

# Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau

Stéphane Bonelli

L'eau s'écoule à travers un ouvrage hydraulique en remblai (barrage ou digue), sa fondation et ses appuis. Elle peut même s'écouler exceptionnellement par surverse au-dessus de l'ouvrage, lors d'une crue par exemple.

Les deux formes ultimes de rupture d'un ouvrage en remblai résultant de l'action de l'eau sont la brèche et le glissement. Une rupture résulte souvent d'un enchaînement de situations et d'une combinaison de phénomènes qui vont en s'accéléralant. La figure 1 (p. 50) montre quelques enchaînements possibles conduisant à la rupture. Elle situe également les trois types de modélisation existants. On constate que quelques phénomènes et enchaînements de phénomènes échappent à la modélisation.

L'action de l'eau est variée et multi-échelle dans le temps et dans l'espace. C'est probablement ce qui explique que les manuels de géotechnique ou les ouvrages spécialisés n'en abordent que quelques aspects seulement.

On se propose de porter un regard transversal sur l'action de l'eau, sous l'angle de la modélisation. Quelques repères permettront d'introduire brièvement l'état de l'art actuel, et le cheminement interdisciplinaire suivi pour y arriver. Quelques voies de recherche à explorer sont mentionnées. Ce regard montre que lorsque l'échelle de travail est celle de l'ouvrage, il apparaît pertinent de ne pas découpler recherche et expertise.

Ces deux approches sont intimement liées par la même information de terrain, aussi précieuse pour évaluer la sécurité de l'ouvrage, que pour développer et valider des modèles.

On peut dans un premier temps décliner le type d'action hydraulique suivant le type d'écoulement: lent ou rapide, interne ou en surface (tableau 1, figure 2, p. 51). C'est l'objet du premier paragraphe. Les autres paragraphes reprennent en détail les diverses formes de l'action de l'eau sur un ouvrage en remblai, en déclinant cette fois cette action suivant les modélisations existantes ou suivant les connaissances disponibles (figure 1).

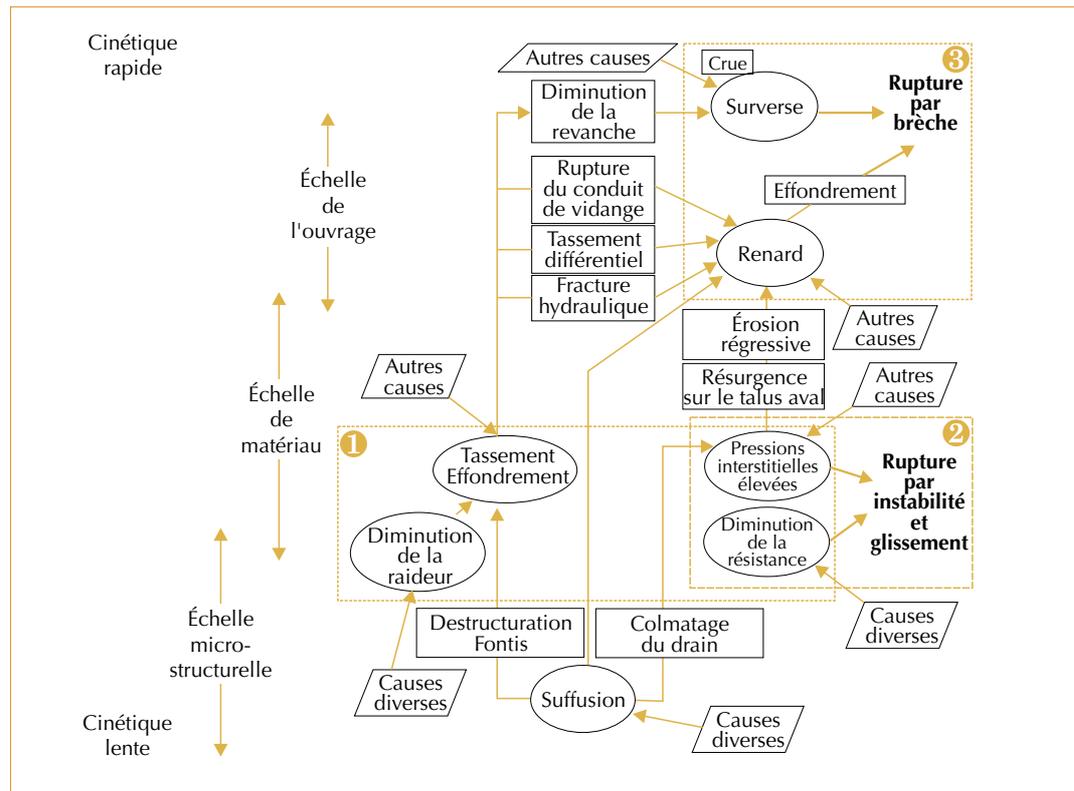
## Les divers types d'écoulement

### ÉCOULEMENTS LENTS INTERNES, SOL TRIPHASIQUE

Lorsque le sol est non saturé, c'est-à-dire lorsque l'espace interstitiel contient de l'eau et de l'air, les grandeurs qui pilotent l'influence de l'eau sont la succion (différence de pression entre l'eau et l'air) et le degré de saturation (volume d'eau/volume des pores). Les écoulements d'eau et d'air sont bien décrits par une loi de type Darcy. L'apport d'eau (saturation) augmente le poids volumique, donc les actions motrices dues à la gravité. Par ailleurs, cette saturation peut provoquer une diminution de la raideur, ainsi qu'une diminution de la résistance. Cette diminution résulte d'une combinaison de phénomènes mécaniques et physico-chimiques. Ceci est maintenant bien

### Contact

Stéphane Bonelli  
• CNRS, Laboratoire de Mécanique et d'acoustique,  
31, chemin Joseph Aiguier,  
13402 Marseille  
Cedex 20  
• Cemagref, Unité Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation,  
Le Tholonet, BP 31,  
13612 Aix-en-Provence Cedex 1



▲ Figure 1 – Quelques enchaînements de phénomènes résultant de l'action de l'eau et conduisant à la rupture. L'action de l'eau est multi-échelle dans le temps et dans l'espace. Le poids propre est une sollicitation omniprésente. Les flèches ne sont pas des implications mais des conséquences possibles. Les encadrés en pointillés situent les modélisations actuelles : 1) modélisation du couplage hydromécanique par éléments-finis ; 2) calcul de stabilité par équilibre limite, analyse limite ou calcul à la rupture ; 3) modélisation de la rupture progressive par hydraulique et transport solide.

connu pour les sol fins cohésifs (Alonso *et al.*, 1995). Ce phénomène est plus marginal mais bien réel pour la classe des sols granulaires non cohésifs à gros grains de type enrochement (Bonelli et Anthinac, 2000). Des tassements importants, voire des effondrements, ou des instabilités et des glissements peuvent alors survenir (figure 1). Ces phénomènes relèvent de la géomécanique, et plus particulièrement de la mécanique des sols non saturés, qui intègre depuis une quarantaine d'années des résultats issus d'autres disciplines comme la physique du sol, la pédologie ou l'irrigation (Alonso *et al.*, 1995).

#### ÉCOULEMENTS LENTS INTERNES, SOL DIPHASIQUE

Lorsque le sol est saturé par un fluide compressible (eau et bulles d'air) ou incompressible (eau), les écoulements lents suivent la loi de Darcy. La grandeur qui pilote dans ce cas l'influence de

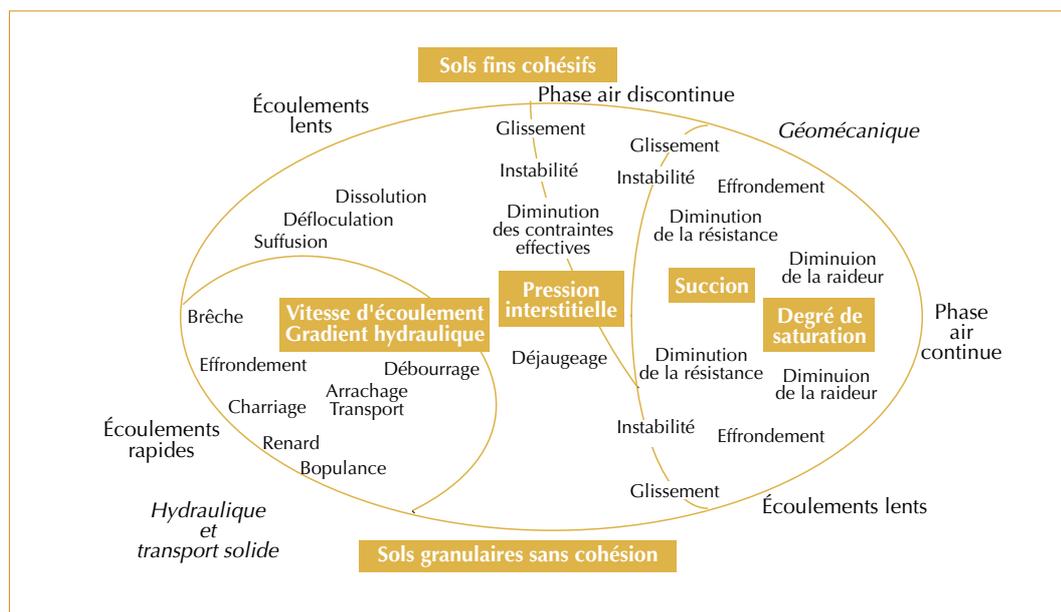
l'eau est la pression interstitielle, qui déjauge la matrice solide et diminue les contraintes effectives (confinement), donc les actions résistantes. Ceci peut conduire à des instabilités et à des glissements (figures 1 et 2). Ces phénomènes relèvent de la géomécanique, et de la mécanique des sols classique. Le déjaugage est connu depuis plus de deux millénaires (Archimède), mais n'est pris en compte que depuis les années vingt (Terzaghi) à travers le principe des contraintes effectives.

#### ÉCOULEMENTS INTERNES LOCALEMENT RAPIDES

La vitesse d'écoulement peut devenir localement importante (supérieure à la perméabilité), à la suite de phénomènes physico-chimiques (défloculation, dissolution), à cause d'une configuration locale particulière (trou, interface entre deux matériaux), ou simplement par vieillissement. Les grandeurs qui pilotent l'influence de

Type d'écoulement	Écoulement interne			Écoulement de surface rapide
	Écoulement lent		Écoulement localement rapide	
	Sol triphasique	Sol diphasique		
Grandeurs influentes	Succion	Pression interstitielle	Gradient hydraulique	Contrainte fluide
	Degré de saturation			
	Autre grandeur physico-chimique			

▲ Tableau 1 – Les grandeurs influentes de l'action de l'eau sur le sol suivant le type d'écoulement.



▲ Figure 2 – Quelques aspects de l'action de l'eau et ses conséquences locales à l'échelle du matériau ou globale à l'échelle de l'ouvrage. Positionnement selon que ces phénomènes intéressent plutôt la géomécanique ou l'hydraulique et le transport solide.

l'eau sont la vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique. Des particules solides peuvent se détacher et être transportées par l'écoulement : c'est l'érosion interne. Ce peut être juste la fraction fine qui est concernée (suffusion), ou l'ensemble de la matrice solide (renard). Ces phénomènes sont bien connus en géomécanique depuis au moins deux siècles.

### ÉCOULEMENTS DE SURFACE

L'écoulement peut se faire en surface. C'est par exemple le cas d'une surverse de l'ouvrage à la suite d'une crue, qui provoque un écoulement transitoire à surface libre sur la crête et le talus aval de l'ouvrage. Les grandeurs qui pilotent l'influence de l'eau sont la vitesse d'écoulement et

la contrainte de cisaillement fluide, qui détache et transporte des grains dans le cas d'un sol non cohésif, ou des mottes dans le cas d'un sol cohésif. Ce phénomène d'érosion hydraulique de surface (ou externe) peut conduire à une brèche. Il ne relève pas de la géomécanique, mais de l'hydraulique fluviale et torrentielle et du transport solide.

### Les outils pour l'appréciation des effets des écoulements lents internes

#### LES APPORTS DE L'HYDRAULIQUE :

##### LA LOI DE DARCY

Darcy montre en 1856 que la vitesse apparente d'écoulement de l'eau est proportionnelle au

gradient hydraulique. Le coefficient de proportionnalité est la perméabilité à l'eau, ou conductivité hydraulique. En 1886, Forchheimer démontre que l'écoulement de l'eau en régime permanent suivant la loi de Darcy dérive d'un potentiel (conservation de la masse d'eau). Cette description est issue de l'hydraulique. Elle n'est valable que pour un fluide incompressible et chimiquement inerte en écoulement laminaire à travers un sol indéformable.

#### **LES APPORTS DE LA PHYSIQUE DU SOL : LA PRISE EN COMPTE DE L'AIR CONTINUE**

Dans un sol pour lequel les déformations sont négligées, la prise en compte de l'air vient de recherches menées en irrigation et surtout en physique du sol : Richards (1931) étend la loi de Darcy aux sols non saturés en supposant que l'état hydrique du sol influence sa perméabilité. La description devient phénoménologique, et de nombreux modèles sont proposés depuis une soixantaine d'années (Alonso *et al.*, 1995), mais l'air et l'eau demeurent des phases continues.

#### **LES APPORTS DE LA GÉOMÉCANIQUE : LA PRISE EN COMPTE DES DÉFORMATIONS**

En géomécanique, les travaux fondateurs de Terzaghi (1923) et de Biot (1941) conduisent aux équations de conservation de masse solide et fluide régissant l'écoulement dans un sol saturé déformable. Après la première tentative de Barden (1965), c'est seulement dans les années quatre-vingt que sont proposées par de nombreux auteurs plusieurs formulations de l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé déformable (Alonso *et al.*, 1995). Tous les modèles supposent toujours l'air et l'eau en phases continues. L'influence de l'air à travers la succion sur la rigidité et la résistance du sol est prise en compte.

#### **L'IMPORTANCE DE LA SURVEILLANCE**

Les modèles actuels nécessitent notablement plus de données que ne peuvent en fournir des essais de laboratoire ou des essais *in situ*. Leur caractère prédictif n'est que qualitatif. Ils permettent par contre une reconstitution convenable des mesures d'auscultation sur une grande durée (plusieurs dizaines d'années). Cette utilisation est cohérente avec la « méthode des observations » introduite en géotechnique par Terzaghi et Peck. Cette méthode appliquée aux barrages consiste à mettre les observations visuelles et les mesures d'auscultation en relation avec un modèle intégrant un ou plusieurs mécanismes correspondant,

afin de faire un diagnostic. On conçoit l'extrême importance de la surveillance de l'ouvrage : inspections visuelles périodiques, auscultation organisée et analyse des mesures d'auscultation. Cette pratique met en évidence deux exemples de besoins de recherche, indiqués ci-après.

### **Deux exemples de voies de recherche à explorer**

#### **L'INFLUENCE DES BULLES D'AIR**

L'air piégé lors de la construction permet d'assimiler le mélange eau + air piégé à un fluide compressible (Schuurman, 1966), et le sol peut être considéré comme saturé. Cette approche permet de modéliser la construction d'un barrage (Sawada et Toriyama, 1967 ; Duncan et Chang, 1983), mais elle ne permet pas de modéliser son remplissage. Le fait que l'air puisse être en phase continue ou non (bulles) reste un verrou majeur et toujours actuel de la modélisation. La prise en compte de l'entraînement par écoulement des bulles d'air piégées à la construction permet d'expliquer que les pressions interstitielles dans le corps d'un barrage puissent être supérieures aux prévisions de projet, et en particulier supérieures aux valeurs de long terme (régime permanent). Cette approche en est encore à ses premiers pas (Billstein et Svenson, 2000).

#### **LE TASSEMENT DES ENROCHEMENTS**

De nombreux ouvrages sont constitués de sols contenant des éléments grossiers (enrochements). Lorsque ces matériaux viennent à se saturer, des tassements importants peuvent survenir et conduire à des désordres. C'est le cas d'un barrage zoné au moment du premier remplissage, ou d'un barrage en enrochements à masque imperméable amont, soumis accidentellement à une saturation, à la suite d'une fuite du masque ou d'une inondation par l'aval. Le comportement et la modélisation de tels sols ont fait l'objet de peu de recherches au regard de l'effort important consenti pour les sols fins. La prise en compte de la fragilisation des blocs et de la cassure des pointes lors de l'immersion a permis d'expliquer les observations sur ouvrage (Bonelli et Anthinac, 2000).

### **Le glissement par instabilité**

#### **Description**

Le glissement par instabilité désigne le détachement et le déplacement le long d'une pente d'un

massif de sol ou de matériaux rocheux sous action des forces de gravité. La connaissance des glissements par instabilité doit beaucoup à l'étude des risques naturels.

L'eau est un facteur-clé du glissement du talus d'un barrage ou d'une digue. Ce phénomène peut survenir lorsque la résistance est médiocre (cohésion, angle de frottement interne), ou diminuée par la saturation du matériau initialement mal compacté ou compacté à une teneur en eau trop faible. Il peut également intervenir lorsque la pression interstitielle est trop élevée, à la suite d'une construction trop rapide, d'une vidange trop rapide, ou d'une déficience du drainage.

La stabilité des talus des barrages en remblai est en général vérifiée en fin de construction, à niveau normal du réservoir (figure 3a) et après une vidange rapide (figure 3b). Les glissements par instabilité n'intéressent pas que les talus des barrages, mais aussi les fondations, ainsi que les versants de la retenue (exemple historique du barrage de Vaiont, Italie, 1963).

### Les modélisations actuelles

Les méthodes d'analyse de stabilité par équilibre limite sont très utilisées par la profession (CIGB, 1986). Elles nécessitent des hypothèses empiriques : approximation des contraintes, forme de la surface de rupture (cercle, spirale logarithmique, segments de droite). Chaque jeu d'hypothèse conduit à une méthode spécifique. Il en existe un nombre important (Fellenius 1926 ; Terzaghi, 1943 ; Bishop, 1954 ; Janbu, 1954 ; Morgenstern and Price, 1965 ; Spencer 1967...). La méthode de Bishop est de loin la plus utilisée.

La popularité de ces méthodes vient probablement du fait qu'elles sont fondées sur des concepts simples (glissement plan ou circulaire, critère de Mohr-Coulomb, 1773). Elles ont été dé-

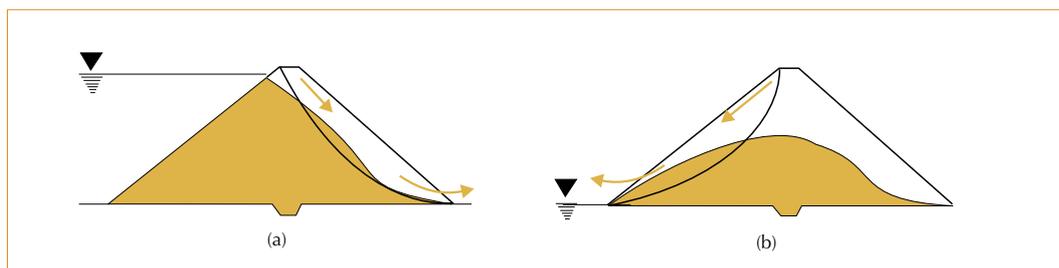
veloppées par des géomécanciens qui ont très tôt intégré les besoins de la profession : champ de pression interstitiel dans le barrage à partir de mesures d'auscultation ou de résultats numériques, géométries complexes, matériaux hétérogènes, chargements variés.

### L'importance du coefficient de sécurité

Les méthodes d'équilibre limite ne sont pas fondées sur une démarche scientifique rigoureuse. Leur signification mécanique est ténue. Elles font intervenir simultanément des considérations d'ordre statique (évaluation des contraintes) et cinématiques (géométrie a priori du glissement). Il est acquis depuis plus de vingt ans que ces méthodes ne sont pas conservatives et peuvent conduire à des estimations supérieures ou inférieures à la charge limite exacte suivant les cas (Kim *et al.*, 1999 ; Yu *et al.*, 1998). C'est en particulier vrai pour des ouvrages hétérogènes. Ceci vient du fait que le champ de contrainte utilisé peut ne pas être statiquement admissible (seul un équilibre global en force ou en moment est partiellement satisfait), et que le champ de vitesse utilisé peut ne pas être cinématiquement admissible (la loi d'écoulement plastique du sol ne fait pas partie du modèle, l'angle de dilatance ne fait pas partie des données). On conçoit alors l'importance du coefficient de sécurité, en général de l'ordre de 1,3. Cette pratique revient à se donner 30 % de marge d'erreur à répartir entre les données géotechniques, et le modèle lui-même.

### Le calcul des champs de contrainte et de vitesse, une voie de recherche à explorer

Les méthodes basées sur l'analyse limite et le calcul à la rupture sont issues de la mécanique des solides. Elles ont également été initiées dans les années cinquante avec des applications importantes en calcul des structures et en mécani-



▲ Figure 3 – L'instabilité par glissement concerne le parement aval lorsque le réservoir est plein (a), et le parement amont au moment d'une vidange rapide (b), lorsque les pressions dans le corps de l'ouvrage ne sont pas dissipées.

que des sols (Chen, 1990 ; Salençon, 1983). Elles sont fondées et rigoureuses. Elles conduisent à une estimation de la charge limite par borne inférieure et supérieure. L'utilisation de la méthode des éléments finis pour calculer les champs de contrainte et de vitesse (Kim *et al.*, 1999 ; Yu *et al.*, 1998) ouvre de larges perspectives, en rendant possible la prise en compte du comportement hydromécanique du sol, ainsi que des géométries et des chargements complexes. Cette possibilité n'est pas encore exploitée.

## L'érosion hydraulique interne

### Description

L'érosion interne résulte du détachement et du transport de matière sous l'effet d'un écoulement d'eau, dans le corps d'un barrage ou dans la fondation. Lorsque le transport est un charriage concentré dans un conduit, c'est un renard. Lorsque le transport est diffus à travers la matrice solide et ne concerne que les fines en suspension, c'est une suffusion. Ce phénomène local est difficile à reproduire en laboratoire, ou à observer *in situ* (CIGB, 1990 ; CFGB, 1997). Il n'est pas spécifique aux ouvrages, mais concerne également les risques naturels (Hagerty, 1991).

### La suffusion

La suffusion (ou suffosion, Pavlov, 1898) groupe tous les processus d'érosion souterraine qui se traduisent par un enlèvement de matière sans intervention de la dissolution. L'écoulement entraîne les particules les plus petites à travers la matrice solide formée par les particules les plus grosses. La teneur en fines évolue dans le temps. Les zones qui ont perdu leurs fractions fines ont une perméabilité plus élevée, donc des vitesses d'écoulement plus élevées, ce qui peut initier un renard. Elles ont également une densité plus faible, ce qui peut provoquer un effondrement. Les zones colmatées par l'arrivée de ces fines ont une perméabilité qui diminue, induisant des pressions interstitielles plus élevées, ce qui peut conduire à des glissements.

Un sol hétérogène, instable, dispersif ou à granulométrie étalée n'assurant pas l'autofiltration, est souvent à l'origine d'une suffusion. Elle peut être initiée dans le volume (suffusion interne) ou à l'interface de deux matériaux (suffusion externe). La

cinétique de la suffusion est lente. Elle est de l'ordre de la dizaine d'années (CFCB, 1997).

### Le renard

Un renard peut survenir dans le corps du barrage ou dans sa fondation. Dans un sol sans cohésion, le filet d'eau entraîne par sa vitesse de fines particules en commençant par le débouché aval, puis l'érosion remonte ensuite vers l'amont en s'accéléralant car l'eau a un chemin de plus en plus court à parcourir et sa vitesse augmente. Dans un sol cohésif dispersif, le renard est dû à un processus de défloculation dans lequel l'eau circule à travers un canal d'écoulement (tel qu'une fissure) et l'érosion de la paroi de ce canal se produit simultanément sur toute la longueur.

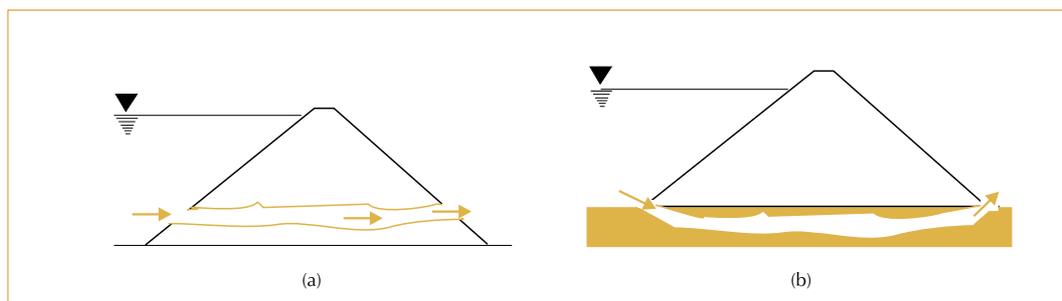
Cette érosion crée une galerie qui traverse le barrage ou sa fondation (figure 4). Le diamètre s'élargit. Si le phénomène continue, il peut se produire un effondrement qui conduit à une brèche (figure 5).

Un renard peut être initié par des facteurs divers : présence de trous (terriers de fousseur, souches), discontinuités matérielles à l'interface de structures rigides (conduits, galeries), insuffisance ou absence de filtre, zones de fissure ou de fracture hydraulique (à la suite d'un remplissage trop rapide par exemple), rupture de la conduite de vidange.

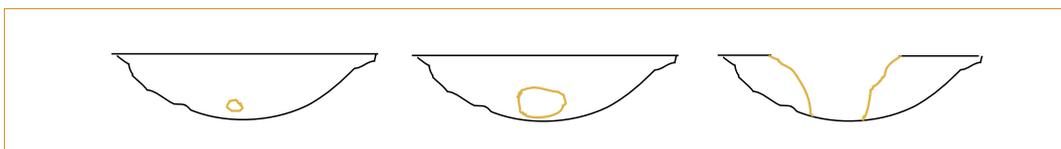
Le délai d'apparition des conséquences d'un renard est variable, de quelques heures à plusieurs mois après le remplissage (CFCB, 1997). Un renard peut être la conséquence d'une suffusion et apparaître plusieurs années après la mise en service (barrage de Saint-Aignan, France). La cinétique conduisant à la rupture est également variable, de quelques heures (barrages de Téton ou de Iowa Beef, États-Unis) à quelques jours (barrage de Fontenelle, États-Unis).

### Les modélisations actuelles et importance de la surveillance de l'érosion interne

Les critères de projet s'appuient le plus souvent sur des méthodes statistiques anciennes (Blight, 1910 ; Lane, 1935). Il n'existe actuellement aucun modèle numérique opérationnel de l'érosion interne, même pour reproduire des événements passés. Il n'existe pas non plus d'expérience de laboratoire basée sur un modèle mécanique.



▲ Figure 4 – Un renard peut survenir dans le corps de l'ouvrage (a) ou dans la fondation (b).



▲ Figure 5 – Évolution type d'un renard dans le corps de l'ouvrage. Vue en coupe rive/rive. Le diamètre du conduit s'agrandit par érosion latérale, puis provoque une brèche par effondrement.

La cinétique d'érosion par renard est actuellement modélisée de manière simple, avec une approche similaire (et les mêmes logiciels) que celle utilisée pour la cinétique d'évolution d'une brèche sous surverse (Singh, 1996 ; CIGB, 1998). Le renard est schématisé par un conduit circulaire dans lequel l'hydraulique peut être considérée en charge ou à surface libre suivant les modèles. Ce conduit s'agrandit progressivement jusqu'à ce que son diamètre atteigne un rayon critique évalué empiriquement. Il y a alors effondrement et brèche.

Il n'existe actuellement aucune modélisation mécanique du phénomène de suffusion.

L'érosion interne est probablement l'action de l'eau qui échappe le plus à l'approche traditionnelle basée sur un modèle mécanique et des expérimentations de calibration de ce modèle. La pratique est plutôt de se prémunir au mieux par des dispositions constructives (c'est notamment le rôle des filtres) et de s'appuyer sur la surveillance visuelle et quantitative (auscultation).

## L'érosion hydraulique externe

### Description

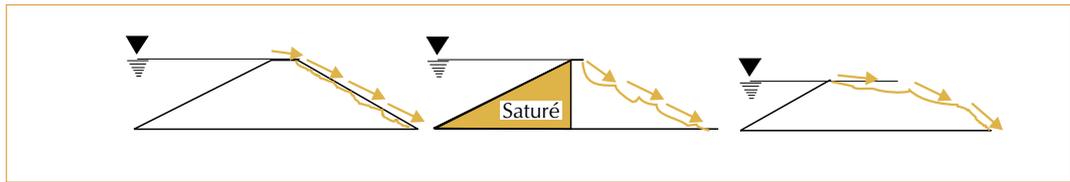
De nombreux facteurs peuvent être à l'origine de la surverse d'un barrage en terre (exemple déjà historique du barrage de Belci, Roumanie, 1991). L'érosion externe concerne les ouvrages, mais aussi les appuis et les rives (inondations de 1996

dans la région de Saguenay, Canada). L'érosion externe concerne également les phénomènes et risques naturels.

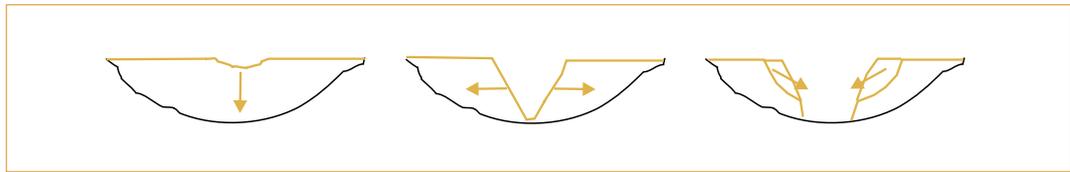
L'analyse statistique des ruptures passées montre que : 1) la largeur de la brèche est de l'ordre de deux à cinq fois la hauteur du barrage ; 2) la moitié des brèches est initiée par moins de cinquante centimètres de hauteur d'eau ; 3) la durée de formation de la brèche est de quelques minutes à quelques heures. Deux phénomènes en sont à l'origine : 1) le détachement et le transport solide par charriage sur le parement aval puis sur le fond et les côtés de la brèche ; 2) le glissement par instabilité des parois latérales ainsi formées (figures 6 et 7, p. 56).

### Les modélisations actuelles d'érosion hydraulique externe

La compréhension et la modélisation de la formation d'une brèche sous l'effet d'une surverse mobilisent des compétences pluridisciplinaires : mécanique des fluides, hydraulique, hydrodynamique, hydrologie, transport solide, géotechnique, géomécanique. Les premiers modèles utilisés dans les années soixante pour les barrages étaient basés sur des approches simples et empiriques. Les modèles actuels de simulation numérique de l'érosion hydraulique, des plus simples aux plus sophistiqués, sont basés sur le couplage d'un modèle hydraulique et d'un modèle de transport solide (Singh, 1988 ; CIGB, 1998).



▲ Figure 6 – Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe amont/aval. Lorsque le volume de la recharge aval devient insuffisant pour assurer la stabilité, la poussée hydrostatique provoque une rupture brutale de la partie haute de l'ouvrage.



▲ Figure 7 – Évolution type d'une brèche par surverse. Vue en coupe rive/rive. La brèche s'approfondit puis s'élargit par érosion latérale ou par glissement des talus.

#### LE MODÈLE HYDRAULIQUE

Le modèle hydraulique est, suivant la finesse de la modélisation, le modèle de Bernouilli avec quelques hypothèses hydrauliques, le modèle de Saint-Venant unidimensionnel ou bidimensionnel. Les équations de Navier-Stokes avec turbulence, utilisées pour l'étude des rivières, ne semblent pas encore avoir été utilisées pour la rupture progressive des barrages en remblai. Le coefficient de perte de charge (Strickler) dépend des profils hydrauliques, du changement de géométrie et du type de sol. Le modèle hydraulique donne accès à la contrainte de cisaillement qui provoque le détachement des particules solides.

#### LE MODÈLE DE TRANSPORT SOLIDE

Ce modèle décrit le charriage des particules solides (modèle de Meyer-Peter/Müller (1948) ou modèle d'Einstein-Brown (1950)). L'actualisation de la géométrie de la brèche utilise la loi de conservation de la masse solide et des hypothèses plus ou moins rustiques, puisque le phénomène est toujours tridimensionnel. Cette actualisation peut également intégrer un calcul de stabilité au glissement pour les parois latérales de la brèche.

Tous ces modèles permettent une bonne reconstitution des ruptures observées (CIGB, 1998). Les débits de pointe estimés par les modèles numériques sont du même ordre de grandeur (à 50 % près tout de même) que les formules basées sur une analyse statistique des ruptures de barrage passées.

#### L'importance du recueil de données

Nous ne connaissons pas de méthodologie d'expérimentation, au laboratoire ou *in situ*, d'érodibilité destinée à la calibration de la modélisation. Ces modèles ne permettent donc pas un dimensionnement. Ils n'ont a priori aucun potentiel prédictif. Ils sont plutôt destinés à reproduire des événements passés, afin d'éviter qu'ils ne se reproduisent, et de permettre par simulation d'évaluer l'impact de plusieurs scénarios pour l'ouvrage lui-même, et pour la zone aval (impact d'un évacuateur, d'une végétalisation du talus aval...). Les paramètres doivent être estimés par recalage par rapport aux observations *in situ*, extrêmement précieuses. Nous ne connaissons toutefois pas de méthodologie de relevés d'informations sur site destinés à la validation de cette modélisation.

#### De nombreuses possibilités d'avancées

Les voies de recherche sont nombreuses et couvrent le modèle mécanique et sa mise en œuvre numérique (CIGB, 1998). On cite quelques exemples relatifs à l'érosion par transport solide, à l'interface de plusieurs disciplines.

Tous les modèles de transport solide par charriage sont des modèles empiriques. Ils sont établis dans le prolongement des formules de transport solide en rivière, issues de considérations de mécanique des fluides sur des géométries simples et

unidimensionnelles, avec des profils de vitesse connus, et pour des matériaux non cohésifs.

Lorsque la hauteur de l'ouvrage est faible et que le volume stocké est important, le phénomène essentiel est l'érosion latérale de la brèche : ce point peut mettre en défaut une modélisation trop simpliste.

Lorsque la modélisation est élaborée, l'expression tensorielle du modèle de transport solide est délicate. La détermination de la contrainte effective agissant sur les grains en fonction de la contrainte de cisaillement fluide est problématique en présence de turbulence.

Les modèles de transport solide par charriage sont bien adaptés aux sols granulaires non cohésifs, pour lesquels le seuil de contrainte intègre l'action de la pesanteur et une taille granulométrique caractéristique. Pour les sols fins cohésifs, l'action hydraulique ne détache pas des grains mais des mottes : ceci n'est pas encore modélisé. On n'a pas encore réussi à résoudre le problème méthodologique d'estimation de la résistance des sols à l'érosion, et l'on n'a pas encore trouvé de relation stricte entre l'érodibilité et les différents types pédologiques existants.

## Conclusion

Un regard transversal de l'influence de l'eau sur les ouvrages en remblai a été mené, sous l'angle des modélisations actuelles et de quelques pistes de recherche à explorer. Ce regard met en évidence trois résultats.

- Les avancées se situent aux interfaces de plusieurs disciplines et intéressent des domaines d'application différents. Des phénomènes simi-

laire se rencontrent notamment sur terrains naturels, en montagne. La représentation de la figure 2 est d'ailleurs fortement inspirée de celle de Meunier (*in* Ildefonse *et al.*, 1997) concernant les phénomènes et disciplines en hydraulique et mouvements de terrain. Ce potentiel pluridisciplinaire a été pleinement exploité pour décrire les écoulements lents, et à un degré moindre, pour décrire l'érosion externe. Il semble que tout reste à faire pour aborder l'érosion interne. Le glissement par instabilité est un cas à part pour lequel se profile une piste.

- Les modélisations actuelles ne sont que ponctuelles et explicatives. Leur caractère prédictif est ténu, voire inexistant. L'utilisation des modélisations numériques se situe pour le moment dans la reconstitution et l'explication de faits passés. Les observations sur site sont primordiales pour la validation des modèles, surtout pour reproduire des accidents rares. La surveillance et l'auscultation des ouvrages est un point d'appui, bien réglementé pour les barrages. Il apparaît par contre nécessaire d'imaginer une méthodologie, accompagnée de moyens (équipe spécialisée) pour relever les informations *in situ* destinées à la compréhension des phénomènes et à la validation des modélisations. Ces relevés doivent se faire après l'accident, mais également pendant celui-ci (intervention rapide), et être détachés du contexte de crise.

- Une partie des phénomènes et plusieurs enchaînements de phénomènes échappent à la modélisation. Outre l'importance de mener des travaux de recherche, ceci met en avant non seulement l'importance de la surveillance, mais également l'importance de la capacité à faire un diagnostic basé sur l'expérience (expertise), afin d'intégrer la complexité des phénomènes. □

## Résumé

L'eau s'écoule à travers un barrage en remblai, sa fondation et ses appuis. Elle peut même s'écouler exceptionnellement au-dessus de l'ouvrage. L'action de l'eau est variée et multi-échelle dans le temps et dans l'espace. Cette variété se reflète dans la variété des disciplines ayant contribué, directement ou non, à la compréhension des phénomènes et à la modélisation de quelques-uns de ces phénomènes. Outre le fait bien admis que les avancées se situent à l'interface de plusieurs disciplines et de plusieurs domaines d'application, une vision globale de l'influence de l'eau met en évidence deux résultats. D'une part, les modélisations actuelles, qu'elles soient simples ou sophistiquées, ne sont que ponctuelles et explicatives. Leur caractère prédictif est ténu, voire inexistant. L'utilisation des modèles numériques se situe pour le moment dans la reconstitution et l'explication de faits passés. Les observations sur site sont primordiales pour la validation des modèles, surtout en cas d'accident ou de crue. D'autre part, une partie des phénomènes et plusieurs enchaînements de phénomènes échappent à la modélisation. Ceci met en avant : 1) l'importance de la surveillance ; 2) l'importance de la capacité à faire un diagnostic basé sur l'expérience (expertise).

### Abstract

The water flows through an earthdam, its foundation and its supports. The work can even be exceptionally flowed above. The action of the water is varied and multi-scale in time and in space. This variety reflects in the variety of disciplines having contributed directly or not, to the comprehension of phenomenon and to the modelling of some of these phenomenon. Besides the well admitted fact that the advanced situate to interface of several disciplines, a global vision of influence of water puts in obviousness two results. First, the current models, simple or sophisticated, are only punctual and explanatory. Their predictive character is tenuous, perhaps non-existent. The real numerical model utilization is the reconstitution and the explanation of facts passed. Observation on site, mostly in case of accident or flood are essential for the validation of models. Secondly, a part of phenomenon and several successions of phenomenon escape modelling. This puts in before 1) importance of surveillance; 2) importance of the capacity to make a diagnosis based on experience (expertise).

### Bibliographie

- ALONSO, E.E., DELAGE, P., 1995. Unsaturated soils. *First international conference on unsaturated soils*, vol. 1, 2 et 3, A.A. Balkema, Presses de l'ENPC.
- BILLSTEIN, M., SVENSON, U., 2000. Air bubbles, a potential explanation of the unusual pressure behaviour of the core at Wac Bennet dam. *Vingtième congrès des grands barrages*, Beijing, Q.78-R.26, p. 369-384.
- BONELLI, S., ANTHINIAC, P., 2000. Modélisation hydroplastique du premier remplissage d'un barrage en enrochements. *53<sup>e</sup> Conférence Canadienne de Géotechnique*, Montréal, p. 255-262.
- CFGB, 1997. Érosion interne : typologie, détection et réparation. *Bulletin du Comité français des grands barrages, Barrages & Réservoirs*, n° 6, 126 p.
- CIGB, 1986. Calcul statique des barrages en remblai. *Bulletin de la Commission internationale des grands barrages*, n° 53, 147 p.
- CIGB, 1990. Sols dispersifs dans les barrages en remblai. *Bulletin de la Commission internationale des grands barrages*, n° 77, 53 p.
- CIGB, 1998. Étude d'onde de rupture de barrage, Synthèse et recommandations. *Bulletin de la Commission internationale des grands barrages*, n° 111, 301 p.
- CHEN, W.F., LIU, X.L., 1990, *Limit analysis in soil mechanics*, Elsevier Science Publishers, BV, Amsterdam, 477 p.
- HAGERTY, D.J., 1991. Piping/sapping erosion, basic consideration and identification-diagnosis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, (8), p. 991-1025.
- ILDEFONSE, B., ALLAIN, C., COUSSOT, P., 1997. *Des grands écoulements à la dynamique du tas de sable*, Cemagref Éditions, 253 p.
- KIM, J., SALGADO, R., YU, H.S., 1999. Limit analysis of soils slopes subjected to pore-water pressure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125, (1), p. 49-58.
- SALENÇON, J., 1983, *Calcul à la rupture et analyse limite*, Presses de l'ENPC, Paris, 366 p.
- SINGH, V.P., 1996. Dam breach modelling technology. *Water Science and Technology Library*, Kleiwer Academic Publishers, 241 p.
- YU, H.S., SALGADO, R., SLOAN, S.W., KIM, J.M., 1998. Limit analysis versus limit equilibrium for slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, (1), p. 1-11.