



HAL
open science

Effet du changement climatique sur les mécanismes de retrait-gonflement et la stabilité des digues et barrages

Luc Boutonnier, Yasmina Boussafir, Rémy Tourment, Jean-Robert Courivaud

► To cite this version:

Luc Boutonnier, Yasmina Boussafir, Rémy Tourment, Jean-Robert Courivaud. Effet du changement climatique sur les mécanismes de retrait-gonflement et la stabilité des digues et barrages. Vingt septieme congrès des Grands Barrages, May 2022, Marseille, France. 21 p. hal-03778371

HAL Id: hal-03778371

<https://hal.science/hal-03778371v1>

Submitted on 15 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT SEPTIEME CONGRES
DES GRANDS BARRAGES
MARSEILLE, JUIN 2021

EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES MECANISMES DE RETRAIT-GONFLEMENT ET LA STABILITE DES DIGUES ET BARRAGES¹

Luc Boutonnier
Egis

Yasmina Boussafir
Ingénieure-Chercheure, UGE/Ifsttar

Rémy Tourment
Ingénieur expert, INRAE

Jean-Robert Courivaud
Expert barrages en remblai, EDF-CIH

FRANCE

1. INTRODUCTION

Avec des sécheresses en France de plus en plus courantes ou, à l'inverse, des épisodes pluvieux dont l'intensité ou la durée augmente, les exploitants sont confrontés à la gestion d'un parc de digues et barrages dont la vulnérabilité est parfois amplifiée par ces événements. L'intensité des sollicitations hydrauliques est une première préoccupation évidente (risque de surverses par exemple avec une croissance de l'intensité des crues exceptionnelles). Dans le cas des ouvrages hydrauliques constitués de sols fins (limons et argiles), d'autres phénomènes, liés à l'évolution de l'état hydrique de ces sols, peuvent perturber le bon fonctionnement des ouvrages (fissures de retrait, gonflements, perte de résistance au cisaillement). Un certain nombre de questions se posent donc pour apprécier les conséquences de ces évolutions climatiques sur ces ouvrages : sur quelle épaisseur se manifestent les variations de teneur en eau sur les ouvrages en terre

¹ *Climate change consequences on the shrinking / swelling behavior and the stability of dams and levees*

en sols fins ? Quelles sont les conséquences sur les scénarii de défaillance pouvant potentiellement affecter les ouvrages ? Quelle est l'évolution potentielle de ces désordres avec le changement climatique ?

Les pratiques actuelles prennent peu ou pas ces phénomènes en compte : comment construire des ouvrages plus résilients ? Comment améliorer le comportement des ouvrages existants ?

Après un état des lieux des recommandations actuelles et des désordres déjà observés lors d'épisodes de sécheresse, nous présentons une synthèse des mécanismes à l'œuvre et, sur la base de différents sites instrumentés, des épaisseurs potentiellement intéressées par des variations d'état hydrique sur les ouvrages en sols fins. L'évolution du climat est ensuite abordée, avec différents scénarii, et en particulier l'évolution de la durée des périodes de sécheresse. Ces données permettent d'estimer des gammes de succions probables dans le futur, à comparer aux gammes de succion actuelles. Une approche hydro-mécanique simplifiée permet ensuite d'exploiter ces séries chronologiques d'évolution de la succion pour proposer des choix de conception adaptés pour les ouvrages neufs et des stratégies pour améliorer la résilience des ouvrages existants.

2. LES PRATIQUES DE CONCEPTION ET CONSTRUCTION ACTUELLES, LES PROBLEMES RENCONTRES SUR LES OUVRAGES EN SERVICE

2.1 CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES DIGUES ET BARRAGES EN SOLS FINS

Dans les guides de conception et construction actuels (références [1], [2] et [3] du Tableau 1), l'effet des variations de teneurs en eau dans les sols fins est évoqué très rapidement au travers de recommandations succinctes pour limiter la dessiccation et dans un choix prudent des paramètres mécaniques à la rupture.

Aucun des ouvrages n'aborde l'effet de l'environnement hydrique comme une situation à justifier aux ELS ou aux ELU. De même, aucun mécanisme de rupture n'est spécifié pour envisager une forme de dégradation de l'ouvrage en lien avec des processus météorologiques. Pourtant, des épisodes de sècheresses extrêmes, ou de précipitations prolongées, pourraient avoir des conséquences sur le niveau de sécurité de l'ouvrage. Le guide du CFBR [1] (chapitre 1.3.2) suggère néanmoins de considérer une fissure de dessiccation en tête du noyau dans les analyses de fiabilité des barrages à noyau en sols fins. Dans l'International Levee Handbook [4], les fissures de retrait apparaissent comme un mécanisme important de dégradation des digues et, en se basant sur l'expérience anglaise ([5], [6]), des solutions sont proposées (substitution de la couche fissurée, recompackage, etc.).



Fig. 1 Exemple de fissures de retrait sur des digues en Angleterre [6]
Fissuring after shrinking in a levee clay embankment in England [6]

Tableau 1
 Référentiels de conception et construction des barrages et digues :
 analyse des recommandations vis-à-vis des variations d'état
 hydrique des sols fins

Ouvrage et contenu	Prise en compte variations état hydrique sols fins
Guide CFBR 2015 [1] Recommandations justifications de stabilité hors érosion interne et externe	Chapitre 4.7.4 : « <i>il est au moins recommandé de protéger les argiles de la dessiccation par un remblai qui met l'argile à l'abri du vent et de l'ensoleillement direct (par exemple, sable et terre végétale). [...] Si l'argile est exposée aux sollicitations climatiques (notamment cycles de saturation / désaturation), elle évolue et peut progressivement perdre sa cohésion</i> »
Guide MEDDE 2015 [2] Référentiel technique digues maritimes et fluviales	Chapitre 2.1.3.3 : « <i>l'évolution des sollicitations au cours du temps [...] peut conduire [...] à l'évolution défavorable des caractéristiques des matériaux de constitution [...] des ouvrages au cours du temps (cycle de dessiccation-imbibition [...]).</i> »
Bulletin CIGB 2016 [3] Recommandations pour les petits barrages	Conception de la crête du noyau argileux de barrages : « <i>La mise en œuvre d'une couche de graviers en crête va en particulier éviter [...] la dessiccation des dernières couches de matériaux argileux constituant le remblai..</i> »
Bulletin CIGB 2017 [7] érosion interne	Chapitre 3.2.9 : La fissuration peut être à l'origine de mécanismes d'érosion interne. Il est donc recommandé de protéger, avec 300 mm de matériaux non plastiques, la partie supérieure des noyaux argileux de barrages.

Les guides ([1], [3], [4]), normes ([8], [9]) et pratiques les plus courantes ([10]) pour le compactage des ouvrages neufs conduisent aux critères suivants :

- (a) une teneur en eau massique w ou volumique θ proche de la ligne optimale de compactage ([3]): ce critère permet d'obtenir la densification optimale. La ligne optimale de compactage correspond souvent dans les sols fins à une teneur volumique en air θ_{air} de l'ordre de 5% (Fig. 2). Dans de nombreux pays, la teneur en air est utilisée dans les spécifications de compactage [8] : une teneur en air inférieure à 5% permet en général d'éviter les risques d'effondrement sous imbibition du remblai. La Fig. 2 utilise une représentation non conventionnelle de l'essai Proctor avec, en ordonnée, la compacité (volume squelette/volume total) et, en abscisse, la teneur en eau volumique θ (volume d'eau/volume total). Dans ce diagramme, les courbes d'iso-saturation, iso teneur en eau ou en air sont toutes des droites.

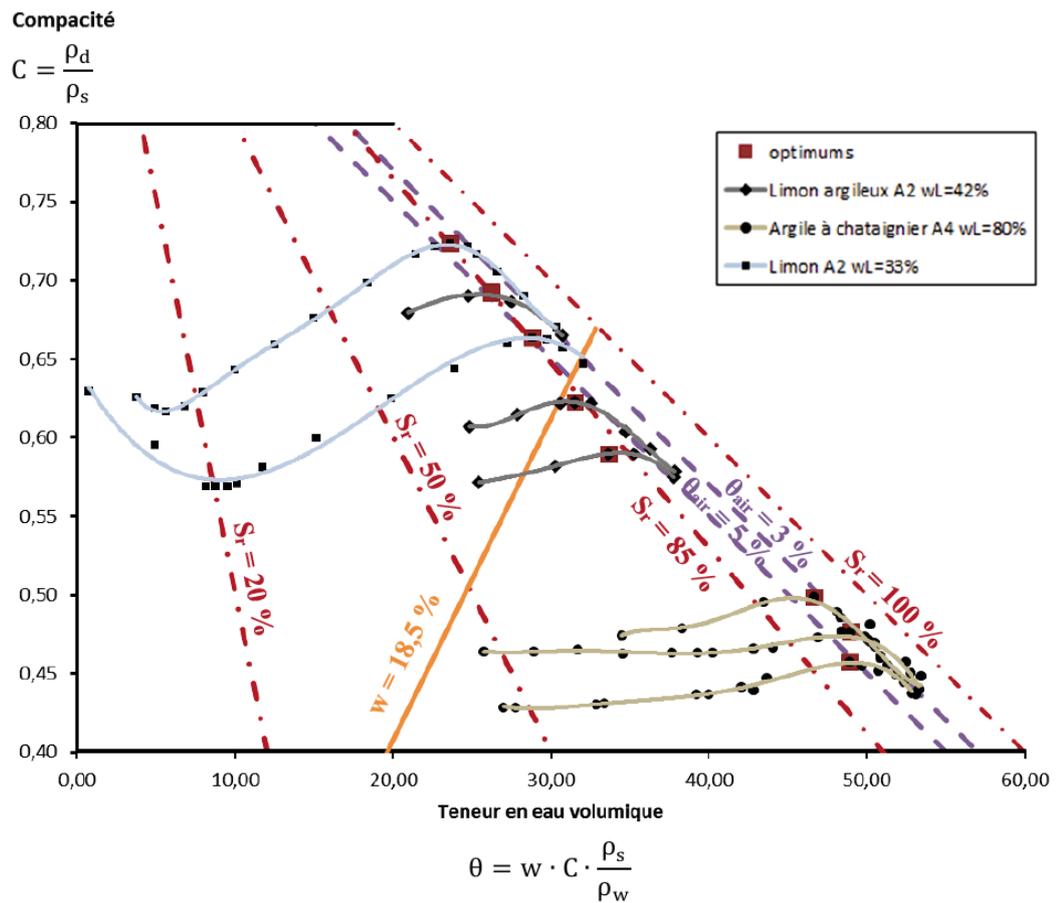


Fig. 2 Courbes Proctor de différents sols fins et à différentes énergies de compactage (d'après [10]). Les sommets des courbes Proctor à différentes énergies passent approximativement par la droite à 5% de teneur en air volumique ($\theta_{air} = 5\%$)

Fine soils Proctor curves for different compactions energies. The maximum of each Proctor curve is close to the line at 5% volumetric air content ($\theta_{air} = 5\%$)

- (b) une densité sèche de compactage minimale exigée : en général au moins 95% de la masse volumique OPN ($\rho_d \geq 95\% \rho_{d\text{OPN}}$)
- (c) pour les parties d'ouvrage ayant une fonction d'étanchéité (noyau), mise en œuvre côté humide de la ligne optimale de compactage ([3], [9]) car côté humide, pour une énergie de compactage donnée, la perméabilité diminue lorsque la teneur en eau de mise en œuvre augmente ;
- (d) surveillance des phénomènes de montée des pressions interstitielles [1] et de dessiccation (fissuration) pendant les travaux de compactage [3] ;
- (e) organisation des contrôles de la qualité adaptée au suivi des travaux [11].

2.2 PROBLEMES LIES AU VARIATIONS D'ETAT HYDRIQUE EN RELATION AVEC L'ENVIRONNEMENT

Les digues et barrages en sols fins sont dimensionnés pour accepter certaines variations des états mécanique et hydrique lors d'un fonctionnement normal (ELS) ou ultime (ELU) de l'ouvrage : variation de niveau dans un barrage, mise en charge d'une digue de protection contre les inondations, cas de vidange rapide, etc. Néanmoins, les variations d'état hydrique d'origine environnementale (cycles de température, pluies, ensoleillement, etc.) se traduisent par des variations de la succion dans les sols, non considérées comme des cas de charge dans le dimensionnement des ouvrages. Ce sujet est donc rarement traité sur les ouvrages neufs et des désordres sont régulièrement constatés (Tableau 2).

Tableau 2
Exemples de désordres liés à une mauvaise prise en compte des variations d'état hydrique liées à des variations de succion du sol

Retour d'expérience	observations
212 barrages du Sud Ouest de la France [12]	25% des ouvrages présentent des fissures de retrait. La profondeur maximale mesurée est de 1,2m. Le non retrait du mètre excédentaire favorise l'apparition de fissures.
Digues du vieux Rhône et digue du Vidourle [13]	Des fissures importantes (plusieurs centimètres de large) sont observées sur des zones de brèches confortées par des matériaux humides et mal compactés
Digues en tourbe et argile aux Pays-Bas [14]	Une rupture de digue en charge suite à la canicule de 2003 par perte de masse importante (tourbe). Beaucoup de fissures observées, souvent à plus d'un mètre de profondeur. Observation de phénomènes d'érosion interne.
Digues dans les Charentes [15]	Des fissures importantes sont observées sur des matériaux très argileux et humides à la mise en œuvre.

La succion est un terme géotechnique utilisé pour évoquer la pression négative qui se développe dans l'eau contenue dans un sol, par suite de phénomènes de séchage. La succion évolue en fonction du type de climat (cf chapitre 3) et des conditions limites hydriques de l'ouvrage (évaporation de surface et/ou évapotranspiration avec un pompage de l'eau via les racines des végétaux par exemple). La pression d'eau négative « effective » (vue par le squelette du sol) peut varier entre zéro (sols secs ou saturés) et plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines, de kiloPascals. Cette pression négative contribue à augmenter la cohésion dite apparente de ces sols, ainsi que leur raideur. Néanmoins, l'augmentation de la succion conduit également à réduire le volume du sol au cours du séchage et donc à créer de manière plus ou moins prononcée de la fissuration. Les cycles de dessiccation / humidification sont ainsi à l'origine des phénomènes de retrait / gonflement (cf chapitre 5).

Les conséquences de ces mécanismes sont multiples. Les fissures changent la perméabilité de plusieurs ordres de grandeur et favorisent l'initiation des mécanismes d'érosion interne [16]. Elles peuvent créer un réseau de fissures perpendiculaires mais aussi parallèles à la surface : la mise en charge rapide de ces fissures peut conduire à des instabilités par glissement ou soulèvement hydraulique de blocs de sols fissurés par la sécheresse [6]. En dehors de la fissuration, la structure des sols fins, et donc leur perméabilité, peuvent aussi être affectés (voir le cas d'un sol peu plastique dans référence [17]). Dans les chapitres suivants, nous analysons l'impact du changement climatique sur ces phénomènes.

3. CARACTERISATION DE L'ENVIRONNEMENT HYDRIQUE ET ZONAGE DES OUVRAGES

L'influence de l'environnement météorologique se manifeste avec une importance variable avec la profondeur : de l'impact le plus fort au niveau de l'interface sol/atmosphère, à l'impact le plus faible au cœur de l'ouvrage. Les observations faites sur deux ouvrages en terre instrumentés, équipés de sondes de teneur en eau et/ou de sondes de succion et localisés à Rouen (76) et à Héricourt (70), permettent d'appuyer ces conclusions. L'ouvrage de Héricourt a été totalement végétalisé, celui de Rouen partiellement.

La modélisation numérique [19] utilisant les données des capteurs, a montré, par extrapolation des mesures, que l'effet de la météorologie de Rouen se répercute sur environ 2 à 3 mètres d'épaisseur dans des limons traités à la chaux et compactés. Au-delà, les variations de teneurs en eau sont insignifiantes.

L'auscultation durant 4 années des teneurs en eau et de la succion sur le remblai expérimental de Héricourt [20], permet d'observer une atténuation de l'effet de la météorologie avec la profondeur, variable selon la nature des matériaux (l'atténuation est plus importante dans les sols argileux que dans les sols limoneux, plus perméables) et avec une amplitude des variations de teneurs en eau et de succion plus élevée à proximité de la surface du sol qu'en profondeur.

Ces observations ont permis de proposer un zonage spécifique au sein de l'ouvrage, illustré sur l'ouvrage "type" de la Fig. 3, différenciant les parties d'ouvrages impactées par la météorologie (épaisseur de 2 à 3 m) et celles qui le sont moins [20]. La synthèse bibliographique effectuée dans le cadre du projet ANR Terredurable recense cinq remblais en sols fins en France et en Grande Bretagne où les épaisseurs affectées sont similaires, de l'ordre de 2 à 4 mètres ([10], partie 1, chap. 4.3.2). Néanmoins, la fissuration se produit probablement en partie supérieure de cette zone d'influence, sans qu'on sache vraiment quantifier simplement la profondeur et la largeur des fissures.

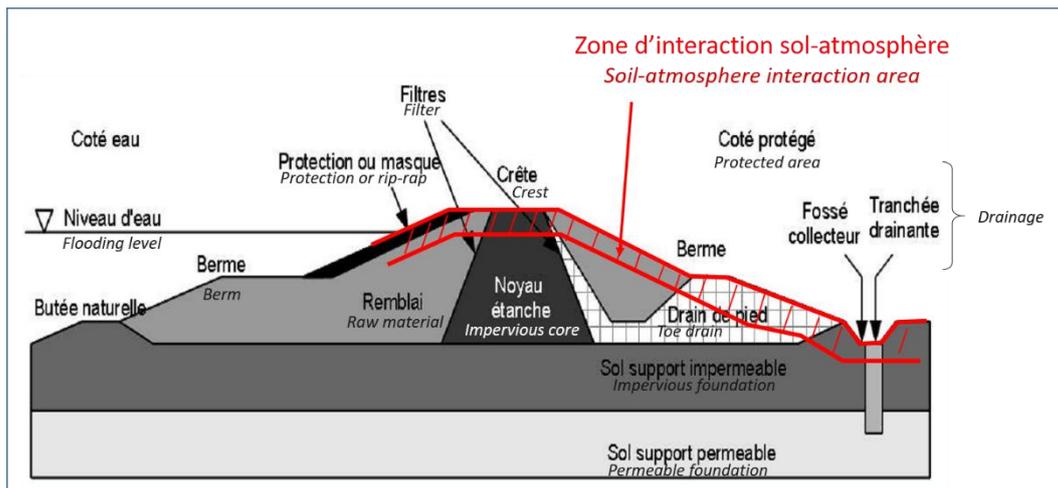


Fig. 3 Les matériaux fins dans la partie hachurée en rouge (2-3m d'épaisseur) peuvent être impactés par le mécanisme de retrait-gonflement et la fissuration. *Inside the zone in red dotted lines, fine soil material can be strongly affected by shrinkage-swelling effects. Inside this zone, cracks can easily appear.*

D'autres sites instrumentés documentés ([21], [22], [23]) permettent d'apporter des compléments sur l'importance des sollicitations météorologiques, résumés dans le Tableau 3. En climat tempéré, la succion s'annule lors de la saison humide mais peut présenter de forts écarts lors de la saison sèche où l'évaporation a lieu.

Tableau 3
Sollicitations météorologique vis-à-vis du mécanisme de retrait-gonflement dans les sols d'ouvrage en terre

Intensité sollicitation météorologique	Faible écart hydrique	Fort écart hydrique
Cas d'étude – localisation	Angleterre – Héricourt	Italie
Durée du mécanisme de retrait	3 mois	6 à 9 mois
Succion maximale (saison sèche)	300 kPa	1100 kPa
Succion minimale (saison humide)	0	0

Les indices de Thornthwaite ([24], [25]), peuvent aider à compléter la caractérisation des impacts météorologiques sur les sols. La combinaison des indices d'humidité (IHU), du rapport d'aridité (Ra) et du rapport d'humidité (Rh) permettent ainsi de dresser une cartographie indicative basée sur les moyennes météorologiques disponibles sur la période 1976-1995 [20]. La carte qui en résulte (Fig. 4) illustre les secteurs où les écarts hydriques au sol entre l'été et l'hiver sont très élevés (forte sollicitation météorologique, V0) et ceux où ces écarts sont faibles (faible sollicitation météorologique, V3), c'est-à-dire respectivement les secteurs où les ouvrages hydrauliques sont probablement très fortement impactés, et ceux faiblement impactés par le mécanisme de retrait-gonflement.

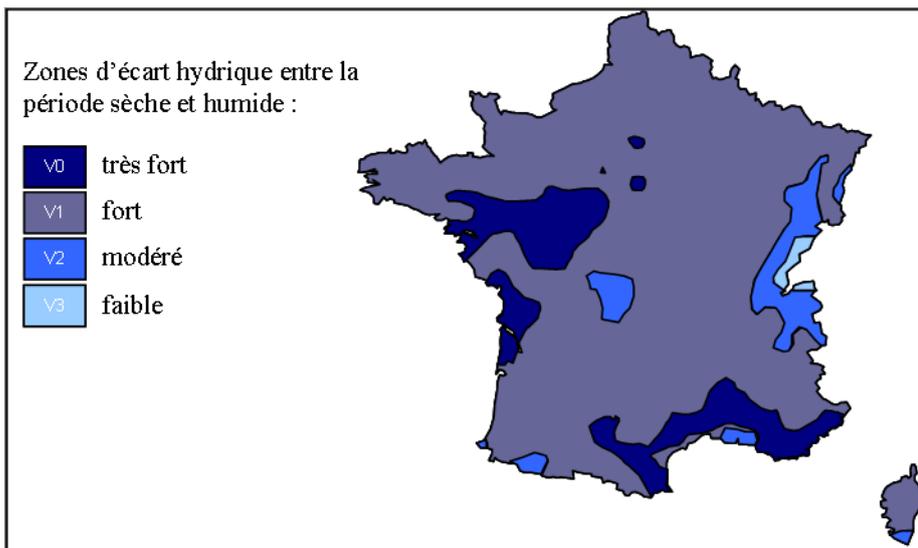


Fig. 4 Cartographie des zones géographiques impactées par des écarts hydriques très fort (V0) à faible (V3), pouvant avoir un effet sur les mécanismes de retrait (période 1976-1995).

Based on Thornthwaite's indicator, the different areas represent the sectors with very high water content gaps (V0) between wet and dry seasons, and those with low water content gaps (V3) at the top of the soil

Cette carte peut illustrer les sollicitations météorologiques actuelles des digues et barrages en terre. Quelle sera leur évolution dans le futur ?

4. EVOLUTION DU CLIMAT DANS LES ANNEES A VENIR ET IMPACT SUR L'EVOLUTION DES SOLS

Les nombreux travaux du GIEC ont permis de montrer que le climat de la terre était en évolution rapide ces dernières années, avec des perspectives de modifications radicales de notre environnement climatique par rapport à ce que

l'on a pu connaître jusqu'à ce jour [26]. Plusieurs scénarios ont été établis à l'aide de différents modèles [27]. Il subsiste à ce jour beaucoup d'incertitudes sur l'intensité des phénomènes à venir. Une seule certitude, le climat va changer dans les années à venir et il est important de pouvoir s'y préparer. Or, comme rappelé dans le paragraphe 2, le dimensionnement des ouvrages intègre peu les effets du climat dans leur conception ou dans leur entretien.

Dans le contexte actuel, il semble important d'apporter des éléments qui aident à mieux adapter les ouvrages aux changements à venir. Ainsi, le projet français Explore 2070 [28] a permis de réaliser des simulations des environnements hydrauliques et hydriques à l'échelle du territoire métropolitain à l'horizon 2070. Des cartes permettent de visualiser les évolutions probables à l'aide d'un code couleur et un degré de confiance dans le résultat attendu représenté par la taille du symbole (plus la taille est grande plus la confiance dans le résultat est élevée).

La première information importante à évaluer porte sur le débit moyen (module) des cours d'eau (Fig. 5) résultats moyens établis sur les 14 simulations.

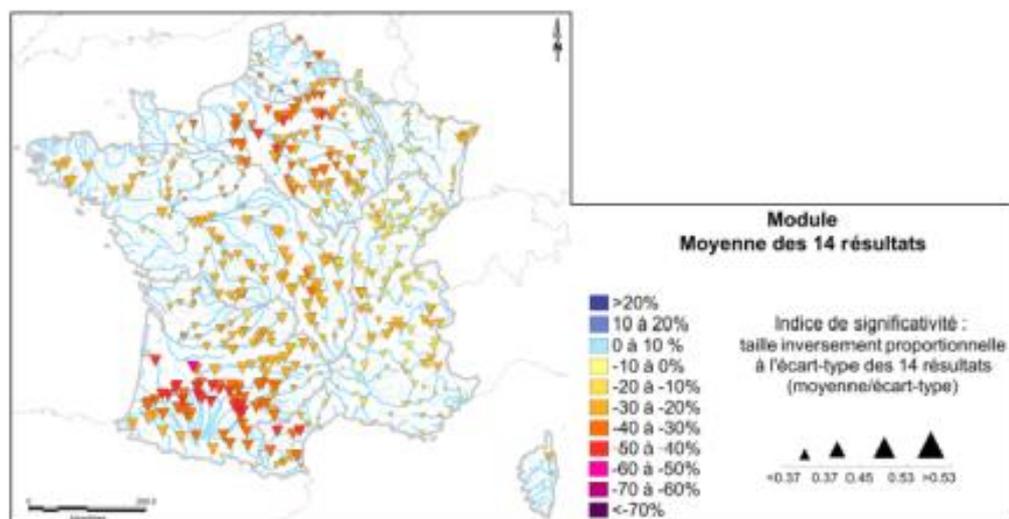


Fig. 5 Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 [28]
Possible relative evolutions (in %) of the mean annual flow between 1961-90 and 2046-65 [28]

La carte permet visuellement de séparer le territoire en 2 grands groupes de comportement :

- les territoires du Sud-Ouest et du Nord impactés par de très fortes diminutions des débits moyens (de l'ordre de -40 à -60% de débit par rapport à la situation actuelle) ;
- le reste du territoire français moyennement impacté, avec une tendance générale à la baisse des débits moyens (de l'ordre de -10 à -40%).

La même tendance est observée sur les débits d'étiage.

Pour les débits de crue décennales, les 14 scénarios étudiés par le projet Explore 2017 ne convergent pas. Le projet s'accorde sur une tendance générale à la diminution entre -10 à -70% par rapport à la situation actuelle est attendue à l'horizon 2070 (Fig. 6) à l'exception des bassins des Cévennes et la partie Est du district Rhin-Meuse où la tendance serait à une augmentation.

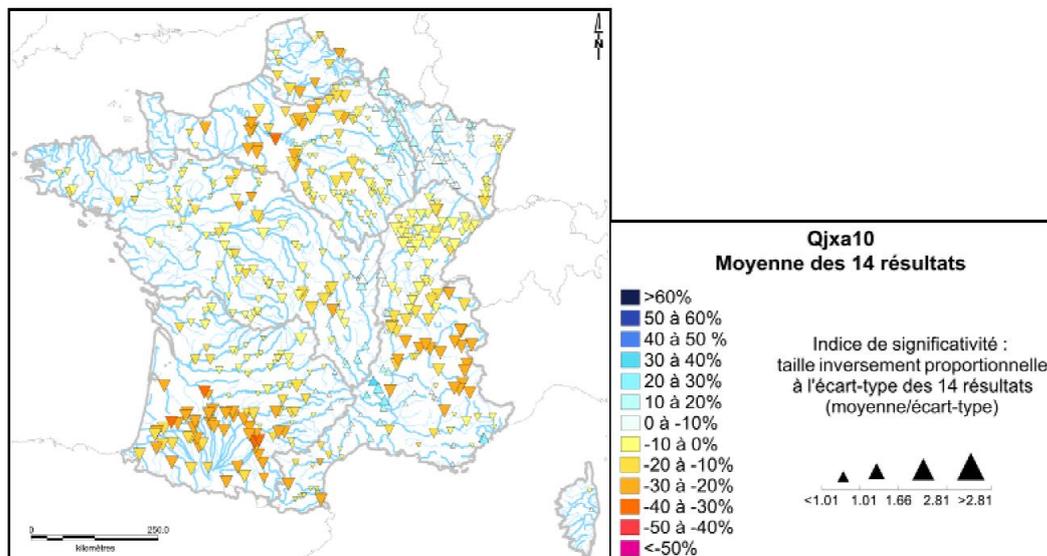


Fig. 6 Evolutions relatives possibles (en %) du débit de crue (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : résultats moyens établis sur les 14 simulations [28]
Possible relative evolutions (in %) of the flood discharge (QJXA10) between 1961-90 and 2046-65: average results established on the 14 simulations

Le projet Explore 2070 pointe aussi le déficit attendu de rechargement en eau des nappes phréatiques dans les années à venir. L'ensemble des cartes issues des modélisations du projet Explore 2070 est très utile pour décrire l'environnement hydrique et climatique des prochaines années des digues et des barrages. Si on en croit les prévisionnistes, les ouvrages devront résister à des sollicitations de crues dans les années à venir très différentes en intensité selon la localisation des ouvrages, mais pour toutes, dans un environnement globalement plus chaud et plus sec. Les matériaux qui constituent l'ouvrage seront fortement affectés par les baisses probables des niveaux d'eau moyens et d'étiage, induisant une baisse globale de l'humidité des sols, et donc potentiellement de sécheresse

des sols. Ceci laisse présager des ouvrages fortement affectés par les phénomènes de retrait en période estivale avec toutes les modifications physiques qui accompagnent ce mécanisme : diminution du volume total de l'ouvrage et de la hauteur, apparitions de fissures de tailles variables, modification du poids volumique humide, modification de la perméabilité.

Les crues en fin d'été début d'automne, pourraient devoir être contenues par des ouvrages fortement affectés par le retrait et dans des conditions de stabilité insuffisantes et certainement différentes de celles qu'elles pourraient avoir en période hivernale, avec des matériaux dont la teneur en eau serait très élevée et des fissures en partie refermées.

5. MODELISATION SIMPLIFIEE DU PHENOMENE AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Pour un sol fin donné, les variations de volume sur un chemin de séchage ou d'humidification dépendent de la teneur en eau et de l'indice des vides initiaux.

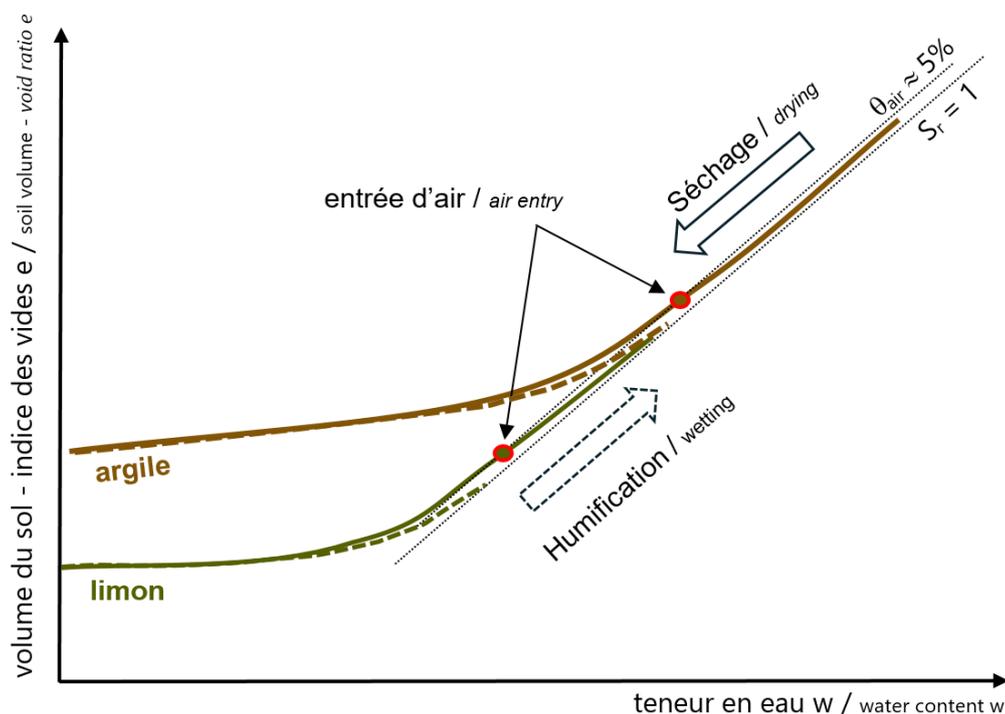


Fig. 7 courbes de retrait d'une argile et d'un limon. L'entrée d'air correspond à la ligne optimale de compactage ($\theta_{air} \approx 5\%$ pour les sols compactés, cf Fig. 2) *shrinking curves for a clay and a silt. Air entry happens when the optimum compaction line is crossed ($\theta_{air} \approx 5\%$ for compacted soils, see Fig. 2)*

Si la teneur en eau et l'indice des vides initiaux sont élevés, la réduction de volume liée au retrait sur le chemin de séchage est importante jusqu'au point d'entrée d'air (correspondant approximativement à la ligne optimale de compactage $\theta_{\text{air}} \approx 5\%$, cf Fig. 2). En-dessous de ce point, la variation de volume est beaucoup plus limitée (Fig. 7). Les sols les plus plastiques comme les argiles ont un potentiel de retrait plus élevé que des limons, et les succions qui s'y développent au cours du séchage, sont également plus élevées.

La variation de volume due au séchage peut être estimée à partir de la variation de succion ([10] partie 1, 2.6.2.1). Pour cela on peut utiliser les corrélations de Fleureau [30] qui permettent d'évaluer la succion existant dans un sol compacté à un certain taux de compactage, à partir de sa teneur en eau initiale (w) et sa limite de liquidité (w_L). À partir de ces équations, la succion initiale dans tout le domaine côté humide peut être extrapolée (Fig. 8 et Fig. 9).

La Fig. 8 représente la succion après compactage telle qu'on peut la calculer avec les formules de Fleureau (courbes en bleues), dans des sols de limite de liquidité variable, et pour trois conditions de compactage différentes : (1) à la densité optimale OPN et teneur en eau optimale (w_{OPN}), (2) à la densité optimale et $w_{\text{OPN}}+2\%$, (3) à 95% de la densité optimale et à $w_{\text{OPN}}+4\%$.

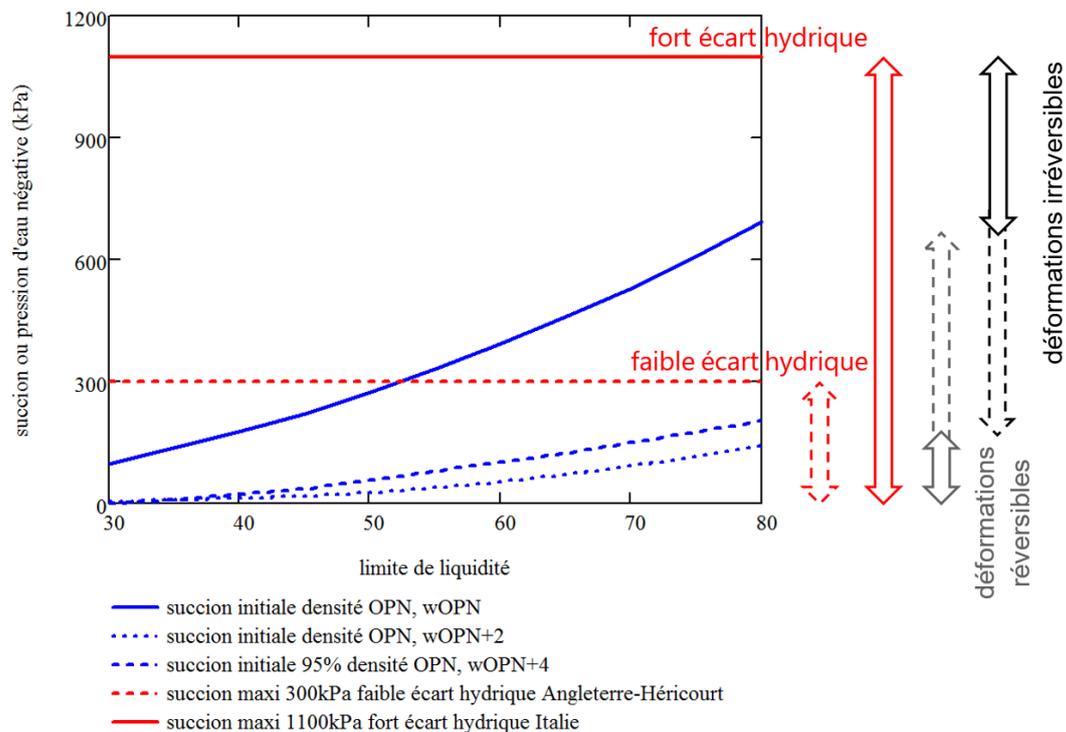


Fig. 8 évaluation de la sensibilité aux déformations de retrait après compactage pour une énergie proche du Proctor Normal (cf Tableau 3 pour écarts hydriques)
Shrinking sensitivity of a soil compacted with near normal Proctor energy (see Tableau 3 for the estimated range of suction).

Ces trois courbes montrent les faibles succions qui existent dans les sols humides compactés à l'énergie Proctor normal et le fait que plus la limite de liquidité (et donc la teneur en argile) est élevée plus les succions seront fortes à énergie de compactage identique.

Les deux droites en rouge représentent les conditions d'environnement qui s'imposent, sur une épaisseur limitée (cf §3), dans des localisations géographiques de fortes sollicitations hydriques (type Italie : 1100 kPa) et de faibles sollicitations hydriques (type Angleterre ou Héricourt : 300 kPa). Lorsque la succion imposée par l'environnement dépasse la succion existante dans le sol compacté, cela peut entraîner des déformations irréversibles si la contrainte effective très forte qui se développe sous l'effet de la succion n'a jamais été atteinte. Ce premier chargement est à l'origine du retrait volumique important et irréversible. D'après la simulation, c'est le cas pour toutes les situations de compactage à l'énergie Proctor normal dans des situations météorologiques de fortes sollicitations.

Dans les conditions météorologiques de faible sollicitation, les sols compactés à l'état hydrique humide ($w_{OPN} +2$ ou $+4\%$) vont probablement se fissurer en été mais les fissures pourront se refermer au cours de la période humide car on peut estimer que les déformations restent réversibles.

Un matériau compacté à une énergie supérieure à celle habituellement utilisée en terrassement en France, type Proctor modifié, aura naturellement des succions initiales plus élevées que s'il était compacté à l'énergie Proctor normal, comme représenté sur la Fig. 9. La teneur en eau sera en effet nécessairement plus faible pour rester proche de la ligne optimale de compactage (Fig. 2).

Dans ces conditions, le matériau compacté à l'OPM ne subira pas de retrait irréversible quand la succion maximale imposée par l'environnement à faible ou forte sollicitation hydrique est plus faible que la succion initiale après compactage (cas des argiles avec w_L élevés). Dans les limons (w_L faible), un retrait irréversible est possible pour les climats à forte sollicitation hydrique, mais leur faible déformabilité et leur contrainte de préconsolidation élevée rendent le phénomène peu probable.

La contrepartie d'une succion initiale forte est un gonflement réversible qui peut être important pour les argiles, plus déformables que les limons. Dans les cas de très forts gonflements, la réversibilité pourrait ne plus être assurée (rupture au cisaillement en extension effaçant une partie du bénéfice d'un compactage intense). Il n'est donc pas judicieux de compacter à l'OPM (et donc de mettre en œuvre des matériaux à faible teneur en eau) dans des climats à faible sollicitation hydrique et qui vont le rester.

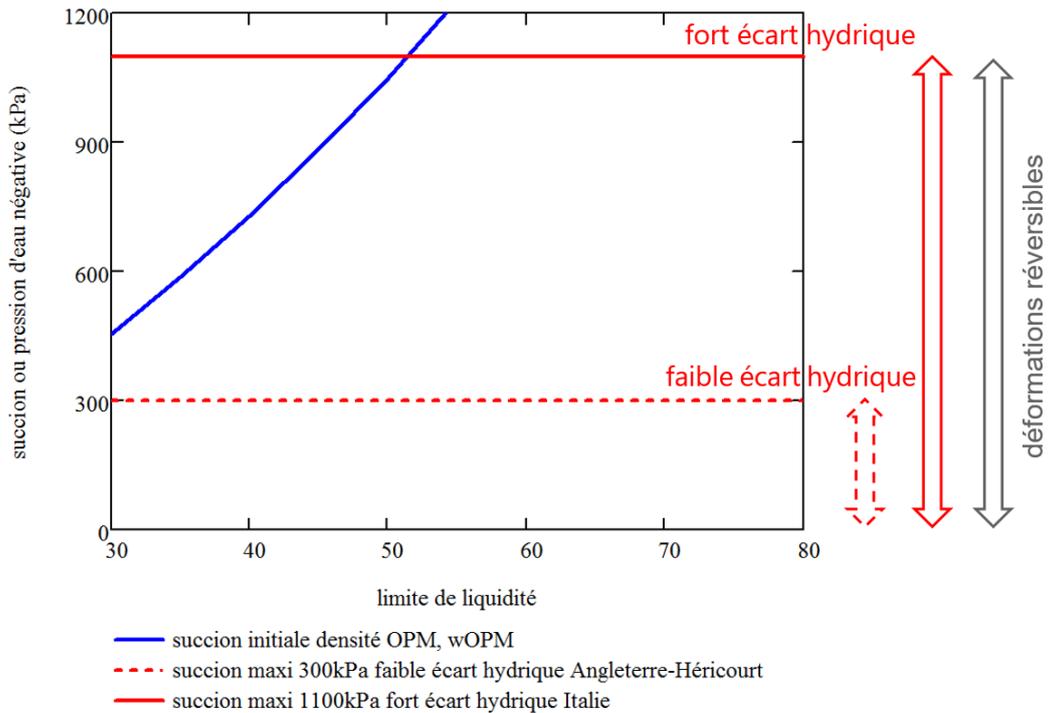


Fig. 9 évaluation de la sensibilité aux déformations de retrait après compactage pour une énergie proche du Proctor modifié (cf Tableau 3 pour écarts hydriques)
Shrinking sensitivity of a soil compacted with near modified Proctor energy (see Tableau 3 for the estimated range of suction).

Compte tenu de l'état plus sec des sols attendu avec le changement climatique (cf chapitre 4), l'amplitude de variation des pressions d'eau en climat tempéré va augmenter, passant par exemple d'un intervalle [0,-300kPa] (faible écart hydrique) à [0,-1100kPa] (fort écart hydrique). Il est probable que des zones tempérées aujourd'hui à faible écart hydrique vont voir l'apparition de fissures irréversibles dans des ouvrages jusqu'ici épargnés par ces phénomènes. Ces fissures seront liées aux premiers « chargements » en succion sur les ouvrages compactés à l'énergie Proctor Normal lors des premiers étés anormalement secs. Pour les ouvrages fortement compactés (énergie OPM et teneurs en eau plus faibles), les fissures irréversibles seront moins probables.

6. RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION, LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION DES OUVRAGES

D'après le paragraphe précédent, il conviendrait dans la réalisation de nos ouvrages d'intégrer la connaissance, d'une part, des environnements hydriques et des gammes d'écart hydriques pouvant affecter l'ouvrage et, d'autre part, des états de succion dans la frange superficielle des ouvrages existant au moment de leur réalisation et se développant dans le long terme. Ces simulations permettent

d'établir des orientations pour les spécifications de compactage (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). À ce jour, il est recommandé d'augmenter l'énergie de compactage dans les parties d'ouvrages neufs en interaction avec l'atmosphère afin de diminuer le risque de retrait lié à la dessiccation. Le choix de la teneur en eau de mise en œuvre, pour une énergie de compactage donnée, est gouverné par la ligne optimale de compactage (Fig. 2). Une mise en œuvre de matériaux trop humide est donc à éviter car elle conduirait à la fois à une faible succion initiale et à une faible densité sèche ρ_d (ou compacité $C=\rho_d/\rho_s$ en référence à la Fig. 2).

Néanmoins, des compacités élevées ($C \geq C_{OPN}$) sont particulièrement difficiles à obtenir sur les talus. De plus, des problèmes à la mise en œuvre (feuillette, matelassage, cf [10], partie 1) peuvent rendre impossible l'atteinte d'objectifs de densités très élevés. Aussi, les variations de teneurs en eau des sols fins peuvent être atténuées par des dispositifs de protection des talus : les masques de protection granulaire semblent particulièrement efficaces [31]. Une couverture végétalisée avec certaines herbes pourrait réduire le risque de dessiccation profonde des sols. L'ensemble des techniques possibles est encore à imaginer et justifier selon les secteurs géographiques et les données de sites.

	Compacité $C=\rho_d/\rho_s$	Climat tempéré faible écart hydrique Succion [0,300kPa]	Climat tempéré fort écart hydrique Succion [0,1100kPa]
limon	$C < C_{OPN}$	= (faible retrait irréversible)	- (retrait irréversible)
	$C \geq C_{OPN}$ et $C < C_{OPM}$	++	= (faible retrait irréversible)
	$C = C_{OPM}$	++	++
argile	$C < C_{OPN}$	- (retrait irréversible puis retrait/gonflement réversible)	--- (fort retrait irréversible et fort retrait/gonflement réversible)
	$C \geq C_{OPN}$ et $C < C_{OPM}$	= (retrait/gonflement réversible)	-- (retrait irréversible et fort retrait/gonflement réversible)
	$C = C_{OPM}$	- (gonflement irréversible puis retrait/gonflement réversible)	- (fort retrait/gonflement réversible)

Tableau 4
Recommandations (+ adapté, = acceptable, - inadapté) pour les spécifications de compactage en climat tempéré. Avec le réchauffement climatique, des zones à faible écart hydrique pourraient passer en fort écart hydrique en France.

Si la maîtrise des teneurs en eau n'est pas possible, la conception de l'ouvrage doit le prendre en compte. Pour les études de stabilité, on pourra retenir les caractéristiques d'un matériau remanié (pas de cohésion, angle de frottement à l'état critique) dans la zone en interaction avec le climat (Fig. 3). Pour les ouvrages avec d'importantes fissures de retrait, on peut analyser la stabilité de blocs avec sous pressions d'eau liées à la mise en charge dans les fissures [6]. Ces matériaux remaniés et/ou fissurés sont sensibles à l'érosion interne et peuvent être très perméables : ils ne doivent donc subir aucun écoulement significatif et ne doivent pas remplir de fonction d'étanchéité sous gradient hydraulique significatif ($>0,1$) dans les ouvrages.

7. CONCLUSION

Les ouvrages en terre en sols fins présentent en climat tempéré une frange sensible aux variations climatiques annuelles : plusieurs études publiées ont évalué son épaisseur entre 2 et 4m. Sur la base de trois sites instrumentés, il a été montré que le climat tempéré se caractérise, à faible profondeur inférieure à un ou deux mètres, par des suctions nulles en période humide et des suctions de l'ordre de 300kPa en période sèche sous climat à faible écart hydrique (Angleterre, Est de la France) mais pouvant atteindre plus de 1000kPa sous climat à fort écart hydrique (exemple de l'Italie). Avec le changement climatique, des ouvrages aujourd'hui peu sollicités du point de vue hydrique en période sèche pourraient l'être beaucoup plus dans le futur, conduisant à des retraits volumiques en partie irréversibles dans la frange sensible aux variations climatiques annuelles. Pour les ouvrages neufs, les spécifications de compactage et la conception d'une manière plus générale devraient prendre en compte dès à présent ces problématiques, ce qui n'est pratiquement pas le cas aujourd'hui faute de recommandations claires sur le sujet. Pour les ouvrages déjà construits, les analyse de vulnérabilité doivent intégrer ces mécanismes et des dispositions de renforcement de certains ouvrages seront probablement à prévoir à terme.

Si la mécanique des sols non saturés et les phénomènes de retrait / gonflement ont fait l'objet de beaucoup de recherches ces dernières années, il manque des instrumentations d'ouvrages réels pour améliorer la connaissance dans ce domaine. Nous encourageons les maîtres d'ouvrages et la profession à instrumenter plusieurs sites dans le cadre de projets de recherche pour disposer de plus de données sur les variations de succion annuelles et pluri-annuelles. Ces données faciliteront les décisions futures sur les solutions de réparation des ouvrages existants. Les recommandations proposées dans ce papier sont une première base construite sur un nombre de données réduit : elles devront être améliorées au fur et à mesure des retours d'expérience et recherches futures.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] *CFBR*. Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Version approuvée en Commission Exécutive du CFBR le 9 octobre 2015.
- [2] *MEDDE*. Référentiel technique digues maritimes et fluviales. Version 1, janvier 2015.
- [3] *CIGB*. Bulletin 157. Petits barrages. Conception, surveillance et réhabilitation. 2016
- [4] *CIRIA*. The International Levee Handbook. C731. 2013.
- [5] Frith C.W., Purcell A.M., Powell A.S. Earth embankment fissuring manual. R&D technical report W41, Environnement agency, Bristol, UK. 1997. Go to : <http://tinyurl.com/m63yfg9>
- [6] Dyer M., Utili S., Zielinski M. The influence of desiccation fine fissuring on the stability of flood embankments. FRMRC Research report UR11. 2007.
- [7] *CIGB-ICOLD*. Bulletin 164. L'érosion interne dans les digues, barrages existants et leurs fondations. 2017.
- [8] *AFNOR*. NF EN 16907-3. Terrassement – partie 3 : procédés de construction. 2018.
- [9] *AFNOR*. FD P 11-302. Exécution des terrassements : réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté. 2018.
- [10] Boutonnier L., Bufalo M., Dubreucq T., Fry J-J, Lejeune J.-M., Mahmutovic D. Conception et construction des ouvrages en sols fins. 512 pages. Presses des Ponts (ISBN : 9782859785222). 2019.
- [11] *CIGB-ICOLD*. Contrôle de qualité pour barrages en remblai. Bul. 56. 1986.
- [12] Lautrin D. Vieillesse et réhabilitation des petits barrages en terre. Cemagref éditions. ISBN 2-85362-597-4. 2002.
- [13] Fry J.J., Couriveau J.-R. Analyse de modes de rupture peu communs pouvant affecter les digues. Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions. 2ème colloque national – Digues 2013, p. 316-323. Ed. Lavoisier. 2013.
- [14] Bottema M., Vonk B., Janssen H., Van Waveren H.. Mitigating drought risk for levees. 11th ICOLD European Club Symposium. Chania Crete, 2-4 october 2019.

- [15] Nédélec Y., Gardet S., Revel J., Clément F., Droz V. Dignes littorales en terre : cas des terres basses et des sols compressibles. 2013.
- [16] Fell R., Fry J.-J. State of the art on the likelihood of internal erosion of dams and levees by means of testing. Erosion in geomechanics applied to dams and levee, p. 1-85. Ed. Wiley. 2013.
- [17] Boussafir Y., Arbaret L. Effets de cycles hydriques sur la perméabilité de matériaux limono-sableux compactés. JNGG, 2 et 3 nov 2020, Lyon.
- [18] An N., Hemmati S., Cui Y.-J. 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. 2016.
- [19] Bicalho K.V., Boussafir Y., Cui Y.-J. Performance of an instrumented embankment constructed with lime-treated silty clay during four-years in the Northeast of France. Transportation Geotechnics. 2018.
- [20] Boussafir Y., Tourment R., Saussaye L., Durand E., Reiffsteck P., Veylon G. Evaluer l'impact du vieillissement des digues sur les mécanismes et scénarios de rupture. Col. Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, Aix en Provence, 19-21 mars 2019.
- [21] Bordoni M., Bittelli M., Valentino R., Chersich S., Meisina C. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data. Journal of Hydrology. n°552. pp.283-305. 2017.
- [22] Smethurst J. A., Clarke D. and Powrie W. Factors controlling the seasonal variation in soil water content and pore water pressures within a lightly vegetated clay slope. Geotechnique. 2012.
- [23] Stirling R., Helm P., Glendinning S., Asquith J., Hughes P., Toll D.. Deterioration of geotechnical infrastructure: the influence of asset aging through environmental cycling. Proceedings of the 19th International Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, pp.3199-3202. 2017.
- [24] Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, Vol.38, n°1 (Jan., 1948), pp.55-94.
- [25] SETRA. Drainage Routier. Guide Technique. 91 pages. 2006.
- [26] ONERC. Plan National d'adaptation de la France aux effets du changement climatique 2011-2015. Edition Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, du Transport et de la Mer. 187 pages. 2011.

- [27] *IPCC*. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral aspects*. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.1-32. 2014
- [28] *EXPLORE 2070*. Hydrologie de surface – A1- rapport de synthèse. Contribution de BRL ingénierie, Irstea, MétéoFrance. 2012.
- [29] Tang A.M. and al. atmosphere-végétation-soil interactions in a climate change context ; impact of changing conditions on engineered transport infrastructure slopes in Europe. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. March 2018.
- [30] Fleureau J.-M., Verbrugge J.-C., Huergo P., Correia G., Kheirbek-Saoud S.. Aspects of behavior of compacted clayey soils on drying and wetting paths, *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol. 39, 6, 1341-1357. 2002.
- [31] Vaughan P.R., Hight D.W., Sodha V.G., Walbancke H.J.. Factors controlling the stability of clay fills in Britain. *Proceeding of the conference on clay fills*. Institution of civil engineers, London, 205-207. 1978.

RESUME:

Les digues et barrages comprennent souvent des éléments en sols fins (argile et/ou limon) qui sont sensibles à l'environnement hydrique atmosphérique de l'ouvrage. Suivant la teneur en eau initiale et la densité sèche initiale, des fissures de retrait peuvent apparaître en période sèche en climat tempéré. Leur profondeur est limitée, sachant que l'épaisseur de sol en interaction avec l'atmosphère serait de l'ordre de 2 ou 3 mètres d'après quelques sites instrumentés. Ces fissures peuvent contribuer à de nombreux désordres sur les ouvrages hydrauliques: mise en charge rapide, perméabilités augmentées de plusieurs ordres de grandeur, réduction du coefficient de sécurité voire glissement du fait de la mise en charge rapide, concentration des écoulements à l'origine du développement de mécanismes d'érosion interne.

Un modèle prenant en compte la succion dans l'analyse du retrait permet d'évaluer l'ampleur des phénomènes de retrait et leur caractère irréversible (premier « chargement » en succion) ou réversible en fonction des sollicitations hydriques. Il est utilisé pour évaluer le comportement des ouvrages en climat tempéré dans deux configurations : dans une zone à faible écart hydrique (succion entre 0 et 300kPa dans l'Est de la France et en Angleterre) et un site à fort écart hydrique (succion entre 0 et 1100kPa en Italie).

Avec le changement climatique, des ouvrages aujourd'hui en climat à faible écart hydrique pourraient passer à fort écart hydrique, conduisant à des fissures de retrait irréversibles et des ouvrages hydrauliques en sols fins rendus plus vulnérables.

Pour limiter les risques de retrait sur les ouvrages neufs en sols fins, il est recommandé d'augmenter l'énergie de compactage et réduire les teneurs en eau de mise en œuvre. Pour les ouvrages les plus sensibles, certaines solutions existent (masques granulaires par exemple) mais une réflexion plus large est à engager pour trouver des solutions adaptées à chaque contexte.

SUMMARY:

Dikes and dams often include fine soil elements (clay and/or silt) that are sensitive to the atmosphere interaction. Depending on the initial moisture content and the initial dry density, shrinkage cracks may appear during dry periods in temperate climates. Their depth is limited, knowing that the thickness of the soil interacting with the atmosphere would be of the order of 2 or 3 meters according to some instrumented sites. These cracks can contribute to numerous disorders on hydraulic structures: higher loading, increasing hydraulic conductivity by several orders of magnitude, reduction of the safety factor or slippage due to rapid increase in water pore pressure, concentration of flows leading to the development of internal erosion mechanisms.

A model, that considers suction in the shrinkage analysis, is used to evaluate the extent of the shrinkage phenomena and their irreversible (first "loading" in suction) or reversible nature depending on the hydric stresses. It has been used to simulate the behaviour of structures in a temperate climate in two configurations: a site with low water gap (suction between 0 and 300kPa as in eastern France and England) and one with high water gap (suction between 0 and 1100kPa as in Italy).

With the climate changing, structures currently in a climate with a low water gap could change to a high water gap, leading to irreversible shrinkage cracks and hydraulic structures in fine soils made more vulnerable.

To limit the risk of shrinkage on new structures using fine soils, the authors recommend to increase the energy of compaction and reduce the compaction water content. For the most sensitive structures, some protection solutions exist (granular masks for example) but a wider reflection is needed to find solutions adapted to each context.

Mots-clés: CLIMAT - CONCEPTION - FISSURATION - SOL - MODIFICATION DU CLIMAT - MISE EN PLACE DU REBLAI - TENEUR EN EAU

Keywords: CLIMATE - CONCEPTION - CRACKING - SOIL - CLIMATE CHANGE - PLACING OF FILL - WATER CONTENT