

DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE D'ESSAI D'EMIETTAGE AMELIORE PAR TRAITEMENT D'IMAGES.

DEVELOPMENT OF AN ENHANCED CRUMB TEST BASED ON COMPUTER VISION.

Ludovic DORE¹, Yasmina BOUSSAFIR², Christophe CHEVALIER³

¹ Cerema, Blois, France

^{2, 3} Université Gustave Eiffel, Ifsttar, Laboratoire Sols Roches et Ouvrages géotechniques, 77447 Marne la Vallée, France

RÉSUMÉ – La désagrégation est un phénomène qui se produit lorsqu'un sol est immergé dans l'eau ; proche d'un mécanisme d'érosion externe, sa compréhension est essentielle pour évaluer la vulnérabilité des digues en période d'inondation. Cet article présente une nouvelle version de l'essai d'émiettement (un essai permettant de caractériser la sensibilité d'un sol à la désagrégation) basée sur le traitement d'images. Des résultats obtenus sur différents types de sols sont également présentés.

ABSTRACT – Dissagregation is a phenomenon occurring when soils are immersed in water. It plays a great role in dike stability. This study presents an enhanced version of the crumb test (a test useful for determining soil sensitivity to dissagregation) based on computer vision. Results obtained on various soil are presented as well.

1. Introduction

Dans le cadre de la tâche 1, « matériaux innovants et variabilité des paramètres géotechniques » du projet EGIDE (Enhanced Geotechnical Investigation and Design for sustainable development), le Cerema de Blois et l'université Gustave Eiffel proposent le développement d'une méthode d'essai permettant la caractérisation du comportement d'un matériau vis-à-vis de son immersion totale dans l'eau. Cet essai s'intitule essai d'émiettement amélioré et s'inspire d'une méthode américaine dénommée Crumb Test (ASTM D6572-00). Il est utile pour la caractérisation de la sensibilité à la désagrégation d'un sol, elle-même importante pour étudier la vulnérabilité des digues en terre vis-à-vis de l'érosion. Le principe de l'essai consiste à observer le comportement au cours du temps d'un échantillon de matériau placé en immersion dans un aquarium rempli d'eau douce. Le suivi se fait par prise de photographies à intervalles réguliers, qui sont ensuite traitées informatiquement afin d'obtenir certaines dimensions qui caractériseront l'évolution et le comportement de l'échantillon. Le présent article décrit les méthodes utilisées pour réaliser cet essai amélioré ainsi que les résultats obtenus sur plusieurs types de sols, à diverses teneurs en eau.

2. Matériels et méthode

2.1. Préparation des échantillons

L'essai d'émiettement est inspiré de la norme américaine ASTM-D6572-00, qui permet de qualifier la dispersion d'un échantillon de matériau plongé dans l'eau. Dans le cas de cette norme, l'échantillon est constitué d'un cube de 15 mm d'arête et la dispersion est

caractérisée visuellement de manière qualitative. Le LCPC a proposé plusieurs évolutions de la norme ASTM (Pham *et al.*, 2008 ; Haguigui *et al.*, 2013) dont la réalisation de l'essai à partir d'une forme régulière et cylindrique, reproductible dans un moule et la quantification non pas uniquement de la dispersion, mais également de l'évolution des dimensions de l'échantillon. Dans le cas des essais présentés dans cet article, l'échantillon de sol est compacté de manière dynamique à l'aide d'un pilon du même diamètre que le moule, en trois couches, de manière à obtenir une éprouvette cylindrique de diamètre et de hauteur de 5 cm. Le suivi se fait en observant l'évolution de trois grandeurs : la hauteur de l'échantillon (H), le diamètre à son sommet (D_{haut}) et le diamètre à sa base (D_{base}).

2.2. Acquisition des images

L'acquisition se fait grâce à un appareil photo piloté par un nano-ordinateur, ce qui permet de réaliser le montage à faible coût. Le suivi est réalisé pendant une heure, avec acquisition d'une photo par seconde. Deux méthodes de prise de vue sont possibles : l'une où l'échantillon est éclairé directement (convient pour des échantillons clairs), l'autre où c'est le fond de l'aquarium qui est éclairé (convient pour des échantillons sombres). Le but est d'avoir un fort contraste de luminosité entre l'échantillon et le fond de l'aquarium afin de faciliter le traitement d'image. La figure 1 montre une photographie du montage, dans le cas d'un fond clair.

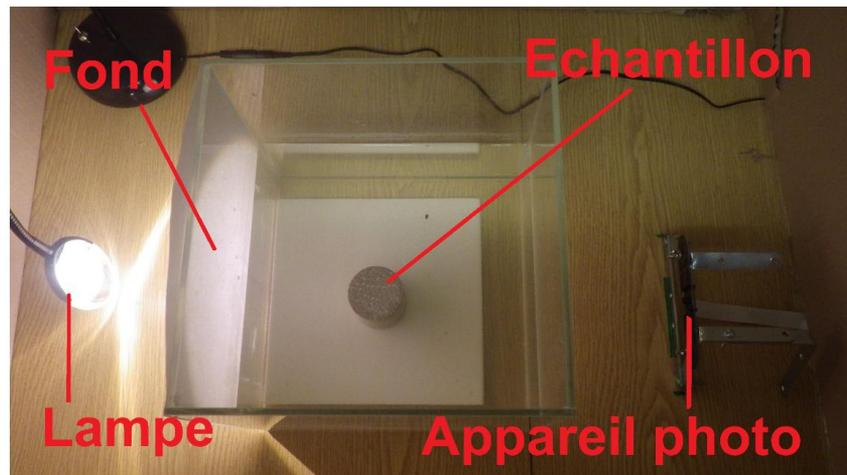


Figure 1 : montage utilisé (fond clair)

2.3. Traitement d'images

Le traitement est effectué à la suite de la prise de vue, sur le nano-ordinateur servant à piloter la prise de photos. La bibliothèque libre OpenCV pour Python permet de réaliser les opérations de traitement d'images. Dans le cas présent, le principe clé est l'utilisation de la méthode d'Otsu, qui se base sur l'histogramme de répartition de la luminosité de la photo. Il s'agit d'un histogramme qui donne, pour chaque valeur de luminosité, le nombre de pixels de la photo ayant cette luminosité. La méthode d'Otsu consiste à essayer chaque valeur seuil de luminosité possible et à calculer les variances internes des deux classes obtenues pour chaque seuil. La valeur seuil qui est gardée est celle pour laquelle les variances internes sont les plus faibles. Elle permet de séparer automatiquement deux grands domaines sur une image, l'un clair et l'autre sombre. La limite entre les deux

domaines correspond au contour de l'échantillon. À partir de ce contour, il est possible d'extraire la hauteur et les diamètres en haut et en bas de l'échantillon. La figure 2 montre un exemple d'application de la méthode, avec l'histogramme de répartition de la luminosité d'une image, la valeur de seuil obtenue, le contour correspondant (pointillés sur l'image traitée) et les trois mesures extraites.

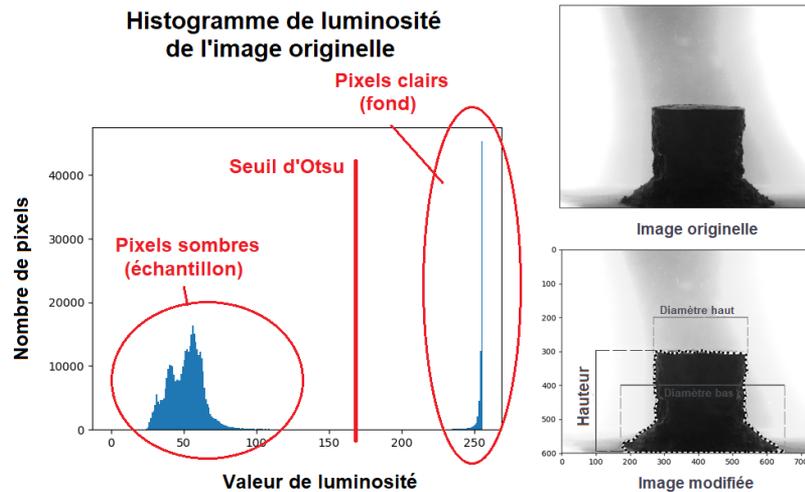


Figure 2 : méthode d'Otsu

À ce stade du traitement d'images, les valeurs des grandeurs mesurées sont obtenues en pixels. Il est possible de calibrer le montage en prenant en photo un damier dont l'arête de chaque case est connue. Le damier doit être immergé dans l'aquarium, à l'endroit où se trouve normalement l'échantillon. Le damier est reconnu automatiquement grâce aux fonctions disponibles dans OpenCV et les longueurs en pixels des arêtes de toutes les cases sont calculées. La valeur moyenne obtenue est utilisée pour déterminer la longueur en mm d'un pixel de l'image à l'endroit où se trouve l'échantillon. Pour le montage présenté dans cet article, une valeur moyenne de 56,2 pixels pour une arête de 10 mm a été obtenue. En prenant cette valeur comme référence, l'analyse des données montre que 48 % des arêtes ont été mesurées avec un écart inférieur à un pixel (soit environ 0,2 mm), 89 % avec un écart inférieur à 2 pixels (environ 0,4 mm) et 99 % avec un écart inférieur à 3 pixels (environ 0,6 mm). Cette précision est considérée acceptable dans le cadre de cet essai.

3. Résultats

3.1. Echantillons utilisés

Quatre sols différents ont été testés :

- une *marne de Bricy* (45) classé A1/A2 selon la norme NF P11-300, qui provient des formations tertiaires de l'Orléanais et contient des cailloux calcaires dans une gangue argileuse blanchâtre. Afin d'éviter les effets liés à de trop grandes hétérogénéités du matériau, les cailloux de taille supérieure à 5 mm ont été retirés avant essai ;

- un *sable limoneux de La Ville-aux-Dames (37)* classé B5, qui provient d'une homogénéisation de prélèvements issus du corps de digue de la levée de protection du val de Tours. Il s'agit d'un matériau de type alluvions anciennes de la Loire, de couleur brune ;
- un *limon de Marche-les-Dames (Belgique)* classé A2, limon de couleur ocre utilisé dans le cadre de l'opération DOFEAS (Digues et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillement, Séisme) pour la construction de deux digues ;
- une *argile de Neuville-aux-Bois (45)*, classé A3/A4, qui provient des formations de Sologne et est composé d'argiles très plastiques de couleur claire avec quelques passées de sables.

Chaque type de sol a été testé à trois teneurs en eau différentes à l'état hydrique sec, moyen et humide pour chacun. L'ajustement de chaque état hydrique a été réalisé visuellement et la teneur en eau mesurée à l'étuve postérieurement. Chaque combinaison sol-teneur en eau a été testée deux fois. Le tableau 1 récapitule les caractéristiques de chaque échantillon.

Tableau 1 : Caractéristiques des échantillons

matériau	échantillon	teneur en eau (%)	masse volumique humide (kg/m ³)	masse volumique sèche (kg/m ³)	indice des vides (-)	succion (kPa)
Marne de Bricy (A1-A2)	sec1	12,4	1549	1378	0,95	120
	sec2	11,5	1514	1357	0,98	
	moyen1	18,7	1879	1583	0,70	48
	moyen2	18,3	1851	1564	0,72	
	humide1	25,8	1923	1529	0,76	6
	humide2	25,0	1938	1551	0,73	
Sable limoneux de La Ville-aux-Dames (B5)	sec1	9,3	2014	1842	0,46	15
	sec2	9,4	2004	1832	0,47	
	moyen1	11,1	2084	1876	0,43	10
	moyen2	11,1	2063	1857	0,45	
	humide1	17,5	2137	1818	0,48	0,1
	humide2	17,5	2077	1767	0,52	
Limon de Marche-les-Dames (A2)	sec1	13,8	2071	1819	0,48	12
	sec2	13,8	2081	1829	0,47	
	moyen1	18,7	2056	1732	0,55	2
	moyen2	18,7	2082	1753	0,53	
	humide1	23,2	2226	1807	0,49	0,4
	humide2	23,2	2031	1649	0,63	
Argile de Neuville-aux-Bois (A3-A4)	sec1	7,9	1855	1719	0,56	2500
	sec2	7,9	1816	1683	0,60	
	moyen1	20,4	2034	1689	0,59	26
	moyen2	20,4	2025	1682	0,60	
	humide1	23,4	2062	1671	0,61	25
	humide2	23,7	1965	1588	0,69	

L'indice des vides des différentes éprouvettes a été calculé à partir d'une masse volumique des particules de 2687 kg/m³ mesurée sur le limon sableux de La Ville-aux-Dames. La succion a été mesurée par la méthode du papier filtre (ASTM D6572-00) décrite par Delage et Cui (2000).

4. Résultats

Des graphes présentant l'évolution des 3 grandeurs mesurées au cours du temps ont été réalisés pour chaque essai. La courbe noire ΔH représente la variation en hauteur de l'éprouvette : les valeurs positives indiquent un gonflement par rapport à la forme initiale et

les valeurs négatives une diminution. La courbe en gris foncé ΔD_{haut} restitue la variation du diamètre au sommet de l'éprouvette et la courbe gris clair ΔD_{base} la variation du diamètre à la base de l'éprouvette. Pour ces deux courbes les valeurs négatives indiquent une diminution de la taille de l'éprouvette et les valeurs positives une augmentation.

La figure 3 présente les résultats acquis pour les deux échantillons du limon de La-Ville-aux-Dames à une teneur en eau de 13,8 %.

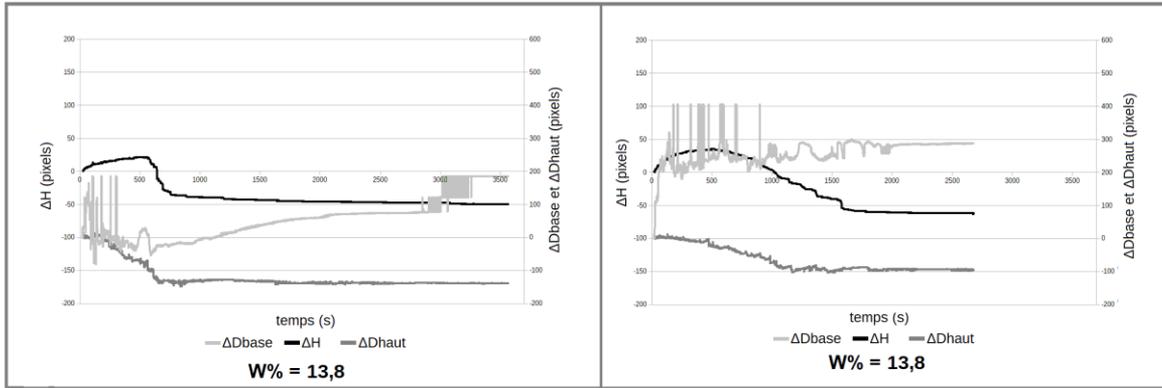


Figure 3 : évolution des dimensions de 2 éprouvettes 5x5 de limon de La Ville-aux-Dames à une teneur en eau de 13,8% lors de l'essai d'émiettage amélioré

Les deux graphes montrent une évolution similaire : La hauteur de l'échantillon augmente pendant environ 500 secondes, ce qui traduit un gonflement de l'éprouvette. Elle diminue ensuite, de manière plus brutale au cours de l'essai 1, traduisant ainsi l'effondrement de l'échantillon. Le diamètre au sommet de l'échantillon diminue dès l'immersion de l'éprouvette. Le gonflement de l'échantillon se produit donc simultanément à sa désagrégation. La courbe du diamètre à la base est peu lisible, en raison des nombreux artefacts dus aux particules en suspension qui rendent difficile sa détection par l'algorithme de traitement d'image.

La figure 4 présente les graphes obtenus pour le même limon, mais à une teneur en eau de 18,7%.

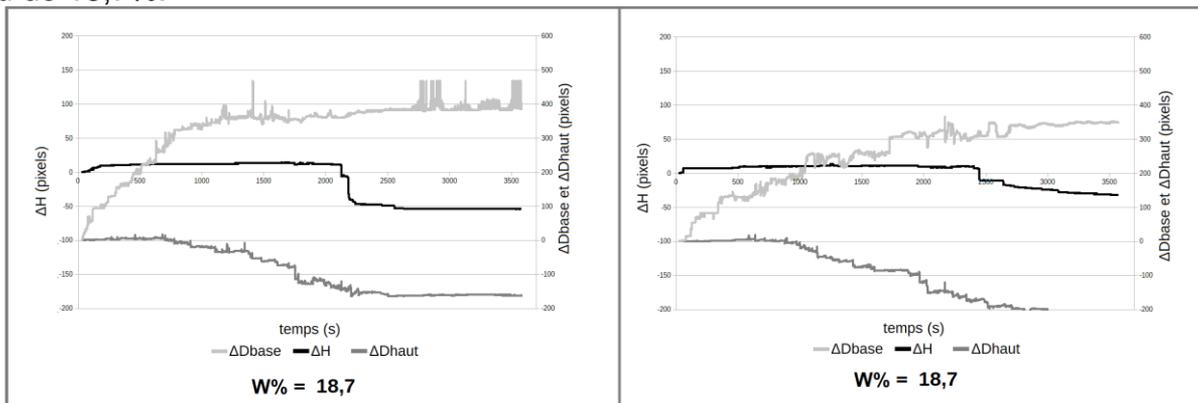


Figure 4 : évolution des dimensions de 2 éprouvettes 5x5 de limon de La Ville-aux-Dames à une teneur en eau de 18,7% lors de l'essai d'émiettage amélioré

La courbe de la hauteur de l'échantillon montre que l'effondrement de l'échantillon intervient plus tard que pour la teneur en eau précédente, aux alentours de 2100-2400 secondes. Elle indique également un gonflement très faible. La courbe du diamètre haut montre que la largeur du sommet de l'éprouvette ne commence à diminuer significativement que vers 800-900 secondes. La courbe du diamètre à la base montre une augmentation dès la mise en immersion, ce qui traduit que la désagrégation de

l'échantillon commence dès sa mise en immersion, même si elle n'affecte pas immédiatement ses parties hautes.

La figure 5 montre les graphes obtenus pour le même limon, à une teneur en eau de 23,2%.

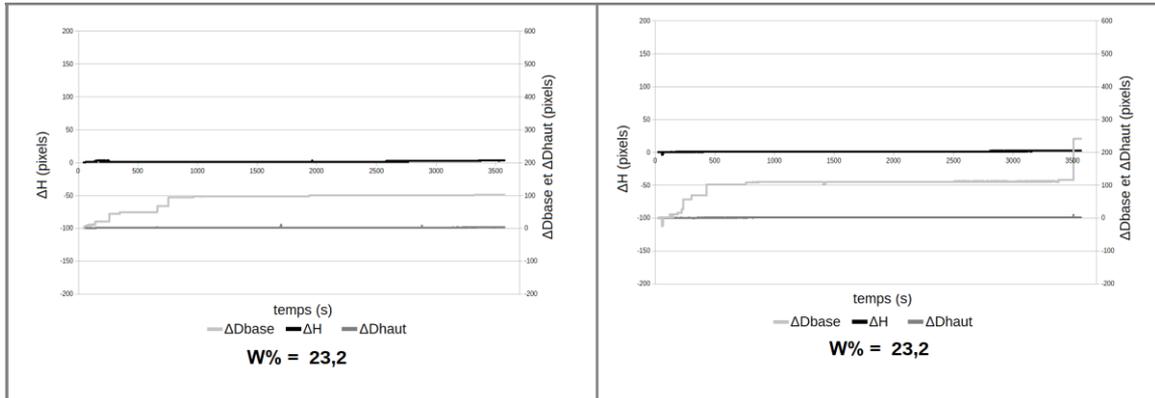


Figure 5 : évolution des dimensions de 2 éprouvettes 5x5 de limon de La Ville-aux-Dames à une teneur en eau de 23,2% lors de l'essai d'émiettage amélioré

Les courbes montrent que les dimensions de l'échantillon n'évoluent pas durant les 3600 secondes de l'essai. La légère augmentation du diamètre à la base est due au détachement de quelques particules et ne traduit pas une désagrégation importante de l'échantillon.

Le tableau 2 récapitule les résultats obtenus pour l'ensemble des essais d'émiettage réalisés.

Tableau 2 : Résultats des essais

Sol	Argile de Neuville-aux-Bois (A3-A4)		Limon de Marche-les-Dames (A2)		Sable limoneux de La Ville-aux-Dames (B5)		Marne de Bricy (A1-A2)	
	durée avant effondrement (s)	gonflement	durée avant effondrement (s)	gonflement	durée avant effondrement (s)	gonflement	durée avant effondrement (s)	gonflement
Sec	250 – 1250	Oui	500 – 550	Oui	10 – 10	-	0 – 0	-
Moyen	pas d'effondrement	Non	2100 – 2450	Oui	10 – 20	-	500 - 1000	Oui
Humide	pas d'effondrement	Non	pas d'effondrement	Non	pas d'effondrement	Non	pas d'effondrement	Non

Ces résultats montrent que le comportement d'un échantillon de sol lors d'un essai d'émiettage dépend fortement de sa teneur en eau initiale : en effet, aucun des matériaux à l'état humide ne s'est effondré à l'issue des 3600 d'essai, alors que tous les matériaux secs ont subi un effondrement (au bout d'un temps toutefois variable). De plus, le gonflement ne peut se produire que pour une plage de teneur en eau donnée : un matériau trop sec s'effondre dès l'immersion, alors qu'un matériau trop humide ne gonfle pas. La durée avant qu'un échantillon ne s'effondre peut s'avérer assez variable entre deux échantillons de même matériau et de même teneur en eau.

5. Interprétation

Les graphes obtenus à la suite d'un essai d'émiettage permettent d'identifier plusieurs comportements différents :

- L'échantillon peut se désagréger dès sa mise en immersion ;
- L'échantillon peut s'effondrer plus ou moins brusquement, cet effondrement se produisant souvent après ou en même temps qu'une phase de gonflement ;

- L'échantillon peut rester stable pendant toute la durée de l'essai.

Ces trois types de comportement sont dépendants de la teneur en eau initiale : la désagrégation dès l'immersion est plutôt associée à des échantillons de faible teneur en eau (matériau compacté à l'état sec), l'absence de variation à des échantillons de forte teneur en eau (matériau compacté à l'état humide). Le gonflement est observé pour des teneurs en eau plus intermédiaires : une teneur en eau trop faible rend l'échantillon trop sensible pour qu'il puisse gonfler avant sa désagrégation, une teneur en eau trop forte ne permet pas le gonflement car l'échantillon est déjà saturé. Les courbes montrant l'évolution de la hauteur et du diamètre en eau de l'échantillon sont généralement adaptées pour déterminer le comportement d'un échantillon au cours de l'essai. En revanche, la courbe du diamètre à la base de l'échantillon est souvent plus délicate à interpréter : en effet, la mesure est souvent perturbée par la présence de particules en suspension qui peuvent provoquer des artefacts lors du traitement d'images.

L'interprétation de cet essai est donc très intéressante tant qu'il reste dans le champ qualitatif car les premiers résultats montrent à l'évidence que l'essai d'émiettement, réalisé dans ces conditions, n'est pas répétable.

L'essai d'émiettement amélioré permet par contre de dégager des règles de comportement et notamment de vulnérabilité des matériaux soumis à une immersion. L'exploitation des courbes (principalement ΔH) peut ainsi se traduire par l'évaluation de la vulnérabilité du sol compacté en identifiant 4 types de comportements :

- matériau très vulnérable, présentant une désagrégation très rapide, voire instantanée lors de l'immersion (moins de 50 secondes de tenue) ;
- matériau vulnérable, présentant une désagrégation rapide après immersion, entre 50 et 1500 secondes avant effondrement complet ;
- matériau peu vulnérable, se désagrégant lentement après immersion, entre 1500 et 2500 secondes ;
- matériau non vulnérable, avec absence d'évolution durant le temps de l'essai (soit 3600 secondes).

6. Conclusions

L'étude a montré qu'il est possible de suivre, à l'aide de photographies prises à intervalles réguliers, l'évolution de différentes dimensions d'un échantillon au cours de son immersion dans un récipient rempli d'eau. Ce suivi est effectué à l'aide d'un dispositif souple, peu onéreux et simple à mettre en place. L'utilisation de méthodes de traitement d'image permet une automatisation de la récupération des dimensions de l'échantillon sur chaque photographie. Il est également possible de convertir les dimensions en pixels récupérées sur les photographies en unités de longueur.

Les échantillons utilisés sont des éprouvettes de sol compacté dynamiquement en trois couches. La hauteur de l'éprouvette et son diamètre sont tous deux de 5 cm. Les dimensions initialement retenues pour le suivi étaient la hauteur de l'échantillon, le diamètre au sommet de l'échantillon et le diamètre à sa base. La réalisation des essais a montré que la hauteur de l'échantillon et le diamètre à son sommet sont des paramètres pertinents pour suivre son évolution. Le diamètre à la base s'avère moins intéressant, car la mesure est souvent perturbée par des artefacts dus à la mise en suspension de particules de sol au cours de l'essai.

Des essais ont été menés sur 4 types de matériaux, à trois teneurs en eau différentes pour chacun. Les résultats mettent en évidence 3 grands types de comportement, qui dépendent de la teneur en eau : une désagrégation immédiate (teneur en eau faible) ; un effondrement survenant après un temps plus long et généralement associé à une phase de gonflement (teneur en eau moyenne) ; et une absence d'évolution (teneur en eau forte). Ces trois comportements ne sont pas forcément tous observés sur un même type de matériau : ainsi l'argile A3-A4 testée ne se désagrège pas instantanément même à une teneur en eau faible.

L'essai d'émiettage amélioré semble être un essai pertinent pour améliorer notre compréhension des mécanismes de dégradation et principalement d'érosion interne. Il peut permettre d'évaluer la vulnérabilité des matériaux compactés vis-à-vis d'un phénomène d'immersion comme cela peut être le cas en période d'inondation sur une digue.

D'un point de vue scientifique, l'essai apporte une dimension intéressante à la compréhension du comportement des sols non saturés. Les essais réalisés par le Cerema de Blois et le laboratoire SRO de l'Ifsttar donnent quelques résultats contre-intuitifs, tels que :

- Des vitesses de désagréations qui ne sont pas liés à la valeur seule de succion dans le sol ; certains sols limoneux à succion modérée se désagrège plus vite que des sols argileux à succion élevée ;
- Des vitesses de désagrégation qui ne sont pas liées à la cohésion apparente mais à la vitesse de pénétration de l'eau dans le matériau et à la nature minéralogique des particules ;

Le type de comportement (vulnérable, peu vulnérable, pas vulnérable) n'étant pas relié à une caractéristique directement mesurable comme la succion, l'indice des vides ou la saturation, l'essai d'émiettage semble justifié comme un nouvel essai à développer : il apporte une dimension caractéristique qui ne dépend pas des paramètres mesurables classiques mais d'autres, qu'il reste à définir. Plusieurs pistes peuvent être envisagées à la suite de cette étude : améliorer la méthode d'essai sur le temps de l'essai et la méthode de compactage afin d'observer d'éventuelles différences de comportement ; multiplier les essais sur différents types de matériaux, afin de pouvoir déterminer des profils types de comportement des sols et d'établir une classification de la sensibilité à la désagrégation ; tester les états hydriques (de départ ou acquis par séchage ou humidification) en lien avec de nombreux autres paramètres de sols (succion, cohésion ...) pour comprendre les mécanismes de désagrégation.

7. Références bibliographiques

ASTM D6572-00 (2000). Standard test methods for determining dispersive characteristics of clayey soils by the crumb test, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Haghighi I. et al. : An "Enhanced Crumb Test" for better characterizing water effects on soils, Geotechnical Testing Journal (submitted)

Haghighi I. (2012). Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques. Thèse Université Paris-Est.

PHAM T.L. et al. (2008). Development of a new test to characterize dispersion of soil. 4Th International Conference on Scour and Erosion, Tokyo.