

Amélioration des méthodes de calcul des barrages de correction torrentielle ¹
Calcul global – prise en compte des interactions sol-structure

Synthèse des travaux

J.M. Tacnet Cemagref ETNA - BP 76 - 38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX
Tel : 33 (0)4 76 76 27 94 Fax : 33 (0)4 76 51 38 03
e-mail : jean-marc.tacnet@grenoble.cemagref.fr

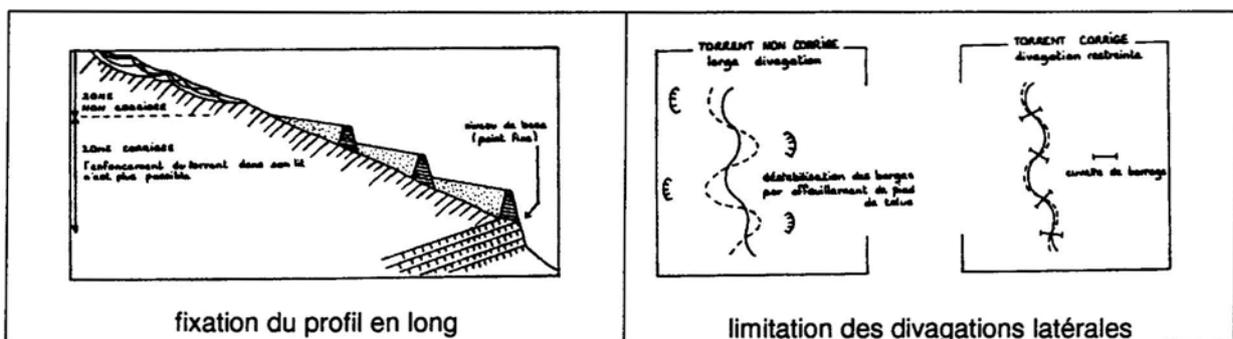
E. Flavigny Laboratoire Sols Solides Structures - BP 53 38041 Grenoble cedex 9
Tel : 33 (0)4 76 82 51 45 Fax : 33 (0)4 76 82 70 00
e-mail : Etienne.Flavigny@hmg.inpg.fr

1 PROBLEMATIQUE GENERALE

Principes de correction torrentielle

Les ouvrages de génie civil occupent aujourd'hui une place essentielle dans les dispositifs de protection contre les risques liés aux crues torrentielles. La plupart du temps, les stratégies de protection sont basées sur une combinaison d'ouvrages de consolidation et d'ouvrages de sédimentation dans le cadre d'aménagements dits "mixtes".

- les **barrages de consolidation** sont implantés en série et en escalier dans les tronçons fortement érodables du chenal d'écoulement dans le cadre de travaux de correction active ; Ces ouvrages visent à réduire, voire supprimer les phénomènes érosifs à leur genèse ou en cours de développement. Ils agissent (figure ci-dessous) sur l'évolution du profil en long du torrent, l'érosion des berges et les divagations latérales des écoulements. Ils atténuent les vitesses et stockent une partie des volumes des laves torrentielles. Ils créent des atterrissements en amont des voiles et participent à la stabilisation des pieds de berges instables.



¹ Contrat de Plan Etat Région Rhône-Alpes (1997-1998) - Programme de recherche sur les risques naturels - Subvention n° 98DST 06 – Montant : 200 000 F T.T.C. (Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Direction des Affaires Scientifiques et Techniques)

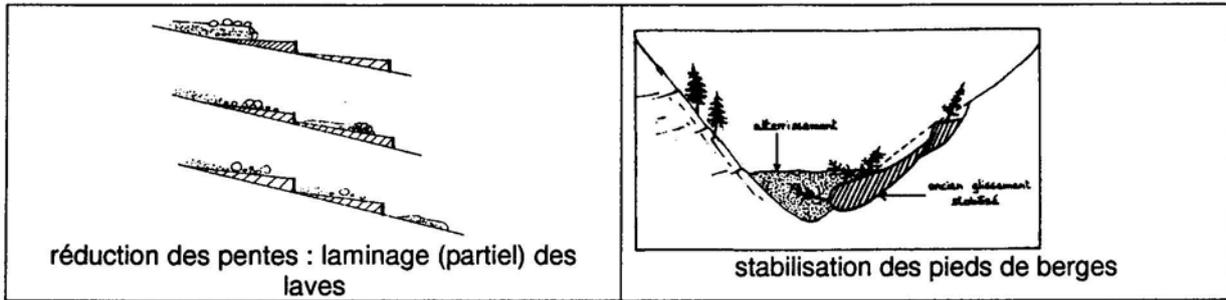


Figure 1 : principaux effets des barrages de correction torrentielle de type "consolidation"

- les **barrages de sédimentation** (ou plages de dépôt) sont réalisés en partie inférieure du torrent dans le cadre de travaux de défense passive. Ces équipements sont généralement constitués d'une capacité de stockage limitée par des digues latérales en remblai et d'un ouvrage terminal en béton armé rendu plus ou moins filtrant grâce à des systèmes de grilles ou de pertuis aménagés dans le voile

Insuffisances des méthodes actuelles de dimensionnement

Au niveau de la conception et du dimensionnement de la structure, les barrages de correction torrentielle se distinguent d'ouvrages d'art plus courants par la nature des charges agissant (chocs, poussée de lave torrentielle) et par un contexte géotechnique de mise en place difficile (caractéristiques géomécaniques du sol de fondation mal connues ; instabilité de berges avec une forte interaction sol-structure..). Les méthodes de conception et outils de calcul spécifiques développés ces dernières années restent basées sur une approche bidimensionnelle largement inspirée des calculs classiques de murs de soutènement. Ces méthodes présentent plusieurs limitations :

- Le caractère tridimensionnel de la géométrie et des actions n'est pas pris en compte malgré :
 - une géométrie d'ouvrage fortement variable entre l'axe de l'ouvrage et les rives
 - des actions agissant non seulement dans un plan perpendiculaire au voile de l'ouvrage mais aussi dans des directions quelconques ;
 - une variation importante de la nature et de l'intensité des actions s'exerçant sur l'ouvrage de l'axe du barrage vers les rives ;
- Les modèles de comportement de sol sous les fondations et au contact du voile résultent d'analyse bidimensionnelle selon des modèles élastiques.

Les méthodes de calcul actuelles présentent de nombreuses insuffisances :

Etablies dans le cadre d'une approche bidimensionnelle et par souci de simplification, les justifications sont faites au niveau de coupes verticales (ou "tranches") choisies sur la largeur de l'ouvrage. On suppose ici que la géométrie et les actions exercées sont constantes dans une direction perpendiculaire au plan de coupe. La figure ci-dessous illustre la forte variation de la géométrie et des actions (nature et intensité) de la cuvette vers les ailes, contredisant les hypothèses précédentes.

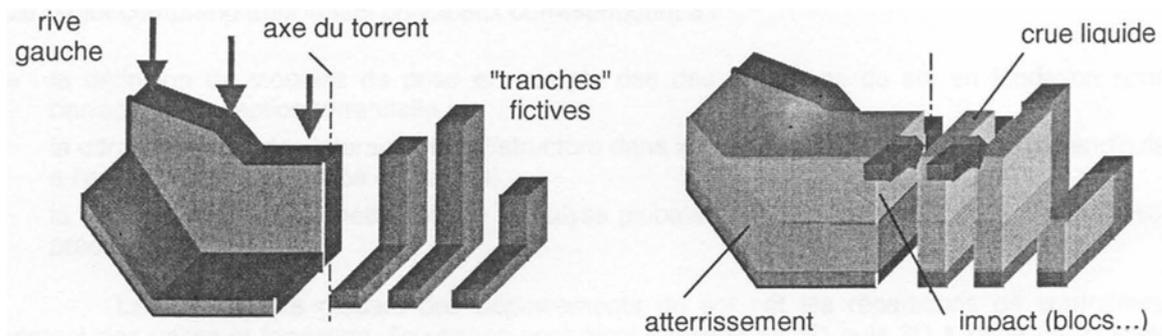


Figure 1: variation de la géométrie et des chargements entre l'axe du torrent et la rive

De plus, les actions exercées (ex : poussée des berges) peuvent ne pas être strictement perpendiculaires au voile des ouvrages, mais agir dans des plans quelconques et de façon dissymétrique d'une berge à l'autre. Le calcul classique sur des coupes dans des plans verticaux est alors inadapté.

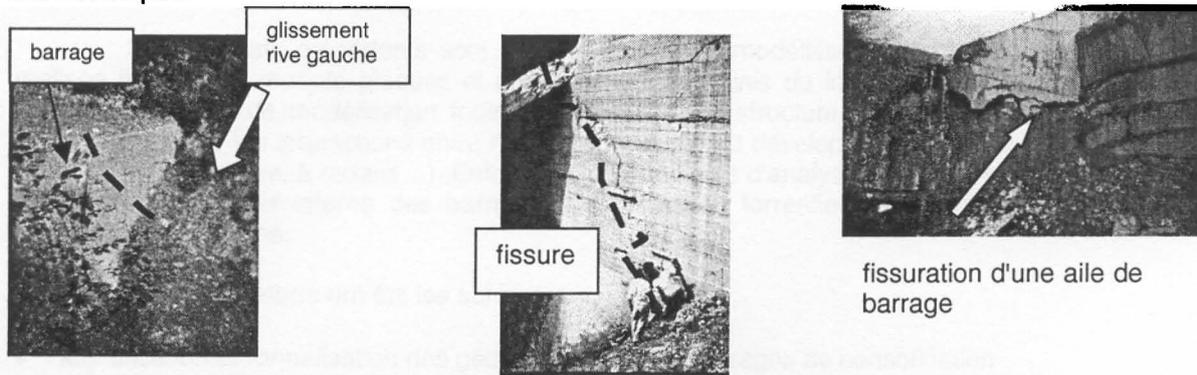


Figure 2 : exemples de pathologies dues aux poussées latérales des berges

Le comportement du sol est considéré comme élastique linéaire sous la fondation et les efforts horizontaux sont repris par frottement supposé uniformément réparti. Dans un plan parallèle à l'axe du torrent, la présence d'une bêche et/ou d'un parafouille modifie les schémas de répartition de contraintes en fondation. Dans un plan perpendiculaire à l'axe du torrent, l'étude de la stabilité externe et interne doit également prendre en compte la variation des conditions d'appui selon des plans parallèles à l'axe du torrent.

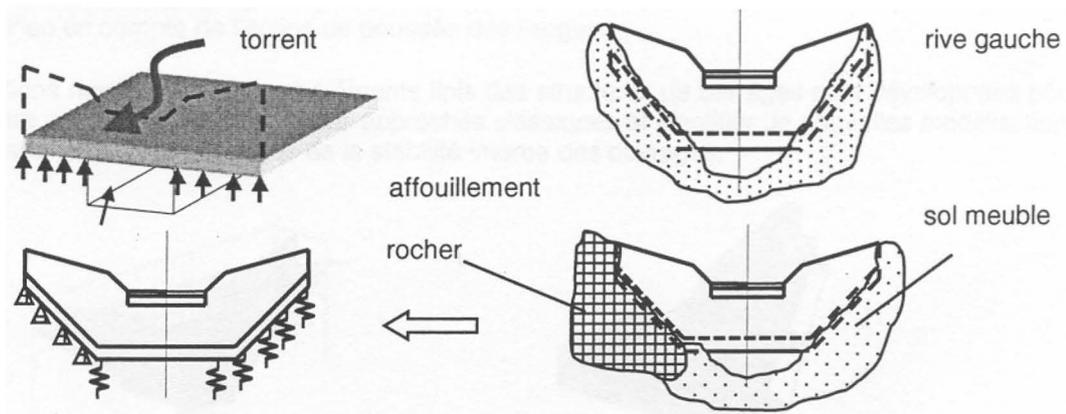


Figure 3 : Exemple de variation des conditions d'appui en fondation et modélisations associées

2 DEMARCHE D'ETUDE - RESULTATS

Ce projet comprend trois volets principaux correspondant à :

- la définition de modèles de prise en compte des des réactions du sol en fondation sous un barrage de correction torrentielle ;
- la caractérisation des interactions sol/structure dans les directions parallèles puis perpendiculaires à l'axe du torrent (poussée de berges) ;
- la mise au point d'une méthodologie d'analyse globale (3D) des ouvrages intégrant les résultats précédents.

La cinématique globale des déplacements du sol et les répartitions de contraintes au contact des voiles et fondation d'ouvrages sont ainsi étudiées en 2D puis 3D à l'aide de logiciels de calcul éléments finis. Dans le cas de l'analyse de l'interaction entre un glissement et un barrage, des études paramétriques sont menées pour caractériser l'influence de paramètres liés à la géométrie du barrage et du glissement sur la distribution des efforts exercés par le massif sur l'ouvrage. On étudie

ainsi les effets de variations de l'inclinaison du parement de l'ouvrage, de la nature de matériau à l'interface entre l'ouvrage et le sol, du caractère compressible de matériaux au niveau de l'interface sol-ouvrage et de l'étendue du glissement en amont. Différentes approches de modélisation (déplacement imposé, appui élastique en surface du sol) sont également testées.

Les résultats précédents sont intégrés dans une modélisation des structures de barrages réalisée à l'aide du module plaques et coques Eléments Finis du logiciel Robot (version Robot97). Une méthodologie de modélisation tridimensionnelle de la structure prenant en compte les cas de charges exercés, les interactions entre l'ouvrage et le sol est développée pour différentes géométries de fondations (inclinaison, à redans...). Enfin, une méthodologie d'analyse simplifiée tridimensionnelle de la stabilité externe et interne des barrages de correction torrentielle, utilisable en ingénierie, est également développée.

Les étapes de cette étude ont été les suivantes :

- ◆ Identification et formalisation des géométries types d'ouvrages de consolidation
- ◆ Mise au point d'une méthodologie d'analyse de la stabilité globale des barrages (définition des cas de charges tridimensionnels, proposition de méthodes de quantification des actions). Une méthode permettant de calculer analytiquement les contraintes subies par les fondations des barrages sous l'effet d'une flexion déviée est proposée. Dans un premier temps, il s'agit d'une extension des méthodes classiques de calcul de fondation 2D aux géométries réelles de la fondation sous l'action de chargements tridimensionnels. Cette méthode permet ensuite d'intégrer les résultats obtenus au niveau de la partie analyse éléments finis géotechnique du projet, notamment en terme de répartition des contraintes entre la partie centrale et les parties latérales ou de prise en compte de l'action de poussée des berges.
- ◆ Simulations numériques de type éléments finis des structures de barrages sont développées pour permettre une comparaison avec les approches classiques et identifier de nouvelles modélisations RDM dans le cadre de l'analyse de la stabilité interne des ouvrages.

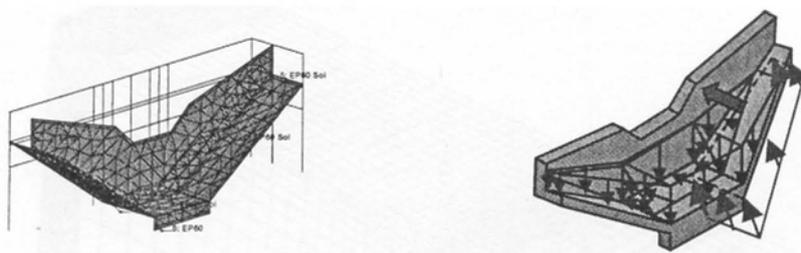


Figure 4 : modélisation EF de la structure et des chargements associés

- ◆ Proposition de modèles de prise en compte des réactions du sol en fondation. Ces modélisations de type éléments finis permettent de valider la forme et la nature des répartitions de contraintes en fondation avec différentes hypothèses d'inclinaison de voile et de fondation (étude des variations de répartition entre les parties de fondation horizontales et inclinées) ;
- ◆ Etude du cas particulier d'interaction sol/structure notamment dans le cas de berges instables et ouvrages de consolidation ; la figure 4 illustre le comportement d'une pente instable et la poussée de la pente sur le parement vertical d'un barrage de correction. Les paramètres que l'on peut faire varier dans cette étude sont :
 - l'angle d'inclinaison de la pente par rapport au terrain naturel et l'angle de frottement du sol ;
 - la profondeur d'une ligne de discontinuité préexistante dans le massif de sol ;
 - la longueur de la pente (et du modèle) : dans la figure ci dessous la longueur du modèle influe sur la cinématique mais n'aura que peu d'influence sur le massif car le glissement passe au dessus de l'ouvrage.

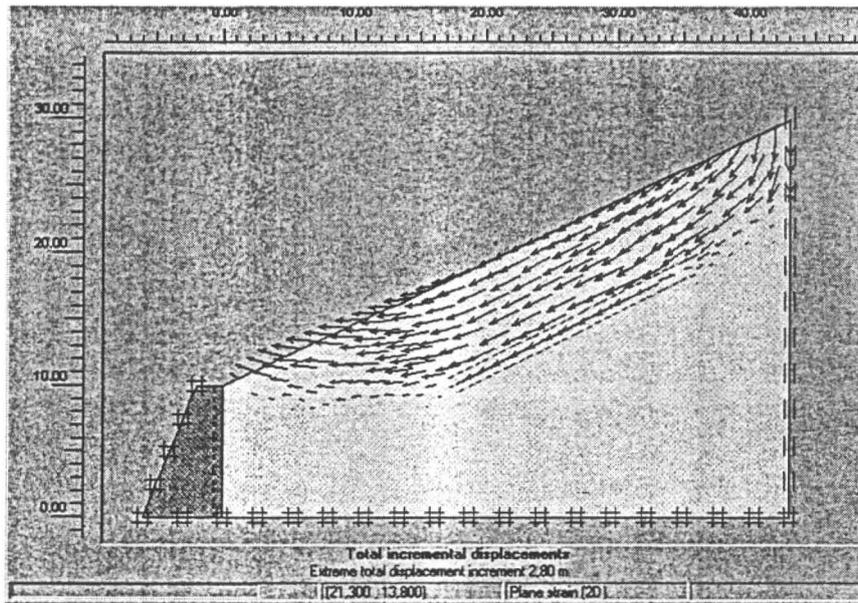


Figure 5 : Effet d'une pente instable latérale

La prise en compte de l'effet tridimensionnel est montré sur la figure 5 ci-dessous : un barrage de correction est implanté dans une vallée avec une pente amont aval et deux versants latéraux en pente. Seule la moitié de l'ouvrage est représentée. L'initialisation des contraintes dans ce type de modèle est délicate car la taille du modèle influe sur la réponse.

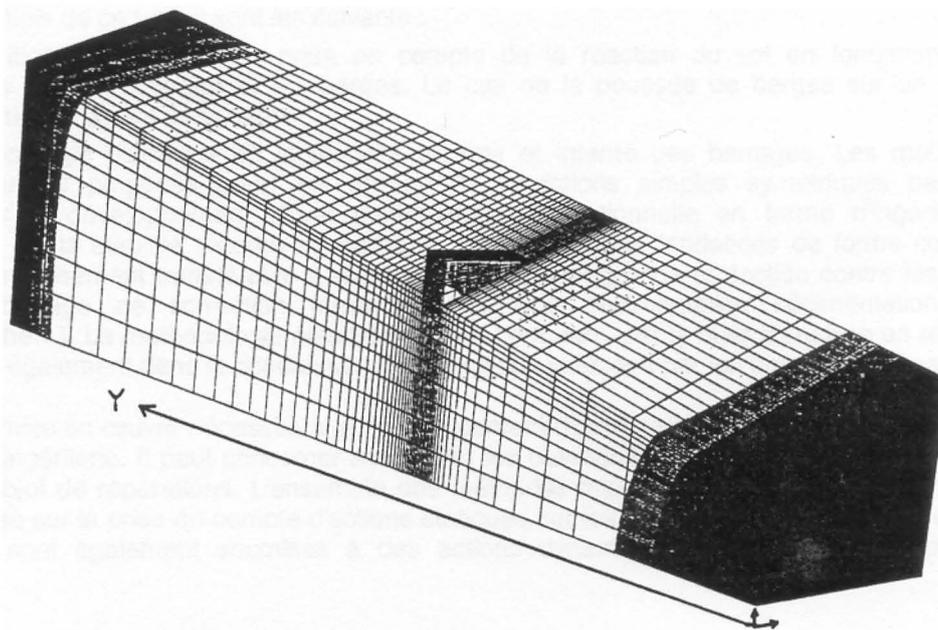


Figure 6 : Modèle tridimensionnel d'ouvrage

La prise en compte de la poussée des berges sur un voile de barrage montre la cinématique du glissement et les efforts qui en résultent : à partir du comportement élastoplastique du sol et des caractéristiques du voile on peut déduire les efforts (moment et efforts tranchants) à prendre en compte dans le calcul du voile.

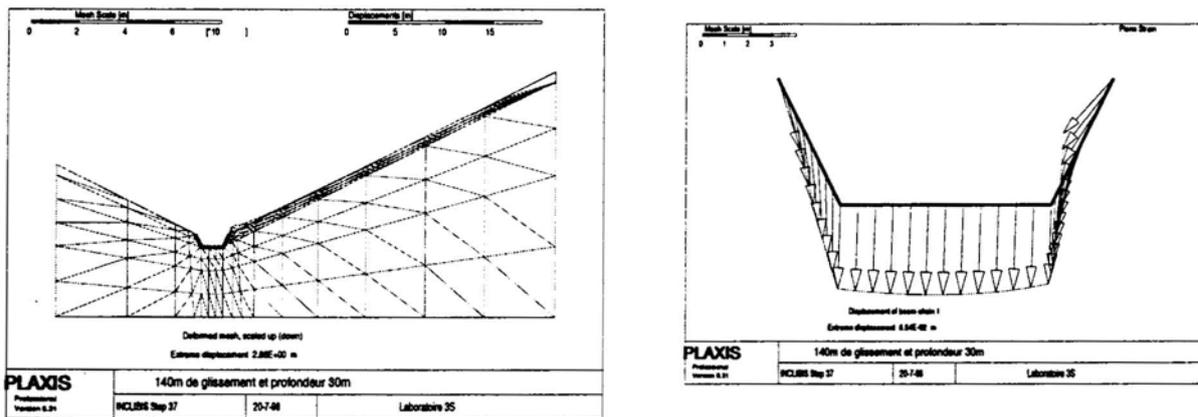


Figure 7 : Analyse de l'influence de l'inclinaison des voiles - exemple de modélisation du barrage selon une direction perpendiculaire à l'axe du torrent

3 CONCLUSION

Ce travail met en évidence les problèmes spécifiques de conception de barrages en sites instables et propose aux maîtres d'œuvre et concepteurs une méthode de calcul mieux adaptée au contexte particulier d'implantation et aux formes de barrages de correction torrentielle.

Basés sur des simulations numériques des structures et de leurs interactions avec le sol, les résultats essentiels de ce travail sont les suivants :

- la proposition de modèles de prise en compte de la réaction du sol en fondation et des interactions entre le barrage et les berges. Le cas de la poussée de berges sur un ouvrage s'avère particulièrement complexe ;
- une méthodologie d'analyse de la stabilité externe et interne des barrages. Les modèles de réaction du sol proposés pour des formes de fondations simples symétriques permettent d'envisager le développement d'une méthodologie opérationnelle en terme d'ingénierie de justification de la stabilité externe de barrages comportant des fondations de forme complexe. Celle ci sera aisément transférable à d'autres types d'ouvrages de protection contre les risques naturels (barrage de correction torrentielle de type sédimentation sédimentation, génie paravalanche...). La méthodologie élaborée devrait permettre, par le biais d'analyse en retour, de progresser également dans la connaissance des actions exercées par les phénomènes naturels.

Leur mise en œuvre nécessitera le développement d'outils informatiques de résolution et de transfert vers l'ingénierie. Il peut concerner aussi bien les ouvrages neufs que les ouvrages anciens devant faire l'objet de réparations. L'ensemble des méthodes mises en œuvre dans le cadre de ce projet reste basé sur la prise en compte d'actions statiques sur les ouvrages. Dans de nombreux cas, les structures sont également soumises à des actions dynamiques nécessitant des approches spécifiques.