



Simulation numérique – Optimisation des fondations et des travaux souterrains

1) L'optimisation, une philosophie

Les ingénieurs se doivent d'être à la pointe de la technique, en particulier en sachant tirer parti des énormes possibilités aujourd'hui disponibles dans le domaine de l'informatique appliquée. Depuis plusieurs années, les ingénieurs de STUCKY SA travaillent avec les scientifiques et investissent pour pouvoir disposer de nouveaux outils de calcul. Cette collaboration a pour but de bénéficier de logiciels au service d'une meilleure conception, à la fois sûre et économique. C'est avec cet objectif d'optimisation de la conception des ouvrages de fondation et des constructions souterraines que STUCKY met à disposition son expérience et ses potentialités de simulations numériques appliquées. Il souhaite le développement de collaboration entre partenaires désireux d'offrir aux Maîtres d'ouvrages des projets de construction au meilleur coût et en toute sécurité.

2) Modèle de simulation numérique

C'est une expérience de plus de 60 ans en Suisse comme dans le monde et une solide réputation internationale dans la conception et la réalisation d'ouvrages hydroélectriques et de barrages qui ont forgé cette volonté de toujours mieux faire et d'aller plus loin.

Aujourd'hui, les ouvrages sont de plus en plus complexes et sont fondés ou réalisés dans des lieux où les conditions du sous-sol sont difficiles. Le coût des fondations est devenu un facteur déterminant. STUCKY propose une démarche d'optimisation des ouvrages souterrains basée à la fois sur son expérience, une approche traditionnelle pour cadrer l'objectif à atteindre et l'utilisation du modèle de simulation Z_SOIL 3D™ pour vérifier et conforter l'attente des concepteurs. Ce logiciel, dédié principalement au calcul des ouvrages souterrains, permet des modélisations tridimensionnelles de toutes natures. Il a été conçu pour être un véritable outil d'aide à la décision au service de l'ingénieur civil.

Son module de calcul est conçu sur la théorie des milieux continus à deux phases (solide-eau), simulant un comportement constitutif élasto-plastique du milieu solide et effectuant une résolution des équations d'équilibre par la méthode numérique des éléments finis.

Z_SOIL 3D est le fruit de plus de 15 ans de recherche académique et de collaboration active entre l'industrie privée et l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Certains collaborateurs de STUCKY ont activement participé à rendre mature et exploitable ce logiciel. Ils en connaissent la théorie, les limites et apportent aujourd'hui leur expérience numérique à votre service.

Déplacements x 50
Facteur de sécurité 3 (état de ruine)

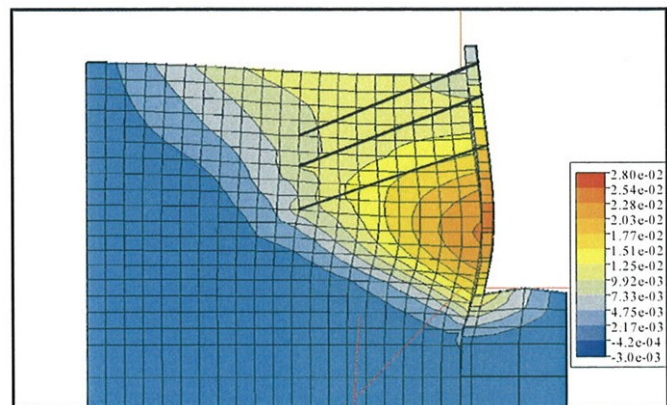


Figure 1 : Isodéplacements horizontaux (m) d'une paroi moulée ancrée

Facteur de sécurité 2.2 (état de ruine)

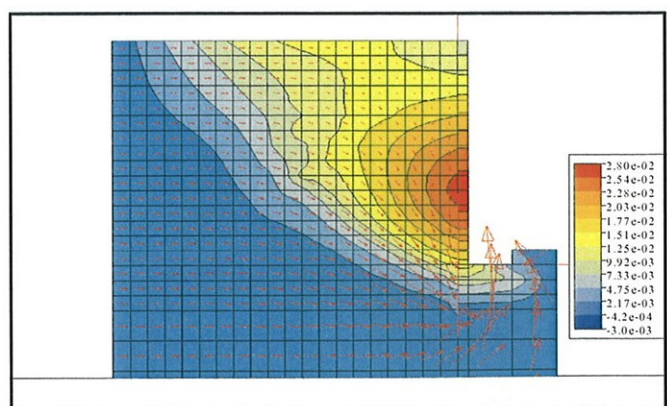


Figure 2 : Drainage d'une nappe d'eau en présence d'une paroi moulée ancrée - Isodéplacements horizontaux (m)



Avec Z_SOIL 3D et sa solution unifiée des problèmes de sol, l'ingénieur se rapproche toujours plus d'une meilleure représentation du comportement réel du terrain et de l'ouvrage, avec lequel il interagit. Dans les figures 1 et 2, l'interaction sol, eau et ouvrage (paroi moulée ancrée) est effective, surtout grâce à la présence d'un élément de contact sol-paroi, développé pour assurer le mouvement libre entre composants des problèmes à résoudre. L'écoulement d'eau est modélisé avec l'effet mécanique de l'eau sur la partie solide du sol. De même, l'illustration des figures 3 et 4 montrent le traitement aisé de tout type de stratification du sol en contraintes couplées et la modélisation de la stabilité locale ou d'ensemble d'un ouvrage. De même, il est aisé d'obtenir la distribution des efforts intérieurs dans l'ouvrage calculé. Le traitement de l'entrée et des modifications des données, ainsi que celui des résultats sont un des points forts du logiciel, assurant une analyse et une interprétation rapide de la conception étudiée.

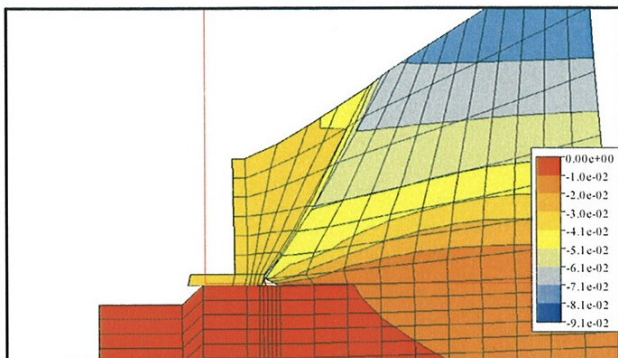


Figure 3 : Isodéplacements horizontaux (m) d'un mur sans ancrage - Glissement du pied
Facteur de sécurité 1.6 (état de ruine)

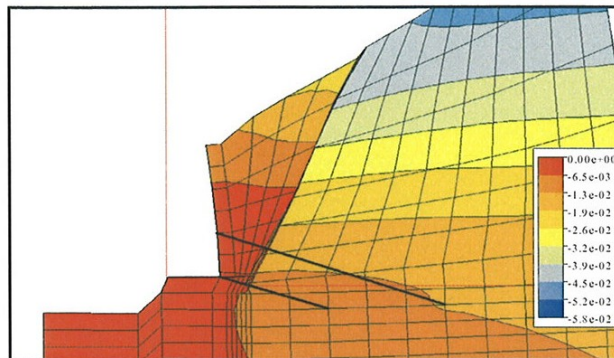


Figure 4 : Isodéplacements horizontaux (m) d'un mur ancré
Facteur de sécurité 2.4 (état de ruine)

3) Avantages de la simulation tri-dimensionnelle

Depuis peu de temps, il devient possible d'envisager efficacement des calculs tridimensionnels. Z_SOIL 3D a été développé avec une boîte à outil pour faciliter la représentation spatiale. Ainsi, des problèmes complexes et non symétriques sont modélisables. L'intérêt de simulation tri-dimensionnelle est d'éviter l'usage d'hypothèses simplificatrices d'état plan de contraintes ou de déformations, parfois inadaptées. La paroi des figures 5 et 6 en est une illustration. Dans ce cas fortement dissymétrique où les dimensions de l'ouvrage dépassent les dizaines de mètres, une simulation de l'exécution des excavations en étapes et du contrôle de leur stabilité a pu être entreprise. De même la reprise en sous-œuvre de la paroi clouée en béton a été modélisée et les efforts intérieurs (M, N et T) calculés pour chaque redistribution des efforts. Ce type de calcul demande une collaboration sans faille avec le spécialiste géotechnicien, dont la compétence est indispensable et complémentaire. STUCKY encourage et favorise ce type de démarche qu'il juge indispensable.

De même, STUCKY insiste beaucoup sur l'expérience acquise par ses propres collaborateurs qui effectuent les modélisations. A la fois praticiens expérimentés, ils ont aussi acquis une solide connaissance complémentaire de pointe en modélisation et dans l'application des lois de comportement complexes des matériaux. Sans cela, l'utilisation de tels logiciels devient hasardeuse.

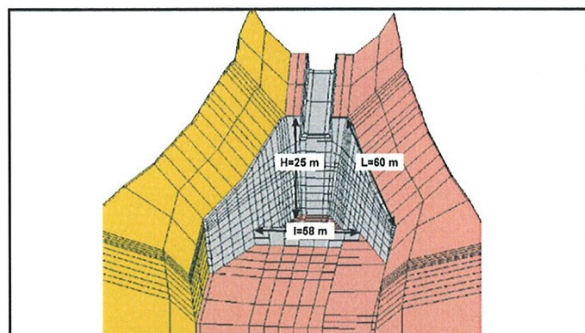


Figure 5 : Paroi de soutènement ancrée - Etat final excavé

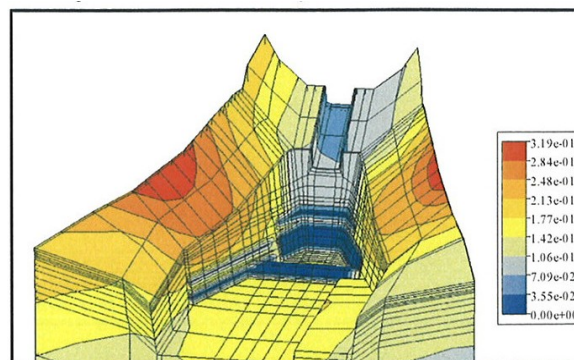


Figure 6 : Paroi de soutènement
Isovaleurs des déplacements d'ensemble (m)

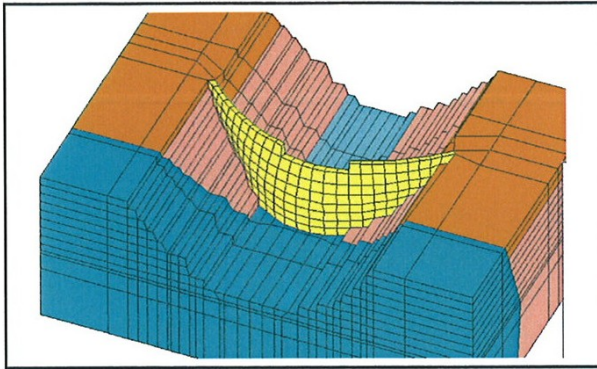


Figure 7 : Barrage-voûte (h = 130 m)
Simulation des étapes de construction

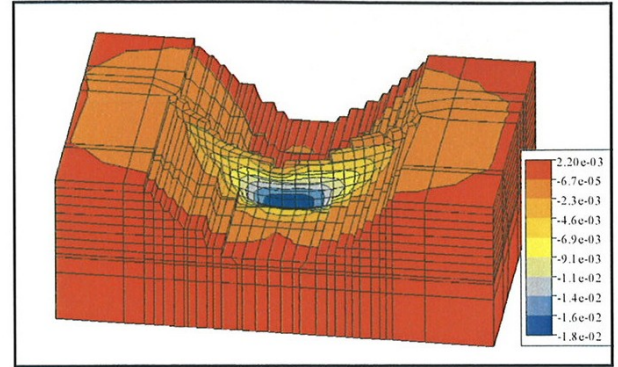


Figure 8 : Isodéplacements verticaux (m)
Etat après 550 jours de construction

L'expérience acquise lors de l'étude de nombreux ouvrages hydroélectriques se poursuit aussi en modélisation numérique comme le montrent les illustrations ci-contre. D'abord à travers les figures 7 à 9, dans le cas d'un barrage en béton, où il s'agissait de contrôler les déplacements de la fondation mesurés in situ. Les conditions de construction ont été simulées avant de déterminer l'évolution des déformations de la fondation. Dans ce cas, la forte anisotropie du massif rocheux empêchait tout calcul par les méthodes classiques.

Dans les figures 10 et 11, un accident géologique rencontré lors de l'exécution des excavations a conduit à rapidement étudier une solution de confortement d'une zone du barrage en phase de surélévation. Ici, la stabilité de la zone bétonnée sur un coin rocheux incliné vers l'aval a été étudiée sous la charge de l'eau de la retenue. De cette étude, des dispositions constructives ont pu être prises et leur stabilité étudiée.

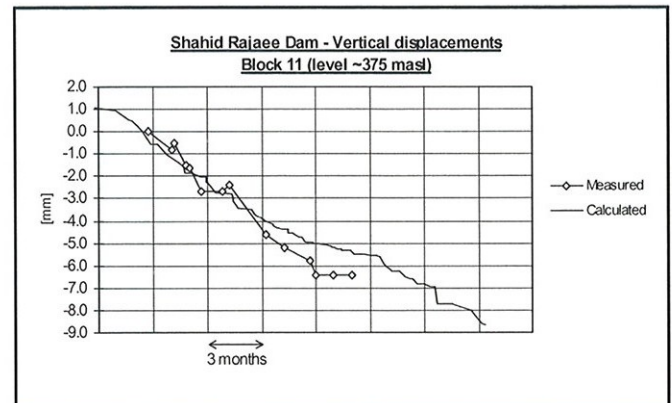


Figure 9 : Comparaison des déplacements mesurés et calculés

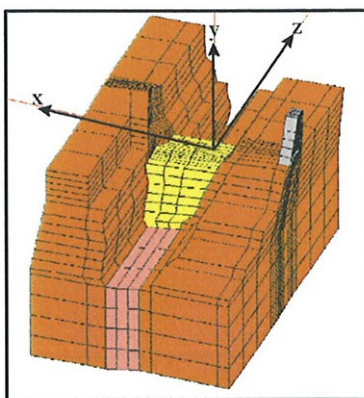


Figure 10 : 2^{ème} phase de bétonnage de la gorge

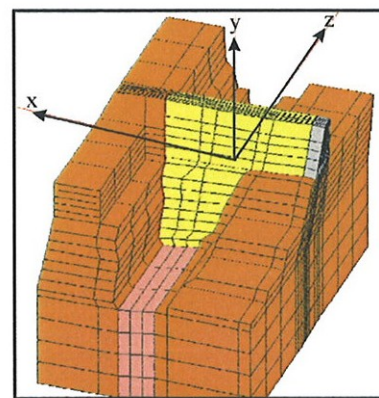


Figure 11 : Etude de la stabilité de rive du barrage



4) Application aux ouvrages souterrains à faible profondeur

Que ce soit en deux ou en trois dimensions, le contrôle de l'influence de l'exécution de toutes constructions souterraines est maîtrisable avec Z_SOIL 3D. Le logiciel est parfaitement adapté aux calculs des tunnels, à fortes, comme à faibles profondeurs. Les figures 12 à 16 donnent une illustration des possibilités de modélisation. La réalisation en étapes et l'effet de l'exécution différée des ouvrages (figures 13 à 16) peuvent être représentés afin d'optimiser le phasage de l'avancement lors de la construction. Tout renforcement local et toute décision d'injection sont simulables, permettant d'apprécier ou de comparer l'efficacité de tel ou tel mode de faire.

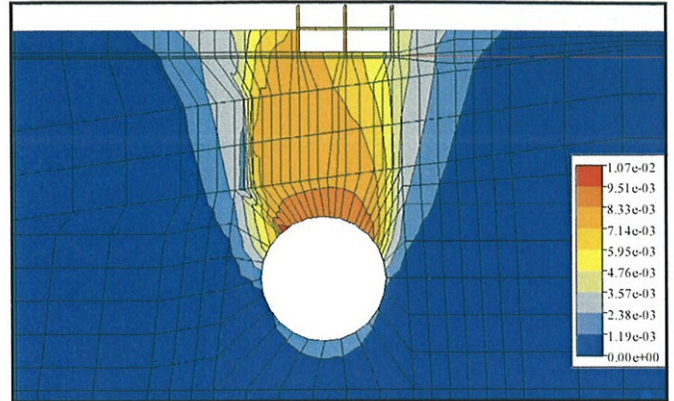


Figure 12 : Contrôle des déplacements de surface avant la pose du revêtement

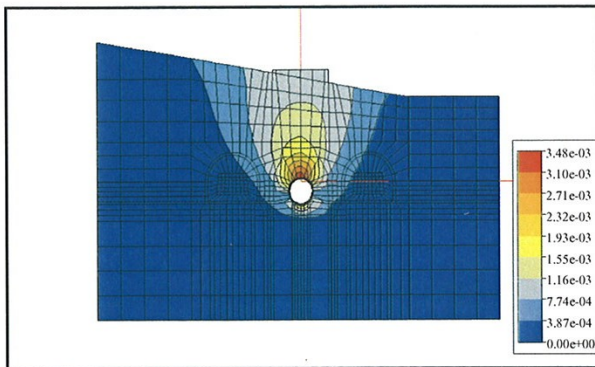


Figure 13 : Exécution galerie pilote
Isodéplacements verticaux

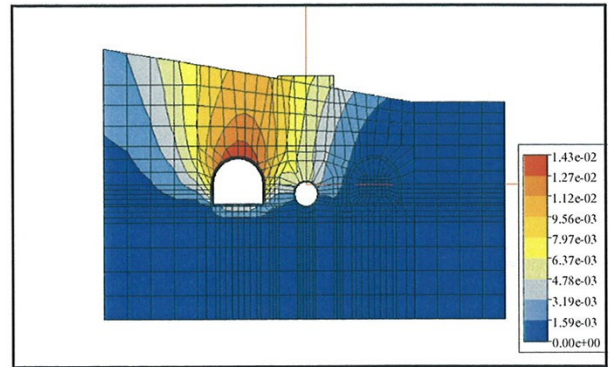


Figure 14 : Exécution tunnel gauche
Isodéplacements verticaux

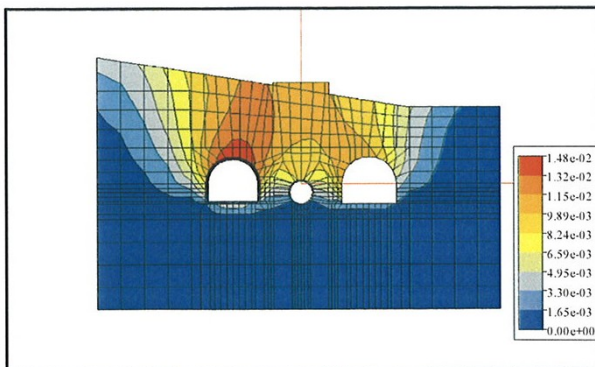


Figure 15 : Exécution tunnel droit
Isodéplacements verticaux

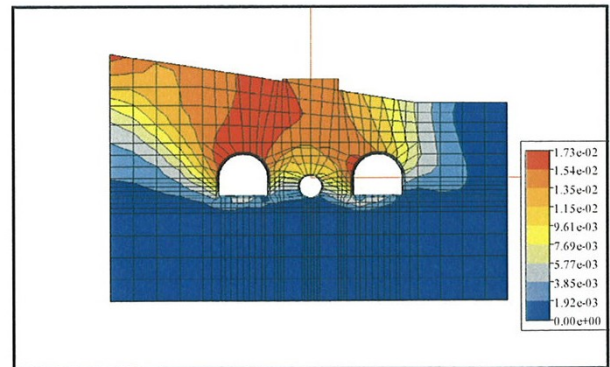


Figure 16 : Evolution des Isodéplacements
pour un facteur de sécurité de 1.9

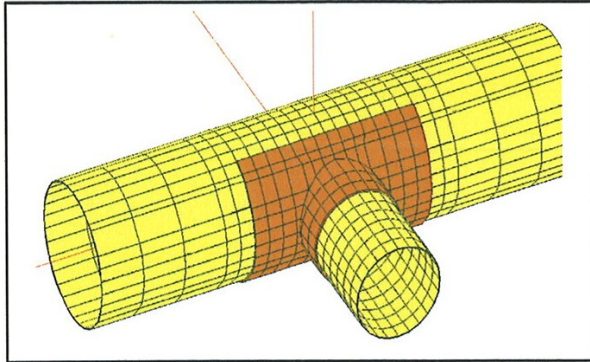


Figure 17 : Embranchement galerie d'amenée et chambre d'équilibre avec un renfort local

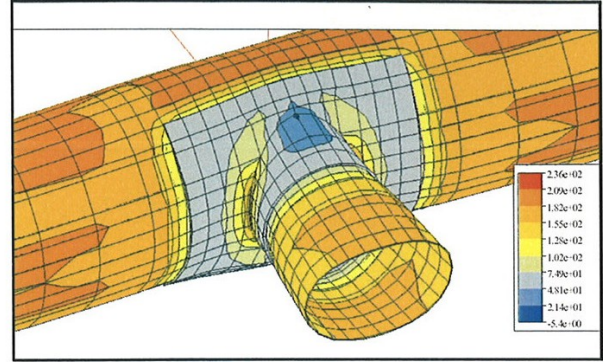


Figure 18 : Isocontraintes de traction (MPa) pour une pression intérieure de 260 mCE

5) Applications multiples

La force de Z_SOIL 3D réside aussi dans la richesse de ses possibilités (traitement des effets thermiques, du fluage du béton, ancrages, clous, utilisation d'éléments type coque pour les parois, de contact entre éléments et un large choix de modèles constitutifs pour la simulation de divers matériaux). Ainsi, des simulations comme celles montrées sous figures 17 à 20 ont aussi pu être réalisées. Sous figures 17 et 18, le contrôle des contraintes d'un élément de conduite forcée métallique et sous figures 19 et 20, la comparaison entre deux solutions de diaphragme hydraulique d'une galerie d'amenée d'eau ont été réalisés. Tous ces exemples démontrent l'étendue de la maîtrise de l'outil numérique utilisé. Si le logiciel est depuis peu à maturité pour des calculs en trois dimensions, les ingénieurs qui l'utilisent ont une large expérience des calculs numériques et de leur métier d'ingénieur. C'est un souci d'attention permanente et de critique face aux résultats du calcul qui anime STUCKY et qui crédibilise la démarche d'optimisation proposée ici.

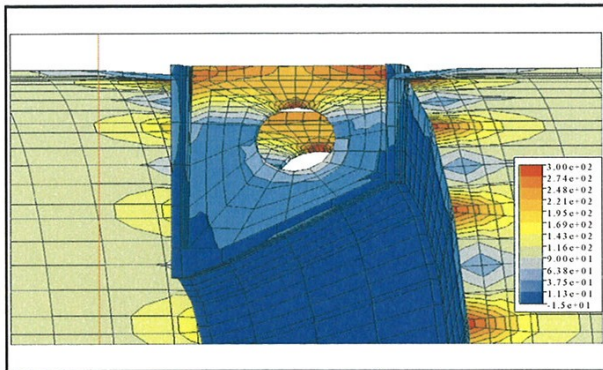


Figure 19 : Isocontraintes de traction (MPa) d'un diaphragme Solution discontinue (apparition de fortes concentrations de contraintes)

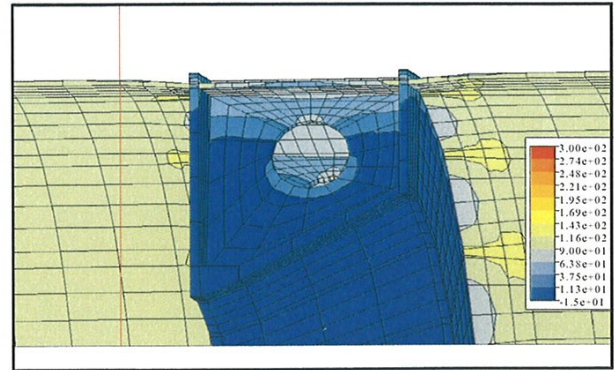


Figure 20 : Isocontraintes de traction (MPa) d'un diaphragme Solution continue