

## METHODES DE RECONNAISSANCE CROISEES POUR L'ANALYSE DE STABILITE DES DIGUES SOUMISES A EROSION INTERNE

J. MONNET

Université Joseph Fourier - L3S-R, Domaine Universitaire,  
BP n°53, 38041, Grenoble, Cedex 9, France; e-mail: jmonnet@ujf-grenoble.fr

P. PLOTTO

Sas IMSRN – Parc Pré Millet, 38330 Montbonnot, France; e-mail: pierre.plotto@imsrn.com

**Résumé:** Les tronçons de digue autour de Grenoble font l'objet d'une campagne de reconnaissances fondée sur l'utilisation d'une méthode géophysique à grand rendement, le panneau électrique. L'expérience montre que la détection de l'écoulement, des hétérogénéités, de la géométrie, de la nature des couches obtenue par l'analyse électrique, n'est pas toujours conforme à une réalité objective, et que la méthode d'inversion conduit à une incertitude qui peut être importante. La recherche permet de réduire les erreurs de cette méthode par la prise en compte des géométries lorsqu'elles sont connues. Des essais pressiométriques à cycle ont été réalisés et interprétés en analyse inverse pour déterminer les caractéristiques mécaniques d'élasticité et de résistance avec les méthodes développées au L3S-R. Des essais Lefranc, pour la détermination de la perméabilité des matériaux de la digue, ont été réalisés. Les résultats sont regroupés et confrontés aux mesures en laboratoire pour une meilleure analyse du risque d'instabilité.

**Abstract:** The sections of dam around Grenoble are the subject of a geotechnical campaign based on the use of a geophysical method, the electrical panel. Practice shows that the detection of the seepage, heterogeneities, the geometry, the nature of the layers obtained by the electric analysis is not always in conformity with an objective reality, but that the method of inversion leads to an uncertainty which can be important. Research allows us to reduce the errors of this method by taking into account of the geometries when they are known. Pressuremeter tests with cycle were carried out and interpreted in inverse analysis to determine the mechanical characteristics of elasticity and resistance with the methods developed with the L3S-R. Lefranc tests, for the determination of the permeability of materials of the dam, were also carried out. The results are gathered and compared with measurements in laboratory for a better analysis of the risk of instability.

### 1. INTRODUCTION

L'érosion interne est l'entraînement des particules d'un sol sous l'action de l'écoulement qui le traverse. Elle se différencie de l'érosion externe, par la nature des écoulements: dans le premier cas, l'écoulement est souterrain, dans le second l'écoulement est superficiel.

En France, 70 manifestations d'érosion interne ont été recensées par le comité Français des Grands Barrages sur l'ensemble des barrages ainsi que sur les digues d'aménagement hydroélectrique. Les incidents les plus nombreux concernent les digues. Leur fragilité est inhérente au caractère exceptionnel et rapide de la crue, à leur réalisation souvent ancienne et aux moyens de surveillance souvent très limités. Les mécanismes d'érosion interne sont à l'origine de la majeure partie des ruptures d'ouvrages hydrauliques en terre. La France compte de nombreux barrages, 8000 km de digues de protection contre les inondations, 6700 km de voies navigables endiguées et plus de 1000 km de digues d'aménagement hydraulique. Dans ce contexte, l'Agence Nationale de la Recherche finance le projet de recherche sur l'*érosion interne des ouvrages hydrauliques en terre* (ERINOH). Ce projet est orienté vers l'étude du mécanisme d'érosion interne. L'état de l'art dans le domaine de l'érosion interne peut se trouver de façon complète sur la bibliographie du colloque d'Aussois (IREX [2]).

La bibliographie est très riche sur le problème de l'érosion interne. Les différentes approches convergent à dire que l'érosion interne ne se développe que si deux conditions nécessaires sont réunies: l'arrachement des particules et leur transport. Huit phénomènes d'arrachement peuvent déstabiliser une particule ou un groupe de particules et à ce titre être initiateurs de l'érosion interne, ce sont:

- La boullance: correspond à l'état d'un volume de sol dans lequel les grains flottent, entourés d'une phase liquide continue, sous l'action d'une pression d'eau qui annule la contrainte effective.

- La suffusion: l'érosion peut être « à caractère suffusif » c'est à dire ne provoquer que le mouvement de grains de petite taille non structuraux lorsque la vitesse locale (ou le gradient local) dépasse une certaine limite.

- L'érosion régressive: l'érosion régressive concerne tout phénomène d'érosion qui produit un vide en un point aval et qui se poursuit en progressant vers l'amont.

- Le débouillage: le débouillage est le déséquilibre d'un volume de sol sous l'action de la poussée de l'eau que la résistance au cisaillement sur le pourtour du volume ne parvient plus à compenser. Il concerne principalement les matériaux argileux coincés dans une discontinuité d'un milieu rocheux.

- La dissolution: la dissolution est la disparition d'une partie des constituants des particules, sous une action chimique ou thermique.

- La dispersion: est un phénomène physico-chimique qui tend à séparer les particules argileuses, diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'argile et faciliter leur mobilité.

- L'entraînement: est le détachement des particules des parois d'une conduite, d'un canal ou d'une rivière à partir d'une certaine valeur du cisaillement engendré par l'écoulement.

- L'exsolution: l'air piégé dans le noyau lors de la mise en eau est comprimé et partiellement dissous dans l'eau en partie amont du noyau. L'air est finalement

transporté par l'eau via le corps du barrage et relâché dans les parties aval du noyau où la pression de l'eau interstitielle est plus faible. Il en résulte une diminution locale de la perméabilité et une augmentation nette des pressions interstitielles.

Différents auteurs développent des méthodes fondées sur la comparaison du gradient hydraulique de sortie avec un seuil de gradient critique. Ils sont obtenus à l'aide de la modélisation numérique. Les gradients critiques changent selon le mécanisme d'érosion étudié. Les formules utilisées pour les gradients critiques sont fragmentaires. Leurs domaines de validité sont souvent mal connus. Les conditions expérimentales ou les hypothèses théoriques qui ont servi à leur élaboration sont parfois très discutables. Les phénomènes de transport ont aussi fait l'objet de plusieurs études mais restent toujours du domaine de la recherche.

## 2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les éléments collectés dans la bibliographie ne peuvent en aucun cas être considérés comme des acquis. En effet, les différentes approches n'ont pu être confrontées à la réalité du terrain. L'étude de l'érosion interne dans les digues comporte peu d'expériences de grande échelle qui simulent l'initiation d'une érosion interne voir la rupture. Une de ces rares études concerne un cas très particulier, le développement de renard sous une dalle étanche de sables fins. L'absence (ou la méconnaissance) des validations grandeur nature constituent donc un vrai besoin. Les possibilités de rupture d'une digue étant nombreuses et diverses, on peut objectiver à chaque cas de sinistre une série de raisons qui, prises individuellement, n'amèneraient pas obligatoirement à la ruine, mais qui, dans le contexte en question, ont amené à la destruction de l'ouvrage. Si on associe à chaque cause un critère (hauteur d'eau, granulométrie, résistance mécanique, ...) la question que si pose et que nous proposons de résoudre est de connaître les critères principaux à respecter pour se préserver du risque d'érosion interne et d'instabilité, ainsi que de déterminer correctement la hiérarchie des ces différents critères à appliquer.

D'une manière plus générale, les objectifs de cette recherche permettront et/ou aideront à répondre aux questions essentielles qui entourent la complexité du phénomène recherché, à savoir: **Où?** A quel endroit l'instabilité va-t-elle se développer? Les digues présentent des linéaires souvent importants. Une réponse à cette question est donc indispensable; **Quand?** A quel moment l'instabilité va-t-elle se déclarer? A partir de quelle charge hydraulique (gradient critique) les ruptures mécaniques se manifestent; **Comment?** De quelle manière l'instabilité va-t-elle se développer? Quelles seront ses conséquences? **Pourquoi?** Quelles sont les causes de déclenchement de l'instabilité (boulance, suffusion interne, suffusion de surface, renard...)?

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'une expertise de l'instabilité puis une expérimentation (sur modèle réduit au laboratoire).

### 3. PROGRAMME DE RECHERCHE

Le programme concerne une expérimentation in situ sur des tronçons de digue constitué de matériaux bien connus (voir homogène dans un premier temps). Il est articulé autour de la notion d'analyse croisée entre les essais in-situ géophysiques et géomécaniques. Les méthodes géophysiques peuvent être utilisées pour faire une étude globale des digues, très rapidement, et déterminer les points particuliers à étudier plus précisément. Les méthodes géomécaniques peuvent être beaucoup plus précises pour étudier un site particulier et définir les paramètres géomécaniques du sol en place.

#### 3.1. ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude choisie se situe le long des berges de l'Isère (figure 1) à proximité de Grenoble et du campus universitaire. L'étude a lieu sur les digues en rive droite et en rive gauche de l'Isère. Ce site a été choisi comme zone d'étude par le Syndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère (SYMBHI) pour contrôler les digues et détecter les zones nécessitant un renforcement éventuel. La stabilité des digues dans ce secteur est un objectif majeur pour sécuriser de domaine universitaire de Saint Martin d'Hères et l'agglomération grenobloise toute proche.

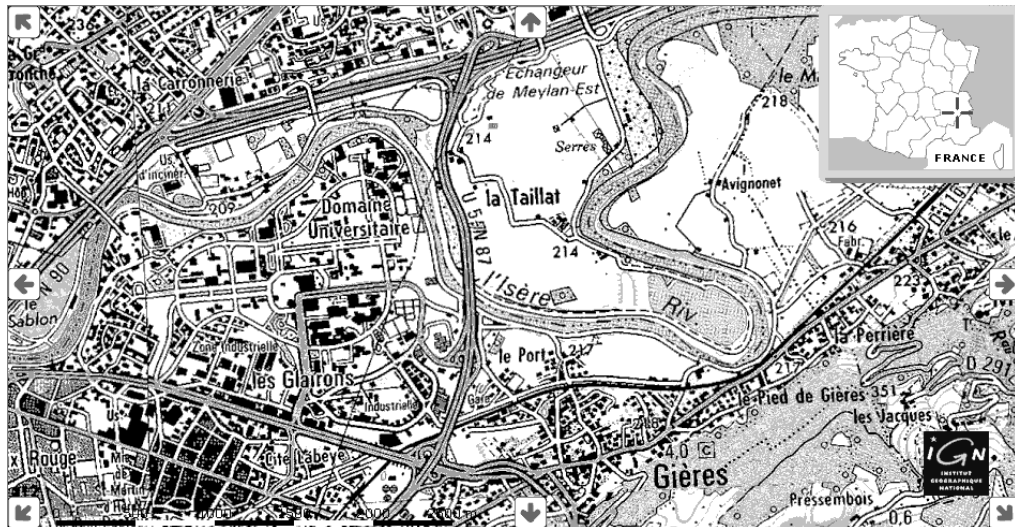


Fig. 1. Carte de la zone d'étude choisie

## 3.2. MESURES IN SITU GÉOPHYSIQUE

Les tronçons de digue font l'objet d'une campagne de reconnaissances fondée sur l'utilisation d'une méthode géophysique à grand rendement, le panneau électrique. L'expérience montre que la détection de l'écoulement, des hétérogénéités, de la géométrie, de la nature des couches obtenue par l'analyse électrique, n'est pas toujours conforme à une réalité objective, mais que la méthode d'inversion conduit à une incertitude qui peut être importante. L'analyse croisée permet de réduire les erreurs de cette méthode par la prise en compte des géométries lorsqu'elles sont connues et des mesures ponctuelles géomécaniques, d'autant plus que l'hétérogénéité des digues apparaît très importante (figure 2).

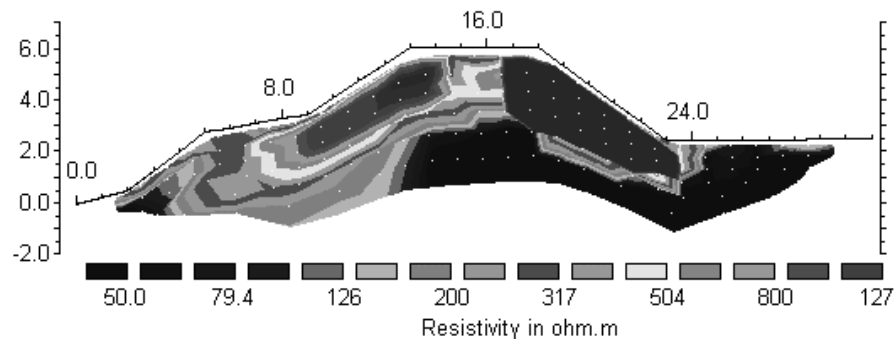


Fig. 2. Panneau électrique

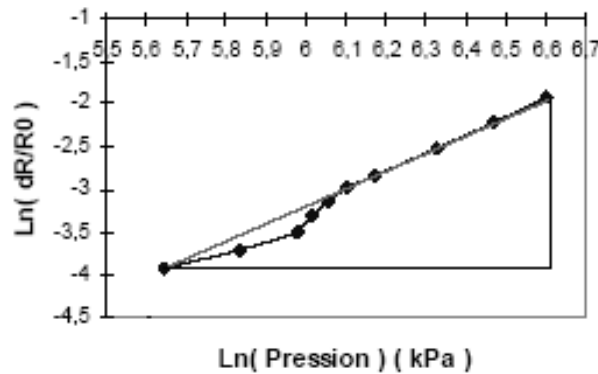


Fig. 3. Interprétation bi-logarithmique de l'essai pressiométrique, mesure de l'angle de frottement par la pente  $p$  de la droite de régression

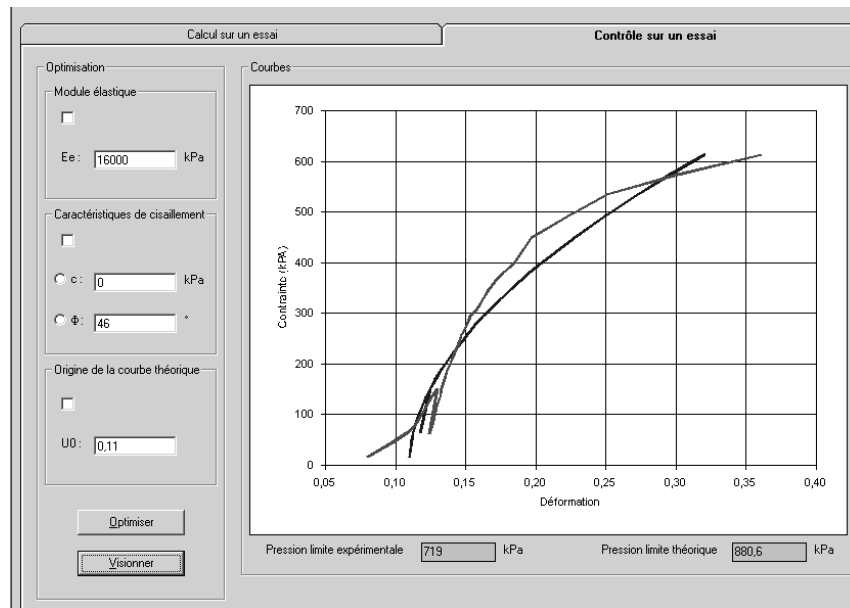


Fig. 4. Contrôle du module d'élasticité et de l'angle de frottement réalisé à l'essai pressiométrique (essai en rouge, courbe théorique en bleu)

### 3.3. MESURES IN SITU PRESSIOMÉTRIQUES

Une campagne de 18 essais pressiométriques à cycle sont réalisés et interprétés en analyse inverse pour déterminer les caractéristiques mécaniques d'élasticité (module de cisaillement) et de résistance (angle de frottement ou cohésion) avec les méthodes développées au L 3S-R (figure 3 et figure 4) et qui ont été testées puis utilisées depuis une dizaine d'années sur de nombreux ouvrages de génie civil (MONNET et ALLAGNAT [3], ALLAGNAT et al. [1], MONNET et al. [5]).

### 3.4. AUTRES MESURES IN SITU

Des essais Lefranc, pour la détermination de la perméabilité des matériaux de la digue, ont été réalisés. Les résultats serviront de bases aux modèles hydrauliques. Des piézomètres ont été installés afin de mesurer le niveau d'eau à différents endroits de la digue.

### 3.5. MESURES DE LABORATOIRE

A l'échelle de l'échantillon, des essais d'identifications (granulométrie, sédimentométrie, teneur en eau, valeur de bleu...) ont été réalisés à la fois sur les matériaux

constituant la digue et sur les matériaux entraînés. Des essais de cisaillement direct ont été entrepris sur des échantillons carottés intacts dans les digues de l'Isère à la machine de Casagrande.

## 4. INTÉGRATION DES MESURES

### 4.1. INTERPRÉTATION EN FROTTEMENT

La pluridisciplinarité des approches impose une phase de travail spécifique pour le dépouillement et l'intégration des différentes mesures effectuées sur site. L'objectif essentiel est de fournir des données de qualité aux modélisations numériques envisagées dans le programme de recherche. Une première analyse croisée a permis de comparer les angles de frottement mesurés au pressiomètre et les angles mesurés au cisaillement direct au laboratoire. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de cette étude:

- Il n'existe pas de corrélation directe évidente entre les mesures par pressiomètre et au cisaillement direct pour des essais sensiblement proches les uns des autres (figure 5).
- L'écart type des angles de frottement est très forte par les deux méthodes ( $5,2^\circ$  au pressiomètre,  $3,4^\circ$  au cisaillement) et traduit bien l'hétérogénéité observées (figure 2).
- La moyenne des angles mesurés est identique par les deux méthodes ( $32,4^\circ$  au pressiomètre,  $32,6^\circ$  au cisaillement).

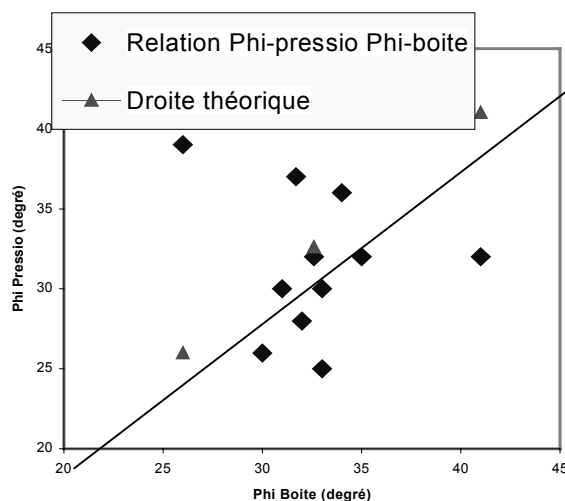


Fig. 5. Comparaison entre les angles mesurés à la boîte de cisaillement et les angles mesurés au pressiomètre, en tenant compte du poids volumique réel du sol de  $17 \text{ kN/m}^3$  en moyenne

## 4.2. RELATION FROTTEMENT/RÉSISTIVITÉ

L'étude de la relation entre le frottement déduit des essais pressiométriques et la résistivité déduite de la méthode du panneau électrique ne montre pas de corrélation évidente entre ces deux résultats (figure 6).

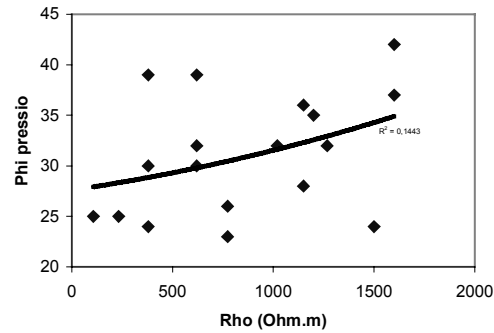


Fig. 6. Relation entre les frottements mesurés au pressiomètre et la résistivité du sol mesurée par méthode géophysique

## 4.3. RELATION MODULE DE YOUNG/ RÉSISTIVITÉ

L'étude de la relation entre le module d'élasticité et la résistivité du sol conduit à plusieurs conclusions intéressantes:

- Il existe une corrélation entre le module de Young cyclique mesuré au pressiomètre et la résistivité trouvée au panneau électrique (figure 7).
- La corrélation n'est pas linéaire, mais décroît pour une résistivité inférieure à 700 Ohm.m et croît pour une résistivité supérieure.
- Cette limite semble liée à la présence des deux couches très différentes, plutôt qu'à un effet électrique particulier.

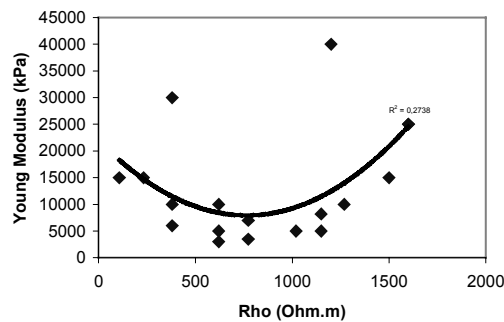


Fig. 7. Relation entre le module d'élasticité mesurés au pressiomètre et la résistivité du sol mesurée par méthode géophysique



## 5. MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

Les modélisations hydrauliques sont réalisées avec le code PLAXFLOW (figure 8). Ce logiciel permet d'analyser l'écoulement souterrain en régime permanent et en régime transitoire. PLAXFLOW utilise aussi la relation de Van Genuchten reliant la pression interstitielle, le degré de saturation et la perméabilité, afin de simuler l'écoulement en milieu partiellement saturé.

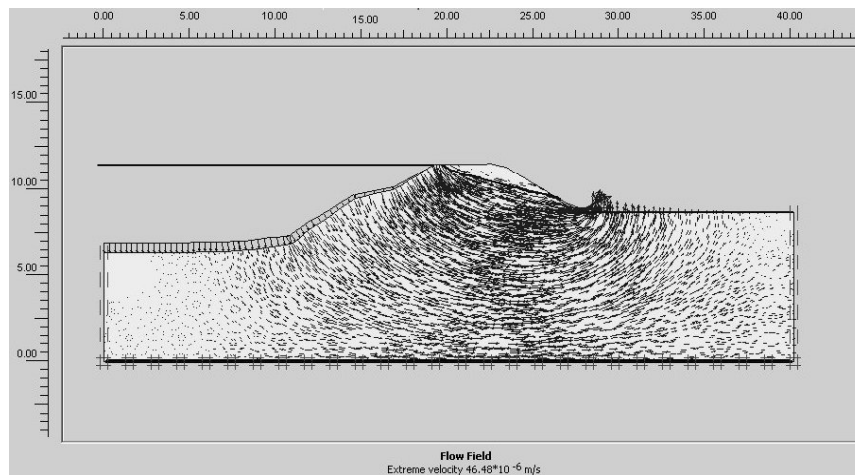


Fig. 8. Modélisation d'un écoulement hydraulique par le logiciel Plaxflow

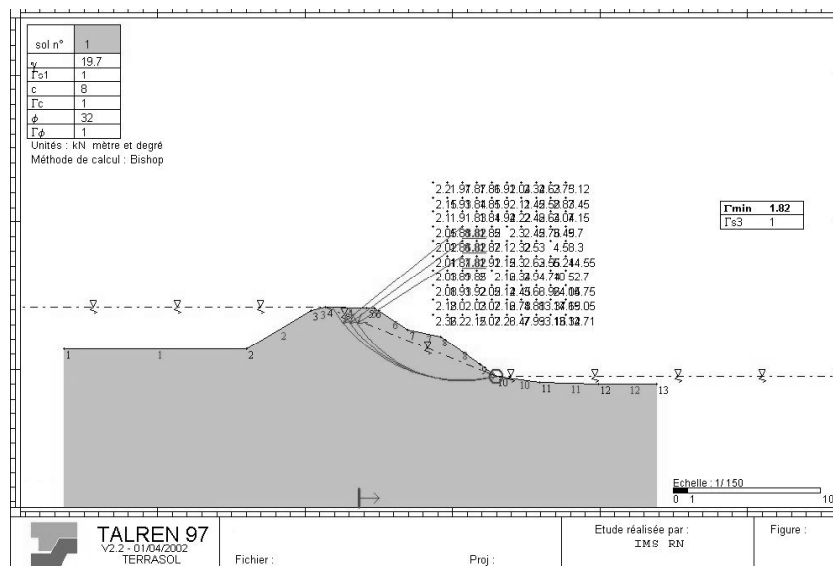


Fig. 9. Calculs de stabilité par Talren

PLAXFLOW est numériquement stable et permet d'introduire des conditions aux limites hydrauliques variables en fonction du temps. Les modélisations mécaniques sont réalisées avec le logiciel TALREN (figure 9) qui permet de faire une analyse classique de la stabilité des pentes par la méthode de Bishop, Fellenius ou la méthode des perturbations. Les résultats des modèles hydrauliques sont pris en compte par l'introduction, dans les modèles TALREN, de la surface libre obtenue par PLAXFLOW. Les calculs numériques sont stables et permettent de tenir compte des conditions aux limites du problème posé.

Il est également possible de combiner les résultats de PLAXFLOW avec PLAXIS 2D pour les calculs concernant de déformation et de stabilité. Des approches couplées hydromécaniques sont envisagées dans le cadre de ce programme.

## 6. CONCLUSION

Une étude systématique d'un même tronçon de digue a été réalisée à la fois par des méthodes géophysiques avec des panneaux électriques, par des méthodes géomécaniques avec essais pressiométriques à cycle, par des carottage et des essais de cisaillement au laboratoire. Une première analyse croisée a fait apparaître une très grande hétérogénéité de la structure des digues de l'Isère et du Drac qui ont été réalisées par des matériaux trouvés sur place. Dans la mesure où la localisation précise des essais pressiométrique et des échantillons testés au laboratoire n'est pas connue, c'est seulement la moyenne des angles de frottement qui apparaît significative et qui montre un bon accord entre l'angle trouvé au pressiomètre et l'angle trouvé à la boîte de cisaillement. L'analyse croisée permet de mettre en évidence une relation entre le module d'élasticité mesuré au pressiomètre et la résistivité du sol. Cependant les hétérogénéités trouvées par le panneau électrique restent à prendre en compte dans l'analyse de stabilité finale.

Ces premiers résultats devraient être complétés par des campagnes de mesures supplémentaires le long du Drac et de l'Isère.

## RÉFÉRENCES

- [1] ALLAGNAT D., MONNET J., TESTON J., BILLET P., BAGUELIN F., *Dimensionnement de la fondation d'un grand viaduc en arc*, Revue Européenne de Génie Civil, 2005, n° 9–10, 1131–1150.
- [2] IREX, *Revue Bibliographique sur l'Erosion Interne*, Colloque Aussois, 2005.
- [3] MONNET J., ALLAGNAT D., *Design of a large retaining structure with pressuremeter analysis*, Proceeding of the Institution of the Civil Engineers – Geotechnical Engineering, London, 2002, GT155, Issue 01, 71–78.
- [4] MONNET J., ALLAGNAT D., TESTON J., BILLET P., BAGUELIN F., *The foundation of the Crozet bridge. A case study*, Studia Geotechnica et Mechanica, 2005, Vol. XXVII, No. 1–2, 125–142.
- [5] MONNET J., ALLAGNAT D., TESTON J., BILLET P., BAGUELIN F., *Foundation design for a large arch bridge on alluvial soils*, Proceeding of the Institution of the Civil Engineers – Geotechnical Engineering, London, 2005, Vol. 159, No. 1, 19–28.