



HAL
open science

Quel type de base de données pour valider les modèles rhéologiques ?

Philippe Reiffsteck, Emmanuel Bourgeois, Valentin Duca

► **To cite this version:**

Philippe Reiffsteck, Emmanuel Bourgeois, Valentin Duca. Quel type de base de données pour valider les modèles rhéologiques?. 1ère Conférence Albert Caquot, cfms, Oct 2001, Paris, France. hal-04425559

HAL Id: hal-04425559

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04425559>

Submitted on 2 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

QUEL TYPE DE BASE DE DONNEES POUR VALIDER LES MODELES RHEOLOGIQUES ?

WHICH TYPE OF DATABASE TO VALIDATE RHEOLOGICAL MODELS?

Ph. REIFFSTECK, E. BOURGEOIS, V. DUCA

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58 Bd Lefebvre, 75732 Paris cedex 15, France

RÉSUMÉ : L'utilisation de modèles rhéologiques sophistiqués par l'ingénieur praticien nécessite de valider ces modèles sur des ouvrages réels et des sols naturels. Cette démarche a donné naissance depuis une vingtaine d'années à deux catégories de bases de données. Les premières rassemblent des résultats d'essais de laboratoire sur différents types de sols naturels, les secondes regroupent des résultats liés à des essais sur des ouvrages expérimentaux ou des ouvrages réels ayant fait l'objet d'une attention particulière (fondations, remblais, soutènements instrumentés par exemple).

Nous présentons les bases de données développées par le LCPC, en insistant sur l'importance respective des données et des outils de dépouillement et d'analyse permettant de proposer des valeurs de paramètres pour les différentes lois de comportement.

1 INTRODUCTION

L'un des principaux objectifs de la recherche en géotechnique est d'améliorer les méthodes de calcul des ouvrages afin qu'elles permettent, d'une part, de mieux garantir la sécurité offerte par les ouvrages et, d'autre part, d'en optimiser le dimensionnement. En particulier, il est nécessaire de réduire la différence entre les comportements calculés et observés. Dans cette optique, la concordance entre les calculs et les observations apparaît comme le principal critère de jugement de la pertinence d'un modèle rhéologique et les bases de données répertoriant les comportements d'ouvrages réels et de sols naturels sont des éléments importants de cette validation.

Lors d'un dimensionnement d'ouvrage l'ingénieur praticien n'utilise qu'une palette réduite de modèles rhéologiques. Cette démarche résulte de la difficulté à déterminer les différents paramètres des modèles à partir d'un nombre d'essais restreint. Généralement, les modèles sophistiqués nécessitant de nombreux paramètres ne sont utilisés que pour l'analyse à rebours d'ouvrages en service ou de désordres survenus. Le trop grand nombre de paramètres est une des conséquences du développement des modèles qui se fondent sur l'étude en laboratoire de sols artificiels. Il est alors rare de disposer d'éléments de jugement sur la pertinence des paramètres et de leur incidence sur un calcul d'ouvrage.

Dans ce contexte, les priorités des recherches sur le comportement et la modélisation des sols et des ouvrages porteront au cours des prochaines années sur :

- la prévision et l'observation du comportement à long terme des ouvrages, le suivi des ouvrages en construction et, notamment, des déformations induites sur les terrains et les ouvrages avoisinants ;
- la caractérisation des terrains, la modélisation et les techniques de construction des ouvrages dans des conditions de sous-sols urbains complexes ;
- la prévision des déformations des ouvrages et des terrains qui les entourent, et les interactions entre ouvrages semblables ou différents, dans le cadre général posé par les Eurocodes pour la gestion de la sécurité et de l'aptitude au service des ouvrages.

2 OBJECTIF

Le cadre général de la démarche est celui du développement des méthodes numériques en géotechnique : les multiples approches traditionnelles de la mécanique des sols ont été progressivement intégrées au sein d'outils généraux de calcul par éléments finis (comme CESAR-LCPC par exemple) ou par différences finies, et l'essentiel des efforts de recherche porte sur l'amélioration de ces outils généraux.

La méthode, illustrée sur la Figure 1, associe un volet expérimental et un volet de modélisation numérique. Le premier volet, comprend deux niveaux distincts : l'étude expérimentale du comportement des sols et l'étude expérimentale du comportement des ouvrages. L'étude expérimentale du sol vise à étudier son comportement rhéologique au niveau élémentaire et à décrire ce dernier sous la forme de lois. L'intégration de ces lois de comportement, ainsi que celles des autres matériaux du génie civil (béton, acier, géosynthétiques) et des lois d'interaction sol-structure dans des logiciels de calcul permet alors de décrire le comportement d'ouvrages complexes. L'étude expérimentale des ouvrages permet, pour sa part, de fournir des repères sur leur comportement et de valider les modèles numériques.

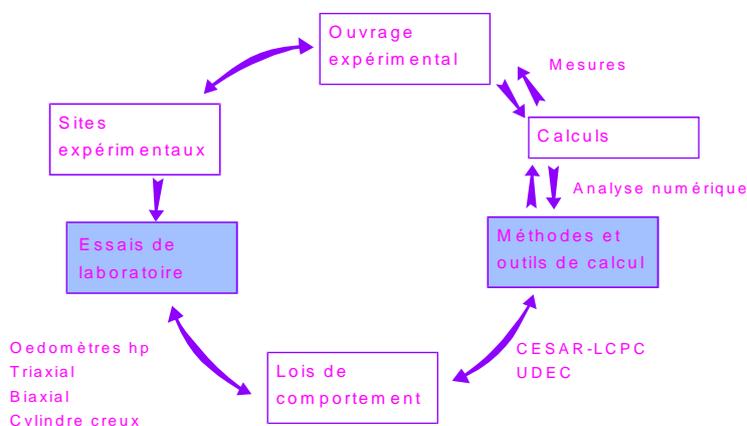


Figure 1 - Méthode d'étude du comportement des sols et des ouvrages géotechniques.

Ces deux approches, complémentaires l'une de l'autre, doivent être développées de pair. En effet, d'un côté, l'approche globale du comportement des ouvrages se prête mal à une généralisation des résultats obtenus sur un ouvrage, ou tout au moins ne permet pas à elle seule d'élaborer des méthodes de prévision quantitative du comportement d'autres ouvrages. De l'autre côté, il est difficile de dire, en restant à l'échelle de l'échantillon, quels aspects du comportement élémentaire du sol doivent faire l'objet d'une description particulièrement fine pour obtenir une prévision fiable du comportement d'un massif de sol soumis à un type de sollicitation donné.

2.1 L'étude du comportement des sols

L'étude des sols vise à décrire, à l'aide de modèles, la façon dont ils se comportent sous l'effet des modifications de sollicitations apportées par les ouvrages géotechniques. De façon pratique, ces études comportent deux étapes :

- la première étape est une étape purement expérimentale, et consiste à tester le matériau sous différentes sollicitations, principalement au moyen d'appareils œdométriques et triaxiaux ;
- la deuxième étape est une étape théorique, qui vise à caler un modèle existant sur les résultats expérimentaux obtenus ou à élaborer un nouveau modèle de comportement permettant de reproduire les phénomènes observés.

Ces études peuvent être menées sur des sols reconstitués ou sur des sols naturels. L'utilisation de sols reconstitués permet de s'affranchir des problèmes d'hétérogénéité propres aux sols naturels.

Elle permet en effet, pour une étude donnée, de tester un matériau unique au cours d'une série d'essais, alors que l'utilisation d'un sol naturel conduit, compte tenu de sa variabilité, à tester un nouveau matériau lors de chaque nouvel essai. En revanche, l'utilisation de sols naturels permet de tenir compte de différentes caractéristiques de structures propres aux sols naturels, que l'on ne sait pas reproduire sur des sols reconstitués, comme la cimentation des grains ou certaines caractéristiques de fluage du matériau. Elle permet, par ailleurs, de resituer l'étude en laboratoire dans le contexte d'étude plus global, incluant notamment la validation par le comportement d'ouvrages expérimentaux, de la Figure 1.

L'utilisation de sols naturels, que le LCPC a privilégiée pour les études passées, nécessite de sélectionner des sites expérimentaux présentant une hétérogénéité réduite. Il est également nécessaire de s'assurer que ces sols appartiennent à des familles représentatives des sols rencontrés en génie civil : ainsi les résultats obtenus pourront être extrapolés à des sols voisins.

Les résultats obtenus à travers ces études du comportement des sols sont de deux ordres. Du point de vue de la rhéologie, les résultats obtenus sont des lois de comportement plus représentatives du comportement des sols. Ce résultat est accompagné de résultats plus particuliers concernant les familles de sol testées : on dispose ainsi de monographies décrivant le comportement des familles de sol testées. Ces monographies peuvent servir de référence dans l'ingénierie aussi bien que dans la recherche, lors de l'étude de sols comparables.

2.2 L'étude du comportement des ouvrages

L'étude expérimentale des ouvrages vise à décrire leur comportement au cours de leur construction et en service. Ces études sont menées sur des ouvrages réels et intègrent donc l'ensemble des facteurs qui concourent au comportement de l'ouvrage (en particulier le mode de réalisation de l'ouvrage et la structure des massifs de sol naturel). Deux types d'études peuvent être menées :

- des études détaillées, dans lesquelles le comportement de chacun des constituants de l'ouvrage doit être pris en compte de manière précise : de telles études expérimentales sont relativement coûteuses en termes d'équipements (capteurs, etc.) et d'études (dépouillement des mesures);
- des études simplifiées, dans lesquelles on ne s'intéresse qu'à quelques paramètres clés du comportement de l'ouvrage (déplacement maximal d'un élément de structure, par exemple), et qui devraient pouvoir être multipliées compte tenu de leur coût plus réduit.

Les études détaillées permettent d'établir des monographies relatives au comportement de l'ouvrage, qui peuvent être utilisées pour valider des développements théoriques. Les études simplifiées permettent pour leur part de constituer des bases de données relatives au comportement des ouvrages. Ces bases de données peuvent être utilisées pour identifier, par analyse statistique, le comportement "moyen" des ouvrages (tassement maximal à attendre du creusement d'un tunnel). On définit ainsi des "comportements repères" qui fournissent un moyen d'encadrer a priori le comportement d'ouvrages nouveaux et de juger de la pertinence des résultats obtenus par des approches numériques.

Ces études sur ouvrages réels peuvent être complétées par l'étude d'ouvrages en semi-grandeur (au Centre d'Expérimentations Routières de Rouen par exemple) et par l'étude de modèles réduits d'ouvrages, en centrifugeuse au centre de Nantes du LCPC ou en chambre d'étalonnage (au CERMES). L'utilisation de modèles réduits permet de multiplier le nombre d'essais. Elle est particulièrement bien adaptée aux études paramétriques.

3 STRUCTURE

Deux types de base de données peuvent être constituées : des bases de données consacrées aux sols d'une part, des bases de données consacrées à des ouvrages instrumentés d'autre part.

3.1 Base de données sols

Le LCPC dispose d'une base de données constituée de dossiers centrés sur un type de sol et rassemblant les résultats d'essais mis en oeuvre pour cerner son comportement spécifique. La base compte environ 450 essais sur des matériaux cohérents et pulvérulents, naturels et reconstitués. Il s'agit d'essais de laboratoire classiques en mécanique des sols :

- essais d'identification ;
- essais œdométriques à chargement par paliers ;
- essais de divers types à l'appareil triaxial classique.

Ces essais peuvent être complétés par des essais spécifiques comme des essais au pressiomètre autoforeur, au dilatomètre Marchetti, des essais triaxiaux sur éprouvettes cylindriques creuses. Les résultats d'essais sont accompagnés d'informations sur l'origine et le prélèvement des échantillons, la nature des terrains, et de divers commentaires. Dans le cas d'un sol lié à un ouvrage instrumenté (voir tableau II), les références du dossier de chantier sont rappelées.

Tableau I : Exemples de sols de la base de données et nombre d'essais.

Nom du sol	oedo	triax	press	péné	Ouvrage rattaché	Auteur
Grave de Criqueboeuf/Seine		105	4	3	Talus et remblai	En cours, Reiffsteck et al., 2001
Argile de Cran	101		33		Pieu, remblai	Bat, 1999
Marne de Las Planas	13	12			Tunnel	Serratrice, 1996
Sable de Labenne		11			Pieu, Fondations superficielles	Amar et al., 1994
Limon de Jossigny	3	30	4	6	Fondations superficielles	Amar et al., 1994
Argile molle de Lanester	3	11	1		Remblai	Amar et al. 1994
Argile des Flandres	22	132	6	1	Murs de quais	Josseume, 1998
Argile de Cubzac les Ponts	15	61	5	4	Remblai	Piyal et al., 1984
Argile de Merville			4	3	Pieux	En cours
Argile de Guiche	43	50			Remblai	Khemissa et al., 1997
Limon de Rouen		10	8	4	Trémie	En cours

3.2 Exemples d'utilisation de la base de données sols.

L'utilisation la plus évidente de la base de données sols consiste à utiliser les résultats d'essai pour identifier les paramètres d'une loi de comportement donnée. Différents travaux menés au LCPC ont permis de proposer une méthodologie de détermination de ces paramètres à partir des résultats d'essais de laboratoire traditionnels, en les reliant aux caractéristiques des courbes expérimentales (Mestat, 2000).

La construction de logiciels appliquant cette méthodologie est un travail qui a été initié depuis de nombreuses années par la communauté scientifique, toutefois la mise en place de comportements types s'appuyant sur la corrélation des essais de caractérisation physique et en place n'a été rendue possible qu'avec l'amélioration de la souplesse et de la compatibilité entre les différents logiciels (SIG par exemple).

La construction d'un tel logiciel est en cours au LCPC. L'objectif est de pouvoir appuyer l'analyse des nouveaux essais sur les résultats d'essais issus de la base de données.

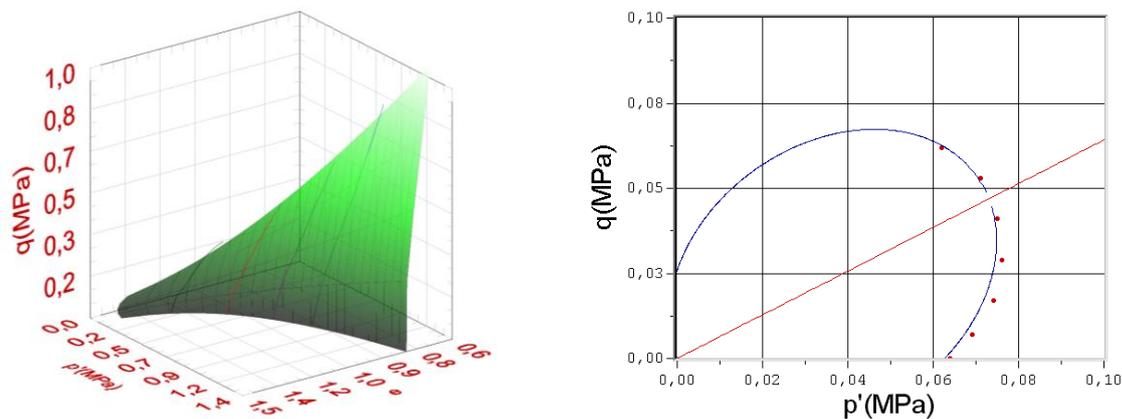


Figure 2 – Exemples de surface de Roscoe et de surface de charge anisotrope (Argile des Flandres)

Cette base de données permet aussi d'étudier l'influence du prélèvement et ou du remaniement sur telle ou telle propriété du sol. En ce qui concerne l'anisotropie par exemple, les premiers résultats montrent qu'un essai après consolidation K_0 sur un échantillon reconstitué ne donne qu'un effet de vieillissement après consolidation primaire faible (même pour une durée de consolidation importante) : dans la suite de l'essai, lors du cisaillement, les directions des incréments de déformation coïncident avec la direction des incréments de contrainte (Piyal et Magnan, 1984) ; les éprouvettes montrent donc essentiellement un comportement isotrope. On peut conclure que les résultats les plus réalistes au regard de l'anisotropie sont obtenus à partir d'échantillons d'argile naturelle, taillés dans des prélèvements par blocs ou par carottiers de grand diamètre et reconstitués en condition K_0 .

3.3 Base de données ouvrage

Un dossier de la base de données correspond à un ouvrage de référence instrumenté. Il comporte le programme d'essais en place et de mesures sur l'ouvrage ainsi que le programme des essais effectués en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site. Ces programmes peuvent combiner une cinquantaine de types d'essais différents et générer une centaine de variables. Chaque dossier compile donc une information très large : description de l'ouvrage, plan de recollement des capteurs, sondages, essais en place, technique de prélèvement, essais en laboratoire de caractérisation physique et mécanique. En pratique, le traitement de ces données répond à différents objectifs : édition des données, archivage, aide à la conduite des programmes expérimentaux et contribution à la démarche qualité par une traçabilité plus importante des données récoltées.

Tableau II : Exemples d'ouvrages de la base de données

Type d'ouvrage	Situation géographique	Sol	Auteur
Fondations superficielles	Jossigny, Labenne, Plancoet, Provins, Chatenay	Limon, sable, argile molle, argile raide, craie	Amar et al., 1994
Pieux	Merville	Argile des Flandres	Borel, 2001
	Labenne	Sable	
Soutènements	Rouen : Trémie Pasteur	Argile sableuse	Duca, 2001
	B600 : Bassin d'essais		Delattre, 1999
Remblais	Cubzac-les-Ponts	Argile molle	Piyal et Magnan, 1984
	Harfleur (remblai sur pieux)	Argile limoneuse	Borel et Pioline, 2001
	Sallède	Argile raide	
	Guiche	Argile molle	Khemissa et al. 1997
Ouvrages portuaires	Quai en eau profonde Port de Calais	Argile des Flandres	Josseume, 1998, Delattre, 1999

	Quai à pondéreux Port de Dunkerque	Argile des Flandres	Josseume, 1998, Delattre, 1999
--	------------------------------------	---------------------	-----------------------------------

3.4 Exemple d'ouvrage : la trémie Pasteur

On présente dans ce paragraphe une instrumentation très complète qui a été réalisée récemment sur le chantier de la trémie Pasteur. Cet ouvrage entre dans le cadre du projet d'aménagement de l'axe routier est-ouest à Rouen. L'expérimentation a été menée, avec l'accord du District de l'Agglomération Rouennaise, Maître d'Ouvrage, par le LCPC et Solétanche-Bachy, membre du groupement d'entreprises réalisant les travaux. La mise en place et le suivi des appareillages ont été confiés au Centre d'Expérimentations Routières et au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen. Le lecteur trouvera dans Duca (2001) une présentation complète de l'ouvrage, des différents systèmes de mesure dont il a été équipé, ainsi qu'une analyse approfondie des mesures et leur comparaison avec des résultats de calcul.

Le projet consiste à réaliser, compte tenu des contraintes du site (limitation des emprises disponibles en site urbain, aménagement des intersections avec les rues voisines), un axe routier en souterrain avec des accès en déblai : l'ouvrage est réalisé en tranchée couverte dans sa partie centrale et en tranchée ouverte à chaque extrémité. Sur toute la longueur de l'ouvrage, l'excavation est soutenue par des parois moulées de hauteur comprise entre 5 m aux extrémités du tronçon et 16 m dans la partie centrale. La voie est posée, au fond de l'excavation, sur un radier rigide en béton armé. Avant la mise en service du radier, les parois sont soutenues par des butons fixés entre les panneaux en vis-à-vis. Cet ouvrage a fait l'objet d'une instrumentation poussée, constituée par un suivi des pressions appliquées par le sol à différentes profondeurs, un suivi des efforts de butonnage, un suivi de la déformation de la paroi par tubes inclinométriques, des mesures de convergence par fil invar entre les panneaux, et enfin un suivi des déformations dans le massif de sol derrière l'excavation (tubes inclinométriques).

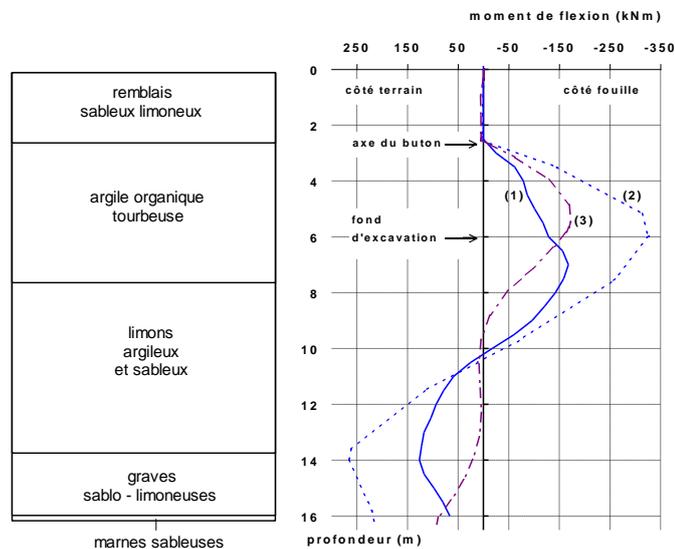


Figure 3 - Coupe géotechnique et courbes de moments fléchissants après excavation (d'après Duca, 2001)

Il s'agit d'une expérimentation complexe, dont on ne peut évidemment pas rendre compte complètement ici. Cependant, à titre d'illustration, on représente sur la figure 3 différentes estimations du moment fléchissant à la fin de l'excavation, avant mise en place du radier et suppression du buton. La courbe (1) correspond à l'estimation déduite des mesures inclinométriques (par dérivation) et de l'inertie de flexion théorique de la paroi ; la courbe (2) est obtenue en incluant dans l'analyse l'ensemble des mesures disponibles (en particulier les mesures de pression totale et d'effort de butonnage). Les deux courbes ont la même allure, et l'on conclut que l'écart constaté provient du fait que l'inertie de flexion théorique est largement sous-estimée. La troisième courbe

correspond aux moments calculés par la méthode des coefficients de réaction (3) avec une inertie corrigée. La différence d'allure (et notamment de courbure au niveau du fond de l'excavation) permet de conclure que la butée mobilisable a été surestimée ; en particulier la valeur adoptée dans le projet pour la cohésion du limon est probablement supérieure à la valeur réelle. Un nouveau prélèvement a été effectué sur le site pour vérifier la validité de cette conclusion ; les essais sont en cours.

Cet exemple montre que de telles expérimentations permettent de confirmer la validité des méthodes de calcul et de cerner la sensibilité des résultats qu'elles donnent aux différents paramètres ; autrement dit, elles permettent d'identifier les paramètres qui ont une influence décisive sur le comportement de l'ouvrage (la cohésion du sol et l'inertie de flexion de la paroi par exemple), et de quantifier cette influence. Par ailleurs, la richesse des résultats constitue une base solide pour juger de la pertinence de la simulation numérique par éléments finis de la construction d'une paroi moulée, en ce qui concerne l'estimation des efforts dans la paroi et des déformations de la structure et du massif encaissant (la construction et la validation de cette modélisation numérique seront menées à bien dans un proche avenir).

4 DISCUSSION

La validation des modèles rhéologiques par l'adéquation entre les comportements calculés et observés des ouvrages doit s'appuyer sur des bases de données provenant d'instrumentations bien documentées, ou de données collectées dans la bibliographie pour les modèles (et les ouvrages) les plus simples.

L'analyse comparée de résultats d'essais de sol et d'observations sur ouvrages a abouti par le passé à élaborer, pour le dimensionnement de différents types d'ouvrage, des recommandations et des règlements encore en vigueur aujourd'hui. La prochaine entrée en vigueur des normes européennes issues du consensus entre différentes pratiques nationales amènera sans doute à reconduire ce type de démarche en s'appuyant sur les données disponibles pour élaborer les documents d'application nationaux.

La valorisation du travail de constitution de ces bases de données se traduit par la publication :

- de monographies relatives à des familles de sol particulières,
- de monographies portant sur le comportement d'un ouvrage instrumenté ou de bases de données de comportements observés.

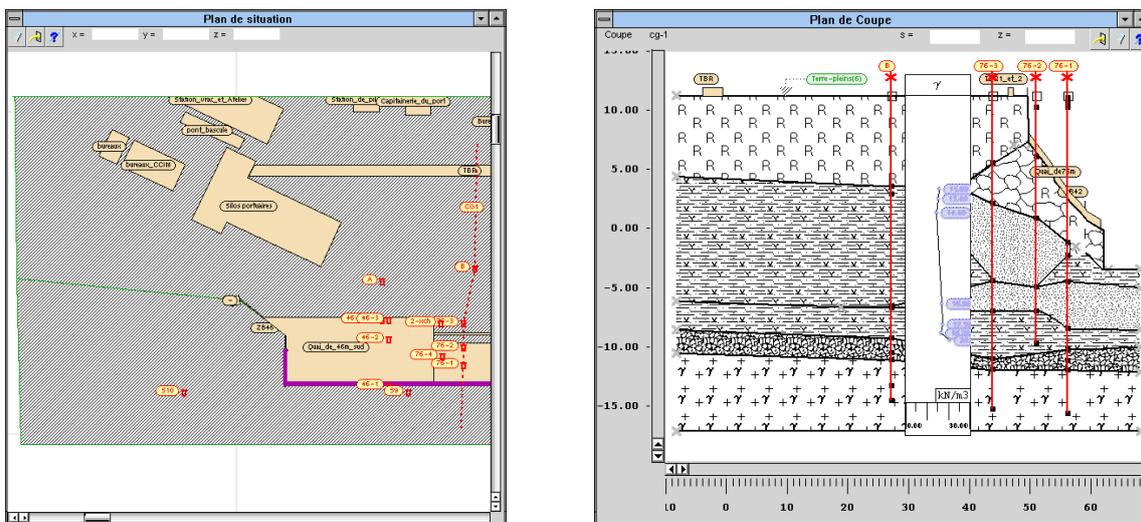


Figure 4 – Plan de situation (section sud des quais de Kergroise au port de Lorient) et géométrie des couches au droit d'une coupe géotechnique avec sondage.

A un deuxième niveau, la démarche produit d'autres résultats qui peuvent être diffusés :

- la formulation de lois de comportement nouvelles, prenant en compte des aspects particuliers du comportement d'un type de sol particulier et validées par confrontation avec des instrumentations sur ouvrages (par exemple la loi de comportement Mélanie proposée pour prendre en compte l'anisotropie des argiles, qui a été introduite dans CESAR-LCPC) ;
- des outils de représentation des données géotechniques à l'échelle d'un site, comme le logiciel EXSOL (figure 4).

5 CONCLUSIONS

La création de ces outils est un travail de longue haleine, mené au LCPC depuis plusieurs années au sein de plusieurs opérations de recherche. La démarche a conduit à des succès incontestables pour certains types d'ouvrages, mais certains détails du comportement observé d'ouvrages complexes (comme les tunnels) sont encore mal reproduits par les méthodes de calcul. On propose donc de continuer à développer une approche s'appuyant à la fois sur les essais de sol en laboratoire et sur l'instrumentation des ouvrages afin d'améliorer la représentativité des modélisations numériques. Les efforts porteront plus particulièrement sur la prise en compte de la réponse du sol aux petites déformations et à la rotation des contraintes intrinsèque au comportement des ouvrages en service. Cet effort est un objectif prioritaire des recherches planifiées pour les quatre prochaines années au LCPC.

6 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amar S., Baguelin F., Canepa Y., Franck R. (1994) Étude expérimentale du tassement des fondations superficielles XIII^{ème} ICSMFE, pp. 623-626.

Borel S., (2001), Comportement et dimensionnement des fondations mixtes, Thèse de doctorat ENPC. (à paraître)

Delattre L., (1999), Comportement des écrans de soutènement- Expérimentations et calculs, Thèse de doctorat ENPC, 491 pages.

Duca V., (2001), Contribution sur la mesure des efforts appliqués par les sols aux ouvrages, Thèse de doctorat ENPC. (sous presse)

Bat A., (1999) Incidence des procédures de prélèvement et des procédures d'essais sur les paramètres géotechniques mesurés, thèse de doctorat université de Caen/Basse Normandie, 182 pages.

Josseume H. (1998) Propriétés mécaniques de l'argile des Flandres à Dunkerque et à Calais, Revue Française de Géotechnique. N°84, pp. 3-26.

Khemissa M., Magnan J.-P., Josseume H. (1997) Étude en laboratoire des propriétés mécaniques de l'argile molle de Guiche. Revue Française de Géotechnique. N°81, pp. 3-25.

Mestat Ph.(2000) De la rhéologie des sols à la modélisation des ouvrages géotechniques, Etude et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, GT 67, 236 pages.

Piyal M., Magnan J.-P., (1984) Paramètres d'élasticité anisotrope de l'argile molle organique de Cubzac-les-Ponts à l'état surconsolidé. Rapport de recherche LPC, N°131 108 pages.

Serratrice J.-F. (1996) Marnes de las Planas, rapport interne, 102 pages.

Valle N., Reiffsteck Ph, Blivet J.-C., (2000) Méthodes de compactage appliquées aux matériaux alluvionnaires, VI^{èmes} Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, tome 2, pp. 349-356.