

# Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales : une courte revue bibliographique

Jean-Pierre Blais

Les articles concernant les incidents et ruptures de digues fluviales par érosion interne sont rares en comparaison du nombre d'articles concernant les incidents et ruptures de barrages par érosion interne. En effet, hormis les travaux publiés par le CFGB (Royet et Lino, 1998), l'analyse de la bibliographie a permis d'identifier seulement deux articles bien documentés et relatant des ruptures de digues fluviales par érosion interne. Ces deux articles concernent les ruptures des digues du Danube lors de la crue de 1965 et les ruptures des digues du Mississippi lors des crues de la période 1937-1952. Ces deux cas ont de nombreux points communs qu'il est intéressant de mettre en avant.

Il est aussi intéressant de constater que les causes d'érosion mises en avant dans les travaux précédents publiés par le CFGB sont les tassements différentiels, les terriers de rongeurs, les conduites dans les corps de digue, les racines d'arbres, alors que pour ces deux articles les ruptures sont intervenues par boullance dans des sols de fondation qui ne sont pas différents des sols de fondation de nombreuses digues françaises.

## Rappel : typologie de l'érosion interne

L'érosion interne ne se développe que si deux conditions nécessaires sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport.

Selon la typologie IREX, huit phénomènes peuvent être initiateurs de l'érosion interne qui peut se développer selon deux types de transport différents.

## Les phénomènes d'arrachement (figure 1)

### LA BOULANCE

En anglais : « *piping by heave, fluidization, blow out, bulk erosion* ». La boullance ou l'annulation de la contrainte par gradient hydraulique, est 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

En anglais : « *suffosion, segregation piping* ». 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.

– *La suffusion interne*, ou suffusion volumique, se développe au sein d'une masse de sol, dont la granulométrie n'assure pas l'autofiltration. Cette situation se rencontre notamment au sein d'arènes granitiques ou dans les remblais morainiques.

– *La suffusion surfacique*, ou suffusion de contact, se développe à l'interface d'un matériau grossier et d'un matériau fin, sous l'action d'un écoulement parallèle ou perpendiculaire à l'interface. Cette situation est très fréquente dans les fondations alluviales, soit à l'interface de la digue et de la fondation, soit au contact entre un limon et un gravier superposés dans le sous-sol.

– La *suffusion externe* se développe à l'interface d'un matériau et de la rivière ou de l'air libre, sous l'action d'un écoulement parallèle, perpendiculaire ou incliné par rapport à l'interface.

#### L'ÉROSION RÉGRESSIVE

En anglais : « *regressive erosion, backward erosion* ». L'érosion régressive concerne tout phénomène d'érosion qui se produit en un point aval et se poursuit en progressant vers l'amont. Il convient de distinguer deux types d'érosion régressive :

– le *déchaussement*. En anglais : « *ravelling, sloughing, sapping, flow-through erosion* ». Ce type d'érosion concerne les remblais. En pied de pente, les forces liées à l'écoulement résurgent provoquent la déstabilisation de matériaux qui forment le squelette du sol. Ces matériaux sont progressivement évacués par l'écoulement, ce qui déstabilise le remblai, dont le glissement fournit de nouveaux matériaux qui sont à leur tour entraînés. Le processus perdure par augmentation des gradients hydrauliques (diminution du chemin hydraulique) et/ou affaiblissement du remblai (augmentation de sa pente aval) ;

– l'*érosion régressive par conduits*. En anglais : « *pipng, wormholes* ». Un ou plusieurs conduits se développent depuis l'aval et progressent par érosion des matériaux qui forment l'extrémité amont du chenal.

#### LE DÉBOURRAGE

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. C'est le cas lorsqu'une fissure rocheuse ou un conduit karstique est rempli de matériaux argileux et qu'une infiltration d'eau exerce une pression qui provoque un déplacement d'ensemble du matériau vers l'aval, jusqu'à une cavité ou un élargissement. L'eau s'écoule alors librement, et peut provoquer un élargissement de la fissure.

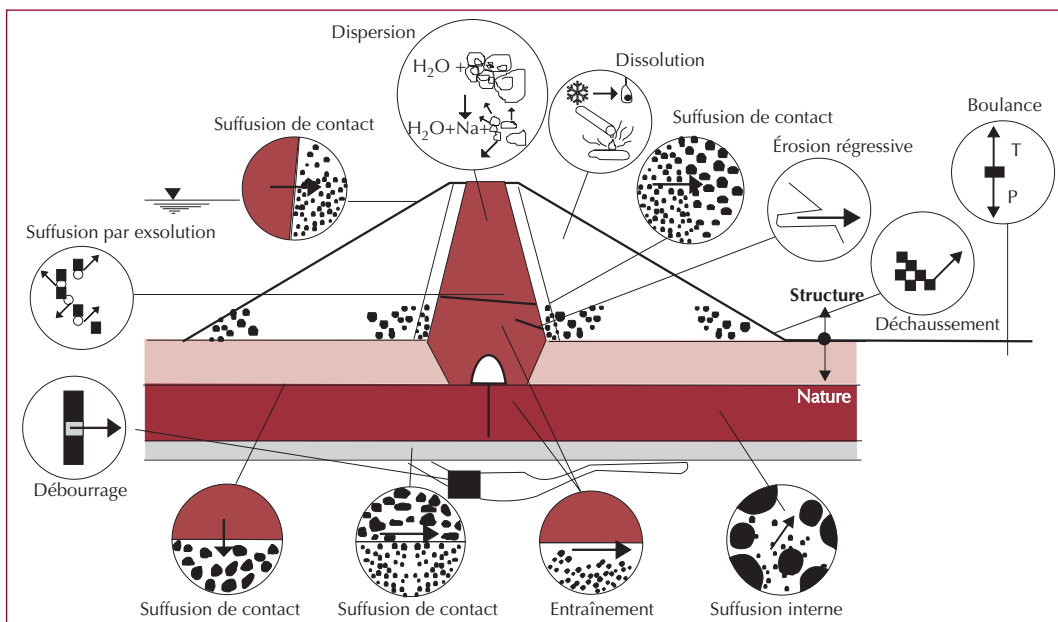
#### LA DISSOLUTION

En anglais : « *glacial lake outburst floods (GLOFs)...* ». La dissolution est la disparition d'une partie des constituants des particules, sous une action chimique ou thermique. D'une nature différente du processus physique d'arrachement, elle peut être une des causes de déclenchement d'érosion interne. Par exemple, les barrages en altitude, dont la terre à noyau est à température proche de 0, risquent d'emprisonner des morceaux de glace lors de la mise en place, dont la fonte laisse des vides dangereux et une densité faible.

#### LA DISPERSION

En anglais : « *dispersive soils* ». La dispersion (défloculation) est un phénomène physicochimique qui tend à diminuer la taille des agglomérats de particules argileuses, disperser les plaquettes d'ar-

► Figure 1 – Schéma représentatif des divers phénomènes initiateurs de l'érosion interne dans un barrage (adapté de Schuler et Brauns, 1996).



gile et faciliter leur mobilité. Les argiles dispersives sont les plus dangereuses car les plus sensibles au contenu ionique de l'eau de la retenue.

#### L'ENTRAÎNEMENT

En anglais : « *entrainment, bed-load transport, progressive erosion, seepage erosion, piping* ». 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'entraînement est un phénomène qui commande la vitesse de développement des renards (le débit solide évacué étant fonction du rapport entre la contrainte de cisaillement réelle et la contrainte de cisaillement critique). Le considérer comme un critère d'initiation de l'érosion interne revient à admettre l'existence avant érosion d'un chemin de fuite préférentiel dans le sol.

#### L'EXSOLUTION

En anglais : « *suffosion by exsolution* ». St-Arnaud (1995) propose une explication originale pour expliquer de fortes piézométries dans la partie aval de noyaux de barrages canadiens : (i) de l'air est piégé dans le noyau lors de la mise en eau, (ii) cet air est comprimé et partiellement dissous dans l'eau en partie amont du noyau, (iii) 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 de fait une augmentation nette des pressions interstitielles.

L'hypothèse émise permet d'expliquer les valeurs mesurées sur les barrages en question.

Dans le cadre d'un programme de recherche de l'Association canadienne des barrages sur « les instabilités internes et le phénomène de renard dans les barrages en cours de vieillissement » une expérience de Garner et Sobkowicz (2002) semble montrer que l'exsolution peut provoquer la suffusion. Les contraintes capillaires des bulles d'air en formation et en mouvement pouvant désorganiser les voûtes qui colmatent l'interface avec le filtre.

Les diverses conditions de déclenchement de l'érosion interne peuvent se combiner entre elles dans un incident et être difficilement distinguées. Mais elles ne sont pas suffisantes pour entraîner la rupture, il faut aussi que les conditions du transport des particules soient assurées, pour que l'érosion soit entretenue.

## Les phénomènes de transport

La nature du transport conduit à distinguer deux types fondamentaux de transports pour l'érosion interne : le transport dans un conduit (renard) et le transport dans l'espace poreux interparticulaire la suffusion. Ils diffèrent par leurs conditions aux limites géométriques et hydrauliques.

Le transport des particules est soit **concentré dans un conduit**, soit **diffus dans l'espace poreux interparticulaire**.

Le risque de rupture est en conséquence différent. Le premier mode de transport est le plus dangereux et le plus rapide. S'il n'est pas immédiatement stoppé, il conduit très rapidement à la rupture. Dans le second, la perméabilité du milieu est lentement modifiée et après une phase de développement ininterrompue, il peut y avoir rupture.

## Les digues du Danube

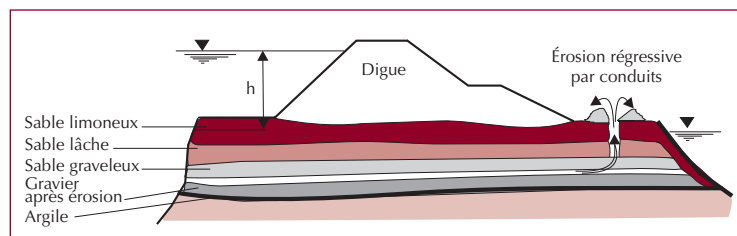
Les digues de Klucovec et de Zitavska sur le Danube slovaque ont rompu lors de la crue de 1965 (selon Peter, 1974). Lors de cette crue, 2 300 amorces d'érosion interne ont été identifiées sur environ 150 km de cours d'eau. Ces deux digues étaient :

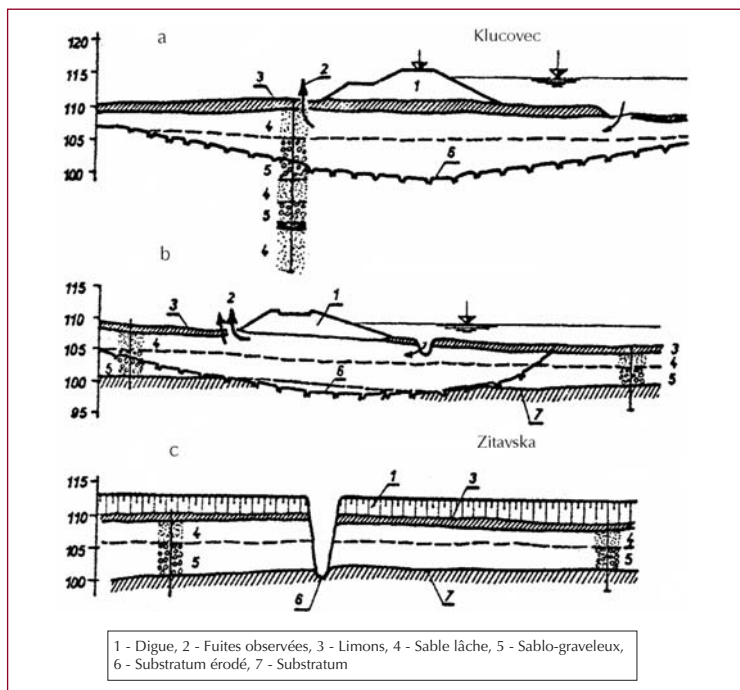
- homogènes ;
- hautes de 5 m environ et larges de 30 m à la base ;
- fondées sur une couche limoneuse reposant sur une alternance de couches sablo-graveleuses et sablo-limoneuses avec un substratum rocheux proche (à 10 m de profondeur).

Ces deux digues ont subi une charge hydraulique de 5 m environ et la crue a duré 3 mois. Il convient de retenir de ces cas de rupture que :

- la rupture de ces digues s'est probablement produite par boulangerie de la couche limoneuse et renard dans la couche sablo-graveleuse (figure 2) ;

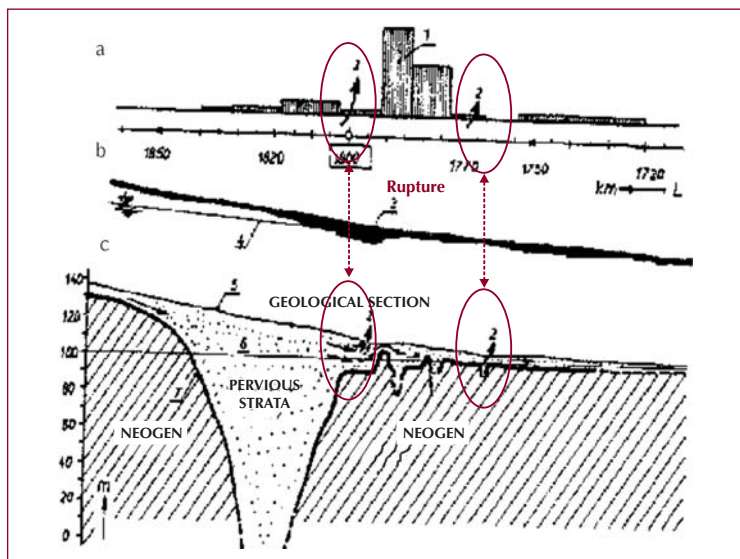
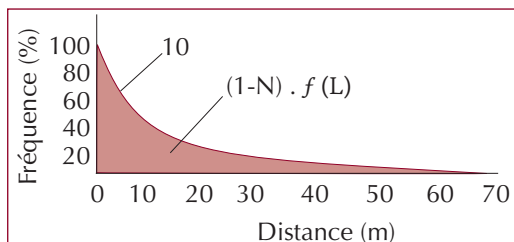
▼ Figure 2 – Mécanisme d'érosion des digues du Danube d'après Peter (1974).





► Figure 3 – Digues de Klucovec (a : vue en coupe) et Zitavska (b : vue en coupe, c : vue de face) selon Peter, 1974.

► Figure 4 – Fréquence d'apparition des tumulus érosifs en fonction de leur distance au pied de digue (selon Peter, 1974).



– la totalité de la digue et de sa fondation jusqu'au substratum rocheux a été emportée (figure 3) ;

– la grande majorité des débouchés des conduits érosifs observés lors de la crue était située à proximité immédiate du pied de digue (figure 4) ;

– les zones situées à l'amont de remontées du substratum ont été particulièrement sujettes à l'érosion (figure 5) ;

– selon Peter, dans les zones où la couche argileuse est « faible », les érosions ont été nombreuses mais n'ont pas conduit à la rupture. Il n'y a eu ruptures que dans les zones où elle est « forte ».

Hulla (2000) constate que les mesures de protection mises en œuvre suite aux recommandations de Peter (recompactage des digues et des abords, surcharge du TN à l'aval) et aux écrans d'étanchéités construits dans les années 1990 ont permis d'évacuer sans dommages les crues de 1997 ( $Q_{max} = 7\,500\text{ m}^3/\text{s}$  contre  $9\,200\text{ m}^3/\text{s}$  en 1965).

### Les digues du Mississippi

La deuxième publication sur l'érosion interne dans les digues qui présente un intérêt est celle de Turnbull et Mansour (1961) qui ont étudié les érosions internes survenues sur les digues du Mississippi lors des crues de 1937 à 1952.

Par l'analyse statistique des nombreuses érosions constatées sur plusieurs centaines de kilomètres de digue, ils en déduisent (comme Peter) que les risques érosifs sont localisés aux points hauts du substratum rocheux et plus précisément (figure 6) :

– dans les zones sableuses à proximité des anciens lits remblayés par des argiles plastiques imperméables (ces derniers concentrant les percolations en les canalisant) ;

– dans les zones où la couche d'argile est d'épaisseur inférieure à 1,50 m ;

– dans les zones dans lesquelles l'activité humaine a modifié la couche superficielle du terrain à l'intérieur ou extérieur de la digue (usage agricole, zones d'emprunt...).

► Figure 5 – Fréquence des érosions (a), épaisseur d'argile (b), coupe géologique (c).

## Conclusion

L'analyse historique de cas d'érosions internes de digues fluviales semblerait indiquer que pour des sols alluvionnaires relativement classiques (couche argileuse couvrant une alternance de couches sablo-graveleuses et sablo-limoneuses), les zones les plus sensibles aux érosions internes en fondation sont :

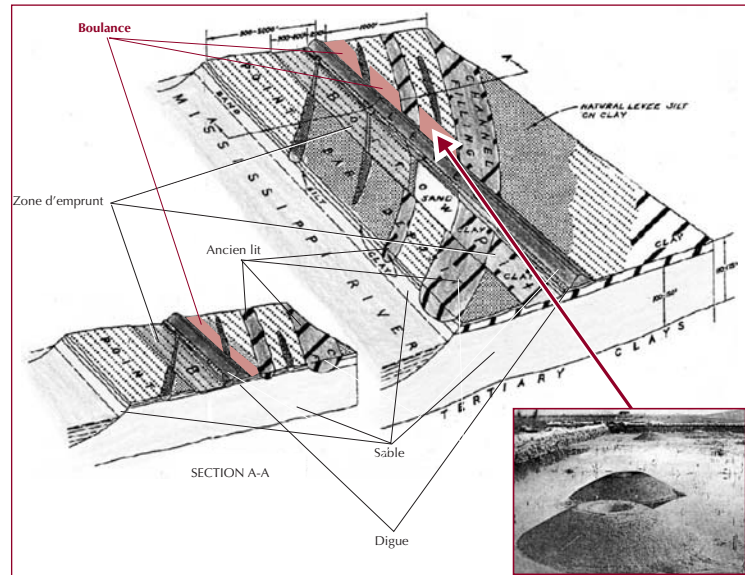
- les zones qui correspondent à des remontées du substratum rocheux,
- les zones proches d'anciens méandres de la rivière,
- les zones dans lesquelles l'activité humaine a modifié la couche superficielle (usage agricole, zones d'emprunt...).

Il semblerait aussi que dans les zones où la couche argileuse est « faible », les érosions soient nombreuses mais bénignes, alors que dans les zones où elle est « forte », elles puissent conduire à la rupture.

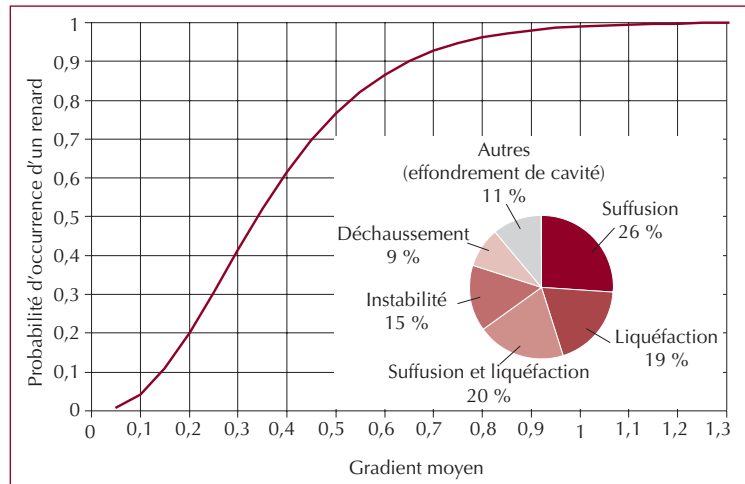
Il convient toutefois de relativiser les conclusions précédentes, car malgré une recherche bibliographique importante, cette analyse n'a pu se fonder que sur deux articles bien documentés.

Par ailleurs, l'étalement des gradients critiques de rupture et la diversité des types de ruptures de digue constatés par Peter (1975) (figure 7), l'imbricatio lexicale de la littérature dédiée au sujet (et plus particulièrement pour ce qui concerne celle d'origine anglo-saxonne) montrent clairement qu'une voie de progrès dans la maîtrise des phénomènes d'érosion interne passe par la mise au point d'une typologie des phénomènes d'arrachement et de transport des particules érodées.

Le travail typologique a été initié par le CFGB en 1996. Une mise à jour de cette typologie a été proposée dans une revue bibliographique (IREX, 2003) préalable à un projet national de recherche sur l'érosion interne. Outre des rappels en hydraulique souterraine, cette revue fournit pour chaque phénomène initiateur ou de transport, les principales lois de la littérature, des analyses propres à certains ouvrages ou domaine d'étude de même que des éléments pour établir l'état de l'art en terme de détection et de mesures de protection de l'érosion interne. En conclusion sont soulignées les lacunes observées, cibles futures des développements à mettre en œuvre. □



▲ Figure 6 : Positionnement des tumulus érosifs le long des digues du Mississippi lors des crues de 1937 à 1952 (selon Turnbull et Mansour, 1962).



▲ Figure 7 — Probabilité d'occurrence d'une érosion interne en fonction du gradient moyen dans une digue selon Peter, 1975 (2 300 cas réels sur une digue et plus de 200 expériences de laboratoire).

### Résumé

L'article est une analyse de cas d'érosion interne de digues fluviales (dignes du Mississippi et digues du Danube). Ces deux cas, bien documentés, permettent de mettre en avant le rôle de la profondeur du substratum et des anciens lits dans le développement des érosions internes en fondation.

### Abstract

The article is an analysis of internal erosion cases on dikes (Mississippi dikes and Danube dikes). These two well documented cases point out the influences of the substratum depth and old river beds in the development of internal erosion processes.

### Bibliographie

- GARNER, S., SOBCOWICZ, J., 2002, Internal instability in gap-graded cores and filters, *Congrès annuel 2002 de l'ACB, Victoria, BC, Canada*, Association canadienne des barrages.
- HULLA, J., 2000, Erosive filtration in the flood embankments subsoil, *Filters and drainage in geotechnical and environmental engineering*, Wolski and Mlynarek ed., Balkema, Rotterdam, p. 305-312.
- IREX, 2003, *Revue bibliographique sur l'érosion interne*, Institut de recherche et d'expérimentation en génie civil, Paris.
- ROYET, P., LINO, M., 1998, Proposition de méthodologie de reconnaissances et de diagnostic des digues anti-crues, *Colloque technique CFGB 1998 Paris*, p. 133-180.
- PETER, P., 1974, Piping problems in the Danube Valley, *4th European conference on soil mechanics and foundation engineering*, p. 35-40.
- TURNBULL, W., MANSOUR, C., 1961, Investigation of seepage, Mississippi river levees, *Transactions ASCE*, vol. 122, p. 1429-1568.
- SCHULER, U., BRAUNS, J., 1997, The safety of geotechnical filters, *Hydropower & Dams*, Issue Six.
- ST-ARNAUD, G., 1995, The high pore pressures within embankment dams : an unsaturated soil approach, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, p. 892-898.