

Les besoins en eau d'irrigation en France comme chez d'autres pays européens (principalement situés sous la latitude 50°) augmentent avec la population, l'urbanisation et les prévisions de modifications climatiques. Constituer des réserves d'eau à l'aide de barrage est donc important. Il en est de même pour la production d'électricité dont les besoins augmentent ainsi que la volonté de production d'énergie dite propre, durable ou renouvelable. Les évolutions climatiques font aussi anticiper les risques en ce qui concerne la protection des personnes et des biens, il est donc nécessaire de maîtriser les digues et les levées dans ce but. Les ouvrages hydrauliques sont essentiels et déjà nombreux, beaucoup sont érigés en terre et remblai. Ceux-ci constituent environ 90 % des barrages sur le territoire français [1], ils sont de capacité, de volumes très variables (figure 1).

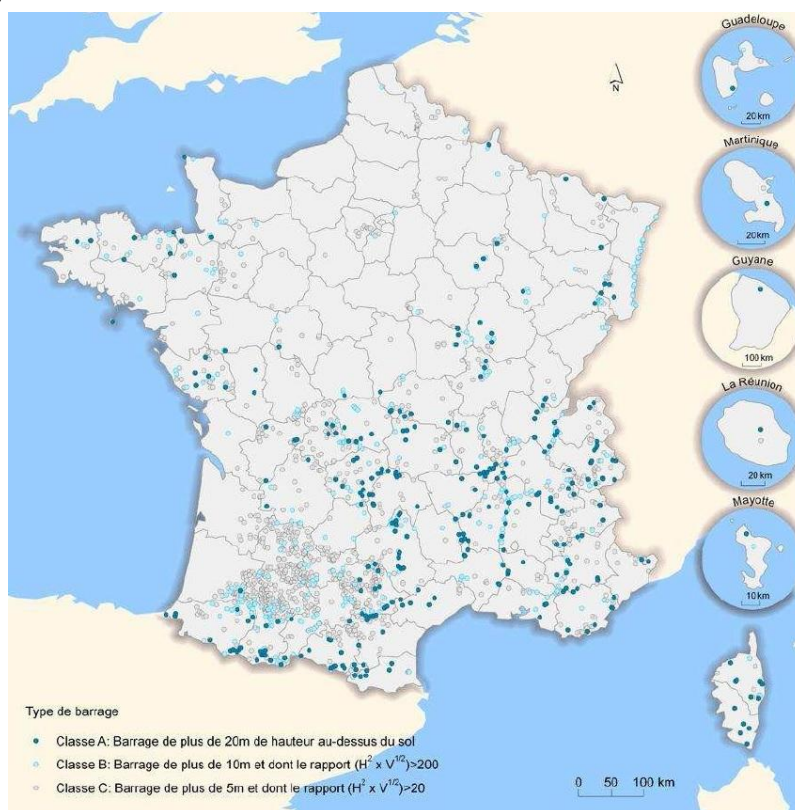


Figure 1 : Localisation des barrages (de classe A, B et C) sur le territoire français
 Image Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer [2]
 Source MDDTL, DGPR, oct 2011 et ©IGN, GEOFLA©, 2006

L'interaction de l'eau avec les ouvrages érigés en terre et remblai peut être à l'origine de dommages importants allant jusqu'à la rupture. Une grande partie de ces dommages (environ un cas sur deux des accidents recensés [3]) est due au phénomène d'érosion interne, c'est-à-dire à une migration de particules générée par un écoulement hydraulique dans le sol ou dans l'ouvrage même.

Cette ressource a pour objectifs de présenter les phénomènes de boulangerie et d'érosion régressive (encore appelée renard hydraulique) ainsi que quelques notions nécessaires en hydraulique des sols ; les moyens de limiter ou remédier à ces détériorations sont ensuite présentés.

1 – Introduction

Dans un écoulement, la force qui lui est liée (force d'écoulement) a une composante verticale ascendante qui s'oppose directement à la force de pesanteur. Si la résultante de ces deux forces est dirigée vers le haut, les grains du sol « flottent » et sont entraînés par l'eau : il s'agit du phénomène de boullance. Celui-ci peut générer des détériorations importantes sur des ouvrages dont les fondations reposent sur un sol dans lequel se produit le phénomène ou si le sol est lui-même l'ouvrage comme pour une digue, un barrage ou un fond de fouille.

Le phénomène de renard est un processus d'érosion interne qui se produit avec l'augmentation des vitesses d'écoulement de l'eau sous une fondation ou un remblai. L'eau atteint localement des vitesses susceptibles d'entraîner progressivement les éléments les plus fins du sol et augmente ainsi le débit. Progressivement des éléments plus gros sont entraînés, l'arrachement des particules progresse vers l'amont générant un conduit depuis l'aval (figure 2). Le phénomène peut s'arrêter si par manque de cohésion le conduit s'effondre. Dans le cas contraire, l'érosion progresse jusqu'à l'amont, l'eau s'engouffre et désorganise le sol. C'est le phénomène de renard difficilement détectable et à évolution très rapide.

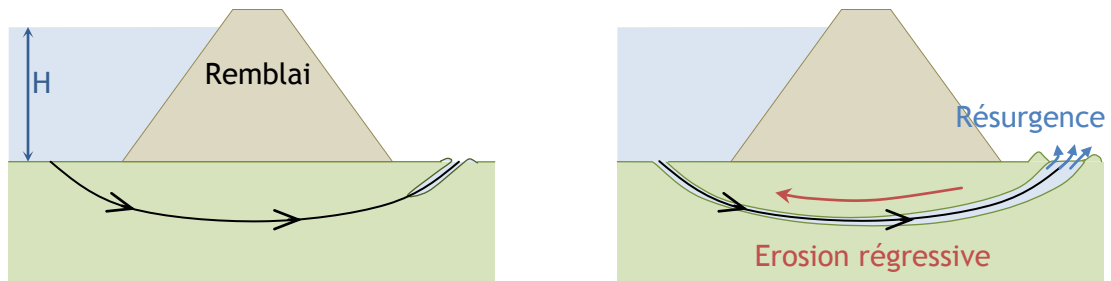


Figure 2 : Illustration en deux phases du phénomène de renard en fondation

Lors de sa mise en eau, le 6 juin 1976, le barrage construit sur la rivière Teton (dans l'Idaho, état du nord ouest des Etats-Unis) a subi une rupture par renard hydraulique (figure 3).



Figure 3 : Etapes de la rupture du barrage « Teton dam » : des premiers signes d'érosion visibles près du socle rocheux, jusqu'à la rupture et l'inondation, via l'apparition de l'écoulement boueux et l'élargissement de la brèche. Images Mrs. Eunice Olson [4]

2 – Notions d'hydraulique des sols

Les écoulements étudiés ici concernent des sols saturés en eau (sous la nappe).

2.1 - Charge hydraulique

La charge hydraulique d'un point, h , exprimée en mètre (m), représente l'énergie d'une particule d'eau de masse unitaire :

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$$

Energie potentielle → z $\frac{u}{\gamma_w}$ $\frac{v^2}{2g}$ ← Energie cinétique
Energie de pression (énergie interne)

Avec z : altitude du point par rapport à un plan de référence

u : pression interstitielle, pression de l'eau au point considéré (en prenant pour origine la pression atmosphérique)

γ_w : poids volumique de l'eau (10 kN/m³)

v : vitesse de l'eau au point considéré

Dans les sols, les vitesses d'écoulement sont faibles permettent de négliger le terme inertiel :

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

L'interaction de l'eau avec les grains du sol génère une dissipation d'énergie, il existe donc une perte de charge hydraulique le long d'une ligne de courant. Le paramètre fondamental est la variation de charge entre deux points pris dans le sens de l'écoulement M puis N (figure 4). La variation de charge dh est négative : $dh = h_N - h_M$. La perte de charge est la quantité :

$$-dh = h_M - h_N$$

La pression interstitielle u se mesure via la hauteur d'eau dans un piézomètre, tube allant jusqu'au point M. Sans écoulement entre M et le point haut de l'eau dans le tube A, la charge hydraulique est la même en ces deux points : $h_M = h_A$

avec
$$h_M = z_M + \frac{u_M}{\gamma_w} \quad \text{et} \quad h_A = z_A$$

d'où
$$u_M = \gamma_w(z_A - z_M)$$

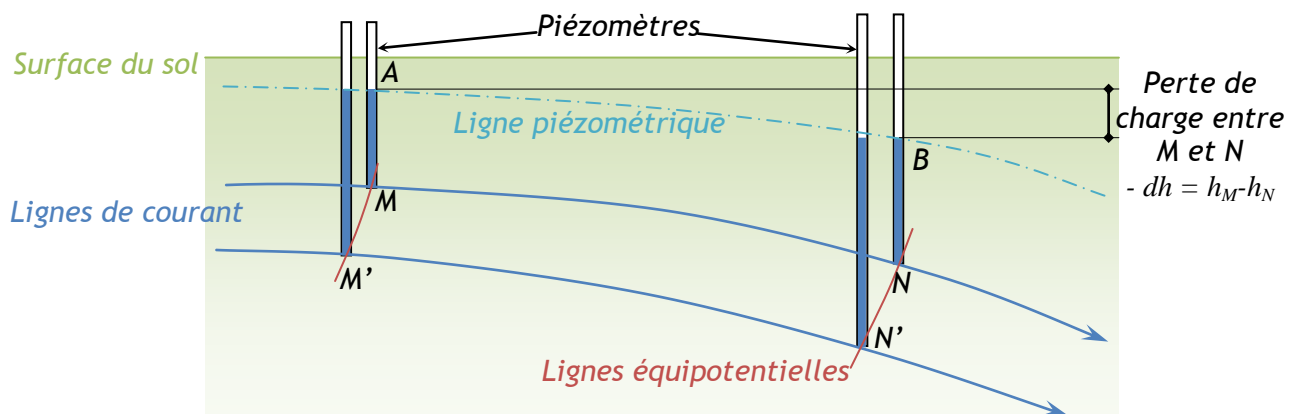


Figure 4 : Illustration de la mesure par piézomètre

La pression interstitielle est proportionnelle à la hauteur dans le piézomètre. Deux points ayant une même charge, et donc une même hauteur d'eau dans les tubes piézométriques, sont sur une ligne équipotentielle. La surface piézométrique est l'ensemble des points correspondants au niveau d'eau dans les piézomètres. Sa trace dans le plan est la ligne piézométrique.

2.2 - Gradient hydraulique

La charge hydraulique h_M est fonction des coordonnées spatiales du point M considéré. Le gradient hydraulique pris dans sa formulation générale est le vecteur \vec{i} défini comme :

$$\vec{i} = -\overrightarrow{\text{grad}} h = \begin{pmatrix} -\partial h / \partial x \\ -\partial h / \partial y \\ -\partial h / \partial z \end{pmatrix}$$

Le gradient hydraulique, i , est une perte de charge hydraulique par unité de longueur. Selon une direction donnée, une ligne de courant, il exprime la différence de charge hydraulique entre deux points d'un sol par unité de distance. Dans le sens d'écoulement, i est un nombre positif (et sans dimension). Soit deux points A et B espacés d'une distance l , h_A et h_B , leur charge hydraulique, le gradient hydraulique entre ces deux points est :

$$i = \frac{-\Delta h}{\Delta L} = \frac{h_A - h_B}{l}$$

Sans perte de charge, $h_A = h_B$, le gradient hydraulique est nul, il n'y a pas d'écoulement dans le sol. L'écoulement existe de A vers B lorsque $h_A > h_B$. C'est une différence de charges hydrauliques, et donc présence d'un gradient hydraulique, qui génère un écoulement. La perte de charge présente dans un écoulement, correspond à la dissipation d'énergie due à l'interaction de l'eau avec les grains du sol. Si le gradient hydraulique est le même en tout point d'un écoulement, celui-ci est dit uniforme.

2.3 - La loi de darcy - perméabilité

Les écoulements dans le sol répondent à la loi de Darcy (voir aussi la ressource « *Les pieux de fondations géothermiques* », paragraphe 2. *Propriétés thermo-physiques du sol*) mettant en évidence la proportionnalité de la vitesse d'écoulement avec le gradient hydraulique :

$$v = k.i$$

Avec v : vitesse d'écoulement en m/s

k : coefficient de perméabilité ou conductibilité hydraulique en m/s, caractérise l'aptitude du sol à être traversé par un fluide. La perméabilité varie en fonction de la nature du terrain (figure 5).

i : gradient hydraulique

Perméabilité	Ordre de grandeur du coefficient de perméabilité k (m/s)	Type de sol
Très élevée	10^{-1} à 10^{-2}	Graviers moyens à gros
Assez élevée	10^{-3} à 10^{-5}	Petits graviers, sables
Faible	10^{-5} à 10^{-7}	Sables très fins
Très faible	10^{-7} à 10^{-9}	Limon
Pratiquement imperméable	10^{-9} à 10^{-12}	Argile compacte

Figure 5 : Ordre de grandeur de la perméabilité de sols

A $k = 10^{-8}$ m/s, la vitesse d'écoulement v est d'environ 30 cm/an. Dans le cas de roches non fissurées, k est compris entre 10^{-12} et 10^{-10} m/s. Le débit de l'écoulement, q , à travers une section, S ($q=v.S$), est proportionnel au gradient hydraulique et à la perméabilité du sol :

$$q = k.i.S$$

Les sols sont constitués de strates superposées de granulométrie variable, et de perméabilité changeante en fonction des différentes couches du sol. Comme nous l'avons vu dans la ressource « *Les pieux de fondation géothermiques* », un sol moyen homogène peut être défini, représentant les n strates d'épaisseur H_j et de perméabilité k_j , qui dans les mêmes conditions de perte de charge est traversé par le même écoulement. Deux cas se présentent selon le sens d'écoulement par rapport aux strates de terrain.

Écoulement parallèle aux strates (figure 6a) : La perte de charge est la même pour chaque strate, donnant donc le même gradient hydraulique i quelque soit la strate. Le débit total du sol moyen homogène est la somme des débits dans chaque strate. Le coefficient de perméabilité horizontal k_h du sol moyen homogène de hauteur H , est exprimé par :

$$k_h = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^{j=n} k_j \cdot H_j$$

Écoulement perpendiculaire aux strates (figure 6b) : Le débit est le même à travers chaque strate, la vitesse v est donc la même. La perte de charge totale est la somme des pertes de charges de chaque strate. Le coefficient de perméabilité vertical k_v du sol moyen homogène de hauteur H , est exprimé par :

$$k_v = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{H_j}{k_j} \text{ avec } \frac{k_h}{k_v} > 1$$

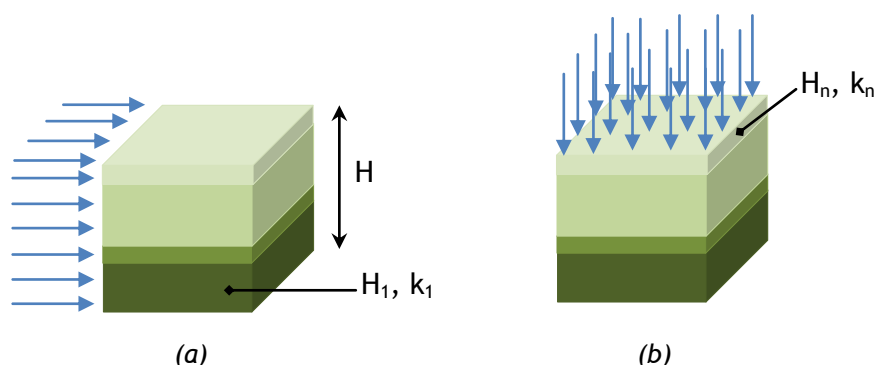


Figure 6 : Ecoulements (a) parallèle aux strates du sol et (b) perpendiculaire aux strates

La perméabilité du sol moyen homogène est plus élevée dans le sens des strates que perpendiculairement : $k_h/k_v > 1$.

Dans le cas d'un sol homogène et isotrope, le coefficient de perméabilité k est de même valeur en tous les points et dans toutes les directions du sol. La loi de Darcy exprime la proportionnalité entre le vecteur vitesse d'écoulement et le gradient hydraulique, les deux vecteurs sont tangents à la ligne de courant et orientés dans son sens, k est alors un scalaire : $\vec{v} = k \cdot \vec{i}$.

Lorsque le sol est homogène et anisotrope, les vecteurs vitesse et gradient hydraulique ne sont plus colinéaires, la perméabilité est alors représentée par un tenseur de perméabilité K , qui exprimé dans les directions principales, est diagonalisable :

$$K = \begin{pmatrix} k_h & 0 & 0 \\ 0 & k_h & 0 \\ 0 & 0 & k_v \end{pmatrix}$$

La loi de Darcy s'écrit :

$$\vec{v} = K \cdot \vec{i} = -K \cdot \overrightarrow{\text{grad } h}$$

2.4 - Réseau d'écoulement

L'écoulement se caractérise par un réseau composé de lignes de courant, le long desquelles l'eau circule, et de courbes équipotentiels, c'est-à-dire à charge h constante. Les lignes de courant sont perpendiculaires aux lignes équipotentiels, le réseau d'écoulement est orthogonal. Les lignes de courant étant les trajectoires d'écoulement, en chaque point le vecteur vitesse d'écoulement y est tangent (figure 7). Le même débit Δq existe entre deux lignes de courant voisines (tube de courant) ; entre deux équipotentiels voisines, on trouve la même perte de charges Δh . A partir des conditions limites connues et des éventuelles mesures de pression in situ, la reconstruction numérique du réseau est réalisable.

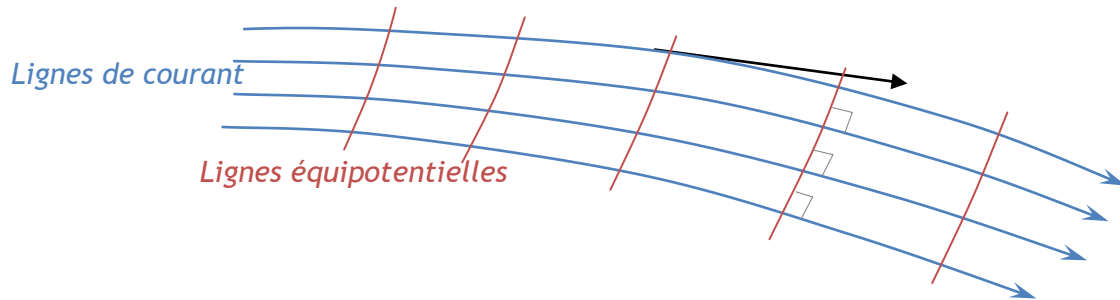


Figure 7 : Schématisation d'un réseau d'écoulement

Deux lignes de courant voisines déterminent un tube de courant, l'eau y circule sans en sortir, le débit est donc constant. La détermination des réseaux d'écoulement est primordiale pour la compréhension de problèmes concrets comme le calcul des débits pour les barrages et les assèchements d'une zone de fouille, ou le calcul de la pression interstitielle nécessaire dans l'étude de la stabilité des talus, des barrages, murs de soutènement en terre ou rideaux de palplanche. Le gradient hydraulique i , est d'autant plus important que les lignes équipotentiels sont rapprochées et la différence de niveau Δh est grande. Dans le cas de la palplanche fichée dans un sol perméable constitué de sable (figure 8), on remarque que les gradients hydrauliques les plus élevés sont situés à son pied.

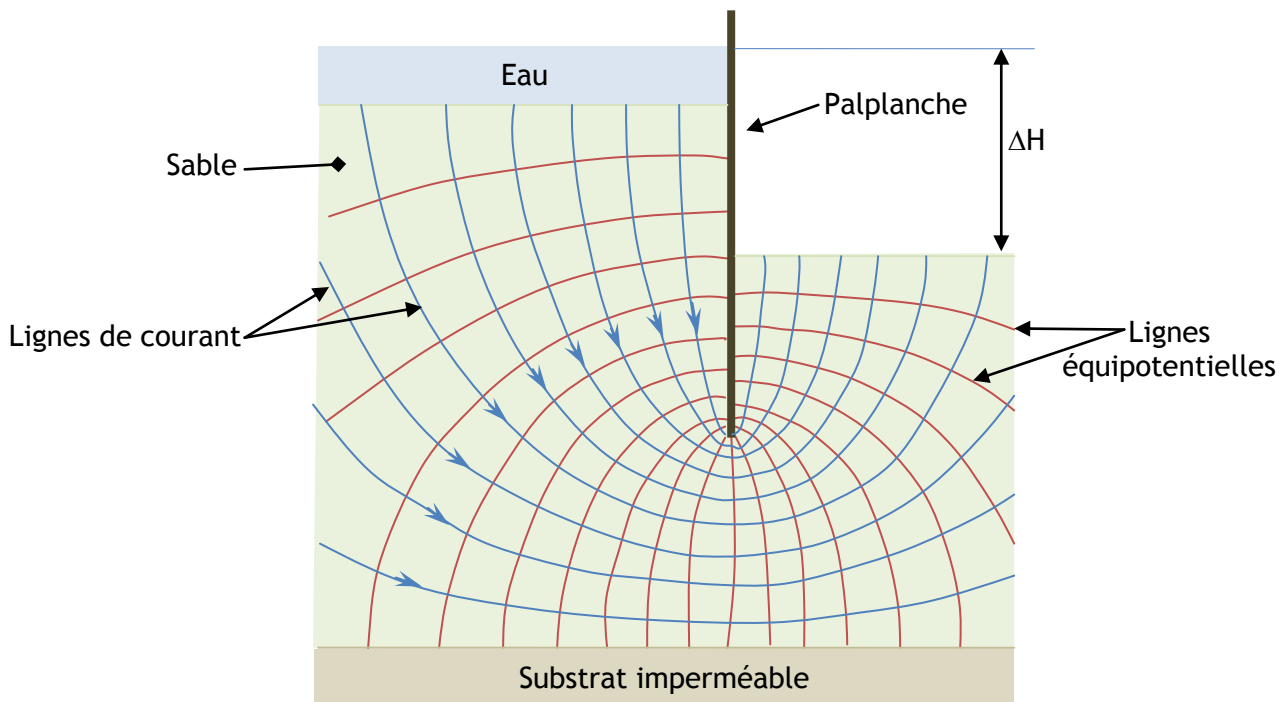


Figure 8 : Exemple d'un réseau hydraulique

2.5 - Forces d'écoulement

Dans un sol saturé en eau et en équilibre hydrostatique, l'action de l'eau sur les grains du sol se résume à une poussée d'Archimède. Lorsqu'il y a écoulement, il y a perte de charge par dissipation d'énergie par frottements eau/grains du sol. Ainsi apparaissent sur les grains du sol, des forces dirigées dans le sens de l'écoulement et qui s'opposent à l'écoulement de l'eau.

Soit un volume élémentaire du sol, dV , le bilan des forces s'exerçant sur lui correspond à trois forces (figure 9):

- Le poids, force verticale descendante : $P = \gamma_{sat} \cdot \Delta V$ avec γ_{sat} , le poids volumique du sol saturé,
- La poussée d'Archimède, force verticale ascendante : $A = \gamma_w \cdot \Delta V$, avec γ_w , le poids volumique de l'eau (10kN/m^3)
- La force d'écoulement : $j = \gamma_w \cdot i$. La stabilité des sols traversés par l'eau dépend de cette force d'écoulement qui est d'autant plus grande que la vitesse de circulation l'est. j est une force volumique et i le gradient hydraulique (sans dimension).

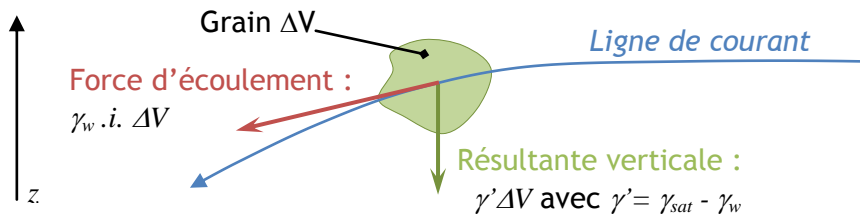


Figure 9 : Bilan des forces s'exerçant sur un volume élémentaire du sol

Les forces d'écoulement sont souvent de même ordre de grandeur que la résultante de pesanteur et de poussée d'Archimède. Elles sont donc à prendre en compte dans les calculs de stabilité des ouvrages.

Il est à noter que lorsque l'écoulement est vertical descendant, les composantes des forces volumiques sont toutes portées sur z et auront une résultante égale à $-(\gamma' + \gamma_w \cdot i)\Delta V$. Dans le cas d'un écoulement vertical ascendant, la résultante sera égale à $-(\gamma' - \gamma_w \cdot i)\Delta V$.

3 – Les mécanismes de l'érosion interne

3.1 - La boullance

Dans un écoulement la composante verticale ascendante de la force d'écoulement génère un gradient hydraulique i vertical ascendant. Cette composante verticale de la force d'écoulement s'oppose directement à la pesanteur (figure 10) ; avec i suffisamment élevé, les grains sont entraînés par l'eau : c'est le phénomène de boullance.

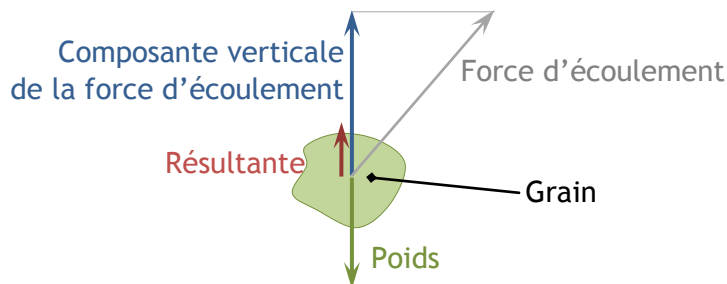


Figure 10 : Les forces mises en jeu lors de la boullance

On définit un gradient hydraulique critique, i_c , pour lequel la résultante des forces est nulle et donc les grains du sol à la limite d'être entraînés :

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

Il est nécessaire de vérifier que les gradients hydrauliques ascendants sont inférieurs au gradient critique lors de construction de barrage ou digue en terre, mais aussi lors de fouille dans un sol ou de construction sur un sol où ce phénomène est possible.

L'arrachement des grains est la première phase de l'érosion interne. Il crée de nouvelles conditions d'écoulement éventuellement plus menaçantes : augmentation des vides, modification des assemblages de composition des sols... Le sol devient plus décharné et plus perméable, permettant à l'eau de circuler à vitesse plus importante et/ou dans de nouveaux écoulements.

3.2 - Phénomène de renard hydraulique

Le phénomène d'arrachement comme la boullance est susceptible d'être accompagné d'un transport important des grains, déstabilisant les sols. Le phénomène de renard apparaît dans des écoulements en milieu perméable comme les barrages ou digues en terre, dans la direction d'écoulement de l'amont vers l'aval. Localement les vitesses d'écoulement augmentant peuvent atteindre le seuil d'entraînement des grains fins qui progressivement va « raviner » les lignes de courant de l'intérieur. Les éléments plus importants vont alors être entraînés, l'érosion progresse de manière régressive le long d'une ligne de courant, formant un conduit où s'engouffre l'eau de manière irréversible (figure 11).

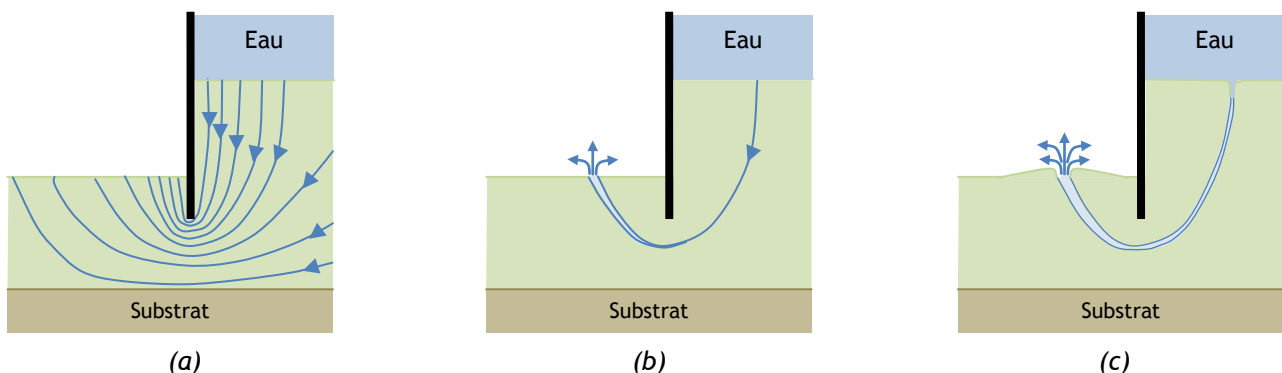


Figure 11 : Illustration du phénomène de renard dans une retenue d'eau par rideau de palplanche
 (a) Réseau d'écoulement sans perturbation, (b) Erosion interne en début de phénomène, le conduit s'élargit depuis la sortie, (c) renard hydraulique développé, rupture proche.

Le développement d'un renard hydraulique est conditionné par le gradient hydraulique au sein de la structure, de la différence de niveau Δh et de la propension de la structure à libérer des particules. Ainsi, lorsque l'écoulement de l'eau dans la structure est long, l'eau ne développe pas la force pour pouvoir emporter des grains du sol. De même, si les grains du sol ont une grande cohésion (comme pour l'argile) il n'y a pas de transport de grain. Alors que dans un massif sableux qui présente une grande différence de niveau d'eau amont-aval et une faible largeur de remblai la probabilité du développement d'un renard hydraulique est importante.

L'écoulement se fait préférentiellement aux points de « fragilité » d'un ouvrage comme le long des structures (en béton, rideaux de palplanche...) ou des joints, en suivant les passages de conduites ou câbles internes à la structure (figure 12) mais aussi aux « faiblesses » de réalisation (défaut de compactage...). Lors du dimensionnement d'un ouvrage, le risque de développement d'un renard doit être maîtrisé, principalement aux niveaux des zones de faiblesse prévisible.



Figure 12 : Le 15 juillet 2001 au matin l'étang des Ouches se vide par une brèche ouverte dans le barrage des Ouches, suivant une section où passe la conduite de vidange. Ce barrage âgé de plus de deux siècles, avait été répertorié sur la première carte topographique du royaume de France, dite Carte de l'Académie ou Carte de Cassini, du nom des astronomes qui se sont succédés à la dresser au XVIII^e siècle [5]

Le sol devient localement plus perméable, les vitesses d'écoulement augmentent, le phénomène s'amplifie avec l'élargissement de la conduite créée. Les conséquences sont la rupture du barrage soit par ouverture d'une brèche (figure 12) soit par effondrement de l'ouvrage avec submersion par une vague (figure 13).

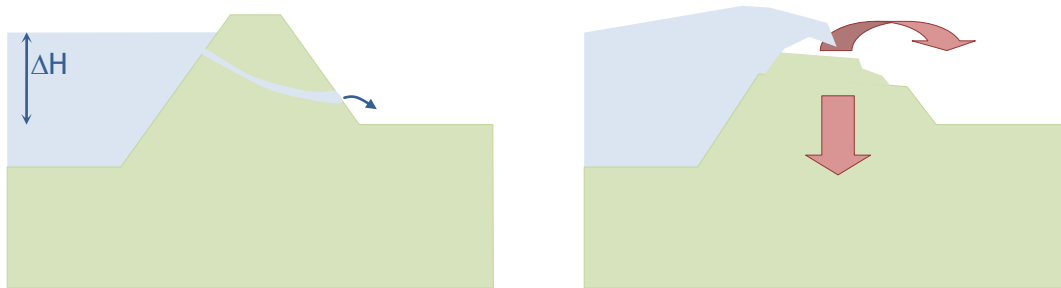


Figure 13 : Illustration de l'effondrement de l'ouvrage avec submersion dus à un renard

4 – Moyens de réduction du risque d'érosion interne

La plupart des phénomènes d'érosion interne ont une origine accidentelle, qui ensuite occasionne une augmentation du gradient hydraulique i . Celle-ci peut advenir lors d'une augmentation de la charge H (période de crue, rehausse majeure du seuil déversant...) ou via une diminution de la longueur d'écoulement de l'eau à travers les grains l . La diminution de la longueur d'écoulement peut être due à plusieurs aléas comme la rupture d'une conduite de vidange, les changements de sol par fissuration ou retrait, l'amorce par terriers animaux ou encore des vides préexistants (défaut de construction).

Quelle qu'en soit la raison, il en résulte une modification des conditions d'écoulement avec diminution de la longueur d'écoulement, augmentation du gradient hydraulique et des vitesses d'écoulement.

La bouillasse se remarque sous eau (par une zone plus ou moins étendue) de turbidité de l'eau c'est-à-dire la présence de grains du sol en suspension. On rappelle que si le gradient hydraulique tend à devenir supérieur au gradient critique, il y a entraînement des grains vers le haut. L'apparition de ce phénomène de bouillasse peut être soudaine et la cause de grands dommages ; à l'aval d'un barrage, sa venue entraîne une perte de portance de la zone avale de la fondation.

Une fois le phénomène amorcé, les moyens mis en œuvre pour le stopper sont considérables. Le déversement de matières perméables (comme du gravier) sur la zone où la boullance apparaît, permet parfois d'enrayer cet événement.

Nous avons vu que la longueur d'écoulement est un paramètre important dans l'apparition du renard hydraulique, la longueur de l'écoulement est directement liée au gradient hydraulique. Un des moyens de se prémunir de l'érosion interne par renard est d'augmenter la longueur de l'écoulement, diminuant les gradients hydrauliques et éloignant les risques d'atteindre une valeur critique du gradient hydraulique. Plusieurs dispositifs sont susceptibles d'être mis en œuvre conjointement ou non (figure 14) :

- En amont, le pied du barrage est éloigné par un tapis de matériaux imperméables,
- Sous le barrage, des barrières verticales étanches détournent l'écoulement,
- En aval, le tapis drainant et un filtre maintiennent les grains, une recharge pèse et empêche le soulèvement des grains,
- Toujours en aval, un puits de décharge permet une mise à la pression atmosphérique de la couche perméable annulant les éventuels forts gradients.

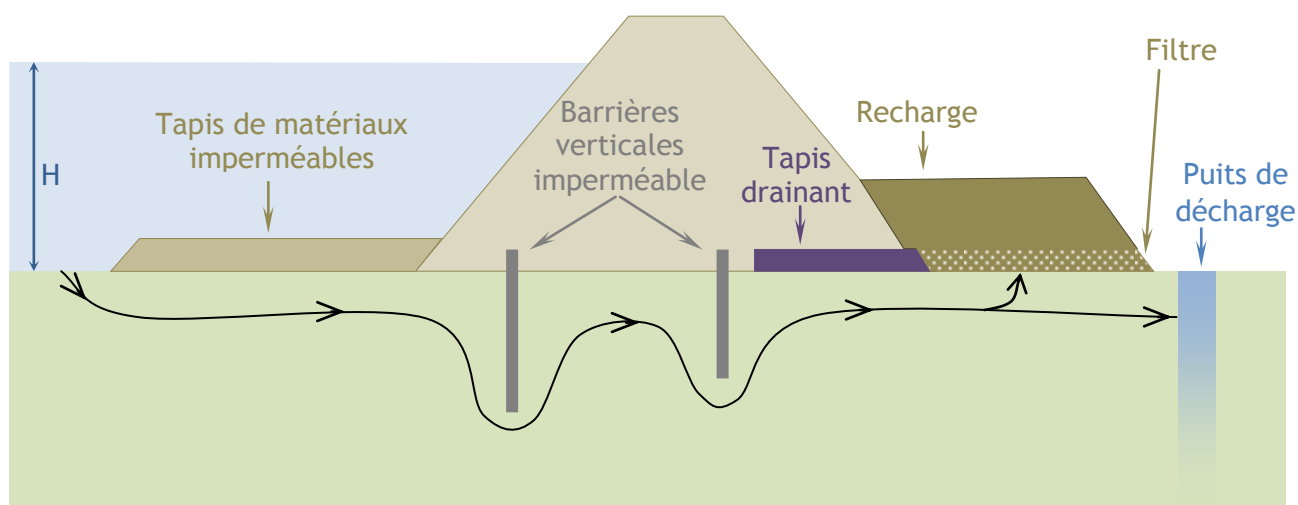


Figure 14 : Dispositifs de réduction du risque d'érosion interne

Les deux premiers dispositifs sont destinés à allonger le chemin d'écoulement, permettant de diminuer le gradient hydraulique et le débit de l'écoulement. Les dispositifs en aval limitent les soulèvements du sol, le puits supprime les gradients encore trop forts.

5 – Conclusion

L'érosion interne peut aboutir à la destruction de barrages. Les phénomènes d'érosion interne sont liés à la circulation d'eau dans les sols de fondation ou du remblai. Si la force d'écoulement est suffisamment importante en regard des autres forces mises en jeu, l'eau arrache sur son trajet des grains du sol et les expulse à l'aval du barrage. L'érosion interne résulte de deux mécanismes : l'arrachement des grains puis le transport de ceux-ci.

Le renard hydraulique est un écoulement selon une ligne de courant qui se développe au sein du remblai ou sous les fondations de l'ouvrage, et qui transporte des particules progressivement en créant un vide pouvant conduire à une rupture totale de l'ouvrage. Un barrage soumis à une montée de sa retenue d'eau, voit la vitesse d'écoulement qui le parcourt augmenter selon la loi de Darcy. Le risque de renard hydraulique est très important en pied de barrage et en fond de fouille en terrain. Le phénomène apparaît alors en surface avec une venue d'eau et entraînement

de matériaux, puis empire avec des conséquences de rupture par ouverture de brèche ou effondrement de l'ouvrage.

Des dispositifs existent permettant de limiter les risques d'érosion interne des barrages. Le contrôle de la valeur du gradient hydraulique devant rester inférieur au gradient critique, est une voie de solution. Le contrôle du niveau de la retenue est aussi nécessaire. Enfin, il faut dans le mesure du possible limiter les amorces de rupture en limitant les zones de faiblesse prévisibles (joints, passages de conduites ou câbles, défaut de réalisation).

Références :

[1]: Stockage de l'eau : quel avenir pour les retenues collinaires ? - Jean Dunglas - Académie d'Agriculture de France - Février 2014

[2]: Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer - Observation et statistiques - <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/1974/1097/risque-rupture-barrage.html>

[3]: Vieillessement et réhabilitation des petits barrages en terre - Danielle Lautrin - Cemagref

[4]: Arthur G. Sylvester - Department of Earth Science, University of California - http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton_Dam/

[5]: Etre propriétaire d'un barrage de petite taille - Direction départementale de l'Equipement et de l'Agriculture de la Haute-Saône, service de contrôle des ouvrages hydrauliques, mars 2009

[a]: Géotechnique - Cours de Jacques Lérau - INSA Toulouse