

ETUDES DES OUVRAGES SOUTERRAINS ATLAS

C. Guillon

Electricité de France and Knight Piésold joint venture, Le Bourget du Lac, France

Résumé

Le groupement d'ingénieurs-conseils EDF-Knight Piésold assure la Maîtrise d'Oeuvre du lot génie civil n° 1 du LHC (zone ATLAS). EDF-Knight Piésold a mis en place une organisation qui favorise au mieux le rapprochement de deux cultures (britannique et de droit privé - française et de droit 'public'). Les missions sont regroupées en trois phases 'études' et deux phases 'travaux'.

Au cours de la 'phase 1' les contraintes géologiques, de programmation et géométriques ont été recensées. Au cours de la 'phase 2', ces contraintes ont été prises en compte dans les études des excavations. Malgré leur nombre, les calculs bidimensionnels étaient insuffisants pour analyser correctement le comportement de tels ouvrages. Les modèles mathématiques tridimensionnels mis alors en oeuvre furent, sans aucun doute, exceptionnels, de par leur taille et de par leur complexité. Ingénieurs, programmes de calculs et moyens informatiques ont été sollicités bien souvent à la limite de leur capacité.

1. INTRODUCTION

Après un rappel rapide de l'organisation du groupement EDF-Knight Piésold et du contexte particulier des études, nous présentons les principaux calculs qui ont permis de :

- comprendre le fonctionnement des structures et de concevoir un phasage des excavations, compatible avec le programme général du projet LHC,
- de définir les soutènements provisoires et quelquefois définitifs nécessaires pour assurer la stabilité, à court terme et moyen terme, des excavations avant la réalisation des revêtements définitifs.

2. EDF-KNIGHT PIESOLD

Notre groupement a été retenu à la suite d'un appel d'offres international. Le Contrat est découpé en **5 phases** :

- Phase 1: Prise en main du projet et vérification de sa faisabilité (Avril 96 - Août 96).
- Phase 2: Avant-projet détaillé et préparation de l'appel d'offres travaux (Août 96 - Avril 97).
- Phase 3: Etudes d'exécution - élaboration de tous les plans d'exécution (Mai 97 - Avril 98).
- Phase 4: Supervision des travaux (Janvier 98 - Juillet 2002).
- Phase 5: Réception et transfert des ouvrages (Juillet 2002 - Juillet 2004).

EDF-CNEH :

- est pilote du groupement, responsable de la direction du projet et des relations avec le client,
- réalise les études d'excavation,
- dirige l'équipe EDF-KPL de supervision des travaux.

KNIGHT PIESOLD :

- est pilote des études,
- réalise toutes les études des structures en surface, et souterraines,
- élabore l'essentiel des plans d'exécution et le dossier d'appel d'offres.

Deux points caractérisent la particularité du groupement EDF-Knight Piésold :

- La forte intégration et solidarité des équipes EDF et Knight Piésold. Ceci favorise le renforcement des expériences respectives des deux bureaux d'études, malgré la différence des cultures techniques et des statuts des deux sociétés.
- La continuité du management; le chef de projet dirige les phases études puis dirige directement les phases travaux. Ceci favorise la cohérence du projet et des décisions.

3. UN CHALLENGE TECHNIQUE : GEOMETRIE DES OUVRAGES, PROGRAMME DE CONSTRUCTION ET GEOLOGIE DU SITE

Avant d'entreprendre les calculs proprement dits de dimensionnement, EDF-Knight Piésold a :

- analysé les données de base,
- étudié, eu égard à son expérience, les premières dispositions constructives à prendre en compte (principe des soutènements, phasage, etc...).

3.1 Contexte géométrique des ouvrages

Les vues en trois dimensions (annexe 1) donnent une bonne image de la complexité géométrique des ouvrages souterrains et leur imbrication. Quelques chiffres :

- La caverne principale UX15 (L=53m, l=33m, h=30m). Son axe sera parallèle à celui du LEP.
- Une grande caverne USA15 (L=62m, l=20m, h=14m), perpendiculaire à la caverne UX15.
- Deux puits circulaires (PX14) et (PX16) de diamètres intérieurs respectifs de 18m et 12,9m au droit de la voûte de l'UX15.

Certaines intersections entre grandes cavités (entre USA 15 et UX15, entre PX14/16 et UX15,...) représentent des zones d'exécution délicates.

La présence d'ouvrages existants complique notablement toutes ces données de base.

3.2 Programme de construction

La période entre l'arrêt des expériences du LEP (démolition partielle d'ouvrages existants) et la mise à disposition des nouveaux ouvrages est trop courte pour réaliser dans sa totalité la caverne UX15. Cette contrainte majeure et d'autres imposent l'anticipation de la construction de nouveaux ouvrages avant l'arrêt du LEP.

3.3 Contexte géologique et géotechnique

La formation géologique dominante est la molasse tertiaire du bassin genevois, recouverte en surface d'un dépôt de moraines glaciaires, peu épais sur le lot 1 du LHC (6 m en moyenne).

La **molasse** est constituée d'une **alternance, en bancs d'épaisseur décimétrique à métrique (typiquement : 5 cm à 2 m), de grès durs, de grès tendres plus ou moins mal cimentés, de grès marneux, de marnes sableuses, de marnes silteuses, et de marnes**, tous les faciès intermédiaires entre le pôle marneux et le pôle gréseux étant représentés.

Dans l'emprise des deux cavités principales, les principaux bancs de grès, marne, etc... (épaisseur supérieure à 0,5 m) peuvent être corrélés de façon satisfaisante d'un sondage à l'autre, ce

qui a permis d'établir pour chacune des deux cavités une stratigraphie-type, destinée à servir de référence pour les modélisations numériques (qui bien entendu la simplifie nécessairement). Le schéma en annexe 2 illustre la stratigraphie type retenue pour UX 15.

La molasse est fortement surconsolidée, suite à l'érosion depuis son dépôt d'environ 2000 m de couverture, et à la présence de glaciers épais de 300 à 400 m au cours des glaciations quaternaires.

En raison de cette surconsolidation, et peut-être aussi pour des raisons tectoniques, les contraintes naturelles dans le **massif molassique sont fortement anisotropes**, le **rapport de la contrainte horizontale à la contrainte verticale au niveau des cavités étant de l'ordre de 2**.

Les points faibles du massif molassique sont les bancs purement marneux, dont la résistance mécanique est plus faible, voire réellement médiocre pour les faciès « grumeleux ».

Le tableau ci-après résume les principales caractéristiques mécaniques des principaux faciès de la molasse.

Table 1
Quelques caractéristiques géotechniques des faciès de la molasse

	Grès très dur	Grès dur	Grès tendre	Grès marneux marne sableuse	Marne	Marne grumeleuse
Résistance à la compression simple (MPa) :	41 (35-53)	24 (16-34)	11 (8-14)	21 (7-44)	13 (3-17)	6 (3-8)
Résist ^{ce} au cisail ^{mt} à la rupture (pic) :						
- Cohésion C (MPa)	6,5	5,5	2,4	5,2	1,5	1,4
- Angle de frottement φ (°)	42	42	39	35	35	16
Résistance au cisaillement post-rupture :						
- C (MPa)	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5
- φ (°)	39	39	32	39	30	19
Module déformation court terme E (GPa) :	5,9	4,4	2,2	4,3	1,4	0,5

En outre, en raison de leur forte surconsolidation, et de la présence de minéraux argileux gonflants dans leur composition (10 à 18 % de smectite), les **bancs marneux sont gonflants**, et par voie de conséquence **très sensibles à la détente**, aux **modifications de teneur en eau** (humidification/dessiccation \Leftrightarrow gonflement/retrait), et au **remaniement mécanique** (trituration).

Dès qu'elle est mise au jour, et de ce fait soumise à la détente (disparition partielle des contraintes initiales qu'elle supportait avant excavation), la marne manifeste une grande sensibilité à l'air (fissuration de retrait, faïençage, désagrégation progressive de la paroi), et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques).

3.4 Difficulté principale : la modélisation du sol

La structure « en mille-feuille » du massif, avec de très forts contrastes de raideur et de résistance mécanique entre certains bancs voisins (grès durs à marnes grumeleuses), rend le problème de la modélisation du terrain très difficile.

La problématique est la suivante :

- **Faut-il modéliser le massif de façon plutôt globale**, en ne considérant qu'un nombre réduit d'unités (3 en l'occurrence), au sein desquelles un faciès est plus ou moins prédominant, et en attribuant à ces unités des caractéristiques « globales équivalentes », calculées à partir des caractéristiques des différents faciès, pondérées en fonction de leur importance relative au sein de l'unité ?

Et dans ce cas, quelle fiabilité accorder à ces caractéristiques « globales équivalentes » ? Sachant que chaque unité comporte des bancs appartenant à tous les faciès, que les distinctions entre faciès comportent nécessairement une part de subjectivité ^(*), enfin, que les descriptions des différents sondages de reconnaissance ne sont pas toujours homogènes entre elles.

- **Faut-il au contraire effectuer une modélisation « pseudo-réaliste » du massif, en individualisant un maximum de bancs gréseux et marneux ?**

La chose est envisageable pour les modèles en deux dimensions, mais est en revanche impossible pour les calculs tridimensionnels, où la complexité de la géométrie des excavations, et l'absence de toute symétrie exploitable, conduit déjà à un maillage très compliqué, même dans un terrain homogène.

- **De plus, il est presque obligatoire de modéliser de façon individuelle (au moins pour des études de détail) certains bancs marneux épais occupant des positions « stratégiques » par rapport aux cavités** (par exemple : à quelques mètres au-dessus de la clef de voûte de UX 15 ou de USA 15). Sans quoi, on gommerait des contrastes aigus entre bancs, dans une zone fortement influencée par les cavités, au risque de fausser totalement la compréhension du comportement de cette zone.

Un large et difficile débat a eu lieu sur ces questions entre les experts géologues.

L'auscultation des premières excavations (puits et USA 15) permettra de vérifier la représentativité des modèles numériques et d'adapter si nécessaire ceux de l'UX15 (ouvrage le plus difficile à réaliser). Dans le cas du lot n° 1, un dispositif d'auscultation important est donc strictement indispensable.

La présence de bancs marneux au sein du massif rocheux complique aussi les lois de comportement à prendre en compte, puisqu'il faut examiner certaines particularités de comportement comme le **fluage**, le **gonflement**, etc.

3.5 Précautions particulières à prendre lors de la construction

Ces particularités géologiques et géométriques conduisent dès à présent à prendre des précautions lors de la phase travaux :

- **altérabilité de la molasse** : il sera indispensable de protéger la molasse des effets de l'air ou de l'humidité, par application immédiate d'une couche de béton projeté;
- **effet de la stratification horizontale et de l'anisotropie des contraintes naturelles** : la stratification horizontale induit un risque élevé de décollement de bancs en clef de voûte (le long d'un joint stratigraphique); d'autant plus que l'importance des contraintes horizontales naturelles initiales (égales au double du poids des terres) entraînera l'apparition de contraintes horizontales très élevées au-dessus de la clef, d'où un risque de rupture de certains bancs en surcompression, avec ouverture des joints horizontaux (ce qui facilitera l'effet de la gravité). Ce phénomène devra être contrôlé à l'aide d'un boulonnage systématique mis en place à l'avancement.

^(*) Exemples : Grès très dur/dur/mi-dur/tendre. Grès légèrement marneux/grès marneux/marne (très) sableuse / marne légèrement sableuse/marne.

L'action de la gravité sur des bancs plus ou moins décollés peut aussi entraîner l'apparition de hors-profils aux naissances de la voûte.

- **importance des déformations du terrain** : L'excavation des grandes cavernes s'accompagne de convergences importantes (décimétriques). L'importance des contraintes horizontales initiales aggrave la situation (beaucoup d'énergie élastique est en effet emmagasinée dans le terrain, assimilable à des ressorts horizontaux fortement bandés).

Ces déformations importantes ont deux conséquences, qu'il est nécessaire d'examiner :

- effets de ces déformations sur les ouvrages existants, en terme de déplacement vers la nouvelle excavation,
 - effets de ces déformations sur les caractéristiques du terrain (risque d'endommagement du terrain, avec chute corrélative de ses caractéristiques mécaniques).
- **existence de déformations significativement différées dans le temps** : les déformations et déplacements engendrés par l'excavation continuent pendant une période relativement longue après la fin du creusement (**fluage des bancs marneux**), et affectent donc le revêtement définitif, qui doit être prévu en conséquence.
 - **prévention du gonflement** : le gonflement des niveaux marneux se manifeste plus particulièrement en radier des excavations. Sur les longpans, le phénomène est contrarié par le frettage horizontal des bancs gréseux qui flanquent les bancs de marne.

L'expérience des travaux antérieurs a montré qu'une pression de confinement de l'ordre de 0,2 MPa est suffisante pour résister au potentiel de gonflement résiduel de la molasse, après mise en place du radier, et assurer un comportement satisfaisant de celui-ci. A cette fin, un radier épais, dans lequel peut s'inscrire une contre-voûte, est prévu pour les cavités.

- **maîtrise des infiltrations d'eau dans la cavité en service** : si les molasses ont une faible perméabilité, il n'en est pas de même pour la couche supérieure composée de moraines renfermant des nappes d'eau. Les termes du contrat spécifiant que les nouveaux ouvrages doivent être parfaitement « hors d'eau », un complexe drain/membrane étanche sera systématiquement interposé entre le béton projeté et les revêtements définitifs en béton. Pendant les travaux, l'eau devra être continuellement maîtrisée, la **molasse** étant en effet **très sensible au gonflement**.

4. ANALYSES NUMÉRIQUES 2D ET 3D

Lorsque toutes les données géologiques, géométriques, les contraintes de planning sont figées, lorsque les grandes lignes du phasage ou les techniques d'exécution sont arrêtées, EDF-Knight Piésold a entrepris une phase d'analyses numériques 2D et 3D pour quantifier les contraintes, les déplacements dans le terrain et dans les soutènements.

La particularité du lot n°1 est l'importance du volume des études tridimensionnelles.

4.1 Calculs bidimensionnels sur quelques sections bien particulières

Ces calculs 2D ont permis de 'dégrossir' l'étude du comportement des ouvrages les plus importants tels que les cavernes principales et les puits d'accès de grand diamètre.

Ces modélisations en 2D ne prennent pas en compte l'interaction entre les différents ouvrages, mais permettent de simuler plus finement :

- La stratigraphie du massif, et en particulier les différentes couches marneuses individualisées dans le cadre de l'étude géologique. Cette modélisation plus précise de la stratigraphie permet de prendre en compte l'hétérogénéité de la molasse et son anisotropie.

- Différents scénarii de séquences d'excavation d'un ouvrage.
- Les soutènements provisoires et/ou définitifs des ouvrages. Le béton projeté est ainsi modélisé par des éléments de structure de type « poutre » travaillant en effort normal, cisaillement, et flexion. Le boulonnage passif est pris en compte.

Ces modélisations bidimensionnelles sont réalisées avec le logiciel FLAC^{2D} (logiciel basé sur la méthode des différences). Cette première étape, réalisée sur réseau UNIX, nécessite plus d'une centaine de calculs.

4.2 Calculs tridimensionnels - des modèles exceptionnels.

Les calculs tridimensionnels ont essentiellement pour objectif de modéliser l'interaction des différents ouvrages.

Dans un premier temps ces calculs ont été réalisés avec le code GEFDYN.

Dans un deuxième temps, ces calculs ont été réalisés avec FLAC-3D, acquis par le CNEH pour les besoins propres de cette étude. Les possibilités de ce code ont permis de compléter et d'affiner les études.

Cette étape a permis, en terme de contraintes et de déplacement :

- dans un premier temps, de confirmer le phasage général évoqué dans la phase précédente,
- puis, dans un deuxième temps, d'établir le phasage détaillé sollicitant le moins possible les structures existantes ou déjà réalisées et le terrain (la molasse).

Basé sur le principe des différences finies, ce logiciel fonctionne sur PC. Celui-ci nécessite toutefois une capacité mémoire conséquente (128 Mo RAM) et une vitesse minimum de 200 MHz. Dans ces conditions, la **simulation de l'excavation** complète des ouvrages, comprenant environ 10 étapes, **nécessite deux semaines de calcul**.

Dans cette étape '3D', l'ensemble des excavations principales est modélisé. Du fait de la complexité du projet (voir en particulier le paragraphe 3.4) le **maillage est exceptionnel** (52 712 éléments). Les **temps de calculs sont donc très longs**.

5. PRINCIPAUX RESULTATS DES CALCULS

Nous avons évoqué au paragraphe 3.5 un certain nombre de dispositions à prendre au cours de la construction. Nous résumons ci-après ce que les calculs proprement dits ont mis plus particulièrement en évidence.

5.1 Réalisation de l'USA15 avant l'UX15.

L'excavation de la caverne USA15 génère une réduction importante des contraintes horizontales dans la zone où doit être excavée ultérieurement la caverne principale UX15. Ceci est particulièrement important vis-à-vis de la forme, défavorable, des longpans plats de l'UX15.

5.2 Réalisation du revêtement définitif de l'USA15, avant excavation du stross de la caverne UX15.

Les convergences des excavations et des soutènements provisoires dans l'USA15 à proximité de l'UX15 seraient très élevées lors des excavations dans l'UX15 sous les poutres du pont roulant. La réalisation au préalable du revêtement définitif de l'USA15 réduira donc fortement ces convergences au détriment d'une reprise importante des contraintes dans celui-ci. Ce phasage permet de mieux équilibrer le planning des travaux avant et après l'arrêt du LEP.

5.3 Remise en cause du mode de réalisation de l'UX15 établi lors de l'étude de pré faisabilité.

L'étude de pré faisabilité, réalisée en 1995, avait conclu à la nécessité, pour réaliser la grande caverne UX15, de créer un pré-radier en préalable à toute autre opération d'excavation de cet ouvrage. Cette disposition était justifiée par la crainte de phénomènes de fluage très importants en radier. Elle était suivie par l'excavation de la voûte, le bétonnage de celle-ci, puis l'excavation du stross de la caverne par bancs successifs.

EDF Knight Piésold a étudié plusieurs séquences d'excavation, dont celle de l'étude de pré faisabilité. Cette analyse a permis de conclure en faveur d'une solution radicalement différente qui concilie mieux les impératifs de planning du CERN et la préservation des structures existantes :

- Excavation de la voûte de l'UX15 jusque sous le niveau des poutres du pont roulant et bétonnage du revêtement définitif, avant la poursuite des excavations sous les poutres.
- Excavation de l'ensemble de l'UX15 jusqu'au radier et bétonnage du revêtement définitif en remontant (radier, puis les murs jusqu'aux poutres du pont roulant). L'ampleur et le découpage des phases détaillées d'avancement pourront être précisés ultérieurement, lorsque l'on disposera du retour d'expérience de l'excavation de l'USA15.

5.4 Estimation des mouvements induits par le creusement sur les ouvrages existants

Les calculs ont permis de donner une première estimation des mouvements du LEP lors des premières phases d'excavation (déplacement vertical ≈ 20 mm à la fin des excavations de la voûte UX15 jusqu'au niveau 370; déplacement horizontal ≈ 10 mm lors de l'excavation de l'USA15).

5.5 Phasage bien adapté aux contraintes de programme

En conclusion, tous les calculs ont permis de valider un phasage bien adapté aux contraintes du projet. En particulier, il permet de bien équilibrer les ouvrages réalisables avant et après l'arrêt du LEP. On a pu noter en effet que l'on peut ainsi réaliser environ 64% des ouvrages avant l'arrêt du LEP, or ceci correspond (hors phase d'installation) à 60% du délai global de la réalisation. Les grandes lignes du programme sont les suivantes :

- **Avant le "shutdown" :**
 - ⇒ excavation des puits PX14 et PX16, et revêtement du puits PX15
 - ⇒ excavation et bétonnage de USA15,
 - ⇒ excavation et bétonnage de la voûte de UX15.
- **Après le "shutdown" :**
 - ⇒ le solde des travaux souterrains à réaliser en 16 mois.

6. CONCLUSION

La complexité et le volume de ces études constituent pratiquement une première aussi bien pour l'équipe qui l'a réalisée que, plus largement, pour la profession.

Les limites des codes de calculs ont souvent été atteintes et remises en question, ainsi que celles des ordinateurs utilisés.

Comme dans tout ouvrage souterrain, une adaptation aux conditions réelles peut s'avérer nécessaire en cours de construction. Le dispositif d'auscultation sera le relais indispensable pour prendre cette décision éventuelle. La planification actuelle des premiers travaux (réalisation en premier de USA15) permettra d'anticiper d'éventuelles adaptations du phasage de l'UX15 sans remettre en cause les délais finaux.

REFERENCES

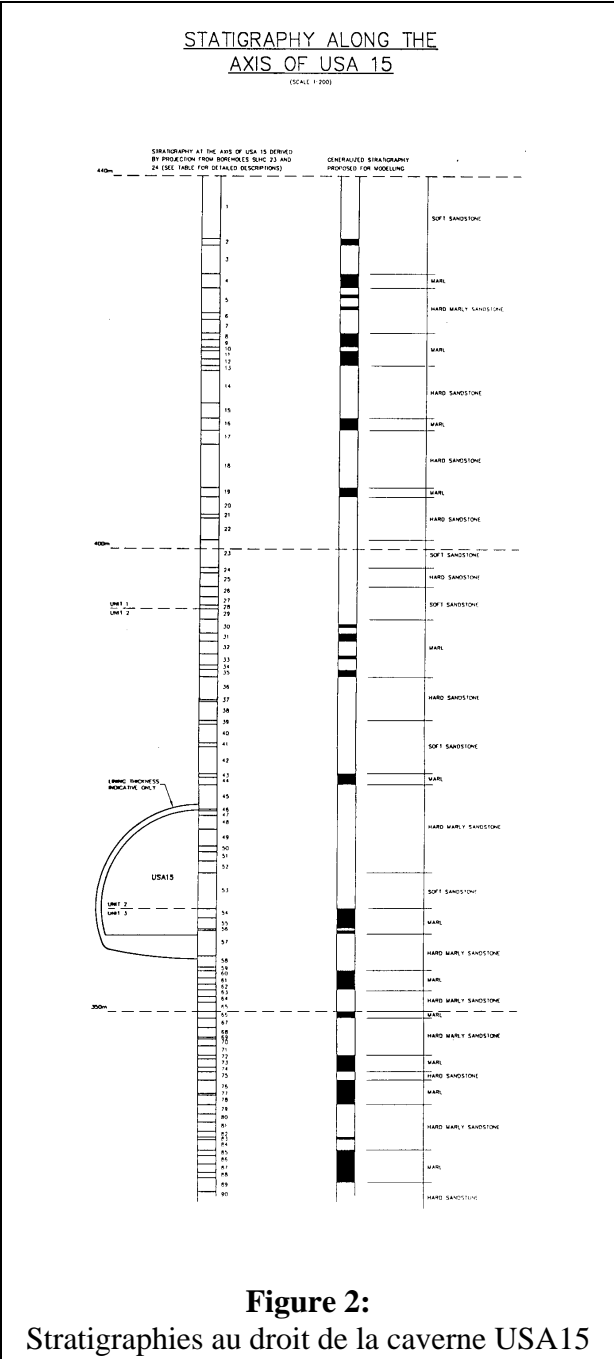
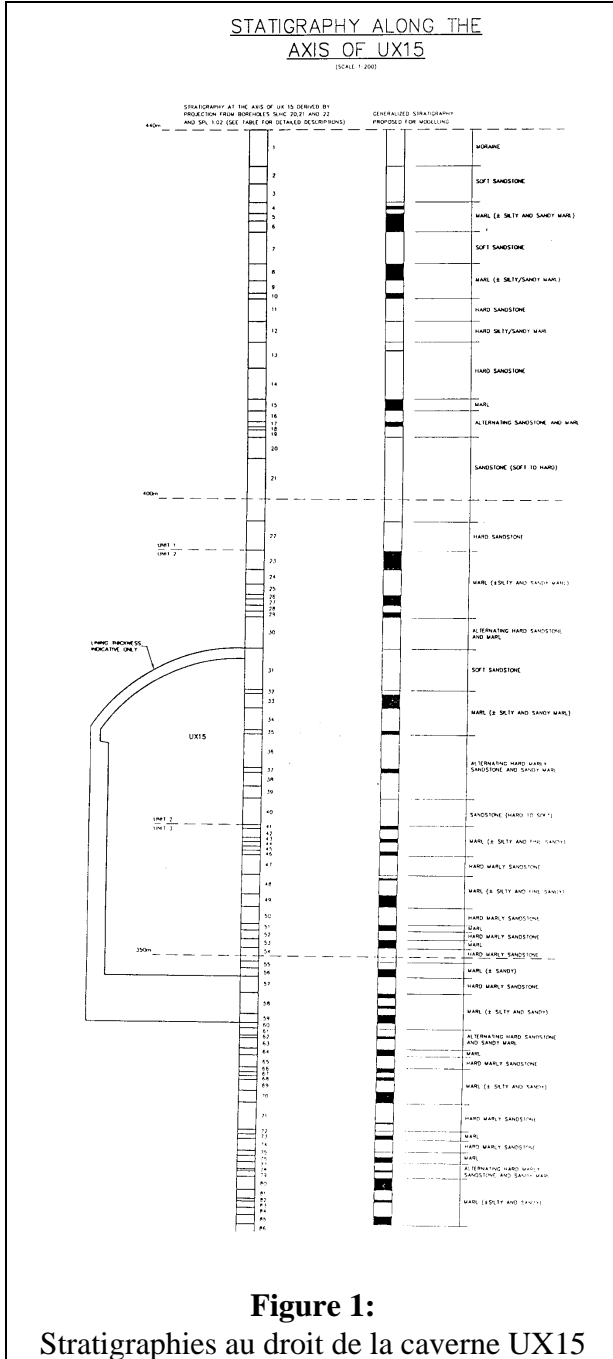
Documents internes EDF-CNEH :

- [1] B. Boymond, CERN - Projet LHC - Excavation des principaux ouvrages du point 1 du LHC, EH DT GC / 97 067 B (1997).
- [2] F. Laigle, Projet LHC - Excavation des ouvrages souterrains - Note de calcul, EH DT ED / 97 029 B (1997).

Documents EDF-Knight Piésold joint venture :

- [3] C. Guitton, Phase Two Design Summary Report (1997).
- [4] P. Varley and P. Buet, Geological and geotechnical interpretative report (1997).
- [5] C. Guitton and J. Turner, Construction cost estimate report (1997).
- [6] C. Guitton, Construction programme report (1997).
- [7] B. Boymond, Report on instrumentation and Monitoring System (1997).

ANNEXE 2 - COUPE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE.



ANNEXE 3 - MODELISATION ET QUELQUES RESULTATS DES CALCULS.

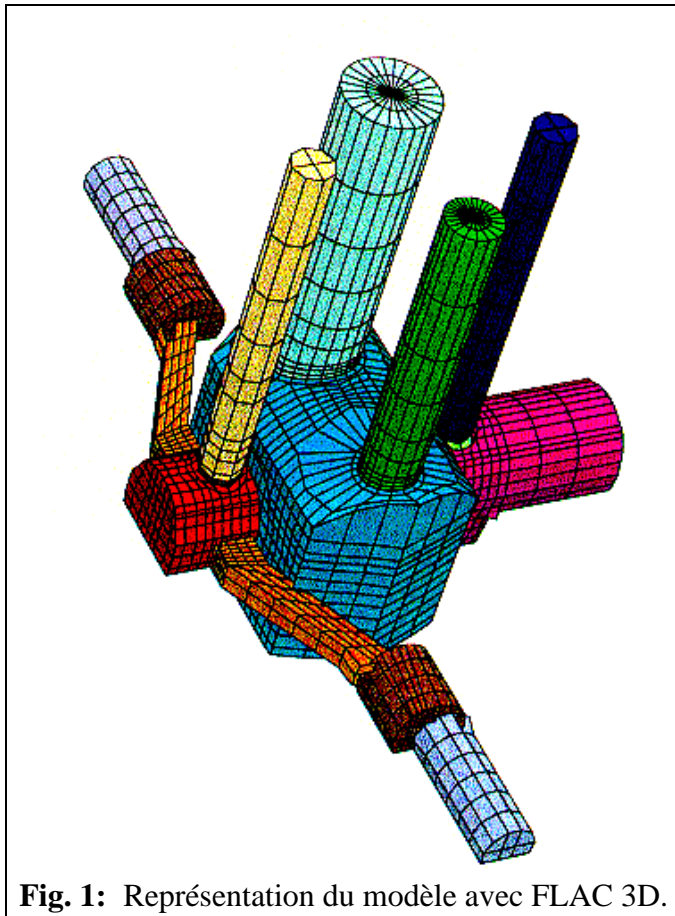


Fig. 1: Représentation du modèle avec FLAC 3D.

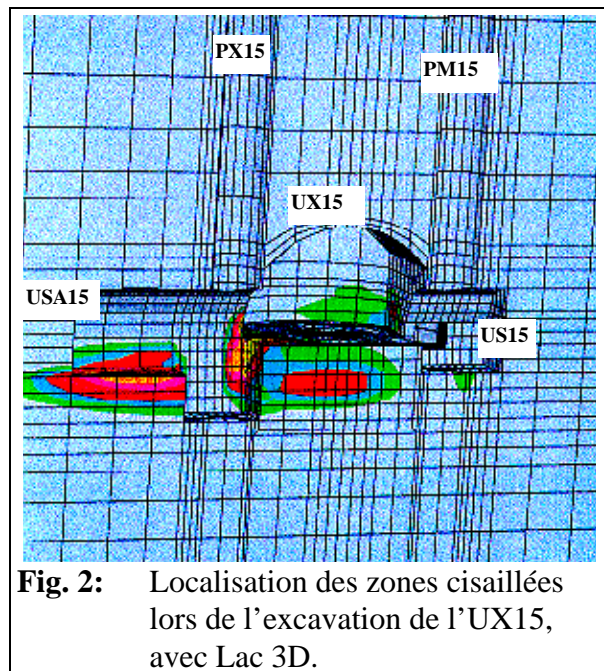


Fig. 2: Localisation des zones cisillées lors de l'excavation de l'UX15, avec Lac 3D.

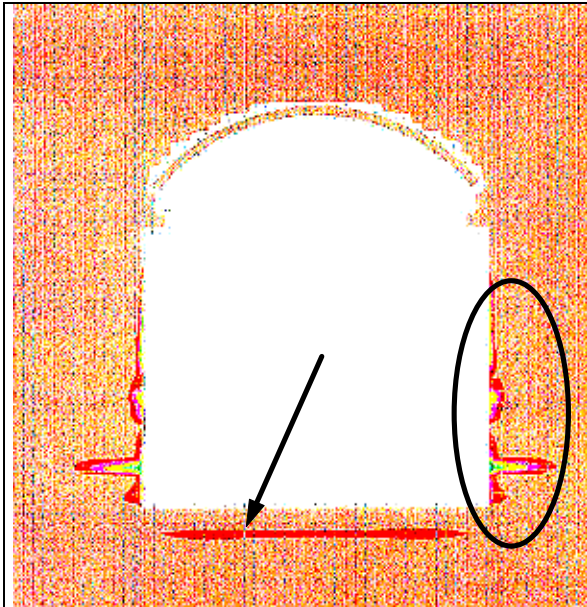


Fig. 3: Localisation des zones cisailées (Couches de marne) dans la caverne UX15, avec Lac 2D.

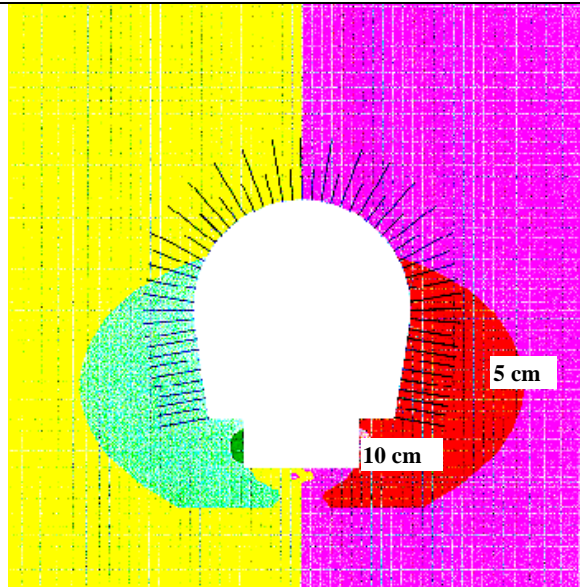


Fig. 4: Isovaleurs des déplacements horizontaux dans la caverne USA15, avec FLAC 2D.

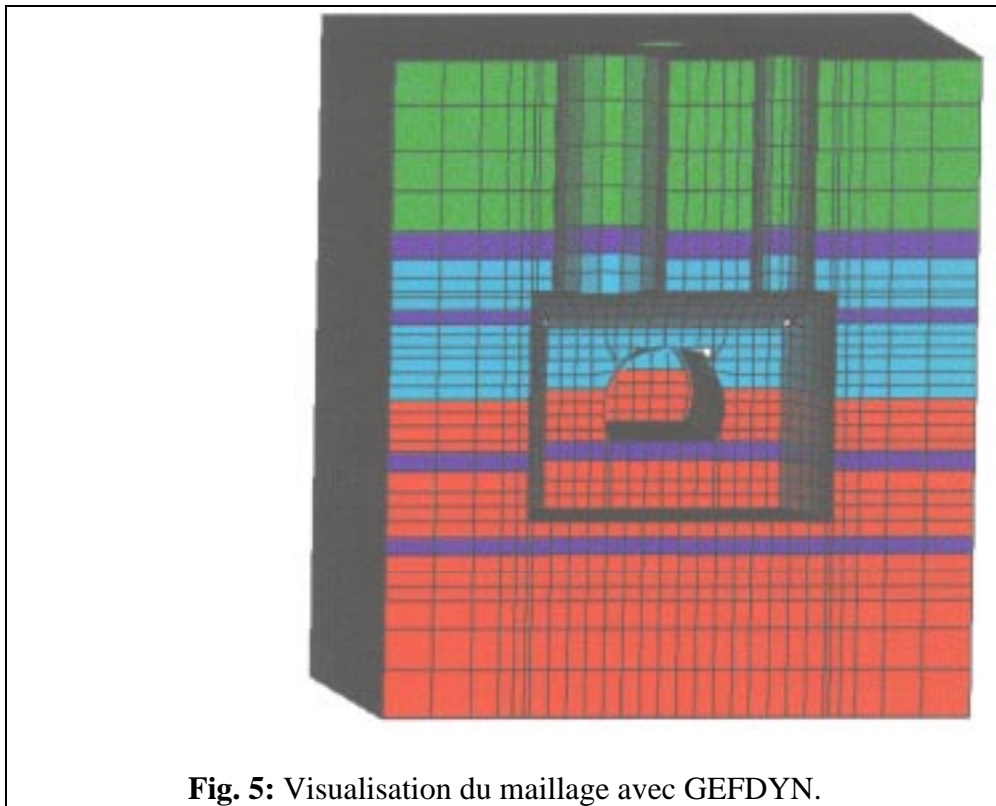


Fig. 5: Visualisation du maillage avec GEFDYN.