontinuités étant parallèles ou subparallèles à la pente.

Les résultats ont également permis d'illustrer clairement le rôle significatif du paramètre d'extension, qui contrôle le volume des blocs potentiellement instables. Ainsi, les mécanismes de rupture détectés impliquent généralement des dièdres avec de petits volumes, qui peuvent toutefois atteindre plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de mètres cubes dans des situations exceptionnelles où des failles sont associées à des discontinuités de grande extension.

Ces résultats rejoignent les observations de terrain montrant que le réseau de discontinuités forme habituellement des blocs de taille petite ou moyenne (autour de quelques mètres cubes), sauf à proximité des failles principales où les discontinuités sont plus développées. De plus grands blocs sont alors délimités directement par la faille ou par des associations de discontinuités connectées formant alors une discontinuité équivalente de grande extension. Ces résultats justifient pleinement le système de renforcement mécanique plus développé installé au niveau des parois verticales et dans le plot central.

L'analyse de la stabilité a également mis en évidence le rôle important des conditions hydrogéologiques et en particulier le drainage des discontinuités qui a été analysé en prenant en compte la densité et la connectivité du réseau de discontinuités au niveau de la masse rocheuse. Pour des conditions hydrauliques réalistes, drainage élevé à moyen des discontinuités, les coefficients de sécurité peuvent diminuer jusqu'à 25 % par rapport à une situation à sec, ce qui souligne la nécessité de maintenir la bonne efficacité des systèmes de drainage mis en place.

4

Analyse des déformations à long terme des pentes de l'écluse à bateaux

L'échelle d'analyse considérée, ainsi que l'intensité modérée de fracturation du massif, autorisent une modélisation par un milieu continu équivalent, rendu toutefois localement discontinu pour tenir compte de l'influence des failles majeures. Les calculs, réalisés avec le logiciel en différences finies FLAC-2D (Itasca), ont permis dans un premier temps de caractériser la réponse du massif à l'excavation, et dans un second temps d'évaluer les déplacements à long terme après la fin de l'excavation.

La construction d'un tel modèle numérique est complexe car elle nécessite la connaissance d'un nombre important de paramètres relatifs à la géologie, l'hydrogéologie, au comportement mécanique du massif rocheux, ainsi qu'aux principales caractéristiques du processus d'excavation et de la mise en œuvre des renforcements mécaniques.

La détermination des paramètres mécaniques du massif rocheux est certainement le point le plus délicat, car ils dépendent à la fois du comportement rhéologique de la matrice rocheuse et des discontinuités. Les essais de laboratoire concernent essentiellement le comportement de la matrice, et les essais *in situ* ne permettent d'investiguer qu'un volume limité du massif rocheux. Quelle que soit leur qualité, ils ne peuvent rendre compte du comportement réel du massif et fournir les paramètres mécaniques correspondants pouvant être utilisés directement dans les modèles numériques, en particulier pour le comportement à long terme qui fait intervenir des paramètres de viscosité.

La solution retenue, comme la plus appropriée pour obtenir des résultats aussi réalistes que possible, a consisté à construire des modèles numériques prenant en compte les principaux paramètres géométriques, géologiques et géomécaniques du projet, et à comparer les résultats des calculs avec les mesures d'instrumentation pour ajuster, par essais successifs, les valeurs de certains paramètres.

Une telle méthodologie doit être bien contrôlée et a donc nécessité de procéder par étapes successives, mettant en œuvre des modèles initialement simples qui ont été progressivement améliorés. A chaque étape, des comparaisons entre les résultats de calcul et les mesures d'instrumentation ont été réalisées pour contrôler la réponse du modèle et ajuster certains paramètres, si nécessaire.

4.1

Calculs préliminaires et dimensionnement du modèle géométrique

Avant d'élaborer des modèles géomécaniques complexes tenant compte de l'ensemble des caractéristiques du projet, il est fondamental de réaliser des calculs préliminaires sur des modèles simplifiés afin d'évaluer l'influence de la taille du maillage et des conditions aux limites sur les résultats de calculs. Cette approche usuelle en simulation numérique a pour objectif principal de déterminer la taille du maillage et les conditions aux limites qui auront une influence nulle ou du moins limitée sur les résultats au voisinage des pentes de l'écluse à bateaux.

Les résultats de ces calculs préliminaires ont conduit à retenir une taille de modèle de 3 000 m × 1 000 m. Le rapport entre taille du modèle et taille de l'excavation est donc d'environ 8, ce qui est plutôt élevé si l'on compare aux valeurs généralement recommandées qui varient entre 5 et 10.

Le maillage (Fig. 4) est divisé en quatre zones à mailles carrées dont la taille est adaptée à la précision nécessaire pour simuler la géologie et la géométrie du problème et à la précision recherchée dans les résultats de calcul. Le nombre total de mailles est de 56 900.

4.2

Résultats des simulations numériques

Dans les premières simulations numériques, la géométrie a été simplifiée et le massif rocheux considéré comme un milieu continu obéissant au modèle de Mohr-Coulomb. Puis, ces modèles ont été progressi-

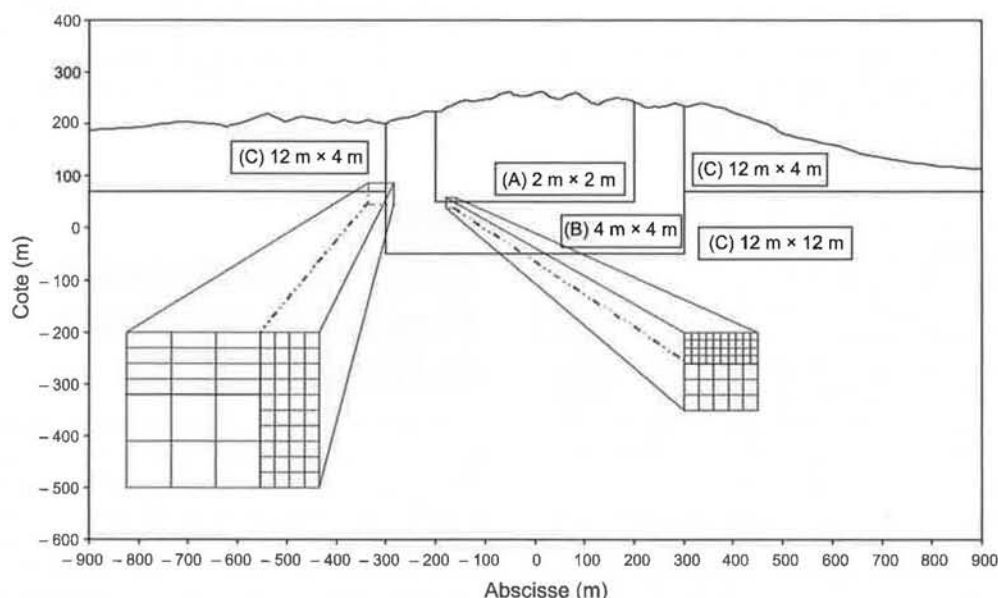


FIG. 4 Géométrie du maillage utilisé dans le logiciel FLAC2D et taille des mailles dans chaque zone (d'après Touitou, 2002).
FLAC2D model grid geometry and element size in each zone (from Touitou, 2002).

vement améliorés pour prendre en compte les aspects discontinus du massif rocheux (discontinuités et failles principales) et le renforcement mécaniques (modèles de Hoek-Brown avec failles et renforcements).

Finalement, le comportement visqueux du massif a été considéré pour pouvoir rendre compte des déformations à long terme du massif après la fin de l'excavation. Le modèle rhéologique utilisé est un modèle de Burger étendu composé d'un modèle viscoélastique de Burger (modèles de Kelvin et de Maxwell en série) en série avec un modèle plastique de Mohr-Coulomb (Fig. 5). Dans la loi de comportement viscoélastique du modèle de Burger, seul le comportement déviatorique est visqueux. Un tel modèle permet donc de simuler la réponse élastique instantanée du massif (volumique et déviatorique à travers le ressort du modèle de Maxwell) et sa réponse visqueuse déviatorique fonction du temps (à travers l'amortisseur du modèle de Kelvin et éventuellement à travers l'amortisseur du modèle de Maxwell). La plasticité est décrite par le modèle de Mohr-Coulomb. Les différents paramètres rhéologiques correspondant à la partie élastoplastique de ce modèle ont été calés à partir des résultats obtenus lors des simulations précédentes sur les modèles élastoplastiques de Mohr-Coulomb et de Hoek-Brown. Les paramètres de viscosité ont été ajustés sur la base de

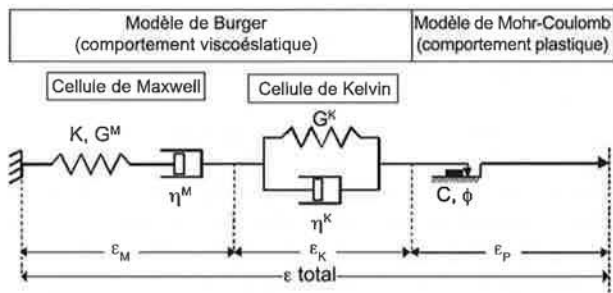


FIG. 5 Modèle rhéologique viscoélastoplastique de Burger étendu. Viscoelastoplastic extended Burger model.

mesures faites pendant plusieurs années sur les parois de l'écluse provisoire situées à l'emplacement de l'ascenseur à bateaux dans le même contexte géomécanique, ainsi que sur les mesures disponibles sur le site de l'écluse à bateaux après la fin de l'excavation (Fig. 6).

Le champ de contrainte résultant de l'excavation est illustré par la figure 7. De fortes concentrations de contraintes de cisaillement apparaissent à la base des parois verticales et à proximité des galeries de drainage, mais ne conduisent pas à des ruptures de pente majeures.

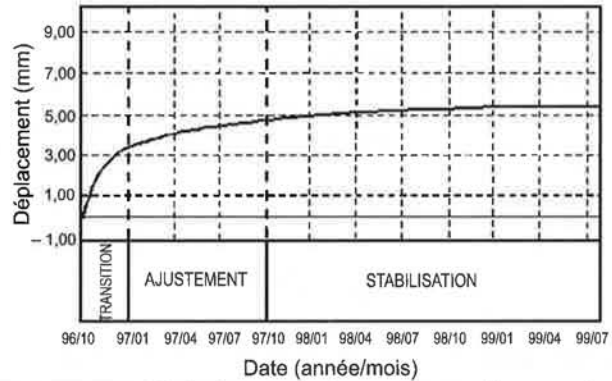


FIG. 6 Déplacement en mm du repère topographique TP14GP04 après la fin de l'excavation de l'écluse temporaire (d'après Chen Deji, 1999). Displacement (in mm) of the benchmark TP14GP04 after the end of the excavation of the temporary shiplock (from Chen Deji, 1999).

Les déplacements correspondants présentent une composante horizontale bien marquée en raison de l'état de contrainte initial caractérisé par des contraintes horizontales largement supérieures aux contraintes verticales dans la partie du massif intéressée par l'ouvrage (Fig. 8).

L'ensemble des calculs réalisés a permis d'apprécier l'influence positive, sur les déformations, des galeries de drainage et du renforcement mécanique par

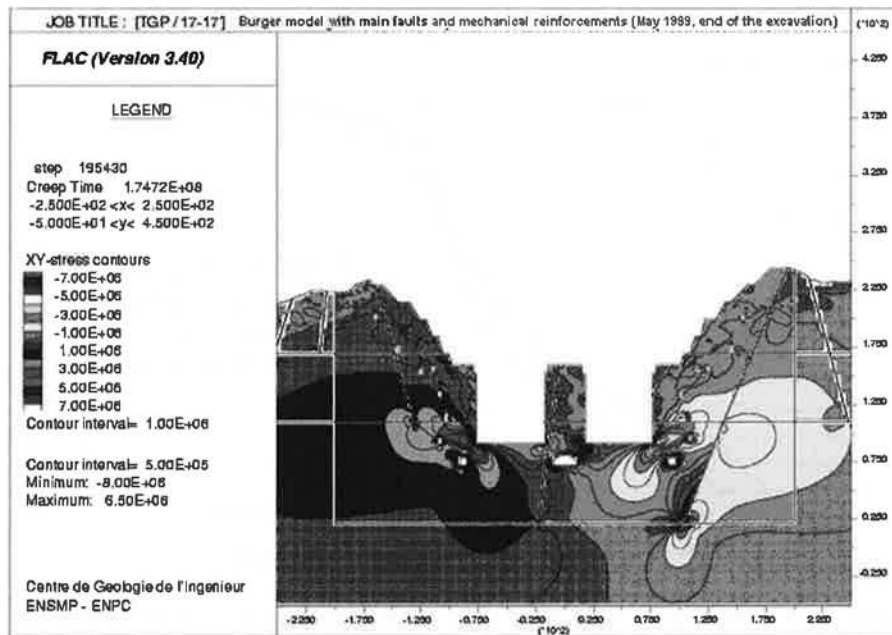


FIG. 7 Distribution des contraintes de cisaillement (en Pa) sur des facettes horizontales ou verticales. Modèle de Burger avec failles principales et renforcements mécaniques. Distribution of shear stress on horizontal or vertical facets (in Pa). Burger model with main faults and mechanical reinforcements.

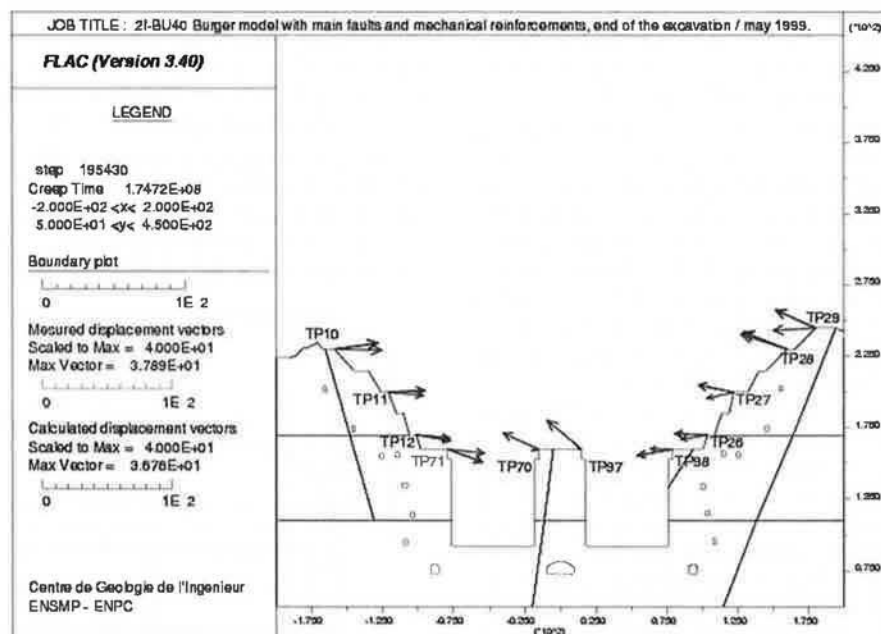


FIG. 8 Vecteurs déplacements (en m) calculés (noir) et mesurés (gris) au niveau des repères topographiques à la fin de l'excavation. Modèle de Burger avec failles principales et renforcements mécaniques.
 Calculated (black colour) and monitored (grey colour) displacement vectors of the benchmarks at the end of the excavation (in m). Burger model with main faults and mechanical reinforcements.

boulons et câbles d'ancrage mis en œuvre de manière systématique le long des pentes et, parfois, intensifié à proximité de certaines failles majeures. D'une manière générale, les renforcements mécaniques ne changent pas de manière significative les champs de contraintes sauf dans le plot central où les modèles sans renforcements mécaniques conduisent au développement de zones de traction excessive. De la même manière, le champ de déplacements est peu modifié sauf le long des murs verticaux des parois des chambres.

Les renforcements mécaniques installés réduisent considérablement les déplacements le long des murs verticaux et particulièrement à leurs sommets où les déplacements induits par l'excavation sont divisés

par 2. Ils limitent également le mouvement de long des failles principales et ont certainement, dans la réalité, une action comparable le long de discontinuités de plus faible extension non prises en compte dans cette modélisation. Au total, ils participent donc activement à la réduction des risques d'instabilités locales de blocs délimités par des failles ou des discontinuités de grande taille.

Dans l'ensemble, les modèles numériques ont donné des résultats en bon accord avec les mesures d'instrumentation (figure 8 de manière globale, et figure 9 pour plus de détails sur le repère topographique TP11) sauf dans la partie centrale où les déplacements mesurés sont sans doute influencés par des effets tridimen-

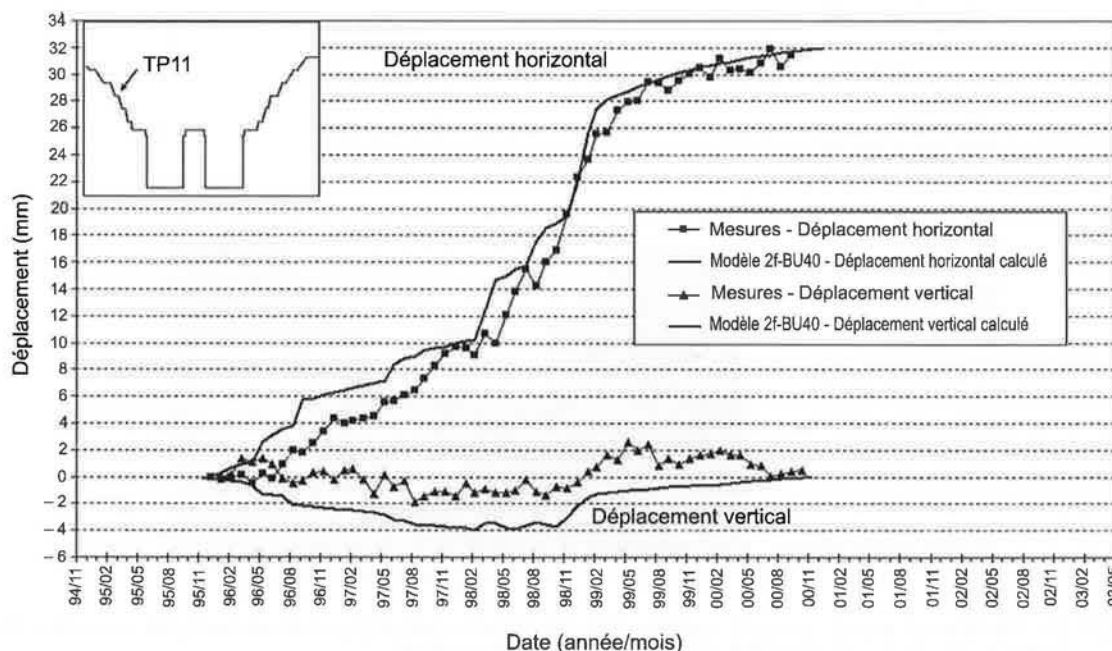


FIG. 9 Déplacement du repère topographique TP11 sur le versant nord.
 Displacement of the benchmark TP11 located on the North slope.

sionnels, un contexte structural complexe et les effets arrière des tirs à l'explosif qui ont certainement affaibli plus particulièrement cette zone.

L'utilisation d'un modèle viscoélastoplastique a alors permis de calculer l'évolution des déplacements à long terme après la fin de l'excavation. Pour ce faire, différents modèles visqueux ont été considérés tels que les modèles 2f-BU20 et 2f-BU40 pour lesquels respectivement 20 et 40 % de la déformation élastique déviatorique est une déformation viscoélastique, et dont les résultats sont illustrés sur la figure 10. On voit ainsi que le déplacement après la fin de l'excavation

est limité dans le temps et devient pratiquement nul au bout de 3 à 4 ans. L'évolution à long terme du déplacement calculé par le modèle de Burger 2f-BU40 est globalement plus proche de la tendance de la courbe d'instrumentation ; ceci est vrai pour l'ensemble des repères topographiques, même pour ceux dont l'accord entre mesures et calculs est moins bon. Avec ce modèle, l'amplitude des déplacements calculés après la fin de l'excavation est du même ordre de grandeur que les déplacements mesurés sur le terrain, et la forme des courbes de l'évolution à plus long terme des déplacements calculés est similaire à celle des courbes de déplacements mesurés.

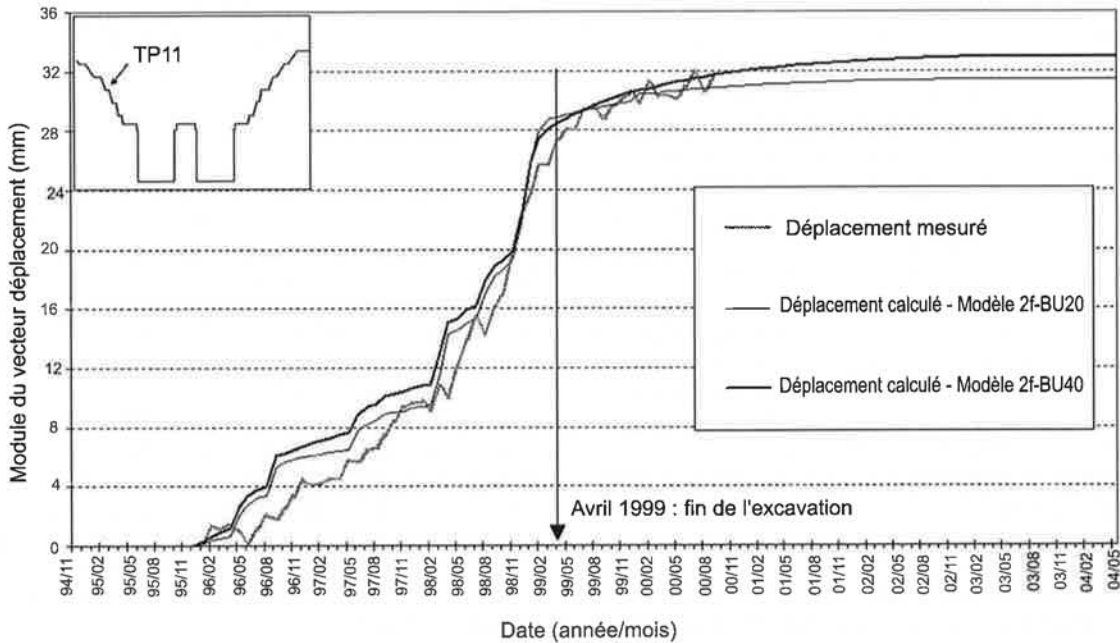


FIG. 10 Comparaison entre les « modules » des vecteurs déplacements mesurés pour le repère topographique TP11 et ceux des déplacements calculés avec les modèles de Burger avec failles et renforcements mécaniques 2f-BU20 et 2f-BU40, et évaluation du déplacement à long terme.

Comparison between measured displacements of benchmark TP11 and calculated displacements for Burger models with faults and mechanical reinforcements 2f-BU20 and 2f-BU40, and long term displacement assessment.

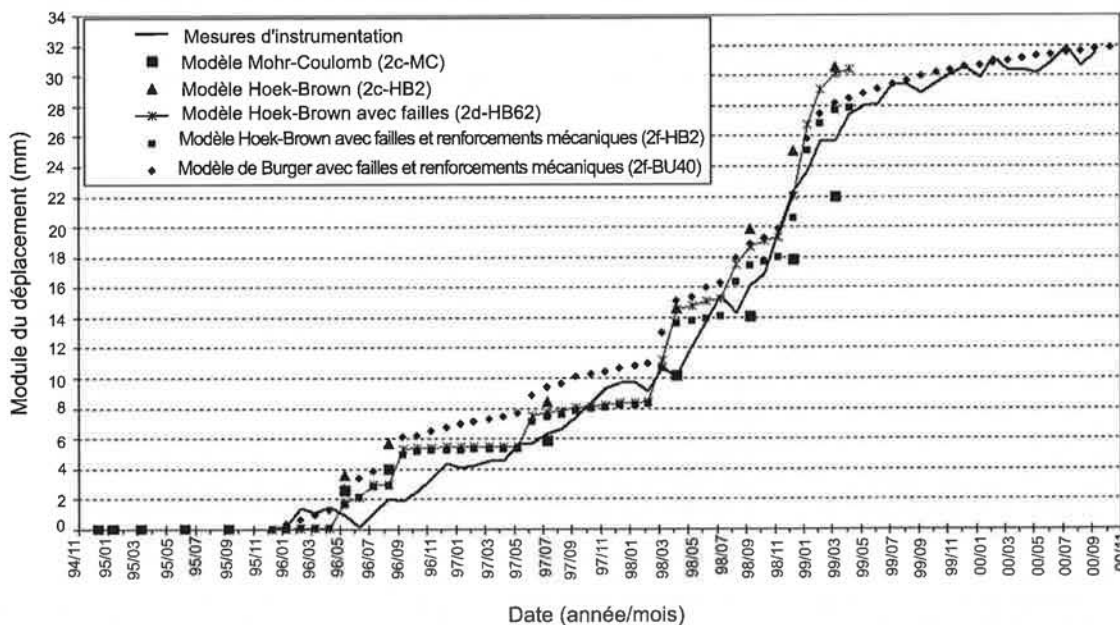


FIG. 11 Comparaison des modules des vecteurs déplacements du repère topographique TP11 mesurés et calculés par différents modèles numériques.

Comparison between measured displacements of benchmark TP11 and calculated displacements for different numerical models.

On a pu ainsi calculer la part du déplacement total qui se produirait après la fin de l'excavation. Pour les repères topographiques situés sur les pentes nord et sud, elle varie entre 8 et 17 % du déplacement total. Ces valeurs sont en bon accord avec les mesures effectuées sur des repères topographiques de l'écluse à bateaux provisoire pendant plusieurs années après la fin de son excavation et qui ont représenté 10 à 15 % du déplacement total.

4.3

Comparaison entre les différents modèles

La figure 11 montre à titre d'illustration les déplacements d'un repère topographique (TP11) fournis par l'instrumentation et les valeurs calculées avec différents modèles géomécaniques du massif rocheux.

Par comparaison au modèle continu équivalent de Mohr-Coulomb (2c-MC), le modèle de Hoek-Brown (2c-HB2), qui permet de prendre en compte une plus grande déformabilité du massif rocheux en raison de la présence des discontinuités, fournit des déplacements supérieurs, plus proches des mesures de terrain.

La prise en compte des failles majeures dans le modèle Hoek-Brown (2d-HB62) ne change pas fondamentalement les résultats pour ce repère topographique situé plutôt dans la partie haute du massif et éloigné des failles majeures du modèle.

Si l'on compare le modèle précédent avec le modèle Hoek-Brown (2f-HB62) qui intègre le renforcement mécanique, on peut observer le rôle favorable joué par ce renforcement, limitant les déplacements en particulier lors des dernières phases de l'excavation au cours desquelles sont creusées les chambres verticales sollicitant particulièrement le massif rocheux. Dans la partie finale de la courbe, les déplacements calculés sont encore plus proches des mesures traduisant une amélioration du modèle numérique.

Le modèle 2f-BU40 permet de tenir compte du comportement visqueux du massif rocheux. Ce comportement différé dans le temps est illustré clairement par l'évolution des déplacements qui se poursuit même lorsque le processus d'excavation est arrêté

(plateau dans la courbe du modèle élastoplastique 2f-HB62). Ce modèle permet de calculer des déplacements après la fin de l'excavation et on voit, qu'avec les paramètres de viscosité choisis, les déplacements calculés s'approchent relativement bien des déplacements mesurés.

5

Conclusion

L'évaluation des déformations à long terme en réponse à des excavations dans les massifs rocheux, dans des contextes géomécaniques complexes, représente un enjeu de première importance pour les problèmes de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches et ne peut être obtenue que par la simulation numérique.

La mise en œuvre de tels modèles requiert cependant de nombreuses données relatives à la géologie, l'hydrogéologie et principalement le comportement mécanique du massif rocheux. Des essais classiques de laboratoire ou même *in-situ* ne peuvent pas rendre compte de manière exhaustive du comportement mécanique du massif rocheux, en particulier de son comportement à long terme qui fait intervenir des paramètres mécaniques de viscosité à la fois pour la matrice rocheuse et pour les discontinuités.

La méthodologie présentée, fondée sur la construction de modèles de complexité croissante prenant en compte progressivement les caractéristiques géomécaniques du massif rocheux et les mesures issues de l'instrumentation, constitue certainement la solution la plus appropriée pour obtenir les résultats les plus réalistes possible.

Encore une fois, il faut rappeler qu'une étude géologique préalable est indispensable pour identifier les paramètres structuraux, géomécaniques et hydrauliques qui vont contrôler principalement le comportement du massif. On peut alors proposer des modèles de calcul dont les résultats s'approcheront du comportement réel du massif, malgré les simplifications nécessairement introduites dans la modélisation, compte tenu de la complexité de la réalité géologique.

Bibliographie

- Chen Deji – The geologic study of the Three Gorges Project in China. *5th International IAEG Congress*, Buenos Aires, 4.1.4, 1986, p. 1067-1075.
- Chen Deji – Engineering geological problems in the Three Gorges Project on the Yangtze, China. *Engineering Geology* 51, 1999, p. 183-193.
- Cojean R., Fleurisson J.-A., Billiotte J., Thénevin I., Touitou D., Cai Y., Arnould M. – *Contribution to the high rock slope design and monitoring of the permanent shiplock at the Three Gorges Dam project*. Final report. Contract Armines-CGI/CTGPC, 2001, 4 volumes.
- Touitou D. – *Apport de la modélisation et de l'instrumentation dans l'analyse de la stabilité et de la déformation à long terme d'un massif granitique. Application aux talus de grande hauteur de l'écluse à bateaux permanente du barrage des Trois Gorges (Chine)*. Thèse de l'École des mines de Paris, 2002, 174 p. et annexes.
- Fleurisson J.-A., Cojean R., Thénevin I. – *A methodological approach to assessing long term deformation of the excavated rock slopes of the permanent shiplock at the Three Gorges Dam (China)*, proceedings CD-R Geoline 2005 Lyon, France 23-25 mai, 2005.
- Fleurisson J.-A., Alonso Garcia J., Cojean R. – Mechanical reinforcement and geotechnical design of open pit mine using DEGRES program. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 10, 1996, p. 103-112.
- Fleurisson J.-A., Alonso Garcia J., Cojean R., Tanays E., Hantz D., Paquette Y., Driancourt D. – Conception géométrique de mines à ciel ouvert avec piste et analyse de la stabilité de talus. *Actes du colloque international géotechnique et informatique*. Paris, 29-30 septembre-1^{er} octobre 1992, p. 233-244.