

QUELS ESSAIS DE LABORATOIRE POUR EVALUER LA DURABILITE DES MATERIAUX DE DIGUE ?

WHAT KIND OF TEST TO APPRECIATE THE SUSTAINABILITY OF LEVEES' MATERIAL ?

Margot DE BAECQUE¹, Yasmina BOUSSAFIR¹

¹ Université Paris-Est – Ifsttar – GERS – laboratoire Sols, Roches et Ouvrages géotechnique, 77 447 Marne la Vallée cedex 2

RÉSUMÉ – La mise en place d'essais représentatifs pour caractériser la durabilité des matériaux des digues s'appuie sur la connaissance de la nature, l'amplitude et la fréquence des phénomènes environnementaux susceptibles de dégrader les matériaux. La spécificité des environnements fluviaux et maritime, ainsi que la spécificité des matériaux naturels, traités à la chaux ou au ciment sont pris compte dans l'élaboration des essais.

ABSTRACT – New tests able to study the sustainability of levees' materials should be based on the knowledge of the type, the amplitude and the frequency of the environmental phenomena that can damage the materials. The specificity of the fluvial and maritime environments, as well as the specificity of natural materials, treated with lime or cement are taken into account in the development of the tests.

1. Introduction

Les matériaux utilisés pour la construction des digues (ouvrages hydrauliques) sont choisis en fonction de leur usage dans l'ouvrage et de l'adéquation de leur propriété avec le dimensionnement attendu. Le dimensionnement se fait par rapport aux états limites définis par le CFBR (CFBR, 2015). Les règles se retrouvent également dans l'International Levee Handbook (CIRIA, 2013) et la norme NF EN 1997-1 (Afnor, 2005)

Le calcul de la stabilité est basé sur le profil en travers de la digue qui permet de visualiser les différentes parties d'ouvrages et les matériaux qui les composent (Figure 1).

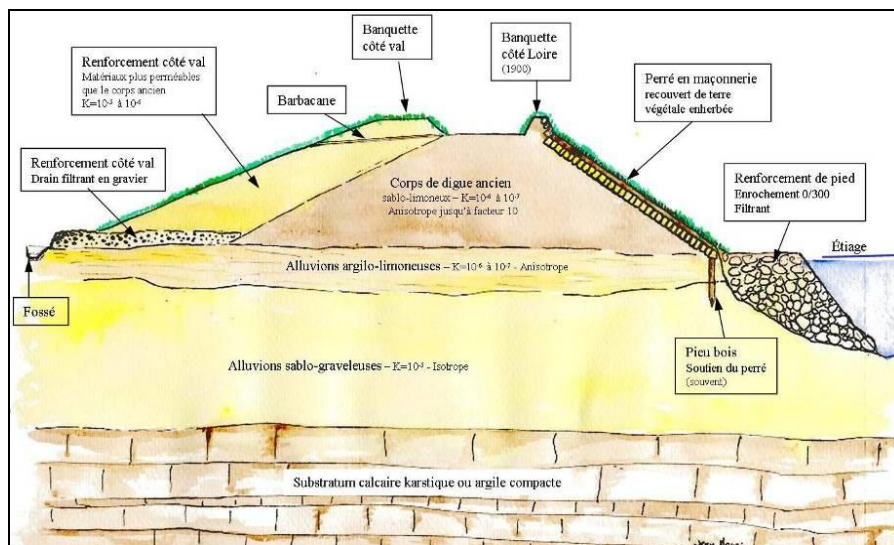


Figure 1 : exemple de profil en travers d'une digue de Loire (©Jean Maurin)

Les caractéristiques sont souvent établies avec des essais de laboratoire normalisés qui prennent en compte les propriétés de nature et les propriétés mécaniques évaluées à la saturation. Les valeurs caractéristiques des sols sont intégrées dans un modèle géotechnique qui est ensuite testé à la rupture en appliquant des lois de comportement.

Les analyses sont réalisées en modélisant des situations de crue sur un profil en travers avec ces données de sols. Cela conduit à évaluer la stabilité avec une maximum de précaution. Néanmoins, les sols qui composent les ouvrages en terre sont des matériaux qui évoluent dans le temps : ils peuvent tasser, se rétracter ou gonfler, ils peuvent se fissurer, s'éroder. Les sols traités peuvent évoluer du fait de la transformation physico-chimique des composés contenus dans le sol. En bord de mer, la présence de sel peut avoir un effet sur les matériaux. Et un ouvrage construit dans le Nord de la France ou dans le Sud de la France se trouvera dans un environnement météorologique différent.

Or aucune approche méthodologique n'est proposée pour évaluer la vitesse d'évolution des propriétés dans le temps dans un environnement donné. Aucune réflexion n'est proposée dans le cas des ouvrages en terre pour définir les environnements et les paramètres extérieurs ayant un impact sur l'évolution des propriétés des sols. Pour apporter des réponses en terme de durabilité (au sens de la norme NF EN 1990-1), les laboratoires commencent à pratiquer de nouveaux essais, dont certains sont présentés ci-dessous.

2. Evaluation des performances des matériaux dans le temps et en fonction des environnements

Les performances acquises au moment de la réalisation de l'ouvrage peuvent évoluer dans le temps par rapport à l'environnement et l'état initial. L'analyse de l'évolution de la performance en fonction du temps correspond à l'analyse de la durabilité d'un matériau par rapport à une fonction donnée.

2.1. Les performances initiales des matériaux

Les matériaux qui sont utilisés pour les ouvrages hydrauliques peuvent correspondre à une des catégories suivantes :

- des matériaux naturels (classification sol selon la norme NF P11-300)
- des produits élaborés souvent de carrières (classification enrochement ou granulats)
- des matériaux améliorés par ajout de liants (chaux, liant hydrauliques, ciments) ou par de nouvelles technologies (résines, bio-remédiation ...).

2.1.1. Cas des matériaux naturels

Les matériaux naturels peuvent constituer le corps de l'ouvrage ou les élargissements côté zone protégée.

Dans ces parties d'ouvrage la performance est évaluée à partir de :

- la masse volumique humide, la cohésion et l'angle de frottement pour évaluer la stabilité mécanique;
- la perméabilité (conductivité hydraulique) pour évaluer les effets sur le risque de soulèvement hydraulique, l'érosion interne, la protection externe (cas des parements étanches) ou interne de l'ouvrage (cas des noyaux étanches).

Certaines propriétés dépendent des conditions de réalisation. C'est le cas par exemple du compactage et la teneur en eau initiale qui a une très nette influence sur l'angle de frottement interne, la microstructure et la perméabilité après mise en œuvre.

2.1.2. Cas des matériaux améliorés/stabilisés à la chaux

Les matériaux traités à la chaux peuvent constituer le corps de l'ouvrage ou avoir une fonction de protection côté eau de la digue. Pour le corps d'ouvrage les performances sont évaluées selon les mêmes critères que les sols naturels (stabilité mécanique et perméabilité). Les performances de la couche de protection sont évaluées sur sa résistance à l'érosion.

Les conditions de réalisation contrôlent les propriétés hydrauliques du matériau. Un compactage par pétrissage côté humide de l'optimum Proctor est indispensable pour obtenir une conductivité hydraulique équivalente à celle d'un sol non traité.

2.2. Les facteurs d'évolution des performances

À propriété initiale identique, un matériau ne vieillira pas de la même manière selon l'environnement dans lequel il baignera. On peut ainsi identifier :

- **L'environnement climatique** : selon l'endroit géographique où l'ouvrage sera emplanté l'ensoleillement, la pluviométrie, le gel seront différents ;
- **L'activité faunistique et biologique** : d'importance très variable, elle se traduit par une modification de l'intégrité de l'ouvrage. Ces modifications peuvent être liées à l'action d'animaux fouisseurs ou au réseau racinaires ;
- **Les sollicitations** : le nombre de crue, leur intensité, et leur récurrence modifient l'état des matériaux, l'état de l'ouvrage
- **Les lois d'évolution des matériaux** : chaque matériau (roche, sol, matériaux traités) a des lois de comportement dans le temps qui sont très variables selon la composition et les conditions initiales de mise en œuvre ;
- **La nature de l'aléa** :
 - l'aléa marin est différent de l'aléa fluvial (possibilité de zone de transition) ;
 - importance des chlorures dans l'air ou le sol ;
- **D'autres facteurs** :
 - les variations du toit de la nappe phréatique ;
 - la présence de constructions enterrées : tuyaux, maisons ...
 - la position des parties d'ouvrage au sein de l'ouvrage : certaines parties sont plus sollicitées que d'autres
 - la présence de cavités souterraines

Contrairement aux règles de dimensionnement performantiels des ouvrages d'art par exemple (LCPC, 2010), ces environnements ne sont pas codifiés pour dimensionner les levées dans le temps. Dans un cadre de changement climatique ou pour une amélioration des règles de gestion et d'entretien du parc des ouvrages hydrauliques il pourrait être intéressant d'apporter des éclairages sur les notions de durée de vie, sur les performances atteintes au bout d'un certain laps de temps ou sur l'occurrence d'un aléa à un moment critique de l'année (par exemple en période de gel ou de forte pluviométrie) voire la répétition d'un aléa dans un moment de forte vulnérabilité de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage.

Le Tableau 1 extrait de (Mehenni, 2015) présente le conditionnement et les sollicitations hydriques appliquées pour évaluer la durabilité des matériaux. Elle illustre la disparité des pratiques en matière de sollicitation hydrique et souligne notre difficulté à faire le lien entre le type de sollicitation à appliquer et le type d'environnement.

On y identifie quatre paramètres sur lesquelles les réflexions d'homogénéisation des pratiques doivent porter dans le futur :

- **la nature des sollicitations** :
 - humidification : par remontée d'eau capillaire, pulvérisation d'eau, imbibition ;
 - séchage : à l'air libre, à l'étuve

- **la température** : on relève les températures suivantes
 - humidification : 21°, 22°, température ambiante et pas d'indication
 - séchage : 20°, 22°, 24°, 35°, 40°, 45°, 60°, 71°,
- **la durée des phénomènes** :
 - humidification : 5h, 12h, 24h, 48h, 60h, 168 h (7jours), 5 semaines, voire le temps nécessaire pour atteindre l'objectif
 - séchage : 12h, 42h, 48h, 120h, et le temps nécessaire pour atteindre l'objectif

Pour évaluer la durabilité des digues et donc reproduire des sollicitations réalistes et homogénéisées en laboratoire il conviendrait de disposer :

- d'une classification des environnements de l'ouvrage qui permettrait de caler des valeurs de sollicitation à imposer sur éprouvettes ;
- d'une classification des matériaux et de leur évolution dans le temps.

La détermination des seuils et valeurs de référence devrait être établie grâce à des retours d'expérience sur site instrumenté.

3. Évaluation de la durabilité des digues

3.1. Les essais qui se pratiquent actuellement

3.1.1. Reproduire les effets des variations hydriques

Les sollicitations qui permettent d'accélérer les variations d'états hydriques, vont de la saturation complète par immersion, à la saturation partielle en atmosphère humide, au séchage partiel en atmosphère faiblement humide, au séchage complet en étuve.

L'immersion dans l'eau d'une éprouvette ou le séchage à l'étuve reproduisent des phénomènes extrêmes. L'immersion peut être utilisée pour tester le comportement de parties d'ouvrages en terre non revêtus par la terre végétale et situés dans des zones au contact de l'eau. Le séchage à l'étuve peut être assimilé à un environnement très sec et chaud pour des parties d'ouvrages en terre non revêtues. La présence d'une couverture végétale atténue fortement l'amplitude des agressions hydriques et on peut estimer que ces deux modalités de tests sont peu représentatifs de la réalité.

Le séchage ou l'humidification dans des enceintes à humidité relative maîtrisée représente le mieux la variation d'état hydrique au sein d'un remblai. Les amplitudes à appliquer dépendent du milieu à étudier mais ces informations ne sont pas encore disponibles et dépendent de retours d'expérience basés sur des sites instrumentés.

Tableau 1 : les principales références permettant d'évaluer les performances des matériaux en lien avec des cycles hydriques et description des méthodes (Mehenni, 2015)

Etude	Méthode d'humidification	Méthode de séchage
ASTM-D559, 1996	Eprouvette libre Immersion dans l'eau à (21±1,5°C) Durée : 5h	Eprouvette libre Passage à l'étude (71°C) Durée : 42 h
Rao et al., 2001	Eprouvette placée dans une bague de consolidation Absorption d'eau à partir d'un lit de matériau sableux humide Durée : 48 h	Eprouvette placée dans une bague de consolidation Séchage par ventilation d'air chaud (40°C) Durée : 48 h
Hoyos et al., 2005	Dispositif spécifique qui permet le retrait-gonflement Immersion dans l'eau à (22°C) Durée : 12 h	Dispositif spécifique qui permet le retrait-gonflement Passage à l'étuve (71°C) Durée : 12 h
Guney et al., 2007	Eprouvette dans une cellule de consolidation permettant le retrait-gonflement Ajout d'eau jusqu'à la stabilisation du gonflement Durée : 60 h	Eprouvette libre Séchage à l'air libre (24°C) Durée : temps requis pour le retour à la teneur en eau initiale

Etude	Méthode d'humidification	Méthode de séchage
Khattab et al., 2007	Eprouvette placée dans une cellule oedométrique, gonflement possible Imbibition d'eau à la base de la cellule Durée : saturation de l'éprouvette	Eprouvette placée dans un dessiccateur, imposition de l'humidité relative par solution saline (20°C) puis passage à l'étuve (60°C) Durée : 48 h par palier
Kalkan, 2011	Eprouvette placée dans une cellule oedométrique, gonflement possible Immersion dans l'eau à température ambiante Durée : 24 h	Eprouvette placée dans une cellule oedométrique Séchage à l'air libre (22°C) Durée : 120 h
Tang et al., 2011	Eprouvette libre Pulvérisation d'eau sur l'éprouvette, puis éprouvette entourée de film en plastique pour homogénéisation de la teneur en eau Durée : temps requis pour atteindre la teneur en eau souhaitée, 24 h min.	Eprouvette libre Séchage à l'air libre, puis éprouvette entourée de film en plastique pour homogénéisation de la teneur en eau Durée : retour à la teneur en eau initiale
Estabragh et al., 2013	Eprouvette placée dans une cellule oedométrique modifiée avec un système d'application de température Imbibition d'eau avec gonflement à charge constante Durée : stabilisation du gonflement 168 h (7 jours)	Eprouvette placée dans une cellule oedométrique modifiée avec un système d'application de température Séchage par augmentation de la température de la cellule (45°C), le drainage étant possible d'eau Durée : stabilisation du retrait
Akcanca & Aytekin, 2014	Eprouvette placée dans un perméamètre à paroi rigide Imbibition d'eau jusqu'à saturation Durée : 5 semaines	Eprouvette placée dans un perméamètre à paroi rigide Passage à l'étuve (35±5°C) Durée : 48 h

Les études en cours à l'Ifsttar et au Cerema de Blois sur la durabilité des matériaux qui composent les digues, ont conduit les équipes à tester différentes possibilités d'humidification des éprouvettes, avec des efficacités variables :

- la conservation en confinement saturé;
- l'humidification par vaporisation et humidificateurs ;
- l'humidification en enceinte à humidité relative imposée (Figure 2 c et d) ;
- l'humidification par remontée d'eau capillaire (figure 2 a et b) ;
- l'humidification par immersion.

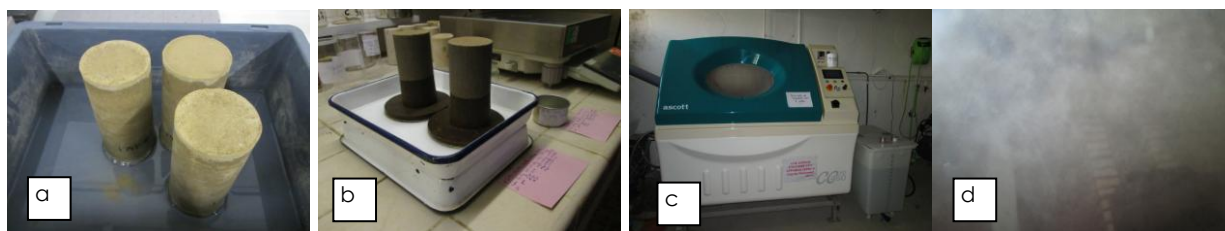


Figure 2 : modes d'humidification retenus pour tester la durabilité des matériaux de digues (a) remontée capillaire dans des limons traités chaux en environnement salin, (b) remontée capillaire d'eau claire dans des sols, (c) et (d) enceinte de confinement à humidité relative contrôlée (Cerema Blois)

La courbe de la Figure 2 représente l'évolution du degré de saturation d'une même éprouvette compactée statiquement, en fonction de différents modes d'humidification.

Le 1er mode de conservation est celui en confinement, dans un dessiccateur. La perte d'eau est forte et passe de 70% à près de 9% en l'espace de 5 jours.

L'éprouvette est ensuite mise dans une cocotte minute étanche (étape 2), avec de l'eau dans le fond du récipient. La saturation augmente mais très lentement. Elle stagne autour de 18%. En 3ème étape, l'éprouvette est confinée dans un cristallisateur avec de l'eau au fond du récipient. L'éprouvette sèche et perd de la masse au lieu de s'humidifier. L'étape 4 correspond à une humidification par vaporisation d'eau. Le gain en masse est immédiat. Cependant, la vaporisation n'est pas uniforme et est difficile à maîtriser sur toute la surface de l'éprouvette. Il faut également ne pas trop vaporiser pour ne pas détruire l'éprouvette par un excès d'eau (le matériau étant très dispersif). L'éprouvette est ensuite

conservée en cocotte-minute étanche. Au bout d'un mois, la masse de l'éprouvette a diminué ce qui montre le peu d'efficacité du dispositif.

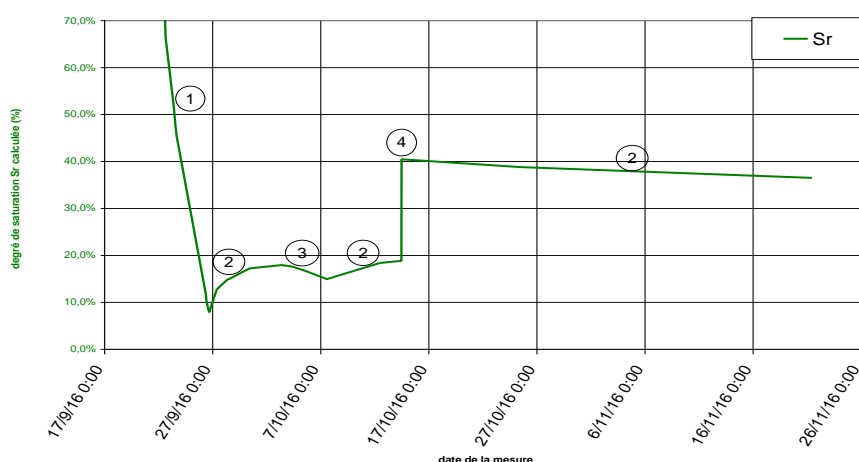


Figure 2. Suivi du degré de saturation sur une éprouvette de sol compacté statiquement à l'optimum Proctor.

Les mêmes observations ont été publiées par (Eijjaouani et al., 2013) montrant la difficulté d'humidifier les sols en laboratoire. Ceci montre l'importance d'établir la **courbe d'adsorption d'eau** pour chaque matériau. Elle permet de mettre en évidence l'aptitude d'un matériau à capter les molécules gazeuses à la surface des particules. Un équilibre s'établit entre l'humidité relative de l'air et la quantité d'eau pouvant condenser à la surface des particules du sol (Daian, 2010).

Pour le sol testé, il faut atteindre des humidités relatives supérieures à 98% pour saturer l'éprouvette. Seule l'humidification dans une enceinte à humidité relative contrôlée (Figure 2 c et d) permet d'arriver à ce résultat. Cette observation permet de comprendre l'assèchement de surface que subissent les digues en l'absence d'inondation ou de très forte pluviométrie (Boussafir et al., 2018).

3.1.2. Reproduire les effets du sel

Les digues maritimes sont en contact avec l'eau salée, soit directement l'eau de mer soit l'eau saumâtre des nappes côtières dont les compositions chimiques varient. La salinité des océans varie elle aussi localement. Au laboratoire il faut faire en choix entre reproduire la composition locale d'un site, ou s'affranchir de cette variabilité en étudiant l'effet sur les matériaux d'une eau de mer normalisée (P18-837), correspondant à la composition moyenne des océans en surface (Tableau 2).

Tableau 2. Composition de l'eau de mer artificielle pour 1 litre (P18-837)

Composé chimique	Masse (g)
Eau distillée	1000
ClNa	30
Cl ₂ Mg, 6H ₂ O	6
SO ₄ Mg, 7H ₂ O	5
SO ₄ Ca, 2H ₂ O	1,5
CO ₃ KH	0,2

La pénétration du sel dans l'échantillon a lieu durant une phase d'humidification par montée capillaire ou vaporisation. Lors des phases de séchage, les ions précipitent et ne peuvent être remobilisés qu'à la phase d'humidification. L'accumulation des sels dans le matériau peut être suivie par des méthodes électriques au laboratoire ou in-situ (Du Plooy et al, 2015).

4. Comment prendre en compte les environnements des digues ?

4.1. les variations hydriques liées à la météorologie

L'environnement météorologique peut être caractérisé par des écarts hydriques modérés entre l'été et l'hiver, V2, comme l'illustre la Figure établie à partir des cartes du guide drainage (Sétra, 2006). Un travail mené sur un remblai à Héricourt et à Rouen montre en effet que les interactions sol-climat sont peut-être dépendants de ces écarts.

Une digue construite dans la région d'Aix-en-Provence (Digue2020), en zone V0, devra prendre en compte des écarts hydriques plus importants qu'un projet en zone V1, 2 ou 3.

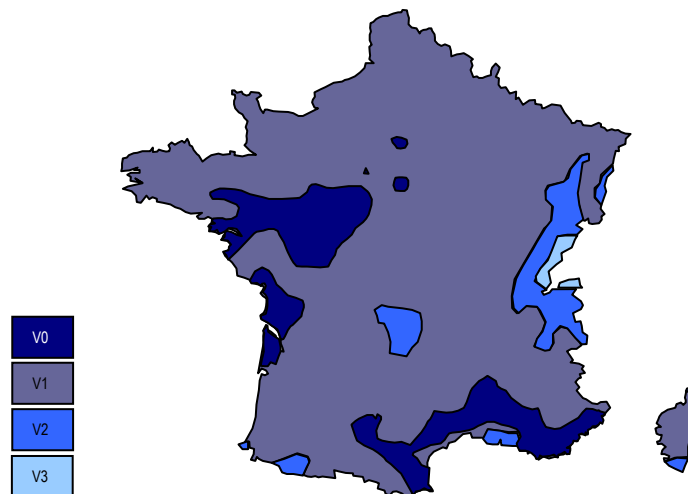


Figure 3 : carte de synthèse présentant les zones géographiques ayant des écarts hydriques entre été et hiver très forts (V0), forts (V1), modérés (V2) et faibles (V3) (selon Sétra, 2006).

4.2. les données disponibles sur les chlorures

Les données de composition chimique de l'eau de mer et des nappes côtières sont rares ponctuelles et peuvent varier dans le temps. C'est pourquoi c'est la fréquence d'exposition à une eau saline, plutôt que sa composition chimique exacte qui est choisie pour caractériser l'environnement d'une digue maritime. Sur le projet Digue 2020 (plate forme expérimentale dédié à l'étude des digues maritime en sol traité à la chaux), la teneur en eau, la salinité dans l'ouvrage et les conditions météorologiques seront enregistrées au cours du temps. A posteriori, les conditions de sollicitations au laboratoire seront mises en regard avec les données issues de l'instrumentation de l'ouvrage Digue 2020 dont la construction est prévue à l'automne 2018.

5. Application à des matériaux de digues

Dans le cadre du projet Digue2020 une plate forme expérimentale de recherche sur les digues de protection contre les submersions marines sera construite en Camargue (digue à la mer gérée par le Symadrem). Du sol traité à la chaux sera utilisé pour réaliser cet ouvrage. Le sol naturel sera prélevé à proximité de la plate forme (<10km). Ce même sol est utilisé pour l'étude de durabilité au laboratoire, les objectifs de compactage et de teneur en eau de préparation sont identiques aux objectifs de l'ouvrage échelle 1. La digue sera instrumentée avec des capteurs TDR et des relevés météorologiques seront réalisés. La représentativité de l'étude de laboratoire sera évaluée par comparaison entre les cinétiques de dégradation du matériau au laboratoire et in-situ au regard des sollicitations réelles de l'environnement.

Un autre projet d'instrumentation de digue de Loire (ODIL) vise également à acquérir des données sur des sols non traités couplées à des données météorologiques. Seules plusieurs instrumentations dans des secteurs variés permettront de statuer sur les natures et les amplitudes des sollicitations à appliquer en laboratoire.

6. Conclusions

Les essais au laboratoire sont nécessaires pour prendre en compte l'évolution des propriétés des matériaux liée aux conditions environnementales. La mise en place d'un protocole expérimental pour évaluer la durabilité d'un matériau doit intégrer la spécificité des matériaux utilisés, ainsi que la nature, l'intensité et la fréquence des sollicitations environnementales s'exerçant sur les ouvrages. Pour les digues les sollicitations environnementales majeures sont les crues et les variations météorologiques. Leurs conséquences sont les variations d'état hydrique des matériaux. La nature des fluides au contact des digues peut également être un facteur dégradant pour les matériaux. L'instrumentation d'ouvrage existant permettrait de reproduire de manière représentative les sollicitations environnementales au laboratoire pour un dimensionnement optimisé des digues. La prédiction des comportements dans le temps, dans des conditions environnementales données constitue une piste pour les travaux de recherche à venir, notamment pour évaluer les effets des changements climatiques à venir et anticiper les besoins de renforcements nécessaires.

7. Références bibliographiques

- An N. (2017). Etude numérique de l'interaction sol-atmosphère : application aux remblais en sols traités. Thèse de l'université Paris Est, Ecole des ponts Paris Tech. 262 pages.
- AFNOR (1993). P18-837. Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques. Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates.
- AFNOR. 2003. NF EN 1990. Eurocodes structuraux. Bases de calcul des structures.
- AFNOR. 2005. NF EN1997-1. Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales
- AFNOR. 2006. NF EN1997-1/NA. Eurocode 7 - Calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005
- Boussafir Y., Bicalho K., Cui Y.-J., Mercadier D. (2018). Vers une meilleure compréhension des interactions sol-atmosphères d'un remblai grâce au monitoring. JNGG Champs-sur-Marne. 13-15 juin 2018.
- 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
- CIRIA (2013). The International Levee Handbook. C731. Ed. Ciria. 1332 pages
- Daïan J.-F. (2010). Équilibre et transferts en milieux poreux I- états d'équilibre. 183 pages. <hal-00452876v1>
- Du Plooy R., Villain G., Palma-Lopes S., Ihamouten A., Dérobert X., Thauvin B. (2015). Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study. Mat & Struct., Vol. 48, pp. 369-386. DOI 10.1617/s11527-013-0189-z
- Magnan J.P., Ejjouani H., Shakhirev V., Bensallam S. (2013). Étude du gonflement et du retrait d'une argile. BLPC n°280-281 novembre 2013. pp.155-170.
- 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.
- Mehenni A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Thèse Univ. Lorraine. 213 pages et 11 annexes. <http://www.theses.fr/2015LORR0299#>
- Sétra (2006). Drainage routier. Guide technique. Edition Sétra. Réf. 0605. 91 pages.