

Évaluer l'impact du vieillissement des digues sur les mécanismes et scénarios de rupture

Impact estimation of aging process on levee breaching mechanisms and scenarios

Y. Boussafir¹, R. Tourment¹, G. Veylon², E. Durand³, L. Saussaye³, P. Reiffsteck¹

¹Ifsttar, Marne-la-Vallée, yasmina.boussafir@ifsttar.fr et philippe.reiffsteck@ifsttar.fr

²Irstea, Aix-en-Provence, remy.tourment@irstea.fr et guillaume.veylon@irstea.fr

³Cerema, Blois, edouard.durand@cerema.fr et lucile.saussaye@cerema.fr

Résumé

Les scénarios de rupture des digues sont basés sur des hypothèses d'enchaînement de dégradations ou de ruptures partielles de différentes parties des ouvrages. Ainsi, pour qu'une défaillance intervienne sur un tronçon de digue, il faut que certaines parties d'ouvrage arrivent à la limite de leur « bon » fonctionnement et que leurs propriétés passent en dessous d'un certain niveau de performance.

L'évolution des propriétés et des performances n'est cependant pas toujours « binaire » : l'ouvrage semble être dans un état correct puis, instantanément, arrive à la rupture. Cet article propose une discussion sur les mécanismes de vieillissement des matériaux utilisés notamment pour leur fonction d'étanchéité, à partir d'exemples concrets. Le vieillissement est un phénomène normal qui apparaît soit par un usage répété de l'ouvrage soit par des phénomènes normaux de dégradation et d'usure par le temps et les conditions extérieures. Ce vieillissement normal peut être identifié au travers de mécanismes de dégradation qui seraient classés par type de dégradation (météorologique, interaction avec le vivant, interaction avec des masses d'eau), par intensité (fort, moyen, faible) et par cinétique (très long, rapide, instantané). Ces mécanismes de dégradations seraient dépendants de la localisation géographique de l'ouvrage, de la nature des composants et de la qualité initiale de la réalisation de l'ouvrage.

Mots-clés

Vieillissement, dégradation, fonction étanchéité

Abstract

The failure process of levees is based on assumptions of deterioration or partial breaking events series. These partial breaking events are caused by poor performance of one or several parts of the levee. Indeed, if one material properties or performance is under the required level, the levee stability can be no more guaranteed. The performance is the result of

the initial condition and how it will evolve over time, what is called deterioration process. But deterioration process of natural material is not currently very well known. We propose in this article a discussion about aging of the material usually used for the watertightness function in a levee. We have based our discussion on an example of a silty soil deteriorated by a process of cyclic wetting and drying events. Cycles are supposed to represent the climatic environment of a levee with alternative of wet and dry seasons in one year. This kind of deterioration is not the only one and we propose a classification of degradation mechanisms that can affect the properties of natural properties. We discuss the quickness (fast, low, very low process) and the intensity (intense, intermediate or small process) of the deterioration processes. We also assume that these deterioration processes depend on the geographic localization of the levee and on the initial properties depending on the levee building quality.

Key words

Aging, deterioration process, watertightness function

Introduction

L'étude du vieillissement des matériaux naturels est un domaine d'étude relativement récent. Peu de travaux permettent réellement d'évaluer l'impact de la dégradation des performances en lien avec l'environnement de l'ouvrage lorsqu'il s'agit d'ouvrage en terre. Par opposition, la durabilité des ouvrages en béton [10], celle des enrochements [6], sont des sujets relativement bien documentés et qui continuent de progresser.

Dans les scénarios de rupture des digues, en plus des mécanismes de rupture bien identifiés portant sur l'érosion interne, l'érosion par surverse, la rupture par affouillement, la stabilité mécanique, le soulèvement hydraulique, etc. qui tous identifient l'élément moteur à l'origine de la défaillance, il est assez clairement évoqué l'importance de la connaissance des propriétés des matériaux qui constituent l'ouvrage pour évaluer la stabilité [7]. Il est également évoqué la possibilité,

tant pour la performance de la fonction que pour les propriétés des matériaux, que ces deux informations ne soient pas invariables dans le temps mais qu'elles évoluent à des rythmes plus ou moins rapides dans le temps nécessitant un suivi et des diagnostics organisés tout au long de la vie de l'ouvrage [7] [13] [14]. Cet article propose quelques éléments permettant d'éclaircir les notions d'évolution dans le temps en travaillant sur la notion de mécanismes de dégradation.

Défaillance et dégradation

La défaillance de l'ouvrage est précédée d'une succession d'événements ou de phases qui se caractérisent par une diminution des performances (Figure 1), qualifiée de dégradation. La défaillance d'une digue correspond à la cessation de la fonction de protection contre l'inondation, qu'elle soit hydraulique ou fonctionnelle. Les études de conception ou de diagnostic doivent examiner la stabilité de l'ouvrage et du profil type retenu, en rapport avec les mécanismes de défaillance identifiés sur le linéaire.

La dégradation est une notion décrite par Simm [13] ainsi que Tourment [14] dans la phase de *deterioration process*. La dégradation se traduit par une variation des propriétés des composants de la levée dans le temps (par rapport à une propriété acquise souvent par construction ou fabrication) ce qui conduit à une altération de la fonction jouée par les composants au sein de l'ouvrage. Les mécanismes de dégradation impliquent des processus physiques, chimiques ou naturels qui se développent tout au long de la vie de l'ouvrage en lien avec les phénomènes extérieurs et l'environnement normal de l'ouvrage. L'évidence du développement d'un mécanisme de dégradation est souvent constatée par un défaut visible lors des inspections comme du tassement, des fissures de dessiccation, des indices d'érosion interne ou d'érosion de surface et toutes marques d'origines anthropiques, végétales ou animales.

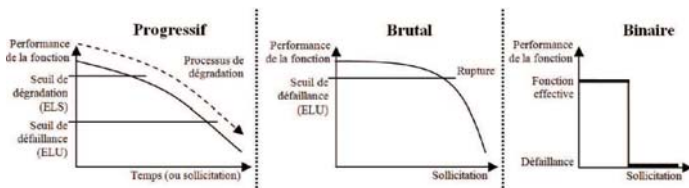


FIGURE 1 : PROCESSUS DE DEFAILLANCE DES FONCTIONS PAR DEGRADATION DES PERFORMANCES [14]

La figure 1 rappelle que la dégradation des propriétés des matériaux ou de la fonction peut évoluer de manière progressive, brutale voire binaire.

La figure 2 illustre la temporalité des événements et l'intensité du développement de la dégradation qui peut, selon l'existence ou non d'événements extérieurs (sollicitations), ponctuellement accélérer ou ralentir l'évolution de l'état des matériaux (ou composants). Le géotechnicien, lors de la conception ou du diagnostic d'un ouvrage, doit associer une valeur caractéristique à chacun des matériaux entrant dans la composition d'une partie d'ouvrage

[7]. La comparaison de cette valeur caractéristique aux états limites ou ultimes permet d'évaluer la stabilité de l'ouvrage.

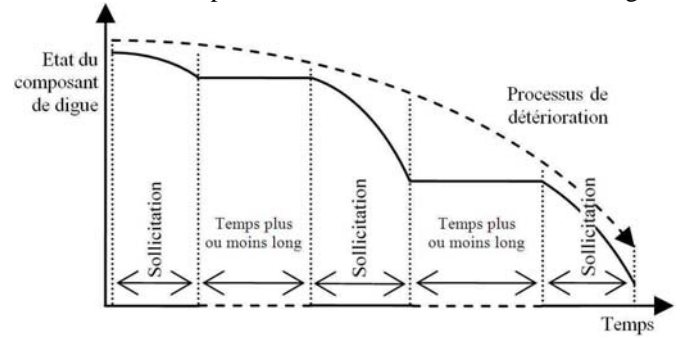


FIGURE 2 : PROCESSUS DE DEFAILLANCE DES FONCTIONS PAR DEGRADATION DES PERFORMANCES [14]

Au cours de cette étape, particulièrement importante lors d'un diagnostic de digue existante, la responsabilité du géotechnicien est grandement engagée quand on sait l'importante variabilité des propriétés des matériaux mis en œuvre au cours de l'histoire de l'ouvrage. La tâche se complique si on prend en compte la possibilité pour ces propriétés d'évoluer dans le temps sous l'influence des environnements extérieurs. Ainsi, par rapport à une valeur mesurée au moment de l'étude géotechnique ou au moment de la construction d'un ouvrage, il s'agit de mettre en perspective une augmentation ou une diminution de certaines propriétés en fonction des environnements et de l'entretien de la digue, ce qui conduit à émettre des hypothèses et des scénarios sur des valeurs probables selon une ou plusieurs conditions d'environnement, et donc à évaluer comme lors d'une analyse de risque, la stabilité de l'ouvrage sous plusieurs conditions d'environnement. L'identification des mécanismes de dégradation permet d'apporter une méthodologie qui clarifie les possibilités d'évolution des matériaux par grand domaine d'action de ces mécanismes. La méthodologie devra par la suite s'enrichir d'éléments permettant d'aboutir à la prise en compte de l'intensité et de la cinétique de la dégradation.

Mécanismes de dégradation

3 grandes causes de dégradation distinctes sont fréquemment observées sur les digues [13] [8] [9]. Il s'agit des interactions : (1) avec l'atmosphère et la météorologie ; (2) avec le vivant, qu'il s'agisse aussi bien des animaux, des végétaux ou des humains ; et (3) avec les mouvements des masses d'eau soit du cours d'eau ou de la mer au contact de la digue soit des nappes souterraines. Pour chacune de ces causes de dégradation, il existe une certaine cohérence en termes de compréhension des phénomènes et des domaines scientifiques concernés. Le tableau 1 présente l'état des réflexions actuelles sur l'identification des mécanismes de dégradation, les sous-divisions possibles ainsi que les défauts se manifestant en lien avec le mécanisme de dégradation.

Les mécanismes de dégradation liés à la sécheresse (ou dessiccation) ou aux végétaux [3] sont les deux mécanismes les mieux documentés à ce jour. Les effets du battillage et des animaux fouisseurs sont également bien connus.

TABLEAU 1: TYPES DE DEGRADATION POUVANT SE DEVELOPPER DANS UNE DIGUE ET DEFAUTS CARACTERISTIQUES DE CHACUN DE CES MECANISMES

	Causes de dégradation	Mécanisme de dégradation proposé/associé	Défauts (observables ou non)
Effets de la météorologie	Dégradation liée à la dessiccation	Sécheresse	Fissures, modification de l'arrangement des particules, tassement par retrait...
	Dégradation liée au gel		Gélifraction, perte de cohésion et/ou de densité, liquéfaction...
	Dégradation liée à la pluviométrie		Ravinement, érosion de surface, saturation des sols, perte de cohésion...
Interaction avec le vivant	Dégradation liée aux animaux fouisseurs		Terriers, piétinements, chemins de passage
	Dégradation liée aux arbres		Formation de conduits racinaires, migration de particules fines, arrachement de matériaux par basculement...
	Dégradation liée aux organismes encroûtants		Développement de biofilms, encroûtements calcaires...
	Dégradation liée à l'anthropisation		Réseaux enterrés, piétinement, constructions diverses (poteaux, escaliers, clôtures...), circulation de véhicules
Interaction avec les mouvements d'eau	Dégradation liée au battillage	Affouillement	Erosion en talus, ravinement
	Dégradation liée au battement de nappe	Erosion interne	Déplacement de matériau, suintements, migration de particules fines, tassement ou gonflement du sol support, saturation des sols...
	Dégradation liée aux minéralisations		Encroûtements calcaires d'origine chimique, oxydation de particules ferreuses...

La fissuration, mécanisme lié à la sécheresse, a été très largement étudiée en Angleterre et a fait l'objet d'une littérature riche sur ce sujet. L'apparition de fissures de retrait est en effet suspectée dans plusieurs cas de rupture de digue [8] lors des inondations marines de 1953 (North Sea Floods) Les auteurs du projet Flood Risk Management Research Consortium, proposent dans leur document de synthèse un schéma illustrant le mécanisme de défaillance associé au mécanisme de dégradation par dessiccation (figure 3). Leur travail s'appuie sur une recherche documentaire de cas de rupture anciens et sur une investigation de terrain mettant en évidence l'existence de nombreuses fissures de retrait et leur importance sur les propriétés globales de l'ouvrage mais surtout concernant les parties jouant une fonction d'étanchéité.

Dégradation liée à la dessiccation

La dessiccation des sols est un phénomène qui se développe sous l'effet des interactions entre l'atmosphère et les sols. Il s'agit d'un phénomène complexe, difficilement modélisable

[1] [2], qui dépend de la météorologie (pluviométrie, évapotranspiration) et de la nature des sols (conductivité hydraulique, propriétés de rétention d'eau, de retrait et gonflement...). Ce phénomène, bien étudié pour les problèmes qu'il cause au bâti, ne doit pas être négligé dans le cas des digues. L'analyse des caractéristiques des sols de la digue de La Ville-aux-Dames en Indre-et-Loire [5] montre par exemple que les sols sont dans des états hydriques anormalement secs dans les 3 premiers mètres de l'ouvrage. Plus en profondeur, l'ouvrage retrouve des états hydriques corrects. Autre exemple, la présence de fissures de retrait est relevée dans près de 35 % des barrages en terre dans le Gers [9].

Mécanisme de séchage

La dessiccation (ou la fissure de retrait) est le défaut que l'on peut observer à la fin d'un processus de séchage des sols. Ce défaut peut s'observer visuellement [2] [9]. C'est le défaut à l'origine du mécanisme de rupture tel que proposé par Dyer [8] synthétisé figure 3.

Le séchage d'un sol est provoqué par une situation

météorologique évaporante et/ou la demande en eau des plantes qui conduisent à la diminution de la teneur en eau du sol.

Dans un premier temps, dans un sol initialement saturé, le mécanisme de séchage s'accompagne d'une diminution du volume des pores, en resserrant les particules du sol entre elles. Cette variation de volume suit linéairement la diminution de la teneur en eau. La succion générée dans le matériau augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur qui dépasse la capacité du sol à se déformer.

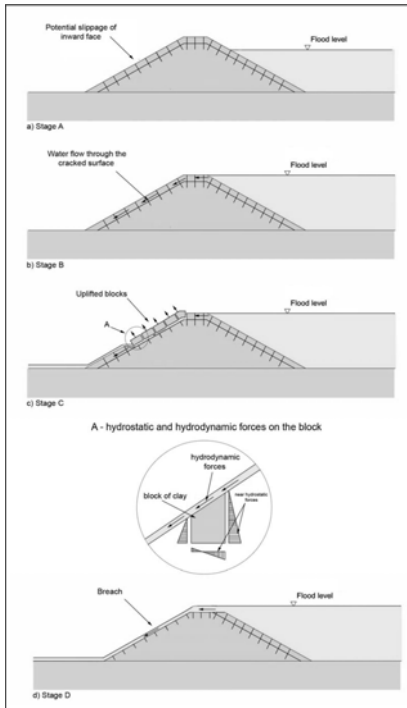


FIGURE 3 : SCENARIO DE DEFAILLANCE LIE AU MECANISME DE DEGRADATION PAR DESSICATION [8]. CE SCENARIO PEUT S'INTITULER « DEFAILLANCE PAR SOULEVEMENT DE BLOCS FISSURES PAR LA SECHERESSE »

Dans ce second temps, la poursuite du phénomène de séchage provoque un retrait non linéaire du sol et l'eau présente dans la porosité ne forme plus un film continu : l'eau migre vers les pores les plus petits et les plus grands pores sont occupés par de l'eau et un volume d'air croissant. Lorsque la teneur en eau descend en dessous de la limite de retrait d'Atterberg, le sol ne se déforme plus car il a atteint sa limite de déformabilité. À ce stade, le retrait s'accompagne de la création de fissures. Le milieu est profondément modifié par ce réseau de fissures qui augmentent la perméabilité. En cas d'inondation, l'eau peut s'infiltrer très rapidement dans les fissures et provoqué des soulèvements de blocs d'argiles sèches (Figure 3). L'arrachement des blocs d'argile modifie la géométrie de l'ouvrage et peut conduire à une surverse. L'entrée d'eau dans l'ouvrage peut aussi conduire à des mécanismes d'érosion interne.

Séchage et humidification dans un milieu poreux

Le séchage est le résultat d'équilibres thermodynamiques entre les phases présentes dans la porosité (l'eau liquide, l'eau sous forme vapeur, l'air) et les conditions extérieures. Ces équilibres dépendent aussi de l'organisation du sol comme la porosité et les différentes tailles de pores, la forme et la nature des particules du sol ainsi que l'affinité que présentent les particules avec l'eau. Certaines particules ont la propriété d'adsorber facilement l'eau, d'autres non. La courbe d'adsorption d'eau de la figure 5 illustre ainsi la difficulté pour certains matériaux à s'humidifier uniquement par condensation de l'eau présente sous forme vapeur dans l'atmosphère ou dans la porosité du sol en une pellicule d'eau liquide à la surface des particules. Ainsi, le limon sableux qui compose la digue de La Ville-aux-Dames présente des propriétés d'adsorption très faibles qui s'expliquent compte tenu de la nature minéralogique du sol composée essentiellement de silts et de très peu d'argiles (passant à $2 \mu\text{m} = 8 \%$; passant à $80 \mu\text{m} = 21 \%$).

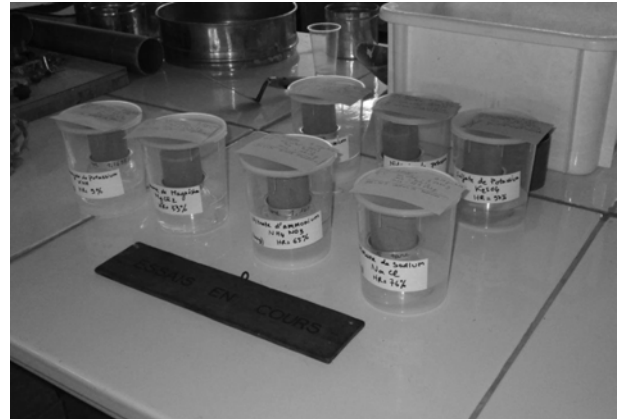


FIGURE 4 : EPROUVETTES 5x5CM DE SOLS DE LA DIGUE DE LA VILLE-AUX-DAMES (37) CONSERVES EN ETUIS ETANCHES SOUS ATMOSPHERE A HUMIDITE RELATIVE CONTROLEE PAR DES SOLUTIONS SALINES SATUREES.

La courbe de la figure 5 est établie à partir d'équilibres hydriques qui se forment entre une éprouvette de sol et l'humidité relative de l'air (HR %) crée au contact de solutions salines (figure 4). Les éprouvettes ($\varnothing 5 \times H 5$ cm) ont été maintenues pendant 6 mois dans leur conditionnement étanche.

On mesure la teneur en eau de l'éprouvette une fois l'équilibre entre le sol et l'atmosphère atteint. La courbe du sol de la Ville-aux-Dames (figure 5) montre très clairement que l'augmentation de la teneur en eau s'obtient à partir d'une humidité relative de l'air supérieure à 97 %. L'éprouvette constituée initialement par compactage statique à une teneur en eau de 12,2 % (état hydrique humide, degré de saturation $S_r = 73 \%$) voit sa teneur en eau diminuer entre 1,13 et 3 % (respectivement 6,7 et 17,8 % de S_r) par équilibre avec l'humidité relative de l'air imposée dans la cellule d'essai dès lors que l'atmosphère de l'air a une HR inférieure à 97 %. Dans ces gammes d'humidité relative, le

sol sèche. L'eau se condense à la surface des particules et n'arrive à saturer l'éprouvette que pour des humidités relatives supérieures à 97 %, l'équivalent d'une atmosphère très humide de type « brouillard ». Sauf événement météorologique ou environnement particulièrement humide, ce sol ne peut que se dessécher au cours du temps. Ce phénomène physique peut expliquer pourquoi la digue de La Ville-aux-Dames se dessèche sur les 3 m supérieurs de l'ouvrage [5]. Dépasser 97 % d'eau en phase vapeur dans la porosité du sol nécessite des conditions extérieures particulières qu'il conviendrait de définir. Ces conditions pourraient dépendre de la nature de la végétation sur la digue, de l'intensité de l'événement (météorologique ou hydraulique), de la nature des particules de sol, de la porosité (donc de la masse volumique) et de la conductivité hydraulique.

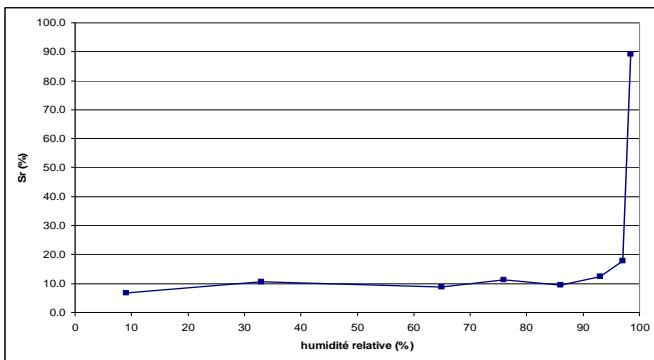


FIGURE 5 : COURBE D'ADSORPTION D'UN LIMON SABLEUX (DIGUE DE LA VILLE-AUX-DAMES, 37) OBTENUE PAR EQUILIBRE HYDRIQUE D'UNE EPROUVETTE COMPACTEE AVEC DES SOLUTIONS SALINES

Les propriétés d'adsorption de l'eau qui sont évaluées à partir d'une courbe d'adsorption d'eau pourraient faire partie d'un lot d'essai nouveau à réaliser pour caractériser les sols de digues.

Pour que la teneur en eau du sol de La Ville-aux-Dames augmente significativement, il semble nécessaire que le mécanisme d'humidification soit créé par de l'eau directement au contact de l'ouvrage (par exemple sous l'effet d'une crue et du développement d'un gradient hydraulique conduisant à la saturation du sol), ou par migration d'eau capillaire (par exemple sous l'effet d'une remontée d'eau en provenance de la nappe phréatique ou des infiltrations d'eau météorique).

Mécanisme d'humidification

Les phases d'humidification peuvent être la conséquence d'une augmentation de la présence de l'eau dans le sol en période de crue ou après de très fortes pluies. Au contact d'une masse d'eau libre la digue est soumise à un gradient hydraulique, et la teneur en eau va mécaniquement augmenter jusqu'à atteindre la saturation. L'humidification peut également être liée à une infiltration d'eau après des événements météorologiques pluvieux ou neigeux. La

quantité d'eau infiltrée dépend du bilan entre la pluviométrie, l'évapotranspiration et le ruissellement au sol. L'eau qui migre dans les deux cas au travers de la porosité du sol est une eau qualifiée de libre et qui évolue sous l'effet de la gravité. Les lois qui régissent ce comportement, quantifiable par la mesure de la conductivité hydraulique, sont issues des travaux de Darcy lorsque le milieu est complètement saturé. En milieu non saturé, la conductivité hydraulique sera déduite de lois, principalement établies par Van Genuchten, qui prennent en compte le degré de saturation et le potentiel capillaire du sol.

Une augmentation de l'eau dans le sol en lien avec des migrations d'eau d'origine strictement capillaire, en provenance des nappes phréatiques sous-jacentes à l'ouvrage, peut également être observée. L'eau migre au travers de la porosité sous l'effet des forces capillaires qui résultent de la taille des pores et des propriétés de surface des particules qui composent le sol.

Effet des cycles d'humidification-séchage sur les propriétés du sol : généralités

Le mécanisme de dégradation par dessiccation prend sa place dans des cycles alternant des phases d'humidification et de séchage. La phase de séchage est liée aux périodes sèches de l'année. La phase d'humidification dépendra de la combinaison des phénomènes météorologiques (principalement des excédents hydriques résultants des périodes pluvieuses ou neigeuses), de l'occurrence de crue (ou des variations du niveau du cours d'eau) et des variations du toit de la nappe phréatique. Le monitoring d'un remblai en sol traité situé à Héricourt (Haute-Saône) [4] a montré que l'on pouvait distinguer plusieurs parties d'ouvrage dans un ouvrage en terre en surélévation par rapport au terrain naturel en lien avec les variations d'humidité dans le matériau. Il résulte de ces observations que seule la partie en talus et au niveau de la plateforme subissent des fluctuations fortes de teneur en eau. Les parties basses de l'ouvrage soumises aux remontées d'eau capillaires évoluent paradoxalement très peu dès lors que l'ouvrage a été construit avec des sols proches de la saturation au départ. Par conséquent, les mécanismes de dégradation par dessiccation peuvent se localiser uniquement dans les parties superficielles (figure 6) de la digue.

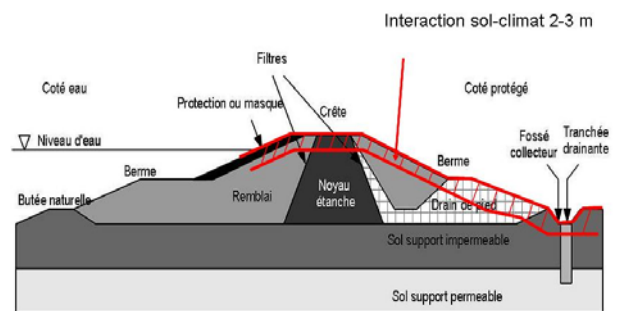


FIGURE 6 : SUPERPOSITION D'UN ZONAGE DE DIGUE TRADITIONNEL [7] AVEC LA ZONE EN INTERACTION AVEC L'ATMOSPHERE. LA ZONE HACHUREE PEUT SUBIR DES

MECANISMES DE DEGRADATION PAR DESSICCATION CONTRAIREMENT AU RESTE DE L'OUVRAGE.

Des travaux de modélisation [1] et les observations réalisées sur sites [2] [5] peuvent permettre d'estimer entre 0 et 3 m l'épaisseur de cette zone. L'appréciation de l'épaisseur résultera : (1) de la nature du sol concerné et de sa sensibilité aux phénomènes de dessiccation (une grave sera nettement moins sensible qu'une argile) et (2) de l'implantation géographique de l'ouvrage et de l'intensité des phénomènes météorologiques relevés localement.

Effet des cycles d'humidification-séchage sur une propriété du sol : la perméabilité

Le mécanisme de dégradation par dessiccation ne devient important qu'à partir du moment où ce phénomène a des répercussions sur les propriétés des matériaux. On sait par les travaux menés sur la sécheresse que certains sols sont plus aptes que d'autres à développer de la fissuration ou du retrait-gonflement [2] : c'est le cas des sols argileux et très argileux.

L'effet de cycles d'humidification-séchage a été testé sur des éprouvettes de sol de La Ville-aux-Dames compactés statiquement à la teneur en eau de 12,2 % et à une masse volumique sèche de $1,85 \text{ t/m}^3$ (correspondant à la masse volumique sèche obtenue pour cette teneur en eau avec une énergie de compactage normale).



FIGURE 7 : DEUX EPROUVETTES 5×10 CM DE SOL DE LA DIGUE DE LA VILLE-AUX-DAMES, COMPACTEES STATIQUEMENT, ET HUMIDIFIEES PAR REMONTEE CAPILLAIRE. LES EPROUVETTES REPOSENT SUR DES PIERRES POREUSES SUR UN FOND D'EAU ET SE SATURENT EN L'ESPACE DE 4 HEURES (IMM).

Après confection de l'éprouvette, les cycles ont débuté par un premier séchage à l'air libre qui permet de faire baisser significativement la teneur en eau. Le séchage est suivi par une phase d'humidification ce qui donne un cycle complet. Deux modes d'humidification différents ont été appliqués. Un lot d'éprouvettes a été humidifié sous atmosphère humide à 98,5 % d'humidité relative et 35 °C et un autre lot a été

humidifié par remontée d'eau par capillarité (figure 7).

Après 1, 3, 6 et 9 cycles alternant séchage et humidification, les deux séries d'éprouvettes ont été saturées dans une cellule triaxiale avant de mener un essai de mesure de perméabilité à charge constante sous un gradient hydraulique de 2. Les résultats des essais conduits selon ce protocole de dégradation par dessiccation sont présentés figure 8.

Les premiers résultats obtenus montrent qu'après un cycle, la perméabilité diminue. Après trois cycles, la perméabilité augmente et devient supérieure à la perméabilité initiale. Au-delà de 3 cycles, et quel que soit le nombre de cycles appliqués, la perméabilité semble rester constante. Les mêmes observations ont été faites dans le cadre de la thèse de Mehenni [11].

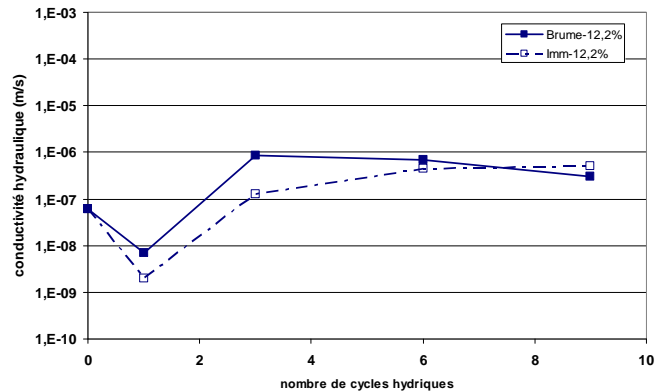


FIGURE 8 : CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE A 10 °C OBTENUE PAR ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE CONSTANTE SUR DES EPROUVETTES DE SOL COMPACTE A $w = 12,2 \%$, AYANT SUBI UN PROCESSUS DE DEGRADATION PAR IMPOSITION DE CYCLES DE SECHAGE ET HUMIDIFICATION EN ATMOSPHERE HUMIDE (BRUME) OU REMONTEE CAPILLAIRE (IMM)

Cela démontre qu'une propriété obtenue par construction, dans notre étude, la perméabilité sur une éprouvette confectionnée par compactage statique, peut évoluer et se dégrader dans le temps. L'imposition de cycles hydriques alternant séchage et humidification modifie la structure acquise par compactage et modifie la performance à l'échelle de l'éprouvette.

À ce stade, l'interprétation de ce résultat conduit à émettre l'hypothèse qu'un ouvrage en sol compacté pour lequel on réceptionne ou on recherche un certain niveau de perméabilité au moment de la réception, peut subir des modifications dans la zone de l'ouvrage en interaction avec l'atmosphère à l'échelle de quelques années (une année pouvant hypothétiquement être représentée par au minimum un cycle d'humidification-séchage l'équivalent d'un hiver suivi d'un été).

Il est utile de préciser qu'aucune fissure visible n'était détectable à l'œil nu sur les éprouvettes, quel que soit le nombre de cycles appliqué. Des premières observations en tomographie de Rayons X montrent que la modification de la perméabilité est très probablement liée à des modifications de la micro- et de la macroporosité à l'échelle des agrégats

limoneux/argileux.

Impact d'un mécanisme de dégradation par dessiccation sur le scénario de rupture

À partir de leur construction, les ouvrages sont en interaction avec leur environnement. L'ouvrage est amené à vieillir plus ou moins rapidement dans le temps et à subir des mécanismes de dégradation variables selon l'implantation géographique et l'environnement immédiat de l'ouvrage.

Les mécanismes de dégradation peuvent être le résultat soit des effets de la météorologie, soit des interactions avec le vivant, soit des interactions avec les mouvements d'eau (tableau 1). Chacune de ces grandes familles de dégradation dépend de l'existence ou non de l'élément moteur de la dégradation, par exemple la présence d'animaux fouisseurs dans le cas des interactions avec le vivant, ou la possibilité d'apparition d'un gel dans le cas des effets de la météorologie.

L'évolution de chacun de ces mécanismes peut être progressif, brutal ou binaire (figure 2). Certains de ces mécanismes peuvent être détectés visuellement lors des Visites Techniques Approfondies (VTA) comme c'est le cas pour les terriers des animaux fouisseurs, dont l'évolution peut être qualifiée de brutale, voire de binaire. D'autres ne peuvent être détectés qu'à partir de l'apparition d'un défaut. C'est le cas de la dégradation par dessiccation. L'évolution est lente et profonde. La manifestation de l'évolution ne devient évidente qu'à partir de l'apparition soit de fissures de dessiccation soit de tassements par retrait des sols. Ces deux défauts peuvent être signalés lors des VTA mais la causalité avec le mécanisme de dégradation par dessiccation n'est pas forcément établie lors du relevé.

L'étude des perméabilités de sols compactés vieillies par des cycles d'humidification-séchage montre que le défaut visible n'est pas le seul facteur à prendre en compte. La performance est affectée dans le temps avec une augmentation par exemple de la perméabilité après quelques cycles hydriques. Le nombre d'années de vie de l'ouvrage après sa construction sera une donnée à prendre en considération.

Mais une année de vie d'un ouvrage situé dans un environnement globalement humide n'aura pas la même importance qu'une année de vie dans un environnement alternant des périodes humides avec des périodes sèches. La durée pendant laquelle une performance est garantie dépendra de la localisation géographique de l'ouvrage et de la météorologie du site.

Un premier essai de cartographie des zones de vulnérabilité aux phénomènes météorologiques a été tenté en représentant des zones de mêmes écarts hydriques entre les périodes humides et sèches en se basant sur les indices Ra (rapport d'aridité), Rh (rapport d'humidité) et IHU (indice d'humidité des sols) de Thornwaite établis dans le cadre du travail de rédaction du guide drainage routier [12]. Cette représentation du territoire (figure 9) semble assez cohérente avec la forte possibilité qu'un ouvrage situé dans le Sud de la France soit

plus affecté par la météorologie qu'un ouvrage situé dans l'Est ou le Centre de la France.

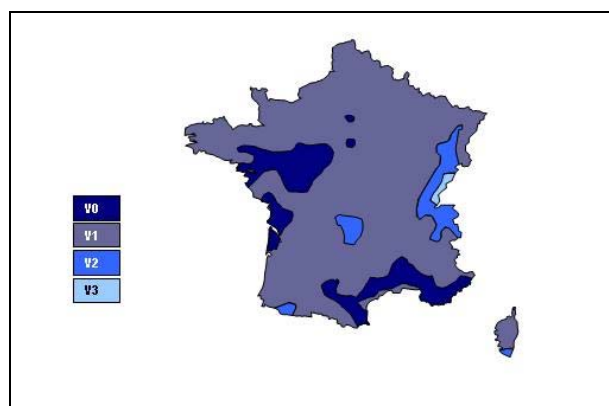


FIGURE 9 : PROPOSITION DE CARTOGRAPHIE DES ZONES D'ECARTS HYDRIQUES AU SOL ENTRE L'ETE ET L'HIVER TRES FORTS (V0), FORTS (V1), MODERES (V2) ET FAIBLES (V3) EN MOYENNE. SYNTHESE REALISEE A PARTIR DE DOCUMENTS DE METEO-FRANCE [12]

À chacune des zones V0, V1, V2 et V3 pourra être associé un protocole de vieillissement en laboratoire par séchage-humidification avec des durées ou des intensités de séchage et humidification représentative du site. Ainsi les courbes des propriétés mesurées permettront d'évaluer le rythme d'évolution dans le temps et d'analyser le risque sur la stabilité globale de l'ouvrage dans un environnement de sollicitation « sévère » ou « modéré ».

L'ensemble de l'ouvrage ne sera pas également affectée par le même phénomène météorologique extérieur : on peut à ce stade des réflexions penser que seule la partie superficielle de l'ouvrage (c'est-à-dire probablement entre 0 et 3 m sous la surface) sera concernée par les échanges sol-atmosphère (figure 6) et que les effets de ces échanges ne seront importants que pour les matériaux contenant une certaine proportion de particules fines. Les matériaux drainants par exemple ne seront pas affectés par le mécanisme de dégradation par dessiccation mais seront affectés par des mécanismes de dégradation en lien avec le vivant et plus particulièrement aux développements de micro-organismes.

Perspectives

Le travail de réflexion concernant les mécanismes de dégradation doit encore se poursuivre dans les années à venir. Les premiers travaux menés montrent des perspectives très intéressantes d'évolution portant sur la caractérisation des effets de la météorologie et de l'intensité des écarts hydriques sur la durabilité des performances de la fonction étanchéité acquises par construction. C'est le cas ainsi de la conductivité hydraulique (perméabilité) qui est affectée significativement par des cycles hydriques, générés en laboratoire.

Il semble également intéressant de mener des réflexions sur le zonage de l'ouvrage affecté ou non par des mécanismes de dégradation et par l'identification des mécanismes concernés

en lien avec la fonction et la nature des matériaux utilisés. La généralisation d'ouvrages suivis par des capteurs disposés dans ce sens serait un plus pour aider à mieux conceptualiser ce zonage.

Les perspectives à long terme portent sur l'évaluation de la durabilité des digues, évaluation qui passe par une meilleure prise en compte de l'évolution des performances dans le temps en fonction de l'intensité des phénomènes extérieurs à l'ouvrage, hors épisode de crue. Par exemple, on peut imaginer des courbes de dégradation d'une fonction donnée, par exemple l'étanchéité, établies pour des matériaux sensibles à la dessiccation en fonction du zonage géographique et de l'implantation de la digue. En reprenant les résultats présentés sur la perméabilité d'un limon sableux, il serait alors possible de définir la courbe de dégradation des matériaux situés en partie superficielle de l'ouvrage par un mécanisme de séchage dans un contexte V0 et V3 (figure 10).

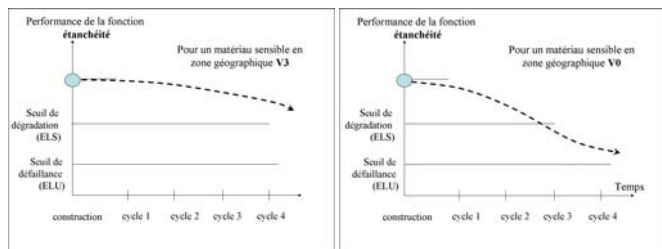


FIGURE 10 : COURBE DE DEGRADATION DES PERFORMANCES D'UN MATERIAU UTILISE POUR SA FONCTION D'ETANCHEITE SELON LA LOCALISATION DE LA DIGUE : A GAUCHE EN ZONE V3 (FAIBLE SOLLECITATION), A DROITE EN ZONE V0 (TRES FORTE SOLLECITATION).

À plus longue échéance, l'analyse conjointe de la dégradation des performances et de l'occurrence des crues permettra d'analyser le risque de rupture si un événement apparaît lors d'une période de vulnérabilité de l'ouvrage.

Conclusion

Le vieillissement des matériaux composants des digues est un phénomène à prendre en compte dans l'évaluation de la performance de l'ouvrage à partir de sa construction. Certains auteurs proposent d'ores et déjà d'ajouter aux mécanismes de ruptures connus un mécanisme qui résulte spécifiquement de la dégradation des performances de certains matériaux sous l'effet de la dessiccation. Plusieurs scénarios peuvent s'imaginer avec à l'origine une dégradation par l'effet de la dessiccation. Le scénario de rupture appelé « soulèvement de blocs fissurés par la sécheresse » intervient en cas de combinaison d'une occurrence de crue avec une période de vulnérabilité de la digue liée à l'apparition de fissures de retrait, suivi d'une défaillance par surverse.

Les travaux présentés dans cet article montrent que les parties superficielles de l'ouvrage (entre 0 et 3 m sous la surface)

peuvent, dans des environnements géographiques soumis à des écarts hydriques forts (entre période sèche et humide), et avec des matériaux sensibles à ces phénomènes, suivre un mécanisme de dégradation par dessiccation qui conduit au bout de quelques années (au minimum 3 ans pour des sols naturels limono-sableux) à la probabilité d'apparition d'un mécanisme de rupture par soulèvement de blocs fissurés par la dessiccation des sols. La dégradation par dessiccation est caractérisée par de la création de fissures mais également par une modification de la perméabilité intrinsèque du sol qui augmente d'une puissance de 10 la perméabilité initiale acquise par compactage après 3 cycles d'humidification-séchage.

On peut supposer que dans les zones géographiques de forts écarts hydriques (par exemple près de la Rochelle ou dans la région PACA), le mécanisme de dégradation par dessiccation aura une intensité très forte et donc rapidement perceptible. Dans une région de faible écart hydrique, par exemple vers Belfort, les ouvrages subiront un mécanisme de dégradation par dessiccation très atténué ou extrêmement long à se développer.

L'analyse de la durabilité de la digue peut être conduite en améliorant notre connaissance du processus de vieillissement en fonction de l'intensité des événements et des types de matériaux concernés.

Références

- [1] AN N., HEMMATI S., CUI Y.-J.. 2016. *Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations in an embankment due to soil-atmosphere interaction*. Computers and Geotechnics. Vol.83. pp40-51.
- [2] AUDIGUIER M., Cojean R., Geremew Z., Laribi S., Fleureau JM., Souli H., Cui YJ., Tang AM., Mantho A., Masroui F., Mard M., Djeran-Maigre I., Pothier C., Didier G., Alimi-Ichola I., Tessier D., Breda N., Coquet Y., Vincent M. 2007. *Projet ARGIC (tâche 10) : synthèse bibliographique sur l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement*. Rapport coordonné par Armines (Centre de Géosciences). 153 pages.
- [3] BAMBARA G., CURT C., MERIAUX P., VENNETIER M., VANLOOT P., 2014. *Évaluation de la vulnérabilité des digues fluviales soumises au développement d'une végétation arborescente*. 32^{èmes} rencontres universitaires de génie civil, Juin 2014, Orléans, France. pp.379-388. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01119026>
- [4] BOUSSAFIR Y., BICALHO K., CUI Y.-J. et MERCADIER D. 2018a. *Vers une meilleure compréhension des interactions sol-atmosphère d'un remblai grâce au monitoring*. Coll. JNGG 2018 Marne-la-Vallée. 13-15 juin 2018.
- [5] BOUSSAFIR Y., SAUSSAYE L., DISSLER E. et DURAND E. 2018b. *Des anomalies géotechniques à l'origine de propositions d'indicateurs de durabilité pour les digues fluviales*. Coll. JNGG 2018 Marne-la-Vallée. 13-15 juin 2018.
- [6] CIRIA, CUR, CETMEF. 2009. *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques*. Version française du Rock Manual. P09-01, Edition Cetmef Compiègne. 1302 pages
- [7] CFBR. 2015. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Editions du Comité Français des Barrages et Réservoirs. 132 pages. http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2015_remb lai.pdf
- [8] DYER M., UTILI S., ZIELINSKI M. 2007. *The influence of desiccation fine fissuring on the stability of flood embankments*. FRMRC Research Report UR11. www.floodrisk.org.uk

- <https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads/UR11%20not%20signed%20off.pdf>
- [9] LAUTRIN D. 1988. *Le vieillissement des petits barrages en remblai*. Ingenieries - E A T, 1998, p. 55 - 67. <hal-00461189>
- [10] LCPC. 2010. *Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton - Application de l'approche performantielle*. Techniques et méthodes des LPC - Guide technique. 56 pages. Réf. DT5731.
- [11] MEHENNI, 2015. *Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités*. Thèse Univ. Lorraine. 213 pages et 11 annexes. <http://www.theses.fr/2015LORR0299#>
- [12] SETRA. 2006. *Drainage routier*. Guide technique. Edition Sétra, réf. 0605. 91 pages.
- [13] SIMM J., WALLIS M., SMITH P., TOURMENT R., VEYLON G., DENIAUD Y., DURAND E., Mc VICKER J., HERSH-BURDICK R. 2013. *The significance of failure modes in the design and management of levees – a perspective from the International Levee Handbook team*. Colloque Comprehensive Flood Risk Management. Ed. Klijn & Schweckendiek, ©Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62144-1. http://eprints.hrwallingford.co.uk/573/1/HRPP539_The_significance_of_failure_modes_in_the_design_and_management_of_levees.pdf
- [14] TOURMENT R., BEULLAC B., DENIAUD Y., SIMM J., WALLIS M., SHARP M., POHL R., VAN HEMERT H. 2013. *L'ILH et les modes de défaillance des digues : présentation d'une démarche d'analyse, prise en compte de mécanismes élémentaires dans des scénarios. Proposition d'une méthode d'analyse associée. Lien avec les études de dangers*. Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, – 2ème colloque national - Dignes 2013, Jun 2013, Aix en Provence.