

## DES OUTILS ADAPTES POUR FORMALISER LA DEMARCHE DE DIMENSIONNEMENT COURANT DES TUNNELS

Adrien SAITTA, Centre d'Etudes des Tunnelles (Cetu), Ministère de l'Équipement et des Transports français, Lyon FRANCE

Emmanuel BIETH, Centre d'Etudes des Tunnelles (Cetu), Ministère de l'Équipement et des Transports français, Lyon FRANCE

Patricia ROURE, ITECH, Paris FRANCE

### ABSTRACT

When the finite element method needs to be implemented in order to complete design and sizing studies for tunnels, the development and operations of a numerical model can only be carried out with the support of an expert user able to master the multiple functional features provided by geotechnical computation codes. Yet during the initial study phases for ordinary tunnel designs, the geometry of the excavation and structures stems from a systemization of standard profiles commonly employed. The resulting reduced number responds to worksite concerns over optimizing project costs and schedules by means of adopting a systematic approach to tunnel excavation.

It is thus beneficial to make use of "trade"-specific tools, as a complement to the geotechnical computation codes for more specialized interfaces; such tools apply this systematization by automatically conducting both a numerical model and the standardized interpretation of results. The engineer heading the design study will then focus more heavily on the choice of characteristic geotechnical parameters.

### RÉSUMÉ

Lorsque le recours à la méthode des éléments finis devient nécessaire pour compléter les études de conception et de dimensionnement de tunnels, la création et l'exploitation d'un modèle numérique ne peut se faire sans le soutien d'un utilisateur expert maîtrisant les nombreuses fonctionnalités offertes par les codes de calcul géotechniques. Pourtant, en dimensionnement courant de tunnels, lors des premières phases d'étude, la géométrie de l'excavation et des structures est issue d'une systématisation des profils-types couramment employés. Leur nombre réduit répond au souci du chantier d'optimiser les coûts et les délais en systématisant le mode d'excavation.

Dès lors, il est intéressant de pouvoir disposer autour de codes de calcul géotechniques d'interfaces plus spécialisées, d'outils « métiers » qui exploitent cette systématisation en réalisant automatiquement d'une part le modèle numérique et d'autre part l'exploitation standardisée des résultats. L'attention de l'ingénieur chargé de l'étude sera davantage portée sur le choix de paramètres géotechniques caractéristiques.

### 1. INTRODUCTION

Les divers logiciels de calcul par éléments finis géotechniques proposés actuellement sur le marché offrent une palette très élaborée dans la prise en compte de toutes les modélisations que les ouvrages de génie civil puissent suggérer. En contre-partie, ils s'adressent principalement à des utilisateurs avertis qui ne peuvent « maîtriser » toutes leurs fonctionnalités qu'en les pratiquant régulièrement. Pourtant, dans la grande majorité des cas à traiter en dimensionnement courant de tunnels, la géométrie de l'excavation et des structures est issue de profils types définis au moment de la conception du tunnel dont le nombre aussi réduit que possible répond au souci du chantier d'optimiser les coûts et les délais en systématisant autant que possible le mode d'excavation.

Partant de ces constatations, il est intéressant de pouvoir disposer autour des codes par éléments finis géotechniques des interfaces plus spécialisées, des outils « métiers », qui réalisent le maillage et les notes de calcul automatiquement à partir d'une configuration type et des données concernant le sol et les structures uniquement.

La note de calcul est alors constituée en quelques minutes, au lieu des deux jours habituellement nécessaires (quel que soit le code utilisé) compte-tenu notamment du volume important des résultats, des vues suivant des coupes et des tableaux de synthèses à constituer. Aujourd'hui, les logiciels de type "outil métier" se développent dans les divers domaines du génie civil. Cependant, il n'existe actuellement aucun logiciel commercialisé comparable (outil métier basé sur la modélisation aux éléments finis) pour la conception et le dimensionnement des tunnels.

Le Cetu, service technique central du Ministère de l'Équipement Français, en collaboration avec la société ITECH, a développé depuis 2002 un tel outil "métier" dédié aux tunnels. Une première version a été finalisée au cours de l'année 2004.

Cet article présente tout d'abord l'originalité de la démarche. Il met l'accent sur l'impact qu'un outil « métier » pourrait avoir sur la profession. En effet, son intérêt principal est d'automatiser les tâches fastidieuses telles que la création propre du modèle (maillage et

phasage du modèle numérique) pour concentrer l'attention du concepteur sur les hypothèses et les conclusions du calcul. En particulier, la réalisation d'études de sensibilité (analyse de l'influence de paramètres géométriques ou des paramètres caractéristiques des matériaux) qui était rendue laborieuse à mener à l'aide des codes de calculs actuellement disponibles, est désormais largement facilitée. C'est d'ailleurs dans ce but précis que le Cetu s'est attaché à ce projet. En effet, il est fortement recommandé, pour toutes les phases de conception d'un ouvrage et en particulier lors de phases d'études préliminaires, d'analyser le comportement de l'ouvrage souterrain par l'intermédiaire d'études de sensibilité.

Cet outil se révèle être aussi un excellent outil pédagogique à l'intention des étudiants de génie civil. Des Travaux Dirigés utilisant ce logiciel comme support sont actuellement dispensés dans les écoles d'ingénieurs françaises et rencontrent un vif succès.

Enfin, cette réflexion est supportée par un thème prioritaire de recherche du Cetu concernant la méthodologie des projets de tunnels. Il préfigure la création en 2005 d'une plate-forme informatique de dimensionnement consacrée aux tunnels qui contiendra d'autres méthodes de calcul utilisées couramment, bâties sur le même principe, et reliées par un assistant. Cet assistant proposera de manière interactive à l'utilisateur (s'il le souhaite) des conseils pas à pas pour la réalisation de son calcul. Cet article présente en particulier l'état des travaux autour de la méthode convergence-confinement répondant à ces soucis et notamment celui d'élargir le cadre des études de sensibilités en croisant les résultats des différentes méthodes de calcul.

## 2. LE DIMENSIONNEMENT « COURANT »

Nous abordons dans cet article le dimensionnement des tunnels en considérant principalement les interactions sol-structure. Dans ce cas, il n'existe pas une méthode de calcul universelle tant le problème est complexe à la fois du point de vue géométrique, du point de vue de la nature et du comportement des terrains que du point de vue de leurs interactions avec les structures.

La géométrie du creusement est véritablement tridimensionnelle dans la mesure où le terrain peut être instable par extrusion excessive du front mais aussi, en arrière du front, par forte convergence radiale des parois de l'excavation.

Les terrains traversés sont souvent hétérogènes et il est difficile de les qualifier précisément à l'échelle de l'ouvrage. Même dans le cas où le massif est relativement homogène, la rhéologie des sols et des roches reste encore du domaine de la recherche. Les résultats obtenus à l'issue des campagnes de reconnaissances classiques permettent d'identifier certains paramètres mécaniques et il est très souvent illusoire de vouloir retenir une loi de

comportement trop sophistiquée dans les calculs de dimensionnement courant. Enfin, le terrain peut exhiber des comportements particuliers qui se répercutent de façon catastrophique sur les structures s'ils n'ont pas été correctement pris en compte.

Les interactions sol-structure sont fortes étant donnée la nature de l'ouvrage à construire. La surface d'interaction concerne l'ensemble de la structure de soutènement et il est souvent trop simpliste de considérer que les actions du terrain peuvent être simulées uniquement par des charges. D'ailleurs, le soutènement peut être composé d'inclusions radiales ou frontales rendant d'autant plus difficile la modélisation.

Le calcul tridimensionnel «vrai » ne résout pas pour autant toutes les difficultés listées précédemment et des simplifications sont de toutes façons nécessaires. Il est encore réservé à des situations bien spécifiques, notamment parce qu'il reste coûteux en temps d'exécution du calcul mais, aussi et surtout, pour ce qui concerne les temps de construction du modèle (pré-processeur) et d'exploitation des nombreux résultats issus du calcul (post-processeur).

Bien sûr, les logiciels de calcul par éléments finis «géotechniques» sont de plus en plus ergonomiques, pratiques à utiliser et permettent de prendre en compte des aspects de plus en plus complexes. Face à la diversité des ouvrages à modéliser, à la variété des comportements envisageables des terrains creusés, à la nature des structures mixtes ou composées d'inclusions dans le terrain et à l'interaction sol-structure sur une surface à priori irrégulière, les pré- et post-processeurs sont très élaborés et offrent un vaste choix de modélisations.

Cependant, cette démarche oblige les utilisateurs à suivre une formation initiale et à pratiquer régulièrement le logiciel afin de le « maîtriser ». Or, comme il a été dit en introduction, les modèles numériques à traiter sont assez similaires dans le cadre d'un dimensionnement courant. Le comportement du massif est quant à lui généralement simplifié et seules un nombre restreint de lois de comportement sont utilisées.

Dans ce contexte, les calculs par éléments finis se résument très souvent à un calcul en déformations planes modélisant une coupe transversale du tunnel (voir figure 1).

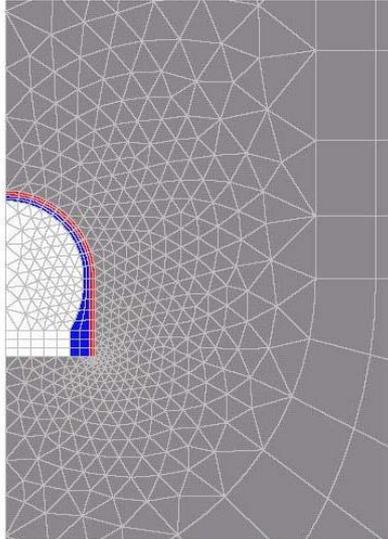


Figure 1. Exemple de maillage réalisé pour un calcul en déformations planes

Plus rarement, et on peut le regretter, des calculs axisymétriques sont menés notamment lorsque la stabilité du front de taille est étudiée plus en détail. L'axe de symétrie correspond alors à l'axe longitudinal de creusement et le tunnel ainsi que les structures modélisées sont parfaitement cylindriques.

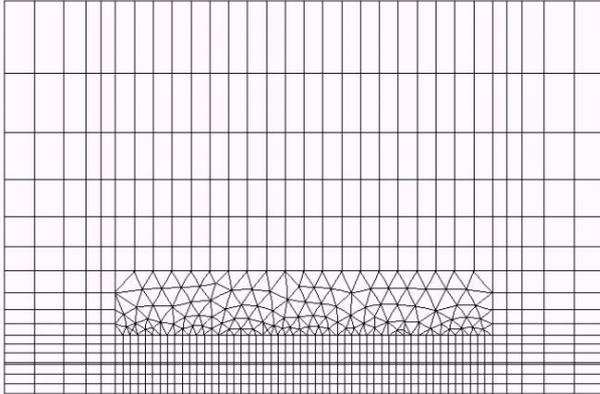


Figure 2. Exemple de maillage d'un modèle numérique en déformations axisymétriques

Dans le cas d'un calcul en déformations planes, la principale tâche consommatrice de temps réside dans l'édition d'une note de calcul et dans une moindre mesure la réalisation du maillage et des données pour le lancement du calcul. A titre indicatif, les temps d'exécution du calcul sont rarement supérieurs à 30mn en utilisant un matériel informatique classique récent, alors que le temps de réalisation d'une note de calcul (y compris la phase de constitution du modèle – pré-processeur) entière est de l'ordre de plusieurs jours. En effet, le calcul est généralement phasé en trois à quatre étapes et la note finale complète comporte facilement une trentaine de

pages, figures et tableaux de synthèses compris. Ces pages doivent être construites en passant souvent par l'intermédiaire d'un tableur pour aboutir à des tableaux récapitulatifs. Des coupes sont nécessaires pour évaluer les paramètres significatifs. Les soutènements et revêtements doivent faire l'objet d'une analyse de type « structure » en termes d'efforts et de sollicitations, ce qui nécessite un travail supplémentaire à l'issue du calcul géotechnique, avec notamment la prise en compte du critère de béton non-armé (voir recommandations AFTES à ce propos). Tout ceci peut être consommateur de temps et source d'erreurs si les possibilités d'automatisation du processus ne sont pas mises à profit.

### 3. DESCRIPTION DES FONCTIONNALITES D'UN OUTIL "METIER"

En plus de l'utilisation de la méthode des éléments finis pour le calcul lors d'études détaillées, une utilisation dès les stades préliminaires peut apporter une information primordiale et de qualité aux projeteurs. Cependant, le souci de l'ingénieur est alors de se concentrer davantage sur quelques paramètres caractéristiques que sur une modélisation fine de la géométrie par exemple.

La réalisation d'un outil spécifique au dimensionnement repose sur une systématisation des cas étudiés par le choix d'une géométrie caractéristique issue de cas "types" proposés. Ces cas, en nombre réduits, permettent d'étudier la plupart des cas couramment rencontrés. Cette opération rend alors possible l'automatisation de la construction du maillage, phase qui représente un temps considérable lorsqu'il est réalisé manuellement.

De la même façon, l'exploitation des résultats est automatisée et le principe est d'écrire une note de calcul standardisée résumant les diverses grandeurs analysées au droit de sections types définies au préalable.

La concrétisation de ces principes a abouti à la mise au point d'un logiciel baptisé C-tunnel, entièrement dédié au dimensionnement de tunnels, qui est le fruit de la collaboration entre ITECH (Société informatique spécialisée dans la distribution de logiciels de génie civil) et le Cetu (Centre d'Etudes des tunnels, organisme technique du Ministère de l'Equipement Français). Il permet de réaliser simplement un calcul complet par le biais de la méthode des éléments finis.

#### 3.1. Construction du modèle par étapes

Conçue directement à partir des préoccupations du concepteur de l'ouvrage, la démarche est axée sur les données du projeteur.

L'assistance à la modélisation commence par conséquent par le choix d'une section type.

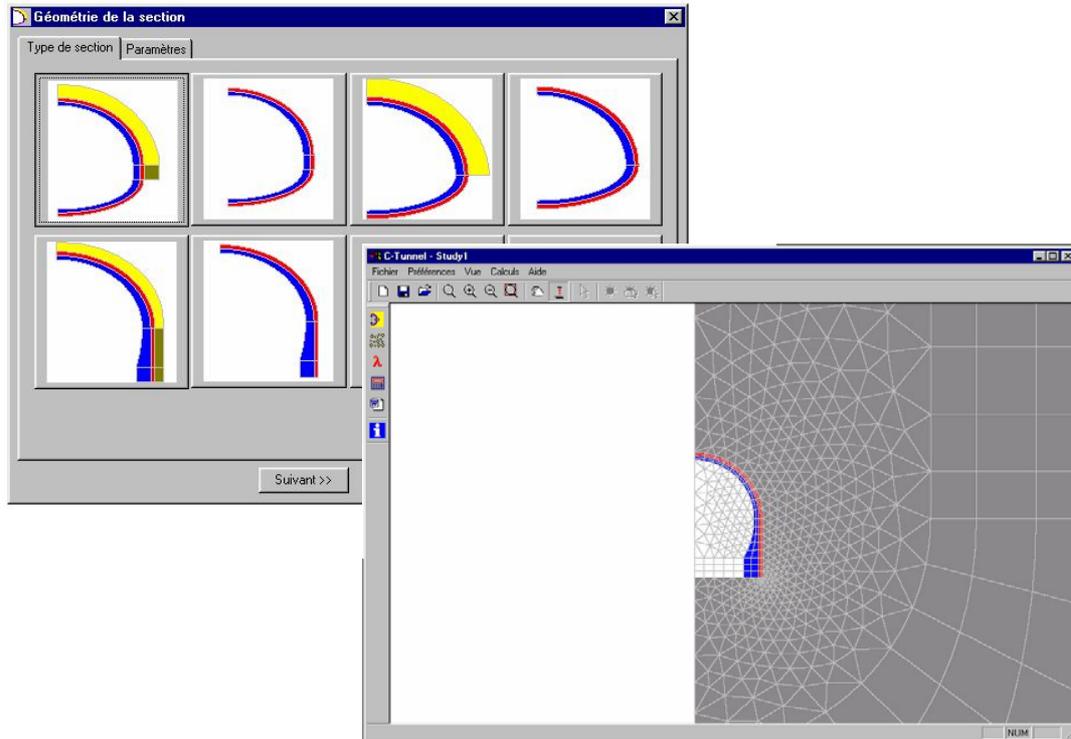


Figure 3. Choix du type de section de tunnel et exemple de maillage automatique proposé

Il s'agit, en commençant l'étude par le choix d'une section type, d'exploiter toutes les possibilités offertes par la méthode des éléments finis (méthode de résolution numérique). L'utilisateur est chargé de définir la géométrie étudiée (section d'excavation, soutènement pris en compte, revêtement, hauteur de couverture, voir figure 4) ainsi que les caractéristiques mécaniques des matériaux employés (voir figure 5).

(La première version finalisée du logiciel ne prévoit que quelques sections-types. Il est prévu dans une version ultérieure de proposer d'autres configurations-types : notamment présence de plusieurs couches de terrain et possibilité d'excaver en demi-section.)

Les caractéristiques réelles d'un projet peuvent être directement exploitées par le logiciel. (voir figures 4 et 5)

L'assistance à la conception concerne ici toute la phase de modélisation. L'utilisateur est ainsi guidé tout au long du processus de construction de son modèle numérique. Le choix des caractéristiques géométriques et des matériaux prend alors le pas sur les opérations fastidieuses de modélisation. Bien que l'exploitation des résultats soit aussi automatisée, il ne s'agit que d'un outil qui propose à l'ingénieur des éléments et résultats caractéristiques lui permettant de tirer ses propres

conclusions par rapport au cas proposé. En aucun cas il ne s'agit d'un système dit "expert".

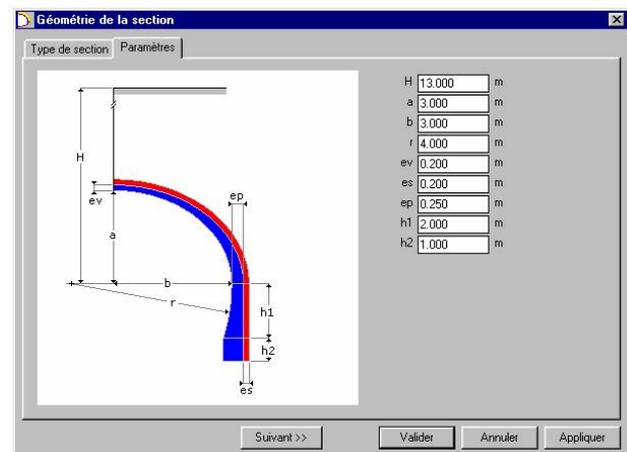


Figure 4. Définition des caractéristiques géométriques d'une section-type

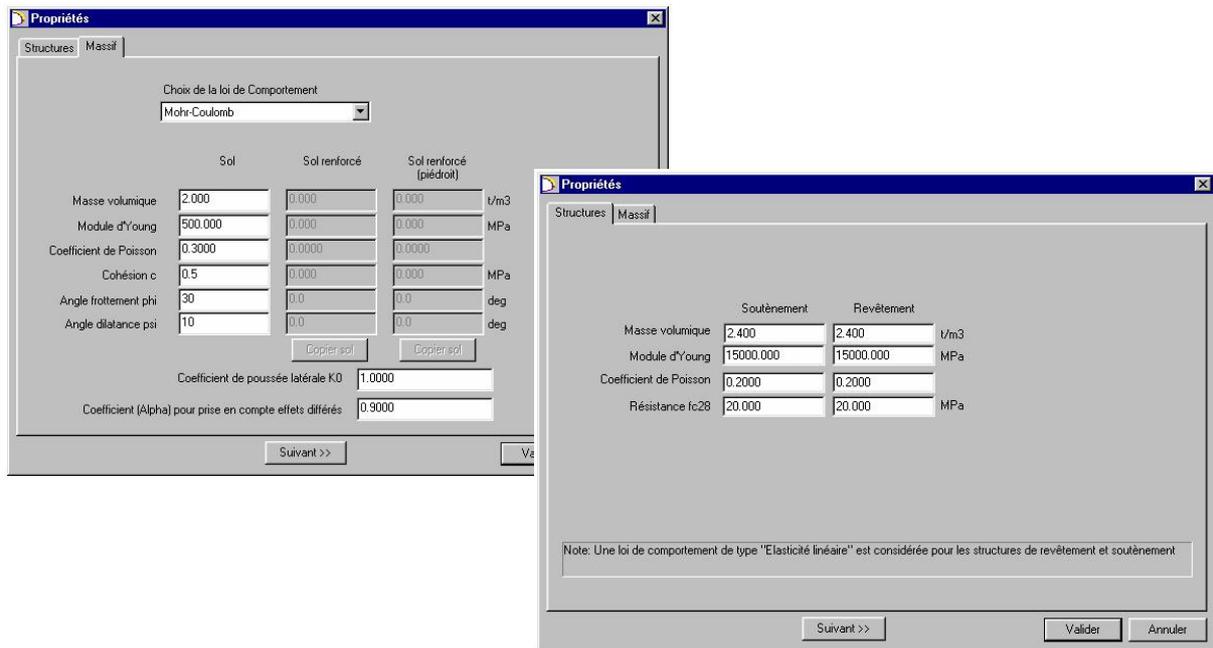


Figure 5. Définition des paramètres caractéristiques des matériaux

Le logiciel procède automatiquement à toutes les tâches qui précèdent le déroulement d'un calcul aux éléments finis. Un mailleur automatique réalise complètement le maillage à partir des caractéristiques géométriques de la structure (voir exemple figure 4). Le déroulement complet du calcul est programmé par avance, de sorte qu'il soit mené selon un enchaînement adapté à la spécificité de ce type d'ouvrage. De la même façon, tous les résultats utiles sont mis en forme automatiquement dans une note de calcul standardisée (voir exemple figures 6 et 7).

Le logiciel tient le rôle d'assistant à la modélisation numérique. Il devient alors possible de réaliser de nombreux calculs sans avoir une connaissance approfondie des méthodes de résolution numérique des structures. La construction du modèle étant semi-automatique, les délais de réalisation sont optimisés au maximum. Le gain considérable obtenu par cette assistance permet alors au concepteur de se focaliser notamment sur l'optimisation du dimensionnement.

### 3.2. Réalisation de la note de calcul standard – lien automatique vers l'analyse « structure »

En automatisant la phase d'exploitation des résultats, l'information pertinente peut être extraite rapidement. Tous les résultats utiles au dimensionnement sont exploités automatiquement et présentés sous forme de tableaux ou graphiques. Une note de calcul standardisée rassemble tous ces résultats.

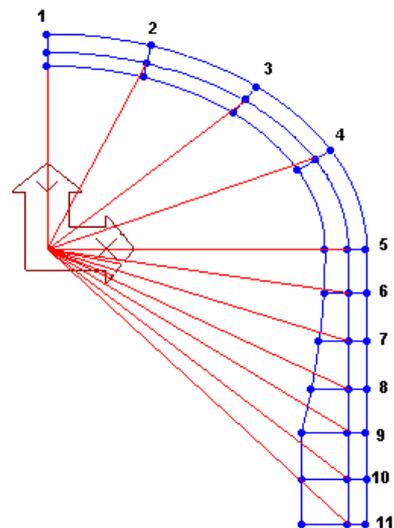


Figure 6. Définition des sections de calcul pour lesquelles les résultats des calculs sont détaillés notamment en terme d'efforts (N, M, T)

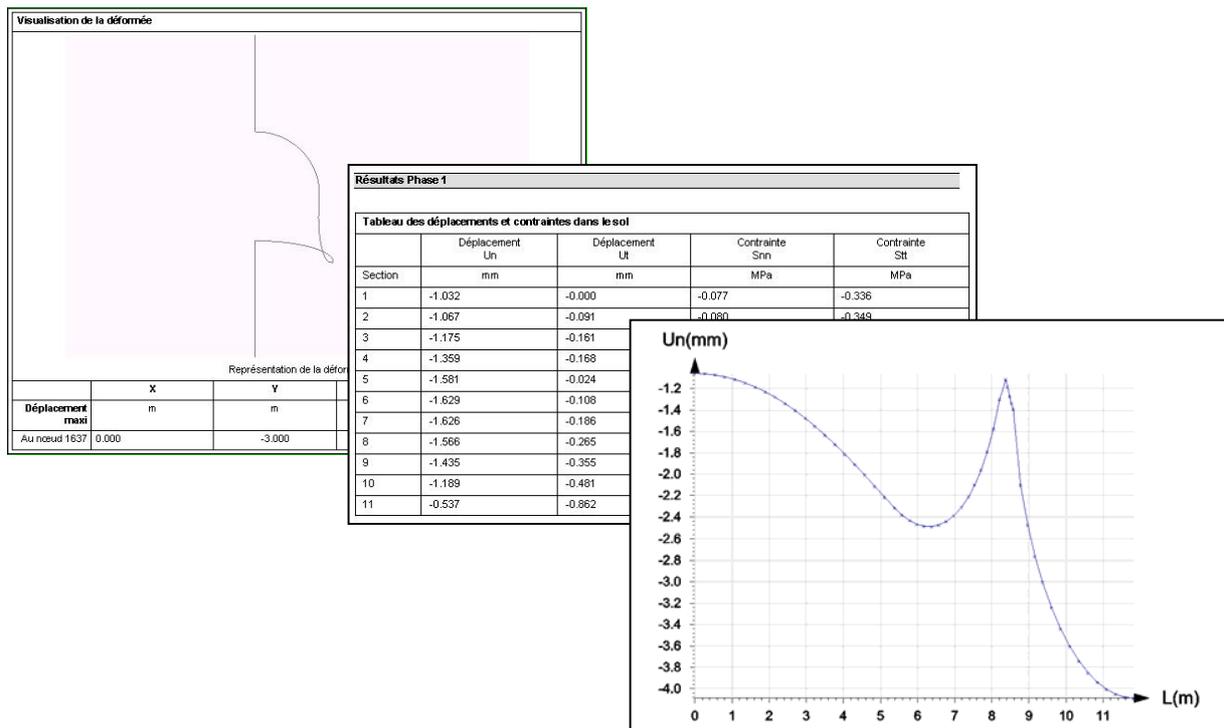


Figure 7. Exemple de résultats obtenus automatiquement à l'aide du logiciel C-tunnel

### 3.3. Note de calcul

C'est le parti retenu (standardisation des sections d'étude (voir figure 6)) qui rend possible l'automatisation de l'exploitation des résultats. La note de calcul créée, d'une longueur d'environ 30 pages, rassemble alors les principaux résultats :

- \* efforts et sollicitations dans les sections définies,
- \* déplacements du terrain au droit du contour de l'excavation
- \* déformations plastiques apparues
- \* etc.

L'ingénieur dispose alors de résultats facilement exploitables et pour lesquels une étude de sensibilité devient raisonnable à mettre en oeuvre dans un temps restreint (il suffit de recommencer le calcul avec des paramètres différents)

### 4. Perspectives

Avec la mise à disposition de tels outils, l'utilisation du calcul par éléments finis dans le dimensionnement courant est facilitée. Les avantages ont été décrits dans les paragraphes précédents. Cependant il existe des travers à une utilisation ponctuelle de cet outil "métier". En effet, comme toute procédure qui devient automatisée, le danger pour un utilisateur est de systématiser à outrance son emploi et perdre progressivement l'esprit critique

indispensable dans ce domaine. Pourtant, dans le dimensionnement des tunnels, il faut être particulièrement prudent et il est recommandé de raisonner en croisant les informations provenant de plusieurs méthodes. Cette attitude permet de renforcer le professionnel dans ses choix. Par conséquent, il nous paraît indispensable de rassembler au sein d'une plate-forme informatique commune les principales méthodes de calcul courantes et de faciliter progressivement leurs modalités de mise en oeuvre.

#### 4.1. Application à la méthode convergence-confinement

Avec la création de l'outil-métier précédent, le Cetu a développé en collaboration avec la société ITECH un logiciel baptisé C-lambda et qui exploite la méthode convergence-confinement. Plusieurs logiciels du même type existent sur le marché, mais le besoin de créer ce produit est principalement venu des deux constatations suivantes :

- \* il est important de pouvoir utiliser la méthode convergence-confinement couplée aux éléments finis en déformations planes pour modéliser efficacement le creusement d'un tunnel
- \* il est nécessaire de pouvoir réaliser des études de sensibilités par la méthode convergence-confinement

En effet, concernant le premier point, la réalisation d'un calcul en déformations planes phasé classique nécessite d'estimer un paramètre issu de la méthode convergence-confinement : la valeur du taux de déconfinement au

moment de la mise en place du soutènement. Pour cela, une passerelle a été programmée entre les deux méthodes de calcul. Le choix revient alors au concepteur : utiliser une valeur de ce paramètre déterminée par ailleurs ou en proposer une estimation par le biais de la méthode convergence-confinement (voir figure 8).

L'originalité de l'outil développé autour de la méthode convergence-confinement réside dans la fonctionnalité qui permet la réalisation simple de véritables études de sensibilité. Ainsi le logiciel a été programmé pour permettre l'étude de plusieurs cas simultanément et ainsi de pouvoir apprécier l'influence des différents paramètres sur les résultats, du point de vue des courbes caractéristiques ou des résultats numériques. L'utilisateur peut, à volonté, créer un nouveau jeu de paramètres (voir figure 9). S'il le souhaite, les résultats pourraient s'afficher simultanément dans la fenêtre graphique et dans le tableau de résultats, chaque colonne correspondant toujours à un jeu de paramètres.

Afin de garder le même état d'esprit que l'outil-métier de calcul aux éléments finis, une note de calcul paramétrable peut être automatiquement réalisée, les résultats à traiter étant, dans ce cas, en nombre bien plus réduit.

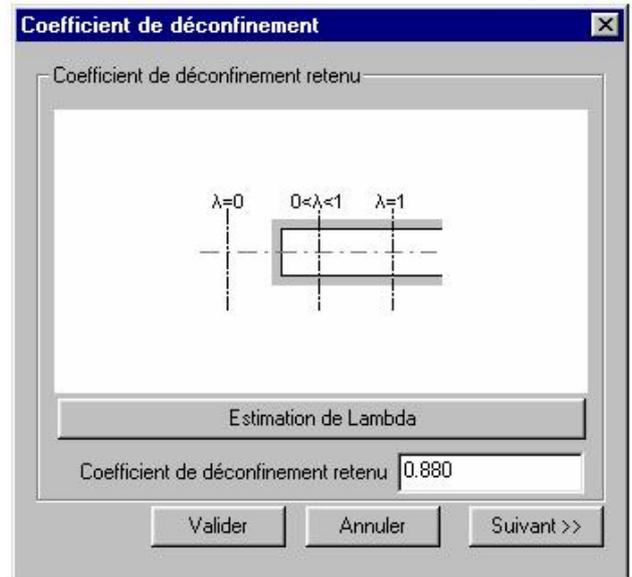


Figure 8. Estimation du taux de déconfinement à prendre en compte lors du calcul par éléments finis

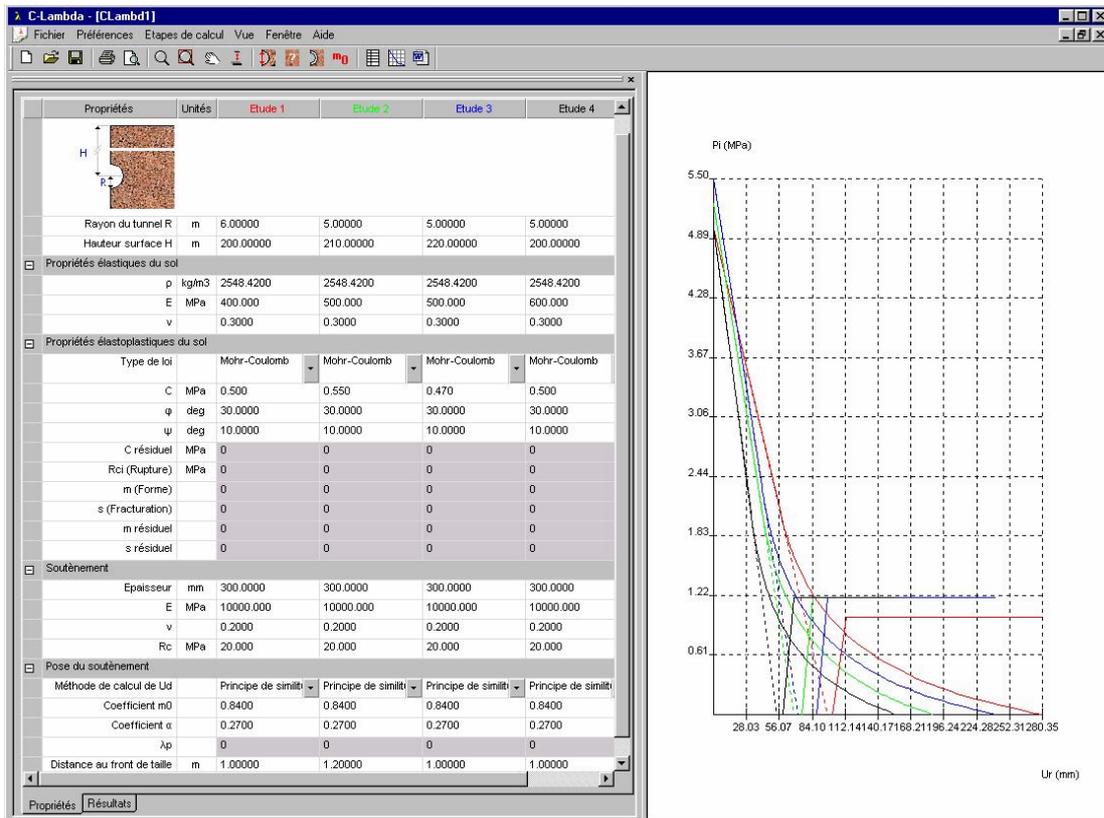


Figure 9. Calcul de type convergence-confinement

#### 4.2. Vers une plate-forme informatique d'aide à la conception et au dimensionnement des tunnels

Ces constatations, qui ont été à l'origine de la création des logiciels précédents, nous amènent tout naturellement à travailler à la réalisation d'une plate-forme de dimensionnement regroupant les principales méthodes de calcul courantes en tunnel.

Le Cetu, dans le cadre de son programme de recherche n°8 initié en 2001 et intitulé « méthodologie d'étude pour les projets de génie civil de tunnels : prise en compte des facteurs liés au terrain dans la conception », met au point un prototype d'une plate-forme dont l'objectif principal est de répondre à ces besoins. Pour reprendre la terminologie de Windows, il s'agit de créer un « bureau » pour l'aide à la conception et le dimensionnement des tunnels.

Le principe retenu pour le « bureau » suit la même démarche que celle explicitée dans cette communication : réaliser une note de calcul automatisée à partir de sections-types prédéfinies. Il offrira la possibilité de choisir parmi trois modèles de calcul :

- la méthode convergence-confinement,
- le calcul par éléments finis en déformations planes
- le calcul par éléments finis en déformations axisymétriques.

De plus, ce « bureau » comportera des outils supplémentaires qui permettront d'enrichir la future note de calcul. Les prototypes de ces outils ont dores et déjà été réalisés pour un usage exclusivement interne aujourd'hui et font actuellement l'objet d'une validation technique (emploi de corrélations pour permettre l'estimation de paramètres, application de théories d'homogénéisation,...). En particulier, un module permettra à court terme de réaliser simplement des études de sensibilités en s'appuyant notamment sur la méthode des plans d'expérience. A moyen terme, il est prévu de créer un module d'assistance pour le choix d'une loi de comportement du massif.

Enfin, un assistant interactif sera créé dans la plate-forme et dont la finalité est d'établir des passerelles entre les différentes méthodes de calcul. L'objectif est de proposer une véritable méthodologie d'utilisation croisée des différentes méthodes de calcul.

Par exemple, en reprenant le lien cité précédemment entre la méthode convergence-confinement et une modélisation aux éléments finis en déformations planes, au cours de l'exécution un calcul aux éléments finis en déformations planes, l'utilisateur doit généralement entrer une valeur : le taux de déconfinement. Ce paramètre (cf recommandations sur la méthode convergence-confinement) peut être directement introduit, mais l'assistant interactif de dimensionnement pourra aussi proposer à l'utilisateur d'effectuer deux autres méthodes de calcul pour approcher la valeur en fonction des données déjà entrées à ce stade du calcul:

\* en utilisant rapidement les fonctions de forme introduites dans la méthode convergence-confinement à la pose du soutènement

\* en utilisant directement les résultats du calcul axisymétrique.

De nombreux liens transversaux de ce type sont à envisager afin d'inciter l'utilisateur à ne pas se cantonner aux résultats bruts issus d'une seule méthode de calcul.

L'objet de cette plate-forme n'est pas de proposer un système expert. Il s'agit d'offrir des outils et des liens transversaux utiles qui permettront d'assister l'utilisateur lorsque celui-ci le désire, sans toutefois chercher à se substituer à lui. C'est important, dans la mesure où la conception des tunnels passe sans doute par une bonne connaissance des règles de l'art mais aussi par une combinaison astucieuse des différentes méthodes courantes de calcul. C'est cependant à l'utilisateur que doit revenir le choix final de cette combinaison, les outils utilisés n'étant conçus que pour proposer et soumettre les différents cas envisageables.

Une première version de cette plate-forme est prévue pour l'année 2005 avec les fonctionnalités citées ci-dessus.

#### 5. Bibliographie

AFTES (Association française des travaux en souterrain), 1998. Recommandations relatives à l'utilisation du béton non armé en tunnel.

AFTES (Association française des travaux en souterrain), 2002. Recommandations relatives à Méthode convergence-confinement, France.

Bouvard-Lecoanet, A., Colombet, G., Esteulle, F., 1992. Ouvrages souterrains, conception, réalisation, entretien, France.

Mestat, P., 1997. Maillages d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique Conseils et recommandations, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro 212, pp. 39-64.

Panet, M., 1995. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement, France.