

THÈSE

Présentée pour obtenir

LE DIPLÔME DE DOCTORAT EN-SCIENCES

SPÉCIALITÉ : GENIE CIVIL

Par

MENAD KAMEL

TRANSPORT ET RÉTENTION DES PARTICULES FINES DANS LES MILIEUX POREUX

Soutenue publiquement Le 11 Mars 2020 à 10H00

Devant le jury composé de :

Président :	LAREDJ Nadia	Professeur	UMAB -Mostaganem
Examineurs :	DELLA Noreddine	Professeur	Université de Chlef
	ARAB Ahmed	Professeur	Université de Chlef
	BERRABAH Hamza M	MCA	CUR Relizane
Rapporteur :	MISSOUM Hanifi	Professeur	UMAB -Mostaganem
Co-rapporteur :	BENDANI Karim	Professeur	UMAB- Mostaganem

Remerciements

Je tiens à exprimer, en premier lieu, mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, professeur Hanifi MISSOUM de m'avoir confié ce sujet de recherche que je trouve particulièrement intéressant. Pour la confiance qu'il a placée en moi en acceptant de diriger ce travail, et surtout pour sa disponibilité, son enthousiasme et ses grandes qualités scientifiques. Les discussions menées avec vous m'ont toujours apportées un plus. Aucun mot ne pourrait exprimer l'estimation que j'ai pour vous.

J'exprime ainsi ma profonde gratitude au professeur Karim BENDANI, co-directeur de thèse, qui a collaboré dans ce travail par ses précieux conseils, son dynamisme et son motivation. Un homme avec de grandes qualités humaines, que j'ai toujours apprécié.

Je voudrais remercier également le professeur Nadia Laredj pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury. Je remercie également les professeurs Noreddine DELLA et Ahmed ARAB et le docteur Madji Hamza BERRABAH d'avoir accepté de lire, de commenter et de juger cette thèse en qualité de rapporteurs.

Et comme ce travail a été réalisé dans les locaux du laboratoire de construction de transport et de protection de l'environnement (LCTPE), dont je fais partie, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers ses responsables qui ont mis à notre disposition les moyens nécessaires pour concrétiser ce travail. Je suis reconnaissant également envers monsieur Belkacem KHALIFA, ingénieur de labo, et au doctorant Ahmed BENGUENAB qui m'ont aidé pour la réalisation des essais.

Un hommage au défunt, monsieur Abdelkader BOURAHLA, géologue, historien et militant pour la protection de l'environnement, qui m'a beaucoup aidé par des informations et des illustrations photographiques sur le site de Kharouba. Que dieu l'accueille dans son vaste paradis.

En fin, un grand merci pour tous ceux qui étaient à mes côtés durant la période d'élaboration de cette thèse, et en particulier mes chères parents qui ont toujours cru en moi 'c'est grâce à vous que je suis devenu ce que je suis', et à ma femme qui m'a énormément soutenu 'merci pour tout ce que tu fais pour moi' .

À mes parents

À mon épouse

À ma source de bonheur...

Mes chères enfants Amine, Anes et Belkïs

À mes frères et sœurs

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Liste des symboles	vi
Liste des figures	v
Liste des tableaux	ix
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Le transport solide et les processus d'érosion des sols

I.1. Introduction	5
I.2. Les mécanismes de transport et de rétention des particules dans un milieu poreux	5
I.2.1. Description des milieux poreux	5
I.2.2. Ecoulement d'eau dans un milieu poreux.....	7
I.2.3. Transport des particules dans les sols.....	8
I.3. Impact du transport solide dans les sols	9
I.3.1. Transport des polluants	9
I.3.2. Erosion des sols	9
I.3.3. Colmatage des sols	9
I.4. L'érosion externe	10
I.4.1. Définition et typologie de l'érosion externe	10
I.4.1.1. Erosion pluviale	11
I.4.1.2. Erosion fluviale	12
I.4.1.3. Erosion maritime	13
I.4.2. Conséquences de l'érosion hydraulique sur la dégradation des sols	14
I.5. L'érosion interne	15
I.5.1. Définition et typologie de l'érosion interne	15
I.5.1.1. Les phénomènes d'arrachement	15
I.5.1.2. Les phénomènes de transport	17
I.5.2. Processus de l'érosion interne.....	20
I.5.3. Pathologies des ouvrages liés à l'érosion interne	22
I.6. Caractérisation de l'érosion	26
I.6.1. Erodabilité des sols.....	27
I.6.2. Essais d'érosion externe.....	28
I.6.2.1. Essai d'érosion en canal (Hydraulic Flume Test)	28
I.6.2.2. Essai d'érosion par cylindre tournant (Rotating Cylinder Test)	31
I.6.2.3. Essai d'érosion par jet d'eau (Jet Erosion Test)	31
I.6.2.4. Essai de simulation de pluie et de ruissellement	32
I.6.3. Essais d'érosion interne.....	33
I.6.3.1. Essai d'érosion de trou 'HET' (Hole Erosion Test)	33

CHAPITRE IV : Etude expérimentale de l'érosion interne par suffusion

IV.1. Objectif de l'étude expérimentale	103
IV.2. Caractérisation des matériaux testés	104
IV.3. Dispositif expérimental et protocole d'essai.....	107
IV.3.1. Dispositif expérimental	107
IV.3.2. Protocole d'essai.....	108
IV.4. Etude paramétrique de l'érosion (résultats et discussions).....	109
IV.4.1. Influence du pourcentage initial des fines	110
IV.4.2. Influence du gradient hydraulique	117
IV.4.3. Influence de la pression de consolidation	120
IV.5. Détermination du gradient hydraulique critique.....	122
IV.6. Conclusion.....	125

CHAPITRE V : Evaluation de la stabilité interne des milieux granulaires

V.1. Introduction.....	128
V.2. Résultats expérimentaux de la deuxième campagne d'essais.....	128
V.3. Applicabilité des approches proposées dans la littérature	135
V.3.1. Approches géométriques basées sur l'analyse de la granulométrie du sol.....	135
V.3.2. Approches géométriques basées sur l'analyse de la distribution de la taille des constrictionns	137
V.4. Proposition d'une nouvelle approche géométrique pour l'évaluation de la stabilité interne des sols	140
V.5. Conclusion	144
Conclusion générale et perspectives	146
Références bibliographiques	150

Résumé

L'étude de la mobilité des particules dans les milieux poreux est un sujet qui concerne plusieurs domaines d'application. Cette recherche s'intéresse au phénomène d'érosion, qui est considéré comme la principale cause de la dégradation des sols et de l'endommagement des ouvrages géotechniques.

Une étude expérimentale est menée pour évaluer la stabilité interne des sols non cohérents vis-à-vis de la suffusion. Ce processus d'érosion correspond à la migration des particules fines à travers la porosité du sol sous l'action d'un flux hydraulique est considéré par beaucoup d'auteurs comme mécanisme d'effondrement des sols.

Le sol investigué provient de la zone de Kharouba, située au nord-est de la wilaya de Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), où l'érosion a causé plusieurs dommages durant les dernières années.

Pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion, deux approches ont été présentées dans la littérature: une approche géométrique basée sur l'analyse de la distribution granulométrique ou de la distribution de la taille des constriction du sol, et une approche hydraulique basée sur la détermination du seuil de la sollicitation hydraulique au-delà de laquelle la suffusion est initiée.

De la synthèse bibliographique, il est ressortit que la plupart des méthodes géométriques proposées sont conservatives car elles classifient des sols stables comme instables. Les limites de ces méthodes proviennent essentiellement du fait qu'elles ne prennent pas en considération les principaux paramètres pouvant influencer la réponse du sol à l'érosion. Les critères hydrauliques sont aussi à discuter car aucun modèle ne donne avec précision une limite exacte du déclenchement de l'érosion. D'autre part, il est évident que l'évaluation exacte de la susceptibilité à l'érosion d'un sol nécessite une combinaison des deux approches (géométrique et hydraulique). Peu de travaux se sont intéressés à la combinaison des deux critères.

Pour une meilleure estimation de la susceptibilité des sols non cohérents à l'érosion, on a mené en premier lieu une étude expérimentale paramétrique pour identifier l'influence de certaines propriétés sur les processus d'érosion. Les essais sont réalisés à l'aide d'un perméamètre à charge constante. La suffusion est suivie par évaluation de la quantité des particules érodées, ainsi que par l'évolution des caractéristiques hydrauliques du milieu. Les résultats obtenus montrent que l'érodabilité du sol dépend fortement de sa granulométrie, de son état de contrainte et des conditions hydrauliques imposées. En fonction de la contribution de ces paramètres dans la probabilité du développement de la suffusion, une nouvelle approche géométrique est proposée pour évaluer la stabilité interne des sols. L'application de ce modèle donne une meilleure évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion par rapport aux modèles proposés dans la littérature.

Mots clés : Erosion – Suffusion – Stabilité interne – Critère géométrique – Critère hydraulique – Kharouba – Mostaganem

Abstract

The study of particle mobility through porous media is a topic that involves several fields of engineering application. This research focuses on the phenomenon of erosion, which is considered to be the main cause of soil degradation and damage to geotechnical structures.

An experimental study is conducted to evaluate the internal stability of cohesionless soils against suffusion. This erosion process corresponds to the migration of fine particles through the porosity of soils under the driven force generated by of a hydraulic flow. This is considered by many authors as a mechanism for soil collapse.

The soil under investigation is collected from Kharouba area, located in the northeast part of Mostaganem (northwest Algeria), where erosion has caused several damages recently.

For the assessment of soil susceptibility to suffusion, two approaches have been presented in the literature: a geometric approach based on the analysis of the grain size distribution or on the analysis of the constriction size distribution of the soil. A hydraulic approach is based on monitoring the threshold of hydraulic loading beyond which suffusion is triggered.

From the literature review, it appeared that most of the proposed geometric methods are conservative because they classify stable soils as unstable. The main limitations of these methods are: they do not take into account the main parameters that can influence the soil response to erosion. The hydraulic criteria are also to be discussed because until now no particular model gives precisely a hydraulic threshold at which the erosion is triggered. On the other hand, it is obvious that the exact assessment of a soil susceptibility to erosion requires a combination of both approaches (geometric and hydraulic). Few studies have focused on the combination of the two criteria.

To better estimate the susceptibility of cohesionless soils to erosion, a parametric experimental study was firstly conducted to identify the influence of some properties on the erosion processes. The tests are performed using a constant-head permeameter. Suffusion is followed by an evaluation of the quantity of eroded particles, as well as by the evolution of the hydraulic characteristics of the medium. The results obtained indicate that the erodibility of the soil depends strongly on its particle size distribution, the stress state as well as on the imposed hydraulic conditions. Based on the contribution of these parameters to the probability of suffusion development, a new geometric approach is proposed to assess the internal stability of soils. The application of this model provides a better assessment of the susceptibility of soils to suffusion than the existed models in the literature.

Keywords: Erosion - Suffusion - Internal stability - Geometric criterion - Hydraulic criterion - Kharouba - Mostaganem

ملخص

دراسة تنقل الجسيمات في الأوساط المسامية هو موضوع يتعلق بعدة مجالات للتطبيق. هذا البحث يهتم بظاهرة تآكل التربة التي تعتبر السبب الرئيسي لتدهور خصائص التربة و انهيار المنشآت الجيوتقنية.

تم إجراء دراسة تجريبية لتحديد الثبات الداخلي للأتربة الغير متماسكة في ما يتعلق بظاهرة تنقل الجزيئات الصغيرة عبر مسامية التربة تحت تأثير التدفق الداخلي للماء. يعتبر العديد من المؤلفين هذه الظاهرة آلية لانهيار الأتربة.

التربة التي تم فحصها من خلال هذه الدراسة جلبت من منطقة خروبة ، الواقعة شمال شرق ولاية مستغانم (شمال غرب الجزائر) ، حيث تسبب التآكل في تضرر العديد من المنشآت في السنوات الأخيرة

لتحديد قابلية التربة للتآكل الداخلي، تم طرح مقاربتين في الدراسات السابقة: مقارنة جيومترية تعتمد على تحليل توزيع حجم الجسيمات، أو توزيع حجم الفراغات في التربة. المقارنة الثانية، وهي مقارنة هيدروليكية، تعتمد على تحديد القيمة الدنبي للإجهاد الذي يحدثه تدفق الماء الذي يبدأ عنده التآكل.

من الدراسة البيبليوغرافية، يتبين أن معظم الأساليب الجيومترية المقترحة غير دقيقة لأنها تصنف بعض الأتربة المستقرة على أنها غير مستقرة. تتبع نقائص هذه الطرق أساسا من أنها لا تأخذ بعين الاعتبار العوامل الرئيسية التي يمكنها أن تؤثر في استجابة التربة للتآكل. يجب أيضا مناقشة المعايير الهيدروليكية نظرا لأنه لحد الآن لا يوجد نموذج يحدد بدقة القيمة الحقيقية المسببة لبداية التآكل. من جهة أخرى، من الواضح أن التقويم الدقيق لقابلية التربة للتآكل يتطلب المزج بين المقاربتين (الهندسية و الهيدروليكية). هذا المزج بين المعيارين لم يأخذ بعين الاعتبار إلا من طرف قليل من الباحثين.

لتقدير أنجع لمدى قابلية التربة الغير متماسكة للتآكل، قمنا أولا بإجراء دراسة تجريبية لتحديد تأثير بعض المعايير على ظهور و تطور هذه الظاهرة. تم إجراء هذه التجارب بواسطة جهاز النفاذية. قمنا بمتابعة تآكل التربة بواسطة حساب كمية الجسيمات التي تخرج من العينة تحت تأثير تدفق الماء أثناء التجربة، ومن جهة أخرى بملاحظة تطور الخصائص الهيدروليكية للعينة. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن قابلية التربة للتآكل تتعلق خصوصا بالتوزيع الحجمي للجسيمات، بحالة الإجهاد و بقوة تدفق الماء في التربة. بناءا على مساهمة هذه الخصائص في ظهور التآكل تم اقتراح مقارنة هندسية جديدة لتقدير الاستقرار الداخلي للتربة. يعطي تطبيق الطريقة المقترحة تقييما أفضل لمدى الاستقرار الداخلي للتربة مقارنة بالنماذج المقترحة سابقا. أخيرا، قدمنا طريقة لحساب القيمة الحرجة للقوة الهيدروليكية المسببة لظهور التآكل بدلالة معامل الثبات المقترح في الطريقة الجيومترية و ذلك من أجل المزج بين المقاربتين (الهندسية و الهيدروليكية).

الكلمات المفتاحية : تآكل التربة – تنقل الجسيمات الدقيقة – استقرار داخلي – معيار جيومترى – معيار هيدروليكي – خروبة – مستغانم.

LISTE DES SYMBOLES

C_u	Coefficient d'uniformité [-]
D_c	Diamètre des constriction [mm]
D_{CD}	Diamètre des constriction pour un arrangement dense des particules [mm]
D_{CL}	Diamètre des constriction pour un arrangement lâche des particules [mm]
d_n, d_f	Diamètre de division de la courbe granulométrique [mm]
d_0, O_{50}	Diamètre moyen des tubes capillaires [mm]
d_{max}	Diamètre maximal des grains [mm]
D_h^c	Diamètre effectif de Kozeny [mm]
D_r, d_r	Densité relative [-]
F, F_n, P	Pourcentage des fines [%]
i	Gradient hydraulique [m/m]
i_{cr}	Gradient hydraulique critique [m/m]
n	Porosité du milieu [m ³ /m ³]
n_c	Porosité de la fraction grossière [m ³ /m ³]
n_f	Porosité finale [m ³ /m ³]
n_c	Porosité initiale [m ³ /m ³]
k	Perméabilité intrinsèque [m ²]
k_{er}	Coefficient d'érosion [s/m]
Q_{smax}	Débit solide maximal érodé [g/sec]
S_{cmax}	Surface maximale inscrite entre quatre particules tangentes [mm ²]
$GSD^{(c)}$	Distribution granulométrique de la fraction grossière
$GSD^{(F)}$	Distribution granulométrique de la fraction des fines
CSD	Distribution de la taille des constriction
τ	Contrainte de cisaillement [Pa]
τ_c	Contrainte de cisaillement critique [Pa]
$\dot{\epsilon}$	Taux d'érosion [kg/m ² .s]
α_D	Coefficient de forme [-]
γ_s	Poids volumique des grains solides [KN/m ³]
γ_w	Poids volumique de l'eau [KN/m ³]
γ'	Poids volumique déjaugé [KN/m ³]
σ_a	Pression (contrainte) de consolidation [Pa]

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1.	Triangle de classification texturale (United States Department of Agriculture)..	6
Figure 1.2.	Illustration de la texture d'un sol argileux (Roth, 2005).....	6
Figure 1.3.	Classification de particules dispersées en fonction de leur taille (Zamani et Maini, 2009).....	7
Figure 1.4.	Les mécanismes de l'érosion pluviale (Pham, 2008).....	12
Figure 1.5.	Les actions de l'érosion fluviale sur une rivière (Nguyen, 2014).....	13
Figure 1.6.	Mécanismes de l'érosion maritime (Pham, 2008).....	13
Figure 1.7.	Phénomène d'arrachement (Pham, 2008).....	15
Figure 1.8.	Phénomène d'érosion régressive (Pham, 2008).....	16
Figure 1.9.	Phénomène de débouillage (Pham, 2008).....	16
Figure 1.10.	Phénomène de bouillonnement (Bendahmane, 2005).....	17
Figure 1.11.	Phénomène de renard (Pham, 2008).....	18
Figure 1.12.	Ouverture d'une brèche dans un barrage par renard (Lautrin, 2003).....	18
Figure 1.13.	Phénomène de suffusion (Pham, 2008).....	19
Figure 1.14.	Schéma représentatif des différents mécanismes de l'érosion interne dans un barrage (Blais, 2004).....	20
Figure 1.15.	Modèle de développement de l'érosion interne dans un barrage a) Erosion régressive ; b) Concentration de fuite (Foster, 1999).....	22
Figure 1.16.	Rupture du barrage de Teton (1976) (Lachouette, 2009).....	24
Figure 1.17.	Inondations à la Nouvelle-Orléans après le passage de l'ouragan Katrina en 2005 (source encyclopédie de l'environnement.....	25
Figure 1.18.	Schéma de l'écoulement dans le sol (Pham, 2008).....	27
Figure 1.19.	Schéma de principe de l'essai d'érosion en canal (Shaikh et al., 1988).....	29
Figure 1.20.	Schéma du dispositif de l'EFA (Briaud et al., 2001).....	30
Figure 1.21.	Classification de l'érodabilité des sols en fonction de la contrainte de cisaillement (Briaud, 2008).....	30
Figure 1.22.	Schéma de l'essai d'érosion par cylindre tournant (Tarog, 2000).....	31
Figure 1.23.	Erodimètre à jet mobile a) Utilisation in-situ ; b) Schéma de la cellule (Mehenni, 2015).....	32
Figure 1.24.	Simulateur de pluie et de ruissellement (Warloulzel, 1999).....	33
Figure 1.25.	Schéma de principe du HET (Wan et Fell, 2004).....	34
Figure 1.26.	Schéma du « flow pump test » a) Cellule d'essai d'érosion interne ; b) Cellule d'essai pour l'érosion de surface ; c)Schéma du montage expérimental (Reddi et al., 2000).....	36
Figure 1.27.	Schéma du dispositif de l'essai d'érosion au triaxial (Beddahmane et al., 2008)	36
Figure 1.28.	Schéma du dispositif de l'essai d'érosion de contact (Béguin, 2011).....	37
Figure 1.29.	Photos prises durant l'essai sur des digues expérimentales (Vaskinn et al., 2004).....	38
Figure 1.30.	Construction d'une digue expérimentale a) Mise en place des matériaux ; b) Interface gravier-limon ; c) et d) Compactage des couches de limons (Béguin, 2011).....	39

CHAPITRE II

Figure 2.1.	Illustration des processus de la suffusion (Sibille, 2016).....	44
Figure 2.2.	Modes de rupture par suffusion (Wan et Fell, 2004).....	45
Figure 2.3.	Distribution des particules fines dans la matrice du sol composée de grains grossiers a) Absence de fines ; b) Présence partielle de fines ; c) Vides remplis par les particules fines (Indraratna et al., 2011).....	46
Figure 2.4.	Fuseau granulométrique des matériaux stables vis-à-vis de la suffusion (Lubochkov, 1969).....	50
Figure 2.5.	Critère de Kezdi (1979).....	51
Figure 2.6.	Critère de De Mello (1975).....	51
Figure 2.7.	Modélisation physique du milieu granulaire (Kovac, 1981).....	52
Figure 2.8.	Critère de Kenney et Lau (1985, 1986).....	54
Figure 2.9.	Critère de Lafleur et al. (1989, 1993).....	55
Figure 2.10.	Critère de Burenkova (1993).....	56
Figure 2.11.	Evaluation de la stabilité interne des mélanges sable-gravier (Wan et Fell, 2004).....	58
Figure 2.12.	Evaluation de la stabilité interne des mélanges argile-silt-sable-gravier (Wan et Fell, 2004).....	58
Figure 2.13.	Méthode alternative pour prédire la stabilité interne des mélanges silt-sable-gravier à granulométrie étalée (Wan et Fell, 2008).....	59
Figure 2.14.	Démarche pour la vérification de la stabilité interne des sols (Li, 2008).....	61
Figure 2.15.	Limite entre les matériaux stables et instables selon la méthode de (Li, 2008)...	62
Figure 2.16.	Démarche pour la vérification de la stabilité interne des sols (Li et Fannin, 2013).....	63
Figure 2.17.	Limite entre les matériaux stables et instables selon la méthode de (Li et Fannin, 2013).....	63
Figure 2.18.	Courbes granulométriques des échantillons testés a) Granulométrie continue (C) ; b) Granulométrie discontinue (D) (Andrianatrehina et al., 2012).....	64
Figure 2.19.	Courbes granulométriques avant et après essai des échantillons C10 et D10 (Andrianatrehina et al., 2012).....	65
Figure 2.20.	Méthode de mesure directe de la stabilité interne des sols (Andrianatrehina et al., 2012).....	65
Figure 2.21.	Illustration de la granulométrie des sols ‘bien gradués’ et des sols ‘mal gradués’ (Chang et Zhang, 2013).....	66
Figure 2.22.	Critère de stabilité interne des sols bien gradués (Chang et Zhang, 2013).....	67
Figure 2.23.	Critère de stabilité interne des sols mal gradués (Chang et Zhang, 2013).....	68
Figure 2.24.	Evaluation de l’efficacité des filtres granulaires (Indraratna et al., 2007).....	70
Figure 2.25.	Evaluation de la stabilité interne des sols (Indraratna et al., 2011).....	71
Figure 2.26.	Evaluation de la stabilité interne des sols non cohérents (Dallo et al., 2013).....	72
Figure 2.27.	Evaluation de la stabilité interne des sols (Dallo et Wang, 2016).....	73
Figure 2.28.	Détermination du gradient hydraulique critique (Adel et al., 1988).....	77
Figure 2.29.	Relation entre le gradient hydraulique critique et l’indice de stabilité (Skempton et Brogan, 1994).....	79
Figure 2.30.	Combinaison des critères géométrique et hydraulique pour l’évaluation de la stabilité des sols non cohérents (Ahlinhan et al., 2012).....	81

Figure 2.31.	Influence du gradient hydraulique sur l'érosion de la kaolinite (Bendahmane et al., 2008).....	83
Figure 2.32.	(a) Influence du pourcentage de fines ; (b) Influence de la pression de confinement sur l'érodabilité des sols (Bendahmane et al., 2008).....	84
Figure 2.33.	Relation entre i_{cr} et la quantité de fines (Ke et Takahashi, 2012).....	85
Figure 2.34.	Relation entre i_{cr} et la densité relative (Ke et Takahashi, 2012).....	85
Figure 2.35.	Evolution du taux d'érosion pour les matériaux testés (Seghir et al., 2014).....	85
Figure 2.36.	Masse cumulée des particules érodées pour différents pourcentages de fines (Seghir et al., 2014).....	85
Figure 2.37.	Variation du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale (Chang et Zhang, 2011).....	86
Figure 2.38.	Relation entre le gradient hydraulique appliqué et la résistance du sol (Ke et Takahashi, 2012).....	86
Figure 2.39.	Résultats des essais de compression triaxiale sur des échantillons érodés et des échantillons non érodés (Ke et Takahashi, 2014b).....	88

CHAPITRE III

Figure 3.1.	Localisation de la zone d'étude	93
Figure 3.2.	Stratigraphie du plateau de Mostaganem (source Agence Nationale des Ressources Hydrauliques A.N.RH. cité par Saibi, 2008).....	94
Figure 3.3.	Répartition mensuelle des précipitations de la station de Mostaganem (1989-2008) (source O.N.M).....	95
Figure 3.4.	Réveil d'un oued dormant	98
Figure 3.5.	Naissance de nouveaux ravins	98
Figure 3.6.	Ouverture et élargissement d'un oued dormant	99
Figure 3.7.	Ouverture d'une fosse et destruction des différents réseaux	99
Figure 3.8.	Destruction des réseaux d'assainissement	99
Figure 3.9.	Destruction des ouvrages de soutènement	99
Figure 3.10.	Effondrement de talus au pied de bâtiment	100
Figure 3.11.	Déchaussement des fondations de bâtiments	100
Figure 3.12.	Début de formation d'une brèche	100
Figure 3.13.	Effondrement totale du talus	100
Figure 3.14.	Localisation des zones de gros dégâts	101

CHAPITRE IV

Figure 4.1.	Schéma du déroulement des essais	104
Figure 4.2.	Distribution granulométrique du sable de Kharouba	105
Figure 4.3.	Distribution granulométrique de la farine de silice	105
Figure 4.4.	Courbes granulométriques des différents mélanges	106
Figure 4.5.	Dispositif expérimental	107
Figure 4.6.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 15\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)....	110
Figure 4.7.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)....	111
Figure 4.8.	Evolution de la masse cumulée érodée ($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$) a) $0\text{sec} < t < 500\text{sec}$; b) $0\text{sec} < t < 5000\text{sec}$	112

Figure 4.9.	Variation de la conductivité hydraulique durant l'érosion ($i=20\text{m/m}$, $\sigma_a=50\text{kPa}$).....	113
Figure 4.10.	Evolution du débit solide en fonction du temps ($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	115
Figure 4.11.	Variation du débit solide érodé maximal en fonction du pourcentage initial des fines	116
Figure 4.12.	Evolution de la masse cumulée érodée pour différentes valeurs du gradient hydraulique appliqué (10% de fines, $\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	117
Figure 4.13.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion pour différentes valeurs du gradient hydraulique a) 5% de fines ; b) 10% de fines	118
Figure 4.14.	Evolution de la conductivité hydraulique pour différentes valeurs du gradient hydraulique (10% de fines, $\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	119
Figure 4.15.	Evolution du débit solide érodé pour différentes valeurs du gradient hydraulique (10% de fines, $\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	120
Figure 4.16.	Evolution de la masse cumulée érodée pour différentes valeurs de la pression de consolidation (5% de fines, $i = 20 \text{ m/m}$).....	121
Figure 4.17.	Débit maximal d'érosion en fonction de la pression appliquée (5% de fines)...	121
Figure 4.18.	Débit maximal d'érosion en fonction de la pression appliquée (10% de fines)..<	122
Figure 4.19.	Variation du taux d'érosion en fonction du gradient hydraulique appliqué ($F=10\%$, $\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	123
Figure 4.20.	Variation du gradient hydraulique critique en fonction du pourcentage initial des fines ($\sigma_a= 50\text{kPa}$).....	124

CHAPITRE V

Figure 5.1.	Courbes granulométriques des matériaux	129
Figure 5.2.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($F = 5\%$, $i = 20\text{m/m}$).....	130
Figure 5.3.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 5\text{m/m}$).....	131
Figure 5.4.	Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 15\text{m/m}$).....	132
Figure 5.5.	Variations du rapport (n_f/n_0) dans les différentes parties de l'échantillon	133
Figure 5.6.	Arrangement des particules a) Etat dense ; b) Etat lâche (Silveira et al. 1975)...	137

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1.1.	Nombre d'incidents dans les barrages pour les différents modes de rupture (Foster et al. 1998).....	23
Tableau 1.2.	Classification de l'érosion (Wan et Fell, 2004).....	35

CHAPITRE II

Tableau 2.1.	Evaluation de la stabilité interne des mélanges silt-sable-gravier et argile-silt-sable-gravier par la méthode de Burenkova (1993) et Kenney et Lau (1985, 1986) (Wan et Fell. 2004).....	57
---------------------	---	----

CHAPITRE IV

Tableau 4.1.	Propriétés physiques des sols testés	106
Tableau 4.2.	Analyse chimique des matériaux	107

CHAPITRE V

Tableau 5.1.	Propriétés physiques des matériaux testés	130
Tableau 5.2.	Evaluation de la stabilité interne des matériaux testés par les critères granulométriques	136
Tableau 5.3.	Evaluation de la stabilité interne des sols testés par les critères de la taille des constrictionns	139
Tableau 5.4.	Evaluation de la stabilité des sols testés par l'approche proposée	143

« *Introduction générale* »

Introduction générale

Enjeux et problématique

Depuis quelques décennies, les catastrophes naturelles n'ont cessé de prendre de l'ampleur à travers le monde faisant de plus en plus de dégâts humains et matériels. Cet accroissement est dû principalement aux dérèglements climatiques causés par le réchauffement de la planète. Parmi les conséquences des changements climatiques, on cite le changement de la pluviométrie, en terme d'intensité de durée et de distributions des précipitations dans l'espace et dans le temps. Par conséquent, les incidents liés à des événements pluvieux extrêmes sont de plus en plus fréquents et dévastateurs.

Les sols en général et les ouvrages géotechniques en particulier sont fortement sollicités, parfois au-delà de leur capacité de réponse. Ce qui peut conduire à leur endommagement et même à leur rupture.

L'exemple le plus marquant est l'ouragan 'Katrina' qui a frappé la nouvelle Orléans (USA) en 2005. Le passage du cyclone a entraîné la rupture des digues de protection. De fortes inondations ont dévasté plus de la moitié de l'espace urbain, faisant environ 1900 victimes et des dégâts estimés à plus de 100 milliards de dollars (Knabb et al., 2005).

L'Algérie, située dans une région semi-aride, très vulnérable aux effets des changements climatiques dont les conséquences sont de plus en plus visibles et alarmantes. Parmi ces conséquences, le risque des inondations qui s'est accentué durant les dernières années. Cet état de fait est illustré par l'exemple frappant des inondations de Bab El-Oued (Alger) en 2001, où plus de 800 personnes sont décédées. Un volume de 800000 m³ de sédiments a été transporté par le ruissellement pour se déposer dans les parties basses de la ville et atteindre plus de 3m de hauteur (Touaibia, 2010). En 2008, les inondations de Ghardaia ont coûté la vie à plus d'une trentaine de personnes. En 2019, les inondations ont

touché plusieurs régions du pays, des personnes sont décédées et d'importants dégâts matériels ont été enregistrés.

La dégradation des sols sous l'effet des forces hydrodynamiques de l'eau en écoulement se fait généralement par l'arrachement et le transport progressif de ses particules. Ce phénomène nommé « érosion » peut être qualifié comme externe s'il est engendré par des circulations d'eau sur la crête des ouvrages. L'érosion interne quant à elle est définie comme la migration des particules au sein du massif du sol induite par un écoulement hydraulique sous-terrain. Les mécanismes des deux phénomènes (érosion externe et érosion interne) sont similaires car ils sont liés à l'équilibre entre les forces hydrodynamiques engendrées par l'écoulement sur la particule et les forces qui s'opposent au mouvement mais avec des conditions hydrauliques et géométriques différentes (Beguin, 2011).

L'érosion hydrique présente un grand problème environnemental, économique et social qui menace beaucoup de pays à travers le monde. En Algérie, environ 14 millions d'hectares sont exposés à une érosion active dans le nord du pays (Meddi et al., 2016). Les pertes en terre ont été estimées à plus de 5000 t/km²/an (Achitte et al., 2006). Les conséquences directes de la dégradation des sols par l'érosion en Algérie sont l'envasement des barrages, la baisse de la fertilité des sols agricoles et de la qualité des eaux sous terrains. En plus des problèmes environnementaux, les processus érosifs présentent un risque majeur pour la stabilité des infrastructures, tels que, les ponts, les routes et les ouvrages de soutènement.

L'intensité de l'érosion varie d'une région à l'autre, la partie nord-ouest du pays est la région la plus érodée (Morsli et al., 2013 ; Hallouz et al., 2017 ; Djoukbala et al., 2018). Dans cette région, le risque d'érosion s'est accentué durant la dernière décennie où des événements catastrophiques se sont produits liés à cet aléa. Nous avons confirmé cette tendance d'accroissement du risque d'érosion dans la zone de Kharouba située à la wilaya de Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie), où le sol a été investigué dans ce travail de recherche, par un suivi permanent de l'évolution du risque d'érosion dans l'espace et dans le temps. Récemment, plusieurs cas d'incidents ont été recensés dans cette zone causant de sérieux dommages à plusieurs structures. Le diagnostic des désordres nous a montré que l'évolution du risque d'érosion dans cette zone est liée à la combinaison de plusieurs facteurs qui devront être pris en compte dans l'étude du phénomène.

Les événements catastrophiques liés à l'érosion qui se répètent régulièrement dans la zone de Kharouba, et qui ne sont pas pris en considération jusqu'à présent dans les études de sol et les études d'aménagement faites dans ce site, sont devenus à part leur caractère naturel, un enjeu socio-économique pour la population.

Quelques études ont été menées traitant le phénomène d'érosion dans le nord-ouest de l'Algérie. On peut citer par exemple les travaux de Kouri et Gormer, 2010 ; Meddi 2015 ; Meddi et al., 2016 ; Benchettouh et al., 2017 ; Hallouz et al., 2017. Ces études, élaborées à l'échelle des bassins versants, s'appuient principalement sur l'estimation de la quantité du sol mobilisé par le ruissellement à l'échelle des versants pour évaluer le risque d'érosion. Ces méthodes ne peuvent pas être appliquées à l'échelle de la parcelle pour étudier la stabilité des sols et des ouvrages vis-à-vis de l'érosion. Le travail de recherche réalisé dans cette thèse présente la première étude axée sur l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion du sol de Kharouba.

Objectifs et démarches

L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer la susceptibilité des sols non cohésifs à l'érosion. La connaissance de la vulnérabilité d'un sol à l'érosion est un enjeu important pour la prédiction de son comportement vis-à-vis de l'écoulement où des mesures préventives peuvent être prises en considération lors de la conception des différents ouvrages.

La démarche adoptée dans cette recherche débute dans la première partie par une étude bibliographique sur les mécanismes de transport et de rétention des particules sous l'effet de l'écoulement. Une attention particulière est donnée aux différents processus de l'érosion. Cette synthèse bibliographique nous permet d'identifier les apports et les limites des recherches dans ce domaine. Dans la deuxième partie, une étude expérimentale est menée sur des échantillons de sol provenant de la région de Kharouba. L'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion du sol testé nous conduit à identifier les principaux facteurs contribuant à l'évolution du risque. Les résultats de l'étude paramétrique sont exploités pour proposer une nouvelle approche pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à l'érosion. Cette démarche conduit au plan de la thèse présenté ci-après.

Structure de la thèse

Cette thèse est structurée en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les mécanismes de transport et de rétention des particules en milieux poreux. Dans ce chapitre nous avons mis en évidence l'impact du transport des particules dans les sols où une attention particulière a été portée sur le phénomène de l'érosion. Les processus, les conséquences du phénomène sur les différents types d'ouvrages ainsi que les principales techniques de caractérisation de l'érosion ont été présentées.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art sur l'instabilité interne des sols. En premier lieu le phénomène d'instabilité interne initié par la suffusion a été décrit en détail. Par la suite, les différents paramètres et facteurs influençant l'initiation et l'évolution de la suffusion ont été présentés. Puis, nous avons passé en revue les principales méthodes proposées pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion.
- Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation et à l'évaluation de la vulnérabilité du site étudié, qui est la zone de Kharouba située au nord-est de Mostaganem, à l'érosion. Nous avons mis en évidence les principaux facteurs conditionnant l'intensité de l'érosion dans cette zone. Quelques cas d'incidents ont été présentés pour montrer l'ampleur du problème.
- Le quatrième chapitre est une étude paramétrique expérimentale menée sur des mélanges de sable et de fines. Les paramètres étudiés sont le pourcentage des fines, le gradient hydraulique et la pression de consolidation. Le but de cette étude est d'étudier l'initiation et le développement de la suffusion sous l'effet des différents paramètres.
- Le cinquième chapitre présente une évaluation de l'applicabilité des différents critères proposés dans la littérature pour la prédiction de la stabilité interne des sols. La comparaison avec nos résultats expérimentaux nous a permis de proposer un nouveau modèle pour l'évaluation de la susceptibilité des sols non cohérents, notamment celui de Kharouba à l'érosion.

Enfin, une conclusion générale reprenant les principaux résultats obtenus. Des perspectives d'études complémentaires viennent clôturer ce travail.

Partie I

« Synthèse bibliographique »

Chapitre I

***« Le transport solide et les processus
d'érosion des sols »***

Chapitre I : Le transport solide et les processus d'érosion des sols

I.1. Introduction :

L'étude de la mobilité des particules dans les sols est un sujet qui concerne de nombreux domaines d'application tels que ; le génie civil (instabilité des sols et endommagement des ouvrages en terre), l'environnement (contamination des aquifères), l'agriculture (baisse de la fertilité des sols agricoles), le génie pétrolier (productivité des puits pétrolier).

Le premier chapitre de ce manuscrit sera consacré à la problématique du transport et de rétention des particules dans les milieux poreux sous l'effet de l'écoulement. Les mécanismes et les impacts du transport solide dans les sols sont identifiés. Une attention particulière sera réservée à l'étude du phénomène de l'érosion qui constitue le but principal de cette étude.

I.2. Les mécanismes de transport et de rétention des particules dans un milieu poreux :

I.2.1. Description des milieux poreux:

Du point de vue géotechnique, un sol est une formation géologique superficielle résultant de l'altération ou de l'érosion d'une ou plusieurs roches de l'écorce terrestre, essentiellement sous l'action d'agents climatiques ou biologiques (Musy et Soutter, 1991). Un sol est donc un produit de décomposition ou se mélangent en proportions variables ; de la matière solide, de l'eau et de l'air (si le sol est situé au-dessus de la nappe phréatique).

Par conséquent le sol est considéré comme un milieu constitué d'une partie solide et une partie fluide. La modélisation la plus utilisée pour représenter ce type de milieu est celle des milieux poreux. Dans ce modèle, la matrice solide est appelée squelette, elle a pour rôle d'assurer la cohésion du milieu. Les espaces vides délimités par cette matrice, nommés pores,

permettent aux fluides de traverser le milieu. Ces pores peuvent être connectés ou non, et remplis partiellement ou totalement de liquide ou de gaz.

La partie solide du milieu poreux est constituée de particules minérales, de taille et forme variables, et d'éléments organiques provenant de la décomposition de débris végétaux et animaux. La composition de la phase solide définit la texture du sol, c'est-à-dire, la distribution en différentes classes de tailles (argile, limon, sable et gravier) (Figures 1.1 & 1.2).

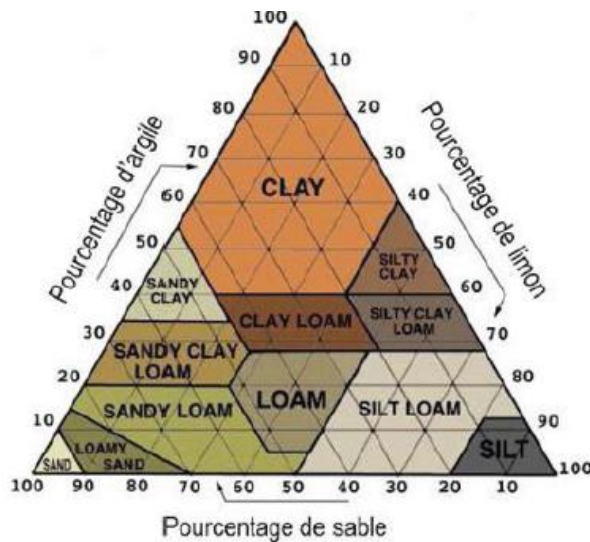


Figure 1.1. Triangle de classification texturale (United States Department of Agriculture)

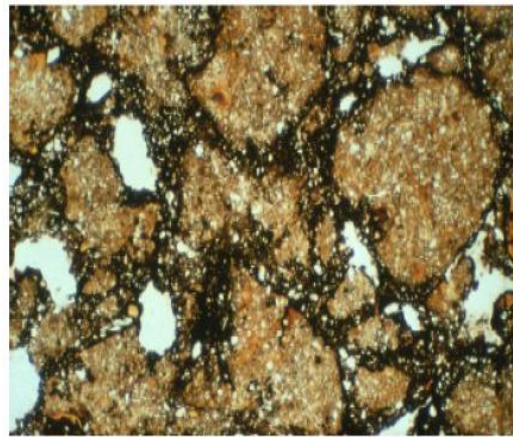


Figure 1.2. Illustration de la texture d'un sol argileux (Roth, 2005)

La composition granulométrique des particules solides peut être décomposée en deux fractions : une fraction granulaire (éléments $> 80\mu\text{m}$) et/ou une fraction fine (éléments $< 80\mu\text{m}$). La figure (1.3) classifie les particules fines qui peuvent se présenter dans une matrice de sol. Un diamètre de $1\mu\text{m}$ est une limite arbitraire entre les particules colloïdales et les particules en suspension. Dans notre travail on va s'intéresser exclusivement à l'étude de la mobilité des particules en suspension.

La partie fluide dans le milieu poreux comporte les phases liquide et gazeuse qui peuvent se déplacer à l'intérieur de l'espace poral, on parle ici d'écoulement. Les processus d'écoulement sont conditionnés d'une part par la porosité du milieu, et d'autre part, par les propriétés physico-chimiques du fluide (viscosité, compressibilité,...etc.).

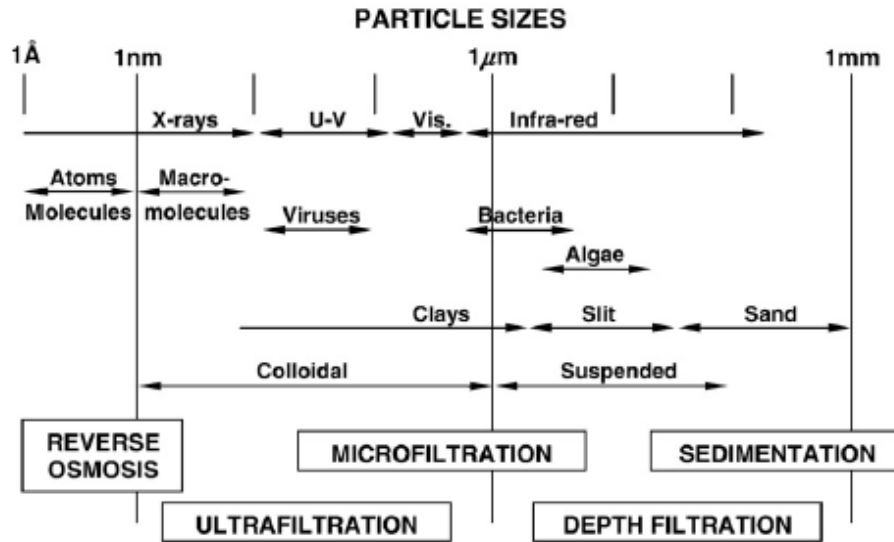


Figure 1.3. Classification de particules dispersées en fonction de leur taille (Zamani et Maini, 2009)

Un milieu poreux est caractérisé principalement par deux caractéristiques : sa porosité, notée n , qui est définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total dans un volume élémentaire représentatif du milieu, et sa perméabilité intrinsèque k qui indique l'aptitude du milieu à être traversé par un écoulement. Cette grandeur dépend de la structure et de la connectivité des pores.

I.2.2. Ecoulement d'eau dans un milieu poreux:

L'étude des écoulements dans les milieux poreux est très complexe car elle fait intervenir plusieurs phénomènes liés à la fois au matériau constituant la partie solide, au fluide, et aux interactions au sein même de ces phases. Dans cette partie, on va s'intéresser uniquement à l'action mécanique de l'eau sur les sols car c'est la principale cause de détachement des particules du sol.

En fait, dans des conditions hydrostatiques la seule action de l'eau sur le sol est la poussée d'Archimède. Tandis que, les frottements provoqués par l'eau en écoulement sur les grains du sol engendrent une dissipation d'énergie. De perte de charge se produit, et l'eau exerce alors une force de trainée sur chaque grains qui agit directement sur les contraintes effectives du matériau. Dans le cas d'un écoulement vertical ascendant, l'augmentation des forces d'écoulement provoque une diminution des effets des forces gravitationnelles agissant

sur le sol. Par contre, si l'écoulement est descendant, un effet de renforcement de gravité en résulte. Donc pour un écoulement ascendant, les contraintes effectives sont diminuées et l'opposé se produit pour un écoulement descendant. Un écoulement horizontal n'exerce aucun effet sur les forces gravitationnelles.

Dans un massif de sol soumis à un écoulement ascendant, lorsque la pression de l'eau devient supérieure au poids déjaugé des particules, les contraintes effectives s'annulent et le sol perd sa résistance au cisaillement. Dans ce cas les particules flottent dans l'eau et elles seront facilement transportables par l'écoulement. Ce phénomène appelé boulangerie a été expliqué théoriquement par Terzaghi (1939), ce dernier a indiqué que le mouvement des particules est initié lorsque le gradient hydraulique atteint un seuil critique (i_{cr}), nommé gradient critique de Terzaghi (cette théorie sera présentée en détail dans le prochain chapitre qui traite la stabilité interne des sols).

I.2.3. Transport des particules dans les sols:

Selon Kovac (1981) et Kenney et Lau (1984), le mouvement des particules dans un milieu granulaire est initié si les forces exercées par l'écoulement d'eau sont supérieures aux forces qui retiennent les grains. Ce phénomène débute par le transport des particules les plus fines.

Les particules arrachées se déplacent à travers le sol selon des chemins bien définis par la structure interne du sol et le sens de l'écoulement. Ces chemins sont appelés 'lignes d'écoulement' par Terzaghi (1943) et interstices par Kovac (1981). Kenney et Lau (1985) ont utilisé le concept de constriction pour décrire l'écoulement dans un milieu poreux, qui correspond à l'ouverture entre deux pores ou réseau de vides continu.

Si les particules transportées par l'écoulement rencontrent une constriction plus petite que leur taille, elles seront bloquées. Par contre, si leur taille le permet, elles seront drainées à l'extérieur du milieu. Dans le premier cas, il y aura une redistribution des particules fines dans le sol. Dans les zones de blocage, la porosité et par conséquent la perméabilité du milieu décroît. Tandis que, dans les zones où les particules ont été arrachées, la porosité et la perméabilité du milieu s'accroissent. Dans le cas où les particules sont lessivées du milieu, la porosité et la perméabilité du matériau augmentent. Ainsi, La mise en suspension et/ou le

dépôt des particules modifie la structure milieu poreux, ce qui induit des modifications dans ses propriétés hydrodynamiques.

I.3. Impact du transport solide dans les sols :

Les particules transportées par écoulement pourront soit se comporter comme des vecteurs de transport de polluants, soit entraîner des particules du sol provoquant son érosion, soit se déposer à d'autres horizons provoquant le colmatage du milieu.

I.3.1. Transport des polluants :

Plusieurs études ont indiqué que la mobilité des particules favorise le transport des polluants (McCarthy et Zachara, 1989 ; Radilla et al., 1997 ; Wang et al., 2011). Certaines particules ont la caractéristique d'adsorber les contaminants. Elles constituent donc un moyen de transport des substances polluantes attachées en elles. Les polluants fortement liés à la surface des particules peuvent être transportés à la même vitesse que l'eau, sous l'effet des forces gravitaires ou suite à un événement pluvial, à travers la zone non-saturée pour atteindre ensuite la nappe phréatique (McCarthy, 1998).

La contamination des nappes d'eau par ces processus peut rendre les eaux souterraines inutilisables pendant des années (Reddi et al., 1997). Pour cela l'étude du transport particulaire des polluants dans les sols est très importante pour minimiser le risque environnemental.

I.3.2. Erosion des sols :

Le terme 'érosion' désigne généralement le détachement des particules et leur transport sous l'action mécanique ou chimique d'un fluide (Bendahmane, 2005). On distingue l'érosion de surface (érosion externe) et l'érosion interne.

La migration des particules solides provoque une modification des caractéristiques hydrauliques et mécanique du sol. Ces modifications peuvent engendrer des désordres dans les ouvrages construits en terre. Ce phénomène sera traité en détail dans la suite du manuscrit.

I.3.3. Colmatage des sols :

Les particules transportées par écoulement peuvent se déposer à différentes échelles du milieu poreux provoquant son colmatage. Le dépôt des particules se développe selon deux

mécanismes (Benamar et al., 2005) : La filtration mécanique, où une particule plus grosse que le pore du milieu tente de le traverser sera bloquée (d'après Herzig et al., (1970) les particules seront retenues si leur diamètre dépasse $1/20$ à $1/10$ du diamètre des grains). La filtration profonde (filtration vrai) : même si la taille des particules transportées est plus petite que celle des pores, cette dernière peut être déposée sous l'effet de la diffusion et de la sédimentation. Les particules les plus fines pénètrent plus profondément dans le sol.

Le processus de dépôt conduisant au colmatage d'un milieu poreux est influencé par plusieurs paramètres (Alem et al., 2009) : la granulométrie du milieu (le colmatage est moins important lorsque le diamètre des grains est grand), les conditions hydrauliques du milieu (le dépôt des particules est moins important quand les forces hydrodynamiques sont importantes), le débit d'écoulement (la chute de la perméabilité est moins importante et plus lente dans le temps lorsque le débit est élevé).

Le colmatage d'un milieu poreux réduit considérablement sa porosité dans le temps et modifie ses caractéristiques initiales. La perméabilité est étroitement liée à la porosité qui diminue à cause du dépôt des particules. La conséquence néfaste du colmatage des sols est la chute, parfois accentuée, de sa perméabilité qui conduit à l'endommagement de certains ouvrages hydrauliques.

Au droit des zones colmatées, les pressions interstitielles peuvent augmentées en un point localisé de l'ouvrage. Si ce point est à l'aval, il va se former une zone instable qui menacera l'ouvrage de ruine.

I.4. L'érosion externe :

I.4.1. Définition et typologie de l'érosion externe :

L'érosion externe peut être définie comme la destruction de la surface par arrachement et déplacement des particules d'un sol ou d'une roche sous l'action d'un agent naturel extérieur. Si l'écoulement d'eau est considéré, trois formes d'érosion externe sont identifiées : l'érosion pluviale, l'érosion fluviale et l'érosion maritime (Pham, 2008 ; Mehenni, 2015).

I.4.1.1. Erosion pluviale :

L'érosion pluviale est définie comme le détachement et le transport de particules de sols par la pluie et le ruissellement. Deux mécanismes d'arrachement et de transfert des particules sont identifiés : l'effet d'impact des gouttes de pluie, appelé splash, et l'écoulement d'eau sur une surface de sol, nommé ruissellement.

Le splash

En arrivant au sol, l'énergie cinétique des gouttes de pluie se transforme en une force de cisaillement qui peut fragmenter les mottes et les agrégats et surtout détache les particules de leur surface. Pour ce produire, ce mécanisme nécessite une certaine énergie des gouttes qui varie selon les sols. Ce phénomène de rejaillissement ou 'splash' en anglais, peut déplacer les particules sur quelques dizaines de centimètres, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluies par rapport à la surface. La masse de sol détachée peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an (Le Bissonet, 1995).

Les particules fines qui sont détachées de la surface du sol par l'impact des gouttes de pluie sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent fermer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration. Sur certains sols, cela provoque la formation d'une pellicule ou d'une mince croûte superficielle, continue et consistante qui lors de la dessiccation provoque une croûte de battance (Rousseva et al., 2002). La croûte de battance ainsi formée s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. Le sol perd toute sa capacité de rétention d'eau superficielle. Par conséquent, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement.

Le ruissellement

Le ruissellement désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il se développe lorsque les eaux de pluie ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement "Hortonien"), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation).

Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, les filets et les lames d'eau exercent une force de cisaillement qui peut arracher les particules de sol.

Le ruissellement est considéré aussi comme l'agent principal de transport des fragments de sol détachés par l'impact des gouttes de pluie. Le transport des particules peut se faire par suspension, saltation ou roulement (Leguédais, 2003). Le mode de transport d'un fragment de sol dépend de sa masse et de ses caractéristiques (Leguédais, 2003). Le transport des particules fines argileuses et limoneuses s'effectue facilement, même pour de faibles vitesses. Mais, pour les matériaux plus grossiers que les sables fins, les particules transportées vont être rapidement déposées. On passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. Les deux phénomènes caractérisant l'érosion pluviale sont schématisés sur la figure (1. 4).

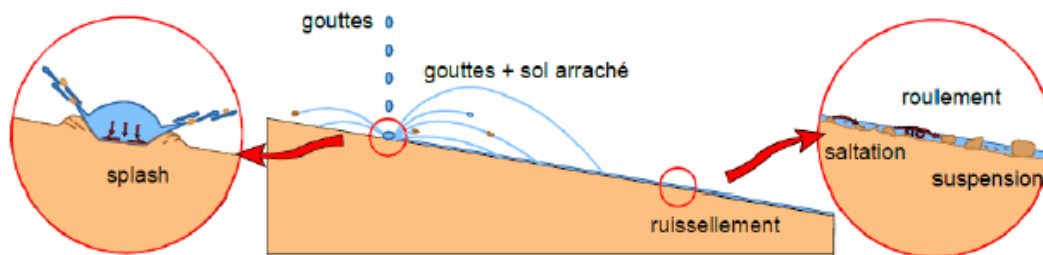


Figure 1.4. Les mécanismes de l'érosion pluviale (Pham, 2008)

I.4.1.2. Erosion fluviale :

L'érosion en fond de cours d'eau est due principalement au courant, qui au-delà d'une certaine vitesse, arrache puis entraîne les particules du sol. Pour une vitesse d'écoulement qui dépasse un seuil de résistance, les matériaux solides se déplacent sur le fond par charriage. Dans ce cas, les grains se déplacent à une vitesse nettement inférieure à celle de l'eau. Pour des vitesses encore plus élevées, les matériaux prélevés sur le fond seront mis en suspension. Les particules se déplacent à la vitesse de l'eau au voisinage du grain. En fait, les fonds et les berges des rivières sont constitués de matériaux de tailles différentes. Pour une vitesse donnée, il y a simultanément transport par charriage pour les matériaux les plus lourds et transport en suspension des matériaux les plus légers.

Dans les cours d'eau naturels, l'écoulement n'est pas uniforme, il existe des zones à forte vitesse où il y a davantage de matériaux arrachés, ce sont des zones d'érosion de fond. Dans les zones à faible vitesse, les matériaux provenant de l'amont peuvent à nouveau se déposer, ce sont des zones de dépôt. Ce phénomène dépend donc de la géométrie du cours d'eau comme indiqué dans la figure (1.5).

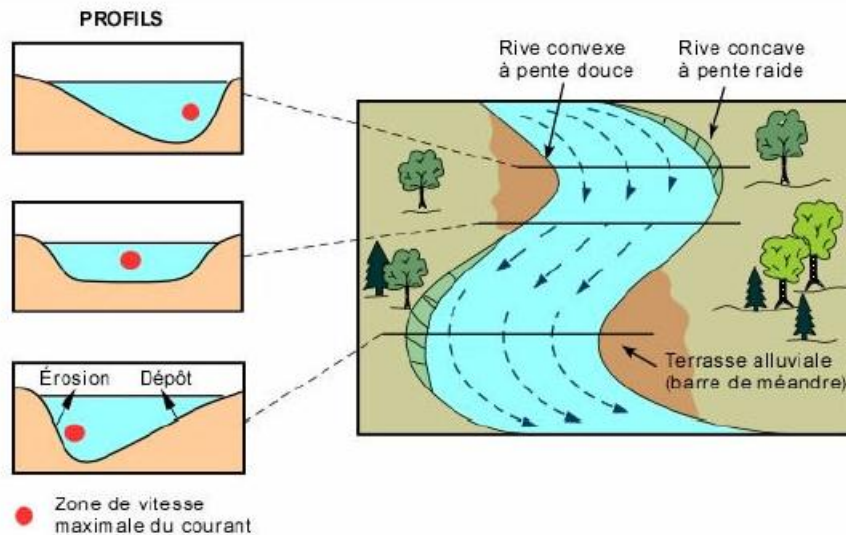


Figure 1.5. Les actions de l'érosion fluviale sur une rivière (Nguyen, 2014)

I.4.1.3. Erosion maritime :

Les sédiments reposant sur les fonds marins sont transportés lorsqu'ils sont soumis à de fortes sollicitations, ou des efforts de cisaillement, provoqués par les mouvements des masses d'eau. Ces mouvements peuvent être produits par les courants de marée ou par les vitesses orbitales des vagues ou une combinaison des deux. Cela conduit à l'érosion de surface ou volumique du rivage (figure 1.6).

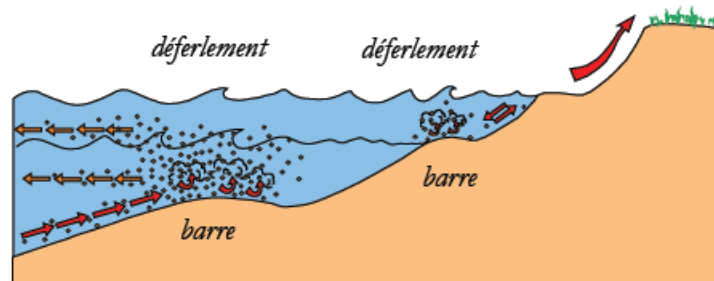


Figure 1.6. Mécanismes de l'érosion maritime (Pham, 2008)

I.4.2. Conséquences de l'érosion hydrique sur la dégradation des sols :

L'érosion hydrique présente un grand problème environnemental, économique et social qui menace beaucoup de pays à travers le monde. Aux Etats Unis, 90% des terres agricoles sont menacées par l'érosion. Le taux d'érosion est estimé entre 5 et 12 t/ha/an (Pimentel et al., 1995). Une étude publiée en 2018 par le centre commun de recherche (JRC) de la commission Européenne montre qu'au niveau de l'UE, l'érosion des sols affecte plus de 12 millions d'hectares de terres, soit environ 7.2% des terres agricoles, et entraîne une perte de productivité des cultures évaluée à 1.25 milliards d'euros.

L'Algérie située dans une zone semi-aride à climat très sévère est considérée comme une des pays les plus menacés par l'érosion au monde (Touaibia, 2010 ; Djoukbala et al., 2018). Environ 14 millions d'hectares sont exposés à une érosion active dans le nord du pays (Meddi et al., 2016). La dégradation spécifique des sols dans les bassins versants dépasse les 5000 tonnes/km²/an (Achitte et al., 2006). La conséquence directe de la dégradation des sols par l'érosion dans les bassins versants est l'envasement des barrages. La quantité cumulée des sédiments déposée dans les fonds des barrages algériens est estimée à 1 milliard de m³ (Hallouz et al., 2017). Les pertes annuelles en termes de stockage d'eau sont évaluées à 20 millions de m³ par an (Remini, 2000).

L'érosion hydrique provoque aussi une baisse de la fertilité des sols, et par conséquent une réduction de leur capacité de production agricole (Klik et Eitzinger, 2010 ; Souadi, 2011 ; Djoukbala et al., 2018). Pour satisfaire leurs besoins alimentaires plusieurs pays, dont l'Algérie, ont essayé de compenser l'appauvrissement et l'épuisement des sols par l'érosion par l'utilisation, parfois excessive, de produits chimiques. Cela a produit une dégradation accrue de la qualité des eaux de surface et des eaux souterrains (Souadi, 2011 ; Junior et al., 2014 ; Pacheco et Fernandes, 2016 ; Valera et al., 2017).

L'intensité de l'érosion en Algérie varie d'une région à l'autre, la partie nord-ouest du pays est la région la plus érodée, 47% des terres sont touchées par l'érosion (Morsli et al., 2013 ; Hallouz et al., 2017 ; Djoukbala et al., 2018). L'ouest algérien constitue une zone de développement importante du pays qui présente un grand potentiel de production agricole. Cette zone est menacée par une dynamique de dégradation très importante car elle est exposée à divers formes d'érosion (Morsli et al., 2004). La baisse de la fertilité des sols et la réduction

de la capacité de stockage d'eau des ouvrages de retenue ont dépassé les tolérances (Toumi, 2013). Le risque de l'érosion s'est accentué dans cette zone durant les dernières années (Kouri et Gormer, 2010 ; Meddi et al., 2016 ; Benchettouh et al., 2017). Kharouba, située à la wilaya de Mostaganem, est l'une des régions du nord-ouest algérien qui connaît les effets d'une forte érosion avec toutes ses formes et ses aspects, sera l'objet de cette étude.

I.5. L'érosion interne :

I.5.1. Définition et typologie de l'érosion interne :

L'érosion interne est l'entraînement vers l'aval des particules constitutives du sol sous l'action d'un écoulement provenant de la retenue ou de la nappe. Les mécanismes responsables de l'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être couplés. Selon Fry (1997) et Lautrin (2003) ; l'érosion interne ne se développe que si deux conditions sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport.

I.5.1.1. Les phénomènes d'arrachement :

Les phénomènes d'arrachement sont ceux où les particules perdent leur liaison avec les autres sous l'action des forces hydrauliques. On distingue six phénomènes d'arrachement : l'entraînement, l'érosion régressive, le débouillage, la boulance, la dissolution et la défloculation (Pham, 2008).

- **L'entraînement** : l'entraînement est défini comme le détachement des particules d'une paroi d'une conduite, d'un canal ou d'une rivière sous l'effet d'un écoulement d'un fluide. Ce phénomène se produit si la contrainte de cisaillement τ exercée par le fluide atteint un seuil critique (contrainte de cisaillement critique τ_c). L'entraînement des particules dépend de la vitesse du fluide ainsi que de la résistance du sol à cette sollicitation (Figure 1.7).

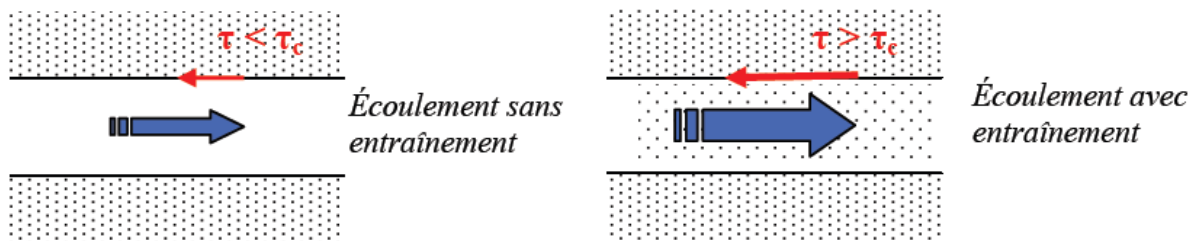


Figure 1.7. Phénomène d'arrachement (Pham, 2008)

- **L'érosion régressive** : l'érosion régressive est un phénomène d'arrachement des particules de sol sous l'effet de la pression d'eau. Elle se débute en un point à l'aval puis elle se poursuit en progressant vers l'amont. Il se produit alors une formation d'un renard hydraulique à l'intérieur de l'ouvrage (Figure 1.8).

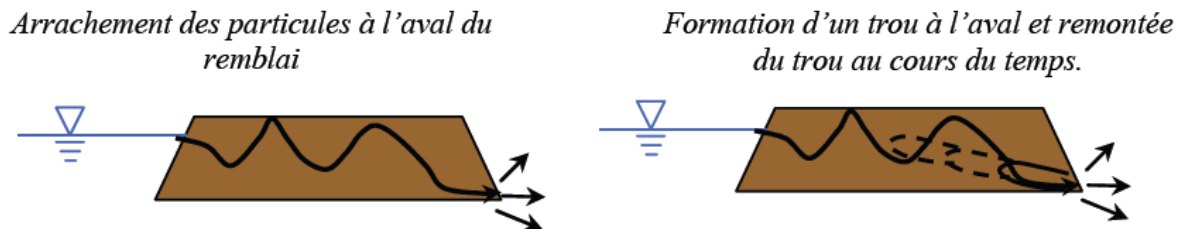


Figure 1.8. Phénomène d'érosion régressive (Pham, 2008)

- **Le débouillage** : Le débouillage se produit dans une fissure rocheuse ou une conduite karstique remplie de matériau argileux. Si l'eau exerce une pression plus importante que la résistance au cisaillement du matériau argileux, un déplacement d'ensemble du matériau se produira vers l'aval jusqu'à la formation d'une cavité ou l'élargissement d'une conduite (Figure 1.9). L'eau peut s'écouler librement dans la fissure.

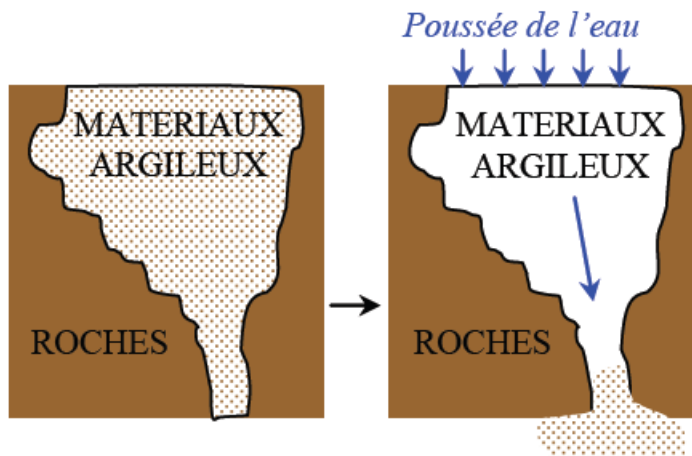


Figure 1.9. Phénomène de débouillage (Pham, 2008)

- **La boullance** : La boullance se produit lorsqu'un gradient hydraulique imposé par un écoulement vertical ascendant est supérieur à un gradient critique, c'est-à-dire lorsque la pression de l'eau sur le sol est supérieure au poids des particules. La contrainte effective entre

les grains s'annulent et les particules du sol flottent dans une phase liquide continue (Figure 1.10).



Figure 1.10. Phénomène de boullance (Bendahmane, 2005)

- **La dissolution** : Contrairement aux processus précédents qui sont considérés comme des phénomènes d'arrachement mécanique, la dissolution est un processus d'arrachement chimique. Elle correspond à la transformation d'un état solide à un état liquide par réaction chimique ou thermique d'un élément constitutif du sol. Ce phénomène provoque la modification de la composition des grains et l'augmentation de la porosité du milieu. Cela provoque l'altération des caractéristiques mécaniques du sol et peut être un facteur de déclenchement de l'érosion interne.

- **La défloculation** : La défloculation est un processus physico-chimique qui tend à désagréger les agglomérats de particules ou de disperser les feuillets d'argile facilitant leur déplacement lors d'un écoulement.

I.5.1.2. Les phénomènes de transport :

Pour l'érosion interne, on distingue deux formes de transport des particules : le transport dans un conduit (renard) et le transport dans l'espace poreux interparticulaire (suffusion). Selon Fry (1997), ces deux modes de transport se distinguent par les conditions hydrauliques et géométriques de l'écoulement.

- **Le renard** : Le renard hydraulique se produit dans les écoulements en milieux perméables comme les barrages et les digues en terre. Si les vitesses d'écoulement sont supérieures au seuil d'entraînement des particules, ces dernières seront transportées et l'érosion progresse d'une manière régressive le long d'une ligne de courant (Figure 1.11).

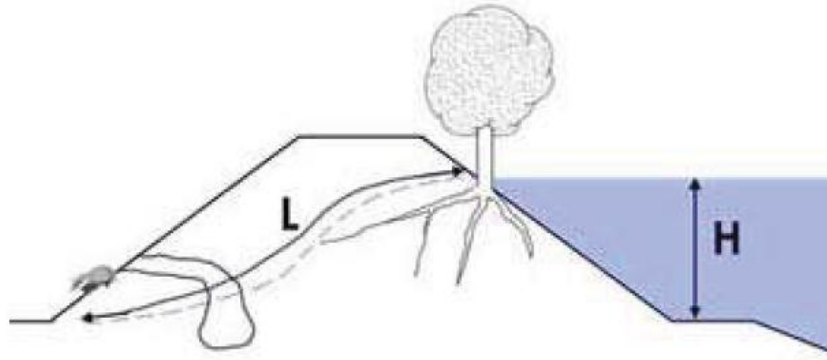


Figure 1.11. Phénomène de renard (Pham, 2008)

Un conduit va se former de l'aval vers l'amont. Le sol devient localement plus perméable, les vitesses d'écoulement augmentent et le phénomène s'amplifie avec l'élargissement de la conduite créée. Les conséquences de ce phénomène sont la rupture de l'ouvrage par l'ouverture d'une brèche (Figure 1.12).

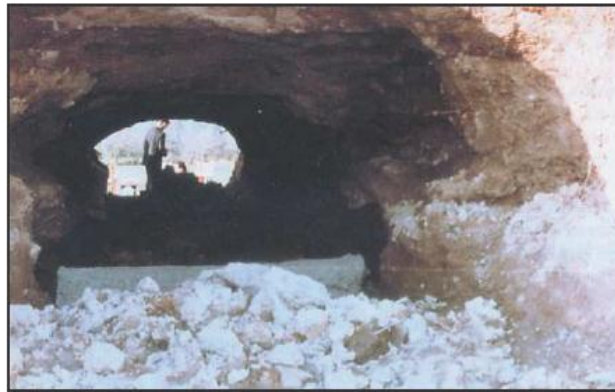


Figure 1.12. Ouverture d'une brèche dans un barrage par renard hydraulique (Lautrin, 2003)

Le phénomène du renard est difficile à détecter et évolue très rapidement, ce qui laisse peu de temps pour agir. Pour cela, le risque du développement d'un renard hydraulique doit être maîtrisé lors de la conception et de la réalisation des ouvrages.

- **La suffusion** : Sous l'effet d'un écoulement, une redistribution des particules fines peut se produire dans la matrice du sol. Les particules de grande taille constituant le squelette du sol restent stables. Tandis que, les particules fines seront transportées par l'écoulement. La suffusion se traduit donc par une migration massive des particules fines (Figure 1.13).

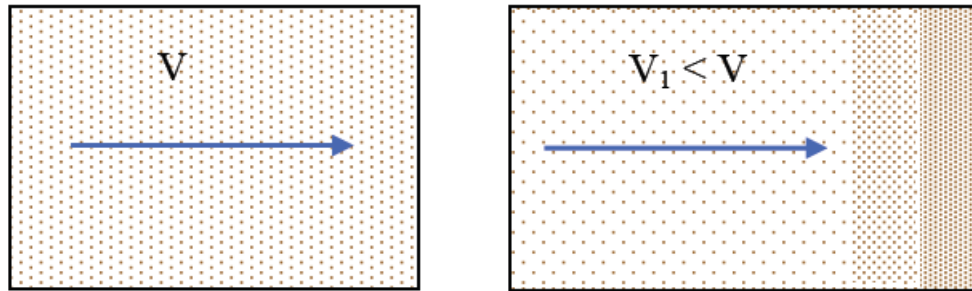


Figure 1.13. Phénomène de suffusion (Pham, 2008)

La redistribution des particules par suffusion provoque une modification des caractéristiques du sol. Dans les zones où les particules ont été érodées, une augmentation de la porosité et donc de la perméabilité augmente la vitesse d'écoulement d'eau. Une érosion régressive peut se déclencher à l'aval de l'ouvrage et favorise par conséquent la création d'un renard hydraulique. Par contre, dans les zones d'accumulation des particules fines se produit un colmatage du sol. Les pressions interstitielles peuvent augmenter localement ou droit des zones colmatées pour créer des zones faibles qui menacera l'ouvrage de ruine.

Contrairement au phénomène du renard, l'évolution de la suffusion est très lente. Cela permet de la détecter et de prendre les mesures nécessaires pour la limiter.

Dans les incidents liés à l'érosion interne, les processus d'arrachement et de transport des particules peuvent se combiner entre eux. Par conséquent, il sera très difficile de distinguer quel phénomène est le responsable du déclenchement de l'érosion.

Le schéma présenté dans la figure (1.14) résumé les divers phénomènes qui peuvent déclencher l'érosion dans un barrage.

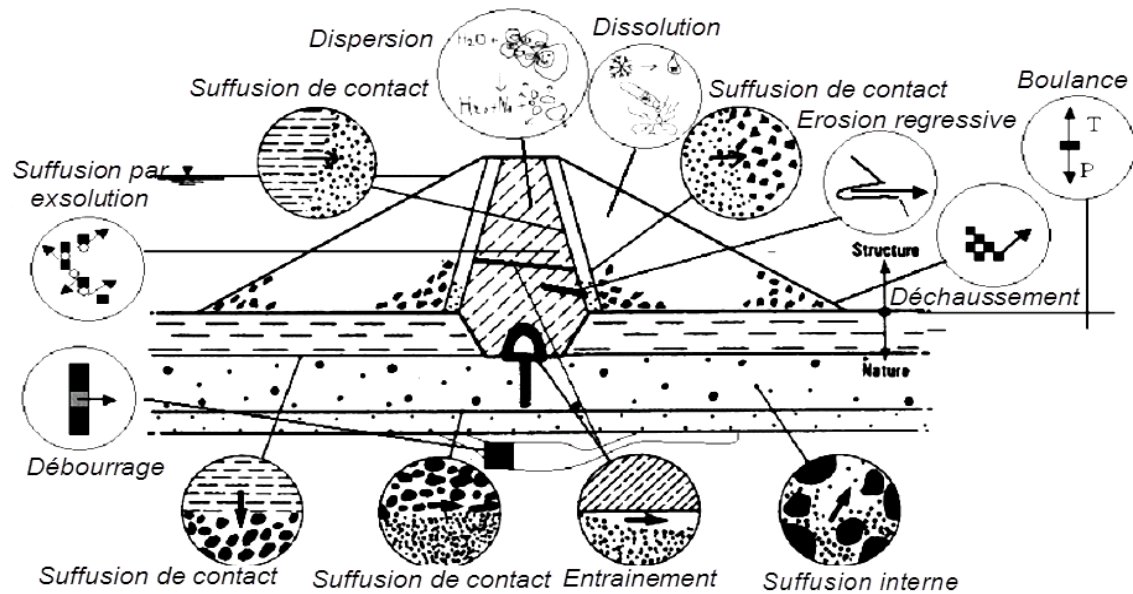


Figure 1.14. Schéma représentatif des différents mécanismes de l'érosion interne dans un barrage (Blais, 2004)

I.5.2. Processus de l'érosion interne :

Les processus de l'érosion interne conduisant à la rupture des ouvrages en terre tels que les barrages et les digues peuvent être divisés en quatre phases : l'initiation de l'érosion, la continuation, la progression et la rupture (Fell et al. 2004).

- **L'initiation de l'érosion** : l'érosion interne se déclenche si l'énergie développée par les forces hydrodynamiques dues à l'écoulement de l'eau, à travers un ouvrage en terre ou de sa fondation, est capable à détacher les particules du sol. Elle peut être provoquée soit par une concentration de fuite produite par une fracturation hydraulique, par suffusion dans les sols instables, par érosion régressive si l'infiltration est suffisamment élevée pour initier le mouvement des particules du sol au point de sortie, ou encore par érosion de contact qui se produit à l'interface de deux matériaux poreux de granulométries très différentes.

- **La continuation** : dans cette phase, l'évolution de l'érosion continue si la structure du sol ne permet pas la filtration des particules détachées. Par contre, si une auto-filtration se produit, sans favorisation d'une accumulation d'un excès de pression dans les pores, les processus de l'érosion seront stoppés à ce stade.

- **La progression :** Dans cette phase, au droit des zones faibles affectées par un des mécanismes de l'érosion interne, la concentration de l'écoulement dans cette partie provoque la création d'un vide à travers l'ouvrage ou sa fondation. Si les sols entourant ces chemins d'infiltration ne peuvent pas arrêter l'expansion de ce vide, il y aura la formation d'un trou de l'aval vers l'amont. Les vitesses d'écoulement à travers l'ouvrage augmentent et accélèrent ainsi le processus de rupture en cours.

La progression de l'érosion dépendra du facteur d'initiation du processus. Dans le cas de l'initiation par une concentration de fuite, la progression dépend de la géométrie de la fuite et de l'érodabilité du sol. Si le processus est initiée par l'érosion régressive, elle sera régit principalement par la fonctionnalité du filtre. Si l'érosion est initiée par la suffusion, la progression de l'érosion se fait généralement de l'aval vers l'amont de l'ouvrage, ce qui conduit à la formation d'un canal continu.

- **La rupture:** Si l'érosion n'est pas détectée durant les phases précédentes, ou les interventions entreprises pour stopper l'évolution de ce processus ont échoué, un effondrement total ou partiel de l'ouvrage en question peut se produire.

Un modèle de développement des processus de l'érosion interne conduisant à la rupture d'un barrage en remblai est présenté dans la figure (1.15).

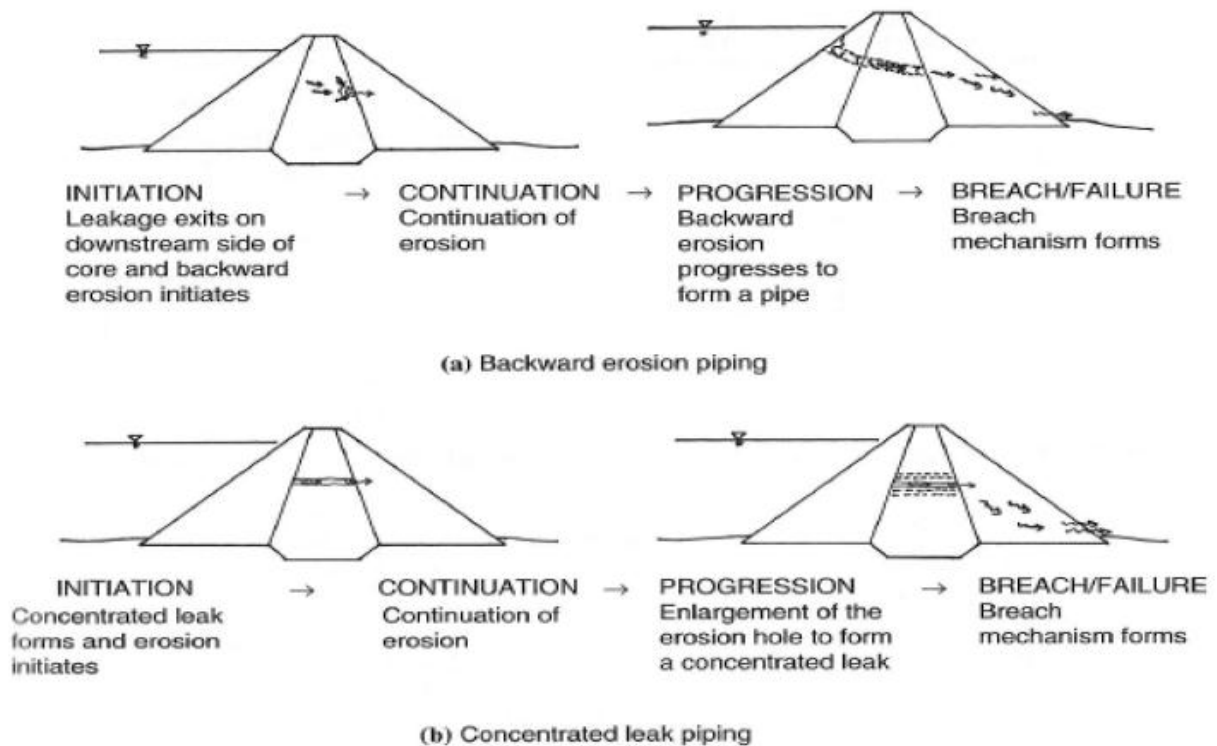


Figure 1.15. Modèle de développement de l'érosion interne dans un barrage
a) Erosion régressive ; b) Concentration de fuite (Foster, 1999)

I.5.3. Pathologies des ouvrages liées à l'érosion interne :

L'érosion interne est la principale cause des instabilités constatées dans plusieurs types d'ouvrages tels que les ouvrages de retenue d'eau (barrages en terre), les ouvrages de protection (digues, soutènements et talus naturels), les couches de fondation des infrastructures routières, ou encore l'instabilité du sol de fondation des différents ouvrages (bâtiments et autres).

Une étude statistique réalisée par Foster et al. (1998) sur 11192 barrages en terre indique que 136 ouvrages ont subi des désordres dont 6% par glissement, 46% par érosion interne et 48% par surverse (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Nombre d'incidents dans les barrages pour les différents modes de rupture (Foster et al. 1998)

Mode of failure	Number of cases		Percent failures (where known)	
	All failures	Failures in operation	All failures	Failures in operation
Overtopping	46	40	35.9	34.2
Spillway/gate	16	15	12.5	12.8
Subtotal	62	55	48.4	47.0
Piping through embankment	39	38	30.5	32.5
Piping through foundation	19	18	14.8	15.4
Piping from embankment into foundation	2	2	1.6	1.7
Subtotal	59	57	46.1	48.7
Slides	7	5	5.5	4.3
Earthquake/liquefaction	2	2	1.6	1.7
Unknown	8	7		
Total number of failures	136	124		

En Chine, environ 37000 barrages en terre ont été endommagés dont 31% de ces dommages sont causés par l'érosion interne (Zhang et al., 2011). D'après Haghighi (2012), un suivi des désordres survenus aux ouvrages construits en terre en France de la période 2010-2012 indique que 46 ruptures ont été observées, parmi lesquelles 43 ruptures étaient dues à l'érosion interne (ceci représente plus que 97% des cas de ruptures).

Ke et Takahashi (2014a) ont lié l'endommagement de certains ouvrages en terre suite au séisme de Peninsula au Japan en 2007 au phénomène d'érosion. L'érosion interne provoque une modification des caractéristiques mécaniques de l'ouvrage et par conséquent, la chute de sa résistance. Cela accroît sa vulnérabilité aux tremblements de terre. Plus récemment, Chen et al. (2016) ont constaté que presque un tiers des ruptures des barrages en terre récemment construits sont provoqués par l'érosion.

Plusieurs cas d'incidents liés à l'érosion interne ont été traités dans littérature. Les auteurs ont essayé d'identifier les causes du déclenchement de l'érosion, les processus d'évolution du phénomène et les mécanismes de rupture des ouvrages par érosion. Les cas les

plus importants sont présentés dans le volume 2 (bulletin 144) de l'ICOLD 2015 (International Committee On Large Dams) et le FEMA P-1032 du Mai (2015). Dans ce mémoire, on cite à titre d'exemple la rupture du barrage de Teton (1976) aux USA et le cyclone de Katrina (2005).

Le barrage de Teton est un barrage en remblai construit sur la rivière de Teton au sud-est de l'Idaho (USA). Lors de sa mise en eau le 5 juin 1976, il fait l'objet d'une rupture de sa structure provoquant une inondation soudaine par la vidange de la retenue. Cela est commencé par l'apparition d'une simple fuite à l'aval de l'ouvrage qui s'est élargie sous l'effet des pressions d'eau engendrées par la retenue. En un espace de quelques heures de l'apparition de la fuite à l'ouverture de la brèche (Figure 1.16) le barrage s'est totalement détruit entraînant la mort de 11 personnes et 13000 têtes de bétails. Les estimations du montant total des dégâts vaut jusqu'à deux milliards de dollars (Stenn, 1995).



Figure 1.16. Rupture du barrage de Teton (1976) (Lachouette, 2009)

Selon le rapport du FEMA P-1032 (2015) les facteurs qui ont contribué à la rupture du barrage de Teton sont l'utilisation de fines érodables de faible plasticité dans le noyau du barrage, l'absence de filtre qui sert comme barrière pour stopper la migration des particules fines si elles sont érodées, et le traitement insuffisant des joints ouverts dans le substratum rocheux.

En 2005, le passage de l'ouragan Katrina provoque l'ouverture de deux brèches au niveau du système de digues de sept mètres de hauteur qui sont conçues pour protéger la ville du New Orléans qui est construite sous le niveau de la mer. La destruction de ces digues provoque l'inondation de plus de 80% de la ville (Figure 1.17) faisant plus de 1800 morts, des centaines de disparus et plus de 140000 sinistrés qui ont été hébergés dans des centres et foyers d'accueil dans divers états. Les dégâts ont été estimés à plus de 110 milliards de dollars (Knabb et al., 2005).



Figure 1.17. Inondations à la Nouvelle-Orléans après le passage de l'ouragan Katrina en 2005 (source encyclopédie de l'environnement. www.encyclopedie-environnement.org)

Il est évident que les ouvrages de retenue sont les plus menacés par l'érosion interne car ils sont fortement sollicités par les pressions d'eau. En effet, un ouvrage de retenu doit répondre à deux fonctions principales : l'imperméabilisation et la résistance mécanique de la structure. L'érosion interne peut provoquer soit la chute de la résistance mécanique de la structure ou la dégradation de l'étanchéité par l'augmentation de la perméabilité locale ou globale de l'ouvrage.

Les principales causes pouvant conduire à la rupture d'un ouvrage par érosion peuvent être classées en deux groupes : le premier regroupe tous les éléments qui affaiblissent la

résistance mécanique à l'érosion, et le deuxième tient en compte les facteurs pouvant affecter l'imperméabilité de la structure (Pham, 2008 ; Nguyen, 2014).

La chute de la résistance mécanique de l'ouvrage peut être due à :

- Mauvais compactage des matériaux.
- Absence ou sous dimensionnement du filtre.
- Utilisation de matériaux dispersifs (argiles, limons ou sables fins).

L'augmentation de la perméabilité peut être due à :

- Mauvais choix des matériaux d'étanchéité.
- Mauvaise exécution de l'étanchéité notamment au droit des liaisons avec le contour.
- Endommagement du dispositif d'étanchéité (par tassements différentiels ou fracturation par sollicitation hydraulique excessive).
- Existence d'un chemin privilégié pour l'écoulement (existence de fissures, existence de lentilles de sable dans les fondations ou appuis, mauvaise reconnaissance géologique ou géotechnique, présence de conduites ou instruments au sein de l'ouvrage).

Une étude statistique menée par Royet (2005) sur les barrages et les digues construits en terre en France a montré que les causes principales de rupture des ouvrages sont le mauvais compactage, l'hétérogénéité des matériaux et le gradient hydraulique.

I.6. Caractérisation de l'érosion :

De la dégradation des sols à la destruction des ouvrages en terre, les conséquences de l'érosion sont catastrophiques. Les bilans après chaque évènement en termes de pertes de vies ou dégâts matériels sont lourds. La réduction du risque d'érosion passe forcément par une meilleure maîtrise du phénomène. Pour cela, les chercheurs essaient toujours de proposer de nouveaux modèles de plus en plus performants pour l'étude du phénomène. Dans cette partie, nous allons exposer les principales méthodes et techniques d'essais développées pour la caractérisation de l'érosion externe et interne.

I.6.1. Erodabilité des sols :

Par définition, un sol érodable est un sol sensible aux agents de l'érosion (définition du dictionnaire Larousse). Plusieurs chercheurs ont essayé de développer des méthodes et des techniques d'essais pour évaluer l'érodabilité des sols, c'est-à-dire leur sensibilité à l'érosion. La plupart de ces méthodes sont basées sur la détermination d'une relation entre la contrainte de cisaillement hydraulique appliquée par les forces d'écoulement sur le sol τ , et le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ qui représente la masse érodée du sol sur unité de surface pendant une unité de temps (Figure 1.18). En effet, à l'interface solide-eau et sous l'effet des forces d'écoulement, des contraintes de cisaillement hydrauliques se développent. Si la valeur de ces contraintes dépasse la résistance du sol à cette sollicitation, ces contraintes provoquent l'arrachement et le transport des particules du sol.

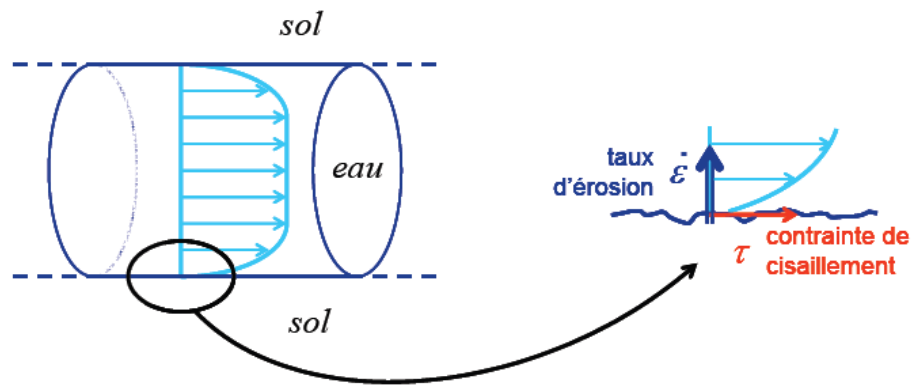


Figure 1.18. Schéma de l'écoulement dans le sol (Pham, 2008)

La quantité des particules érodées dépend de certains paramètres qui peuvent être classés en deux catégories : (1) Des paramètres liés à la puissance de la sollicitation hydraulique. (2) Des paramètres liés à la résistance du sol aux forces érosives appliquées.

Plusieurs auteurs ont essayé de relier le taux d'érosion ou la quantité des particules érodées à la contrainte de cisaillement hydraulique. Shields (1963) à partir des essais de laboratoire a exprimé l'érodabilité des sols par une relation linéaire entre le taux d'érosion et la contrainte de cisaillement hydraulique. Une loi d'érosion est exprimée par la relation donnée par l'équation (1.1) :

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= 0 & \text{si } \tau < \tau_{cr} \\ \dot{\varepsilon} &= k_{er}(\tau - \tau_c) & \text{si } \tau > \tau_{cr} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Où $\dot{\varepsilon}$ est le taux d'érosion, τ la contrainte de cisaillement hydraulique, τ_c la contrainte de cisaillement critique et k_{er} est le coefficient d'érosion. Dans l'équation (1.1), τ_c exprime la contrainte seuil du déclenchement de l'érosion (la résistance du sol à l'érosion) et le k_{er} présente la vitesse des particules érodées une fois le processus de l'érosion est initié.

Il faut noter que la loi d'érosion proposée par Shields (1936) peut être utilisée pour évaluer l'érodabilité des sols à la fois dans le cas de l'érosion interne ou de l'érosion externe.

Dans ce qui suit nous présentons les principaux dispositifs expérimentaux proposés dans la littérature pour l'évaluation de l'érodabilité des sols. Plusieurs essais in-situ ou de laboratoire ont été développés pour simuler les différents processus de l'érosion externe et interne. Certains essais déterminent l'érodabilité des sols d'une façon qualitative. Tandis que, d'autres s'appuient sur la détermination de la relation $\dot{\varepsilon} = f(\tau)$.

I.6.2. Essais d'érosion externe :

I.6.2.1. Essai d'érosion en canal (Hydraulic Flume Test) :

Le principe de cet essai est de créer un écoulement à surface libre parallèle à la surface du sol. Les échantillons de sol placés au fond du canal subissent un débit d'écoulement constant (Figure 1.19). La contrainte de cisaillement hydraulique appliquée au sol est constante durant l'essai. Cette contrainte est assimilée à la force de traction exercée par l'écoulement. La masse érodée est la différence entre la masse du sol sec avant et après essai. Le taux d'érosion est défini comme la proportion de la masse érodée par unité de surface et unité de temps. Cette méthode est considérée comme l'une des plus anciennes dans la mesure directe de l'érosion.

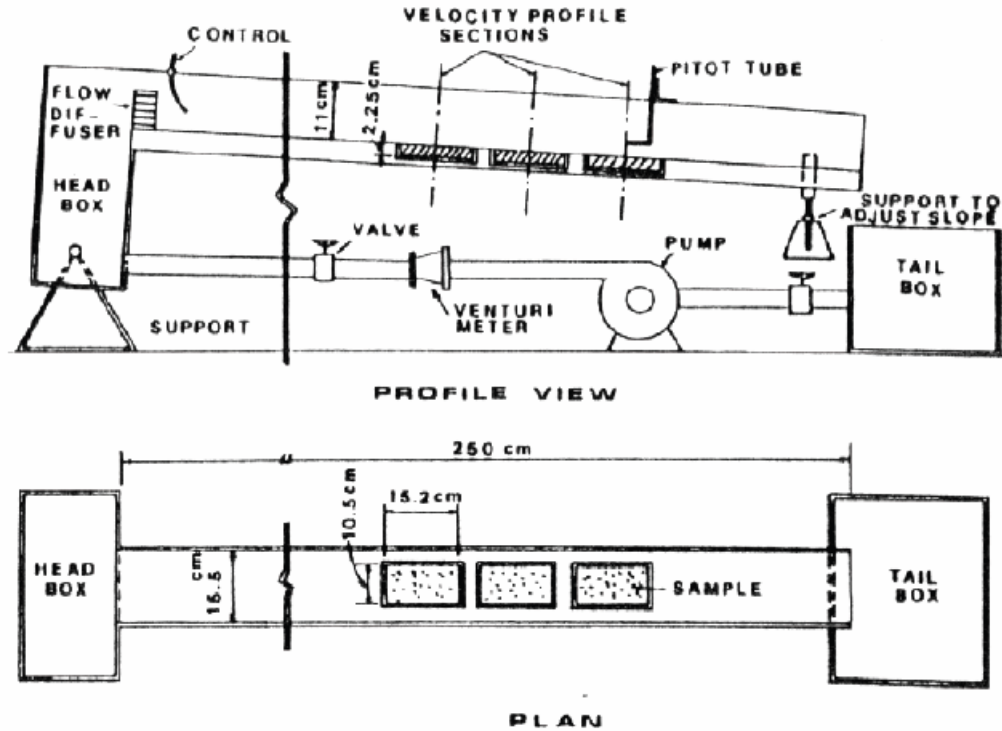
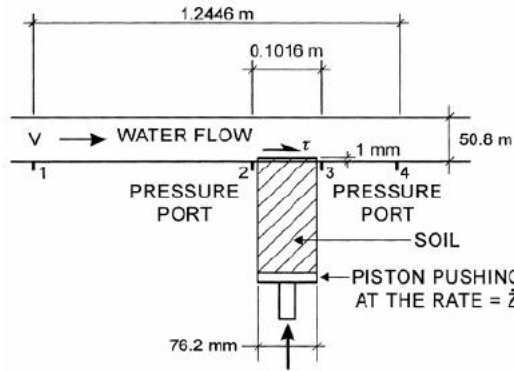
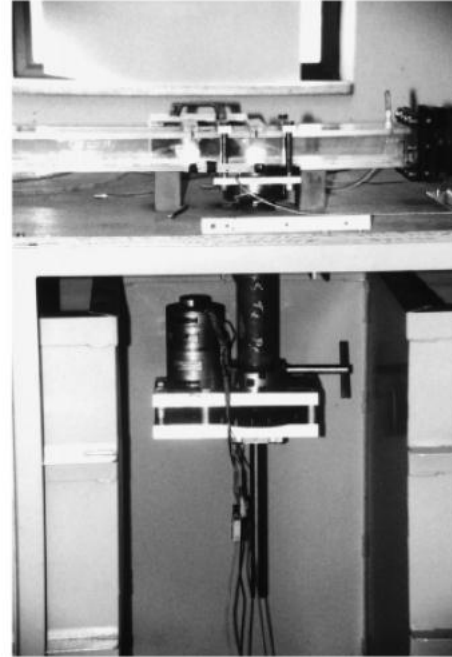


Figure 1.19. Schéma de principe de l'essai d'érosion en canal (Shaikh et al., 1988)

En se basant sur le même principe de l'essai d'érosion en canal, Briaud et al. (2001) ont développé le 'Erosion Function Apparatus' (EFA) (Figure 1.20). L'objectif principal de cet essai est d'étudier la résistance à l'affouillement des sols aux voisinages des piles de ponts. L'essai est réalisé par déplacement progressif de l'éprouvette du sol avec un pas de 1mm. Lors de l'essai, la vitesse d'écoulement ainsi que le temps nécessaire pour éroder 1mm de hauteur du sol sont mesurés pour déterminer les caractéristiques de l'érosion (la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion).



(a) Schéma conceptuel de l'éprouvette dans le dispositif



(b) Photo de la section d'essai

Figure 1.20. Schéma du dispositif de l'EFA (Briaud et al., 2001)

A partir des résultats obtenus sur plusieurs essais réalisés à l'aide de ce dispositif, Briaud (2008) a proposé 6 catégories de sensibilité à l'érosion (Figure 1.21).

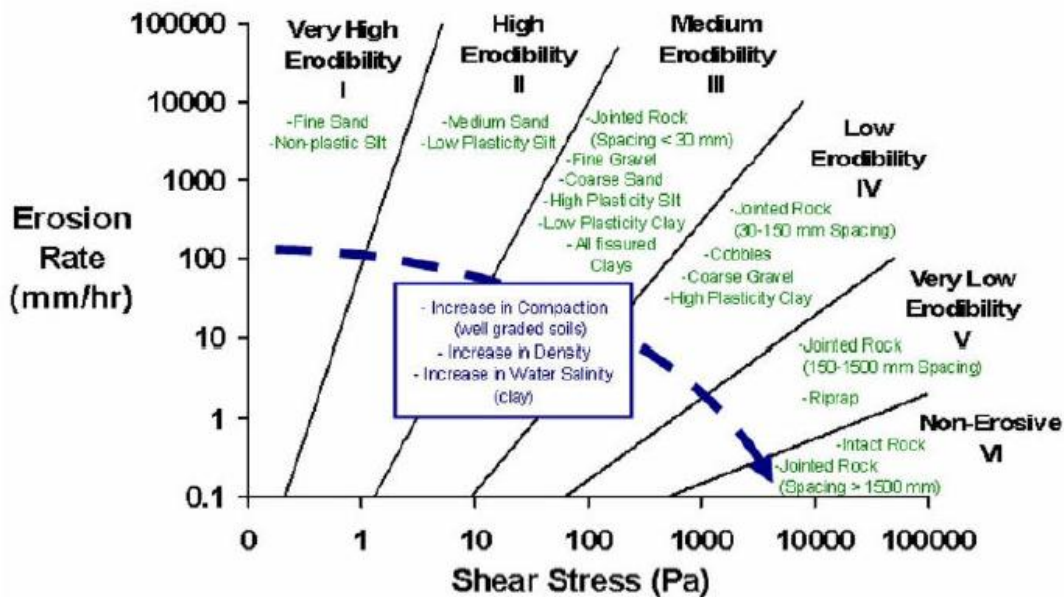


Figure 1.21. Classification de l'érodabilité des sols en fonction de la contrainte de cisaillement (Briaud, 2008)

I.6.2.2. Essai d'érosion par cylindre tournant (Rotating Cylinder Test) :

Le dispositif est composé d'une cellule cylindrique remplie d'eau, à l'intérieur de cette cellule est placée une éprouvette de sol dans un cylindre intérieur maintenu fixe, tandis que la rotation d'un cylindre extérieur engendre des contraintes de cisaillement hydrauliques sur la surface latérale de l'échantillon de sol (Figure 1.22). La contrainte de cisaillement est calculée à partir du moment de torsion générée par la rotation du cylindre extérieur qui sera exprimée en fonction de la vitesse angulaire imposée sur ce dernier. Ce dispositif a été développé par Moore et Masch (1962) puis il a été amélioré par d'autres auteurs (Chappuis, 1986 ; Lim, 2006 et 2009).

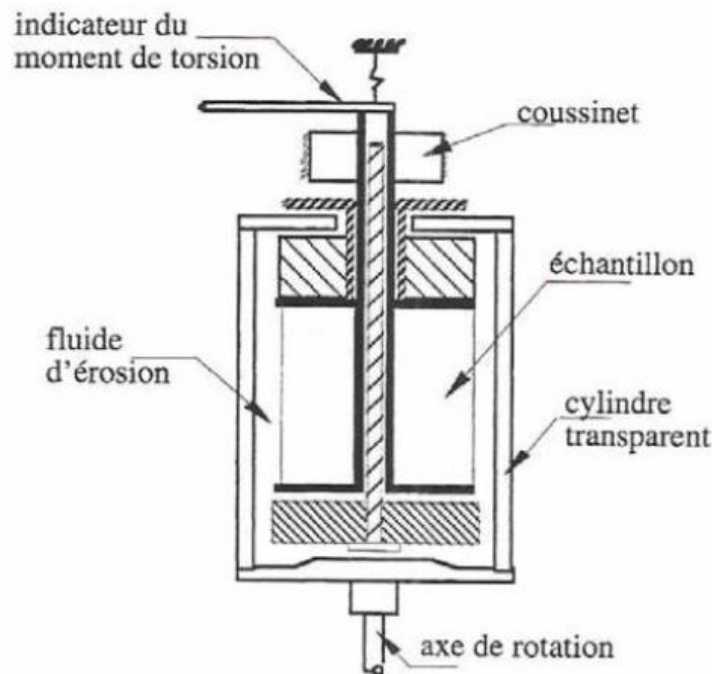


Figure 1.22. Schéma de l'essai d'érosion par cylindre tournant (Tarog, 2000)

I.6.2.3. Essai d'érosion par jet d'eau (Jet Erosion Test) :

Le principe de cet essai est d'appliquer un jet d'eau perpendiculaire à une surface de sol. L'impact du jet d'eau sur la surface du sol engendre des contraintes de cisaillement qui érode le sol (Figure 1.23). Les particules érodées sont recueillies puis quantifiées. Une relation qui relie la contrainte de cisaillement au taux d'érosion est établie pour évaluer l'érodabilité du sol. Cet appareil qui a été créé initialement par Moor et Masch (1962) a connu plusieurs

améliorations qui ont permis le développement de deux dispositifs qui sont actuellement très utilisés, il s'agit de l'érodimètre à jets mobiles et le 'jet erosion test'. Les récentes modifications apportées au 'jet erosion test' ont permis de mettre en place un dispositif qui quantifie les caractéristiques d'érosion du sol (Hunson et Hunt, 2006 ; Mehenni, 2015).

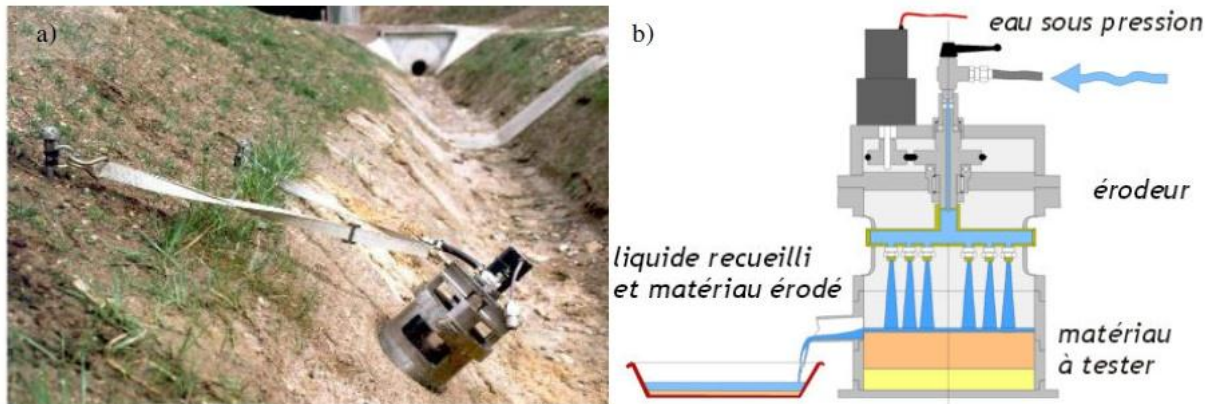


Figure 1.23. Erodимètre à jet mobile a) Utilisation in-situ ; b) Schéma de la cellule (Mehenni, 2015)

I.6.2.4. Essai de simulation de pluie et de ruissellement :

L'essai avec simulateur de pluie est utilisé spécialement pour l'étude de l'érosion pluviale (Warlouzel, 1999). Ce dispositif (Figure 1.24) permet de réaliser des simulations de pluie ou de ruissellement à conditions contrôlées. L'eau en contact avec l'échantillon testé provoque le détachement des particules du sol qui seront transportées en bas de la pente. L'eau et les particules seront récupérées dans un réceptacle. La quantité des articles récoltés peut être utilisée comme indication sur la sensibilité du sol à l'érosion.

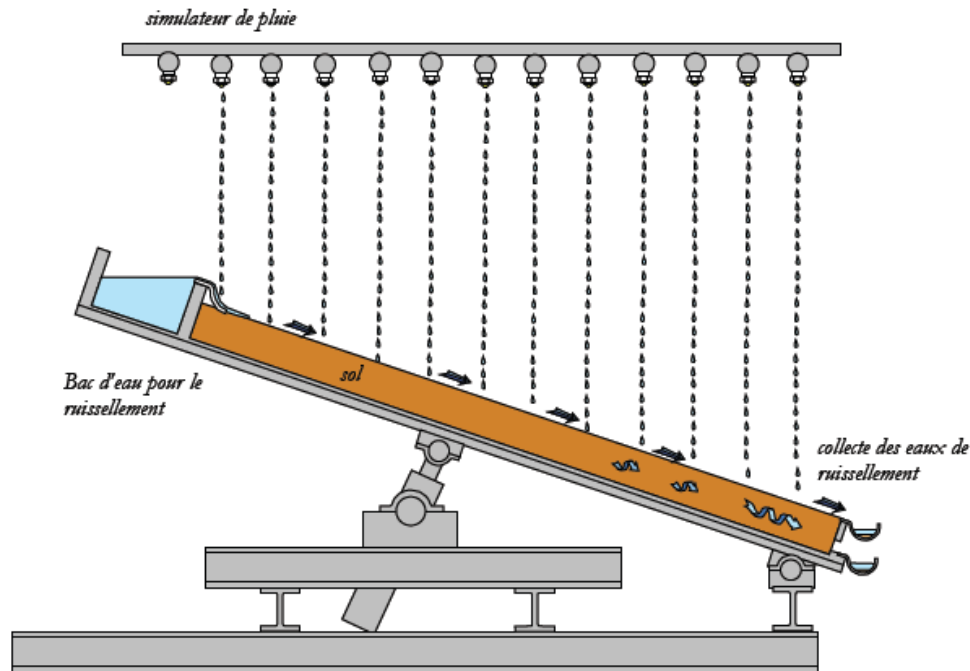


Figure 1.24. Simulateur de pluie et de ruissellement (Warloulzel, 1999)

I.6.3. Essais d'érosion interne:

I.6.3.1. Essai d'érosion de trou 'HET' (Hole Erosion Test):

Cet essai a été développé par Wan et Fell (2004), son principe est de faire circuler de l'eau dans un trou perforé dans l'échantillon de sol et de suivre l'évolution du diamètre de ce trou en cours d'essai afin de déterminer une relation $\dot{\epsilon} = f(\tau)$ qui régit l'érosion du sol dans un conduit. La figure (1.25) montre un schéma du HET.

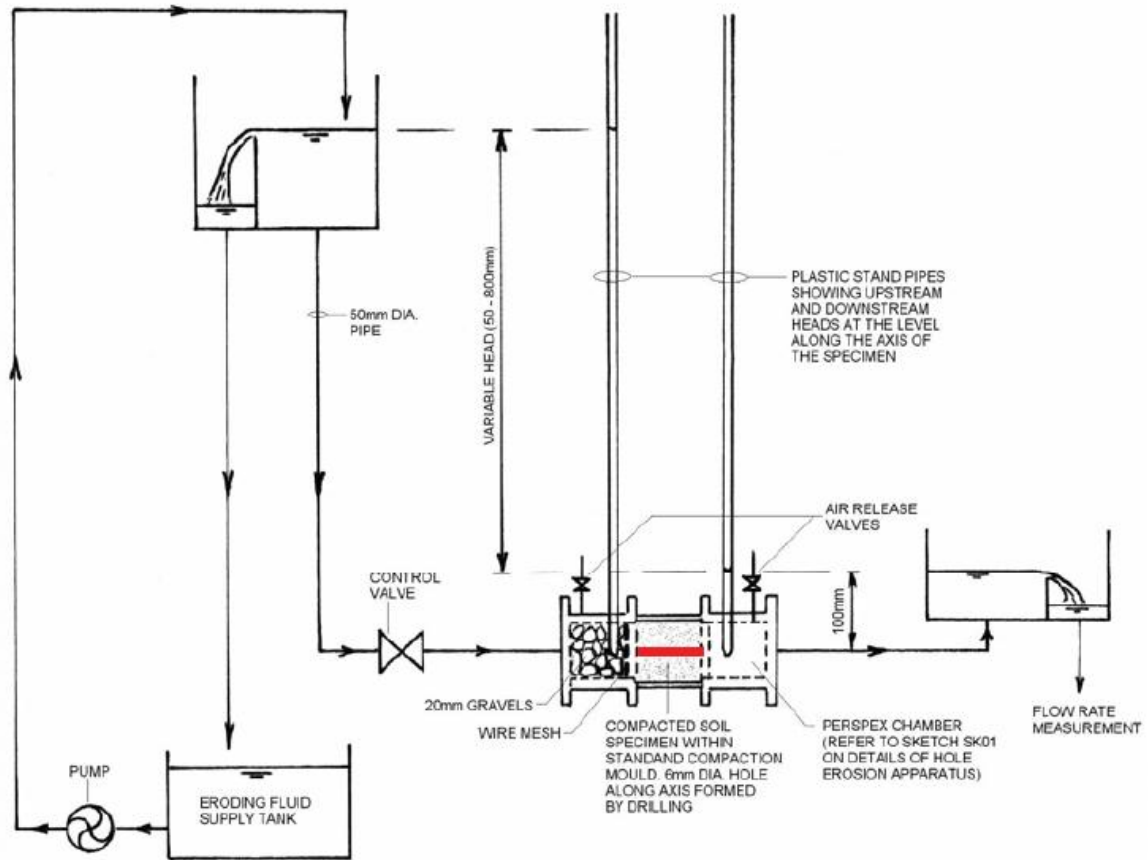


Figure 1.25. Schéma de principe du HET (Wan et Fell, 2004)

Grace aux paramètres mesurés à l'aide du HET, le taux d'érosion est exprimé en fonction de la contrainte de cisaillement. Une loi d'érosion semblable à celle de Shields (1936) a été proposée par Wan et Fell (2004), elle est exprimée par la relation suivante :

$$\dot{\varepsilon} = c_e (\tau - \tau_c) \quad (1.2)$$

Où : $\dot{\varepsilon}$ est le taux d'érosion, c_e est le coefficient d'érosion qui est représenté par la pente de la ligne droite de la courbe $\dot{\varepsilon} = f(\tau)$. τ_c est la contrainte de cisaillement critique qui représente la valeur de la contrainte de cisaillement pour un taux d'érosion nul (intersection de la droite $\dot{\varepsilon} = f(\tau)$ et l'axe horizontal représenté par $\dot{\varepsilon} = 0$).

Pour la caractérisation de l'érodabilité des sols, ils ont proposé un indice d'érosion qui est donné par la relation suivante :

$$I = -\log(c_e) \quad (1.3)$$

Une classification de l'érosion selon la valeur de cet indice est donnée dans le tableau (1.2)

Tableau 1.2 : Classification de l'érosion (Wan et Fell, 2004)

Group No.	Erosion Rate Index	Description
1	<2	Extremely rapid
2	2 – 3	Very rapid
3	3 – 4	Moderately rapid
4	4 – 5	Moderately slow
5	5 – 6	Very slow
6	>6	Extremely slow

Plusieurs chercheurs ont travaillé sur l'optimisation du (HET) durant les dernières années (Benahmed et Boneli, 2007; Pham, 2008 ; Haghighi, 2012). Leurs contributions portent en général sur l'amélioration du dispositif, sur les instruments de mesure des paramètres d'érosion et notamment sur les méthodes d'interprétation de ces paramètres.

I.6.3.2. « Flow pump test »:

C'est un essai développé par Reddi et al. (2000) et qui peut être utilisé pour l'étude de l'érosion interne et externe. Le principe de l'essai consiste à faire passer de l'eau soit à l'intérieur du réseau des pores d'un échantillon de sol, ou à travers un trou percé dans l'éprouvette du sol comme dans l'essai d'érosion de trou. Un gradient hydraulique est généré par une pompe pour provoquer l'arrachement des particules (Figure 1.26). La masse du sol érodé est quantifiée à l'aide d'un turbidimètre et la contrainte de cisaillement est calculée par une relation proposée par le même auteur.

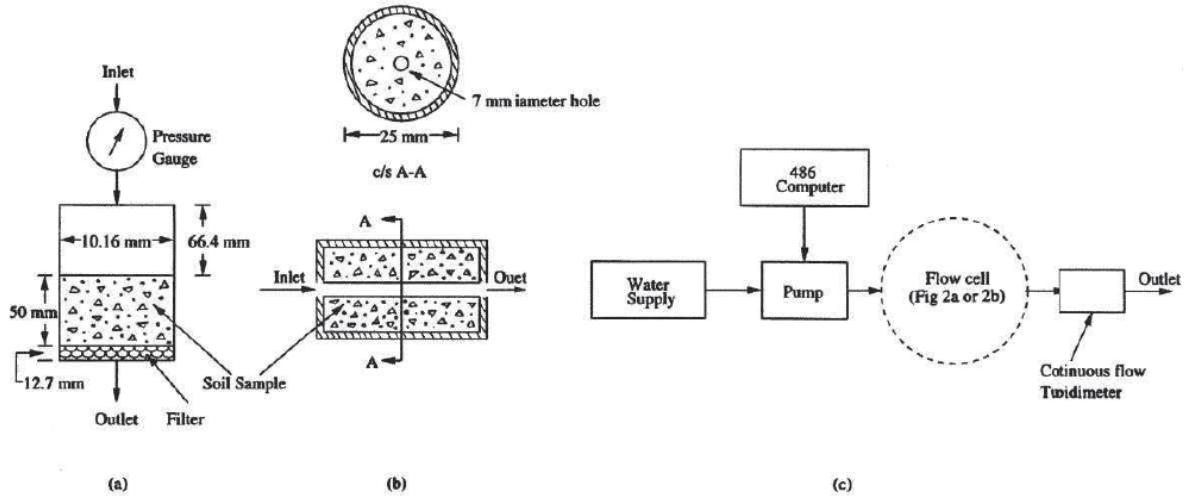


Figure 1.26. Schéma du « flow pump test » a) Cellule d'essai d'érosion interne ; b) Cellule d'essai pour l'érosion de surface ; c) Schéma du montage expérimental (Reddi et al., 2000)

I.6.3.3. Essai d'érosion au triaxial:

Le dispositif utilisé dans cet essai est un montage modifié de l'appareil triaxial classique. Des échantillons de sol peuvent être sollicités hydrauliquement et mécaniquement afin d'étudier la suffusion dans un volume généralement homogène. Il offre ainsi la possibilité de maîtriser le confinement pendant l'essai pour éviter des éventuels écoulements parasites autour des éprouvettes. La figure (1.27) présente le dispositif proposé par Bendahmane et al. (2008) pour l'étude paramétrique de l'érosion.

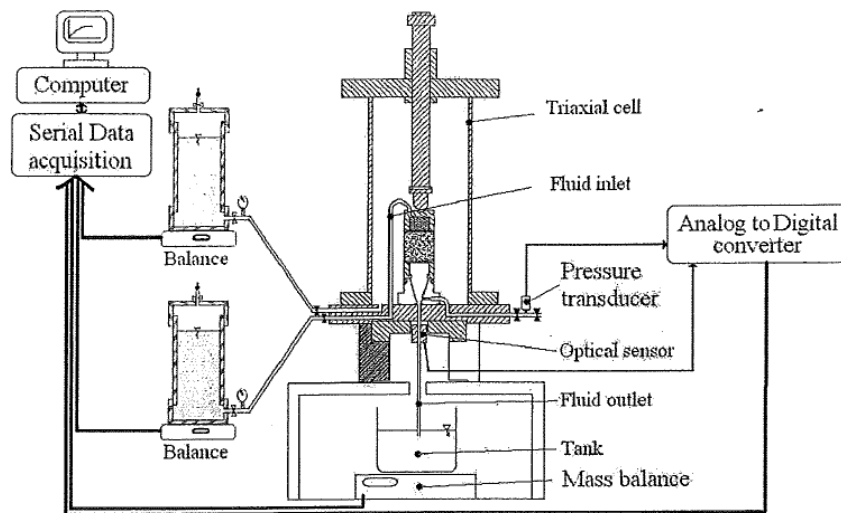


Figure 1.27. Schéma du dispositif de l'essai d'érosion au triaxial (Beddahmane et al., 2008)

I.6.3.4. Essai de l'érosion de contact:

Ce dispositif a pour objectif d'étudier l'érosion à l'interface de deux matériaux différents soumis à un écoulement tangent. Il a été développé par Ho (2007) pour étudier le comportement des sols renforcés par des géotextiles face à l'érosion. Guidoux (2010) et Béguin (2011) ont utilisé le même dispositif pour étudier l'érosion entre deux couches de matériaux différents et soumis à une sollicitation hydraulique contrôlée (Figure 1.28). Les sols grossiers sont utilisés comme des filtres pour les sols fins. L'écoulement généré est considéré comme localisé dans le sol grossier et sa vitesse est estimée en supposant un écoulement uniforme dans toute la section. La masse des particules érodées est évaluée à la sortie de la cellule par un turbidimètre. L'écoulement à l'interface des deux couches est généré par une différence de pression mesurée par des capteurs de pression positionnés en aval et en amont de la cellule. Ce dispositif permet de tester des conditions propices au détachement et au transport des particules.

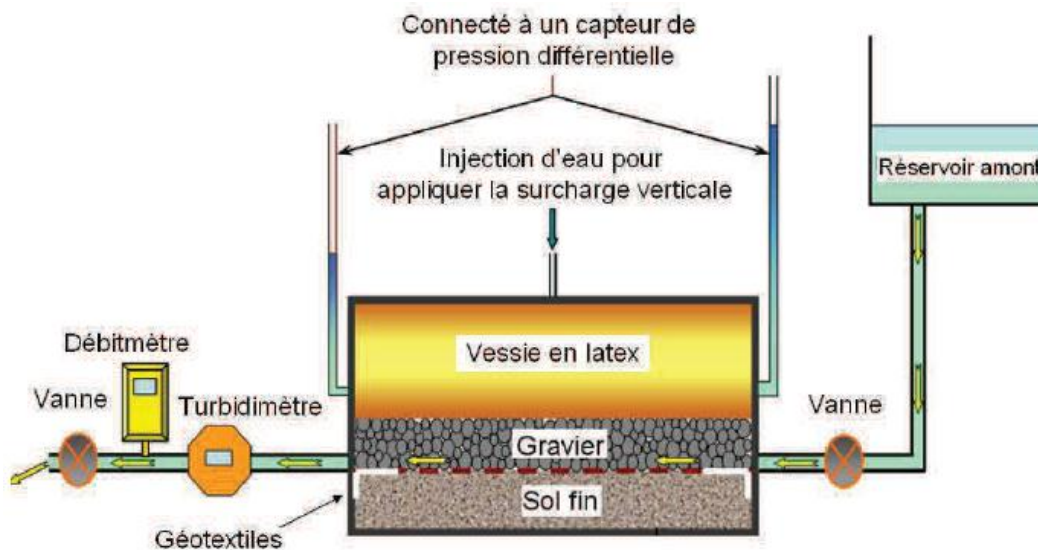


Figure 1.28. Schéma du dispositif expérimental de l'essai d'érosion de contact (Béguin, 2011)

I.6.3.5. Essais à grande échelle:

Quelques chercheurs ont essayé de reproduire le phénomène de l'érosion à l'échelle de l'ouvrage (échelle 1). L'avantage de ce type d'essai est que les paramètres pertinents pour l'étude de l'érosion peuvent être déterminés en temps réel. Les grandeurs utilisées dans les études d'ingénierie, tels que les déplacements, les débits au sein de l'ouvrage et autres, peuvent être facilement mesurées. Ils constituent des bases de données intéressantes pour les modélisations numériques.

Les premiers essais d'érosion interne réalisés à grande échelle sont les essais présentés par Vaskinn et al. (2004). Cinq digues expérimentales ont été construites et soumises à un essai d'érosion de contact. L'évolution de l'érosion a été suivie de l'évolution jusqu'à la formation de la brèche (Figure 1.29). Les données de cette étude ont été utilisées pour la validation d'un modèle numérique du phénomène de renard développé par Lachouette et al. (2008).

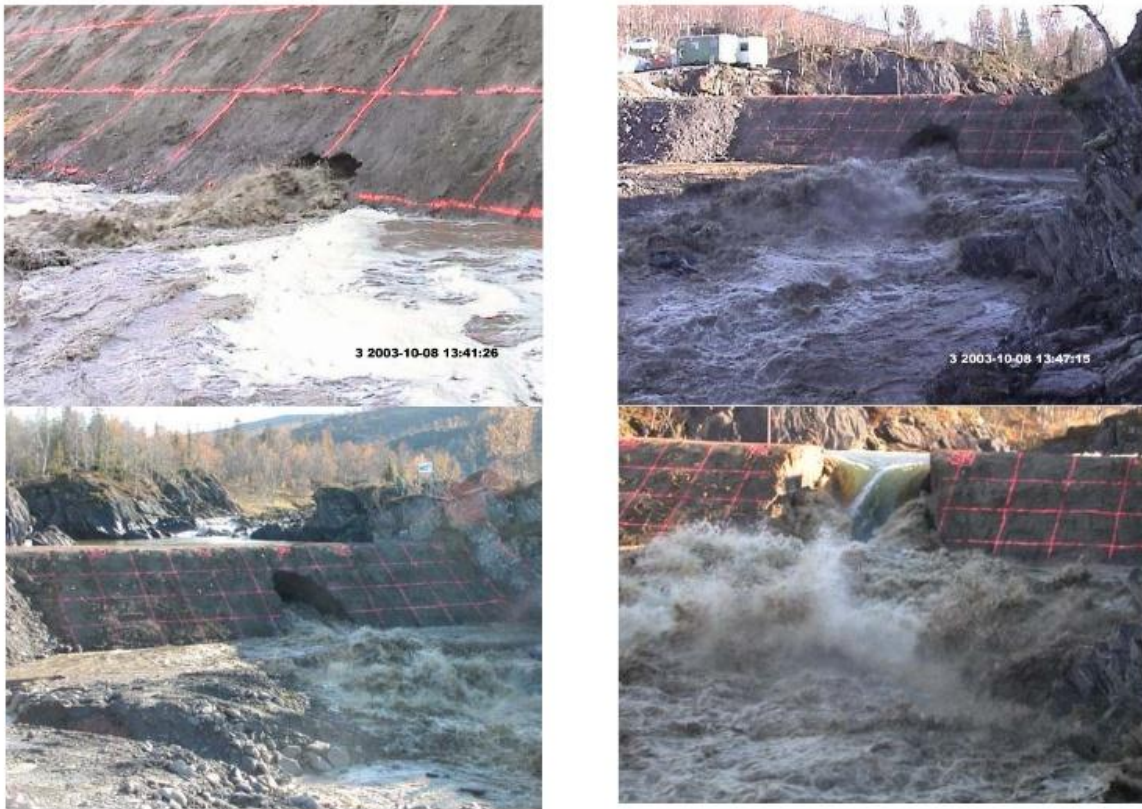


Figure 1.29. Photos prises durant l'essai sur des digues expérimentales (Vaskinn et al., 2004)

Béguin (2011) a réalisé des essais d'érosion de contact à une échelle proche de l'ouvrage (volume de sol 60m^3). Au total 9 essais ont été réalisés (Figure 1.30) : 3 avec une forme similaire aux essais réalisés à l'échelle de l'échantillon et 6 avec la forme classique du talus d'un ouvrage hydraulique en terre. L'instrumentation utilisée a permis le suivi détaillé du comportement hydraulique et mécanique de l'ouvrage, ainsi que le suivi indirect du processus d'érosion. L'auteur a démontré la faisabilité de ce type d'essai dans la caractérisation de l'érosion. L'utilisation de capteurs s'est révélée très intéressante pour l'acquisition d'informations permettant ainsi de valider des interprétations parfois difficiles d'un processus dont l'initiation ne peut pas être observée. L'initiation et la progression du conduit d'érosion ont été détectées plus d'une dizaine d'heures avant la rupture de l'ouvrage.



Figure 1.30. Construction d'une digue expérimentale a) Mise en place des matériaux ; b) Interface gravier-limon ; c) et d) Compactage des couches de limons (Béguin, 2011)

Les principaux obstacles de ce type d'essai sont d'une part leur coût (l'élaboration d'un seul essai nécessite la mise en disposition d'importants moyens humains, matériels et techniques), et d'autre part le respect des conditions de sécurité. C'est pour cette raison que le nombre d'essai réalisés à ce jour est très faible.

I.6.4. Conclusion sur les dispositifs expérimentaux de caractérisation de l'érosion:

Afin d'évaluer l'érodabilité des sols, plusieurs méthodes et techniques de mesure ont été développées. Le principe de ces essais est de reproduire, d'une façon simplifiée, les différents mécanismes de l'érosion interne ou externe. Ces dispositifs permettent de mesurer les modifications des caractéristiques géométriques et hydrauliques des sols sous l'influence de l'écoulement. Néanmoins plusieurs différences existent entre ces dispositifs d'essai. Par exemple, pour la caractérisation de l'érosion externe, l'essai d'érosion en canal consiste à produire directement une contrainte hydraulique parallèle à la surface du sol. Par contre, dans le 'Jet Erosion Test' le sol est soumis à un jet d'eau perpendiculaire à sa surface. Dans l'essai d'érosion par cylindre tournant, et contrairement aux autres essais, la contrainte de cisaillement est appliquée indirectement au sol par la rotation du cylindre. D'autre part, les techniques de mesure ainsi que les hypothèses d'interprétation diffèrent d'un essai à l'autre. Ces essais peuvent être réalisés au laboratoire ou in-situ. Dans cette partie, nous avons exposé les principaux essais dédiés à l'étude de l'érosion, des synthèses bibliographiques plus détaillées sont présentées dans les travaux de Tarog (2000) ; Haghighi (2012) et Nguyen (2014).

I.7. Conclusion:

L'étude de la mobilité des particules solides dans les milieux poreux est un sujet d'extrême importance, car il concerne plusieurs champs d'application. En génie civil, le phénomène d'érosion, définie par l'arrachement, le transport et le dépôt des particules du sol sous l'effet de l'écoulement présente la principale cause de la dégradation des sols et de l'endommagement des ouvrages géotechniques.

Les mécanismes régissant les processus de transport et de rétention des particules dans un milieu poreux sont très complexes. Ils font appels à plusieurs phénomènes, parfois couplés. Dans le cas de l'érosion par exemple, les interactions mécaniques eau – sol ont une grande

influence sur le comportement du sol vis-à-vis de l'écoulement. En effet, une sollicitation hydraulique si elle est supérieure aux forces qui retiennent les grains du sol, peut provoquer l'arrachement et le transport des particules. Cela débute généralement par les grains les plus fines et peut entraîner même les particules constitutives du sol si la force d'écoulement est suffisamment grande. Ainsi, les particules érodées peuvent être drainées à l'extérieur du milieu ou stopper à un autre horizon du matériau provoquant son colmatage. Par conséquent, le phénomène d'érosion provoque une modification des caractéristiques hydrauliques du sol.

Les conséquences de l'érosion sont parfois catastrophiques. Ce problème environnemental avec des répercussions socio-économiques est devenu un enjeu qui menace plusieurs pays dans le monde. La baisse de la fertilité des sols agricoles et la dégradation de la qualité des eaux sont les conséquences directes de l'érosion hydrique. D'autre part, l'érosion interne présente toujours un mécanisme de ruine des ouvrages hydrauliques.

Pour réduire ces risques, plusieurs méthodes et techniques ont été proposées pour la caractérisation de l'érodabilité des sols. Ces différents dispositifs permettent de simuler les différents mécanismes d'érosion interne ou externe. En effet, malgré l'importance des recherches réalisées jusqu'à présent pour l'étude de l'érosion, on continue toujours à enregistrer de nouveaux sinistres causés par ce phénomène. Cela veut dire que cette problématique n'est pas encore maîtrisée et que des efforts devront être fournis davantage par la communauté scientifique pour réduire les conséquences néfastes de cet aléa.

Le prochain chapitre sera consacré à l'exposé des principales recherches menées sur le phénomène d'instabilité interne par suffusion des sols non cohérents. En particulier on s'intéressera à l'identification des facteurs contribuant au déclenchement et à l'évolution de l'érosion, et aux critères proposés par les différents auteurs pour l'évaluation de la stabilité interne des sols. Cette synthèse va nous permettre de positionner la présente recherche par rapport aux études existantes, et de fixer les principaux objectifs de notre travail.

Chapitre II

***« Instabilité interne des milieux
granulaires »***

Chapitre II : Instabilité interne des milieux granulaires

II.1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la présentation des résultats des études menées sur la stabilité interne par suffusion des sols non cohérents. En fait, il faut noter qu'un sol est qualifié comme érodable si sa structure est 'internellement instable'. Cet état de l'art, non exhaustif, va nous permettre de montrer au lecteur l'apport de nos travaux par rapport aux études existantes reliées au sujet que nous avons abordé. En premier lieu, le phénomène d'instabilité interne initié par suffusion sera décrit en détail. Puis, un exposé au cours duquel une analyse critique des approches proposées dans la littérature pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion sera effectué. Nous enchainons ensuite par la détermination des différents facteurs et paramètres pouvant influencer l'initiation et l'évolution de ce phénomène. Une partie sera consacrée aux conséquences de la suffusion sur le comportement mécanique des sols. Ce chapitre se termine par une conclusion dans laquelle on fixe les objectifs de notre recherche et la démarche qui sera adoptée dans l'étude expérimentale.

II.2. Instabilité interne des sols par suffusion :

II.2.1. Définitions et terminologies :

L'expression 'instabilité interne' désigne généralement la susceptibilité des particules fines à se faire déplacer à travers les pores formés par les particules grossières, qui constituent le squelette du sol, sous l'effet des forces d'écoulement. Dans la littérature, il y a d'autres termes qui définies ce phénomène comme instabilité inhérente, suffusion ou encore suffosion.

« US Army Corps of Engineers » (USACE, 1953) sont les premiers à utiliser les termes 'stabilité interne' et 'stabilité inhérente' pour définir la résistance d'un filtre à la ségrégation et à l'érosion. Plus tard, Kenney et Lau (1985) ont défini la stabilité interne

comme la possibilité d'un matériau granulaire à empêcher la perte de ses particules fines sous l'effet de forces perturbatrices.

Kezdi (1979) a utilisé le mot 'suffusion' pour définir le phénomène dans lequel l'infiltration de l'eau dans un sol provoque uniquement la mobilité des particules fines sans la destruction de sa structure.

Kovac (1981) a aussi utilisé le mot 'suffusion' pour décrire le mouvement des particules fines. Il a défini la suffusion interne comme une redistribution interne des fines, le volume de la matrice du sol ne change pas et seule la perméabilité locale sera modifiée. Il a défini aussi la suffusion externe comme un lessivage des particules fines. Dans ce cas, le volume de la matrice solide est réduit et la perméabilité augmente sans que la stabilité du squelette solide soit affectée.

Chappuis (1992) a défini un autre terme 'suffosion' pour décrire la migration de particules de petites tailles de la structure du sol qui laissent de grandes ouvertures entre les particules du sol.

Fell et al. (2005) ont défini la suffusion comme l'inhabilité des grosses particules, constituant le squelette d'un sol, à empêcher la migration des particules fines sous l'effet de l'écoulement.

Richards et Reddy (2007) ont défini la suffusion comme le transport des fines dans la matrice du sol sans la destruction de sa structure. Tandis que, la suffosion est caractérisée par une migration des particules fines qui conduit à la réduction du volume total du sol et à l'effondrement de sa structure.

Wan et Fell (2008) ont défini la suffusion comme le processus de migration des particules fines à travers les constriction formées par les grosses particules sous l'effet d'un écoulement d'eau.

Devant la complexité des termes utilisés, et les différentes définitions données au phénomène étudié, nous adoptons dans notre travail les approches de Fell et al. (2005) pour décrire le phénomène d'instabilité interne des sols. Les termes 'stabilité interne' et 'suffusion' seront donc utilisés dans ce mémoire pour désigner la susceptibilité d'un matériau granulaire au phénomène d'érosion interne.

II.2.2. Processus et mécanismes de la suffusion :

La suffusion est caractérisée par le détachement et le transport des particules fines par un écoulement interstitiel laissant un squelette de sol formé par des particules grossières. La figure (2.1) illustre les processus de la suffusion. Dans ces processus, le squelette du sol reste intact tandis que les particules fines présentes dans l'espace poral seront mobilisées si leur taille est inférieure à la taille des constriction formées par les grosses particules.

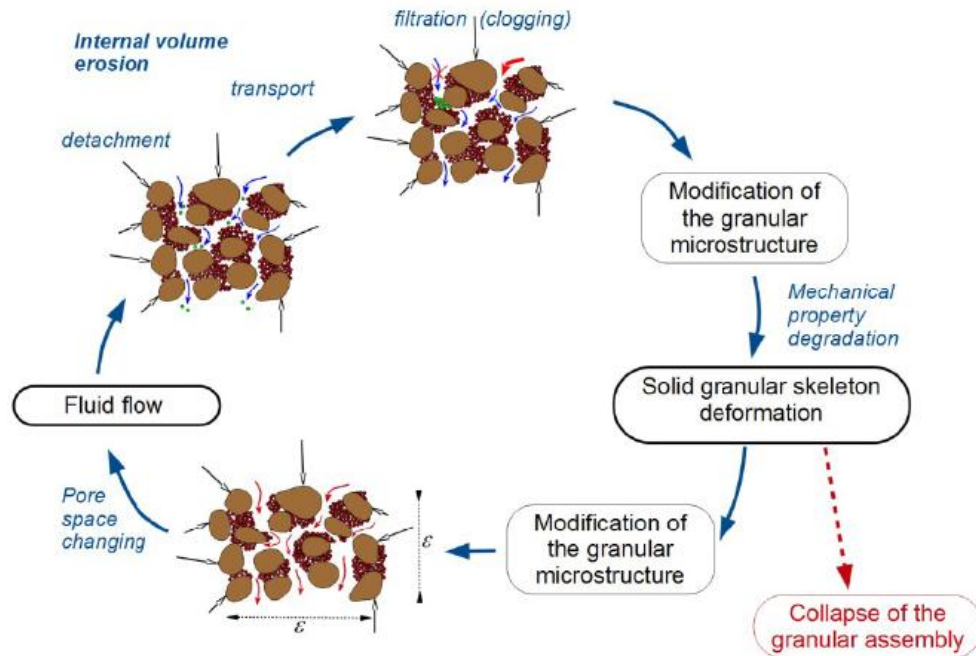


Figure 2.1. Illustration des processus de la suffusion (Sibille, 2016)

La modification de la microstructure du sol par le déplacement ou l'évacuation des fines par la suffusion, peut produire des changements locaux des caractéristiques hydrauliques du sol. Dans la zone d'accumulation des grains érodés, la porosité et la perméabilité décroissent. Puis, à l'opposé, dans la zone ayant subi une perte des particules fines, la porosité et la perméabilité accroissent. Ce changement structural provoque une dégradation de la résistance mécanique du sol et qui peut mener même à sa rupture.

Des études récentes ont indiqué que la suffusion s'accompagne généralement par la filtration de certaines particules (Cividini et Gioda, 2004 ; Reboul et al., 2010 ; Sato et Kuwano, 2015 ; Nguyen et al., 2019 ; Yang et al., 2019). C'est-à-dire, si les particules transportées rencontrent des constriction trop petites, elles seront bloquées dans les pores empêchant ainsi la poursuite de l'érosion. La suffusion entraîne donc un colmatage du milieu accompagné d'une concentration de pressions interstitielles en un point localisé. Si ce point se trouve à l'aval de l'ouvrage, il va se former une zone instable qui menacera l'ouvrage de ruine. La figure (2.2) illustre quelques modes de rupture associés au processus d'érosion interne par suffusion pour un barrage en terre.

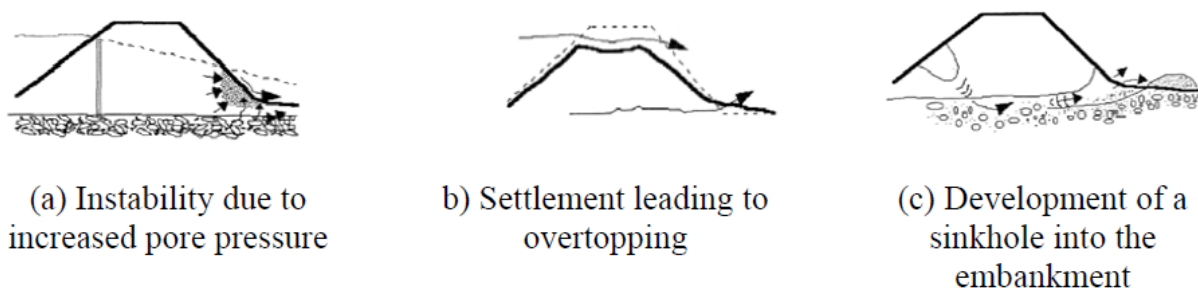


Figure 2.2. Modes de rupture par suffusion (Wan et Fell, 2004)

Généralement la rupture par suffusion se produit par :

- La formation d'une zone instable à l'aval de l'ouvrage par augmentation des pressions interstitielles et création d'une zone de dépression. La dégradation de la résistance mécanique dans cette zone provoque l'affaissement des couches supérieures. Cela provoque la formation d'une brèche qui peut conduire à la rupture de l'ouvrage (Figure 2.1.a).
- L'entraînement des matériaux par suffusion peut provoquer un affaissement local (tassement) de l'ouvrage, ce qui peut provoquer la rupture de ce dernier par surverse (Figure 2.1.b).
- Le développement d'une cavité au sein de l'ouvrage. La vitesse d'écoulement augmente ce qui provoque un glissement successif de l'ouvrage jusqu'à sa rupture (Figure 2.1.c).

II.2.3. Les critères d'initiation de la suffusion :

A partir d'une synthèse des résultats des essais d'érosion menés par différents auteurs pour étudier la stabilité interne des sols, Wan et Fell (2004) ont suggéré trois critères pour que la suffusion se produise :

- 1- Les dimensions des particules fines doivent être inférieures aux dimensions des constriction entre les particules grossières qui forment la structure primaire (le squelette) du sol (c'est-à-dire la structure du sol est instable).
- 2- La quantité des particules fines doit être inférieure à la quantité nécessaire pour remplir tout l'espace des vides de la structure primaire.
- 3- La vitesse d'écoulement doit être suffisamment élevée pour pouvoir déplacer les particules fines à travers les constriction entre les plus grosses particules.

La suffusion se produit donc exclusivement dans les sols avec une structure 'bimodale' où l'arrangement des particules est tel qu'il est possible de distinguer une structure primaire composée de particules grossières constituant le squelette du sol, et une structure secondaire composée de particules fines positionnées dans les pores formés par les grosses particules (Figure 2.3), et qui peuvent être entraînés par l'écoulement à travers les constriction.

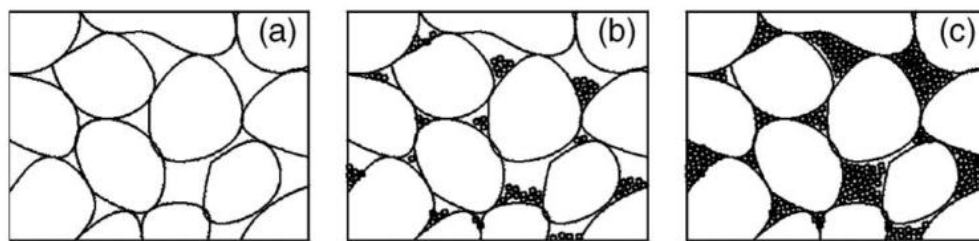


Figure 2.3. Distribution des particules fines dans la matrice du sol composée de grains grossiers a) Absence de fines ; b) Présence partielle de fines
c) Vides remplis par les particules fines (Indraratna et al., 2011)

Des études ont montré que la quantité des fines influe considérablement sur la microstructure du sol et que la participation des particules à différentes tailles dans les forces de contact inter-particulaires change avec la quantité des fines (Shire et al., 2014).

Selon Skempton et Brogan (1994), la quantité des particules fines pouvant se trouver à l'intérieur d'une matrice granulaire d'un sol n'excède pas 24 à 29% selon la porosité respective des matrices fines et grossière. Si la teneur en particules fines est supérieure à 35%, les particules grossières flottent dans la matrice des fines. Ce constat a été confirmé par Wan et Fell (2004, 2008).

Liu (1992) indique que les particules fines commencent à jouer un rôle dans la matrice solide d'un sol, entre autre, dans sa résistance dès que leur pourcentage dépasse 25%.

Chang et Zhang (2014) ont réalisé des essais triaxiaux sur des échantillons avec différents pourcentages en fines. Ils ont constaté que les particules fines ont contribué à la résistance du sol à une contrainte effective appliquée aux échantillons contenant 35% de fines. Tandis que, pour les autres échantillons contenant de faibles pourcentages de fines, la résistance aux charges appliquées est assurée uniquement par les grosses particules.

Nous remarquons que les deux premiers critères d'initiation de la suffusion sont liés à la granulométrie du sol, ce sont les critères de base pour les approches géométriques proposées pour l'évaluation de la stabilité interne des sols. Le troisième critère est relatif à la sollicitation hydraulique, c'est la base des critères hydrauliques proposés pour la détermination du seuil de la sollicitation hydraulique au-delà de laquelle l'érosion est initiée.

II.3. Critères d'évaluation de la stabilité interne des sols:

Plusieurs critères ont été proposés dans la littérature pour évaluer la stabilité interne des sols face à la suffusion. Ces critères peuvent être classés en deux catégories : des critères basés sur une approche géométrique et d'autres basés sur une approche hydraulique.

II.3.1. Les critères géométriques:

Les critères géométriques sont utilisés pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion. Ils sont basés sur le principe de l'auto-filtration, c'est-à-dire de vérifier si les particules grossières agissent comme un filtre sur les particules fines. En d'autres termes, si les grosses particules ont la capacité de retenir les petites particules.

Les modèles proposés dans ce sens peuvent être scindés en deux groupes : des modèles basés sur l'analyse de la distribution granulométrique du sol, et des modèles basés sur l'analyse de la distribution de la taille des constriction.

Les modèles granulométriques sont basés sur certains diamètres caractéristiques de la courbe granulométrique des matériaux testés et sur la forme de ces courbes ainsi que sur des singularités qui peuvent y exister (discontinuités dans les courbes granulométriques).

Les modèles basés sur la distribution de la taille des constriction évaluent la susceptibilité à la suffusion des sols par la vérification si la taille des constriction dans le réseau des pores est capable d'empêcher (ou de stopper) la migration des fines.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les modèles les plus pertinents proposés dans la littérature pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion.

II.3.1.1. Critères géométriques basés sur l'analyse de la granulométrie du sol:

✓ Critère de Terzaghi (1939) :

Terzaghi (1939) a proposé un critère dit de rétention pour la vérification de la stabilité des filtres granulaires. Ce critère est donné par la relation suivante :

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (2.1)$$

Où, D_{15} est le diamètre des particules du filtre correspondant à 15% de passant en masse, et d_{85} le diamètre des particules du sol à protéger correspondant à 85% de passant en masse.

Ce facteur de rétention a été utilisé plus tard par beaucoup d'auteurs pour la vérification de la stabilité interne des matériaux.

✓ US Army Corps of Engineers (USACE, 1953):

Dans le but d'étudier la possibilité de confectionner un filtre granulaire à partir d'un mélange de sable et de gravier au lieu d'utiliser un système de couches de ces deux matériaux, USACE (1953) ont étudié la stabilité interne des mélanges (sable – gravier) avec différents proportions pour connaître la composition la plus stable.

Des essais de perméabilité à charge constante ont été effectués avec un écoulement descendant. Un gradient hydraulique égal à 0.5 m/m a été imposé au début de l'essai, puis augmenté par palier jusqu'à une valeur de 16 m/m. Pour rendre les conditions hydrodynamiques plus sévères, des vibrations ont été appliquées au cours de l'essai. La stabilité interne a été déterminée en comparant la granulométrie de l'échantillon avant et après chaque essai.

A l'issue des essais ils ont trouvé que les mélanges contenant 50% de sable + 50% de gravier et ceux contenant 30% de sable + 70% de gravier étaient instables. Les mélanges avec 70% de sable + 30% de gravier et ceux avec 90% de sable + 10% de gravier sont stables et peuvent être utilisés dans la confection des filtres.

L'USACE (1953) stipule qu'un filtre est instable si l'écoulement est turbulent et le gradient hydraulique est supérieur à 5 et si le coefficient d'uniformité du matériau est supérieur à 20.

✓ **Critère de Istomina (1957) :**

Istomina (1957) a proposé une méthode simple pour évaluer la stabilité interne d'un sol en utilisant le coefficient d'uniformité (C_u). Ce coefficient caractérise la répartition en taille des éléments qui composent le sol. Selon cet auteur :

- Si $C_u \leq 10$ le sol est stable.
- Si $C_u \geq 20$ le sol est instable.
- Si $10 < C_u < 20$ condition transitoire.

✓ **Critère de Lubochkov (1969) :**

Lubochkov (1969) a montré que le potentiel d'instabilité interne d'un sol dépend de l'allure entière de sa courbe granulométrique. Il a démontré aussi que ce n'est pas forcément que les matériaux ayant un coefficient d'uniformité supérieur à 20 sont instables. Il propose une méthode analytique selon laquelle le matériau sera stable vis-à-vis de la suffusion lorsque la pente de sa courbe granulométrique est inférieure à une certaine limite dans chacune de ses classes granulométrique. Il a défini par la suite un fuseau de granulométrie dans lequel les sols sont considérés comme stables vis-à-vis de la suffusion (Figure 2.4).

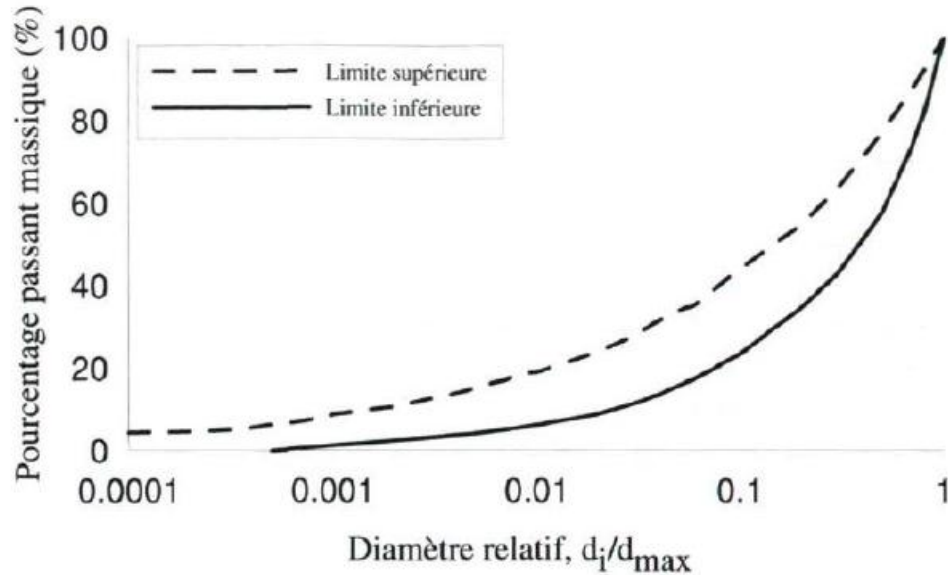


Figure 2.4. Fuseau granulométrique des matériaux stables vis-à-vis de la suffusion (Lubochkov, 1969)

✓ **Critère de Kezdi (1969, 1979) :**

La méthode d'évaluation de la stabilité interne des sols proposée par Kezdi (1969, 1979) consiste à diviser la courbe granulométrique du sol en un point arbitraire (d_n) en deux parties (Figure 2.5) : une partie (S1) constituée de particules grossières (leur taille notée D), et une partie (S2) constituée de particules fines (leur taille notée d), puis de vérifier la capacité des particules grossières à empêcher la migration des particules fines par l'application du critère de rétention de Terzaghi ($D_{15}/d_{85} < 4$). Où D_{15} est le diamètre correspondant à 15% de passant dans la partie (S1) et d_{85} est le diamètre correspondant à 85% de passant de la partie (S2).

Si le critère de Terzaghi est vérifié pour tous les points de sa courbe granulométrique (en variant le d_n), le sol sera stable.

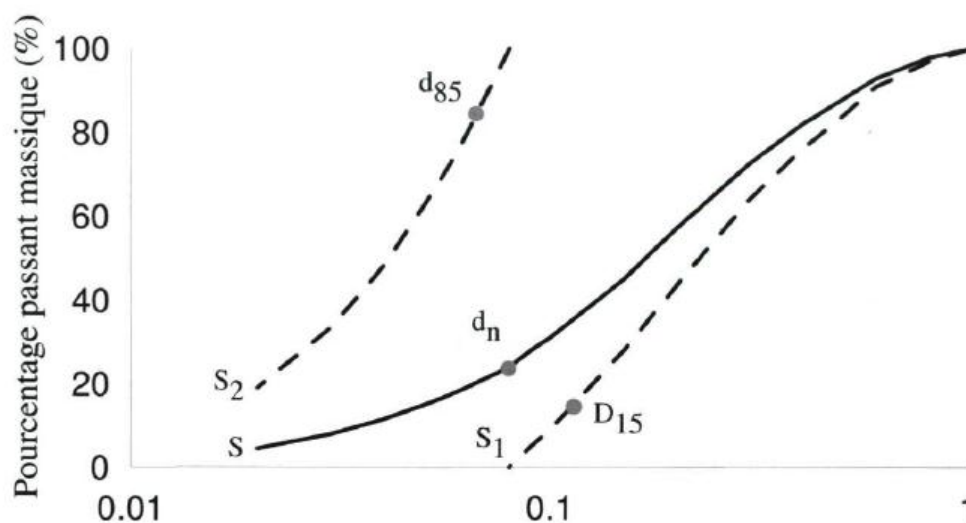


Figure 2.5. Critère de Kezdi (1979)

✓ **Critère de De Mello (1975) :**

De Mello (1975) a appliqué la méthode de Kezdi (1969) pour les sols à granulométrie discontinue. Il subdivise aussi la courbe granulométrique en deux composants : une partie comprenant les particules fines et l'autre comprenant les particules grossières. Cependant, contrairement à Kezdi le diamètre de division n'a pas été choisi arbitrairement, mais il prend le diamètre correspondant au point de discontinuité comme un diamètre de division (Figure 2.6). La stabilité interne est évaluée par l'application du critère de Terzaghi en ce point avec un facteur de rétention de 5 au lieu de 4.

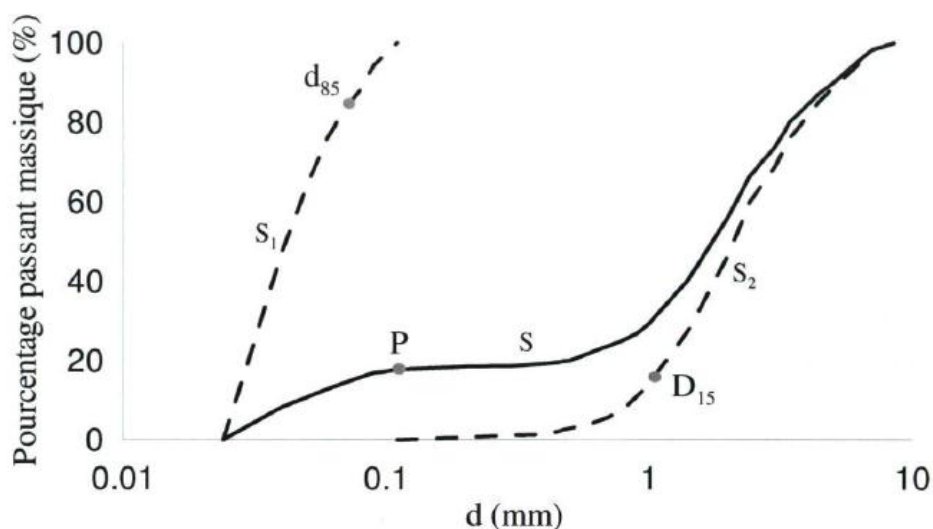


Figure 2.6. Critère de De Mello (1975)

✓ **Critère de Kovac (1981) :**

Kovac (1981) a proposé une méthode basée sur la modélisation physique du milieu granulaire. Dans ce modèle, le milieu poreux est représenté par un réseau de tubes capillaires avec des diamètres variables (Figure 2.7). Les tubes capillaires remplacent les pores du milieu granulaire, leur diamètre moyen peut être calculé par la formule suivante :

$$d_0 = 4 \frac{n_c}{1 - n_c} \cdot \frac{D_h^c}{\alpha_D} \quad (2.2)$$

Dans cette équation n_c est la porosité de la fraction grossière. α_D est un coefficient de forme, qui vaut 6 pour les particules sphériques et de 7 à 9 pour les particules de forme granulaires. D_h^c est le diamètre effectif de Kozeny qui peut être calculé comme suit :

$$D_h^c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta F_i}{D_i}} \quad (2.3)$$

D_i est le diamètre moyen de l'intervalle (i) de la courbe granulométrique et ΔF_i est le pourcentage passant en masse entre deux tailles de particules D_i .

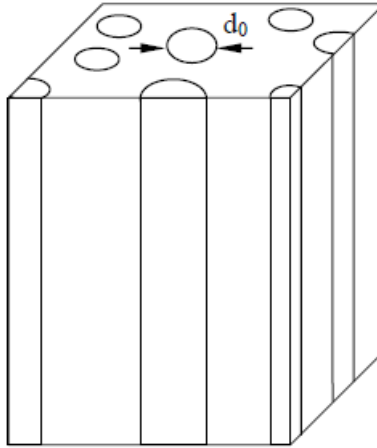


Figure 2.7. Modélisation physique du milieu granulaire (Kovac, 1981)

Kovac (1981) a proposé d'évaluer la stabilité interne des sols par la comparaison du diamètre moyen des tubes d_0 avec le diamètre caractéristique de la fraction fine d_{85} tout en variant le D_h^c le long de la courbe granulométrique. Le sol sera considéré comme stable si :

$$d_0 = 4 \frac{n_c}{1 - n_c} \cdot \frac{D_h^c}{\alpha_D} \leq d_{85} \quad (2.4)$$

✓ **Critère de Kenney et Lau (1985, 1986) :**

En se basant sur les travaux publiés par l'USACE (1953), Kenney et Lau (1985, 1986) ont réalisé des essais d'érosion sur des matériaux composés de sable et de gravier. Les échantillons ont été soumis à un écoulement descendant dans un perméamètre à charge constante accompagné de légères vibrations imposées manuellement. Une surcharge de 10 kPa était appliquée à la surface des matériaux durant l'essai. La stabilité du sol a été évaluée par la comparaison des courbes granulométriques des échantillons avant et après chaque essai.

A partir des résultats de ces essais, ils ont élaboré une méthode permettant d'évaluer la stabilité interne d'un sol granulaire ayant un diamètre des particules supérieur à 80 microns. Cette méthode consiste à créer une courbe de forme $H = f(F)$ à partir de la courbe granulométrique du sol (Figure 2.8). Dans cette courbe F est le pourcentage en masse des particules ayant un diamètre inférieur à D et H est le pourcentage en masse des particules ayant un diamètre compris entre D et $4D$. La comparaison de H et F permet de déclarer si le sol est stable ou instable.

Dans le repère H - F , si la granulométrie des matériaux se trouve sous un seuil donné par $H/F = 1$ sur une partie de sa fraction fine correspondant à $F \leq 20$ pour une granulométrie étalée ($C_u > 3$) ou $F \leq 30$ pour une granulométrie moins étalée ($C_u < 3$), alors ces matériaux seront stables sous écoulement. La fraction $F \leq 20$ -30 correspond à la quantité maximale des particules libres susceptibles d'être érodées.

Il faut noter que initialement un rapport $H/F = 1.3$ avait été choisis comme limite entre les matériaux stables et instables. Puis, suite aux remarques faites par Sherard (1986) et Milligan (1986), Kenney et Lau (1986) ont décidé d'utiliser un ratio $H/F = 1$ comme limite. Par ailleurs, selon Skempton et Brogan (1994) un rapport H/F de 1 serait représentatif de

matériaux assez denses, tandis qu'un rapport de 1.3 serait davantage approprié pour des matériaux plus lâches.

D'après Wan et Fell (2004), l'approche de Kenney et Lau, largement utilisée pour l'évaluation de la stabilité interne des graves sableuses, peut être aussi appliquée pour les sols composés de limon-sable-gravier, et qui ne font pas partie de la gamme des sols testés par les auteurs de cette méthode.

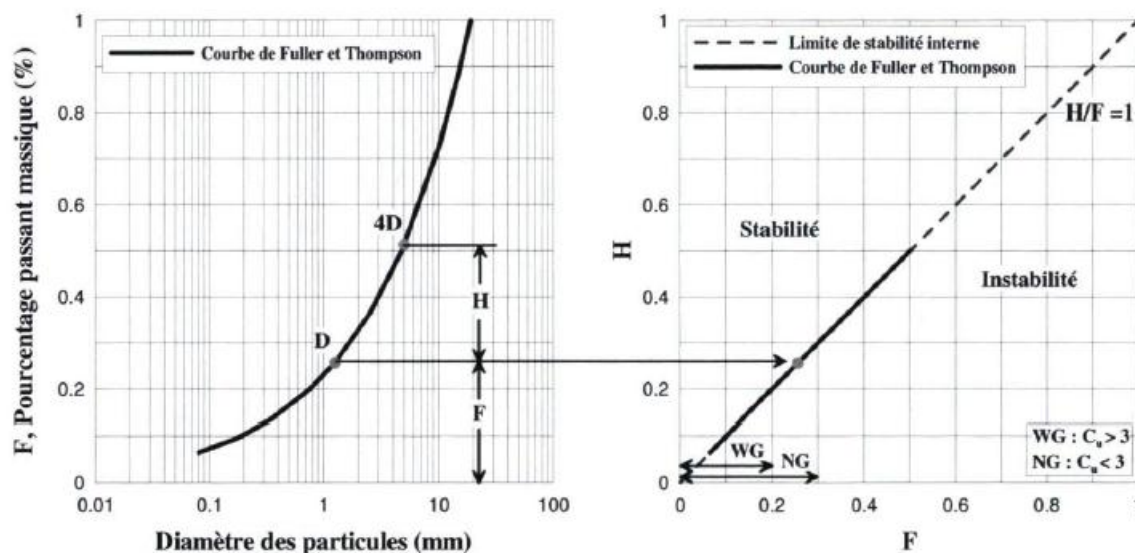


Figure 2.8. Critère de Kenney et Lau (1985, 1986)

✓ **Critère de Lafleur et al. (1989, 1993) :**

Lafleur et al. (1989, 1993) ont établi une relation entre la stabilité interne d'un sol et l'allure de sa courbe granulométrique comme indiqué dans la figure (2.9). Les auteurs précisent que les matériaux avec une courbe granulométrique linéaire (courbe 1) ou linéaire sur sa partie fine (courbe 2) sont généralement stables sous écoulement. Dans les matériaux à granulométrie discontinue (courbe 3), une gradation des particules est manquante, il y a donc un risque d'instabilité interne. Les sols dont la granulométrie est représentée par une courbe étalée avec une partie fine allongée (courbe 4) ont un fort potentiel d'instabilité interne.

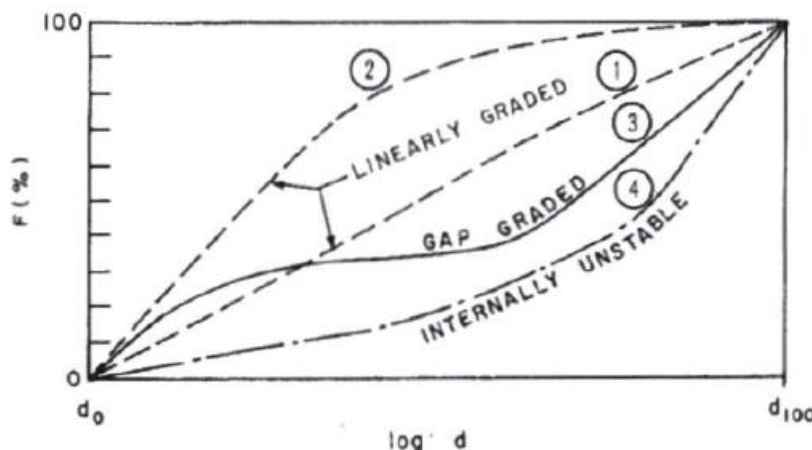


Figure 2.9. Critère de Lafleur et al. (1989, 1993)

Quoique cette méthode ne donne qu'une classification quantitative, elle peut former une première appréciation du comportement des sols vis-à-vis de la suffusion à partir de leur granulométrie.

✓ **Critère de Burenkova (1993) :**

Burenkova (1993) a fait des essais sur des échantillons de sols constitués de mélanges de sable et de gravier. Les matériaux avaient des granulométries variées, un coefficient maximal d'uniformité égal à 200 et la taille maximale des particules est 100 millimètres.

Son étude s'est basée sur l'hypothèse que la stabilité interne d'un matériau dépend de la forme de sa courbe granulométrique, et que les matériaux peuvent être divisés en une portion grossière qui supporte les charges et une portion fine qui se trouve dans les pores. Dans un premier temps il a développé une méthode expérimentale afin d'évaluer le diamètre maximal des grains susceptibles d'être érodés. Cette méthode consiste à diviser chaque matériau en classes granulométriques. Puis, la portion la plus grossière était placée dans un montage et le volume de l'échantillon est mesuré. Ce procédé était répété pour toutes les classes granulométriques en allant des plus grosses au plus fines, tout en mesurant le volume de l'ensemble après chaque ajout. Ainsi, si l'ajout d'une fraction augmente le volume de l'échantillon, cette classe de grains fait partie de la fraction grossière. Si le volume ne change pas, ces particules ajoutées feront partie des particules fines érodables.

La limite entre la structure primaire et secondaire des matériaux, notée d_{dv} , peut être approximée par la relation suivante :

$$0.55\left(\frac{d_{90}}{d_{15}}\right)^{-1.5} < \frac{d_{dv}}{d_{max}} < 1.87\left(\frac{d_{90}}{d_{15}}\right)^{-1.5} \quad (2.5)$$

Où d_{max} est le diamètre maximal des grains, d_{90} et d_{15} désignent les diamètres correspondant à 90 et 15% de passant en masse respectivement.

Par la suite, il a étudié expérimentalement la stabilité interne de ces matériaux en procédant à des essais d'écoulement. Les résultats de ces essais ont indiqué que la stabilité interne peut être définie en fonction de deux facteurs d'uniformité ($h' = d_{90}/d_{60}$) et ($h'' = d_{90}/d_{15}$). A partir de ces facteurs, l'auteur a proposé une limite entre les sols stables et instables (Figure 2.10).

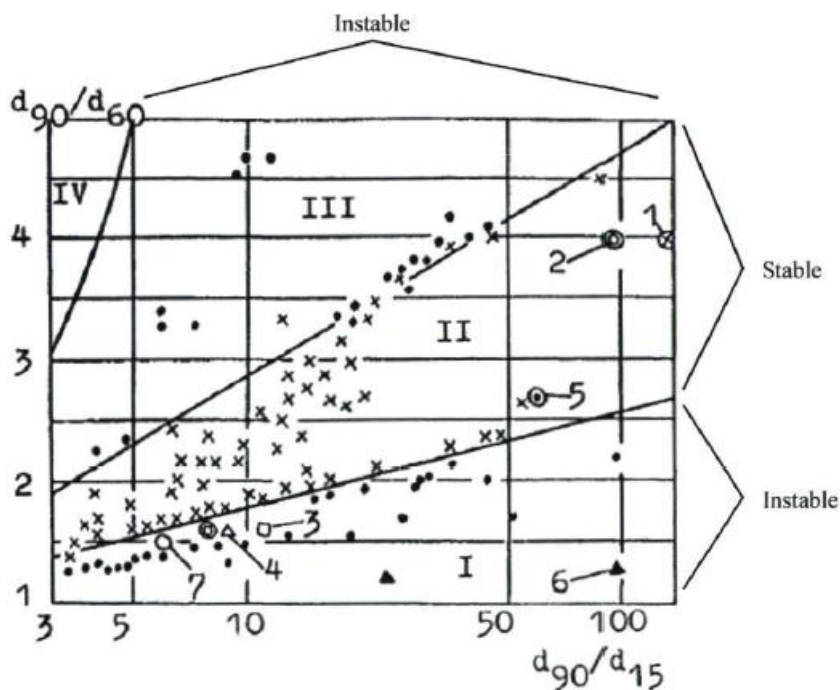


Figure 2.10. Critère de Burenkova (1993)

A partir de la figure (2.10) on peut distinguer quatre zones : la zone I et III regroupe les matériaux instables, la zone II comporte les matériaux stables et la zone IV représente quant à elle une zone de matériaux de composition non probable. Selon ce critère, les matériaux seront stables si l'inégalité suivante est respectée :

$$0.76\log(h'') + 1 < h' < 1.86\log(h'') + 1 \quad (2.6)$$

✓ **Critère de Wan et Fell (2004, 2008) :**

Wan et Fell (2004) ont étudié la stabilité interne de mélanges composés de silt-sable-gravier et argile-silt-sable-gravier. Des essais d'écoulement descendant ont été menés à l'aide d'un perméamètre à charge constante. Des gradients hydrauliques variant entre 10 et 18m/m ont été imposés et la stabilité des matériaux a été évaluée par analyse granulométrique des échantillons avant et après essai.

En premier lieu, ils ont étudié la validité d'application des principales méthodes proposées dans la littérature pour évaluer la stabilité interne des sols testés. Ils ont trouvé que les méthodes basées uniquement sur le coefficient d'uniformité ne sont pas adéquates pour prédire la stabilité des sols à la suffusion. Les méthodes basées sur l'auto-filtration comme celle de Kezdi (1979) et de De Mello (1975) sont trop conservatives puisqu'elles classifient des sols stables comme étant instables. De même pour la méthode de Kenney et Lau (1985, 1986), où beaucoup de matériaux stables ont été définis comme instables. Les auteurs stipulent que la méthode de Burenkova (1993) est moins conservatrice que celle de Kenney et Lau (1985, 1986) et en combinant les deux, l'estimation du potentiel d'instabilité interne des matériaux semble plus appropriée comme indiqué dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1 : Evaluation de la stabilité interne des mélanges silt-sable-gravier et argile-silt-sable-gravier par la méthode de Burenkova (1993) et Kenney et Lau (1985, 1986) (Wan et Fell. 2004)

Likelihood of Internal Instability		Kenney & Lau (1985, 1986) method		
		$H < F$	$F \leq H < 1.3F$	$H \geq 1.3F$
Burenkova (1993) method	$h' \leq 0.76\log(h'') + 1$	Likely - Very likely	Neutral - Likely	Very unlikely
	$h' > 0.76\log(h'') + 1$	Unlikely	Very unlikely - Unlikely	Very unlikely

Les auteurs proposent une méthode probabiliste basée sur le critère de Burenkova (1993), qui est présentée dans les figures (2.11) et (2.12) pour les mélanges sable-gravier et argile-silt-sable-gravier respectivement. Cette méthode s'applique aux sols ayant 10% ou moins de fines non plastiques.

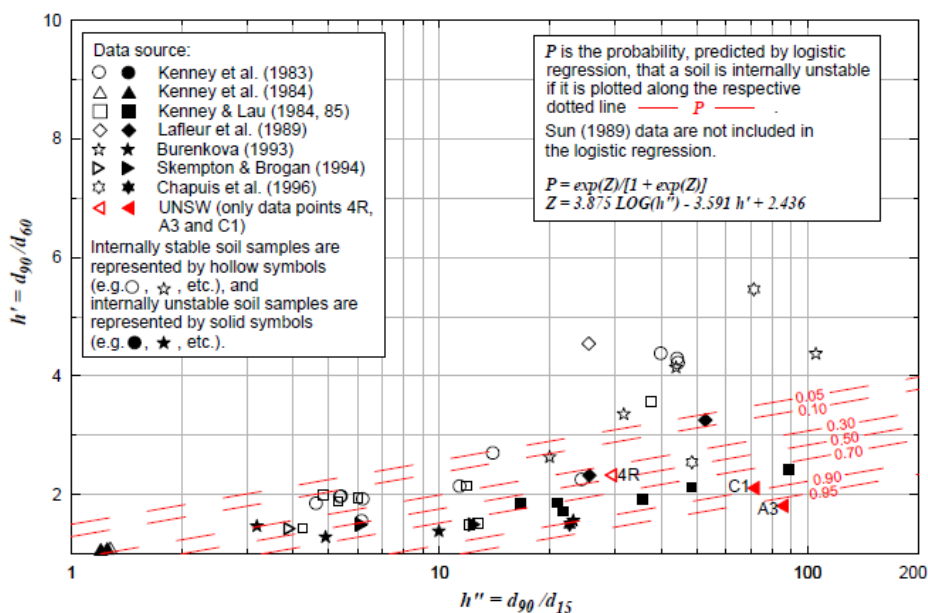


Figure 2.11. Evaluation de la stabilité interne des mélanges sable-gravier (Wan et Fell, 2004)

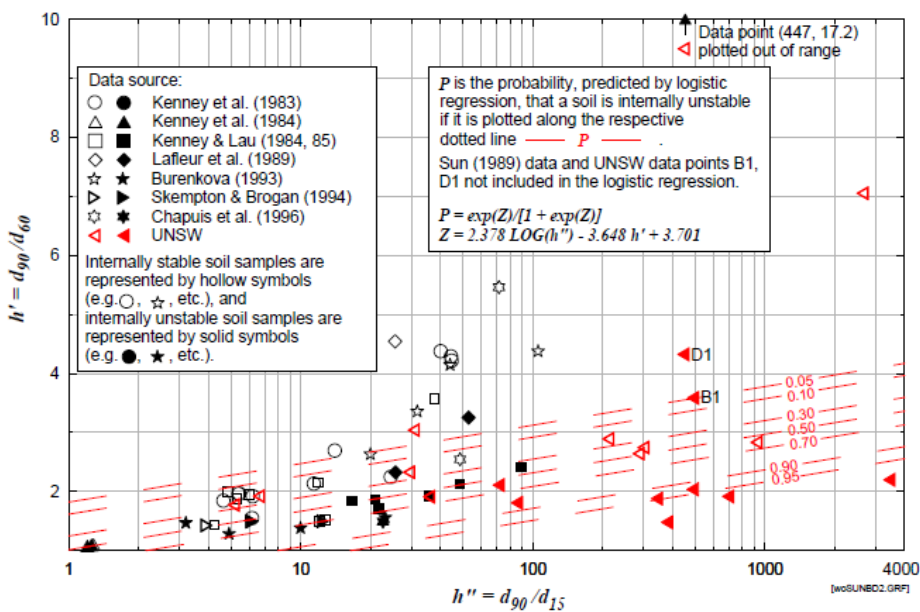


Figure 2.12. Evaluation de la stabilité interne des mélanges argile-silt-sable-gravier (Wan et Fell, 2004)

L'application de cette approche sur plusieurs granulométries a permis aux auteurs de constater que les sols ayant une pente raide dans la portion grossière de leur courbe granulométrique, et une pente faible sur leur portion fine étaient les plus susceptibles à la suffusion. Ils ont réalisé que cette observation peut être représentée graphiquement par les rapports d_{90}/d_{60} pour la portion grossière et d_{20}/d_5 pour la portion fine (Figure 2.13).

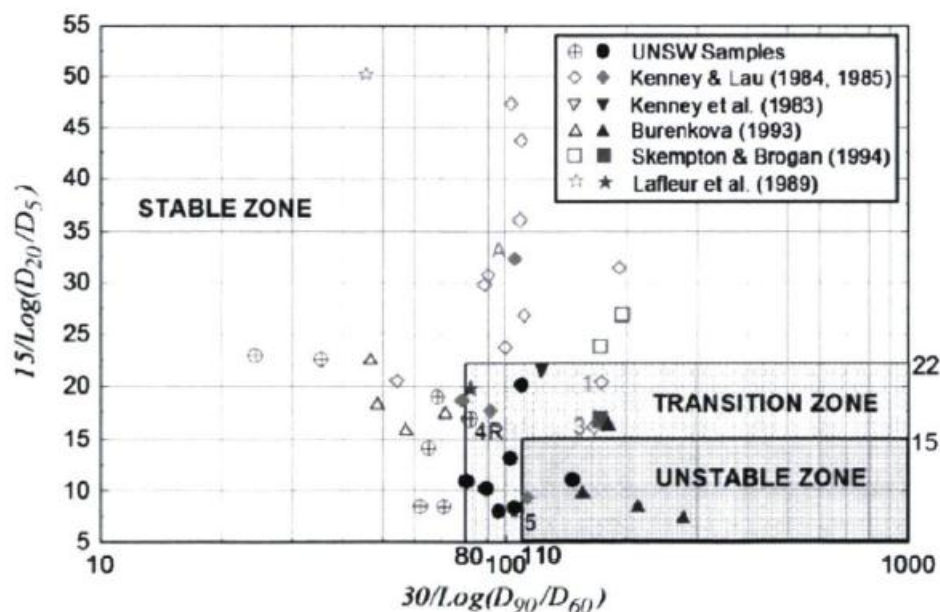


Figure 2.13. Méthode alternative pour prédire la stabilité interne des mélanges silt-sable-gravier à granulométrie étalée (Wan et Fell, 2008)

✓ **Critère de Liu (2005) et de Mao (2005) :**

Comme beaucoup d'auteurs, Liu (2005) et Mao (2005) divisent la courbe granulométrique du sol en deux composantes, l'une grossière et l'autre fine, en un point donné de coordonnées (d_f , P_f).

Liu (2005) divise un sol à granulométrie discontinue au point de discontinuité, et un sol à granulométrie continue au diamètre correspondant à $d_f = \sqrt{d_{70} \cdot d_{10}}$. Le pourcentage en masse des passants correspondant au diamètre d_f est déterminé, et la stabilité du sol sera évaluée comme suit :

$P_f < 25\%$, le sol est instable

$25\% < P_f < 35\%$, condition transitoire de stabilité

$P_f > 35\%$, le sol est stable

Dans la méthode de Mao (2005), pour un sol à granulométrie continue la courbe granulométrique est divisée au point $d_f = 1.3\sqrt{d_{85} \cdot d_{15}}$ et le critère de stabilité est donné comme suit :

$P_f < \frac{1}{4(1-n)}$, le sol est stable

$P_f \geq \frac{1}{4(1-n)}$, le sol est instable

Dans cette formule le n représente la porosité du sol.

Selon Li (2008) ces deux méthodes sont recommandées dans les guides techniques en Chine.

✓ Critère de Li (2008) :

Li (2008) a réalisé des essais de percolation sur des matériaux granulaires avec différentes distributions granulométriques. En premier lieu, l'auteur a évalué l'efficacité de certains critères granulométriques proposés pour l'estimation de la stabilité interne des sols.

Les critères de Kezdi (1979) ; Kenney et Lau (1985, 1986), et celui de Burenkova (1993) ont été évalués par une confrontation avec les résultats expérimentaux des essais menés sur 62 granulométries, dont 29 granulométries discontinues et 33 granulométries continues.

Li (2008) a conclu à partir de cette comparaison que le critère de Kezdi donne une meilleure prédiction de la stabilité interne des matériaux à granulométries discontinues. La méthode de Kenney et Lau est la mieux adaptée pour l'estimation de la stabilité des sols à granulométrie étalée. Enfin, la méthode de Burenkova apparaît moins conservatrice que les deux autres méthodes.

L'auteur a proposé une nouvelle approche, semi-empirique, basée sur celle du tube capillaire de Kovac (1981). Dans cette approche, la stabilité interne est évaluée par la détermination du ratio d'_{85} / O_{50} avec, d'_{85} est le diamètre correspondant à 85% en masse de la partie fines, et O_{50} est le diamètre moyen d'un tube capillaire. La démarche suivie dans cette méthode est résumée dans la figure (2.14).

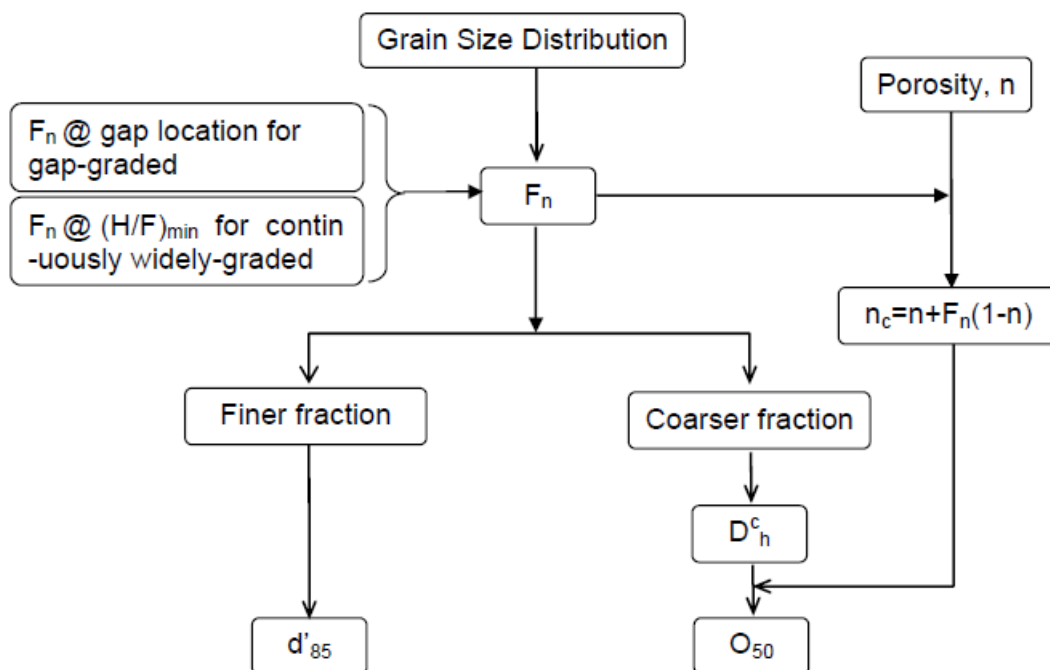


Figure 2.14. Démarche pour la vérification de la stabilité interne des sols (Li, 2008)

Premièrement, et à partir de la courbe granulométrique du matériau, le pourcentage des fines F_n est déterminé. Selon cet auteur, cette méthode est valide pour les matériaux contenant moins de 35% de fines. Au-delà de cette quantité, il est considéré que les particules grossières flottent dans une matrice de fines. Le point de division entre les particules grossières et les particules fines est choisi comme étant celui à la discontinuité d'une courbe granulométrique discontinue, et au point correspondant au ratio $(H/F)_{min}$ calculé par la méthode de Kenney et Lau (1985, 1986) pour les granulométries continues. Ensuite, connaissant la porosité globale du milieu, la porosité de la fraction grossière est déterminée. En calculant le diamètre effectif de Kozeny par la formule (2.3), on peut déterminer le diamètre moyen du tube capillaire O_{50} par la formule (2.4). Une relation linéaire a été établie par rapport au ratio d'_{85} / O_{50} et une

limite entre les matériaux stables et instables a été proposée comme indiqué dans la figure (2.15).

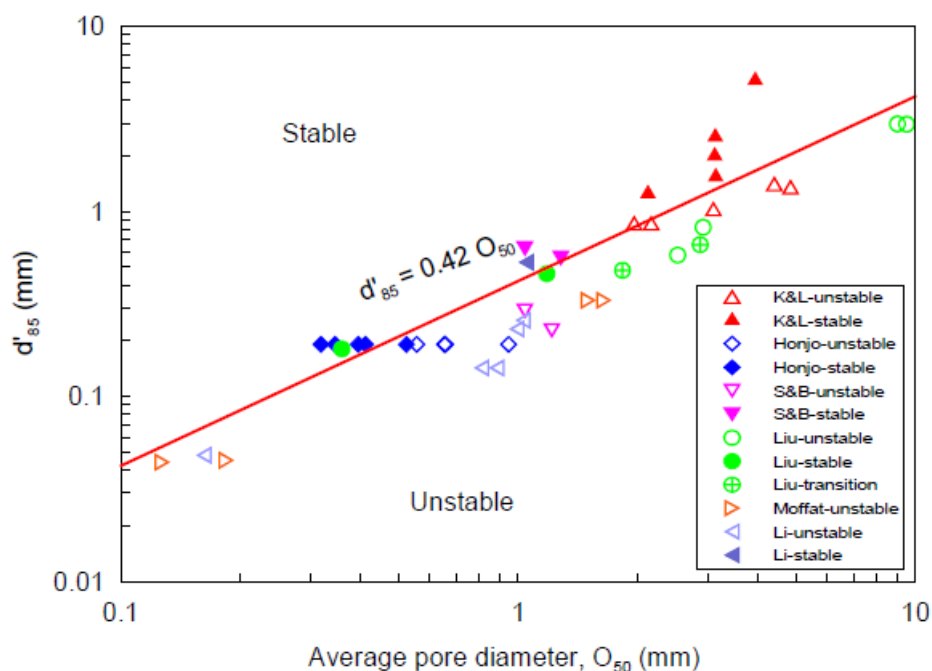


Figure 2.15. Limite entre les matériaux stables et instables selon la méthode de (Li, 2008)

Li et Fannin (2013) ont adopté la même méthode (Figure 2.16) pour la vérification de la stabilité interne des sols en utilisant l'approche de Kovac (1981) pour la modélisation de la porosité du sol, mais en suggérant une nouvelle limite entre les matériaux stables et les matériaux instables (Figure 2.17).

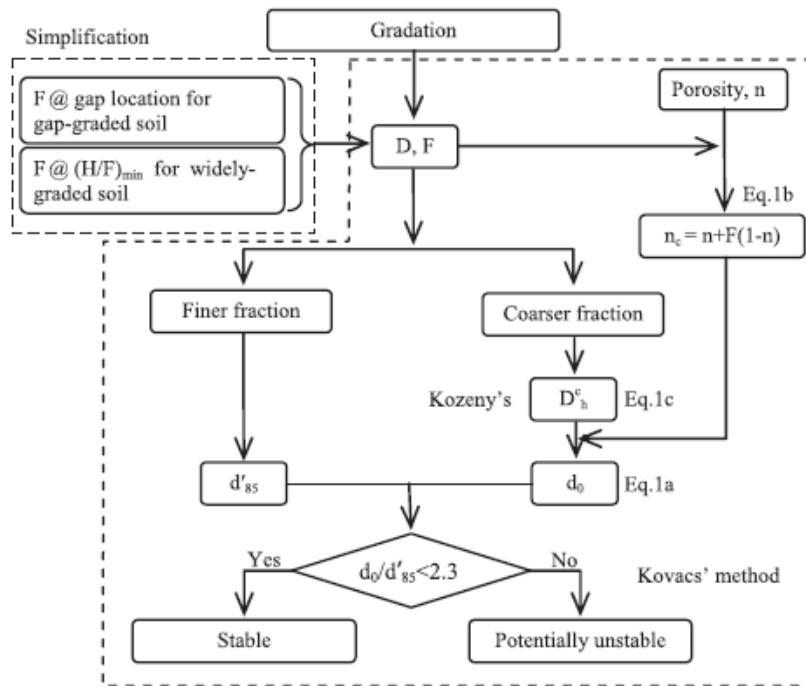


Figure 2.16. Démarche pour la vérification de la stabilité interne des sols (Li et Fannin, 2013)

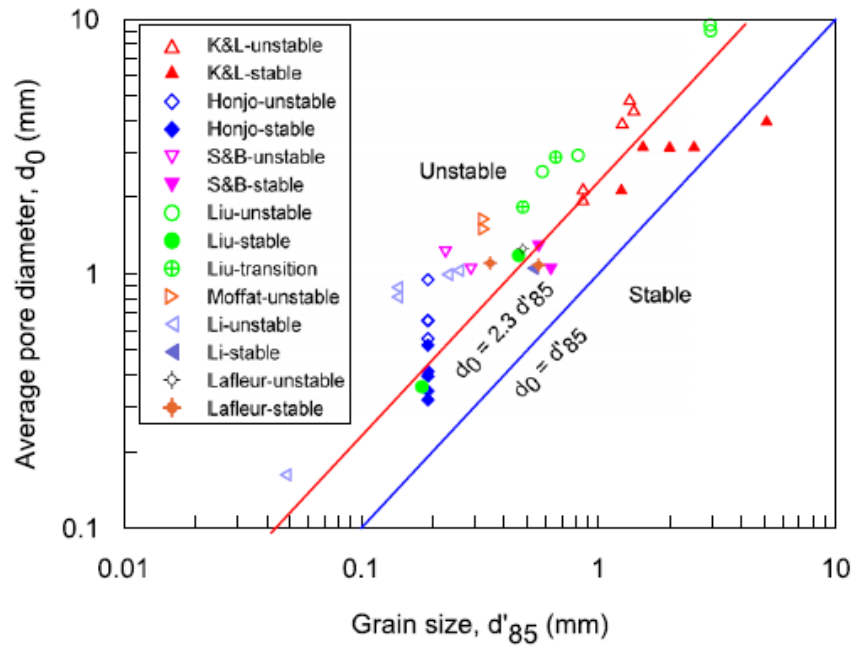


Figure 2.17. Limite entre les matériaux stables et instables selon la méthode de (Li et Fannin, 2013)

✓ Critère d'Andrianatrehina et al. (2012) :

Andrianatrehina et al. (2012) ont réalisé des essais de suffusion à l'aide d'un appareil triaxial sur des échantillons provenant d'un dépôt alluvionnaire de la rivière de Rhône (France). Neuf distributions granulométriques, avec un diamètre maximal des grains égal à 16mm, ont été considérées dans ces essais. Cinq échantillons ont une distribution granulométrique continue (C) et quatre discontinue (D) comme indiqué dans la figure (2.18). Ces granulométries sont caractérisées principalement par le pourcentage des particules ayant un diamètre inférieur à 0.315mm (le pourcentage apparaît dans la dénomination des échantillons), qui est considéré comme le diamètre limite entre les particules grossières et les particules fines. Les densités relatives des échantillons varient de 30, 50 et 90%, et les contraintes de confinement de 50, 100 et 200 kPa.

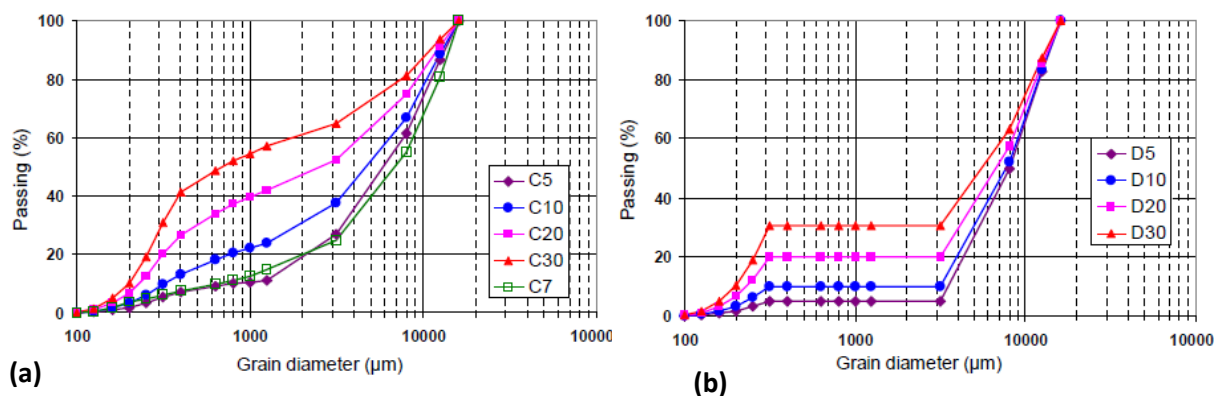


Figure 2.18. Courbes granulométriques des échantillons testés
 a) Granulométrie continue (C) ; b) Granulométrie discontinue (D)
 (Andrianatrehina et al., 2012)

Après chaque essai, l'échantillon est divisé en trois parties : partie supérieure, médiane et partie inférieure. Par la suite, la courbe granulométrique pour chaque partie est tracée pour estimer la migration des particules fines dans cette zone de l'échantillon durant l'essai (Figure 2.19).

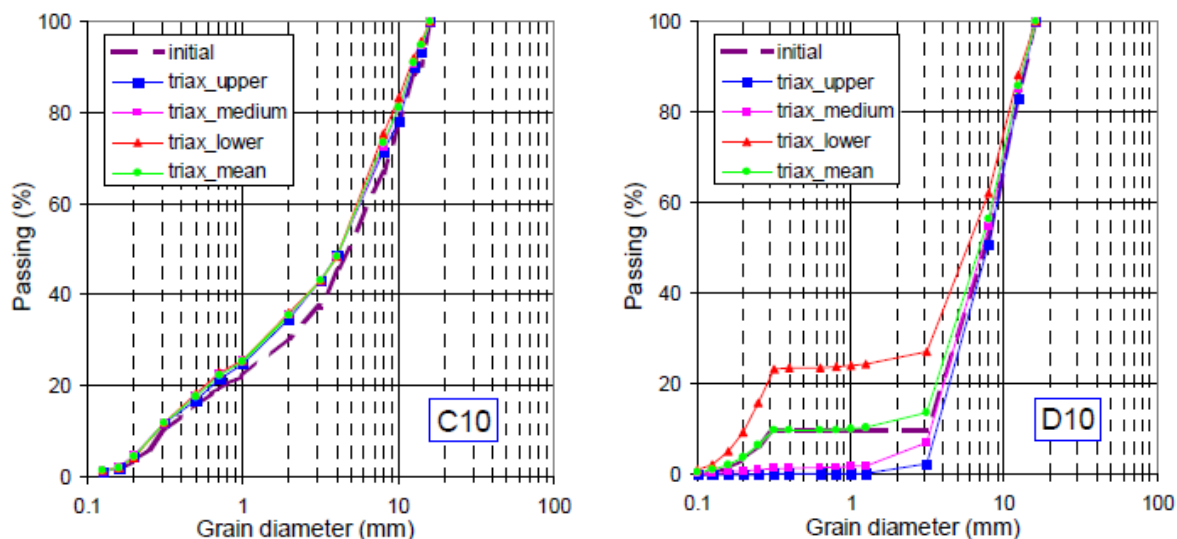


Figure 2.19. Courbes granulométriques avant et après essai des échantillons C10 et D10 (Andrianatrehina et al., 2012)

Pour estimer le potentiel d'instabilité du sol, un paramètre $\Delta P(\%)$, représentant l'écart entre les courbes granulométriques avant et après essai a été exprimé. Les auteurs ont proposé à partir de cette méthode un critère de stabilité interne basé sur la mesure direct du paramètre ΔP . Ils ont considéré qu'un matériau est stable lorsque $\Delta P < 5\%$ et instable pour $\Delta P > 10\%$ (Figure 2.20). Les valeurs intermédiaires entre les pourcentages 5 et 10% correspondent à une limite de stabilité.

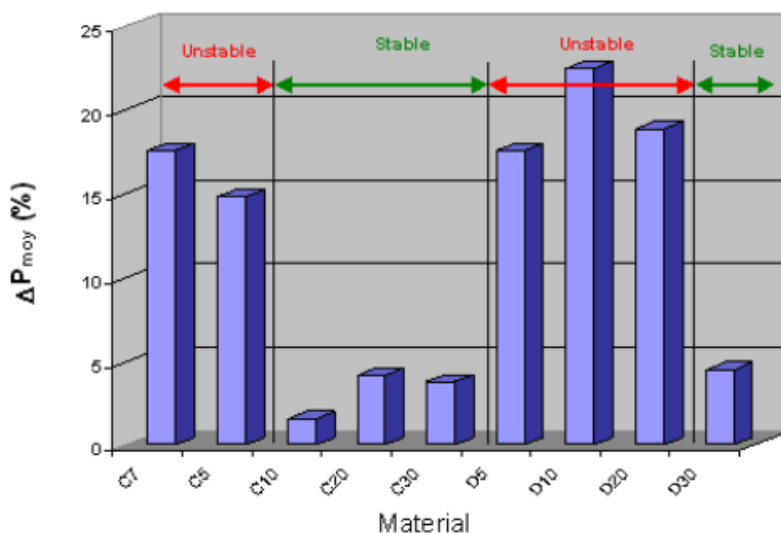


Figure 2.20. Méthode de mesure directe de la stabilité interne des sols (Andrianatrehina et al., 2012)

✓ Critère de Chang et Zhang (2013) :

En appliquant les critères de Istomina (1957), Kezdi (1969) et Kenney et Lau (1985) pour l'évaluation du potentiel d'instabilité interne de 131 échantillons de sols à différente granulométrie, Chang et Zhang (2013) ont conclu que ces critères donnent une estimation plus au moins acceptable de la stabilité pour des applications dans l'ingénierie. Cependant, aucun critère ne peut être appliqué pour tous les types de sols et en particulier les sols comportant une quantité importante de particules fines. Cela est expliqué par le fait que les paramètres contrôlant les processus d'érosion ne sont pas les mêmes pour les différents types de matériaux. Ainsi, les auteurs ont procédé à une classification des sols testés selon leur distribution granulométrique et selon la quantité de fines qu'ils contiennent. Puis, ils ont essayé d'élaborer un critère de stabilité pour chaque type de sol.

Les sols sont divisés en deux types selon la configuration de leur courbe granulométrique : des sols 'bien gradués' à granulométrie étalée (sols A et B dans la figure (2.21)), et des sols 'mal gradués' à granulométrie discontinue (sols C et D dans la figure (2.21)).

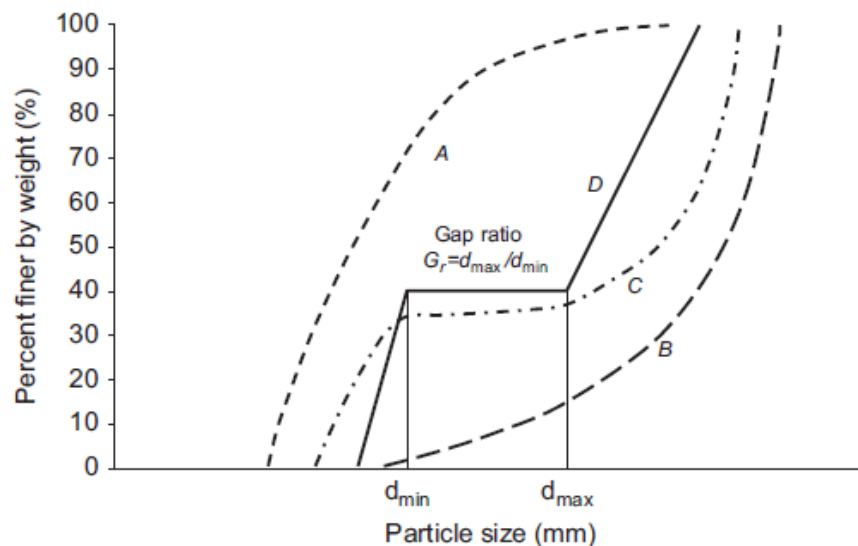


Figure 2.21. Illustration de la granulométrie des sols 'bien gradués' et des sols 'mal gradués' (Chang et Zhang, 2013)

La stabilité interne des sols bien gradués est évaluée en fonction du pourcentage de particules fines ($P\%$) par l'utilisation de l'indice de stabilité $(H/F)_{min}$ suggéré par Kenney et Lau (1985). Pour ce type de sols, le critère proposé par Chang et Zhang (2013) est présenté dans la figure (2.22). Les matériaux contenant moins de 5% de fines ($P < 5\%$) seront considérés comme stables si $(H/F)_{min} > 1$. Tandis que, les sols à faible plasticité contenant entre 5 et 20% de fines ($5\% \leq P \leq 20\%$) seront jugés comme stables s'ils vérifient l'inégalité $(H/F)_{min} > -(1/15)P + (4/3)$. Les sols comportant une quantité de particules fines supérieure à 20% ($P > 20\%$) sont stables.

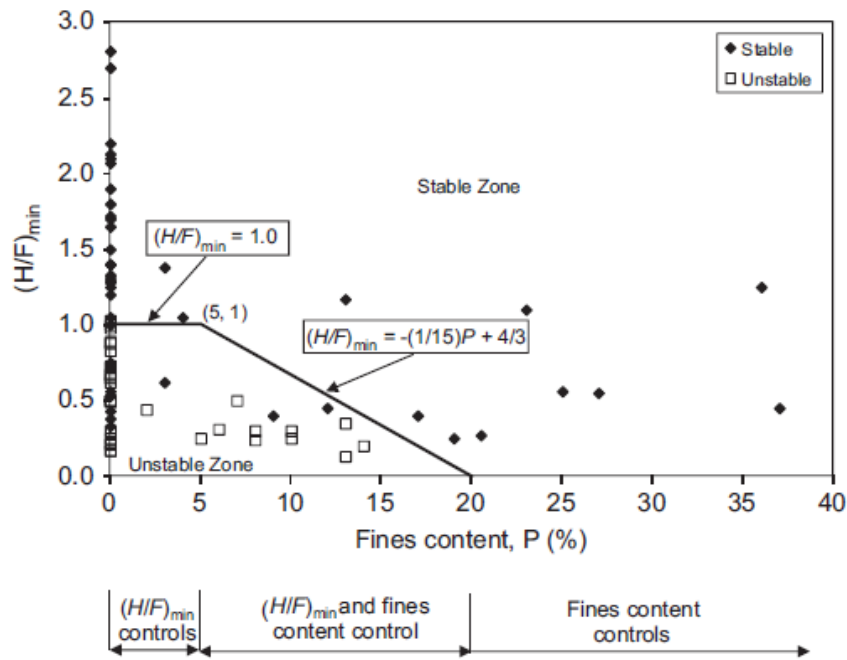


Figure 2.22. Critère de stabilité interne des sols bien gradués (Chang et Zhang, 2013)

Concernant les sols à granulométrie discontinue, les auteurs ont constaté que le comportement du sol vis-à-vis de l'érosion dépend principalement de sa composition granulométrique. La stabilité interne de ce type de sols peut être déterminée en fonction du paramètre G_r (Figure 2.21), qui est définie comme le ratio entre le diamètre maximal d_{max} et le diamètre minimal d_{min} de la partie discontinue de la courbe granulométrique du sol. Le critère d'évaluation de la stabilité interne des sols mal gradués est présenté dans la figure (2.23). La stabilité des matériaux avec $P < 10\%$ peut être estimée en se basant uniquement sur le paramètre G_r . Ils peuvent être considérés comme stables si $G_r < 3$. La stabilité des sols peu-plastiques contenant entre 10 et 35% de particules fines est évaluée en fonction de P et de G_r .

Ces matériaux sont stables si $G_r < 0.3P$. Les matériaux contenant plus de 35% de fines sont considérés comme des matériaux stables vis-à-vis de la suffusion.

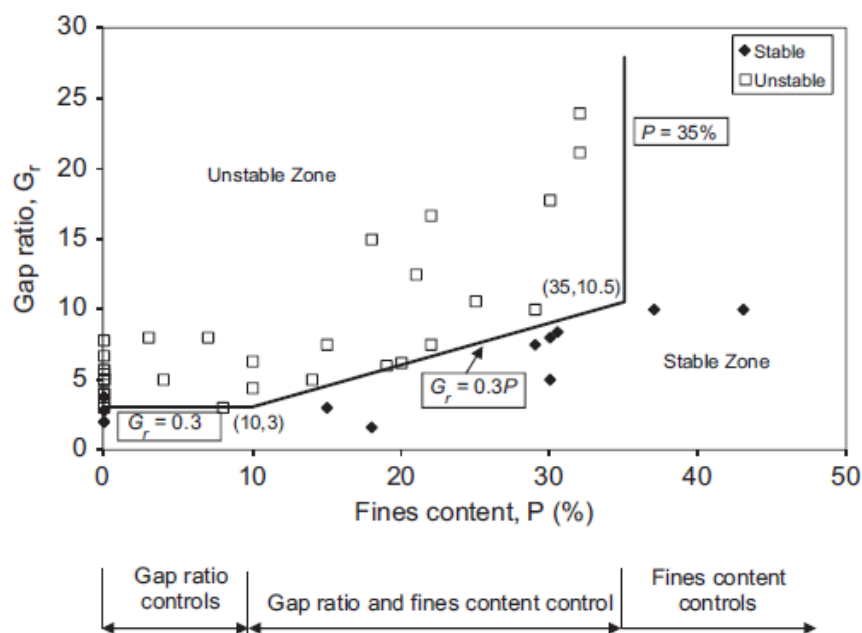


Figure 2.23. Critère de stabilité interne des sols mal gradués (Chang et Zhang, 2013)

II.3.1.2. Critères géométriques basés sur la distribution de la taille des constriction:

L'évaluation de la stabilité interne des sols passe par la vérification si leur structure primaire assure l'auto-filtration des particules fines. Selon Silveira et al. (1975) et Wittman (1979), la possibilité de filtration des particules fines par les grosses particules est liée à la géométrie du réseau poral et en particulier aux dimensions des constriction de la structure primaire du sol. Ces constriction sont définies comme étant l'ouverture la plus étroite entre les pores, et par conséquent, les obstacles les plus étroits qu'une particule fine doit surmonter lorsqu'elle traverse un filtre granulaire (Locke et al., 2001 ; Indraratna et al., 2007 ; Sjah et Vincens, 2013 ; Shire et O'sullivan, 2016). Pour cela, la compréhension des processus de transport en milieux poreux nécessite, en premier lieu, l'établissement d'un modèle adéquat de son réseau poral (Vincens et al., 2015).

Ainsi, l'approche proposée pour la vérification de la capacité de filtration du sol est basée sur la détermination de la distribution de la taille des constriction du milieu granulaire, et de vérifier si ces constriction sont capables d'empêcher la migration des particules fines.

Dans ce qui suit, nous présentons quelques modèles, basés sur ce concept, et qui sont proposés pour l'estimation de la stabilité des sols à l'érosion.

✓ **Critère de Kenney et Lau (1984):**

Kenney et al. (1984) sont les premiers à introduire le concept du contrôle de la taille des constriction pour la vérification de la stabilité des matériaux utilisés comme filtres granulaires. Ce paramètre, qui caractérise la géométrie du réseau de vides du milieu poreux, détermine la taille maximale des particules qui peuvent être transportées à travers le filtre.

Sur la base des résultats des essais de filtration effectués sur des matériaux uniformes ($C_u = 1.2-12$), et en utilisant des considérations théoriques, décrites par Silveira et al. (1975) et Wittman (1979), qui sont liées aux possibilités d'arrangement des grains du sol dans son état dense ou lâche, les auteurs ont montré que la taille des constriction D_C est liée à la partie fines des matériaux, et la stabilité du filtre peut être vérifiée par la formule suivante :

$$\frac{D_C}{D_5} \leq 0.25; \frac{D_C}{D_{15}} \leq 0.20 \quad (2.7)$$

✓ **Critère de Indraratna et al. (2007, 2011):**

Indraratna et al. (2007) ont mené une étude théorique pour l'évaluation de l'efficacité des filtres granulaires. Ils ont indiqué que les particules fines du sol ne seront pas filtrées si leur dimension est inférieure au D_{C35} qui représente la taille des constriction correspondant à 35% en masse des particules constituant le filtre. Selon ces auteurs, la capacité de filtration d'un filtre granulaire peut être estimée par la comparaison de la plus grande dimension des particules fines, prise égale au $d_{85,SA}$ qui correspond au diamètre des grains qui occupent 85% de la surface occupée par les particules fines, avec un diamètre de contrôle de la taille des constriction, qui est pris égal au D_{C35} . Le filtre est jugé efficace (stable) s'il satisfait la condition suivante : (Figure 2.24).

$$\frac{D_{C35}}{d_{85,SA}} < 1 \quad (2.8)$$

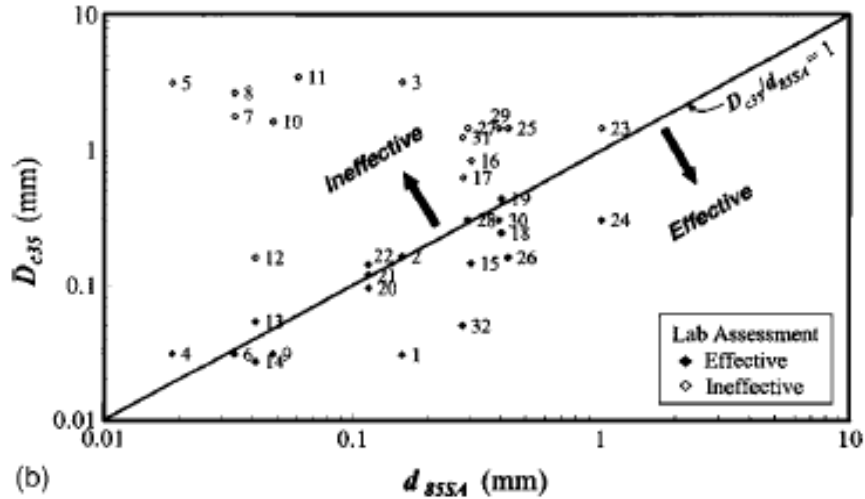


Figure 2.24. Evaluation de l'efficacité des filtres granulaires (Indraratna et al., 2007)

Plus tard, Indraratna et al. (2011) ont essayé d'appliquer l'approche théorique proposée par Indraratna et al. (2007) pour l'étude de la stabilité interne des sols. Ces auteurs ont utilisé les résultats de différentes études expérimentales présentées dans la littérature (Kenney et Lau, 1985 ; Skempton et Brogan, 1994 ; Honjo et al., 1996 ; Lafleur et al., 1989 ; Wan et Fell, 2008). Au total les résultats de 41 essais menés sur des sols à différente configuration granulométrique ont été utilisés. Deux limites de stabilité ont été proposées (Figure 2.25). Si $D_{C35}/d_{85} < 0.82$, le sol est considéré comme potentiellement instable. Si $D_{C35}/d_{85} > 0.73$, le sol peut être considéré comme stable. Tandis que, Si le D_{C35}/d_{85} se situe entre ces deux limites, c'est-à-dire ($0.73 \leq D_{C35}/d_{85} \leq 0.82$), cette zone est considérée comme une zone transitoire. Dans ce cas une étude expérimentale s'impose pour estimer le potentiel d'instabilité du sol.

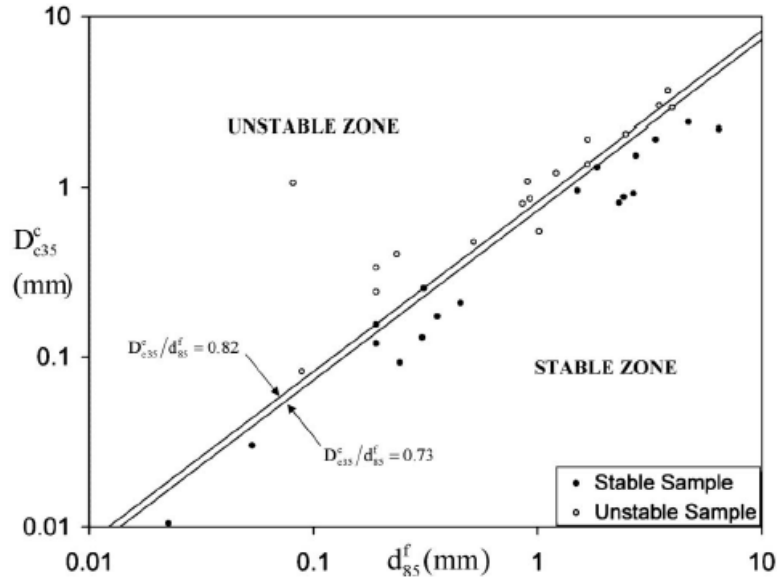


Figure 2.25. Evaluation de la stabilité interne des sols
(Indraratna et al., 2011)

✓ **Critère de Dallo et al. (2013):**

Le critère proposé par Dallo et al. (2013) pour l'évaluation de la susceptibilité des sols non cohérents à la suffusion est basé sur les résultats publiés par Indraratna et al. (2007). Dans cette méthode, un diamètre de contrôle de la taille des constriction est comparé au d_{85} de la fraction des fines. L'analyse des résultats de 47 essais présentés dans la littérature ont permis aux auteurs de proposer trois zones de stabilité (Figure 2.26). Une zone stable définie par la limite $D_{C35}/d_{85} < 1$. Une zone instable avec une limite $D_{C35}/d_{85} > 1.05$, et une zone transitoire située entre ces deux limites $1 \leq D_{C35}/d_{85} \leq 1.05$. Cette méthode est applicable uniquement si le $d_{85} < 1.18\text{mm}$. La stabilité des sols qui ont un $d_{85} > 1.18\text{mm}$ devra être déterminé expérimentalement.

Par ailleurs, et pour s'affranchir des difficultés rencontrées pour le calcul du D_{C35} par la détermination de la courbe représentant la distribution cumulée de la taille des constriction du milieu poreux, les auteurs ont proposé, à partir d'une analyse statistique, une corrélation entre ce paramètre est certains diamètres de la courbe granulométrique du sol. Le D_{C35} pour un état dense du sol peut être déterminé par la relation suivante :

$$D_{C35}(\text{dense}) = 0.177 * D_{10} + 0.007 * D_{15} + 0.003 * D_{30} - 0.008 * D_{60} - 0.003 * D_{95} + 0.003 \quad (2.9)$$

Pour un état lâche, le diamètre de contrôle de la taille des constriction est exprimé par la formule suivante :

$$D_{c35}(l\grave{a}che) = 0.437 * D_{10} + 0.114 * D_{15} + 0.008 * D_{30} - 0.007 * D_{60} - 0.015 * D_{75} + 0.007 * D_{95} - 0.012 \quad (2.10)$$

Où : D_{10} , D_{15} , D_{30} , D_{60} , D_{75} et D_{95} sont les diamètres correspondant à 10, 15, 30, 60, 75 et 95% de passant en masse respectivement.

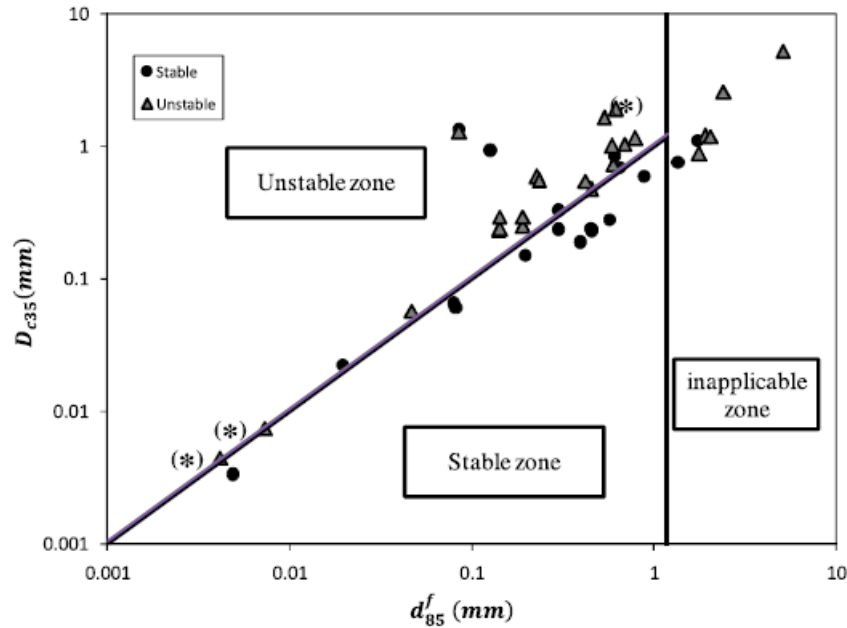


Figure 2.26. Evaluation de la stabilité interne des sols non cohérents (Dallo et al., 2013)

✓ **Critère de Dallo et Wang (2016):**

Dallo et Wang (2016) ont proposé une méthode basée sur la détermination d'un diamètre de contrôle de la taille des constriction par la méthode des tubes capillaires (méthode de Kovac). Les auteurs ont utilisé les mêmes granulométries des sols testés par Kenney et Lau (1985) ; Skempton et Brogan (1994) ; Honjo et al. (1996) ; Moffat (2005) et Li (2008). La stabilité interne des matériaux a été évaluée expérimentalement par la mesure de la quantité des particules érodées, la mesure du changement de la perméabilité, et par comparaison des distributions granulométriques des échantillons avant et après chaque essai.

En utilisant la méthode des tubes capillaires suggérée par Kovac (1981), les auteurs ont exprimé le diamètre des constriction en fonction du diamètre moyen des pores par la formule suivante :

$$D_C = d_0 / 2.75 \quad (2.11)$$

$$D_C = 1.4545 \frac{n_c}{1-n_c} \cdot \frac{D_h^c}{\alpha_D} \quad (2.12)$$

Pour la vérification de la stabilité interne, le D_C est exprimé en fonction du d_{85} qui représente le diamètre correspondant à 85% de passant des particules fines (Figure 2.27). La limite entre les matériaux stables et les matériaux instables peut être exprimée par ($D_C/d_{85}=1$).

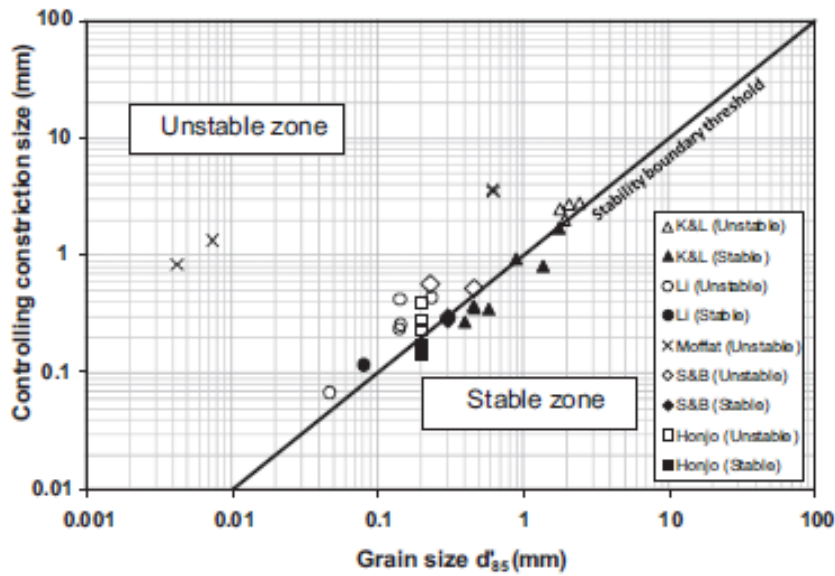


Figure 2.27. Evaluation de la stabilité interne des sols
(Dallo et Wang, 2016)

II.3.2. Sommaire des critères géométriques:

Tous les critères géométriques proposés pour l'évaluation de la stabilité interne des sols sont basés sur le principe de l'auto-filtration, c'est-à-dire de vérifier si la structure primaire du sol est capable d'empêcher ou de stopper la migration des particules fines. Certains critères analysent la granulométrie du sol. Tandis que, d'autres approches s'intéressent à l'analyse de la distribution de la taille des constriction du milieu poreux.

La plupart des critères granulométriques sont basés sur l'étude de la pente de la courbe granulométrique des matériaux sur un certain intervalle (Lubockove, 1969 ; Kezdi, 1969, 1979 ; Kenney et Lau, 1985, 1986 ;...). Ces méthodes ne se différencient que dans la discrétisation de ces intervalles. Cette différence fait que le même matériau peut être classé différemment selon ces critères. Un matériau jugé stable par une certaine méthode peut être classé comme instable par une autre. Pour cela l'utilisation de ces critères doit se faire avec précautions.

Les critères de Kezdi (1969, 1979) et de Kenney et Lau (1985, 1986) qui sont très utilisés dans l'ingénierie, et notamment dans le dimensionnement des filtres granulaires pour les ouvrages hydrauliques, convergent pour $F = 15\%$. Selon Li et Fannin (2008), la méthode de Kezdi est conservative pour l'évaluation de la stabilité des sols à granulométrie continue pour $F < 15\%$. Tandis que, celle de Kenney et Lau donne une mauvaise estimation du potentiel d'instabilité des sols à granulométrie discontinue pour $F > 15\%$. D'autre part, Cote (2010) a jugé que la méthode de Kenney et Lau (1985, 1986) est très conservative parce qu'elle a été élaborée à partir d'essais où des conditions très sévères ont été appliquées aux matériaux (gradients élevés et vibrations).

Certaines méthodes basées sur l'analyse de la granulométrie du sol consistent à diviser sa courbe granulométrique en deux composantes : une partie comprenant les particules grossières et l'autre comprenant les particules fines. Quelques auteurs choisissent le point de division d'une façon arbitraire puis le faire varier tout au long de la courbe granulométrique. Le sol est déclaré stable si en tout point, le critère de rétention est vérifié. Quelle que soit son efficacité, cette méthode nous semble relativement couteuse. De Mello (1975) a proposé de prendre le diamètre correspondant au point de discontinuité comme un diamètre de division et d'appliquer le critère de Terzaghi uniquement en ce point. Dans cette méthode la quantité des particules fines n'est pas prise en considération, ce qui peut sous-estimer le potentiel d'instabilité du sol. Burenkova (1993) a proposé une méthode expérimentale pour déterminer la limite entre la structure primaire et secondaire des matériaux. Liu (2005) et Mao (2005) divisent les courbes granulométriques discontinues au point de discontinuité. Tandis que, pour les sols à granulométrie continue, ils expriment le diamètre de division en fonction de quelques points caractéristiques de la courbe granulométrique. La détermination de ce

diamètre de division qui sépare les particules fines érodables à ceux constituant le squelette du sol est un point important dans l'étude de la capacité de filtration des matériaux granulaires. Plusieurs recherches ont été menées dans ce sens. On cite par exemple les travaux de Wan et Fell (2008) ; Ghafghazi et Azhari (2012) ; Andrianatrehina et al., (2016, 2017).

D'autre part, la plupart des critères granulométriques tient en compte seulement quelques points de la courbe granulométrique. Les dimensions caractéristiques des particules grossières caractérisent les dimensions des pores et les dimensions caractéristiques des particules fines représentent les particules érodables. Or, l'évaluation de la stabilité interne des sols doit tenir en compte l'allure complète de la courbe granulométrique des matériaux.

Il est évident que l'écoulement de fluides et le transfert de masse dans un milieu poreux sont liés à la géométrie de l'espace poral et en particulier aux dimensions des constriction. Pour cela, certains auteurs utilisent la comparaison directe entre la taille des particules fines et celle des constriction du milieu granulaire pour évaluer la stabilité interne du sol. Par rapport aux critères basés sur l'analyse de la granulométrie des matériaux, les critères basés sur l'analyse de la distribution de la taille des constriction donnent une meilleure modélisation physique de la suffusion. Parmi les avantages de cette approche, tous les diamètres des grains constituant la courbe granulométrique sont pris en considération dans la détermination de la courbe représentant la distribution de la taille des constriction avec la possibilité de prendre en compte la densité relative du matériau (Locke et al., 2001 ; Indraratna et al., 2007, 2011 ; Vincens et al., 2015 ; Taylor et al., 2016).

Kenney et Lau (1984) sont les premiers à déterminer un diamètre de contrôle de la taille des constriction, et qui est lié à la partie fine pour la vérification de la stabilité interne des filtres granulaires. Ce diamètre de contrôle a été pris égal à D_{C35} dans les autres critères.

Plusieurs études ont été menées pour évaluer l'efficacité des critères géométriques proposés pour l'estimation du potentiel d'instabilité interne des sols. Selon Indraratna et al. (2006) ; Wan et Fell (2008) ; Chen et al. (2016) ; la plupart de ces méthodes sont conservatives parce qu'elles classifient des sols stables comme instables. Récemment, Benamar et al. (2019) ont indiqué que les critères les plus utilisés dans l'ingénierie des barrages et dans la conception des digues surestiment la susceptibilité des sols à la suffusion. Ces auteurs préconisent la nécessité d'effectuer des essais expérimentaux pour évaluer la

résistance effective des sols à l'érosion. Les limites des critères existants proviennent essentiellement du fait qu'ils ne prennent pas en compte l'influence de paramètres importants sur les processus d'érosion tels que, la porosité, la minéralogie des matériaux, la sollicitation hydraulique, l'état de contrainte,...etc. Par ailleurs l'érosion peut être la résultante de plusieurs phénomènes qu'il convient d'identifier puis de caractériser.

II.3.3. Les critères hydrauliques:

Les critères géométriques présentés dans la section précédente permettent d'évaluer la stabilité interne des sols vis-à-vis de la suffusion. Or, la sollicitation d'un sol 'instable' par une faible force d'écoulement ne conduit pas forcément au déclenchement de l'érosion en raison des forces de contact qui existent entre les particules et qui empêchent leur mouvement.

En effet, le mouvement des particules est initié par l'application d'un gradient hydraulique relativement élevé (Kovac, 1981). Par conséquent, la suffusion ne se produit pas dans les ouvrages construits par des matériaux classés potentiellement instables si la sollicitation hydraulique reste faible.

Cela montre que la classification de l'érodabilité des sols dépend aussi des conditions hydrauliques auxquelles ils sont soumis. Les critères hydrauliques s'intéressent à l'évaluation de la valeur limite de la sollicitation hydraulique qui déclenche l'érosion.

✓ Critère de Terzaghi (1939) :

En considérant un volume de sable soumis à un écoulement vertical ascendant, Terzaghi (1939) a proposé une théorie pour la détermination d'un gradient hydraulique à partir duquel la migration des particules s'initie. Cette théorie est basée sur la comparaison de la force verticale ascendante exercée par l'écoulement d'eau et la force verticale descendante due au poids des particules du sol. Si la force d'écoulement dépasse la force de la pesanteur, les particules sont soulevées par l'eau, la contrainte effective s'annule et le sol se comporte comme un liquide. Le gradient hydraulique correspondant à cet état est nommé gradient critique de Terzaghi et il est donné par l'expression suivante :

$$i_{cr} = (1 - n) \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \quad (2.13)$$

Où n est la porosité du sol, γ_s est le poids volumique des grains solides, γ_w est le poids volumique de l'eau.

✓ **Critère de Adel et al. (1988) :**

Adel et al. (1988) ont mené des essais d'érosion sur trois types de 'minestones' (déchets provenant de l'exploitation des mines) qui sont très utilisés pour la protection des talus et des digues aux pays bas. Les échantillons ont été soumis à un écoulement horizontal avec une charge hydraulique maintenue constante au début de l'essai, puis augmentée graduellement par paliers toutes les 30 minutes. Les auteurs mesurent le gradient hydraulique critique pour chaque palier, celui-ci correspond au gradient hydraulique correspondant à un taux d'érosion égal à $1 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{sec}$. La susceptibilité des matériaux à l'érosion a été évaluée par l'utilisation de la méthode de Kenney et Lau (1985) où une relation linéaire entre le gradient critique i_{cr} et l'indice de stabilité $(H/F)_{min}$ a été établie comme illustrer dans la figure (2.28).

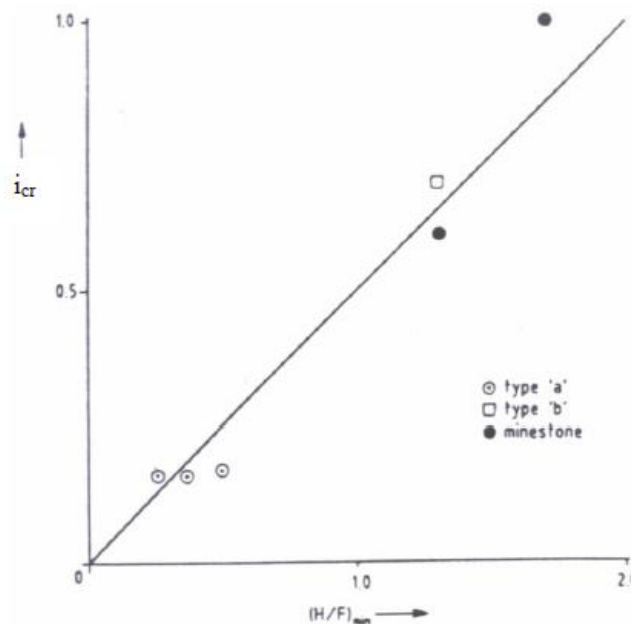


Figure 2.28. Détermination du gradient hydraulique critique (Adel et al., 1988)

La figure (2.28) indique que la valeur du gradient hydraulique critique augmente avec l'augmentation de l'indice de stabilité $(H/F)_{min}$.

✓ Critère de Skempton et Brogan (1994) :

Skempton et Brogan (1994) ont réalisé des essais d'érosion sur des matériaux constitués de mélanges de sable et de gravier avec différentes distributions granulométriques. Les échantillons ont été soumis à un écoulement unidirectionnel vertical ascendant avec une intensité qui est augmentée graduellement jusqu'à la rupture. A l'issue de ces essais, les auteurs ont constaté que les gradients hydrauliques critiques pour les matériaux instables sont de l'ordre de 1/3 à 1/5 du gradient critique de Terzaghi. Ceci a été expliqué par le fait que la majeure partie de la contrainte effective est reprise par la structure primaire du sol constituée par les particules grossière, les particules fines reprennent très peu de charges et donc elles seront facilement détachées et transportées par l'écoulement d'eau si la porosité du milieu ne s'oppose pas à leur migration. Sur la base de cette interprétation, Skempton et Brogan (1994) ont proposé une formule pour l'évaluation du gradient critique d'érosion. Ce dernier est donné par la formule suivante :

$$i_{cr} = \alpha \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (2.14)$$

Où α est un facteur de réduction de la contrainte effective, qui est inversement proportionnel à la quantité des particules fines, γ' est le poids volumique déjaugé des particules du sol et γ_w est le poids volumique de l'eau.

Les auteurs ont exprimé par la suite le gradient critique en fonction de l'indice de stabilité suggéré par Kenney et Lau (1985, 1986) (Figure 2.29).

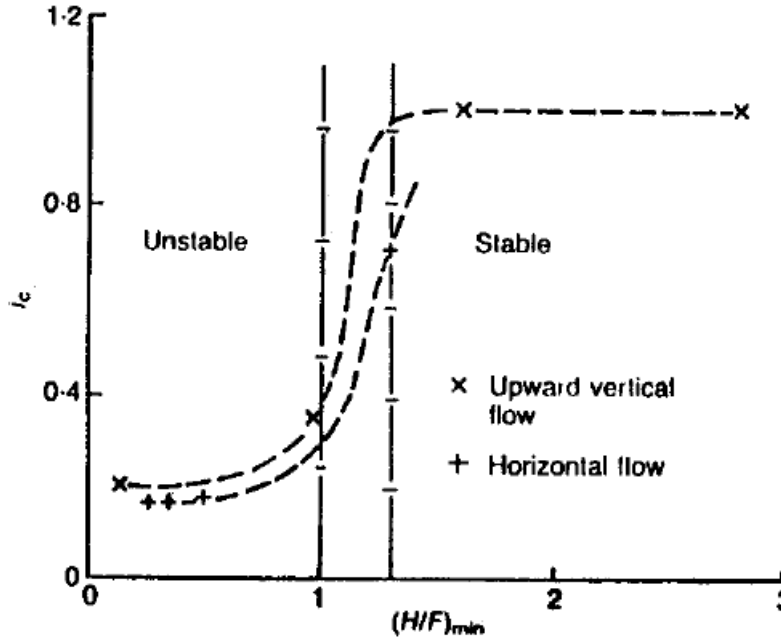


Figure 2.29. Relation entre le gradient hydraulique critique et l'indice de stabilité (Skempton et Brogan, 1994)

Cette figure indique que dans le cas de matériaux géométriquement instables, l'instabilité se produit à des gradients très faibles ($i_{cr} < 0.4$). On peut constater aussi que la relation entre le gradient hydraulique critique et l'indice de stabilité n'est pas linéaire contrairement aux résultats obtenus par Adel et al. (1988).

✓ **Critère de Mao (2005) :**

En plus du critère géométrique proposé par cet auteur pour l'évaluation de la susceptibilité à la suffusion des sols non cohésifs qu'on a cité plus haut, Mao (2005) a étudié les conditions hydrauliques d'initiation de l'érosion. Il a défini le gradient hydraulique critique de rupture des matériaux comme le gradient hydraulique à partir duquel la pente de la courbe vitesse d'écoulement – gradient hydraulique change brutalement. Il a proposé une relation non linéaire qui exprime le gradient critique en fonction du pourcentage des fines et de la porosité comme suit :

$$i_{cr} = \frac{7d_5}{d_f} [4P_f(1-n)]^2 \quad (2.15)$$

Où d_5 représente le diamètre correspondant à 5% de passant en masse, d_f est le diamètre de séparation entre les particules fines et les particules grossières qui est égal à $d_f = 1.3\sqrt{d_{85} \cdot d_{15}}$, P_f est le pourcentage des particules fines et n est la porosité du matériau.

✓ **Critère de Ahlinhan et al. (2012) :**

Ahlinhan et al. (2012) ont réalisé des essais d'érosion sur des échantillons de sol non cohérent. Cinq différents matériaux ont été soumis à des écoulements verticaux et horizontaux. Au cours des essais, le gradient hydraulique est augmenté graduellement par petits paliers pour pouvoir identifier le gradient critique qui déclenche l'érosion.

En premier lieu, et à partir de la combinaison des méthodes de Kezdi (1979) et de Kenney et Lau (1986), ils ont proposé un indice d'instabilité pour l'évaluation de la stabilité géométrique du sol. Les résultats des essais expérimentaux ont montré que pour les sols classés instables par le critère géométrique, la valeur du gradient critique pour les échantillons sollicités par un écoulement vertical égale à environ 0.2 avec une faible influence de la densité relative des matériaux. Le gradient critique pour les échantillons sollicités horizontalement est environ 60 à 90% du gradient vertical. Ils ont constaté aussi que pour les sols classés dans la zone transitoire, le gradient critique d'initiation d'érosion dépend fortement de la densité relative du sol. En se basant sur ces résultats, les auteurs ont proposé une nouvelle approche qui combine le critère géométrique et hydraulique. Dans cette méthode, on peut à la fois évaluer la stabilité interne du sol et déterminer la valeur du gradient critique au-delà duquel l'érosion est initiée.

La figure (2.30) présente un exemple d'application de la méthode de Ahlinhan et al. (2012). Pour le sol testé, l'indice de stabilité suggéré par Kezdi (1979) sera égal à $(d_{15}/d_{85} = 0.20)$ et celui recommandé par Kenney et Lau (1986) $(H/F)_{min} = 0.20$. Le report de ces valeurs dans le graphe H-F indique que ce sol est instable. Pour l'estimation de la valeur du gradient critique, une droite reliant les points représentant les valeurs $(H/F)_{min}$ et (d_{15}/d_{85}) est tracée puis la valeur de i_{cr} est directement déterminée en fonction de la densité relative du sol. Dans cet exemple $i_{cr} = 0.18$ pour une densité relative $D_r = 0.40$. Selon les auteurs la même valeur du gradient a été obtenue expérimentalement.

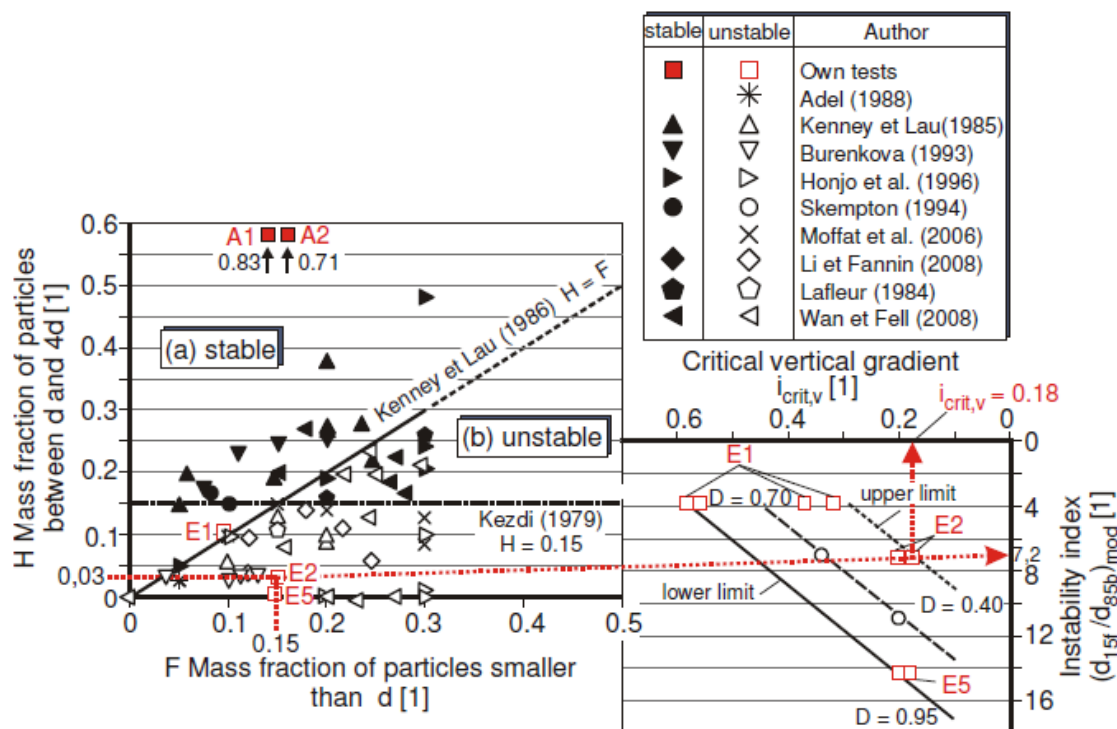


Figure 2.30. Combinaison des critères géométrique et hydraulique pour l'évaluation de la stabilité des sols non cohérents (Ahlinhan et al., 2012)

II.3.4. Sommaire des critères hydrauliques:

En comparaison avec les critères géométriques, le nombre des critères hydrauliques est très limité. Terzaghi (1939) a été le premier à déterminer un seuil du gradient hydraulique au-delà duquel les particules dans un massif de sol sont mises en mouvement sous l'effet d'écoulement. Cette approche, quoi qu'elle puisse donner une estimation du gradient hydraulique de perte de portance du sol, elle s'avère peu complète dans l'étude de l'érosion car elle a été établie théoriquement en se basant sur l'équilibre des forces sur une seule particule et ne prend pas en compte les interactions que peuvent avoir entre les différentes particules. Plusieurs auteurs ont indiqué que l'initiation de la suffusion peut se développer à des valeurs de gradient hydraulique bien inférieures au gradient de Terzaghi (Skempton et Brogan, 1994 ; Wan et Fell, 2004 ; Ke et Takahashi, 2012 ; Ahlinhan et al., 2012 ; Ke et Takahashi, 2014a).

Certains chercheurs ont essayé de déterminer les conditions hydrauliques critiques marquant la frontière entre un matériau stable et instable. Adel et al. (1988) ont déterminé le gradient critique d'initiation de l'érosion comme le gradient hydraulique correspondant à un taux d'érosion égal à $1 \text{ g/cm}^2\cdot\text{s}$. Skempton et Brogan (1994) quant à eux, considère que le i_{cr} est le gradient correspondant à l'apparition des particules dans l'effluent à l'aval de l'échantillon. Cela pose la question de la définition du gradient critique, puisque le drainage des particules érodées à l'extérieur du matériau à un gradient donné ne signifie pas que l'érosion a débuté à ce stade. Elle a sans doute commencé avant d'atteindre ce seuil. Mao (2005) a pu déterminer le gradient critique par le suivi du comportement hydraulique du sol. Il correspond au gradient à partir duquel la pente de la courbe exprimant la variation de la vitesse d'écoulement en fonction du gradient appliqué change brutalement.

D'autre part, Adel et al. (1988) et Skempton et Brogan (1994) ont établi une relation entre le gradient critique et l'indice de stabilité $(H/F)_{min}$ défini par Kenney et Lau (1985, 1986). Cependant, Wan et Fell (2004) ont indiqué qu'aucune corrélation ne peut être établie entre le gradient critique d'érosion i_{cr} et le rapport (H/F) . Ahlinhan et al. (2012) ont proposé une méthode pour l'estimation du gradient hydraulique critique en fonction de l'indice de stabilité d_{15}/d_{85} .

En conclusion, les critères hydrauliques proposés dans la littérature sont à discuter parce que, aucun modèle ne donne avec précision un seuil critique de la sollicitation hydraulique au-delà duquel l'érosion sera déclenchée. Ces critères sont applicables uniquement pour les types de matériaux testés et sous les mêmes conditions d'essais. Il faut noter aussi que l'érosion ne peut pas se produire dans un sol géométriquement instable si la sollicitation hydraulique n'est pas suffisante pour provoquer le détachement et le transport des particules. Contrairement, un gradient (ou une vitesse) élevé ne peut pas produire une érosion par suffusion dans un sol géométriquement stable. La stabilité interne des sols dépend donc des conditions géométriques (de la composition de la matrice du sol) et des conditions hydrauliques, si le sol est géométriquement instable. Cela veut dire que l'évaluation exacte de la susceptibilité à la suffusion des sols non cohérents nécessite la combinaison des deux approches (géométrique et hydraulique). Cette combinaison paraît utile parce que dans la pratique on sera obligé d'utiliser des matériaux instables pour des raisons économiques.

II.4. Influence des différents paramètres sur l'initiation et l'évolution de la suffusion:

Plusieurs recherches ont été effectuées pour déterminer l'influence de différents paramètres sur la suffusion. Bendahmane et al. (2008) ont réalisé une étude d'érosion sur des matériaux reconstitués à partir de mélanges de sable et de kaolinite pour déterminer l'influence de la quantité d'argile, du gradient hydraulique et du confinement sur l'érodabilité des sols. Les essais ont été menés à l'aide d'une cellule triaxiale modifiée à parois flexible, qui est dotée d'un capteur optique pour le suivi de la concentration de l'effluent, et un système d'acquisition de données automatisé pour permettre de quantifier les particules érodées en temps réel. Les matériaux ont été sollicités par un écoulement descendant avec un gradient maintenu constant durant l'essai.

Les résultats ont indiqué que l'augmentation du gradient hydraulique appliqué engendre une augmentation du taux d'érosion (Figure 2.31). Inversement, en augmentant la quantité des particules fines, le taux d'érosion diminue significativement et cela pour les différentes valeurs du gradient (Figure 2.32a). Ce qui signifie que la résistance à l'érosion des sols testés augmente avec l'augmentation de la proportion d'argile. Ils ont constaté aussi que l'accroissement de la pression de confinement, et donc de la consolidation des matériaux, induit une diminution du taux d'érosion, et par conséquent, une amélioration de la stabilité du sol vis-à-vis de l'érosion (Figure 2.32b).

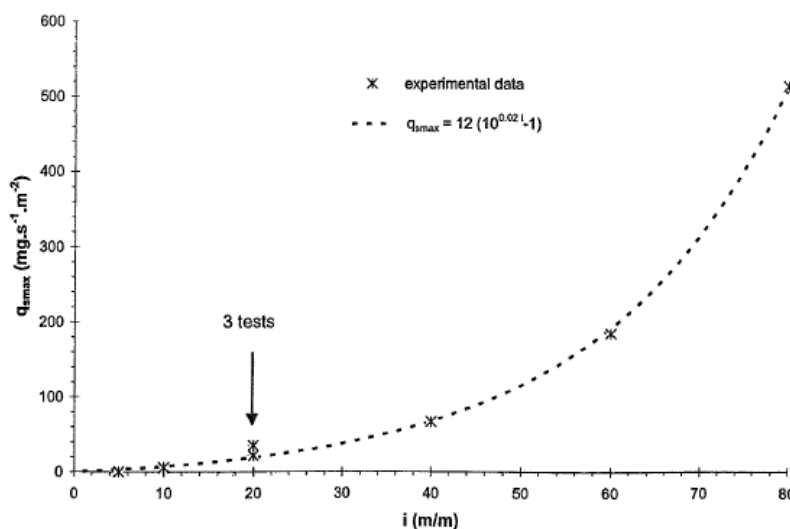


Figure 2.31. Influence du gradient hydraulique sur l'érosion de la kaolinite (Bendahmane et al., 2008)

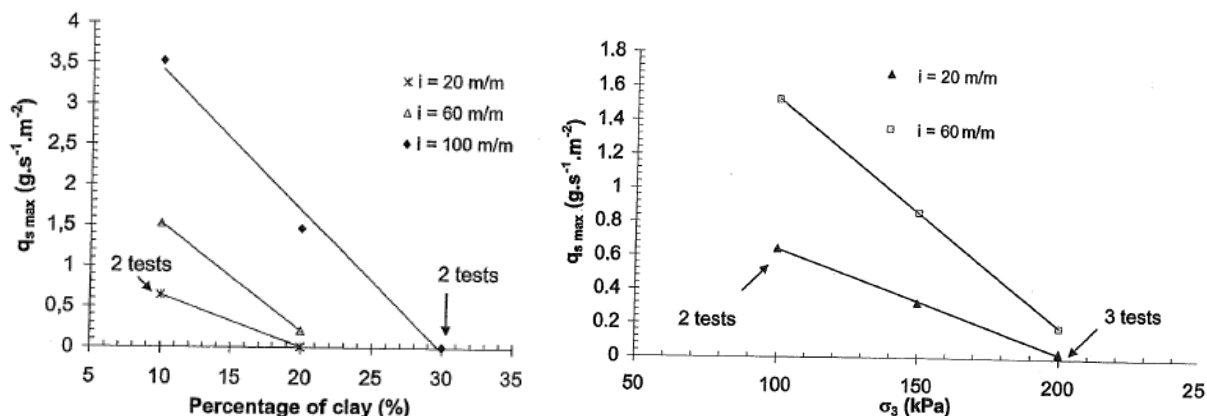


Figure 2.32. (a) Influence du pourcentage de fines ; (b) Influence de la pression de confinement sur l'érodabilité des sols (Bendahmane et al., 2008)

Marot et al. (2012) ont étudié l'influence de l'angularité des grains de la fraction grossière sur la suffusion. Des échantillons composés de sable argileux ont été soumis à un écoulement descendant sous gradient hydraulique constant à l'aide d'un appareil triaxial modifié. Les fractions grossières testées se différencient par leur distribution granulométrique et par l'angularité de leurs grains.

Les résultats de cette étude ont montré que l'angularité des grains peut contribuer à accroître la résistance des sols à l'érosion. Par ailleurs dans le cas des sols testés, la forme des grains a une influence sur la diminution de la conductivité hydraulique. Cela est expliqué par le fait que l'angularité des grains de la fraction grossière a augmenté la possibilité de blocage géométrique des particules argileuses détachées.

Ke et Takahashi (2012) ont étudié l'influence de la quantité des fines et de la densité relative sur l'érodabilité des sols. Ils ont constaté que la valeur du gradient hydraulique critique d'initiation de l'érosion diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines (Figure 2.33). Le déclenchement de l'érosion pour des échantillons contenant de faibles quantités de fines nécessite l'application d'un gradient plus important que celui pour les échantillons avec un pourcentage élevé de fines. Ce gradient, déterminé expérimentalement, égale à environ 1/5 à 1/3 du gradient théorique de Terzaghi. L'influence de la densité relative sur le gradient critique d'érosion est représentée dans la figure (2.34). Pour la même quantité de fines, l'augmentation de la densité relative des matériaux implique l'application d'un gradient hydraulique plus élevé pour que l'érosion soit initiée.

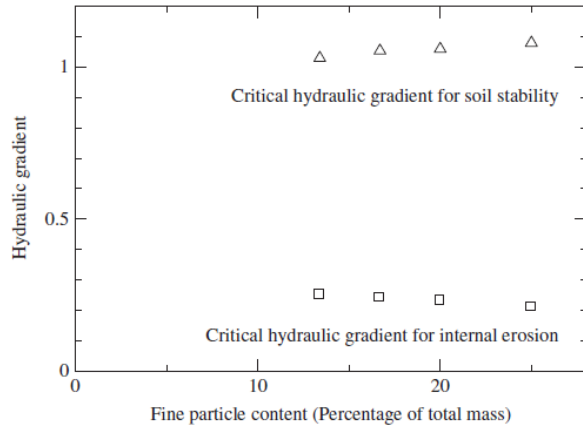


Figure 2.33. Relation entre i_{cr} et la quantité de fines (Ke et Takahashi, 2012)

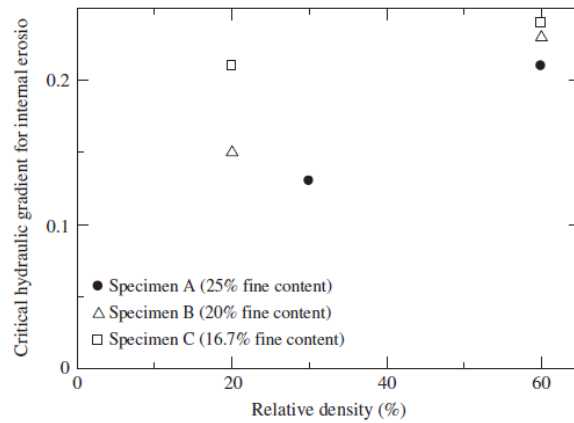


Figure 2.34. Relation entre i_{cr} et la densité relative (Ke et Takahashi, 2012)

Seghir et al. (2014) ont étudié l'influence de la nature des particules fines ainsi que de leur quantité sur l'évolution de la suffusion. Une étude expérimentale a été menée sur des matériaux reconstitués au laboratoire composés de mélanges de sable et de fines (kaolinite, limon et illite) à différents pourcentages. Les résultats ont montré que la nature des particules fines influe sur leur érodabilité. L'évolution du taux d'érosion pour la même quantité initiale de fines (Figure 2.35) indique que le mélange sable-kaolinite présente une résistance au début, suivie par une évolution progressive et continue de l'érosion. Tandis que, le mélange sable-limon tend à s'éroder rapidement au début d'essai pour ensuite atteindre un état stable. Le matériau composé de sable et d'illite est stable vis-à-vis de la suffusion. Concernant l'influence du pourcentage des fines sur l'érosion, les résultats des essais menés sur des échantillons contenant 5, 10 et 20% de fines ont indiqué que l'accroissement de la quantité initiale de fines dans un mélange provoque l'accroissement de sa résistance à l'érosion (Figure 2.36).

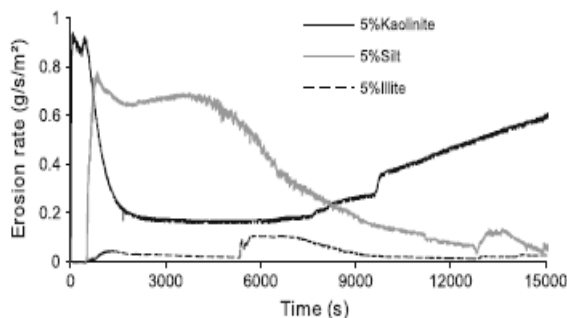


Figure 2.35. Evolution du taux d'érosion pour les matériaux testés (Seghir et al., 2014)

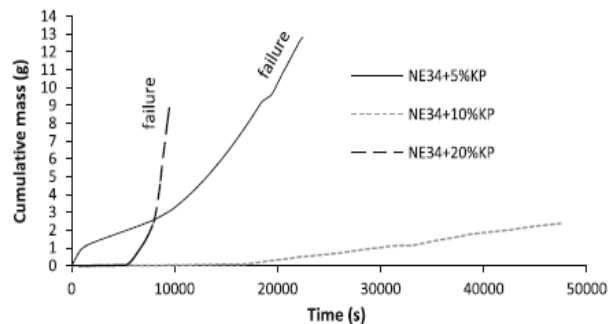


Figure 2.36. Masse cumulée des particules érodées pour différents pourcentages de fines (Seghir et al., 2014)

II.5. Conséquences de la suffusion sur le comportement mécanique des sols:

La migration des particules fines par suffusion provoque une modification de la microstructure initiale du sol, et par conséquent, l'altération de ses caractéristiques physiques et hydrauliques. Ces modifications peuvent entraîner à leur tour des conséquences sur les propriétés mécaniques du sol concerné. Des études récentes ont essayé d'analyser le comportement mécanique des sols érodés. Dans cette partie, nous exposons les principaux résultats présentés dans la littérature.

Chang et Zhang (2011) ainsi que Chang et al. (2012) ont réalisé des essais de compression triaxiale en condition drainée sur des sols érodés. Ils ont remarqué que, après la perte d'une quantité importante de particules fines, le comportement original du sol (contrainte – déformation) de type dilatant – dilatant est devenu un comportement de type contractant – contractant, et la valeur du déviateur de contrainte au pic diminue après érosion (Figure 2.37). Cela peut être expliqué par l'augmentation de la porosité globale du sol après le lessivage des particules fines et par conséquent une diminution de sa résistance mécanique, qui est fortement liée à la porosité du milieu.

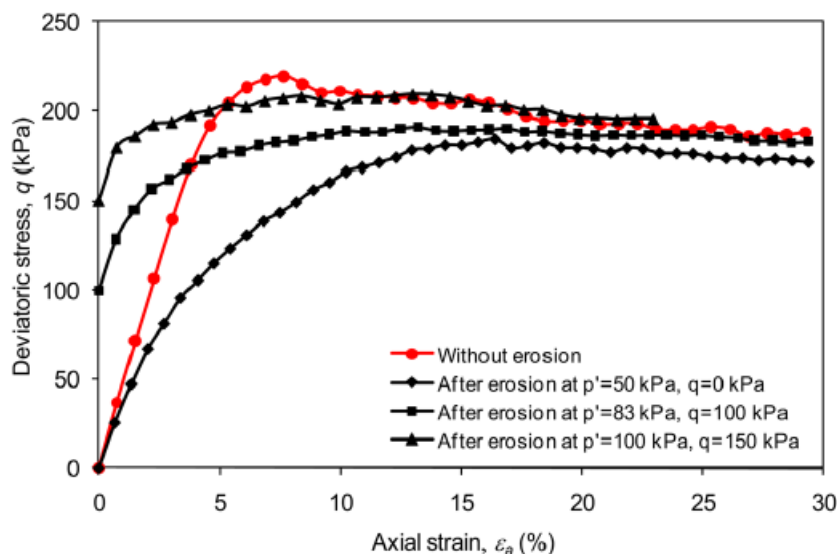


Figure 2.37. Variation du déviateur de contrainte en fonction de la déformation axiale (Chang et Zhang, 2011)

Ke et Takahashi (2012) ont attribué la diminution de la résistance du sol après l'érosion à la perte des particules fines qui supportent une part des charges appliquées au sol. Ils ont proposé une relation non linéaire entre la résistance du sol érodé et le gradient hydraulique appliqué (Figure 2.38). Ils ont constaté que, à une certaine valeur du gradient hydraulique appliqué, la résistance du sol diminue fortement.

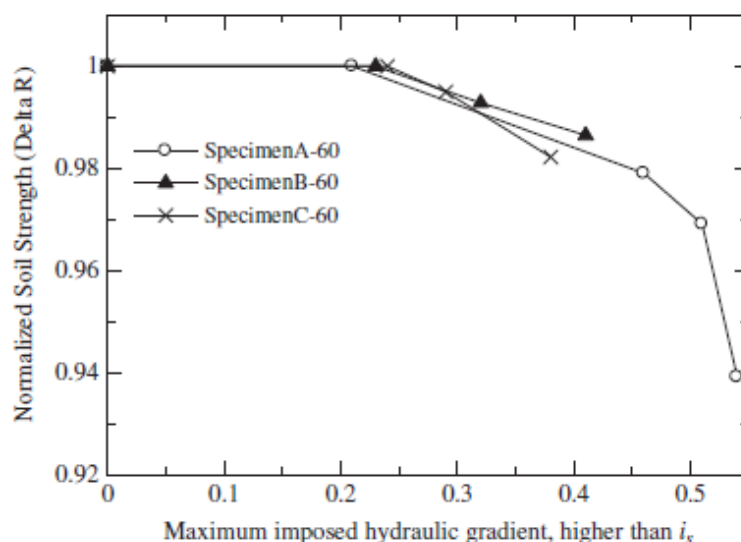


Figure 2.38. Relation entre le gradient hydraulique appliqué et la résistance du sol (Ke et Takahashi, 2012)

D'autres part, et contrairement à ces résultats, d'autres chercheurs ont constaté un comportement mécanique différent des sols érodés. Ke et Takahashi (2014a) en conduisant une série d'essais de compression triaxiale en condition non drainée sur des sols érodés, ont constaté que le déviateur de contrainte en faible et moyenne déformations est plus important pour les échantillons érodés que celui pour les échantillons non érodés.

Ke et Takahashi (2014b) et Xiao et Shwiyhat (2012) ont constaté que la résistance du sol augmente après l'érosion comme indiqué dans la figure (2.39). Ce constat a été confirmé par Nguyen et al. (2019). Selon Ke et Takahashi (2014b), ce comportement est dû à un fort réarrangement des grains au-delà d'un certain niveau de déformation. Après érosion, l'échantillon devient hétérogène, les particules fines se concentrent dans des endroits précis du milieu, leur accumulation provoque un renforcement du squelette du sol dans ces zones. Par conséquent, le déviateur de contrainte au pic des échantillons érodés devient plus grand.

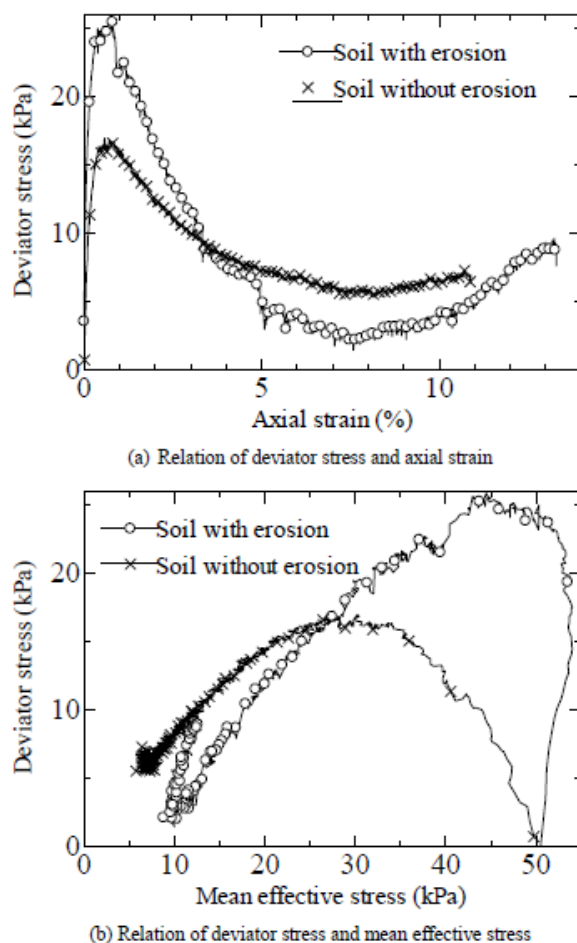


Figure 2.39. Résultats des essais de compression triaxiale sur des échantillons érodés et des échantillons non érodés (Ke et Takahashi, 2014b)

Pour mieux appréhender le comportement des sols érodés, un examen de la nouvelle microstructure du sol après érosion peut se révéler nécessaire. Ainsi, une observation microscopique pourrait mieux expliquer le comportement mécanique du sol après érosion car l'interprétation des résultats expérimentaux basés sur les théories classiques de la mécanique des sols sont difficilement applicables pour les matériaux hétérogènes.

II.6. Conclusion:

La suffusion, caractérisée par la migration des particules fines à travers les constriction formées par les grosses particules sous l'effet des forces d'écoulement, est considérée comme un mécanisme d'instabilité des milieux granulaires. Une fois déclenché, ce phénomène provoque une modification de la microstructure du sol, et par conséquent, des changements de ses caractéristiques hydrauliques. Si la sensibilité des matériaux à

l'écoulement n'est pas prise en compte dans la conception de l'ouvrage, où si l'initiation de l'érosion n'est pas détectée à temps dans un ouvrage en service, l'évolution du phénomène peut conduire à la destruction totale de ce dernier.

L'érodabilité d'un sol dépend fortement de sa granulométrie ainsi que des conditions hydrauliques. Sur la base de ces critères, deux approches sont proposées pour évaluer la susceptibilité des matériaux à la suffusion. L'approche géométrique, qui étudie la stabilité interne du sol par la vérification de la capacité de sa structure primaire à empêcher, voir à stopper, la mobilité des particules fines. L'approche hydraulique, qui s'intéresse à la détermination de la valeur critique de la sollicitation hydraulique au-delà de laquelle la suffusion est initiée.

Concernant l'approche géométrique, quelques critères sont basés sur l'analyse de la granulométrie où des points spécifiques de la courbe granulométrique du sol sont utilisés pour vérifier sa capacité de rétention. Selon plusieurs auteurs, la plupart de ces modèles sont conservatifs, leur application doit se faire avec beaucoup de prudence. D'autres critères géométriques sont basés sur la comparaison directe de la taille des particules érodables avec celle des constriction pour vérifier la possibilité de leur migration. Par rapport aux critères granulométriques, cette méthode donne une meilleure modélisation physique de la suffusion. Néanmoins, les critères existants méritent d'être améliorés car ils ne prennent pas en considération l'influence de paramètres importants sur les processus d'érosion.

Par rapport aux critères géométriques, le nombre de critères hydrauliques proposés dans la littérature est très limité. Parmi les modèles existants, aucun modèle ne fixe, avec précision, le seuil critique de la sollicitation hydraulique au-delà duquel l'érosion sera déclenchée. Ces critères sont applicables uniquement pour les types de matériaux testés et sous les mêmes conditions d'essais. D'autre part, dans la pratique et pour des considérations économiques, il sera judicieux d'utiliser des matériaux instables si on n'est pas confronté à une sollicitation hydraulique élevée. Pour cela l'estimation du potentiel d'instabilité du sol par la combinaison des deux approches (géométrique et hydraulique) est nécessaire pour l'évaluation du risque d'érosion.

Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de différents paramètres sur l'initiation et l'évolution de la suffusion, tels que la quantité des fines et leurs natures, l'état de compacité du

sol, l'intensité de la charge hydraulique, la forme des grains, ...etc. Une synthèse de ces études nous a montré la variabilité des résultats obtenus. Les processus d'érosion sont très complexes et ils dépendent de plusieurs paramètres liés au sol, à l'écoulement et aux interactions eau-sol.

Les changements apportés à la microstructure initiale du sol par la migration des particules fines entraînent des modifications sur son comportement mécanique. Des études récentes ont été menées pour déterminer l'influence de l'érosion sur les caractéristiques mécaniques des sols érodés. Les résultats de ces études sont variables et parfois contradictoires. Cela témoigne encore de la complexité du phénomène. La prédiction du comportement mécanique des sols érodés par suffusion reste encore un champ ouvert pour de futures recherches.

A l'issue de cette synthèse bibliographique, composée de ces deux premiers chapitres, nous avons exposé les éléments nécessaires pour la compréhension du phénomène d'érosion et notamment l'instabilité des milieux granulaire par la suffusion. Cet état de l'état nous a permis d'identifier les apports et les limites des recherches dans ce domaine. Dans la deuxième partie de cette thèse, on s'intéresse à l'évaluation de la susceptibilité des sols non cohérents à l'érosion, qui présente le principal objectif de cette recherche. Une étude expérimentale est menée sur des échantillons de sols provenant de la région de Kharouba (Mostaganem) et sur des sables siliceux commercialisés par l'entreprise 'Adwan Chimicals'. L'évaluation de la vulnérabilité des sols testés à l'érosion va nous permette de retenir les principaux facteurs contribuant à l'évolution du risque. Les résultats de cette étude paramétrique seront exploités pour proposer une approche pour l'évaluation des sols non cohérents à l'érosion.

Partie II

« Etude expérimentale »

Chapitre III

***« Caractérisation et évaluation de la
vulnérabilité du site étudié à l'érosion »***

Chapitre III : Caractérisation et évaluation de la vulnérabilité du site étudié à l'érosion

III.1. Introduction :

Proposée au début des années 90 par l'Agence Nationale d'Aménagement du Territoire (ANAT) pour l'extension de la ville de Mostaganem vers le nord-est, la zone de Kharouba est devenue aujourd'hui un axe important de développement de la ville. Deux grandes zones urbaines traversées par la route nationale N°11 ont été construites parallèlement au cordon littoral. L'une en direction d'un massif forestier, abrite plusieurs équipements de différentes catégories (école de protection civile, universités et cités universitaires, CHU, ...) et un programme important de logements (600 logements LSP, des logements promotionnels, ...). L'autre, du côté de la plage de Sidi Medjdoub, des habitats individuels sont construits aux abords d'un espace réservé comme une zone d'expansion touristique.

Malgré que cette zone soit située dans une plaine basse vers laquelle convergent tous les cours d'eau provenant de son bassin versant, Kharouba faisait partie intégrante d'un milieu naturel en situation d'équilibre. Son urbanisation sur un sol dunaire et l'extension orientée vers un écosystème très fragile ont entraîné la rupture de cette situation d'équilibre. Cela a provoqué durant la dernière décennie plusieurs crues et inondations causant de graves dommages.

L'évènement pluvial le plus marquant est celui de du 21 novembre 2011 où une pluie de 52mm (au-dessus de la moyenne) a été à l'origine de gros dégâts. La constatation des désordres et l'analyse des données environnementales ont mis en évidence que la cause principale de ces sinistres est liée au phénomène d'érosion.

Ce chapitre présente une étude de la vulnérabilité à l'érosion de la zone de Kharouba. Nous allons traiter les principaux éléments expliquant cette vulnérabilité naturelle et son

aggravation par les activités humaines. Quelques cas d'incidents enregistrés dans ce site seront exposés pour mettre en évidence l'importance du problème.

III.2. Présentation de la zone d'étude :

III.2.1. Situation géométrique et données altimétriques :

L'agglomération de Kharouba est située au nord-est de la ville de Mostaganem (nord-ouest de l'Algérie). Elle est délimitée à l'est par la ligne de crête 'Djebel Ediss', 'El-Hchem' et les dunes fossiles d'El-Arssa jusqu'à 'Diar El-Hanaa' et au nord par la mer méditerranée (Figure 3.1).

Les données altimétriques de Kharouba varient de 95m à 86m, c'est la ligne des points hauts constituant le piedmont de la zone basse du bassin versant. De 19m à 23m, c'est la ligne des points bas constituée par le tracé de la route de Sidi Medjdoub. Les points culminants du bassin versant surmontant Kharouba sont de 150m à 300m d'altitude. Cette altimétrie affiche une topographie très accidentée avec des déclivités pouvant dépassées les 70m par endroits.

Kharouba est par excellence la zone de convergence naturelle de tout le ruissellement provenant de ce vaste périmètre naturel. Avec une forte pente et des distances importantes d'écoulement, les eaux de ruissellement vont augmenter en vitesse et en masse donnant lieu à des risques accrus d'érosion.

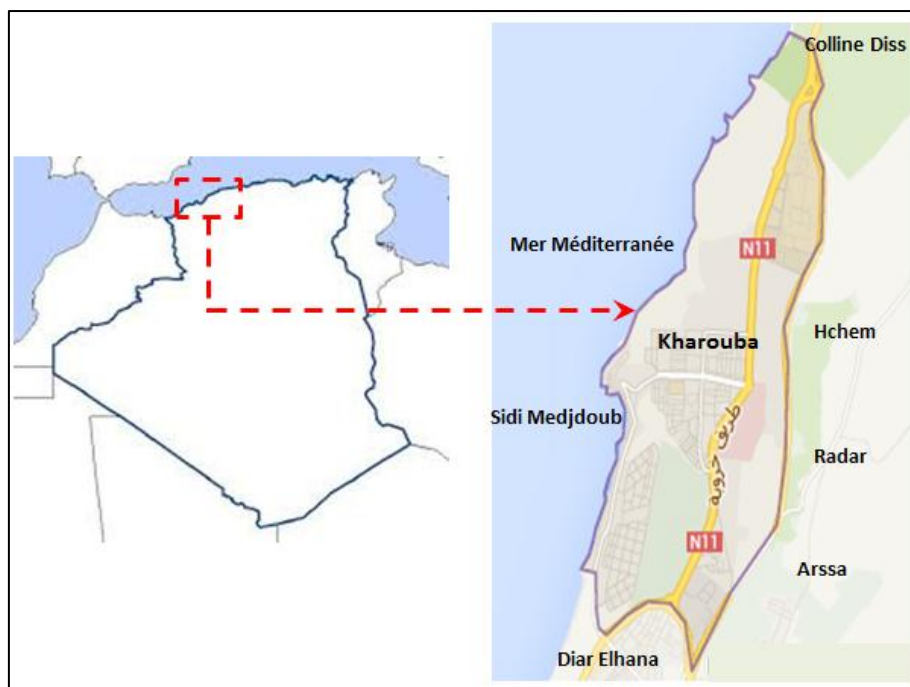


Figure 3.1. Localisation de la zone d'étude

III.2.2. Géologie du site :

Kharouba est une partie du plateau de Mostaganem qui est formé par des rides anticlinales pliocènes et poste pliocènes recouvertes soit par des lumachelles calabriennes ou des dunes (Figure 3.2) (Boulaine, 1955 ; Saibi, 2008).

L'étude de la structure géologique du plateau de Mostaganem a montré l'existence d'une structure liée à la morphologie du substratum qui constitue une sorte de cuvette relevée sur les bordures. Cette cuvette comporte plusieurs dépressions (Saibi, 2008). Cette configuration favorise les écoulements en nappe (Boulaine, 1955).

Le sol de Kharouba est formé par une superposition de dunes. Cette formation est le résultat de régression et transgression de la mer méditerranée. Il est évident que les formations dunaires sont très sensibles à l'eau, notamment si elles sont dans un état de déséquilibre naturel.

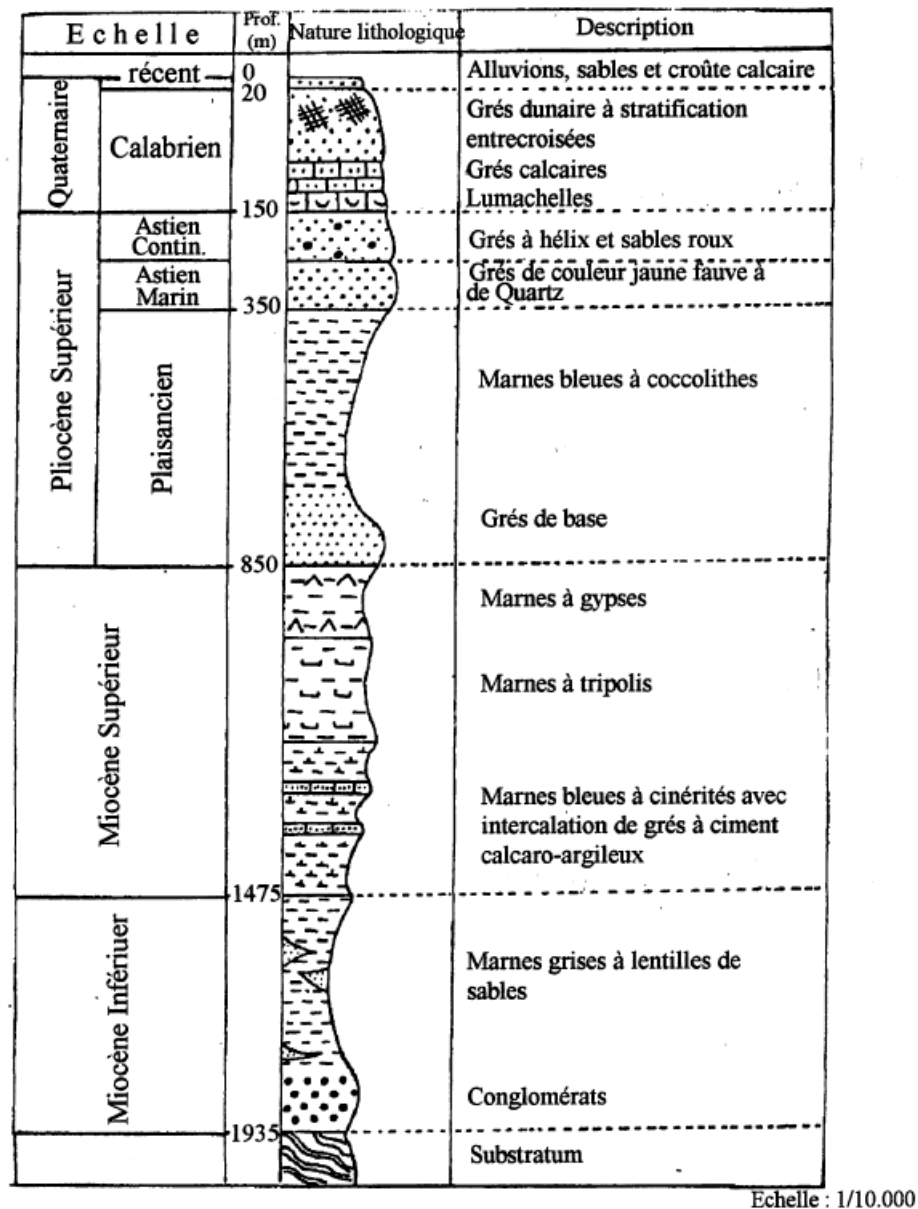


Figure 3.2. Stratigraphie du plateau de Mostaganem (source Agence Nationale des Ressources Hydrauliques A.N.RH. cité par Saibi, 2008)

III.2.3. Le climat :

Le climat de Mostaganem est un climat semi-aride. C'est traits climatiques les plus marquants sont un été sec et chaud et un hiver doux et humide avec des influences marines marquées en toutes périodes (Saibi, 2008). Les calculs des précipitations dans la région, basés sur des mesures des stations pluviométriques pour la période 1989 – 2008 (Figure 3.3) ont

indiqué un module pluviométrique moyen égal à 395mm/an. Les mois les plus pluvieux sont novembre (71.43mm) et décembre (56.73mm). La température moyenne mesurée est 17.78C°. A partir des données fournies par l'ONM (Office Nationale de Météorologie), nous constatons une variabilité de la pluviométrie d'une année à l'autre avec des pluies concentrées en un nombre limité de jours sur quelques heures ou minutes. Ces averses, parfois de caractère torrentiel, sont à l'origine de l'apparition de quelques crues et inondations dans cette zone.

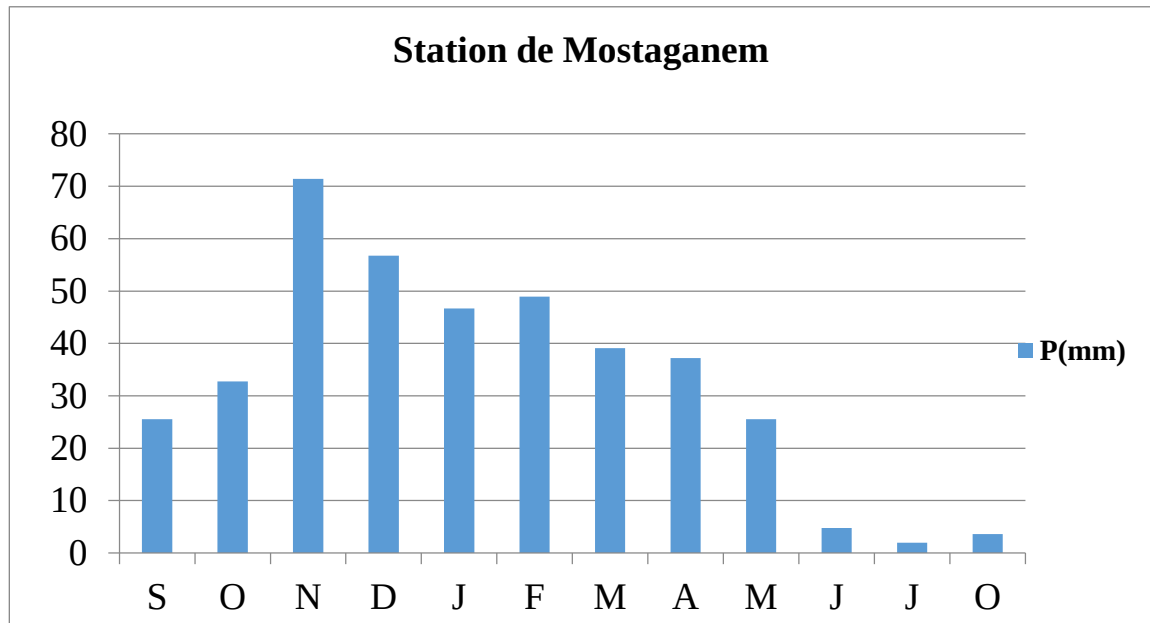


Figure 3.3. Répartition mensuelle des précipitations de la station de Mostaganem (1989-2008) (source O.N.M)

III.3. Facteurs à l'origine des désordres :

Les sinistres apparus dans la zone de Kharouba durant les dernières années sont dus à la conjugaison de plusieurs facteurs, dont notamment, à la vulnérabilité des sols de Kharouba à l'érosion, que ce soit interne ou externe, à la topographie du site et au climat. A ces facteurs, déclencheurs de l'érosion, s'ajoutent les pratiques humaines qui ont aggravé les vulnérabilités.

III.3.1. La susceptibilité des sols à l'érosion :

La susceptibilité à l'érosion est une estimation de la capacité de chaque sol à résister à l'érosion. Basée sur les caractéristiques physiques du sol, elle caractérise sa vulnérabilité à l'érosion. L'érodabilité d'un sol dépend de plusieurs paramètres, tels que, la granulométrie du sol, sa plasticité, le pourcentage de la fraction argileuse,...etc. (Briaud, 2008 ; Pham, 2008).

Les sols limoneux ou limono-sableux sont très sensibles à l'érosion. Tandis que, les sols à texture grossière ou très fines sont plus stables (Daoud, 2013).

Les formations superficielles dominatrices du sol de Kharouba sont des formations sableuses ou sablo-limoneuses avec un certain pourcentage de fines. Cela les confère une forte susceptibilité à l'érosion. Cette tendance sera confirmée dans l'étude expérimentale.

III.3.2. La topographie :

La topographie modifie les conditions d'écoulement des courants d'eau. Plus la pente d'un champ est raide et plus cette pente est longue, les risques d'érosion sont grands. Le débit de l'eau est plus rapide, le transport des sédiments augmente, ce qui donne lieu à des risques accrus d'érosion et d'affouillement (Boukheir et al. 2001 ; Daoud, 2013).

Avec une topographie très accentuée, Kharouba constitue l'exutoire naturel d'un réseau hydrographique peu hiérarchisé à l'écoulement épisodique. C'est une zone à grand risque pluviale. Ce risque est d'autant plus grave que les eaux et les sédiments convergent vers les zones urbanisées.

III.3.3. Le climat :

Des études récentes sur les changements climatiques dans la région méditerranéenne, dont Mostaganem fait partie, indique un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (Boukheir et al. 2001). Dans ces zones, aux périodes de sécheresse peuvent succéder des événements pluviales exceptionnels voir des catastrophes climatiques (Daoud, 2013).

Kharouba fait partie du plateau de Mostaganem qui est classé dans les zones à climat semi-aride. La pluviométrie est concentrée en un nombre limité de jours, ce qui a provoqué des crues et des inondations qui sont à l'origine des processus de l'érosion hydrique.

III.3.4. La végétation :

L'érosion des sols est fortement contrôlée par le couvert végétal (Boukheir et al. 2001 ; Le Bissonnais, 2004). Les risques d'érosion sont plus graves si le sol n'est pas protégé. Le couvert végétal participe à la réduction des vitesses d'écoulement des eaux et favorise leur infiltration dans le sol. Cela contribue à la réduction du pouvoir érosif des eaux de ruissellement.

Kharouba était protégée par une formation végétale riche et variée. Les vignes et les formations forestières naturelles dominées par le 'rétama rétame' ont maintenu le milieu en équilibre. Ce couvert a été gravement endommagé par les activités humaines. La déforestation, le surpâturage et le raclage de la végétation ont mis à nu les formations sableuses sillonnées par des couloirs d'érosion.

Parmi les pratiques humaines qui ont contribué au déséquilibre du milieu naturel, les carrières d'exploitation des sables. En contradiction avec les lois de protection de l'environnement, plusieurs carrières illicites ont été ouvertes dans cette zone, ce qui a contribué d'avantage à la rupture de l'équilibre du milieu.

III.3.5. L'urbanisation :

L'urbanisation imperméabilise les espaces, elle stocke le ruissellement et favorise son cheminement. Cela peut accroître les risques d'érosion, notamment, si les aménagements ne respectent pas les circuits naturels des eaux de ruissellement et la sensibilité aux inondations des zones urbanisées (Boukheir et al. 2001 ; Daoud, 2013).

Durant les dernières années, l'agglomération de Kharouba a connu une forte croissance urbaine. Cette extension se poursuit même vers des zones de plus en plus basses (vers la mer). L'imperméabilisation des espaces urbanisés a augmenté le coefficient de ruissellement provoque désormais des ruissellements plus importants et très violents. De grandes masses d'eau et de matières solides ont été acheminées vers des oueds et talwegs dormants qui ont retrouvé leurs lits. Des constructions construites aux abords de ces oueds sont aujourd'hui en menace de ruine. La quantité importante de matières solides transportées a provoqué l'inondation par des coulées boueuses des routes et des voiries, la circulation a été bloquée dans plusieurs endroits après chaque événement pluvial. Par conséquent, l'urbanisation anarchique du site de Kharouba a aggravé la vulnérabilité de cette zone à l'érosion.

III.4. Conséquences et désordres liés à l'érosion :

Les premiers signes de l'évolution de la vulnérabilité de la zone de Kharouba à l'érosion ont commencé à apparaître vers la fin de l'année 2006, où suite à une pluie torrentielle, une quantité importante de sable et de coulée boueuse apportés par le ruissellement a envahi les routes et les voiries. Des anciens oueds dormants ont retrouvé leurs anciens lits mettant les ouvrages construits aux abords en danger (Figure 3.4). De nouveau ravin en vu le jour mettant en cause la stabilité des constructions (Figure 3.5).



Figure 3.4. Réveil d'un oued dormant



Figure 3.5. Naissance de nouveaux ravins

Ces dégâts ont eu lieu au moment d'une très forte croissance urbaine sur des terrains non viabilisés amplifiant d'avantage les processus d'érosion et fragilisant le milieu dans son ensemble. Les services concernés ont réagi par la planification de nouveaux aménagements dans ce site avec la réalisation de différents ouvrages afin de réduire les risques d'inondation. Ces aménagements, lourds et coûteux, ne parvient pas à résoudre systématiquement les problèmes. Les dégâts ne cessent de se reproduire après chaque événement pluvial, à l'image de l'ouverture d'un ancien oued dormant (Figure 3.6). Cet oued a été utilisé pour l'enfouissement de deux grandes conduites d'eau (800 et 1100 mm) provenant du barrage de Gargar et alimentant les deux villes Mostaganem et Oran, ainsi que des canalisations des eaux usées et des eaux de ruissellement. L'ouverture de l'oued a provoqué la destruction totale de ces canalisations. La figure (3.7) montre l'ouverture d'une grande fosse (plus de 4 m de largeur et 100m de linéaire) provoquant l'effondrement de la route construite aux abords.



Figure 3.6. Ouverture et élargissement d'un oued dormant



Figure 3.7. Ouverture d'une fosse et destruction des différents réseaux

D'autres incidents ont été enregistrés, des réseaux d'assainissement ont été totalement détruits (Figure 3.8), la destruction des ouvrages de soutènement (Figure 3.9), effondrement de talus aux pieds des bâtiments (Figure 3.10), ou encore le déchaussement des fondations de bâtiments récemment livrés et qui se sont trouvés en menace de ruine (Figure 3.11).



Figure 3.8. Destruction des réseaux d'assainissement



Figure 3.9. Destruction des ouvrages de soutènement



Figure 3.10. Effondrement de talus au pied de bâtiment



Figure 3.11. Déchaussement des fondations de bâtiments

Le cas présenté dans les figures (3.12) et (3.13) montre clairement l'évolution des processus de l'érosion, où nous constatons dans la figure (3.12) le début de la formation d'une brèche à l'aval d'un talus naturel, l'élargissement de ce canal sous l'effet de l'écoulement se termine par l'effondrement spectaculaire du talus et la formation d'un ravin de plus de 6m de profondeur (Figure 3.13).



Figure 3.12. Début de formation d'une brèche



Figure 3.13. Effondrement totale du talus

Les constats et les diagnostics des différents désordres nous ont permis de conclure que les écoulements des eaux de pluie sur les crêtes du bassin versant de Kharouba ont tendance à se concentrer dans les points du bas profil (Figure 3.14). En raison de l'imperméabilisation des espaces urbanisés, notamment pour ceux dépourvus de réseaux de drainage des eaux de pluie, la vitesse du ruissellement augmente. Cela a accentué d'avantage le détachement et le transport des particules du sol. Les eaux de percolation interceptées au bas du site sont chargées en matière solide témoignant de la contribution accrue des processus d'érosion dans la dégradation des sols. Cette dynamique érosive a été marquée par la renaissance, l'approfondissement et l'élargissement des lits des oueds et talwegs dormants. Les habitations implantées à proximité de ces lits sont placées dans une situation de danger potentiel.

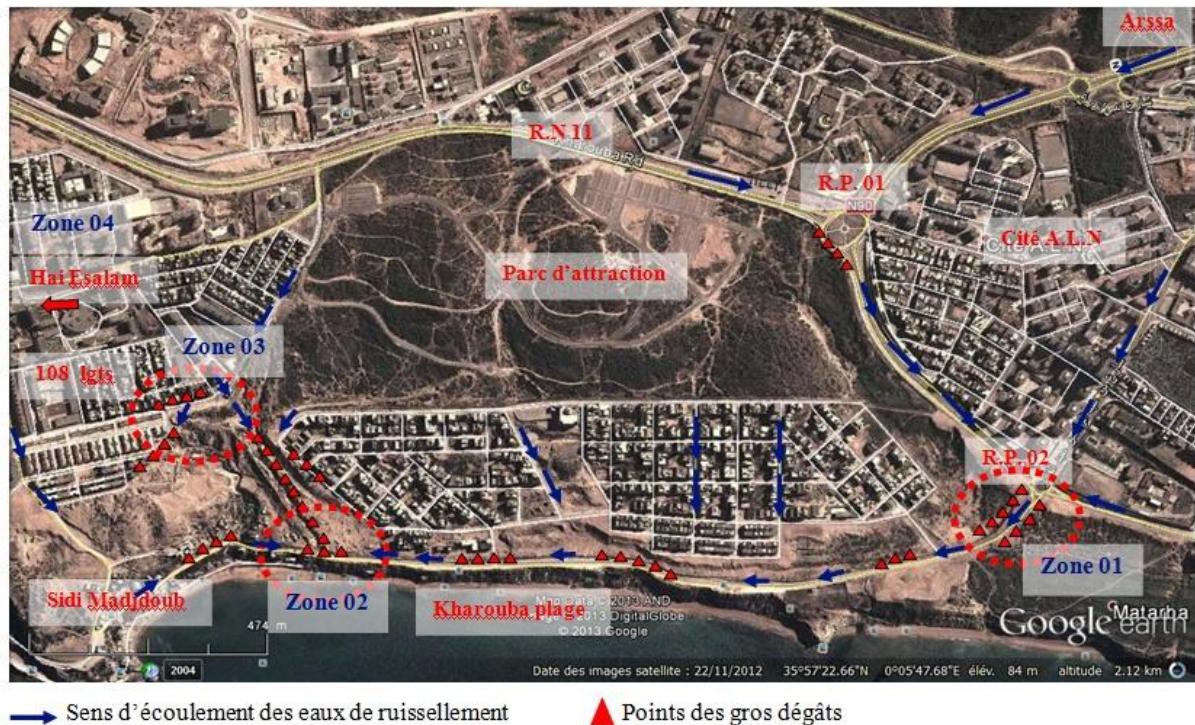


Figure 3.14. Localisation des zones de gros dégâts

Les dégâts apparurent au niveau des différents ouvrages, tels que les routes et les bâtiments, sont dus essentiellement à la sensibilité au phénomène d'érosion interne des zones de contact entre les ouvrages rigides et le sol. Cette interface (ouvrage – sol) constitue en effet à la fois une zone d'écoulement privilégiée et une zone de sensibilité du matériau lui-même. Le sol granulaire au contact d'une paroi rigide constitue une zone de faible compacité, donc de grande perméabilité que la masse du matériau favorisant le développement du phénomène de suffusion. Il en résulte une concentration des écoulements et une augmentation de la vitesse de percolation. Ces deux phénomènes, forte perméabilité et faible compacité, se conjuguent pour expliquer la sensibilité des interfaces à l'érosion. L'ouvrage est d'autant plus vulnérable qu'il est fondé sur un matériau meuble est érodable.

Il faut noter que la détermination des phénomènes d'érosion interne, surtout sous les fondations d'un ouvrage rigide, est très délicate. Il sera difficile de détecter les écoulements et les entrainements de matières dans la phase d'initiation du processus. Les désordres deviennent apparents que lorsque le phénomène est largement développé.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a mis en évidence la vulnérabilité de l'agglomération de Kharouba, située au nord-est de la wilaya de Mostaganem, à différentes formes de l'érosion.

Cette vulnérabilité naturelle est liée principalement à l'érodabilité des formations sableuses caractérisant cette zone, à la topographie accidentée du site et aux facteurs climatiques qui sont devenus de plus en plus sévères en raison des dérèglements climatiques dans les milieux semi-aride. D'autres facteurs conditionnant l'intensité de l'érosion ont été identifiés, à l'image de la croissance urbaine anarchique qu'a connu la zone, ou encore le déséquilibre des formations naturelles par des pratiques inadaptées de l'homme.

L'évolution de l'ampleur des incidents, depuis 2006 jusqu'à présent, nous a permis non seulement de démontrer la progression des vulnérabilités, mais aussi de mettre en lumière la fragilité de tout le système urbain de cette agglomération, et révéler que les vulnérabilités sont, jusque-là, sous-estimés. Pour cela une démarche scientifique doit être adoptée afin de mieux comprendre et maîtriser les impacts de l'érosion des sols sur la sécurité des personnes et des biens dans le but de proposer des solutions pour lutter contre ce phénomène naturel à conséquences socio-économiques.

Chapitre IV

***« Etude expérimentale de l'érosion
interne par suffusion »***

Chapitre IV : Etude expérimentale de l'érosion interne par suffusion

IV.1. Objectif de l'étude expérimentale :

L'objectif de cette étude expérimentale est la caractérisation de la susceptibilité à l'érosion du sol de Kharouba (wilaya de Mostaganem). Une étude paramétrique est réalisée sur des mélanges de sables et de fines avec différentes proportions et sous différentes conditions d'essais afin d'identifier l'influence des différents paramètres sur les processus d'érosion.

Les essais d'érosion sont menés à l'aide d'un perméamètre à charges constante où les échantillons sont sollicités hydrauliquement par un écoulement descendant sous gradient constant. Le fluide d'injection est de l'eau déminéralisée et désaérée.

Ces essais doivent nous permettre d'étudier l'initiation et le développement de la suffusion sous l'effet des différents paramètres. Les paramètres étudiés sont le pourcentage des fines, le gradient hydraulique et la contrainte de consolidation. Les paramètres mesurés durant les essais pour définir la réponse du sol à la suffusion sont la masse des particules érodées, le débit solide érodé et l'évolution dans le temps de la conductivité hydraulique du sol durant l'érosion (le déroulement des essais est schématisé dans la figure 4.1).

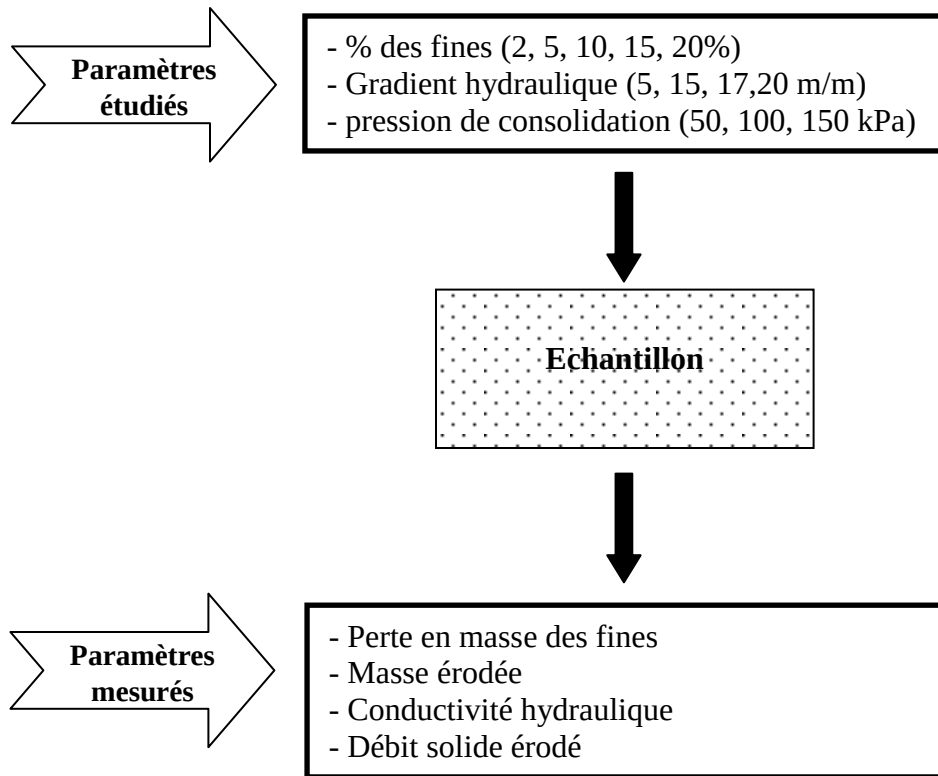


Figure 4.1. Schéma du déroulement des essais

IV.2. Caractérisation des matériaux testés :

Les essais d'érosion ont été menés sur des mélanges composés de sable naturel provenant de la région de Kharouba et de la farine de silice utilisée comme des fines. La farine de silice est un produit commercialisé par l'entreprise 'Adwan Chimicals' qui est installée dans la zone industrielle de Fornaka (ouest de la wilaya de Mostaganem). Elle est obtenue par broyage d'un sable siliceux.

Dans les différents mélanges, le sable de Kharouba qui est préalablement lavé et tamisé présente la structure primaire du sol (la partie grossière), et la farine de silice modélise la structure secondaire composée de particules fines qui peuvent être érodées sous l'effet de l'écoulement. Le critère de choix de la farine de silice comme des fines est principalement leur caractère non dispersif d'une part, et d'autre part, pour éviter les effets de cohésion entre les particules. Elle peut être considérée comme des particules inertes où les interactions avec la matrice granulaire du sol en présence d'eau pouvant perturber leur migration peuvent être négligées.

Les analyses granulométriques des matériaux sont réalisées par tamisage selon la norme NF P94-056 et par sédimentométrie selon la norme NF P94-057. Les distributions des tailles des particules pour les matériaux brutes (sable de Kharouba et farine de silice) sont présentées dans les figures (4.2) et (4.3) respectivement.

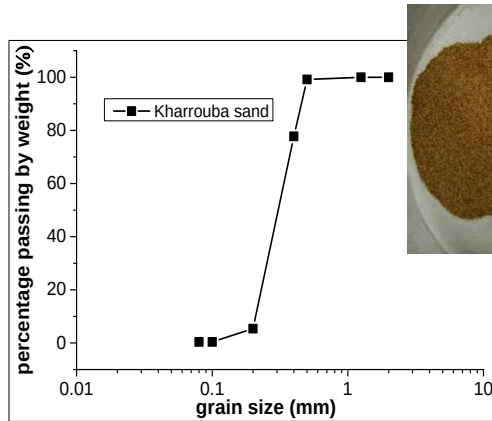


Figure 4.2. Distribution granulométrique du sable de Kharouba

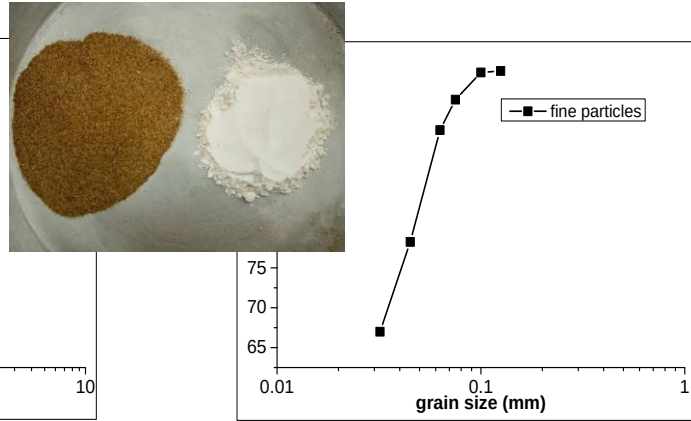


Figure 4.3. Distribution granulométrique de la farine de silice

Les courbes granulométriques des différents mélanges ainsi que les propriétés physiques des matériaux testés sont présentés dans la figure (4.4) et dans le tableau (4.1). Les courbes granulométriques des matériaux brutes (figures 4.2 et 4.3) indiquent que le diamètre des grains du sable de Kharouba se situe entre 0,08mm et 1,00mm, et celui des particules fines se trouve entre 0,006mm et 0,10mm. Le coefficient d'uniformité C_u du sable de Kharouba égale à 1,62, cela indique que sa granulométrie est très serrée. Son coefficient de courbure C_c égale à 0,95, ce qui montre que la granulométrie de ce sable est mal graduée.

La figure (4.4) indique que les mélanges avec les différents pourcentages en masse des fines ne contiennent pas de particules argileuses, tous les échantillons testés sont considérés comme non-plastiques, les indices de plasticité mesurés au laboratoire par la méthode de Cazagrande sont nuls ($I_p = 0\%$). Les coefficients d'uniformité des échantillons KH-2%F, KH-5%F et KH-10%F, qui contiennent respectivement 5, 10 et 15% de fines, sont inférieurs à 5. Leurs coefficients de courbure sont inférieurs à 3. Ceci indique que la granulométrie de ces échantillons est mal graduée. Les échantillons KH-15%F et KH-20%F contenant respectivement 15 et 20% de particules fines dans leur composition sont caractérisés par des

C_u supérieurs à 5, et des C_c supérieurs à 3, ce qui indique que leur distribution granulométrique est bien graduée.

Il faut noter que les pourcentages des particules fines utilisés dans cette étude ont été fixés conformément aux résultats présentés dans la littérature, où à une certaine quantité de fines (la quantité maximale des fines est prise égale à 20% dans notre étude) les particules grossières constituant le squelette du sol flottent dans la phase constituée par les fines (Wan et Fell, 2004, 2008). Dans ce cas le sol est stable vis-à-vis de la suffusion, mais d'autres formes d'érosion peuvent se produire (qui ne sont pas traités dans la présente étude)

Tableau 4.1: Propriétés physiques des sols testés

Propriétés physiques	Sable	Fines	Spécimen KH-2%	Spécimen KH-5%	Spécimen KH-10%	Spécimen KH-15%	Spécimen KH-20%
Densité des grains G (-)	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
Diamètres moyen D_{50} (mm)	0.30	0.03	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28
Diamètre effectif D_{10} (mm)	0.21	0.01	0.21	0.20	0.11	0.05	0.04
Coef d'uniformité C_u (-)	1.62	3.00	1.62	1.68	3.00	6.40	8.29
Coef de courbure C_c (-)	0.95	1.33	0.91	0.93	1.59	3.39	4.23
Forme des grains	Angulaire						

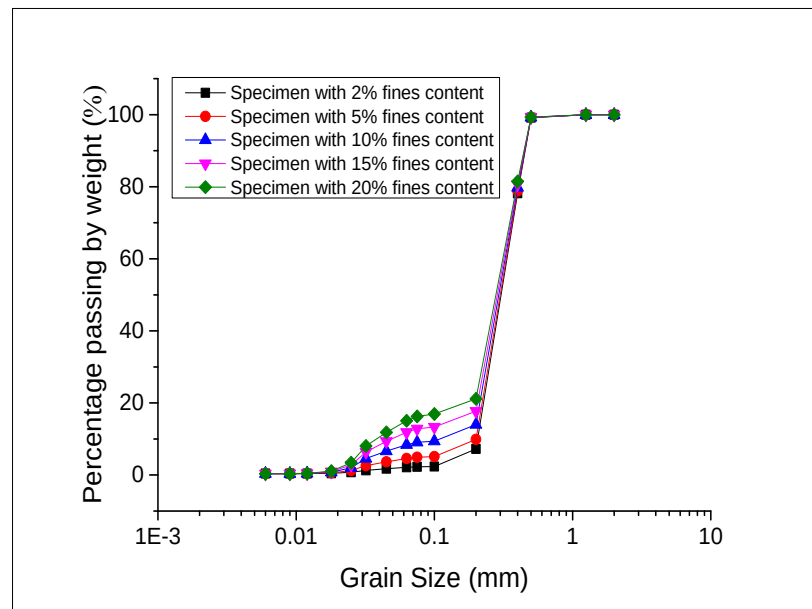


Figure 4.4. Courbes granulométriques des différents mélanges

L'analyse chimique des matériaux utilisés est présentée dans le tableau (4.2). Les deux matériaux sont constitués essentiellement de silice. Le sable renferme une quantité appréciable de calcaire.

Tableau 4.2 : Analyse chimique des matériaux

	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₄ (%)	Perte au feu (%)
Sable	76.97	11.02	00.14	00.76	00.37	00.00	10.89
Fines	98.42	00.02	00.01	00.90	00.08	00.00	00.32

IV.3. Dispositif expérimental et protocole d'essai:

IV.3.1. Dispositif expérimental:

Le principe des essais consiste à solliciter hydrauliquement des échantillons composés de mélanges de sable et de fines par un écoulement unidirectionnel descendant à l'aide d'un perméamètre à charge constante (Figure 4.5). Ce dispositif a été utilisé pour la caractérisation au laboratoire de la suffusion des sols par plusieurs auteurs (Kenney et Lau, 1985; Moffat, 2005; Wan et Fell, 2004 ; Ayadat et al., 1998 ; Reddi et al., 2000).



Figure 4.5. Dispositif expérimental

Le perméamètre utilisé dans cette étude est composé d'un moule cylindrique d'un diamètre de 10.5cm et 12cm de hauteur. Des piézomètres sont répartis sur la hauteur du moule pour permettre de suivre l'évolution des pressions au cours de l'essai. Le moule est couvert à

ses deux extrémités par des couvercles. Celui du bas comporte un ajutage permettant l'évacuation de l'effluent, l'autre du haut est raccordé à un réservoir d'eau. Des plaques poreuses coiffent l'échantillon sur ses deux faces à l'intérieur du moule. Un filtre est positionné entre la partie basse de l'échantillon et la plaque inférieure pour permettre de contrôler le diamètre des particules érodées. Dans notre étude, l'ouverture des mailles du filtre utilisé est de $80\mu\text{m}$, c'est-à-dire seules les particules fines (diamètre $< 80\mu\text{m}$) peuvent être évacuées durant l'essai.

IV.3.2. Protocol d'essai:

La méthodologie adoptée pour la réalisation des essais d'érosion est basée sur celle décrite dans les travaux de Ayadat et al. (1998), Bendahmane (2005) et de Bendahmane et al. (2008). Après avoir préparé les échantillons, ils seront mis dans le moule du perméamètre puis saturé et consolidé à la pression désirée. Les échantillons sont soumis par la suite à un écoulement à gradient constant et les paramètres caractérisant l'érosion du sol seront mesurés.

1) Préparation des échantillons :

La méthode utilisée pour la préparation des échantillons consiste à malaxer en premier lieu le sable seul avec une quantité d'eau inférieure à l'optimum Proctor pendant trois minutes. Tout en continuant le malaxage, les fines sont ajoutées progressivement jusqu'à la quantité désirée. Le malaxage de l'ensemble des matériaux sera poursuivi pendant dix minutes. Cette étape de malaxage est très importante pour assurer une homogénéité des échantillons, un mauvais malaxage peut conduire à des échantillons hétérogènes qui auront des comportements différents lors des essais. Après malaxage, les matériaux sont laissés pendant une certaine durée pour se stabiliser avant d'être mis dans le moule cylindrique. Leur mise en place dans le moule se fait en trois couches, chaque couche sera compactée manuellement. L'échantillon sera par la suite consolidé mécaniquement puis saturé.

2) Consolidation et saturation :

Après le remplissage du moule par le matériau à tester, la face supérieure de l'échantillon sera soigneusement arasée pour avoir une surface parfaitement horizontale. L'échantillon est soumis par la suite à une pression verticale à l'aide d'une presse hydraulique. La pression appliquée est augmentée par palier jusqu'à la valeur de la pression de

consolidation désirée. Après consolidation et à l'aide d'une pompe à vide, une dépression est appliquée à l'échantillon qui sera par la suite saturé par de l'eau déminéralisée et désaérée. La saturation doit se faire de bas en haut pour éviter la migration de petites particules.

3) La sollicitation hydraulique :

L'échantillon est sollicité hydrauliquement par un écoulement d'eau descendant avec un gradient hydraulique maintenu constant durant toute la période de l'essai. La durée de chaque essai dépendra des caractéristiques de l'échantillon à tester, l'essai est arrêté lorsque l'eau récoltée à la sortie de l'échantillon soit claire, c'est-à-dire, les particules ne sont plus évacuées de l'échantillon.

4) Mesure de la masse des particules érodées :

L'effluent est récolté à la sortie du moule dans des récipients numérotés, chaque récipient correspond à un intervalle de temps de l'essai. La masse des récipients est mesurée à l'aide d'une balance digitale pour déterminer le débit massique du fluide récolté pour chaque intervalle de temps. Par la suite, ils seront mis dans une étuve. Après séchage, les récipients seront remesurés pour déterminer cette fois-ci la masse des particules érodées pour chaque intervalle de temps.

IV.4. Etude paramétrique de l'érosion (résultats et discussions):

Une étude paramétrique a été menée pour déterminer l'influence des différents paramètres sur la réponse du sol à la suffusion. Trois variables sont considérées dans cette étude :

1) Le pourcentage initial des fines : les essais sont réalisés sur des échantillons contenant 2, 5, 10, 15 et 20% en masse des fines.

2) Le gradient hydraulique : les échantillons sont sollicités par des gradients hydrauliques constants, égales à 5, 15, 17 et 20m/m.

3) La pression de consolidation : les échantillons sont testés sous l'influence d'une contrainte axiale appliquée verticalement. Les valeurs des pressions utilisées dans les différents essais sont 50, 100 et 150kPa.

Les pourcentages de fines utilisés dans les différents mélanges ont été choisis pour représenter les distributions granulométriques du sol qui peuvent être rencontrées dans les différents endroits du site étudié et à différentes profondeurs. Les valeurs du gradient hydraulique exploité sont fixées pour modéliser les conditions d'écoulement prévues dans le site et les pressions de consolidation fixées à 50, 100 et 150kPa représentent des profondeurs de sol égales à 2.5, 5 et 7.5m respectivement.

IV.4.1. Influence du pourcentage initial des fines:

L'évolution de la perte en masse des particules fines durant l'érosion pour les différents pourcentages initiaux de fines est présentée dans les figures (4.6) et (4.7).

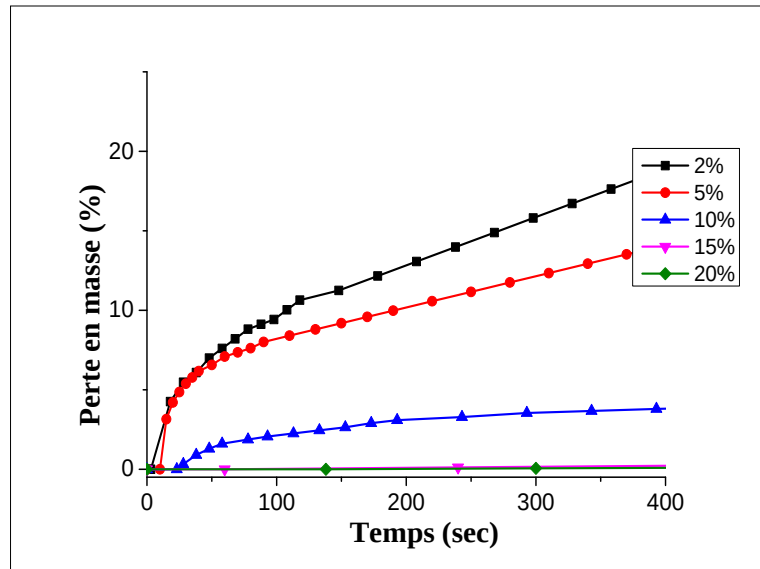


Figure 4.6. Perte en masse des particules fines durant l'érosion
($i = 15m/m$, $\sigma_a = 50kPa$)

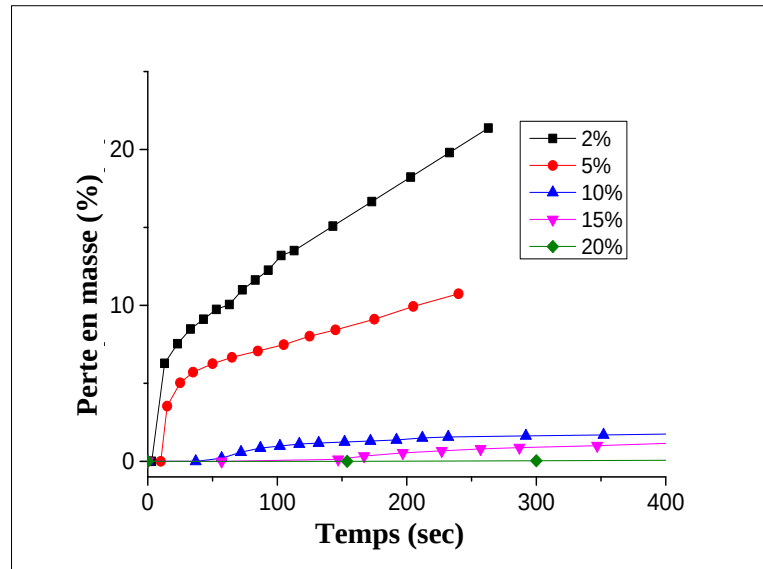


Figure 4.7. Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)

Les figures (4.6) et (4.7) indiquent que la perte en masse des particules fines pour les échantillons contenant 2, 5 et 10% de fines est plus importante que celle enregistrée pour les échantillons avec 15 et 20% de fines. Nous remarquons aussi que la quantité maximale des particules érodées est toujours inférieure à la quantité des particules érodables, qui peut être représentée par la quantité initiale des fines C_0 , et cela pour tous les échantillons testés. Ceci peut être expliqué par le fait que durant l'évolution du processus de la suffusion, seulement une partie des particules fines sollicitées par l'écoulement peut être drainée à l'extérieur de l'échantillon, les autres particules seront filtrées par la matrice granulaire.

L'évolution de la masse cumulée érodée en fonction du temps pour différents mélanges est représentée dans la figure (4.8). L'analyse des courbes indique que la cinétique d'érosion diffère selon la quantité initiale des fines présente dans l'échantillon. Pour les échantillons contenant 2, 5 et 10% de fines, l'allure des courbes est marquée par une croissance rapide durant les premières secondes ($0 < t < 50\text{sec}$) suivie par une évolution lente et quasi-linéaire jusqu'à la fin de l'essai. Pour des pourcentages plus élevés de fines (15 et 20%), les quantités de particules érodées sont très faibles durant les premières minutes (Figure 4.8a). Cette très faible croissance, sera suivie par une évolution presque linéaire à partir de $t > 500\text{ sec}$ (Figure 4.8b).

Les échantillons contenant 2, 5 et 10% de fines sont caractérisés par une grande porosité. La sollicitation hydraulique de ces échantillons conduit à une érosion massive de particules fines durant les premières secondes de l'essai. Après une certaine période, un nouveau état d'équilibre s'installe marqué par une tendance linéaire de l'évolution de la quantité des particules érodées jusqu'à la fin de l'essai. L'augmentation de la quantité des fines dans les mélanges conduit à la diminution de leur porosité. La mobilité des particules devient de plus en plus difficile dans les échantillons avec 15 et 20% de fines, cela explique la faible quantité drainée à l'extérieur de ces échantillons notamment au début de l'essai.

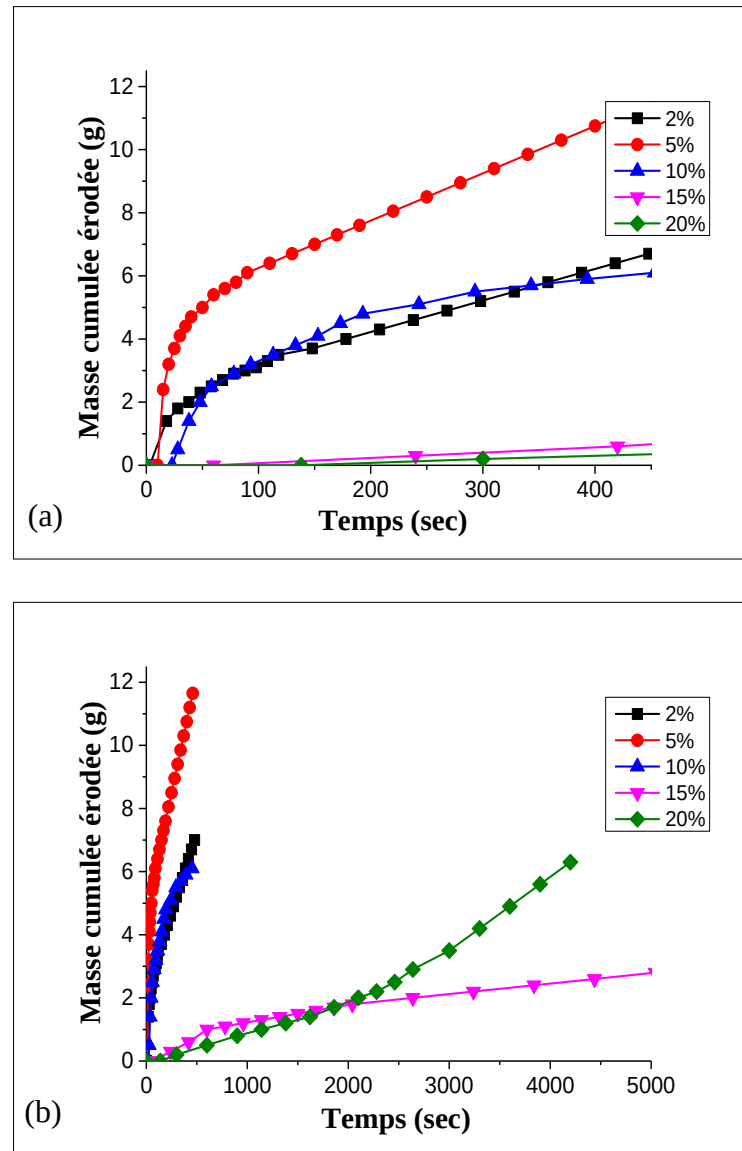


Figure 4.8. Evolution de la masse cumulée érodée ($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)
a) $0\text{sec} < t < 500\text{sec}$, b) $0\text{sec} < t < 5000\text{sec}$

La différence de comportement entre les mélanges ayant un pourcentage de fines inférieur ou égale à 10%, et les échantillons comportant 15 et 20% de fines peut être expliquée par un suivi de l'évolution de la conductivité hydraulique des milieux.

La conductivité hydraulique est un paramètre indirect qui peut nous renseigner sur les processus de migration des particules dans le sol. L'influence de l'érosion interne sur la variation de la perméabilité de mélanges de sable et de bentonite a été étudiée par Koaser et al. (2006) où ils ont établi une relation entre le taux d'érosion et la conductivité hydraulique.

La figure (4.9) montre l'évolution de la conductivité hydraulique du sol au cours du temps pour des échantillons contenant 10 et 15% de fines.

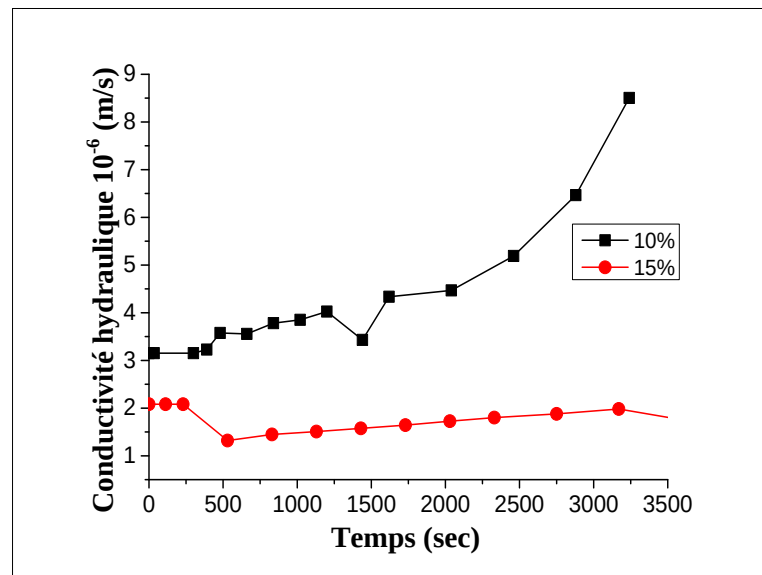


Figure 4.9. Variation de la conductivité hydraulique durant l'érosion
($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)

Pour 10% de fines, nous avons constaté une nette augmentation de la perméabilité dès le début de l'essai. La quantité importante des particules fines érodées par suffusion provoque une augmentation de la porosité facilitant ainsi l'écoulement de l'eau à travers le milieu poreux.

Pour le mélange contenant 15% de fines, la perméabilité diminue durant les premières minutes puis elle augmente pour $t > 500$ sec, mais cette augmentation est très faible par rapport à celle constatée pour l'échantillon avec 10% de fines. La diminution de la perméabilité au début de l'essai peut être expliquée par le colmatage du milieu. Les particules arrachées par

les forces d'écoulement ont été piégées par la matrice granulaire du sol (généralement à l'aval de l'échantillon). Leur accumulation provoque une réduction de la porosité locale du milieu granulaire et par conséquent, une réduction de sa conductivité hydraulique. Le colmatage a favorisé l'apparition de surpressions dans les zones de blocage. L'augmentation de ces surpressions sous l'effet de l'écoulement conduit à un processus de décolmatage entraînant l'accroissement de la perméabilité et l'augmentation de la quantité des particules érodées. La suffusion s'est poursuivie par la suite accompagnée par une augmentation (faible) de la conductivité hydraulique du sol. Il faut noter que la formation et la dissipation du processus de colmatage s'est produit rapidement en raison de la forte perméabilité des sols testés.

Le comportement hydraulique du sol durant l'érosion est un paramètre important pour déterminer sa réponse à l'érosion. Koaser et al. (2006) et Ke et Takahashi (2012, 2014) ont indiqué dans leurs travaux que la suffusion provoque une augmentation de la porosité globale du milieu granulaire, et par conséquent l'augmentation de sa perméabilité et ceci quel que soit la composition granulométrique du sol. Par contre, Bendahmane et al. (2008) ; Luo et al. (2013) ; Seghir et al. (2014) ; Sibille et al. (2015) et Marot et al. (2016) ; ont indiqué que la migration des particules fines par suffusion provoque le colmatage du milieu poreux, ce qui conduit à la diminution de la porosité locale et donc de la conductivité hydraulique du sol.

Nos résultats montrent que le comportement hydraulique des sols érodés dépend fortement de la quantité initiale des fines présente dans l'échantillon. A de faibles pourcentages de fines, la perméabilité du sol augmente durant l'érosion. Tandis que, les échantillons comportant des proportions importantes de particules fines ont connu une diminution de leur conductivité hydraulique.

Un autre paramètre très déterminant pour caractériser le phénomène d'érosion, c'est le débit solide érodé qui exprime la masse des fines évacuée par unité de temps. La figure (4.10) présente l'évolution du débit solide en fonction du temps pour différents pourcentages de fines (le gradient hydraulique imposé $i = 20$ m/m et la pression de consolidation $\sigma_a = 50$ kPa).

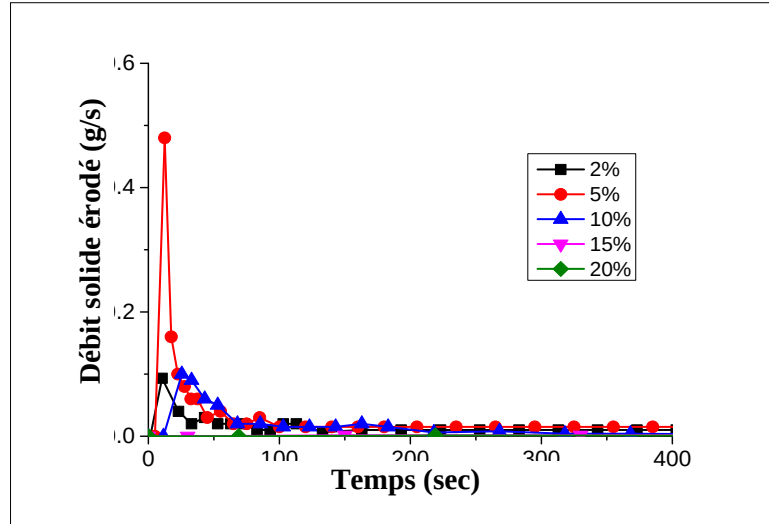


Figure 4.10. Evolution du débit solide en fonction du temps
($i = 20\text{m/m}$, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)

Dans la figure (4.10) on constate que les courbes ont la même allure qui peut être divisée en trois phases. Dans la première phase, le débit solide subit une croissance brutale pour atteindre un pic élevé. En seconde phase, le débit subit une décroissance jusqu'à qu'il se stabilise à un palier dans la troisième phase. La valeur du débit solide est très faible dans cette phase pour les différents échantillons.

Nous constatons aussi que les pics du débit solide érodé sont pointus pour les échantillons avec une quantité initiale des fines inférieure ou égale à 10%. Tandis que, les pics sont plus étalés dans le temps pour 15 et 20% de fines. La quantité importante de fines rend les milieux moins perméables, la faible quantité des particules mobilisées par l'écoulement met plus de temps pour être évacuer à l'extérieur de l'échantillon.

La figure (4.11) représente le débit solide érodé maximal pour différents pourcentages de fines. Cette figure nous montre clairement que le taux d'érosion diminue avec l'augmentation de la quantité initiale des fines. Une corrélation entre le débit maximal érodé et le pourcentage initiale des fines est proposée. Cette corrélation peut être présentée par la formule suivante :

$$Q_{s,\max} = -0.002 + 2.254e^{-(0.305.\% \text{ fines})}, r = 0.98 \quad (4.1)$$

Selon cette relation, le sol ne sera plus érodable ($Q_{s,max}=0$) si le pourcentage de fines dépasse les 30%. Cela a été confirmé expérimentalement sur des échantillons contenant 30% de fines et sollicités par différents gradients hydrauliques où nous n'avons observé aucun signe d'érosion dans les différents échantillons testés.

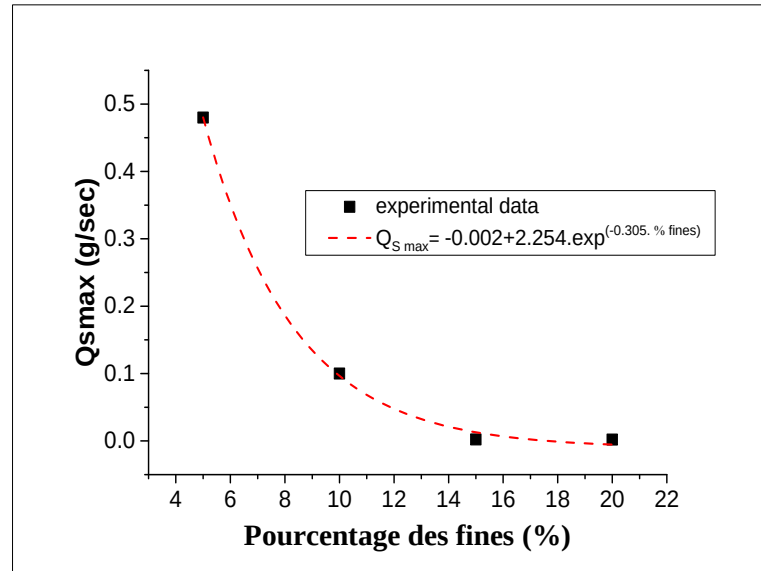


Figure 4.11. Variation du débit solide érodé maximal en fonction du pourcentage initial des fines

L'évolution de la perte en masse des particules fines, l'évolution de la quantité des particules érodées, le comportement hydraulique des sols durant l'érosion et la diminution du débit solide érodé maximal avec l'augmentation du pourcentage initial des fines sont tous des paramètres qui indiquent que la quantité des fines présentes dans la matrice d'un sol non-cohésif joue un rôle important dans sa réponse à l'érosion par suffusion. L'augmentation de la quantité des fines dans les mélanges provoque une diminution de leur porosité, cela peut entraver l'évacuation des particules fines à l'extérieur de la matrice granulaire du sol. Par conséquent, l'augmentation du pourcentage initial des fines améliore la résistance du sol à la suffusion.

IV.4.2. Influence du gradient hydraulique:

La figure (4.12) illustre l'évolution dans le temps de la masse cumulée des particules érodées pour différentes valeurs du gradient hydraulique des échantillons contenant 10% de fines et consolidés par une pression égale à 50kPa.

Nous constatons que la quantité des particules érodées est très faible pour un gradient de 5m/m. pour les autres gradients appliqués, les courbes affichent des tendances similaires caractérisées par un accroissement rapide durant les premières minutes, suivi par une évolution presque linéaire vers la fin des essais. La masse des particules érodées s'accroît avec l'augmentation du gradient hydraulique appliqué.

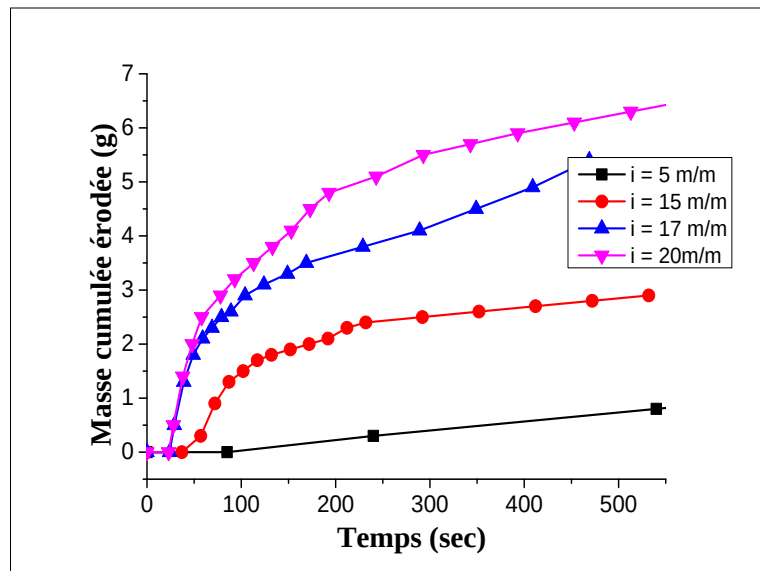


Figure 4.12. Evolution de la masse cumulée érodée pour différentes valeurs du gradient hydraulique appliqué (10% de fines, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)

L'évolution dans le temps de la perte en masse des particules fines en fonction du gradient hydraulique imposé pour les échantillons contenant 5 et 10% de fines est représentée dans la figure (4.13). Dans cette figure, nous constatons que la perte en masse des fines augmente avec l'augmentation du gradient hydraulique pour les différents mélanges. En effet, la sollicitation du sol par un gradient hydraulique élevé favorise l'arrachement, le transport et l'évacuation des particules fines à l'extérieur du milieu. Pour la même valeur du gradient, la perte en masse est plus importante dans l'échantillon contenant 5% de fines que celle pour

l'échantillon avec 10% de fines. Cela confirme les constatations faites concernant l'influence du pourcentage des fines sur l'érodabilité du sol.

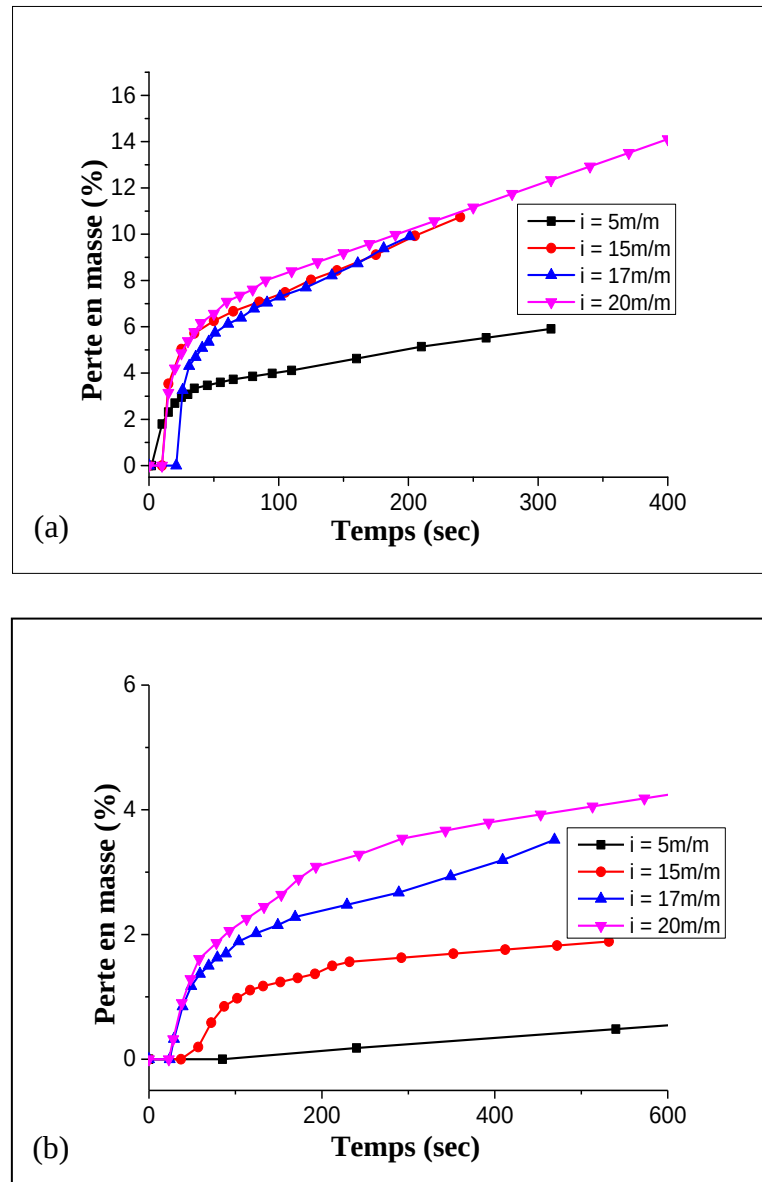


Figure 4.13. Perte en masse des particules fines durant l'érosion pour différentes valeurs du gradient hydraulique a) 5% de fines, b) 10% de fines

L'évolution de la conductivité hydraulique au cours des essais pour différents gradients hydrauliques imposés est représentée dans la figure (4.14). Pour le même pourcentage initial de fines, et après l'initiation de l'érosion, la conductivité hydraulique augmente avec l'augmentation de la valeur du gradient hydraulique appliqué.

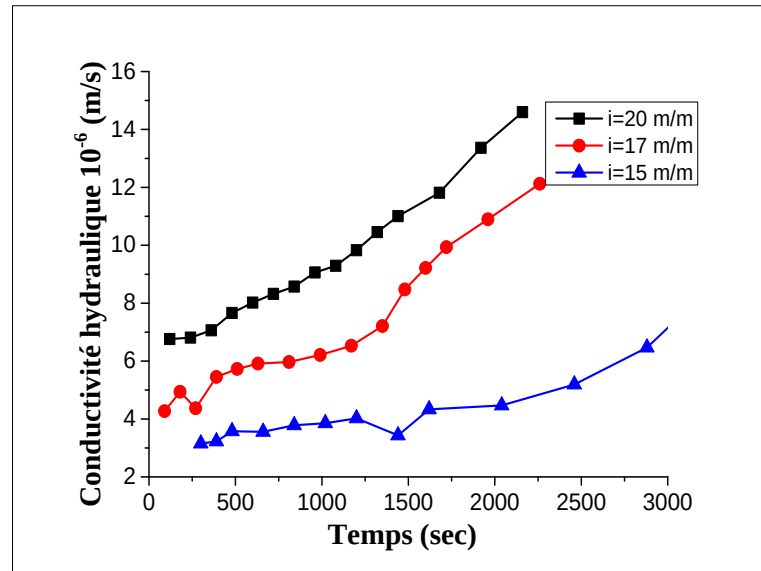


Figure 4.14. Evolution de la conductivité hydraulique pour différentes valeurs du gradient hydraulique (10% de fines, $\sigma_a = 50$ kPa)

Les forces qui accompagnent le gradient de charge jouent un rôle important dans l'arrachement et le transport des particules modifiant ainsi la structure porale du sol. L'analyse des graphes de la figure (4.14) nous conduit à deux remarques importantes :

1 – La perméabilité globale de l'échantillon sollicité par un gradient hydraulique égal à 15m/m est faible par rapport à celle des échantillons sollicités par des gradients plus importants.

2 – L'évolution de la perméabilité est beaucoup moins importante dans l'échantillon sollicité par un gradient égal à 15m/m que celle pour les autres charges.

Cela implique que l'augmentation de l'intensité de la charge hydraulique facilite le détachement et le transport des particules. La porosité, et par conséquent, la perméabilité du sol augmente. Cette évolution est proportionnelle à la valeur du gradient hydraulique appliquée.

L'évolution du flux solide érodé pour différentes valeurs du gradient hydraulique est présentée dans la figure (4.15). Les courbes ont la même tendance, le débit solide érodé augmente rapidement pour atteindre un pic puis décroît pour se stabiliser à un palier avec une faible valeur qui dépendra du gradient appliqué. Le taux d'érosion est proportionnel au gradient appliqué. La valeur maximale du flux solide augmente en augmentant le gradient

hydraulique. Le temps correspondant à cette valeur maximale est très court pour des gradients élevés. Cela veut dire que l'érodabilité du sol augmente avec l'augmentation de l'intensité de la sollicitation hydraulique.

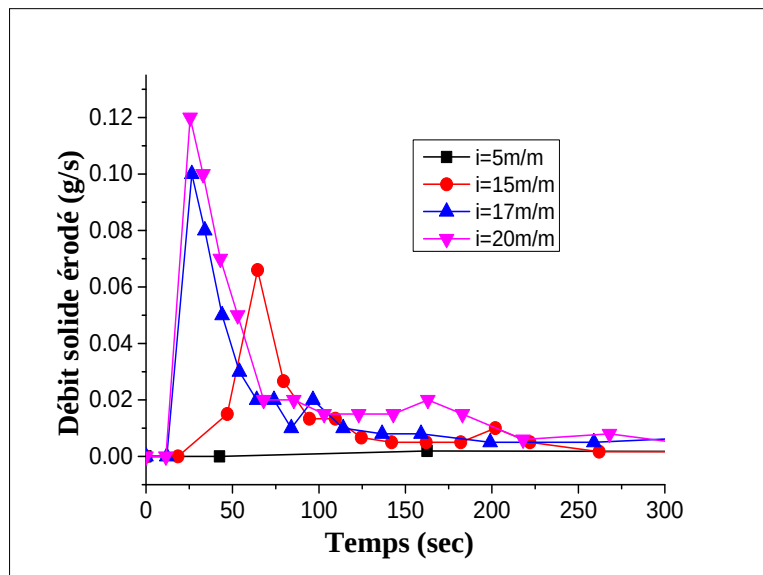


Figure 4.15. Evolution du débit solide érodé pour différentes valeurs du gradient hydraulique (10% de fines, $\sigma_a = 50\text{kPa}$)

IV.4.3. Influence de la pression de consolidation:

L'évolution de la masse cumulée érodée pour différentes valeurs de la pression de consolidation est représentée dans la figure (4.16). Nous constatons que la quantité des particules érodées décroît avec l'augmentation de la pression appliquée. Cette observation est valable pour les autres échantillons à différents pourcentages de fines.

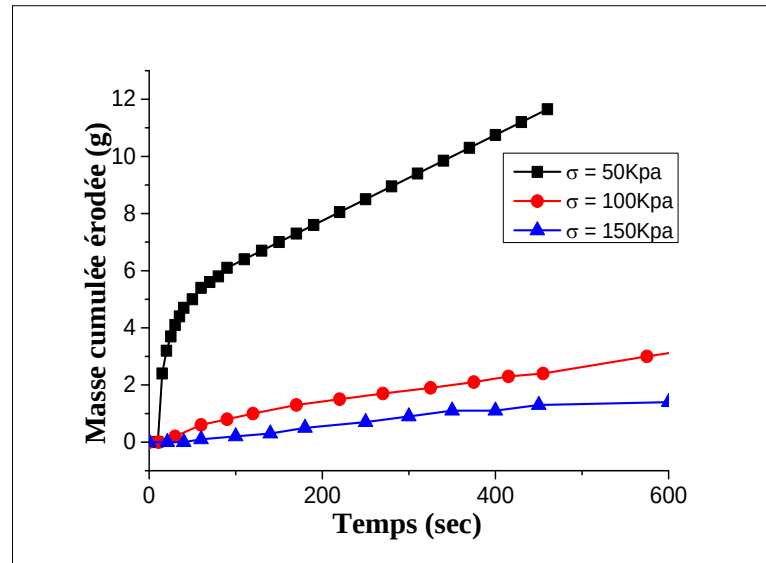


Figure 4.16. Evolution de la masse cumulée érodée pour différentes valeurs de la pression de consolidation (5% de fines, $i = 20$ m/m)

Les figures (4.17) et (4.18) présentent la variation du débit solide érodé maximal en fonction de la pression de consolidation pour des échantillons comportant 5 et 10% de fines respectivement, et sollicités par différents gradients hydrauliques. Nous constatons que le taux d'érosion diminue avec l'augmentation de la contrainte de consolidation quel que soit la quantité initiale des fines présente dans le sol et du gradient hydraulique appliqué.

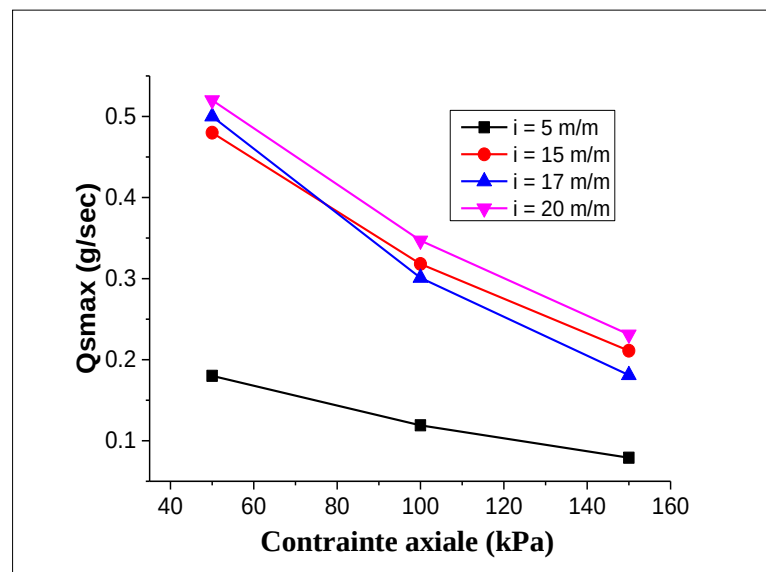


Figure 4.17. Débit maximal d'érosion en fonction de la pression appliquée (5% de fines)

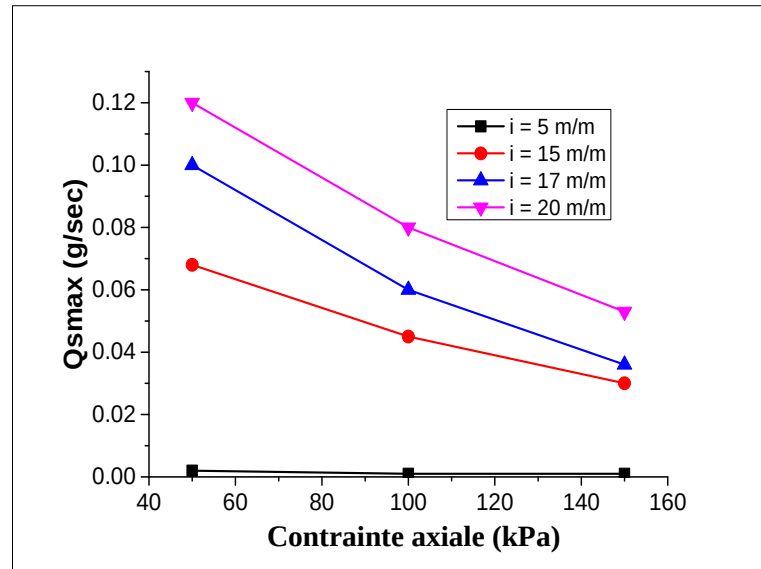


Figure 4.18. Débit maximal d'érosion en fonction de la pression appliquée (10% de fines)

L'état initial de compacité du sol a une grande influence sur les processus d'érosion interne. La décroissance de la masse cumulée érodée et du débit solide d'érosion avec l'augmentation de la pression appliquée peuvent être expliquées par l'accroissement induit de la consolidation des échantillons qui réduit la porosité du milieu et augmente les liaisons intergranulaires. La migration des particules à travers la matrice du sol devient de plus en plus difficile avec l'augmentation de l'intensité de la contrainte appliquée. Cela veut dire que le compactage du sol entraîne l'amélioration de sa résistance à l'érosion.

IV.5. Détermination du gradient hydraulique critique:

Les résultats obtenus dans les sections précédentes nous ont montré que la susceptibilité à la suffusion des sols non cohérents dépend de la composition de la matrice granulaire du sol (de sa granulométrie et de la quantité des particules fines), de son état de contrainte, des conditions hydrauliques imposées, ainsi que des interactions entre ces paramètres.

La suffusion est initiée dans un matériau géométriquement instable si les forces générées par l'écoulement sont suffisamment élevées pour entraîner l'arrachement et le transport des particules. Le gradient hydraulique correspondant à l'initiation de l'érosion est nommé 'gradient hydraulique critique'.

Pour la détermination de ce paramètre, quelques auteurs ont estimé que le i_{cr} est le gradient hydraulique qui correspond à l'apparition des premiers signes d'érosion dans l'effluent (drainage des premières particules à l'extérieur du milieu). Cette méthode peut sous-estimer la valeur du gradient critique en raison des erreurs probables de manipulation et de lecture.

La méthodologie proposée dans ce travail pour l'estimation de la valeur du gradient hydraulique critique en fonction des paramètres étudiés, consiste à calculer, en premier lieu, le taux d'érosion $\dot{\varepsilon}$ qui représente la quantité des particules érodées par unité de surface et par unité de temps, pour un échantillon contenant un pourcentage de fines $F\%$ et consolidé par une contrainte axiale σ_a . Puis, la variation du taux d'érosion en fonction du gradient hydraulique imposé sera présentée. L'interpolation de cette courbe $\dot{\varepsilon} = f(i)$ pour un taux d'érosion nul nous permis de calculer la valeur du gradient hydraulique critique i_{cr} .

La figure (4.19) présente la variation du taux d'érosion en fonction du gradient hydraulique appliqué pour l'échantillon contenant 10% de fines et consolidé par une pression égale à 50kPa. Une corrélation entre $\dot{\varepsilon}$ et i a été établie, et qui peut être représentée par la relation ($\dot{\varepsilon} = 0.893i - 3.550$, $r = 0.99$). Pour un taux d'érosion nul, la valeur du gradient hydraulique critique obtenue sera égale à $i_{cr} = 3.97$ m/m ($F = 10\%$ et $\sigma_a = 50$ kPa).

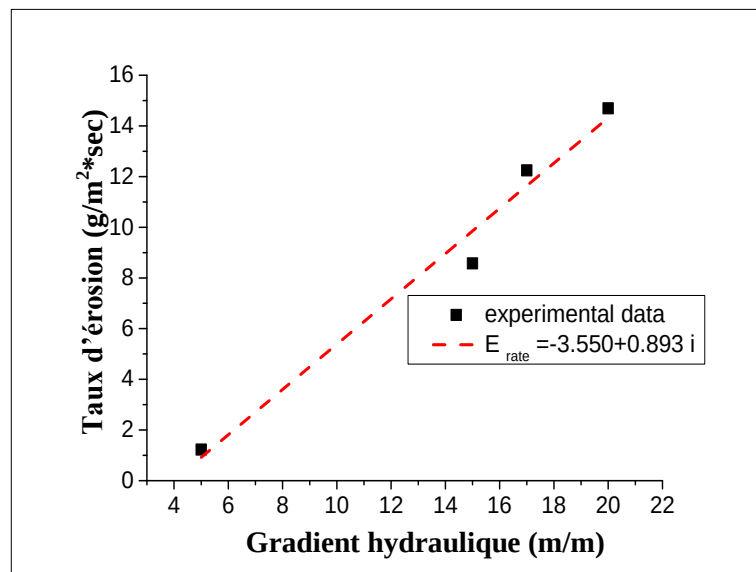


Figure 4.19. Variation du taux d'érosion en fonction du gradient hydraulique appliqué ($F = 10\%$, $\sigma_a = 50$ kPa)

De la même manière, les valeurs des gradient critiques pour les échantillons contenant différents pourcentages de fines et soumis à la même contrainte de consolidation ont été déterminés. Une corrélation linéaire est ensuite élaborée pour exprimer une relation entre le gradient hydraulique critique et le pourcentage des particules fines, pour une contrainte de consolidation donnée (Figure 4.20).

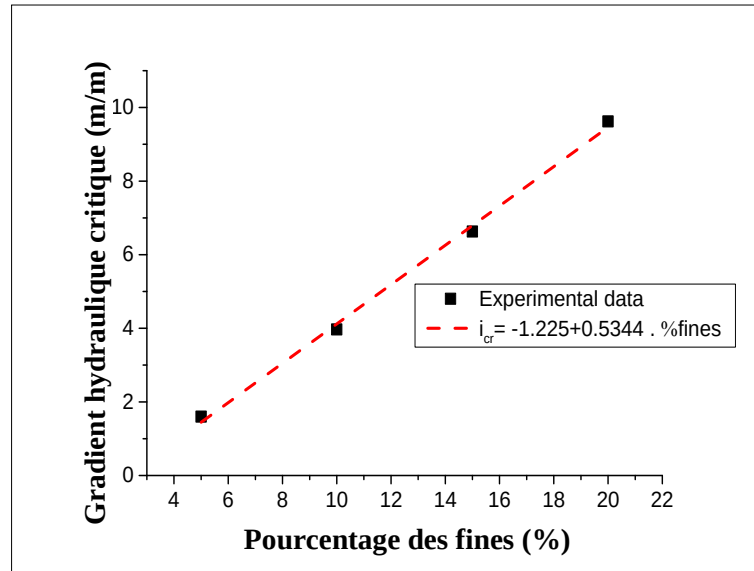


Figure 4.20. Variation du gradient hydraulique critique en fonction du pourcentage initial des fines ($\sigma_a = 50\text{kPa}$)

L'estimation du gradient hydraulique critique en fonction de la quantité initiale de fines présente dans la matrice du sol, pour les différentes valeurs de la pression de consolidation est donnée par les relations suivantes :

$$\sigma_a = 50 \text{ kPa: } i_{cr} = -1.225 + 0.5344 * \% \text{ fines } (r = 0.98)$$

$$\sigma_a = 100 \text{ kPa: } i_{cr} = -1.205 + 0.5426 * \% \text{ fines } (r = 0.95)$$

$$\sigma_a = 150 \text{ kPa: } i_{cr} = -0.705 + 0.7416 * \% \text{ fines } (r = 0.98)$$

IV.6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur l'initiation et l'évolution de l'érosion par suffusion. L'étude expérimentale a été menée sur des échantillons de sol provenant de la région de Kharouba (Mostaganem). Des essais d'érosion ont été réalisés à l'aide d'un perméamètre à charge constante. Des échantillons composés de mélanges de sable et de fines à différents pourcentages ont été soumis à un écoulement descendant avec un gradient hydraulique maintenu constant durant l'essai. Les paramètres variés dans cette étude sont le pourcentage initial des fines, le gradient hydraulique et la pression de consolidation. Notre démarche expérimentale s'appuie sur la quantification de la masse des particules érodées, du débit solide érodé et du suivi de l'évolution de la conductivité hydraulique du sol durant l'érosion. Après caractérisation des matériaux testés, nous avons exposé en détail le Protocole d'essai adopté dans cette recherche.

Sur la base des résultats expérimentaux, nous avons constaté que ; pour tous les échantillons testés, la quantité des particules érodées est toujours inférieure à la quantité maximale des particules érodables. Cela est expliqué par la filtration d'une certaine proportion de fines. La suffusion est caractérisée donc par le détachement, le transport et la filtration de fines. Ces trois processus ne peuvent pas être dissociés dans l'étude de ce phénomène. La cinétique d'érosion dépendra fortement du pourcentage initial de fines présentent dans la matrice du sol. A des faibles quantités de fines, la migration des particules augmente la porosité du milieu et par conséquent, un accroissement de la perméabilité au cours du temps peut être observé. A des pourcentages plus élevés de fines, les particules mobilisées vont être piégées dans le sol provoquant son colmatage. La perméabilité décroît durant un certain temps. Des suppressions localisées décolmatent le sol et la conductivité hydraulique reprend son accroissement mais lentement à cause de la faible porosité du milieu. L'évolution de la perméabilité par la migration des fines présente un paramètre important pour la détermination de la réponse du sol à l'érosion. Une corrélation entre le débit solide maximal érodé, souvent utilisé pour caractériser l'érodabilité des sols, et le pourcentage des fines a été proposée. L'interpolation de la courbe représentant cette corrélation pour un débit d'érosion nul, nous a permis de conclure que le sol étudié est stable vis-à-vis de la suffusion si le pourcentage des fines est supérieur ou égal à 30%. Les résultats obtenus concernant l'influence de la quantité

initiale des particules fines ont montré que l'augmentation de leur proportion dans la matrice du sol améliore sa résistance à la suffusion.

L'augmentation du gradient hydraulique favorise le détachement, le transport et le drainage des particules fines à l'extérieur du milieu. Ainsi, pour la même intensité du gradient appliqué, la perte en masse des particules érodées est plus importante pour les échantillons contenant une faible proportion de fines que celle pour les échantillons avec une quantité initiale assez élevée de particules fines. D'autre part, nous avons constaté aussi que la conductivité hydraulique des différents mélanges augmente avec l'augmentation de la valeur du gradient imposé. Cela est dû principalement à l'augmentation de la porosité du milieu par l'érosion.

Par la suite, nous avons mis en évidence l'influence de l'état de compacité du sol sur les processus d'érosion. En effet, la consolidation réduit la porosité du milieu et augmente les liaisons entre ses grains, ce qui entraîne l'amélioration de la résistance du sol à l'érosion.

Finalement, une corrélation entre le gradient hydraulique d'initiation de la suffusion et les paramètres étudiés a été établie. Ces relations vont nous permettre de calculer la valeur du gradient hydraulique critique en fonction du pourcentage initial de fines et de la pression de consolidation.

En conclusion, nous avons déterminé dans cette partie l'influence des principaux paramètres sur l'érosion. Puis, on a identifié la réponse du sol testé à la suffusion en relation avec les interactions entre les facteurs étudiés. Les résultats de cette étude paramétrique seront exploités dans le dernier chapitre pour proposer une nouvelle approche pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à l'érosion.

Chapitre V

*« Evaluation de la stabilité interne des
milieux granulaires »*

Chapitre V : Evaluation de la stabilité interne des milieux granulaires

V.1. Introduction:

La connaissance de la vulnérabilité d'un sol à l'érosion est un enjeu important pour la prédiction de son comportement vis-à-vis de l'écoulement où des mesures préventives peuvent être prises en considération lors de la conception des différents ouvrages. Dans la synthèse bibliographique, nous avons exposé les principaux critères proposés dans la littérature pour l'évaluation de la stabilité interne des sols. Une analyse de ces critères nous a permis d'identifier les avantages et les limites des approches existantes.

Dans ce chapitre, nous allons en premier lieu évaluer l'applicabilité des différents critères pour l'estimation de la susceptibilité à la suffusion des sols testés par confrontation avec les résultats de l'étude expérimentale. Puis, un nouveau modèle sera proposé pour l'évaluation de la stabilité interne vis-à-vis de la suffusion des sols non cohérents. Ce modèle doit tenir en compte des principaux paramètres pouvant contribuer dans la réponse des sols à l'érosion.

V.2. Résultats expérimentaux de la deuxième campagne d'essais:

Dans le but de déterminer l'influence de la granulométrie de la fraction grossière sur les processus d'érosion, une deuxième campagne d'essais a été réalisée sur des mélanges de sables et de fines. Les résultats seront comparés à ceux obtenus dans les essais menés sur le sable de Kharouba. Les matériaux utilisés sont des sables commercialisés par l'entreprise 'Adwan Chemicals', qui sont caractérisés par des granulométries bien définies. Cinq distributions granulométriques seront testées, identifiées par C1, C2, C3, C4 et C5. Les courbes granulométriques de ces matériaux sont représentées dans la figure (5.1).

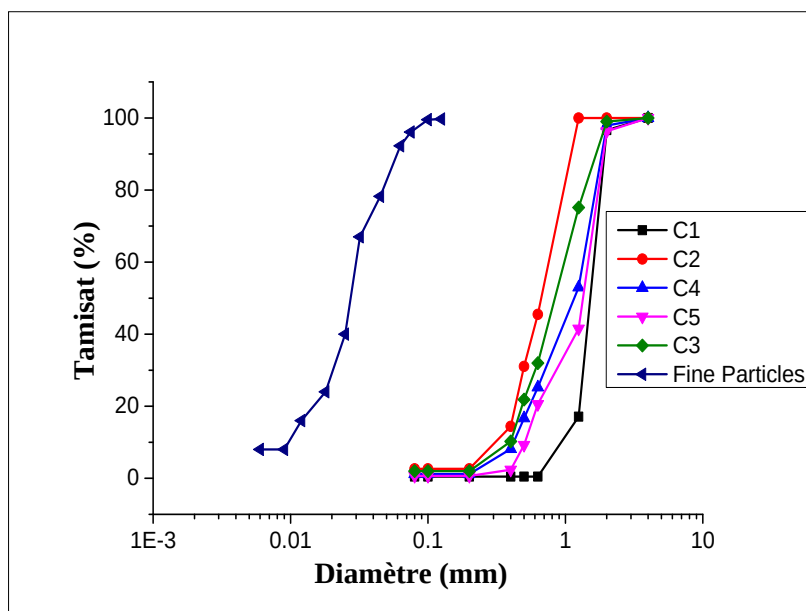


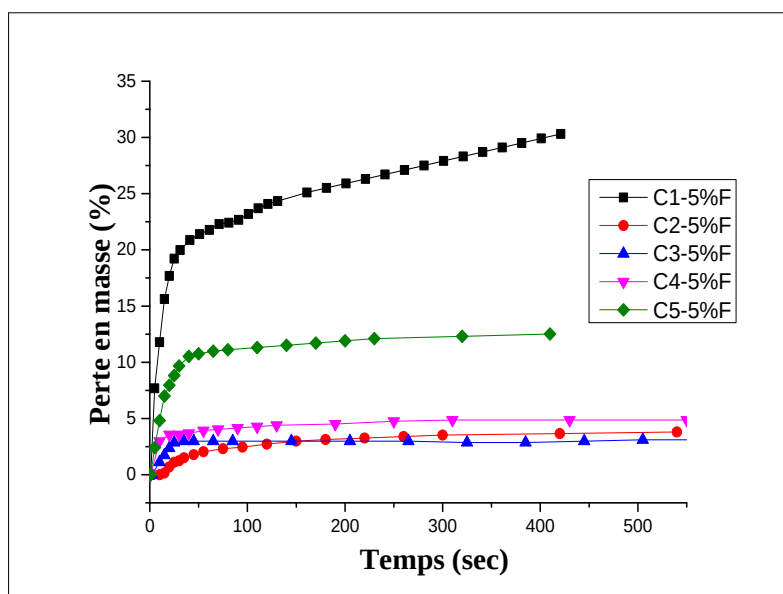
Figure 5.1. Courbes granulométriques des matériaux

Des essais de suffusion ont été réalisés sur des mélanges de sables et de fines (farine de silice) avec différents pourcentages en masse et sous différentes conditions d'essais. Les propriétés physiques des matériaux testés sont représentées dans le tableau 5.1. Pour les différents mélanges, les échantillons sont identifiés par Cx-F%, avec $x = 1-5$ indique la référence du sable utilisé comme fraction grossière, et $F = 5-20\%$ représente le pourcentage en masse des particules fines. Le protocole d'essai ainsi que le dispositif utilisé dans cette campagne sont les mêmes que ceux décrits dans le troisième chapitre.

La mesure de la quantité des particules drainées à l'extérieur de l'échantillon sous l'effet des forces d'écoulement est le premier critère utilisé pour déterminer le potentiel d'érosion des sols testés. La figure (5.2) présente l'évolution de la perte en masse des particules fines pour des échantillons contenant un pourcentage initial de fines égal à 5%, et soumis au même gradient hydraulique $i = 20\text{m/m}$. Nous constatons que la perte en masse des particules fines est plus importante pour l'échantillon C1-5%F que celle pour l'échantillon C5-5%F, et elle est très faible pour les autres échantillons. La première remarque qu'on peut tirer à partir de ce graphe est que pour la même quantité initiale de fines et sous les mêmes conditions hydrauliques, l'érodabilité dépend de la granulométrie de la phase solide constituant le squelette du sol.

Tableau 5.1: Propriétés physiques des matériaux testés

Echantillon	Pourcentage des fines (%)	Diamètre moyen D_{50} (mm)	Diamètre effectif D_{10} (mm)	Coefficient d'uniformité C_u (-)	Coefficient de courbure C_u (-)
Silica flour	-	0.03	0.01	3.00	1.33
C1	-	1.60	0.93	1.81	1.30
C2	-	0.67	0.31	2.44	1.04
C3	-	0.84	0.39	2.50	0.93
C4	-	1.21	0.42	3.39	0.82
C5	-	1.42	0.54	2.89	0.89
C1-5%F	5	1.58	0.77	2.16	1.52
C1-10%F	10	1.56	0.65	2.56	1.76
C1-20%F	20	1.52	0.04	42.63	25.50
C2-5%F	5	0.65	0.24	3.05	1.24
C2-10%F	10	0.63	0.06	12.00	4.69
C2-20%F	20	0.58	0.03	21.34	7.65
C3-5%F	5	0.88	0.27	3.85	1.09
C3-10%F	10	0.85	0.07	15.15	4.00
C3-20%F	20	0.79	0.04	27.20	6.05
C4-5%F	5	1.12	0.31	4.52	0.98
C4-10%F	10	1.03	0.09	15.18	2.85
C4-20%F	20	0.90	0.04	36.71	5.32
C5-5%F	5	1.40	0.44	3.43	0.86
C5-10%F	10	1.36	0.24	6.33	1.31
C5-20%F	20	1.25	0.04	38.24	5.99

Figure 5.2. Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($F = 5\%$, $i = 20\text{m/m}$)

Nous remarquons aussi que même pour l'échantillon C1-5%F, qui présente un potentiel élevé d'érosion, la quantité des particules érodées est inférieure à la quantité maximale des particules érodables (C_0). Cela confirme les constatations faites pour le sol de Kharouba. La suffusion est donc toujours accompagnée de la filtration d'une proportion des particules érodées. Ce phénomène doit être pris en considération dans l'étude de l'érosion.

L'évolution de la perte en masse des particules durant l'érosion pour les échantillons C1-5%F, C1-10%F et C1-20%F sollicités par un gradient hydraulique égal à 5m/m et 15m/m est représentée dans les figures (5.3) et (5.4) respectivement. L'analyse des courbes nous indique que la quantité initiale des fines ainsi que l'intensité de la sollicitation hydraulique influent considérablement sur l'érodabilité des sols testés. La quantité des particules érodées augmente avec l'augmentation du gradient hydraulique appliqué. La perte en masse des particules fines est plus importante pour les échantillons soumis à un gradient égal à 15m/m que celle pour les échantillons sollicités par un gradient égal à 5m/m, et cela pour la même quantité initiale de fines. Nous constatons aussi que cette évolution affiche la même tendance pour les différents gradients appliqués. L'allure des courbes pour les échantillons instables est marquée par une croissance rapide durant les premières minutes, suivie par une évolution lente et quasi-linéaire vers la fin de l'essai.

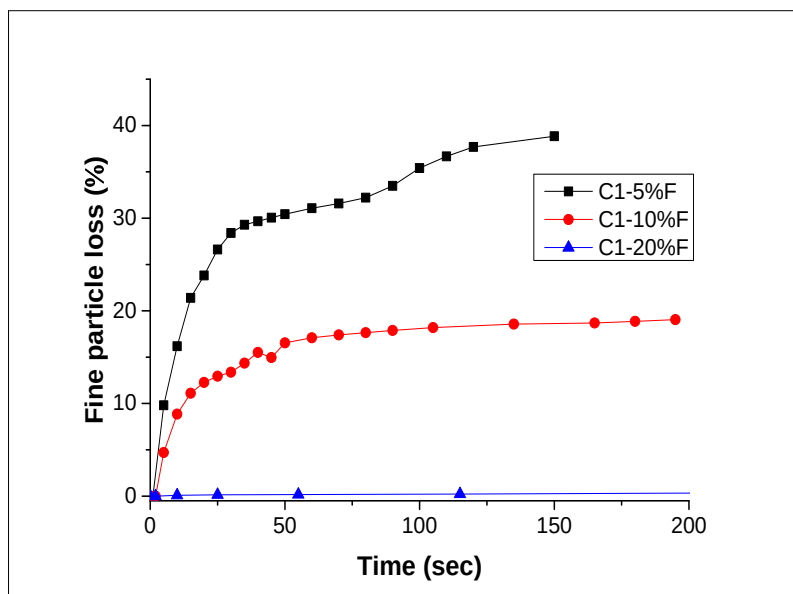


Figure 5.3. Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 5\text{m/m}$)

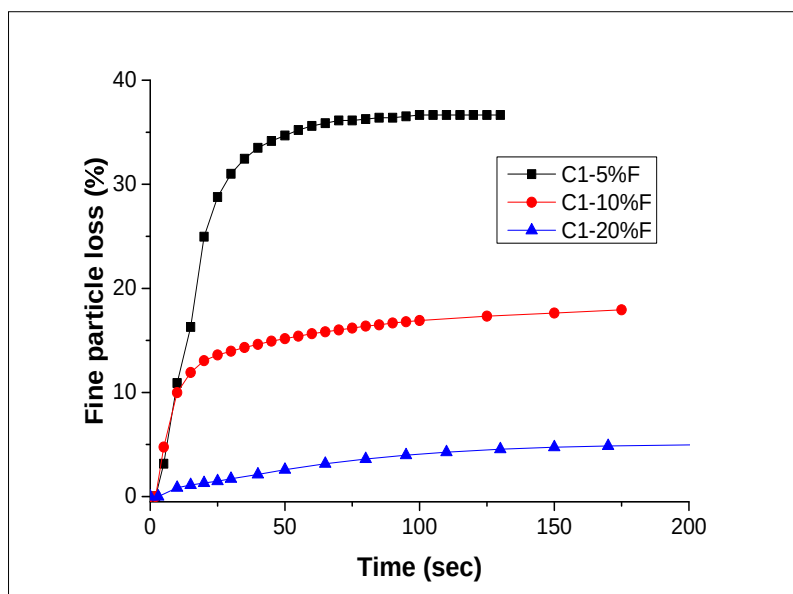


Figure 5.4. Perte en masse des particules fines durant l'érosion ($i = 15\text{m/m}$)

Ces observations confirment les constatations faites concernant l'influence du pourcentage des fines et du gradient hydraulique sur l'érodabilité du sol de Kharouba. En fait, l'accroissement de la quantité des fines présente dans la matrice du sol améliore sa résistance à l'érosion, et l'augmentation de l'intensité de la charge hydraulique favorise l'arrachement, le transport et le drainage des particules à l'extérieur du milieu poreux.

La mobilité des particules fines dans les échantillons contenant de faibles pourcentages de fines est favorisée par leur grande porosité. L'augmentation de la quantité des particules fines réduit le volume des vides, et par conséquent diminue la porosité du milieu. La mobilité des particules devient difficile. Les échantillons contenant une quantité importante de fines sont stables vis-à-vis de la suffusion.

Pour nous renseigner sur les changements locaux de la structure du sol par la migration des particules fines sous écoulement, nous avons étudié l'évolution de la porosité dans les échantillons testés par comparaison de leur porosité finale n_f à la fin de chaque essai, avec leur porosité initiale n_0 .

Après chaque test, l'échantillon de sol est divisé en trois parties : une partie supérieure (P1), une partie médiane (P2) et une partie inférieure (P3). La porosité finale de chaque partie de l'échantillon est mesurée puis comparée à la porosité initiale. La figure (5.5) illustre les valeurs du rapport n_f/n_0 pour quelques échantillons testés. Dans les parties où ($n_f/n_0 > 1$), la porosité finale est supérieure à la porosité initiale, cela veut dire que la porosité est augmentée dans les zones où les particules fines ont été érodées. Les zones de colmatage, où les particules érodées ont été piégées, sont caractérisées par une diminution de la porosité ($n_f/n_0 < 1$).

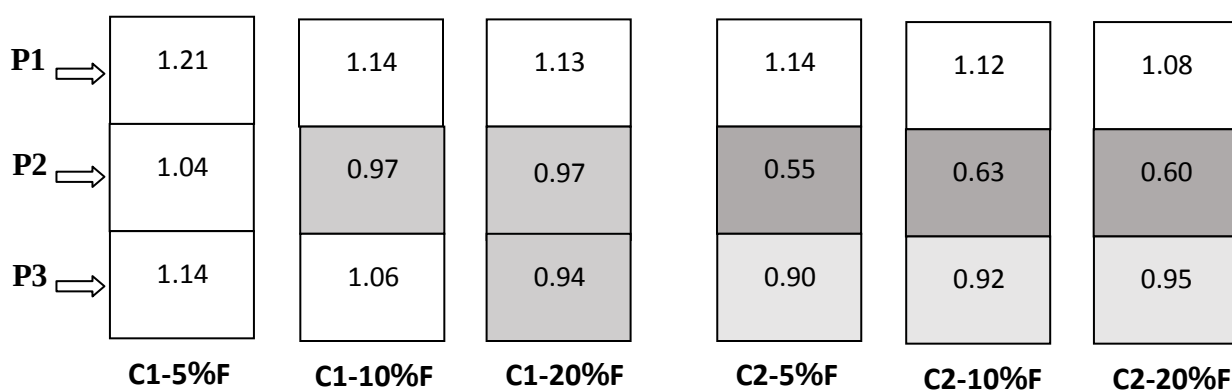


Figure 5.5. Variations du rapport (n_f/n_0) dans les différentes parties de l'échantillon

Les échantillons composés de sable C1 comme fraction grossière, avec les différents pourcentages de fines, sont qualifiés comme instables par rapport aux quantités importantes de particules drainées par l'écoulement. Pour ces échantillons, nous avons remarqué que la porosité finale est supérieure à la porosité initiale dans les trois parties de l'échantillon C1-5%F. Pour l'échantillon C1-10%F, $n_f > n_0$ dans les parties P1 et P3. Tandis que, $n_f < n_0$ dans la zone P2 de l'échantillon. Pour l'échantillon C1-20%F, $n_f < n_0$ au niveau des parties P2 et P3, par contre $n_f > n_0$ dans la partie P1. Pour l'échantillon C1-5%F, et en raison de la porosité élevée du matériau, les particules arrachées par les forces d'écoulement ont été facilement transportées et évacuées à l'extérieur du milieu. Pour les deux échantillons, C1-10%F et C1-20%F, la porosité initiale des deux matériaux est faible par rapport à celle de l'échantillon C1-5%F en raison de la quantité relativement élevée des particules fines. Cela a diminué la perméabilité des milieux. Une partie des particules arrachées par l'écoulement à l'amont des échantillons a été piégée dans d'autres horizons. Néanmoins, la quantité des particules filtrées

reste faible ($n_f / n_0 \approx 1$). Cela peut expliquer les quantités assez importantes des particules érodées pour les trois échantillons. Nous avons constaté aussi que l'évolution du rapport n_f / n_0 , donc de la porosité, diminue avec l'augmentation de la quantité initiale des fines.

Les échantillons composés de sable C2 comme fraction grossière mélangé avec différentes proportions de fines, sont qualifiés comme stables vis-à-vis de la suffusion. Les quantités des particules érodées, sous différentes conditions d'écoulement, sont négligeables. Pour les échantillons C2-5%F, C2-10%F et C2-20%F, nous avons constaté que $n_f > n_0$ dans les parties P1, et $n_f < n_0$ au niveau des parties P2 et P3 des échantillons. Cela est expliqué par le fait qu'une faible quantité de particules fines a été mobilisée à l'amont de l'échantillon puis elle a été piégée au cœur du milieu, où les parties P2 et P3 ont été colmatées en raison de la faible perméabilité des matériaux.

L'analyse de l'évolution de la porosité nous indique que les particules fines mobilisées par les forces d'écoulement vont être transportées dans le sens d'écoulement, puis elles seront capturées par la structure primaire du sol si la géométrie de cette dernière peut assurer leur filtration. Ce type de structures est 'internellement stable'. Dans les sols instables, une grande quantité de particules mobilisées sera drainée à l'extérieur du milieu.

Les résultats de l'étude paramétrique menée sur le sol de Kharouba (dans le troisième chapitre), ainsi que ceux obtenus dans cette deuxième campagne d'essais, vont nous permettre de lier l'érodabilité des sols aux paramètres suivants : 1) la granulométrie de la phase solide ; 2) la quantité initiale des particules fines présente dans la matrice du sol ; 3) l'intensité de la charge hydraulique ; 4) l'état de contrainte du sol ; 5) la porosité initiale de la phase solide ; 6) la porosité globale du milieu (qui tient en considération la réduction de la porosité de la phase solide par la présence des fines).

Une évaluation adéquate de l'érodabilité des sols non cohérents doit tenir en compte les paramètres sélectionnés à partir de l'étude expérimentale. Une analyse critique des modèles proposés dans la littérature est établie dans la section suivante afin de vérifier leur faisabilité pour l'évaluation de la stabilité interne des sols testés, et identifier leurs insuffisances.

V.3. Applicabilité des approches proposées dans la littérature:**V.3.1. Approches géométriques basées sur l'analyse de la granulométrie des sols:**

L'évaluation de la stabilité interne des sols testés par l'application des critères basés sur l'analyse de la distribution granulométrique des sols, ainsi que la classification de la stabilité des sols selon les résultats des essais de laboratoire sont représentés dans le tableau 5.2.

Nous remarquons que la plupart des critères classifient les matériaux testés comme instables, à l'exception du critère de Istomina (1957) qui classifie certains échantillons comme stables et d'autres comme instables. Le critère de Wan et Fell (2008) positionne certains mélanges dans une zone transitoire.

La comparaison des résultats obtenus par l'application des critères existants avec les résultats expérimentaux indique que les méthodes d'évaluation de la stabilité interne des sols, basées sur l'analyse de la distribution granulométrique, sont très conservatives. La plupart des modèles ont considéré les matériaux testés comme instables tandis que les résultats de l'étude expérimentale les classifient comme étant stable vis-à-vis de l'érosion. Cela est expliqué par le fait que chaque méthode a été développée pour un sol spécifié. La plupart de ces modèles ont été élaborés pour la conception des filtres pour les ouvrages de retenue, tels que les digues et les barrages. Par conséquent, elles ne couvrent pas toutes les granulométries et notamment la gamme des sols étudiés.

Tableau 5.2: Evaluation de la stabilité interne des matériaux testés par les critères granulométriques

Spécimens	Istomin a (1957)	Kezdi (1979)	DeMello (1975)	Kovac (1981)	Kenney & Lau (1985)	Burnkv a (1993)	Wan & Fell (2008)	Liu (2005)	Mao (2005)	Li (2008)	Li & Fannin (2013)	Résultats essais
KH-5%F	S	U	U	U	U	U	S	U	U	U	U	U
KH-10%F	S	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	U
KH-15%F	S	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	U
KH-20%F	S	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	U
C1-5%F	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
C1-10%F	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
C1-20s%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
C2-5%F	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C2-10%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C2-20s%F	U	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	S
C3-5%F	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C3-10%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C3-20s%F	U	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	S
C4-5%F	S	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	S
C4-10%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C4-20s%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S
C5-5%F	S	U	U	U	U	U	T	U	U	U	U	U
C5-10%F	S	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
C5-20%F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	S

U : instable. S : stable. T : zone transitoire

V.3.2. Approches géométriques basées sur l'analyse de la distribution de la taille des constrictions:

La distribution de la taille des constrictions dans un milieu poreux, qui représente la distribution cumulée des diamètres des constrictions de sa fraction grossière (du filtre) est physiquement la meilleure façon de déterminer la capacité de rétention d'un sol (Silveira et al., 1975 ; Indraratna et al., 2007 ; Vincens et al., 2015). Trois différentes approches ont été proposées pour déterminer et calculer la distribution de la taille des constrictions : une approche expérimentale, une approche numérique et une approche analytique (Vincens et al., 2015 ; Shire et O'Sullivan, 2016).

Dans ce travail, nous avons utilisé une méthode analytique basée sur le concept de 'cercles inscrits' proposé par Silveira et al. (1975). Le principe de cette méthode est d'idéaliser le milieu poreux en une représentation plane (2D) où les particules grossières du sol, ainsi que les constrictions, sont présentées par des cercles. L'état dense du sol est représenté par un arrangement de trois sphères (Figure 5.6a). Tandis que, un état lâche est présenté par un arrangement de quatre sphères (Figure 5.6b).

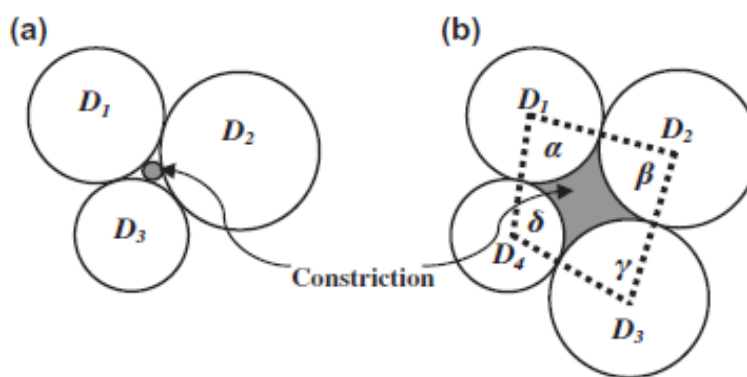


Figure 5.6. Arrangement des particules
a) Etat dense ; b) Etat lâche (Silveira et al. 1975)

Pour un arrangement dense des particules, la taille des constriction D_{CD} qui représente la taille de la plus grande particule qui peut passer à travers le vide formé par l'arrangement de trois particules, peut être calculée par la formule suivante (Humes, 1996) :

$$\left(\frac{2}{D_1}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_2}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_3}\right)^2 + \left(\frac{2}{D_{CD}}\right)^2 = 0.5 \left[\left(\frac{2}{D_1}\right) + \left(\frac{2}{D_2}\right) + \left(\frac{2}{D_3}\right) + \left(\frac{2}{D_{CD}}\right) \right]^2 \quad (5.1)$$

Avec D_1 , D_2 et D_3 les diamètres des trois particules qui forment le groupe (Figure 5.6a).

Pour un arrangement lâche des particules, la taille des constriction D_{CL} peut être calculée par la formule proposée par Silveira et al. (1975) :

$$D_{CL} = \sqrt{\frac{4S_{Cmax}}{\pi}} \quad (5.2)$$

Avec S_{Cmax} est la surface maximale inscrite entre les quatre particules tangentes (Figure 5.6b), qui peut être calculée par la formule suivante (Silveira et al., 1975) :

$$S_C = \frac{1}{8} \left[(D_1 + D_2)(D_1 + D_4) \sin \alpha + (D_2 + D_3)(D_3 + D_4) \sin \gamma - (\alpha D_1^2 + \beta D_2^2 + \gamma D_3^2 + \delta D_4^2) \right] \quad (5.3)$$

Locke et al. (2001) ont proposé une formule pour calculer la taille des constriction D_C à n'importe quelle valeur de la densité relative R_d :

$$D_C = D_{CD} + P_C (1 - R_d) (D_{CL} - D_{CD}) \quad (5.4)$$

D_C est la taille des constriction correspondent au pourcentage des particules P_C . D_{CD} et D_{CL} sont les tailles des constriction pour des arrangements dense et lâche des grains, correspondant au même pourcentage P_C .

La méthode utilisée pour calculer la distribution de la taille des constriction est décrite en détail dans les travaux de Indraratna et Raut (2006) ; Indraratna et al. (2007) ; Reboul et al. (2010) ; Dallo et al. (2013) ; Vincens et al. 2015.

L'évaluation de la stabilité interne des sols par cette approche est basée sur la détermination d'un diamètre de contrôle à partir de la courbe représentant la distribution cumulée de la taille des constriction de la partie grossière du sol. Ce diamètre représente la taille maximale des particules qui peuvent être transportées à travers le filtre, il sera comparé à

un diamètre caractéristique de la fraction des particules fines pour vérifier la possibilité de filtration.

Le tableau (5.3) illustre les résultats de l'application de quelques modèles, basés sur ce critère, sur les sols testés. En comparaison avec les résultats expérimentaux, nous constatons que les critères de Kenney et Lau (1984) ; Indraratna et al. (2011) et Dallo et Wang (2016) donnent deux seules estimations erronées de la stabilité. Tandis que celui de Dallo et al. (2013) donne six estimations erronées. Les modèles basés sur l'analyse de la distribution de la taille des constriction donnent une meilleure estimation de la stabilité interne des sols que ceux basés sur l'analyse de la distribution granulométrique des sols. Cependant les limites de cette approche seront discutées dans la section prochaine où une nouvelle méthode sera proposée pour une meilleure prédiction de la susceptibilité des sols à la suffusion.

Tableau 5.3: Evaluation de la stabilité interne des sols testés par les critères de la taille des constriction

Spécimens	Kenney & Lau 1984	Indraratna & al. 2011	Dallo & al. 2013	Dallo & Wang 2016	Résultats essais
KH1-5%F	U	U	S	U	U
KH1-10%F	U	U	S	U	U
KH1-15%F	U	U	S	U	U
KH1-20%F	U	U	S	U	U
C1-5%F	U	U	U	U	U
C1-10%F	U	U	U	U	U
C1-20%F	S	U	U	U	U
C2-5%F	S	S	S	S	S
C2-10%F	S	S	S	S	S
C2-20%F	S	S	S	S	S
C3-5%F	S	S	S	S	S
C3-10%F	S	S	S	S	S
C3-20%F	S	S	S	S	S
C4-5%F	U	S	S	S	S
C4-10%F	S	S	S	S	S
C4-20%F	S	S	S	S	S
C5-5%F	U	S	S	S	U
C5-10%F	U	S	S	S	U
C5-20%F	S	S	S	S	S

U : instable. S : stable

V.4. Proposition d'une nouvelle approche géométrique pour l'évaluation de la stabilité interne des sols:

L'évaluation de la susceptibilité à la suffusion des sols par les critères granulométriques est basée sur l'analyse de la distribution de la taille des grains constituant la structure primaire du matériau où des diamètres spécifiques de leur courbe granulométrique sont utilisés. Plusieurs paramètres du sol ne sont pas pris en considération dans cette méthode, tels que l'influence de la quantité des fines et l'effet de la compacité. Parmi les modèles proposés dans cette approche, aucun modèle ne peut être appliqué pour tous les types de sols pour la vérification de leur stabilité à la suffusion.

Par rapport aux critères granulométriques, les critères basés sur l'analyse de la distribution de la taille des constriction donnent une meilleure modélisation physique de la suffusion. L'avantage de cette approche est que tous les diamètres des grains constituant la courbe granulométrique du sol sont pris en considération dans la détermination de la distribution de la taille des constriction avec la possibilité de prendre en considération la densité relative du matériau. L'inconvénient de cette méthode est que les diamètres des constriction sont déterminés uniquement à partir des diamètres des grains de la fraction grossière, avec prise en compte des possibilités de leur arrangement, mais elle ne prend pas en considération la forme de la courbe granulométrique ainsi que l'influence de la quantité des particules fines sur la porosité du milieu.

Dans notre modèle, et en se basant sur les résultats de l'étude expérimentale, nous considérant que la probabilité pour que la suffusion se développe dans un sol non cohérent (exprimer dans l'équation 5.5 par S_p), dépend de la distribution granulométrique de la fraction grossière (structure primaire du sol) $GSD^{(C)}$, de la distribution granulométrique de la fraction des fines (structure secondaire du sol) $GSD^{(F)}$, de la distribution de la taille des constriction de la fraction grossière CSD , de la quantité initiale des fines $F\%$, de la porosité de la fraction grossière n_c , et de la porosité globale du milieu n . Cela peut être exprimé par l'équation (5.5) :

$$S_p = f\left(GSD^{(C)}, GSD^{(F)}, CSD, F\%, n, n_c\right) \quad (5.5)$$

Dans l'équation (5.5) nous n'avons pas pris en considération l'effet des conditions hydrauliques car le but de cette partie est d'évaluer géométriquement la stabilité interne du sol. Nous avons considéré que les forces d'écoulement appliquées sont suffisantes pour provoquer la suffusion dans les matériaux géométriquement instables. L'influence de la compacité du sol est prise en considération dans la détermination des diamètres des constrictiones en termes de densité relative conformément à la relation (5.4) proposée par Locke et al. (2001). Les effets de d'autres paramètres sur les processus d'érosion ; tels que la forme des grains et l'homogénéité du milieu ont été négligées par rapport à ceux pris dans notre modèle, et cela en se référant aux travaux de Sadaghiani et Witt (2011).

La distribution de la taille des particules de la partie grossière $GSD^{(c)}$ et celle de la fraction des fines $GSD^{(F)}$ ont été obtenues par analyse granulométrique. La distribution de la taille des constrictiones CSD a été déterminée par la méthode de Silviera et al. (1975), en utilisant les équations (5.1), (5.2), (5.3) ainsi que l'équation (5.4) pour la prise en compte de la densité relative des matériaux conformément aux conditions de laboratoire. La porosité globale du milieu n et celle de la fraction grossière n_c ont été déterminées expérimentalement. Néanmoins, la porosité n_c peut être calculée en fonction de la porosité globale n et de la quantité initiale des fines F par la relation suivante (Ghafghazi and Azhari, 2012) :

$$n_c = n + (1 + n)F \quad (5.6)$$

Il est évident que la porosité du milieu dépend de la quantité initiale de fines. L'augmentation de la quantité de fines présente dans la matrice du sol réduit le volume des pores, la porosité sera par conséquent réduite. L'influence simultanée du pourcentage initial des fines et de la porosité sur les processus d'érosion peut être exprimée par l'introduction du rapport n/n_c dans l'équation (5.5).

La distribution granulométrique de la fraction grossière $GSD^{(c)}$ est exprimée par la variation du coefficient d'uniformité C_u de la fraction solide. La granulométrie de la fraction des fines $GSD^{(F)}$ est représentée par le diamètre caractéristique des particules érodables d_{85} , qui présente le diamètre correspondant à 85% en masse des particules constituant la fraction fine. Les diamètres des constrictiones de la partie grossière du sol CSD seront représentés par le diamètre de contrôle de la taille des constrictiones D_{C35} suggéré par (Indraratna et al., 2006;

Indraratna et al., 2007; Dallo et al., 2013; Dallo & Wang, 2016), et qui représente le diamètre des constriction correspondant à 35% en masse des particules grossières.

A partir de l'équation (5.5), la probabilité de développement de la suffusion peut être exprimée par la relation suivante :

$$S_p = f(C_u, n/n_c, D_{C35}, d_{85}) \quad (5.7)$$

Dans cette équation, les paramètres C_u , n/n_c et D_{C35} caractérisent la fraction grossière du sol et d_{85} représente la fraction des fines érodables.

L'évaluation de la stabilité interne du sol, et donc de sa susceptibilité à la suffusion, se fait comme expliqué précédemment par la vérification de la possibilité de filtration des particules érodables. Pour cela nous avons déterminé un diamètre de contrôle de la partie grossière du matériau D^* en fonction des paramètres caractérisant cette phase. A partir de l'équation (5.7), D^* sera exprimé comme suit :

$$D^* = \left(f(C_u) \cdot C_u + f(n/n_c) \cdot \frac{n}{n_c} \right) D_{C35} \quad (5.8)$$

Avec $f(C_u)$ est un facteur qui dépend du coefficient d'uniformité, et $f(n/n_c)$ est en fonction de la porosité et de la quantité initiale des fines. Ces deux paramètres ; $f(C_u)$ et $f(n/n_c)$ ont été déterminés par une analyse statistique des résultats obtenus à partir des essais d'érosion réalisés sur les sols testés. Les données relatives à chaque échantillon (les porosités n et n_c , le coefficient d'uniformité C_u , le D_{C35} et le d_{85}) ont été classifiées et analysées à l'aide d'un logiciel d'analyse statistique (SPSS Statistics V25). Dans ce cas, les valeurs mesurées présentent des points dans un espace permettant de classer les échantillons comme stables ou instables. Notre objectif est de déterminer une fonction de classification qui nous permettra de prédire la classe de chaque échantillon (stable/instable). La méthode la plus appropriée pour ce type d'analyse est la méthode d'analyse discriminante linéaire, généralement utilisée dans les statistiques pour décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis d'un ensemble d'observations à partir d'une série de variables. Un module d'analyse linéaire est prédéfini dans le logiciel SPSS Statistics ; où il suffit seulement d'introduire les variables à analyser et de définir les groupes de classes recherchées.

Le diamètre de contrôle de la fraction grossière peut être calculé par la formule suivante :

$$D^* = \left(0,054C_u + 0,638 \frac{n}{n_c} \right) D_{C35} \quad (5.8)$$

La limite entre les matériaux stables et les matériaux instables peut être exprimée mathématiquement par ($D^*/d_{85} = 1$). Si le rapport ($D^*/d_{85} < 1$) le sol est intérieurement stable. Tandis que, si ($D^*/d_{85} > 1$) le sol sera considéré comme instable.

Les résultats de l'application de cette approche sur les sols étudiés sont résumés dans le tableau 5.4. En comparaison avec les modèles existants, le critère proposé offre une meilleure estimation de la susceptibilité des sols non cohérents à la suffusion. La classification de la stabilité interne des sols testés par cette méthode est conforme avec les résultats de l'étude expérimentale. L'avantage de cette nouvelle approche réside dans le fait qu'elle prend en compte le maximum de paramètres pouvant influencer les processus d'érosion, et qui n'ont pas été pris en considération dans les modèles existants.

Tableau 5.4: Evaluation de la stabilité des sols testés par l'approche proposée

Spécimens	C_u (-)	n/n_c (-)	D_{C35} (mm)	D^* (mm)	D^*/d_{85}	Estimation stabilité	Résultats essais
KH-5%F	1.62	0.93	0.175	0.119	1.41	U	U
KH-10%F	1.62	0.86	0.175	0.111	1.31	U	U
KH-15%F	1.62	0.78	0.175	0.102	1.20	U	U
KH-20%F	1.62	0.68	0.175	0.091	1.08	U	U
C1-5%F	1.81	0.88	0.221	0.146	1.71	U	U
C1-10%F	1.81	0.74	0.221	0.126	1.48	U	U
C1-20%F	1.81	0.52	0.221	0.094	1.11	U	U
C2-5%F	2.44	0.94	0.077	0.056	0.66	S	S
C2-10%F	2.44	0.86	0.077	0.052	0.62	S	S
C2-20%F	2.44	0.69	0.077	0.044	0.52	S	S
C3-5%F	2.50	0.93	0.092	0.067	0.79	S	S
C3-10%F	2.50	0.85	0.092	0.062	0.73	S	S
C3-20%F	2.50	0.66	0.092	0.051	0.60	S	S
C4-5%F	3.39	0.93	0.109	0.085	1.00	S	S
C4-10%F	3.39	0.85	0.109	0.079	0.93	S	S
C4-20%F	3.39	0.67	0.109	0.067	0.78	S	S
C5-5%F	2.89	0.90	0.131	0.096	1.13	U	U
C5-10%F	2.89	0.79	0.131	0.086	1.02	U	U
C5-20%F	2.89	0.54	0.131	0.066	0.77	S	S

U : instable. S : stable

V.6. Conclusion:

L'évaluation de la stabilité interne des sols est un enjeu important pour la prédiction de leur comportement vis-à-vis de l'écoulement. Plusieurs modèles géométriques existent et qui peuvent être utilisés dans l'ingénierie, notamment dans la conception des ouvrages géotechniques. Néanmoins pour certains sols, l'application de ces modèles peut aboutir à des résultats contradictoires. A l'issue de cette étude expérimentale, une nouvelle approche a été proposée pour la prédiction de la stabilité interne des sols non cohérents. Dans cette approche, les principaux paramètres pouvant contrôler les processus de la suffusion ont été pris en considération pour dépasser les limites des modèles existants. En effet, les résultats de l'étude paramétrique menée sur des mélanges de sables et de fines sous différentes conditions d'essais, nous ont permis de lier l'érodabilité des sols testés à la granulométrie de la fraction grossière, à la granulométrie de la fraction fines, à la quantité initiale des fines, à la porosité de la fraction grossière, à la porosité globale du sol, ainsi que de son état de contrainte.

L'évaluation de la susceptibilité à la suffusion est basée sur l'approche qui utilise le concept de l'analyse de la distribution de la taille des constriction du milieu. Cette approche a été adoptée car elle donne une meilleure description physique de la capacité de rétention des sols par rapport aux méthodes basées sur l'analyse de la granulométrie. La distribution de la taille des constriction des sols étudiés a été déterminée par une méthode analytique qui modélise le milieu poreux en une représentation plane où les particules ainsi que les constriction sont présentées par des cercles. Les données déterminées à partir des résultats de l'étude expérimentale pour chaque échantillon ont été analysées par un logiciel de statistique pour déterminer une fonction de classification, qui nous permet de prédire la classe de chaque échantillon comme stable ou instable. Par suite à cette analyse, une formule empirique a été proposée pour calculer un diamètre de contrôle de la fraction grossière qui prend en considération les principaux paramètres pouvant influencer les processus d'érosion. La limite entre les matériaux stables et les matériaux instables peut être déterminée par la comparaison de ce diamètre de contrôle avec un diamètre caractéristique des particules érodables. Par rapport aux critères existants, l'approche proposée donne une meilleure estimation de la susceptibilité des sols testés à la suffusion.

« Conclusion générale et perspectives »

Conclusion générale et perspectives

Le phénomène d'érosion est considéré comme l'une des principales causes de dégradation des sols et d'endommagement des ouvrages de génie civil. L'ampleur de ce problème s'est accentuée durant les dernières années en raison des changements climatiques où des événements pluvieux extrêmes sont de plus en plus fréquents et dévastateurs. Malgré les efforts déployés par la communauté scientifique pour réduire ses risques, en continu à enregistrer chaque année des événements catastrophiques liés à l'érosion.

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer la susceptibilité des sols non cohérents à l'érosion. En fait, la connaissance de la vulnérabilité d'un sol à l'érosion est un enjeu important pour la prédiction de son comportement vis-à-vis de l'écoulement où des mesures préventives peuvent être prises en considération dans la conception des ouvrages.

L'étude bibliographique exposée dans la première partie de cette thèse est composée de deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté les éléments nécessaires à la compréhension du phénomène d'érosion par l'étude des mécanismes qui régissent les processus de transport et de rétention des particules dans les milieux poreux. La sollicitation hydraulique d'un sol peut provoquer en effet la migration de ses particules. Si un écoulement de surface est considéré, l'érosion sera qualifiée comme externe. Par contre, l'érosion interne est induite par un écoulement sous terrain. Pour mettre en évidence l'importance de cette problématique, nous avons exposé les multiples conséquences de l'érosion externe sur la dégradation des sols à l'échelle mondiale et locale ainsi que les différentes pathologies des ouvrages liées à l'érosion interne. A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les principales méthodes et techniques d'essais développées pour la caractérisation de l'érosion.

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué une recherche bibliographique détaillée sur l'instabilité interne des sols par suffusion. Cette forme d'érosion peut se produire dans les sols non cohérents à structure bimodale. Elle correspond à l'arrachement et au transport des particules fines à travers les constriction de la structure primaire du sol. La migration des particules par suffusion peut provoquer des changements dans la microstructure

du sol, et par conséquent des modifications de ses caractéristiques hydrauliques et mécaniques. Les études ultérieures sur ce phénomène ont montré que ses aspects sont très complexes, et s'il n'est pas pris en compte dans la phase conception, ou s'il n'est pas détecté à temps, il peut conduire à la destruction totale de l'ouvrage. Nous avons vu dans cette synthèse bibliographique que de nombreux critères ont été proposés pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion. Les critères géométriques évaluent la stabilité interne des sols par la vérification de leur capacité de filtration des particules érodables. Tandis que les critères hydrauliques s'intéressent à la détermination de la sollicitation hydraulique au-delà de laquelle la suffusion est initiée. Néanmoins, la plupart de ces critères sont empiriques et dépendent de la nature des matériaux testés et des conditions d'essais. D'autre part, nous avons conclu que l'évaluation exacte du risque d'érosion doit se faire par la combinaison des deux approches 'géométrique et hydraulique'. Cet état de l'art nous permis d'identifier les apports et les limites des recherches dans ce domaine.

Dans la deuxième partie de cette recherche, le troisième chapitre a été consacré à la caractérisation de la vulnérabilité de la zone de Kharouba (Mostaganem) à l'érosion. La vulnérabilité naturelle de cette zone aux différentes formes d'érosion a été essentiellement liée à l'érodabilité des formations sableuses caractérisant le site et aux conditions climatiques et topographiques. A ces facteurs s'ajoutent le déséquilibre des formations naturelles par les pratiques humaines. L'évolution du risque durant les dernières années, qui est devenu un souci pour la population, nous a motivé pour mener cette étude afin d'essayer de proposer des solutions pour mieux comprendre et maîtriser les impacts de l'érosion des sols sur la sécurité des personnes et des biens.

Dans le quatrième chapitre, une étude paramétrique a été réalisée sur des échantillons composés de mélange de sable de Kharouba et de fines pour déterminer l'influence de certains paramètres sur l'initiation et l'évolution de la suffusion. Les paramètres variés sont le pourcentage initial de fines, le gradient hydraulique et la pression de consolidation. Les résultats des différents essais ont montré que la réponse des sols à la suffusion dépend fortement de la quantité des fines présente dans la matrice du sol, de l'intensité de la sollicitation hydraulique ainsi que de l'état de compacité du sol. Une corrélation entre le gradient hydraulique critique d'initiation de l'érosion et les paramètres étudiés a été proposée.

Dans le dernier chapitre, nous avons réalisé une deuxième campagne d'essais sur des sables commercialisés par l'entreprise 'Adwan Chemicals'. Le but de ces essais est de déterminer l'influence de la granulométrie de la fraction grossière sur l'érodabilité du sol, et d'identifier les principaux paramètres pouvant influencer les processus d'érosion. Les résultats de cette deuxième campagne et ceux de l'étude paramétrique réalisée sur le sol de Kharouba ont été exploités pour la proposition d'une nouvelle approche pour l'évaluation de la susceptibilité des sols à la suffusion. La comparaison des résultats obtenus par l'application des critères existants et ceux obtenus par la nouvelle approche indique que cette dernière donne une meilleure estimation de la stabilité des sols testés vis-à-vis de la suffusion. Cette méthode peut être utilisée dans les prochaines études de sol ou d'aménagement qui seront menées dans le site de Kharouba.

Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent à de nombreuses perspectives de recherche. On peut citer :

- Extension du modèle proposé à d'autres types de sols.
- Extension de l'étude paramétrique à d'autres paramètres tels que la forme des grains, la durée d'application de la sollicitation hydraulique, l'état de saturation,....
- Reproduire les essais avec un autre dispositif expérimental, notamment l'appareil triaxial pour étudier l'effet de la pression de confinement sur l'érosion.
- Améliorer les techniques de mesures de la quantité des particules érodées.
- Développer un nouveau dispositif afin d'étudier l'influence combinée de la sollicitation hydraulique et mécanique sur l'érosion.
- Réaliser une simulation numérique pour modéliser les processus d'érosion.

« *Références bibliographiques* »

Références bibliographiques :

Achite, M., Touaibia, B., & Ouillon, S. (2006). Erosion hydrique en Algérie du Nord: Ampleur, conséquences et Perspectives. In *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco.*

Adel, H., den, Bakker, K. J., Breteler, M.K. (1988). Internal stability of minestone. *Proceeding International Symposium Modeling Soil Water-Structure interaction*, p. 225-231.

Alem, A., Alhaddad, S., Benamar, A., & Wang, H. (2009). Migration de particules dans un milieu poreux: Erosion interne. XXIVèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil.

Andrianatrehina, L., Souli, H., Fry, J. J., Phan, Q. T., & Fleureau, J. M. (2012). Internal stability of granular materials in triaxial tests. ICSE Paris.

Andrianatrehina, L., Souli, H., Rech, J., Taibi, S., Fry, J. J., Bunieski, S., & Fleureau, J. M. (2017). Determination of the maximum diameter of free fines to assess the internal stability of coarse granular materials. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(3), 332-347.

Andrianatrehina, L., Souli, H., Rech, J., Taibi, S., Fry, J. J., Ding, L., & Fleureau, J. M. (2016). Analysis of the internal stability of coarse granular materials according to various criteria. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(8), 936-953.

Ayadat, T., Belouahri, B., & Ammar, R. A. (1998). La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement des sols. *Revue française de Géotechnique*, (83), 73-81.

Beguin, R. (2011). Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).

Benahmed, N., & Bonelli, S. (2007). Etude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite. In XXV Rencontres Universitaires de Génie Civil (pp. 8-pages).

- Benamar, A., dos Santos, R. N. C., Bennabi, A., & Karoui, T. (2019). Suffusion evaluation of coarse-graded soils from Rhine dikes. *Acta Geotechnica*, 14(3), 815-823.
- Benamar, A., Wang, H., Ahfir, N. D., Alem, A., Masséi, N., & Dupont, J. P. (2005). Effets de la vitesse d'écoulement sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(5), 497-504.
- Benchettouh, A., Kouri, L., & Jebari, S. (2017). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE/GIS techniques and practices conservation suggested for reducing soil erosion in Wadi Mina watershed (northwest, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(4), 79.
- Bendahmane, F. (2005). Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- Bendahmane, F., Marot, D., & Alexis, A. (2008). Experimental parametric study of suffusion and backward erosion. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(1), 57-67.
- Blais, J. P. (2004.). Typologie de l'érosion interne et érosion interne des digues fluviales, Une courte revue bibliographique. In *Colloque technique sur la sécurité des digues fluviales et de navigation* (pp. 65-70).
- Bou Kheir, R., Girard, M. C., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2001). Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens: une revue bibliographique. *Étude et gestion des sols*, 8(4), 231-245.
- Boulaine, J., (1955). Notice explicative de la carte de reconnaissance des sols d'Algérie : feuille de Mostaganem N°21. Inspection Générale de l'Agriculture, Pédologie, C.S N°06, (p 1-19).
- Briaud, J. L., Chen, H. C., Kwak, K. W., Han, S. W., & Ting, F. C. K. (2001). Multiflood and multilayer method for scour rate prediction at bridge piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(2), 114-125.
- Briaud, J. L. (2008). Case histories in soil and rock erosion: woodrow wilson bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(10), 1425-1447.

- Burenkova, V. V. (1993). Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. Filters in geotechnical and hydraulic engineering. Balkema, Rotterdam, 357-360.
- Chang, D. S., Zhang, L., & Xu, T. H. (2012). Laboratory investigation of initiation and development of internal erosion in soils under complex stress states. In Proceedings of the Sixth International Conference on Scour and Erosion (pp. 895-902). Paris: ISSMGE.
- Chang, D. S., & Zhang, L. M. (2011). A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils. *Geotechnical Testing Journal*, 34(6), 579-589.
- Chang, D. S., & Zhang, L. M. (2013). Extended internal stability criteria for soils under seepage. *Soils and Foundations*, 53(4), 569-583.
- Chapuis, R. P. (1992). Similarity of internal stability criteria for granular soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 711-713.
- Chapuis, R. P., & Gatien, T. (1986). An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. *Canadian geotechnical journal*, 23(1), 83-87.
- Chen, C., Zhang, L. M., & Chang, D. S. (2016). Stress-strain behavior of granular soils subjected to internal erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 06016014.
- Cividini, A., & Gioda, G. (2004). Finite-element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils. *International Journal of Geomechanics*, 4(3), 191-198.
- Côté, S. (2010). Critères de stabilité interne pour des matériaux de faible plasticité soumis à l'écoulement de l'eau. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Civil pour l'obtention du grade de Maître es Sciences (M.Sc.). P 237.
- Dallo, Y. A., Wang, Y., & Ahmed, O. Y. (2013). Assessment of the internal stability of granular soils against suffusion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(4), 219-230.

Dallo, Y. A., & Wang, Y. (2016). Determination of controlling constriction size from capillary tube model for internal stability assessment of granular soils. *Soils and Foundations*, 56(2), 315-320.

Daoud, A. (2013). Retour d'expérience sur les inondations dans l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) de 1982 à 2009: de la prévention à la territorialisation du risque. *Revue Géographique de l'Est*, 53(1-2).

De Mello, V. F. (1975). Some lessons from unsuspected, real and fictitious problems in earth dam engineering in Brazil. In *Proceedings 6th Regional Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference for Afrika* (pp. 285-304).

Djoukbala, O., Mazour, M., Hasbaia, M., & Benselama, O. (2018). Estimating of water erosion in semiarid regions using RUSLE equation under GIS environment. *Environmental earth sciences*, 77(9), 345.

Fell, R., Foster, M., & Wan, C. F. (2004). Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping-piping through the embankment. University of New South Wales.

Fell, R., MacGregor, P., Stapleton, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical engineering of dams*. Taylor & Francis Group, plc, London.

Fell, R., & Wan, C. F. (2002). Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test-interpretative report.

Fell, R., & Wan, C. F. (2005). Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping in the foundation and from embankment to foundation. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering. FEMA

Foster, M. A. (1999). The probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping (Doctoral dissertation, University of New South Wales).

Foster, M. A., Spannagle, M., & Fell, R. (1998). Report on the Analysis of Embankment Dam Incidents. UNICIV Report No. R374.

- Foster, M. A., & Fell, R. (1999). *A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods*. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- Fry, J. J. (1997). Internal erosion: Typology, detection, repair. *Barrages and Reservoirs*, (6).
- Ghafghazi, M., & Azhari, F. (2012). A simple method for estimating the non-structural fines content of granular materials. In *6th international conference scour and erosion, ICSE* (pp. 6-016).
- Guidoux, C., Faure, Y. H., Beguin, R., & Ho, C. C. (2010). Contact erosion at the interface between granular coarse soil and various base soils under tangential flow condition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 741-750.
- Haghighi, I. (2012). *Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion: développement d'essais et applications pratiques* (Doctoral dissertation, Paris Est).
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Toumi, S., & Rahmani, S. E. A. (2018). Erosion, suspended sediment transport and sedimentation on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda Dam, Algeria. *Water*, 10(7), 895.
- Herzig, J. P., Leclerc, D. M., & Goff, P. L. (1970). Flow of suspensions through porous media—application to deep filtration. *Industrial & Engineering Chemistry*, 62(5), 8-35.
- Ho, C. C. (2007). *The erosion behavior of revetment using geotextile* (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Humes, C. (1996, May). A new approach to compute the void size distribution curves of protective filters. In *Proceedings of Geofilters* (Vol. 96, pp. 57-66).
- Hanson, G. J., & Hunt, S. (2006, May). Determining the erodibility of compacted soils for embankment dams. In *Proceedings of the 26th Annual USSD Conference* (pp. 311-320).
- Indraratna, B., Raut, A. K., & Khabbaz, H. (2007). Constriction-based retention criterion for granular filter design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(3), 266-276.

Indraratna, B., Nguyen, V. T., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). Assessing the potential of internal erosion and suffusion of granular soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(5), 550-554.

Indraratna, B., & Raut, A. K. (2006). Enhanced criterion for base soil retention in embankment dam filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(12), 1621-1627.

Istomina, V. S. (1957). Filtration stability of soils. *Gostroizdat, Moscow, Leningrad*, 15.

Junior, R. V., Varandas, S. G. P., Fernandes, L. S., & Pacheco, F. A. L. (2014). Groundwater quality in rural watersheds with environmental land use conflicts. *Science of the Total Environment*, 493, 812-827.

Kaoser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M., & Ayadat, T. (2006). The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. *Soil & Sediment Contamination*, 15(5), 481-496.

Ke, L., & Takahashi, A. (2012). Strength reduction of cohesionless soil due to internal erosion induced by one-dimensional upward seepage flow. *Soils and Foundations*, 52(4), 698-711.

Ke, L., & Takahashi, A. (2014a). Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil. *Soils and Foundations*, 54(4), 713-730.

Ke, L., & Takahashi, A. (2014b). Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion. *Geotechnical Testing Journal*, 37(2), 347-364.

Kenney, T. C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G. I., Omange, G. N., & Ume, C. A. (1984). Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(1), 32-43.

Kenney, T. C., & Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian geotechnical journal*, 22(2), 215-225.

Kenney, T. C., & Lau, D. (1986). Internal stability of granular filters: Reply. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 420-423.

- Kezdi, A. (1969). Soil Physics—Developments in Geotechnical Engineering—Selected Topics.
- Kezdi, A. (1979). Soil physics. *Selected topics developments in geotechnical engineering* -25.
- Klik, A., & Eitzinger, J. (2010). Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. *The Journal of Agricultural Science*, 148(5), 529-541.
- Knabb, R. D., Rhome, J. R., & Brown, D. P. (2005). *Tropical cyclone report: Hurricane katrina, 23-30 august 2005*. National Hurricane Center.
- Kouri, L., & Gomer, D. (2010). Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell oranais (Algérie). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), 257-265.
- Kovacs, G. (1981). Developments in water science—seepage hydraulics, Chap 3.2.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). (2015). Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. *Bulletin 164, volume 1: internal erosion processes and engineering assessment*.
- Lachouette, D. (2009). *Modélisation d'une interface fluide/solide avec érosion, application à l'érosion interne* (Doctoral dissertation).
- Lachouette, D., & Bonelli, S. (2008, June). Modélisation de l'érosion par renard hydraulique: du laboratoire à l'ouvrage. 26ième rencontre de l'AUGC.
- Lafleur, J., Mlynarek, J., & Rollin, A. L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(12), 1747-1768.
- Lafleur, J., Mlynarek, J., & Rollin, A. L. (1993). Filter criteria for well graded cohesionless soils. *Filters in geotechnical and hydraulic engineering*, 97-106.
- Lautrin, D. (2003). *Vieillesse et réhabilitation des petits barrages en terre*. Editions Quae.
- Le Bissonnais, Y., & Le Souder, C. (1995). Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des sols*, 2(1), 43-56.
- Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J., & Gorce, M. (2004). Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. *Etude et gestion des sols*, 11, 3.

- Leguédais, S. (2003). *Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés* (Doctoral dissertation).
- Li, M. (2008). *Seepage induced instability in widely graded soils* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Li, M., & Fannin, R. J. (2013). Capillary tube model for internal stability of cohesionless soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 831-834.
- Lim, S. (2006). *Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils*. University of New South Wales.
- Lim, S., & Khalili, N. (2009). An improved rotating cylinder test design for laboratory measurement of erosion in clayey soils. *Geotechnical testing journal*, 32(3), 1-7.
- Liu, J. (2005). Seepage control of earth-rock dams theoretical basis, engineering experiences and lessons.
- Liu, J. (1992). Seepage stability and seepage control of soil. *Water Resources and Electric Power Press, Beijing (in Chinese)*.
- Locke, M., Indraratna, B., & Adikari, G. (2001). Time-dependent particle transport through granular filters. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(6), 521-529.
- Lubočkov, E. A. (1969). The calculation of suffusion properties of noncohesive soils when using the non-suffusion analog. In *Proceedings of the International Conference on Hydraulic Research, Brno, Czechoslovakia* (pp. 135-148).
- Mao, C. X. (2005). Study on piping and filters: Part I of piping. *Rock and Soil Mechanics*, 26(2), 209-215.
- Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H. H., Bendahmane, F., & Sibille, L. (2016). Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology. *Natural Hazards*, 83(1), 365-388.
- Marot, D., Bendahmane, F., & Nguyen, H. H. (2012). Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process. *La Houille Blanche*, (6), 47-53.

- McCarthy, J., & Zachara, J. (1989). ES&T Features: Subsurface transport of contaminants. *Environmental science & technology*, 23(5), 496-502.
- McCarthy, J. F. (1998). Colloid-facilitated transport of contaminants in groundwater: mobilization of transuranic radionuclides from disposal trenches by natural organic matter. *Physics and Chemistry of the Earth*, 23(2), 171-178.
- Meddi, M. (2015). Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du nord. *Larhyss Journal*, 24, 315-336.
- Meddi, M., Toumi, S., & Assani, A. A. (2016). Spatial and temporal variability of the rainfall erosivity factor in Northern Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(4), 282.
- Mehenni, A. (2015). *Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Milligan, V. (1986). Internal stability of granular filters: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 414-418.
- Moffat, R. (2005). *Experiments on the internal stability of widely graded cohesionless soils* (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
- Moore, W. L., & Masch Jr, F. D. (1962). Experiments on the scour resistance of cohesive sediments. *Journal of Geophysical Research*, 67(4), 1437-1446.
- Morsli, B., Habi, M., & Meddi, M. (2013). Dynamique de l'érosion en zone méditerranéenne algérienne: facteurs explicatifs de variation du ruissellement et de l'érosion sous différentes occupations du sol. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 26(2), 89-105.
- Morsli, B., Mazour, M., Mededjel, N., Hamoudi, A., & Roose, E. (2004). Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie. *Sécheresse*, 15(2), 96-104.
- Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol* (Vol. 6). PPUR presses polytechniques.

- Nguyen, C. D., Benahmed, N., Andò, E., Sibille, L., & Philippe, P. (2019). Experimental investigation of microstructural changes in soils eroded by suffusion using X-ray tomography. *Acta Geotechnica*, 14(3), 749-765.
- Nguyen, V. N. (2014). *Caractérisation de l'érosion des sols par le Jet Erosion Test* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale Paris).
- Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. S. (2016). Environmental land use conflicts in catchments: A major cause of amplified nitrate in river water. *Science of the Total Environment*, 548, 173-188.
- Pham, T. L. (2008). *Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide* (Doctoral dissertation).
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., ... & Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), 1117-1123.
- Radilla, G., Aigueperse, A., Bertin, H., Le Thiez, P., & Quintard, M. (1997). Dispersion active en milieu poreux: expériences de laboratoire et interprétation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIB-Mechanics-Physics-Chemistry-Astronomy*, 324(3), 143-150.
- Reboul, N., Vincens, E., & Cambou, B. (2010). A computational procedure to assess the distribution of constriction sizes for an assembly of spheres. *Computers and Geotechnics*, 37(1-2), 195-206.
- Reddi, L. N., Lee, I. M., & Bonala, M. V. (2000). Comparison of internal and surface erosion using flow pump tests on a sand-kaolinite mixture. *Geotechnical testing journal*, 23(1), 116-122.
- Reddi, L. N., & Bonala, M. V. (1997). Analytical solution for fine particle accumulation in soil filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(12), 1143-1152.
- Remini, B., & Avenard, J. (2000). L'envasement des barrages. *Bulletin Réseau Erosion*, (20), 71-165.

- Richards, K. S., & Reddy, K. R. (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4), 381-402.
- Roth, K. (2005). Soil Physics, Lecture Notes. *Institute of Environmental Physics, University of Heidelberg*, 252 p.
- Rousseva, S., Torri, D., & Pagliai, M. (2002). Effect of rain on the macroporosity at the soil surface. *European Journal of Soil Science*, 53(1), 83-93.
- Royet, P. (2005, April). Internal erosion problems encountered on dams and dikes in France (historical cases). In *Workshop on Internal Erosion*.
- Sadaghiani, M. R. S., & Witt, K. J. (2011). Variability of the grain size distribution of a soil related to suffusion. *Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011*, 239-248.
- Saibi, H., & Ehara, S. (2008). Hydrogeology and vulnerability assessment of groundwater resources in the Mostaganem Plateau, Northwestern Algeria. *Journal of Environmental Hydrology*, 16, 1-11.
- Sato, M., & Kuwano, R. (2015). Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil. *Soils and Foundations*, 55(6), 1427-1440.
- Seghir, A., Benamar, A., & Wang, H. (2014). Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. Experiments and modeling. *Transport in Porous Media*, 103(2), 233-247.
- Shaikh, A., Ruff, J. F., Charlie, W. A., & Abt, S. R. (1988). Erosion rate of dispersive and nondispersive clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(5), 589-600.
- Sherard, J. L., & Dunnigan, L. P. (1986). Internal stability of granular filters: Discussion. *Canadian Geotechnical Journal*, 23(3), 418-420.
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement.
- Shire, T., O'Sullivan, C., & Hanley, K. (2014). The influence of finer fraction and size-ratio on the micro-scale properties of dense bimodal materials. *Geomech. Micro Macro* (eds K. Soga, K. Kumar, G. Biscontin and M. Kuo), 1, 231-236.

Shire, T., & O'Sullivan, C. (2016). Constriction size distributions of granular filters: a numerical study. *Géotechnique*, 66(10), 826-839.

Sibille, L., Marot, D., & Sail, Y. (2015). A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter. *Acta Geotechnica*, 10(6), 735-748.

Sibille, L. (2016). *Erosion interne et rupture dans les sols grenus* (Doctoral dissertation, Grenoble 1 UGA-Université Grenoble Alpe).

Silveira, A., de Lorena Peixoto, T., & Nogueira, J. (1975, November). On void size distribution of granular materials. In *Proceedings of the 5th Pan American conference on soil mechanics and foundation engineering, Buenos Aires* (pp. 161-177).

Sjah, J., & Vincens, E. (2013). Determination of the constriction size distribution of granular filters by filtration tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(10), 1231-1246.

Skempton, A. W., & Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3), 449-460.

Souadi, Y. (2011). L'érosion hydrique au Maghreb, étude d'un cas: le bassin versant de l'oued Barbara (Tunisie septentrionale).

Stene, E. A. (1995). *The Teton Basin Project*. Bureau of Reclamation History Program.

Sun, L., Fang, H., Qi, D., Li, J., & Cai, Q. (2013). A review on rill erosion process and its influencing factors. *Chinese geographical science*, 23(4), 389-402.

Tarog, I. (2000). *Perméabilité et érosion interne des mélanges sable-argile, contribution théorique et expérimentale* (Doctoral dissertation, Thèse Ecole Centrale de Lyon).

Terzaghi, K. (1939). 45th james forrest lecture, 1939. soil mechanics-a new chapter in engineering science. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 12(7), 106-142.

Touaibia, B. (2010). Problématique de l'érosion et du transport solide en Algérie septentrionale. *Sécheresse*, 21(4), 333-335.

- Toumi, S., Meddi, M., Mahé, G., & Brou, Y. T. (2013). Remote sensing and GIS applied to the mapping of soil loss by erosion in the Wadi Mina catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 58(7), 1542-1558.
- Valera, C. A., Pissarra, T. C. T., Martins Filho, M. V., Junior, R. V., Fernandes, L. S., & Pacheco, F. A. L. (2017). A legal framework with scientific basis for applying the 'polluter pays principle' to soil conservation in rural watersheds in Brazil. *Land use policy*, 66, 61-71.
- Vaskinn, K. A., Lovoll, A., Hoeg, K., Morris, M., Hanson, G., & Hassan, M. A. A. M. (2004). Physical modeling of breach formation: Large scale field tests. *Proceedings of Dam Safety*.
- Vincens, E., Witt, K. J., & Homberg, U. (2015). Approaches to determine the constriction size distribution for understanding filtration phenomena in granular materials. *Acta Geotechnica*, 10(3), 291-303.
- Wan, C. F., & Fell, R. (2004). *Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations*. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- Wan, C. F., & Fell, R. (2008). Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(3), 401-407.
- Wang, D., Paradelo, M., Bradford, S. A., Peijnenburg, W. J., Chu, L., & Zhou, D. (2011). Facilitated transport of Cu with hydroxyapatite nanoparticles in saturated sand: effects of solution ionic strength and composition. *water research*, 45(18), 5905-5915.
- Warloulzel, K. (1999). *Caractérisation et comportement des géotextiles pour la lutte contre l'érosion pluviale des sols: étude des mécanismes de protection et compatibilité avec la végétation* (Doctoral dissertation, Université Joseph Fourier (Grenoble)).
- Wittman, L. (1979). The process of soil filtration – Its physics and the approach in engineering practice. *Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 303–310.

Xiao, M., & Shwiyhat, N. (2012). Experimental investigation of the effects of suffusion on physical and geomechanic characteristics of sandy soils. *Geotechnical Testing Journal*, 35(6), 890-900.

Yang, J., Yin, Z. Y., Laouafa, F., & Hicher, P. Y. Modeling coupled erosion and filtration of fine particles in granular media. *Acta Geotechnica*, 1-13.

Zamani, A., & Maini, B. (2009). Flow of dispersed particles through porous media—deep bed filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69(1-2), 71-88.

Zhang, L. M., Xu, Y., Jia, J. S., & Zhao, C. (2011). Diagnosis of embankment dam distresses using Bayesian networks. Part I. Global-level characteristics based on a dam distress database. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(11), 1630-1644.