

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider, Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département: Génie civil et hydraulique

Ref : ...



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الهندسة المدنية و الري

المرجع: ...

Thèse présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Hydraulique

Option : Aménagement et ouvrages hydrauliques

Modélisation numérique de l'influence des infiltrations excessives sur la stabilité des barrages

Présenté par : SOUALHI Mounir

Soutenu publiquement le 06 / 06 /2023

Devant le jury composé de:

MESSAMEH Abdelhamid	Pr	Université de Biskra	Président
BENMEBAREK Naima	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
DEMAGH Rafik	Pr	Université de Batna	Examineur
LABADI Abdallah	MCA	Université de Biskra	Examineur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de gratitude et de respect à toi, le lecteur de ces mots,
et à tous ceux qui connaissent la valeur de la connaissance.

Remerciements

Je tiens à adresser ma reconnaissance la plus profonde à mon encadrante, Madame la professeure BENMEBARAK Naima, qui m'a proposé ce sujet et a maintenu constamment mon esprit en éveil afin d'atteindre les objectifs visés.

Mes remerciements les plus sincères à Monsieur BENMEBAREK Sadok pour ses orientations et de m'avoir accueilli au Laboratoire Modélisation Numérique et Instrumental en Interaction Sol-Structure (MN2I2S).

Je témoigne tout particulièrement ma reconnaissance à BOUZIANE M.Toufik, DJEDRI Toufik et CHERHABIL Sonia, Professeurs à l'université de Biskra pour leurs aides précieuses et encouragements malgré leurs nombreuses occupations.

Je remercie les membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail.

Je tiens à présenter pour l'occasion toute ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes remerciements à tout le personnel de département d'hydraulique.

Enfin, merci infiniment à tous les amis qui m'ont soutenu et qui m'ont aidé pour l'élaboration de ce travail.

Soualhi, Mounir

Résumé

Afin de bien comprendre l'influence des infiltrations sur la stabilité hydromécanique des barrages, une recherche bibliographique sur les défaillances des barrages en terre dues aux infiltrations excessives à travers le corps a été faite. Pour surmonter ces problèmes, des techniques de drainage dans les barrages ont été adoptées comme solution de protection contre les glissements et l'érosion interne. L'analyse des différentes techniques de drainage a montré que si les matériaux de construction des drains ne sont pas disponibles à proximité, la série de drains parallèles dans des barrages en terre constitue une solution économique mais à effet tridimensionnel. Ce travail vise à fournir un outil de calcul permettant de dimensionner l'espacement et la longueur d'une série de drains parallèles en fonction de la géométrie du barrage et du niveau d'eau en amont. Cette technique, adoptée pour les petits barrages ne dépassant pas 15 m de hauteur, présente certains avantages telles que la facilité d'utilisation, la disponibilité des matériaux de construction et la rentabilité. Pour mener à bien cette recherche et prendre en considération l'effet tridimensionnel de ce type de drain, des études expérimentales et numériques ont été effectuées. Les résultats expérimentaux et ceux de Plaxis 3D sont en bon accord pour les débits et la pression interstitielle et le modèle numérique est ainsi validé. L'influence de l'espacement et de la longueur des drains sur le débit de fuite, la pression interstitielle, la ligne phréatique et la stabilité hydromécanique de la structure a été analysée. L'étude paramétrique numérique réalisée pour plusieurs combinaisons d'espacement et de longueur des drains a montré que l'espacement entre les drains dépend de plusieurs paramètres telles que la longueur du drain, la hauteur du remblai et la pente aval. Pour minimiser le débit de fuite, la longueur maximale des drains ne doit pas dépasser un tiers de la base du remblai. La comparaison des résultats de l'application numérique du système de drainage proposé sur un barrage réel (réservoir de Oued El Magroune) avec ceux du système existant (drain horizontal) a montré la fiabilité de ce choix.

Mots clés : Barrage en terre, drainage, infiltration, modélisation, PLAXIS 3D, érosion

Abstract

In order to understand the influence of seepage on the hydromechanical stability of dams, a literature search on the failures of earth dams due to excessive seepage through the body was conducted. To overcome these problems, drainage techniques in dams have been adopted as a solution for protection against landslides and internal erosion. Analysis of different drainage techniques has shown that if the materials for constructing the drains are not available nearby, the series of parallel drains in earthen dams is an economical solution but with three-dimensional effect. The purpose of this work is to provide a computational tool for sizing the spacing and length of a series of parallel drains based on the geometry of the dam and the upstream water level. This technique, adopted for small dams not exceeding 15 m in height, has certain advantages such as ease of use, availability of construction materials and cost effectiveness. To carry out this research and to consider the three-dimensional effect of this type of drain, experimental and numerical studies were carried out. The experimental results and those of Plaxis 3D are in good agreement for the flow rates and pore pressure and the numerical model is thus validated. The influence of the spacing and length of the drains on the leakage rate, the pore pressure, the phreatic line and the hydromechanical stability of the structure has been analyzed. The numerical parametric study performed for several combinations of drain spacing and length showed that the spacing between drains depends on several parameters such as drain length, embankment height and downstream slope. To minimize the leakage rate, the maximum length of the drains should not exceed one third of the embankment base. The comparison of the results of the numerical application of the proposed drainage system on a real dam (Oued El Magroun reservoir) with those of the existing system (horizontal drain) showed the reliability of this choice.

Keywords: Earthen dam, drainage, infiltration, modeling, PLAXIS 3D, erosion

ملخص

من أجل فهم تأثير التسرب على الاستقرار الهيدروميكانيكي للسدود ، تم إجراء بحث ببيوغرافي عن فشل السدود الترابية بسبب التسرب المفرط عبر الجسم. للتغلب على هذه المشاكل ، تم اعتماد تقنيات الصرف في السدود كحل للحماية من الانهيارات الأرضية والتآكل الداخلي. أظهر تحليل تقنيات الصرف المختلفة أنه في حالة عدم توفر المواد اللازمة لبناء المصارف في مكان قريب ، فإن سلسلة المصارف المتوازية في السدود الترابية هي حل اقتصادي ولكن بتأثير ثلاثي الأبعاد. الغرض من هذا العمل هو توفير أداة حسابية لتحديد حجم التباعد وطول سلسلة من المصارف المتوازية بناءً على هندسة السد ومنسوب مياه السد. هذه التقنية معتمدة للسدود الصغيرة التي لا يزيد ارتفاعها عن 15 مترًا ، بمزايا معينة مثل سهولة الاستخدام وتوافر مواد البناء وفعالية التكلفة. لإجراء هذا البحث ودراسة التأثير ثلاثي الأبعاد لهذا النوع من الصرف ، تم إجراء دراسات تجريبية ورقمية. تتوافق النتائج التجريبية ونتائج Plaxis 3D بشكل جيد مع معدلات التدفق وضغط المياه المسامية ، وبالتالي تم التحقق من صحة النموذج العددي. تم تحليل تأثير التباعد وطول المصارف على معدل التسرب ، وضغط المياه المسامية ، منسوب المياه و الاستقرار الهيدروميكانيكي للهيكل. أظهرت الدراسة العددية البارامترية التي تم إجراؤها على عدة مجموعات من مسافات التصريف وطولها أن التباعد بين المصارف يعتمد على عدة عوامل مثل طول الصرف وارتفاع السد ودرجة انحداره. لتقليل معدل التسرب ، يجب ألا يتجاوز الطول الأقصى للمصارف ثلث قاعدة السد. أظهرت مقارنة نتائج التطبيق العددي لنظام الصرف المقترح على سد حقيقي (خزان واد المجرون) مع نتائج النظام الحالي (الصرف الأفقي) موثوقية هذا الاختيار.

الكلمات المفتاحية: السد الترابي ، الصرف ، التسرب ، النمذجة ، PIAXIS 3D ، التآكل الداخلي

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

Introduction	1
1 Stabilité des talus d'une digue vis-à-vis du glissement.....	1
2 Facteur de sécurité évalué par la méthode de réduction des paramètres c' et ϕ'.....	1
3 Effets de la pression interstitielle sur la stabilité de talus.....	2
4 Effet des pressions interstitielles excessives sur la performance sismique d'un barrage zoné.....	2
5 Défaillance de la digue induite par une immersion prolongée.....	3
6 Vidange rapide d'un barrage en terre homogène en tenant compte de l'écoulement transitoires et de la succion.....	4
7 Influence de colmatage du tapis drainant sur la stabilité du barrage en terre.....	5
8 Défaillance d'un remblai de réservoir revêtu de géomembrane.....	7
9 Les effets de l'érosion interne sur la stabilité au glissement d'un barrage en terre....	9
9.1 L'érosion de conduit (ou érosion par écoulement concentré).....	9
9.2 L'érosion régressive.....	10
9.3 L'érosion de contact.....	11
9.4 La suffusion.....	11
10 Étude expérimentale sur l'érosion dans les fondations de gravier sablonneux en tenant compte de l'effet de l'argile sus-jacente.....	12
11 Évaluation du processus d'érosion régressive.....	14
11.1 Initiation de la zone relâchée.....	14
11.2 Initiation et progression du canal.....	14

11.3 Fluidisation du sable.....	15
11.4 Progression de la zone relâchée.....	15
12 Influence des ouvrages souterrains sur le développement des cavités souterraines induites par l'érosion interne.....	15
13 La distribution spatiale des fractions fines induit par la suffusion dans une digue soumise à une charge constante.....	18
Conclusion.....	19

CHAPITRE II : Techniques de drainage dans les barrages en terre

Introduction.....	21
1 Contrôle des infiltrations à travers les remblais.....	21
2 Drainage du remblai.....	21
2.1 Prisme de drainage.....	21
2.1.1 La conception.....	22
2.1.2 La mise en place du prisme.....	22
2.1.3 Control et surveillance.....	22
2.2 Tapis drainant.....	23
2.2.1 La conception.....	23
2.2.2 La mise en place du tapis.....	24
2.3 Drain cheminée.....	25
2.3.1 La conception du drain cheminée.....	26
2.3.2 La mise en place.....	27
3 Drainage de la fondation.....	29
3.1 Puits de secours.....	30
3.2 Tranchées de drainage.....	31
4 Drains de géotextile.....	32
5 Ce que le géotextile apporte par rapport aux solutions traditionnelles.....	32
6 Critères de choix des matériaux de filtre.....	33
7 Les tuyaux de drainage.....	33
7.1 les tuyaux en PVC.....	33
7.2 les tuyaux en PEHD.....	33
Conclusion	34

CHAPITRE III : Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

Introduction	35
1 Filtre granulaire.....	35
1.1 Traçage de la courbe granulométrique du sol en contact avec le filtre.....	35
1.2 Analyse de la courbe granulométrique.....	35
1.2.1 Stabilité interne des sables.....	36
1.3 Reclassement du sol.....	36
1.4 Classement du sol de base.....	37
1.4.1 Coefficient d'uniformité.....	39
1.4.2 Coefficient de courbure.....	39
1.5 Critère de rétention de filtre.....	40
1.6 Critère de perméabilité.....	40
1.7 Limites du contenu en fines et en matières surdimensionnées.....	41
1.8 Prévention des écarts.....	41
1.9 La sélection finale du filtre.....	42
2 Filtre géotextile.....	44
2.1 Définition des exigences d'application du filtre.....	44
2.2 Définir les conditions aux limites.....	44
2.2.1 Les Conditions mécaniques.....	44
2.2.2 Les conditions d'écoulement.....	44
2.3 Déterminer les exigences de rétention.....	45
2.3.1 Indices de plasticité IP.....	48
2.3.2 Indice de densité ID.....	48
2.3.3 Essai de dispersion (Double Hydrometer Ratio).....	49
2.4 Exigence de perméabilité.....	50
2.4.1 Définir la conductivité hydraulique du sol (ks).....	50
2.4.2 Définir le gradient hydraulique pour l'application (is).....	50
2.4.3 Déterminer la perméabilité minimale admissible du géotextile (Kgéo).....	50
2.5 Exigences en matière d'anti-colmatage.....	50
2.6 Déterminer les exigences de survie.....	51
2.7 Déterminer les exigences de durabilité).....	53
2.8 Diverses considérations de conception.....	53
Conclusion	53

CHAPITRE IV : Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

Introduction	54
1 Matériels et méthodes.....	54
2 Etude expérimentale.....	55
2.1 Présentation de l'équipement.....	55
2.2 Mesure de perméabilité du sable.....	56
2.3 Préparation du modèle physique.....	57
2.4 Programme des essais.....	58
3 La modélisation numérique.....	60
3.1 Présentation du logiciel PLAXIS 3D.....	60
3.2 Le modèle numérique.....	60
3.2.1 Le maillage.....	61
3.2.2 Conditions aux limites.....	61
4 Résultat et discussion.....	62
4.1 Ligne de saturation.....	62
4.2 Les pressions interstitielles.....	64
4.3 Les débits.....	68
4.4 Erosion interne.....	69
5 La technique du drainage.....	70
Conclusion	71

CHAPITRE V : Etude paramétrique du système de drainage par drains

Introduction	72
1 Matériels et méthodes.....	72
1.1 Les caractéristiques du model.....	72
1.2 Cas étudié.....	73
2 Manipulation.....	74
2.1 Le rabattement spécifique.....	75
3 Résultats de l'étude paramétrique.....	76
3.1 Mécanisme d'écoulement.....	76
3.2 Influence de l'écartement des drains.....	77
3.2.1 Rabattement de la surface phréatique.....	77

3.2.2 La hauteur et le fuit aval du barrage.....	79
3.2.3 La surface de suintement.....	80
3.2.4 Le facteur de sécurité.....	81
4 La stabilité mécanique.....	82
5 Débit de fuite.....	83
6 Modélisation de la retenue collinaire (Oued El Magroune).....	84
6.1 Caractéristiques géotechniques de remblai du barrage (Oued El Magroune).....	85
6.2 Le modèle numérique.....	86
7 Résultats de la modélisation du réservoir (Oued El Magroune).....	87
7.1 La stabilité.....	87
7.2 Débit de fuite.....	90
Conclusion	91

CHAPITRE VI : Etude technico-économique du système de drainage par drains

Introduction	93
1 Un Projet.....	93
2 Le découpage d'un projet.....	94
2.1 Les taches.....	94
3 Eléments constitutifs de système de drainage.....	95
3.1 Tapis drainant.....	95
3.2 Drainage proposé (Série des drains).....	95
4 Définition des ressources.....	96
4.1 Les ressources humaines et matérielles pour réalisé un tapis.....	96
4.2 Les ressources humaines et matérielles pour réalisé un des drains.....	97
5 Etude économique.....	98
5.1 Génération de prix.....	98
5.2 Estimation des quantités et des frais de réalisation total.....	101
6 Résultat et discussion.....	103
6.1 Devis quantitatif.....	103
6.2 Gain économique.....	105
Conclusion	106
Conclusion générale	
Perspectives	
Références	

Liste des figures

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

Fig. 1 Répartition des charges hydrauliques en fonction du temps. (Luo et al. 2016).....	3
Fig. 2 Le fruit minimal du talus aval en fonction de Hb. (Romer Llanque Ayala et al.2020).....	5
Fig. 3 Scénarios de colmatage du tapis de drainage étudiés. (Dey and Talukdar 2022).....	6
Fig. 4 Stabilité du parement aval de barrage en terre soumis à différents types de colmatage du tapis drainant. (Dey and Talukdar 2022).....	6
Fig. 5 Détails typiques d'une section de digue de séparation. (Bhowmik et al. 2018).....	7
Fig. 6 (a) Le sol emporté sous la géomembrane déchiré autour des drains latéraux, (b) Dommages dans le remblai. (Bhowmik et al. 2018).....	8
Fig. 7 Érosion interne (phénomène de renard), barrage de Tunbridge, Tasmanie, Australie. (Jeffrey A. Farrar 2005).....	10
Fig. 8 Exemple de boulangue digue de L'Agly. (P.Mériaux 2013).....	10
Fig. 9 Erosion de contact. (Beguin 2011).....	11
Fig. 10 Erosion par suffusion du sable en laboratoire. (Nguyen 2018).....	12
Fig. 11 Erosion de la couche d'argile sus-jacente. (Wang et al. 2016).....	13
Fig. 12 Illustrations schématiques du mécanisme de progression de l'érosion. (Peng and Rice 2020).....	14
Fig. 13 La position du cylindre par rapport à l'emplacement de l'ouverture. (Sato and Kuwano 2015).....	15
Fig. 14 Photos de l'érosion de chaque position de cylindre. (Sato and Kuwano 2015).....	16
Fig. 15 Résultats des essais de pénétration. (Sato and Kuwano 2015).....	17
Fig. 16 Présentation du système expérimental. (Horikoshi and Takahashi 2015).....	18
Fig. 17 Distributions du pourcentage des fines pour les temps d'infiltration (a)20 h,(b) 24h, (c) 48 h, et (d) 280 h. (Horikoshi and Takahashi 2015).....	19

CHAPITRE II : Techniques de drainage dans les barrages en terre

Fig. 1 Présentation du prisme de drainage.....	22
Fig. 2 Présentation du tapis drainant.....	23
Fig. 3 Définition des paramètres géométriques de la digue. (Chahar 2004).....	24

Fig. 4 La mise en place d'un tapis drainant. (NRCS, Alabama).....	25
Fig. 5 Drain de cheminée en remblai stratifié.....	26
Fig. 6 Problème de réalisation de drain cheminée verticale mince. (Pabst et al. 2011).....	28
Fig. 7 Réalisation d'un drain vertical avec un sable 0-5 mm. (Irstea bordeaux).....	28
Fig. 8 Simple section montre le drain cheminée ajouté à un barrage existant.....	29
Fig. 9 Phénomène d'ébullition du sable.....	30
Fig. 10 Présentation des puits de secours.....	30
Fig. 11 Eléments constitutifs du drain tranchée.....	31
Fig. 12 drainage par tranchée en cour de réalisation. (Pabst et al. 2011).....	32
Fig. 13 Coupe schématique de barrage Brugnens (France). (GIROUD 1979).....	32

CHAPITRE III : Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

Fig. 1 Critère de stabilité interne. (Burenkova 1993).....	36
Fig. 2 Exemple de reclassement d'un sol. (Pabst et al. 2011).....	37
Fig. 3 Schéma des étapes de classement des sols de base. (Pabst et al. 2011).....	38
Fig. 4 Un exemple des limites (points de contrôle) pour un sol de base catégorie 2. (Pabst et al. 2011).....	42
Fig. 5 Exemple de gradation d'un filtre de rétention. (Pabst et al. 2011).....	43
Fig. 6 Critères de rétention du sol dans des conditions d'écoulement en régime permanent. (Luettich et al. 1992).....	46
Fig. 7 Critères de rétention du sol dans des conditions d'écoulement dynamiques. (Luettich et al. 1992).....	47
Fig. 8 Résultat de Double Hydrometer Test.....	49
Fig. 9 Exigences de la résistance de survie. (AASHTO, 1996).....	52

CHAPITRE IV : Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

Fig. 1 Schéma méthodologique de l'étude.....	55
Fig. 2 Vue générale de l'appareil.....	56
Fig. 3 Vue générale de perméamètre.....	57
Fig. 4 La mise en place du modèle physique.....	58
Fig. 5 Vue générale du modèle physique.....	58
Fig. 7 Configurations de drainage des trois modèles physiques.....	59
Fig. 6 Butée de protection du talus aval.....	59

Fig. 8 Les drains utilisés dans le modèle physique.....	60
Fig. 9 Modèle numérique PLAXIS 3D.....	61
Fig. 10 Maillage des trois modèles.....	61
Fig. 11 La surface phréatique obtenue par la modélisation et celle de l'expérimentation pour $E/P=0.36$	62
Fig. 12 La forme de la ligne de saturation de drainage par drains à droite et celle de tapis à gauche.....	63
Fig. 13 Présentation des lignes de saturation des trois modèles avec niveau d'eau constant.	63
Fig. 14 Présentation des lignes de saturation avec différent niveau d'eau pour un écartement $E/P=0.36$ des drains.....	64
Fig. 15 Variation des pressions interstitielles obtenues par la modélisation et celle du modèle expérimental en fonction du niveau d'eau pour $E/P=0,36$	65
Fig. 16 Résultats des pressions interstitielles des modèles physiques et numériques.....	67
Fig. 17 Débits de fuite du modèle physique et numérique en fonction de l'écartement E/P des drains.....	68
Fig. 18 Débits de fuite en fonction de la charge d'eau amont pour $E/P=0.36$	68
Fig. 19 Diagramme des vitesses d'une coupe longitudinale du barrage au niveau de drain.	69
Fig. 20 Diagramme des vitesses d'une coupe transversale du barrage au niveau de l'entrée du drain.....	70
Fig. 21 Exemple drainage par tranchée.....	70

CHAPITRE V : Etude paramétrique du système de drainage par drains

Fig. 1 Les paramètres du modèle étudié.....	74
Fig. 2 (a) Diagramme de la charge hydraulique dans le plan médian (M), (b) ligne phréatique entre deux drains de $E/P=0,29$	75
Fig. 3 Illustration de rabattement spécifique.....	75
Fig. 4 Ligne de saturation avant et après drainage.....	76
Fig. 5 Mécanisme d'écoulement des eaux de drainage pour $E/H_b = 0,6$	77
Fig. 6 Exemple de scénario de la ligne de saturation du plan médian (M) en fonction de E/P	78
Fig. 7 Influence des paramètres géométriques E/P sur le rabattement de la nappe d'eau aval.....	78
Fig. 8 scénario de la ligne phréatique pour $m,n=2$	79
Fig. 9 Scénario de la ligne phréatique pour $m,n=2.5$	80

Fig. 10 Influence de l'écartement des drains sur l'apparition de la surface de suintement...	81
Fig. 11 Facteur de sécurité en fonction de rabattement de la nappe aval.....	82
Fig. 12 La position maximale admissible qu'une surface phréatique pourrait atteindre.....	82
Fig. 13 La longueur des drains en fonction de l'espacement maximal admissible pour une pente donnée.....	83
Fig. 14 Débit de fuite en fonction de l'espacement pour des longueurs de drain bien définies avec une pente de $m,n=2$	84
Fig. 15 Débit de fuite en fonction de l'espacement pour des longueurs de drain bien définies avec une pente de $m,n=2.5$	84
Fig. 16 Géométrie du réservoir (Oued El Magroune).....	85
Fig. 17 Les trois configurations de drainage étudiées.....	87
Fig. 18 Le facteur de sécurité de la digue d'Oued El Magroune obtenu par PLAXIS 3D....	88
Fig. 19 Le facteur de sécurité de la digue de Oued El Magroune obtenu par PLAXIS 3D pour l'espacement $E= [3m, 5m, 7.5m]$ des drains.....	89
Fig. 20 Variation du facteur de sécurité en fonction de l'espacement des drains pour $P=0,3B$	90
Fig. 21 Vecteurs de vitesse d'écoulement vers le drain de $P=0,3 B$	91
Fig. 22 Débit de fuite en fonction de l'espacement E des barrages avec $P=0,3 B$	91

CHAPITRE VI : Etude technico-économique du système de drainage par drains

Fig. 1 Critère de réalisation d'un projet.....	93
Fig. 2 Conception des systèmes de drainage (Drains, Tapis).....	94
Fig. 3 Réalisation d'un tapis drainant. (Irrstea-G2DR).....	95
Fig. 4 Matériaux de construction pour les systèmes du drainage (Drains, Tapis).....	96
Fig. 5 Détail constitutif d'une unité de surface d'un tapis drainant.....	97
Fig. 6 Détail constitutif d'une unité de longueur d'une tranchée drainante.....	98
Fig. 7 Devis quantitatif de réalisation d'un système des drains et d'un tapis en fonction de l'espacement des drains pour $n=2$	104
Fig. 8 Devis quantitatif de réalisation d'un système des drains et d'un tapis en fonction de l'espacement des drains pour $n=2.5$	104
Fig. 9 Gain économique de système des drains par rapport à un tapis drainant pour une unité de largeur E pour un fruit $n,m=2$	105
Fig. 10 Gain économique de système des drains par rapport à un tapis drainant pour une unité de largeur E pour un fruit $n,m=2.5$	105

Liste des tableaux

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

CHAPITRE II : Techniques de drainage dans les barrages en terre

Tab. 1 Épaisseur minimale du drain cheminée en sable. (Alonso et al. 1997).....	27
---	----

CHAPITRE III : Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

Tab. 1 Classement des sols de base. (FEMA 2011).....	39
Tab. 2 Critères de rétention. (FEMA 2011).....	40
Tab. 3 Critères de taille (maximale et minimale) des particules. (Pabst et al. 2011).....	41
Tab. 4 Critères de la ségrégation. (Pabst et al. 2011).....	41
Tab. 5 Indice de plasticité de sol.....	48
Tab. 6 Etat de compacité des sols.....	49
Tab. 7 Classification de la dispersion des sols. (Sherard et al. 1976).....	50

CHAPITRE IV : Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

Tab. 1 Données des pressions interstitielles mesurées pendant les essais.....	65
Tab. 2 Exemple de calcul de coefficient de détermination R^2	66
Tab. 3 Résultats des débits de fuite du modèle physique et numérique.....	68

CHAPITRE V : Etude paramétrique du système de drainage par drains

Tab. 1 Les fruits admissibles pour une digue homogène. (UU, LL, EE, & EE).....	73
Tab. 2 Les caractéristiques géotechniques du remblai.....	86

CHAPITRE VI : Etude technico-économique du système de drainage par drains

Tab. 1 Devis estimatif de réalisation d'un mètre linéaire (mL) de drain tranchée.....	99
Tab. 2 Devis estimatif de réalisation d'un mètre carré (m ²) du tapis horizontal.....	100
Tab. 3 Devis quantitatif et estimatif de réalisation du tapis horizontal.....	102
Tab. 4 Devis quantitatif et estimatif de réalisation des tranchées drainantes.....	103

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
c'	Cohésion	kN/m ²
ϕ'	Angle de frottement interne	°
c'_{red}	Cohésion réduite	kN/m ²
ϕ'_{red}	Angle de frottement interne réduite	°
F	Facteur de réduction	*
$\sigma_{n,max}$	Contrainte normale maximale	kN/m ²
m	Fruit amont	*
n	Fruit aval	*
$d_{n\%}, D_{n\%}$	Diamètre des particules qui correspond à un pourcentage des passants	mm
C_u	Coefficient d'uniformité	*
C_c	Coefficient de courbure	*
D_{15F}	Diamètre des particules qui correspond à un pourcentage des passants du filtre	mm
D_{85B}	Diamètre des particules qui correspond à un pourcentage des passants du sol de base	mm
O_{95}	Ouverture du géotextile de filtration séparation	mm
PI	Indice de plasticité	%
I_D	Indice de densité	%
W_L	Limite de liquidité	%
W_P	Limite de plasticité	%
e	Indice des vides in situ	*
e_{max}	Indice des vides dans l'état le plus compact	*
e_{min}	Indice des vides dans l'état le moins compact	*
HDR	Rapport double hydromètre	*
K, K_s	Perméabilité de sol	m/s
$K_{géo}$	Perméabilité de géotextile	m/s
i, i_s	Gradient hydraulique	*
S	Section	m ²
L	Longueur	m
t	Temps	s, h
DH	Différence de charge	m
E	Ecartement des drains	m
P	Longueur des drains	m
H_b	Hauteur de la digue	m
l	Largeur	m
b	Largeur de la crête	m
R^2	Coefficient de détermination	*
y_i	Les données observées obtenues à partir du modèle numérique	cm
\hat{y}_i	Les données prédites de l'équation $f(x_i)$	cm
\bar{y}	La valeur moyenne des données observées obtenues à partir du modèle numérique	cm
q	Débit par unité de largeur	l/s.m
B	Largeur de la base du barrage	m
h	Profondeur des eaux d'infiltration avec drainage	m
H_s	Profondeur des eaux d'infiltration sans drainage	m
R_s	Rabattement spécifique	*
F_s	Facteur de sécurité	*

Introduction générale

Les barrages en terre sont des structures conçues pour retenir l'eau, et leur stabilité dépend de l'équilibre entre les forces exercées par l'eau retenue et les forces de résistance de la structure. Lorsque des infiltrations excessives se produisent, cela signifie que l'eau s'infiltré dans la masse de terre constituant le barrage à un rythme supérieur à celui prévu normalement. Ces infiltrations peuvent résulter de défauts dans la conception ou la construction du barrage, ou de conditions géologiques défavorables.

La résistance des barrages en terre aux forces exercées par l'eau retenue est essentielle, et si le matériau est affaibli en raison des infiltrations excessives, cela peut entraîner des fissures, des affaissements, une érosion interne et d'autres dommages susceptibles de compromettre la stabilité globale du barrage. Afin de prévenir ces problèmes liés aux infiltrations excessives, il est crucial de mettre en œuvre des mesures de conception et de construction appropriées. Cela peut inclure l'utilisation de techniques de drainage telles que des tapis drainants, des prismes de drainage et des drains cheminés, conçus avec des matériaux granulaires ou associés à des matériaux géosynthétiques.

La construction d'un barrage en terre nécessite une planification minutieuse et l'utilisation de matériaux adéquats pour garantir sa stabilité et sa durabilité. Les systèmes de drainage jouent un rôle fondamental dans la gestion des infiltrations d'eau, en permettant d'évacuer l'excès d'eau à travers la structure du barrage et en évitant ainsi des conséquences potentiellement désastreuses telles que l'érosion interne, la saturation du matériau et les glissements de terrain. Cependant, lorsque les matériaux nécessaires ne sont pas disponibles sur place, la mise en place d'un système de drainage efficace devient un défi majeur.

Cette problématique met l'accent sur les défis liés au manque de matériaux de construction des drains pour un barrage en terre sur place, et soulève la question de savoir comment assurer la stabilité et la durabilité de la structure malgré cette contrainte, elle invite à explorer les différentes stratégies, alternatives ou solutions techniques qui peuvent être mises en œuvre pour contrôler les infiltrations d'eau à l'instar des drains conventionnels. Cette étude vise donc à explorer les différentes stratégies, techniques et alternatives qui peuvent être mises en œuvre pour résoudre ce problème critique. En examinant les techniques de drainage alternatives et en optimisant la conception du système de drainage, nous chercherons à répondre à la problématique centrale consistant à garantir la stabilité et la durabilité d'un barrage en terre malgré le manque de matériaux de construction des drains sur place.

Dans les sections suivantes de cette thèse, nous présenterons une analyse expérimentale et numérique en 3D de la performance de séries de drains parallèles dans des barrages en terre. Cette technique implique l'installation d'une série de drains parallèles formant une surface de drainage discontinue. Elle offre une solution économique, en particulier lorsque les matériaux de construction des drains ne sont pas disponibles à proximité. Dans le cadre de cette étude sur les séries de drains, certaines hypothèses sont prises en compte, notamment l'homogénéité des propriétés des drains, le comportement perméable du matériau de la digue et les conditions de contrainte initiales appropriées.

La thèse est structurée en six chapitres. Le premier chapitre présente une revue de quelques travaux récents sur la défaillance hydromécanique des digues en terre causée par l'infiltration de l'eau à travers la digue en régime permanent et transitoire. Les phénomènes d'instabilité et d'érosion interne ont été étudiés pour protéger les barrages contre les défaillances dues à l'infiltration excessive. Le deuxième chapitre aborde les techniques de drainage dans les remblais et les fondations des digues en terre, en mettant en évidence l'importance de la protection des drains par des filtres.

Le troisième chapitre propose un guide pratique pour le dimensionnement des filtres granulaires et géotextiles, en veillant à assurer une conductivité suffisante et une capacité de rétention adéquate des particules fines. Le quatrième chapitre présente une étude expérimentale et numérique sur le système de drainage par série de drains parallèles, visant à évaluer sa performance et à valider le modèle numérique utilisé. Ensuite, une étude paramétrique est réalisée pour optimiser les paramètres géométriques des drains en fonction de différents facteurs.

Le cinquième chapitre applique la méthode des séries de drains sur le réservoir d'Oued El Magroun dans le nord-est de l'Algérie, et compare les résultats obtenus avec ceux d'un drain horizontal. Enfin, le sixième chapitre propose une étude technico-économique pour évaluer les avantages économiques de la méthode de drainage par séries de drains par rapport au tapis drainant.

En conclusion, cette thèse vise à apporter des contributions significatives à la littérature existante sur la construction de barrages en terre. Elle fournit des orientations pratiques pour les ingénieurs et les professionnels du domaine, en mettant l'accent sur une solution durable et innovante et de répondre aux défis posés en garantissant la stabilité.

**CHAPITRE I : Influence des infiltrations
excessives sur la stabilité et l'érosion interne des
barrages**

Introduction

La technique de construction des digues en terre est très évoluée dans les derniers temps en matière de matériels, matériaux et technicité, mais juste mettre le remblai en contact avec l'eau on va donner la chance à la naissance de plusieurs phénomènes qui vont influencer sur la stabilité hydromécanique de l'ouvrage.

Dans ce chapitre, nous présentons quelques travaux récents sur la défaillance hydromécanique des digues en terre due à l'infiltration des eaux à travers la digue en régime permanent et transitoire, les principaux phénomènes d'initiation et de l'évolution de problèmes d'instabilité et d'érosion interne ont été étudiés et interprétés.

1 Stabilité des talus d'une digue vis-à-vis du glissement.

Les ruptures de pente sont l'une des catastrophes importantes qui causent chaque année de nombreuses victimes humaines et d'énormes pertes financières. Des recherches antérieures sur la rupture des pentes ont indiqué que la plupart des accidents sont étroitement liés à la pression de l'eau interstitielle dans le talus, il serait donc approprié de considérer l'effet de la pression interstitielle dans la conception des pentes (Shin et al. 2009).

2 Facteur de sécurité évalué par la méthode de réduction des paramètres c' et ϕ'

La technique de réduction des paramètres est certainement la méthode d'analyse de stabilité la plus employée dans les études utilisant les éléments finis disponibles dans la littérature, la méthode a été tout d'abord évoquée par Zienkiewicz et al. (1975).

Elle présente certains avantages comme la modélisation de la déformabilité des géomatériaux, et le fait que la surface de rupture se déduit automatiquement du calcul. Cette méthode consiste à diminuer progressivement les propriétés mécaniques de résistance au cisaillement du sol (cohésion c' et angle de frottement interne ϕ') ayant un comportement élasto-plastique, jusqu'à l'apparition de la rupture (Mouyeaux et al. 2015).

Les paramètres réduits c'_{red} et ϕ'_{red} sont définis par :

$$c'_{red} = \frac{c'}{F} \quad \phi'_{red} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\phi')}{F} \right) \quad (I.28)$$

A la rupture, le facteur de réduction F va être assimilé au facteur de sécurité de la pente étudiée.

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

En effet, si on considère par exemple que la résistance au cisaillement est décrite par le critère de Mohr-Coulomb, on aura à la rupture (l'indice r signifiant rupture) :

$$\tau'_{\max} = \frac{c'}{F_r} + \sigma_{n,\max} \frac{\tan(\varphi')}{F_r} = c'_r + \sigma_{n,\max} \tan(\varphi'_r) \quad (I.29)$$

Dans un modèle aux éléments finis, l'application de la méthode de réduction des paramètres se fait grâce à un processus itératif comportant les étapes suivantes (Afiri 2021) :

1. Calcul d'un état initial de contraintes effectives par application des charges hydrauliques et mécaniques.
2. Réduction des paramètres de résistance au cisaillement et recherche d'un nouvel état d'équilibre en contraintes-déformations.
3. Itération de la deuxième étape jusqu'à l'apparition de la rupture. Le facteur de sécurité est alors égal au coefficient de réduction. L'utilisation de la méthode de réduction des paramètres dans une modélisation nécessite de définir numériquement la rupture, ce qui n'est pas toujours simple.

3 Effets de la pression interstitielle sur la stabilité de talus

L'augmentation de la pression de l'eau interstitielle entraîne une réduction de la résistance au cisaillement. Par conséquent, les changements de niveau d'eau doivent être évalués consciencieusement.

Les différents niveaux d'eau H , c' et φ' peuvent influencer considérablement la stabilité de la pente. Lorsque φ' et c' augmentent, les surfaces de rupture se déplacent à proximité de la crête et lorsque c' diminue, la surface de rupture proche du pied devient plus claire. L'augmentation de H/H_b amène les surfaces de rupture à atteindre la ligne de base horizontale à travers le pied de talus (Wulandari et al. 2019).

4 Effet des pressions interstitielles excessives sur la performance sismique d'un barrage zoné

L'accumulation éventuelle de la pression de l'eau interstitielle réduit l'amplification du mouvement du sol dans le corps du barrage, mais augmente les déplacements permanents du barrage et l'étendue des mécanismes plastiques temporairement activés par la secousse sismique.

Les déplacements horizontaux des pieds amont et aval sont de signe opposé, indiquant un gonflement du barrage pendant l'excitation sismique (Cascone et al. 2021).

5 Défaillance de la digue induite par une immersion prolongée.

L'immersion prolongée dans les eaux de crue est l'une des principales causes de rupture de digue ou de barrage en période de crue.

La grande inondation de 1998 dans le bassin du fleuve Yangtze (Chine), qui a duré de fin juin à début juillet, a causé des dommages à environ 9396 digues principales du fleuve Yangtze, et des pertes économiques ont été estimées à plus de 36 milliards de dollars (Luo et al. 2016).

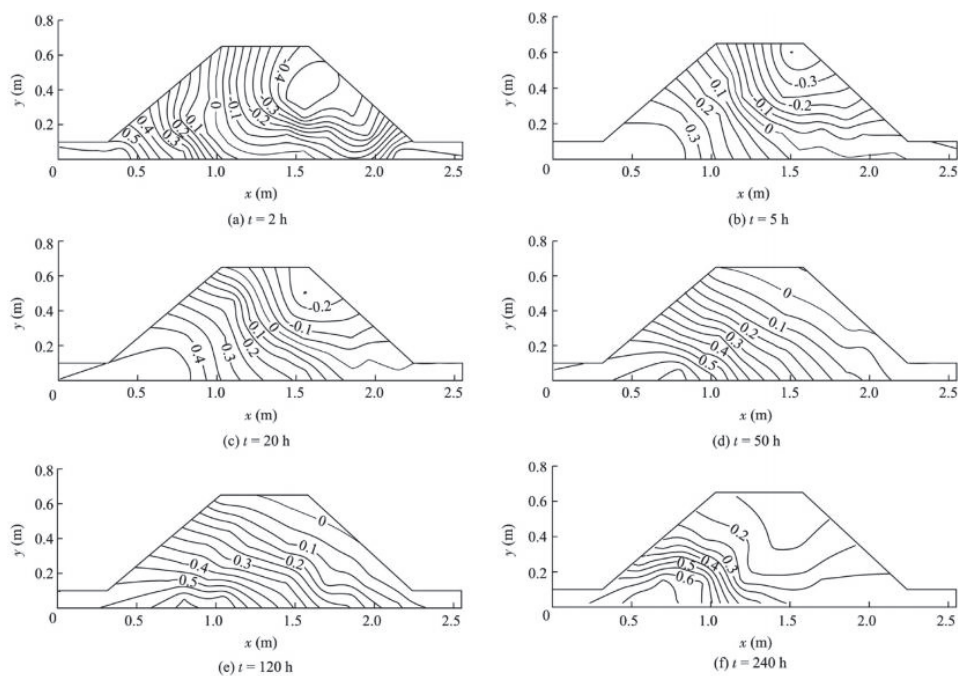


Fig. 1 Répartition des charges hydrauliques en fonction du temps. (Luo et al. 2016)

Certaines conclusions peuvent être tirées de l'essai sur un modèle physique effectué en laboratoire par Luo et al. (2016), la figure 3 présente l'évolution des charges hydraulique en fonction de temps de l'immersion de la digue.

- Le mode de défaillance de l'infiltration dans cette étude est des fissures observables et un phénomène de soulèvement près du pied aval et dans la strate supérieure.
- La rupture de digue qui se produit pendant la saison des crues est principalement attribuée à la montée rapide du niveau d'eau, l'immersion prolongée entraîne des pressions

importantes de soulèvement à la base de la strate supérieure et une réduction du cisaillement, cela induit un effet d'impact considérable, ce qui diminue considérablement les forces de résistance à la rupture.

- La pression de soulèvement sur l'interface entre la digue et la fondation perméable atteint 0,27 m à (t 240 h) et cette pression correspondante dépasse le poids immergé de pied aval de la digue, ce qui provoque le phénomène de soulèvement et entraîne un écoulement concentré le long des fissures.

6 vidange rapide d'un barrage en terre homogène en tenant compte de l'écoulement transitoires et de la succion.

Les résultats ont démontré les avantages de considérer les conditions réelles d'écoulement et de succion du talus amont lors d'une vidange rapide.

Les équations corrélant la pente minimale avec la hauteur du barrage représentent la limite inférieure, à considérer dès lors que la vitesse adoptée dans les analyses de vidange correspond à la vitesse définie par l'USBR. Elle peut être une aide précieuse dans la définition de la géométrie du barrage autant que dans le processus ou le calendrier de construction, et la sélection des zones d'emprunt. A titre d'exemple de la proposition, la [figure 4](#) montre les courbes pour le matériau SC, mettant en évidence le domaine d'application (Romer Llanque Ayala et al. 2020).

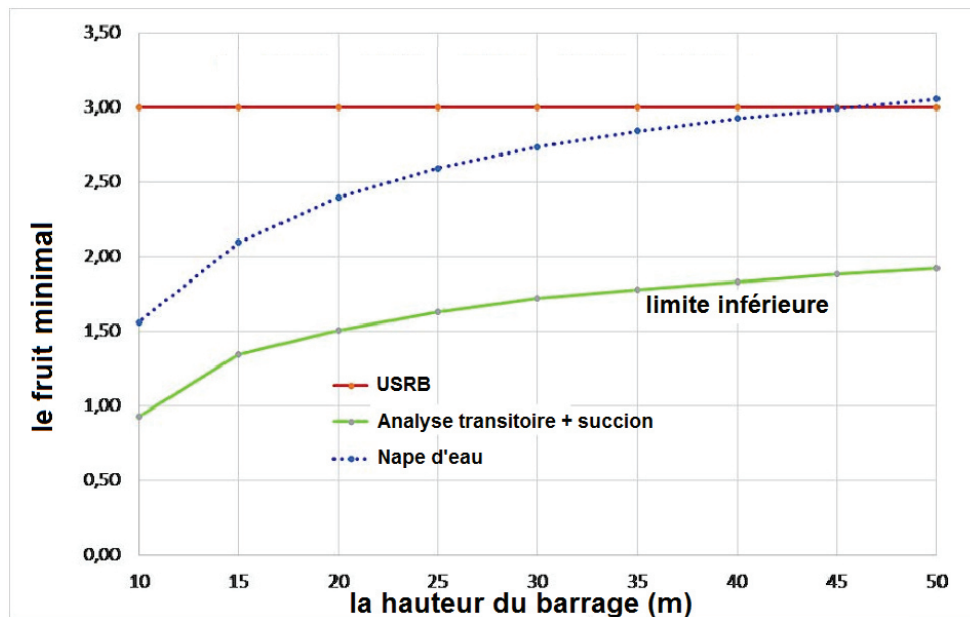


Fig. 2 Le fruit minimal du talus aval en fonction de H_b . (Romer Llanque Ayala et al. 2020)

L'analyse transitoire de vidange rapide, présente une meilleure représentation de phénomène, intègre l'augmentation apparente de la résistance au cisaillement du matériau en fonction de son degré de saturation.

La comparaison avec l'analyse simplifiée habituelle, montre, pour un même facteur de sécurité et une même hauteur de barrage, une inclinaison beaucoup plus forte pour l'analyse transitoire, ce qui signifie des volumes de matériaux plus faibles dans le talus amont et donc un scénario économique plus souhaitable.

7 Influence de colmatage du tapis drainant sur la stabilité du barrage en terre.

Le colmatage peut conduire à la réduction de la longueur et de la largeur du drain. Afin de simuler les différents scénarios possibles de colmatage, la réduction de la perméabilité de la couche de drainage a été effectuée en plusieurs étapes, pour lesquelles la longueur ou la largeur totale du drain a été divisée en différentes sections. Une étude détaillée de différents cas est réalisée par Dey and Talukdar (2022), qui comprend la réduction de la longueur du drain, la réduction de l'épaisseur du drain et un colmatage aléatoire de la couche de drainage (Fig.5).

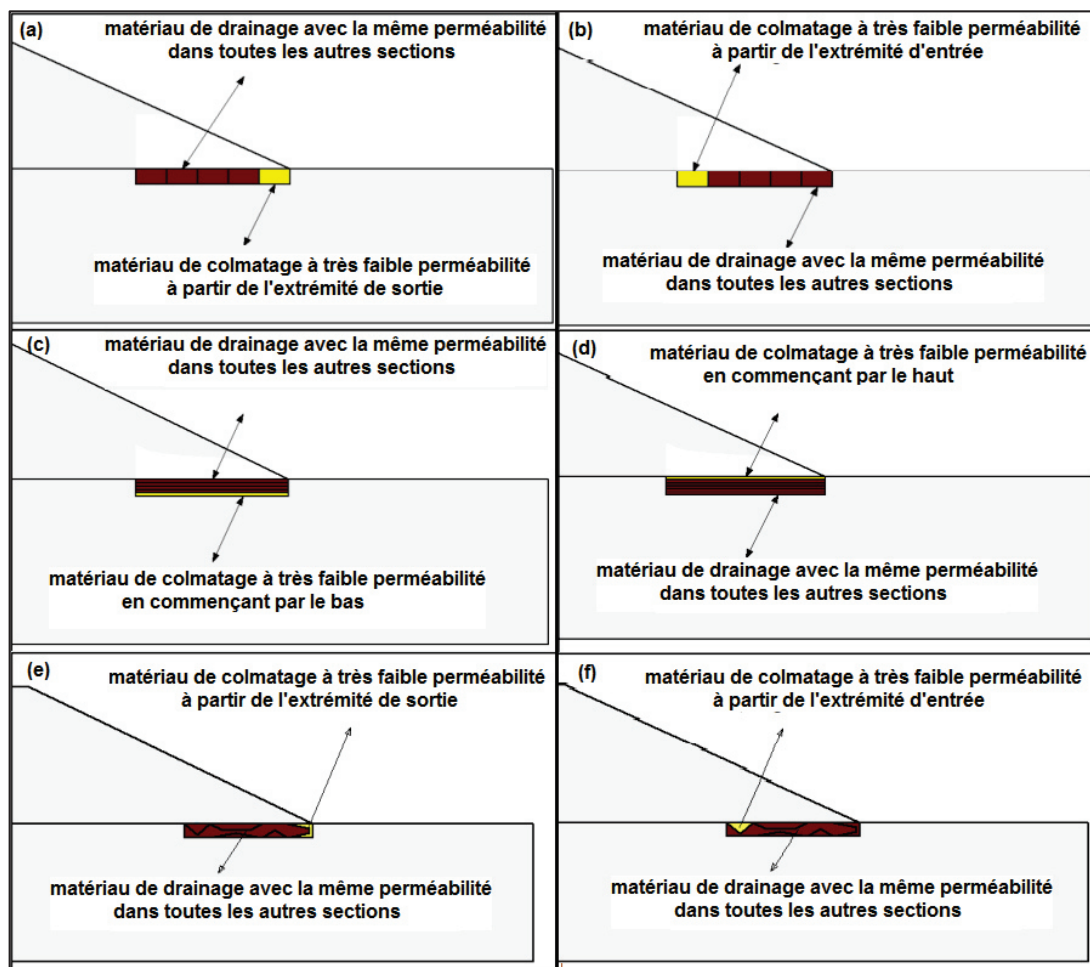


Fig. 3 Scénarios de colmatage du tapis de drainage étudiés. (Dey and Talukdar 2022)

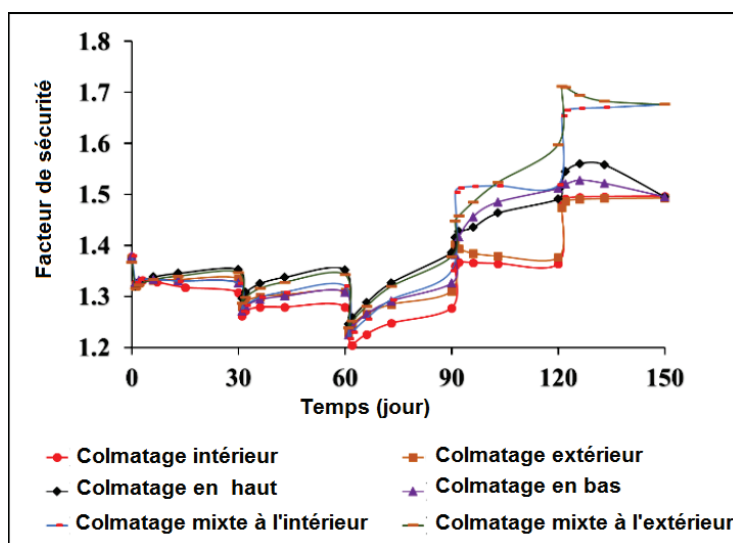


Fig. 4 Stabilité du parement aval de barrage en terre soumis à différents types de colmatage du tapis drainant. (Dey and Talukdar 2022)

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

La figure 6 a montré que le colmatage de partie intérieure du tapis drainant s'est avéré être le scénario de colmatage le plus critique, mettant en danger la stabilité de la face aval du barrage en terre, dans ce scénario, le colmatage séquentiel du tapis drainant au début mène à l'élévation substantielle de la surface phréatique et une génération élevée de la pression interstitielle en aval du barrage en terre.

Par conséquent, la fourniture de matériaux filtrants efficaces pour empêcher le colmatage du tapis drainant est recommandée afin d'assurer un bon fonctionnement du drain d'une part et avoir une durabilité plus élevée du barrage d'autre part.

8 Défaillance d'un remblai de réservoir revêtu de géomembrane.

Une étude de cas de défaillance due à l'érosion interne d'un talus de 8 m de haut entourant un réservoir d'eau brute est présentée par Bhowmik et al. (2018) , les remblais et la base du réservoir étaient tous revêtus d'une géomembrane, des brèches importantes se sont produites dans la digue de séparation environ un an après le remplissage de l'un des réservoirs (Fig.7 et Fig.8).

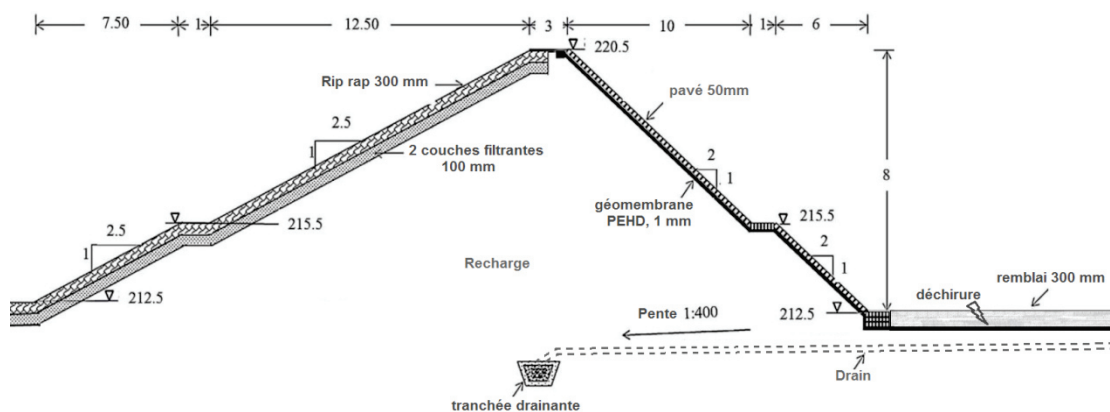


Fig. 5 Détails typiques d'une section de digue de séparation. (Bhowmik et al. 2018)



Fig. 6 (a) Le sol emporté sous la géomembrane déchiré autour des drains latéraux, (b) Dommages dans le remblai. (Bhowmik et al. 2018)

- Le système de drainage interne n'était pas prévu pour un certain nombre de raisons : Tout d'abord, il a été supposé que les revêtements à la base du réservoir et le talus amont des remblais ne présenteraient pas de fuites, donc il n'y aurait pas de suintement.
- Les digues étant dans la catégorie des "petits barrages", le système de drainage interne n'est pas considéré comme vital.
- Le coût de l'acheminement des matériaux pour le filtre sur une distance de 200 km pour la construction du système de drainage interne était très élevé, seules deux couches filtrantes de transition d'épaisseurs nominales (10 cm) entre le remblai et le rip-rap ont été conçues.
- Les remblais ont été construits avec un sol sable limoneux, la pente du talus aval, qui étaient même inférieures au minimum spécifié par les spécifications standard.
- Le drainage interne n'a probablement pas été jugé nécessaire par les concepteurs.

Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes ci-dessous :

- Il est important, chaque fois qu'une géomembrane est utilisée comme couche barrière, de prévoir un revêtement secondaire sous la forme d'une couche d'argile ou d'une couche géosynthétique, ceci est d'une importance critique si des drains souterrains sont fournis sous le revêtement.
- Un revêtement secondaire empêcherait le développement de voies d'infiltration à haut débit à travers une déchirure de la géomembrane.
- Si la mise en place d'une seule couche de géomembrane comme seule couche barrière est inévitable, alors l'analyse des infiltrations et de la stabilité des pentes peut être effectuée en supposant que la couche barrière de géomembrane peut fuir

- Un drainage interne adéquat doit être assuré, même dans une petite digue, si celle-ci est constituée d'un matériau de remplissage semi-perméable, l'absence de drainage peut entraîner un débit d'infiltration élevé dans le remblai et provoquer l'érosion du matériau de recharge.
- Le contrôle de la qualité de la géomembrane sur le terrain et pendant la construction est indispensable pour minimiser la fréquence des déchirures et des perforations.
- L'utilisation de pavés sur la géomembrane doit être utilisée avec précaution comme mesure de protection de la géomembrane, l'adhérence entre les éléments de pavé et la géomembrane lisse n'est généralement pas satisfaisante, de plus, la pose de dalles sur la géomembrane peut provoquer des dommages à la géomembrane, et ainsi mettre en danger la sécurité du le remblai.

9 Les effets de l'érosion interne sur la stabilité au glissement d'un barrage en terre

L'effet de l'érosion interne conduit à une augmentation du taux de vide (porosité) du sol et à une diminution de la teneur en fines, ce qui, à son tour, entraîne une diminution de la résistance au cisaillement de la zone érodée, la diminution de la teneur en fines près du pied de la digue pourrait provoquer le glissement global de la digue. L'étude de ce problème a montré que le facteur de stabilité de la digue peut être réduit de 16% de sa valeur initiale (Abderrezak 2021).

Les travaux menés depuis une quinzaine d'années ont abouti à une classification, largement partagée dans la communauté scientifique, en quatre mécanismes :

9.1 L'érosion de conduit (ou érosion par écoulement concentré)

Correspond à l'élargissement d'un conduit, comme par exemple, une fissure, un mauvais compactage, l'eau qui s'écoule dans le conduit exerce sur ses bords des efforts de cisaillement qui peuvent arracher du matériau en surface si l'écoulement est suffisamment intense. Le diamètre du conduit grossit ainsi petit à petit, laissant passer un débit d'eau de plus en plus important qui va entretenir le phénomène jusqu'à rencontrer un matériau plus résistant ou bien jusqu'à l'effondrement (Fig. 9).



Fig. 7 Érosion interne (phénomène de renard), barrage de Tunbridge, Tasmanie, Australie. (Jeffrey A. Farrar 2005)

9.2 L'érosion régressive

Elle se déclenche sous l'effet d'un écoulement interne au sol qui débouche perpendiculairement à l'interface sol/eau et se manifeste par l'apparition de bouillonnements (Fig.10). Si l'écoulement est trop intense, les grains de sol les plus proches de la surface sont emportés. L'eau chargée de particules en suspension jaillit du sol. En ralentissant, les particules se redéposent et on observe souvent de petits monticules semblables à des volcans miniatures. Si le phénomène perdure dans le temps, les particules déposées proviennent de zones de plus en plus lointaines et, un conduit d'érosion se creuse depuis l'aval vers l'amont.

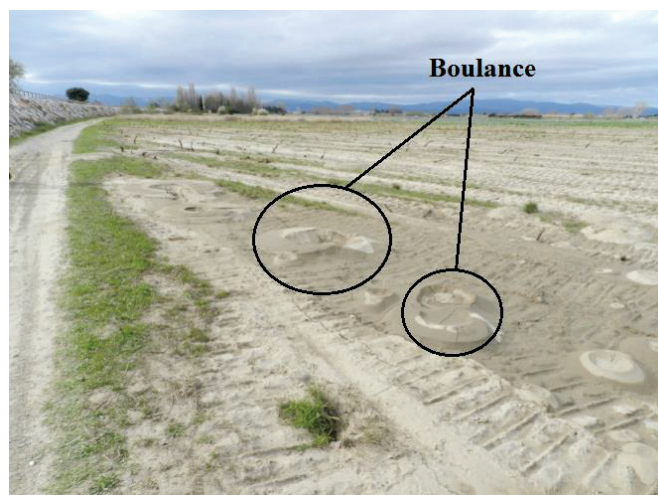


Fig. 8 Exemple de boullance digue de L'Agly. (P.Mériaux 2013)

9.3 L'érosion de contact

Se produit au niveau d'une interface entre un sol fin et un sol plus grossier lorsque de l'eau s'écoule soit parallèlement à l'interface, soit depuis le matériau fin vers le matériau grossier. Lorsque l'écoulement est suffisamment intense, le matériau fin peut être érodé si les grains qui le composent sont suffisamment petits pour se faufiler entre les gros grains du second matériau. Si les couches de matériaux sont disposées à l'horizontale, l'érosion de contact provoque généralement des tassements (Fig.11).



Fig. 9 Erosion de contact. (Beguin 2011)

9.4 La suffusion

Correspond à l'érosion sélective des plus petits grains d'un sol, dans un matériau granulaire, tous les grains ne sont pas sollicités de la même manière pour reprendre les efforts mécaniques qui s'appliquent sur le sol. Seule une petite fraction des grains (de l'ordre de 20 % à peine) transmet les principaux efforts mécaniques. Les autres grains sont peu contraints et peuvent alors être facilement mis en mouvement par un écoulement interne d'eau. Si la granulométrie est telle que les plus petits grains du sol peuvent circuler entre les plus gros grains de ce même sol, une fraction du sol va pouvoir s'éroder sous l'effet de cet écoulement interne.

Le sol en place devient alors de plus poreux jusqu'à éventuellement s'effondrer sur lui-même ou favoriser la mise en place d'autres mécanismes d'érosion au fur et à mesure de l'intensification de l'écoulement. En pratique, ce mécanisme est difficile à mettre en évidence car les traces de la suffusion sont peu visibles avant une rupture et sont ensuite complètement

effacées par la rupture. On peut néanmoins mettre en évidence le phénomène en laboratoire (Fig.12).

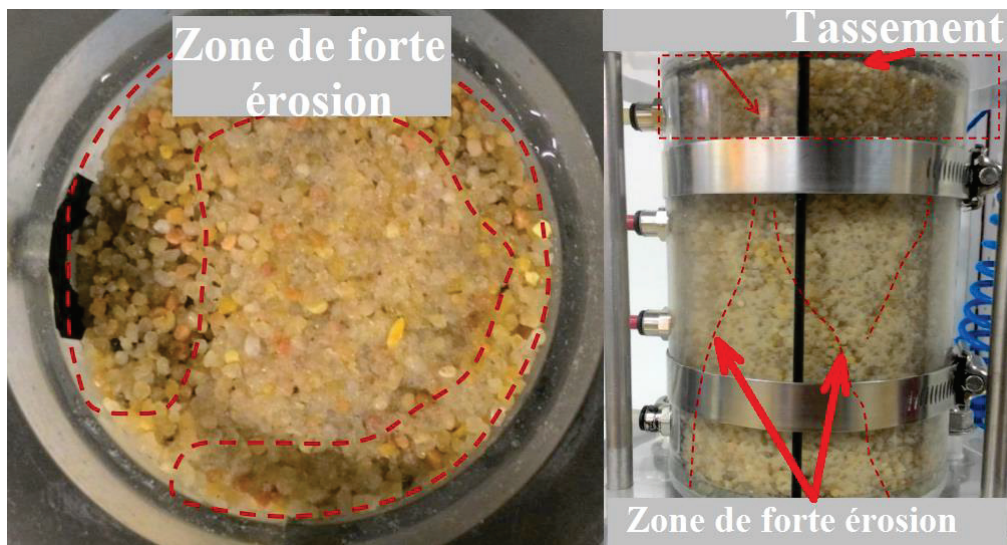


Fig. 10 Erosion par suffusion du sable en laboratoire. (Nguyen 2018)

10 Étude expérimentale sur l'érosion dans les fondations de gravier sablonneux en tenant compte de l'effet de l'argile sus-jacente

L'influence de l'argile sus-jacente sur la progression de phénomène de renard dans la fondation sablo-gravillonnée des ouvrages de rétention d'eau est souvent négligée.

Afin d'étudier cette influence, une étude expérimentale a été menée sur un modèle à l'échelle du laboratoire (Wang et al. 2016).

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

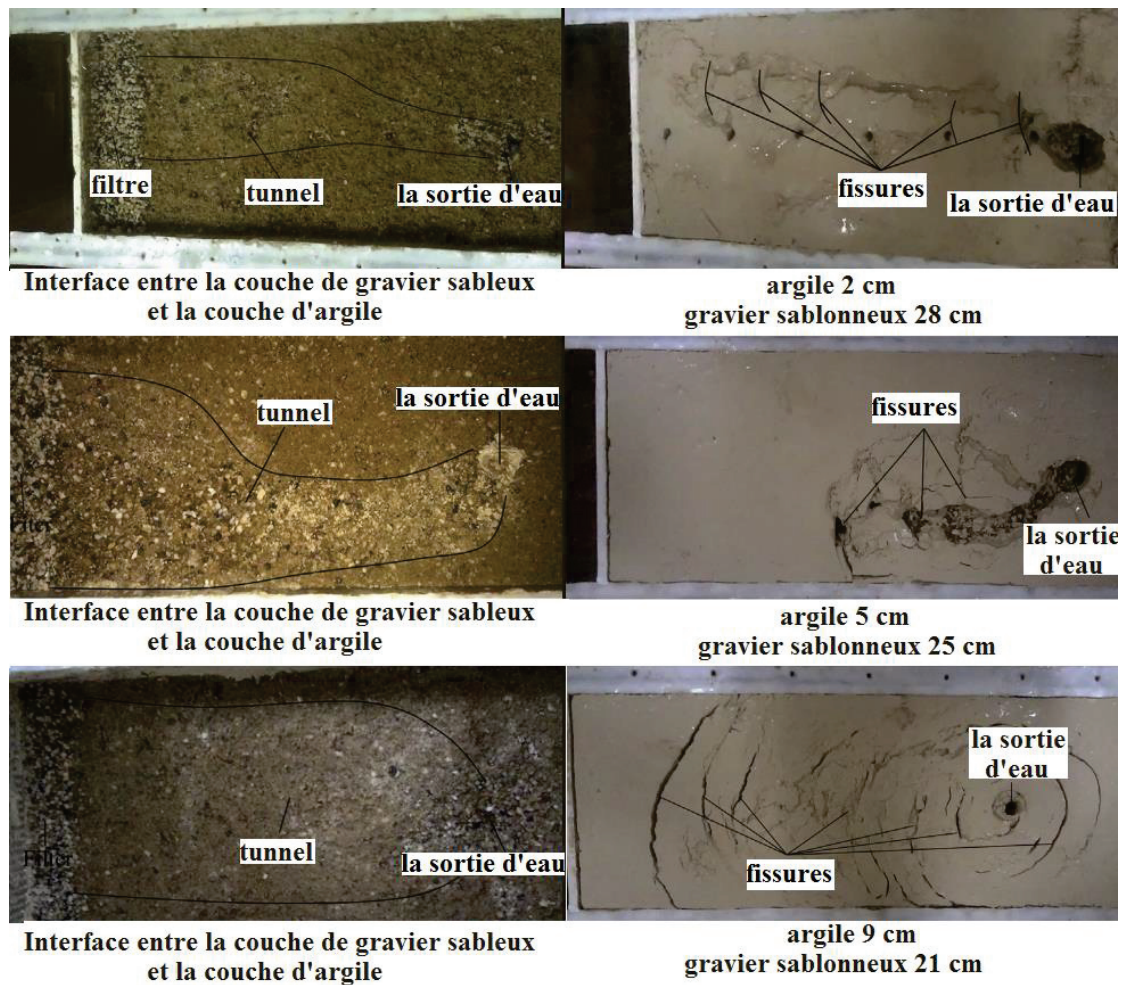


Fig. 11 Erosion de la couche d'argile sus-jacente. (Wang et al. 2016)

Il a été découvert que le gradient hydraulique critique et la surface du tunnel de l'érosion augmentent lorsque l'argile sus-jacente s'épaissit, avec une couche d'argile plus épaisse, l'érosion du gravier sableux sous la couche d'argile se produit plus tard, mais, une fois que l'érosion commence, le taux d'érosion est très élevé et la vitesse moyenne de l'eau infiltrée à travers la section transversale du gravier sableux augmente rapidement en raison de la faible déformabilité de l'épaisse couche d'argile (Fig.13). De plus, il a été constaté que la progression de trou est un processus compliqué et itératif impliquant l'érosion des particules fines, le colmatage des pores et le rinçage des pores obstrués. Deux types d'érosion ont été identifiés dans la progression des trous: l'une fait avancer le tunnel vers l'amont, l'autre augmente la profondeur du tunnel.

Les résultats montrent que l'argile sus-jacente est un facteur important lors de l'évaluation de la tuyauterie dans les fondations de gravier sableux des structures de retenue d'eau.

11 Évaluation du processus d'érosion régressive

Les résultats d'analyse inverse indiquent que la progression de l'érosion observée au laboratoire se compose de quatre étapes observables : (1) initiation de la zone relâchée, (2) initiation et progression du canal, (3) fluidisation du sable de la colonne montante, (4) progression de la zone relâchée (Peng and Rice 2020).

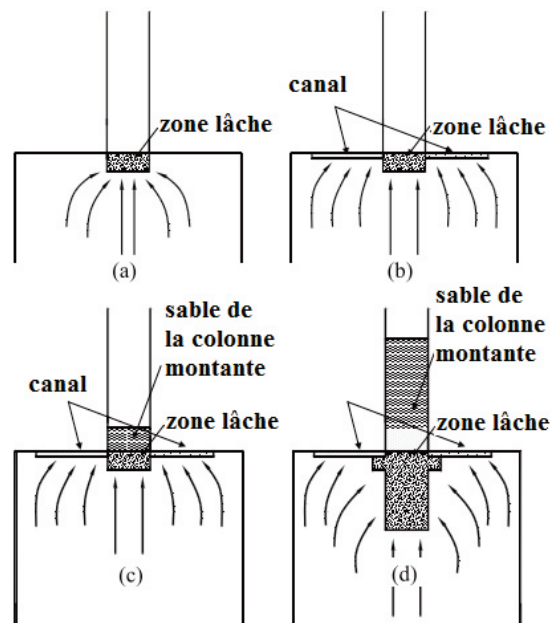


Fig. 12 Illustrations schématiques du mécanisme de progression de l'érosion. (Peng and Rice 2020)

11.1 Initiation de la zone relâchée

Sur la figure 14a, une petite zone de sol ameubli se forme sous la sortie en raison de l'écoulement concentré sur cette zone, l'analyse inverse des données de pression interstitielle a indiqué que la zone lâche s'agrandit progressivement au cours des premières étapes du chargement hydraulique jusqu'à ce que les gradients horizontaux deviennent suffisamment importants pour initier la formation du canal.

11.2 Initiation et progression du canal

Le développement initial des canaux d'érosion est illustré à la figure 14b. Au fur et à mesure de la formation des canaux, le flux d'infiltration qui s'était concentré dans la zone relâchée a convergé dans les canaux à haute conductivité, diminuant ainsi les gradients hydrauliques à la limite de la zone relâchée et ralentissant ou arrêtant son élargissement.

11.3 Fluidisation du sable

Avec une charge différentielle totale accrue, les canaux se sont propagés avec peu ou pas d'élargissement de la zone meuble et les particules de sol ont commencé à pénétrer dans la colonne montante en raison de l'érosion des particules de sol des canaux (Fig.14c).

11.4 Progression de la zone relâchée

Le sable s'élève lorsque sa densité diminue en raison de l'élimination des particules, une fois que le développement du canal atteint le bord du porte-échantillon, la zone lâche recommence à augmenter en largeur et en profondeur, comme illustré dans (Fig.14d).

12 Influence des ouvrages souterrains sur le développement des cavités souterraines induites par l'érosion interne

Une série de tests sur modèle en laboratoire a été réalisée pour examiner la pertinence de l'emplacement des structures souterraines et de l'expansion des cavités souterraines (Fig.15); (Sato and Kuwano 2015).

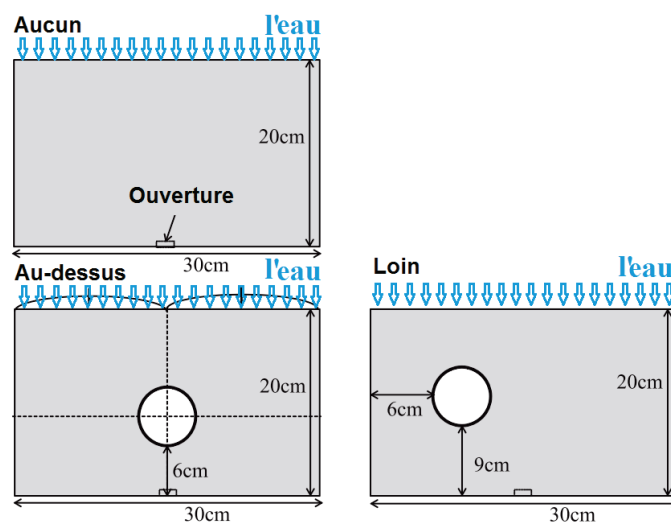


Fig. 13 La position du cylindre par rapport à l'emplacement de l'ouverture. (Sato and Kuwano 2015)

Les résultats de ces essais en laboratoire ont montré que les ouvrages souterrains entraînaient une variation dans la formation des cavités du fait d'une variation du cheminement des infiltrations localisées qui s'étaient développées tout au long du trajet le plus proche depuis la surface jusqu'aux l'ouverture de la boîte.

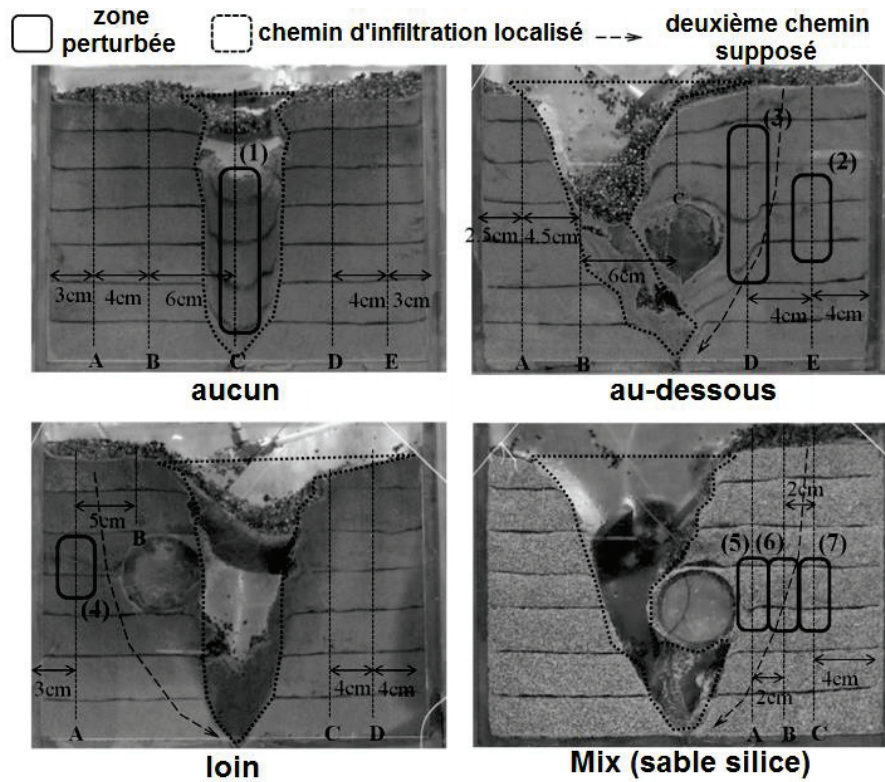


Fig. 14 Photos de l'érosion de chaque position du cylindre. (Sato and Kuwano 2015)

Après les essais sur modèle, la résistance du sol modèle a été examinée au moyen d'une série d'essais de pénétration en laboratoire dans les ABCDE comme la montre la figure 16.

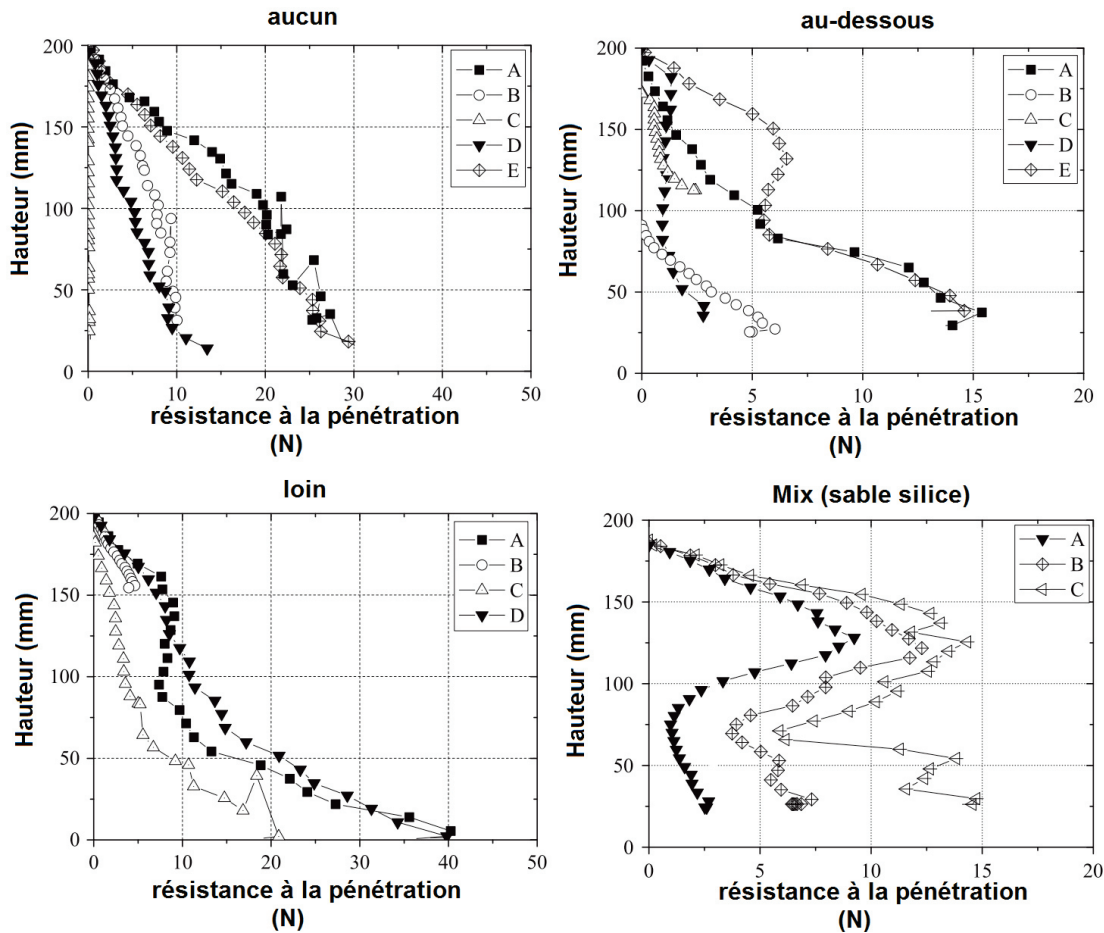


Fig. 15 Résultats des essais de pénétration. (Sato and Kuwano 2015)

- La croissance de la cavité est produite de manière préférentielle tout au long du parcours de l'infiltration localisée vers l'ouverture, la localisation était très sensible à la distance de l'ouverture, induite le long du chemin le plus proche de la surface vers celle-ci. Le cylindre a entraîné une variation du trajet lorsqu'il était situé près du trajet original. Après le début épisodique de l'érosion à partir de la sortie, une cavité s'est développée le long du chemin en raison de l'érosion interne du sol liquéfié.
- La progression temporelle de l'expansion de la cavité a été gouvernée par la conductivité hydraulique qui a été produite à la fois par l'emplacement du cylindre et les propriétés du matériau.
- Un changement dans la résistance de pénétration a été corrélé avec un changement dans la distance des cavités, et inversement des murs de la chambre du sol. Une baisse remarquable de la résistance a été induite dans la partie déformée. En outre, le sol perturbé s'est largement étendu sans être accompagné d'une déformation visible, ce qui s'est également produit à une échelle pratique du sol (Fig.17).

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

Dans des situations pratiques, la localisation des infiltrations peut être prédite à partir des relations spatiales entre la sortie et d'autres structures, par conséquent, dans les collecteurs des eaux il est important de considérer non seulement les tuyaux cassés, mais aussi les tuyaux sains.

13 La distribution spatiale des fractions fines induit par la suffusion dans une digue soumise à une charge constante.

Horikoshi and Takahashi (2015) ont effectué une série d'essais sur modèle physique à petite échelle avec un mélange de deux sables de silice, qui est catégorisé comme "matériau instable interne" (Fig18).

L'étendue spatiale de la variation de la teneur en fines induite par l'érosion est discutée par des analyses granulométriques sur des zones subdivisées du remblai modèle après l'essai.

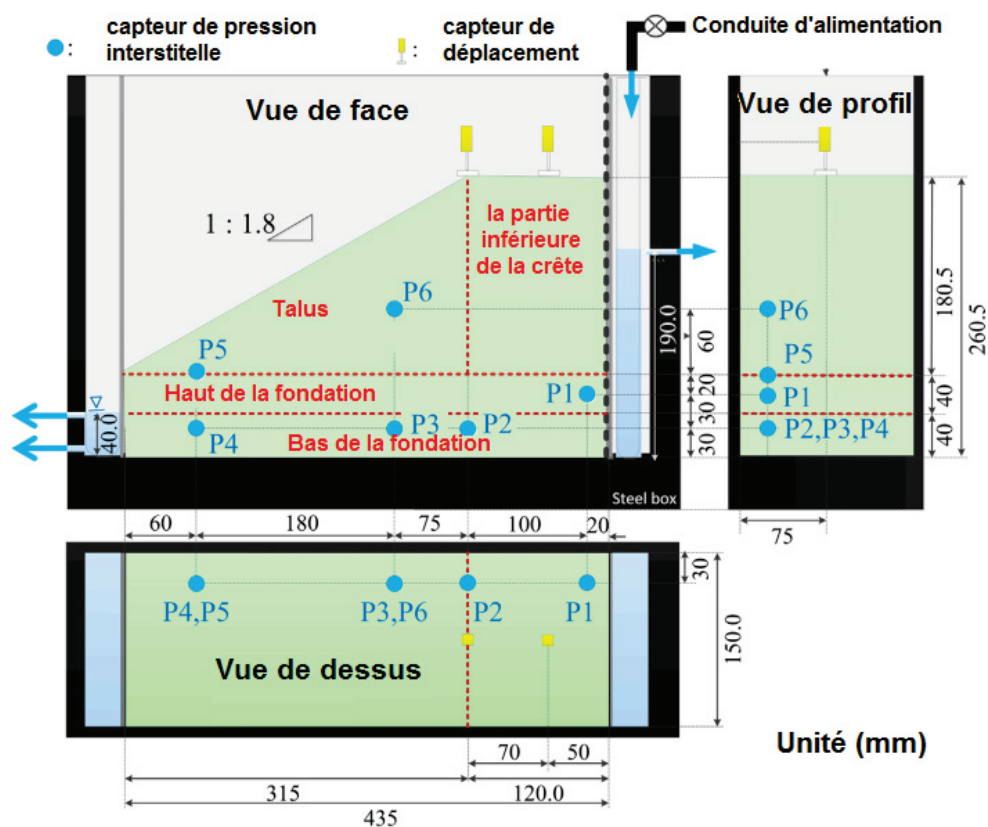


Fig. 16 Présentation du système expérimental. (Horikoshi and Takahashi 2015)

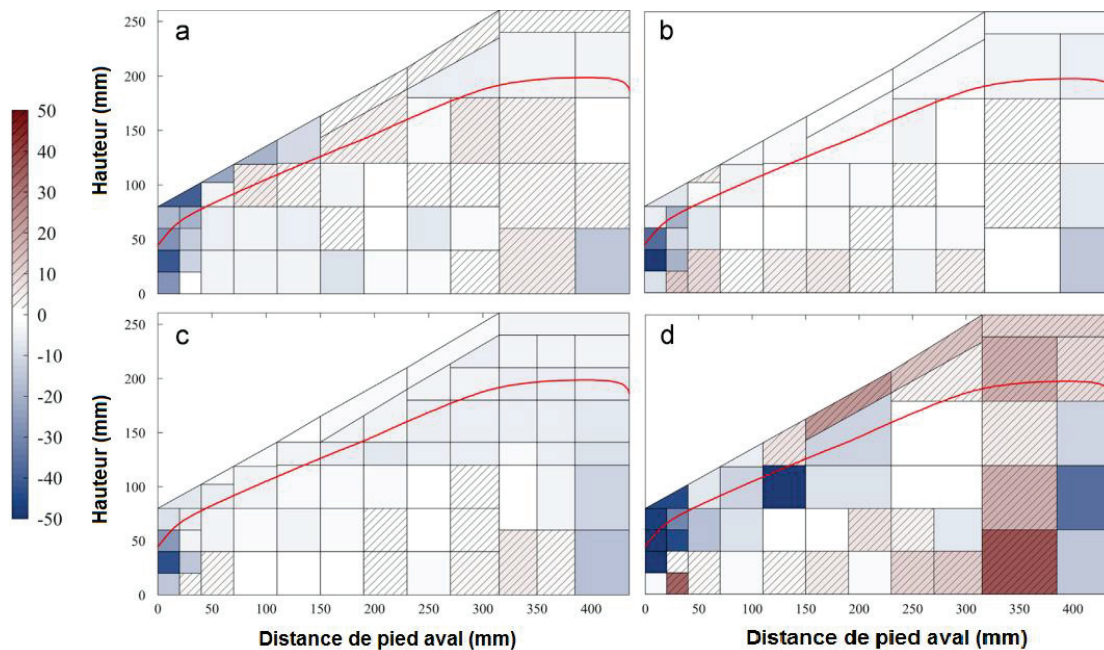


Fig. 17 Distributions du pourcentage des fines pour les temps d'infiltration (a)20 h,(b) 24 h, (c) 48 h, et (d) 280 h. (Horikoshi and Takahashi 2015)

Des analyses granulométriques dans chaque zone du remblai peuvent aider à observer avec succès la distribution spatiale des fines dans le remblai modèle (Fig.19).

- Dans les conditions d'infiltration transitoire, une érosion importante des fines a lieu en raison de l'élévation de la surface phréatique.
- La disparition de la succion et le transport des fines avec le flux d'infiltration modifie la distribution de la teneur en fines dans le remblai.
- Après un certain temps, la suffusion se développe le long de la surface phréatique depuis l'aval du remblai. Sous la surface phréatique, les fines érodées se déplacent non seulement latéralement, mais aussi verticalement en raison de la force gravitationnelle, et se déposent dans la fondation, ce dépôt de fines entraîne l'expansion de la région riche en fines dans la fondation et provoque une diminution de la perméabilité de l'ensemble du remblai.

Conclusion

Compte tenu de l'analyse bibliographique, l'utilisation des logiciels est indispensable pour étudier le comportement des barrages, les actions principales auxquelles l'ouvrage est soumis,

CHAPITRE I : Influence des infiltrations excessives sur la stabilité et l'érosion interne des barrages

la discontinuité de sol, les écoulements..., rend le calcul très complexe avec les méthodes traditionnelles.

Les recherches ont indiqué que la plupart des accidents sont étroitement liés à la pression de l'eau interstitielle dans le talus, il serait donc approprié de considérer l'effet de l'écoulement dans la conception des digues.

Le choix et la mise en place des matériaux de conception des barrages en terre est une étape très importante pour assurer la sécurité vis-à-vis l'érosion interne et la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage.

Il faut tenir en compte les interfaces (sol remblai-sol fondation, sol-rigide, sol filtre) lors de conception et modéliser le comportement de l'ouvrage avec des scénarios plus défavorables, et sans oublier le contrôle avec soin pendant la réalisation et après le fonctionnement.

CHAPITRE II : Techniques de drainage dans les barrages en terre

Introduction

La position de la ligne phréatique influence sur la stabilité hydromécanique du barrage en terre en raison d'érosion causé par le gradient de sortie excessif et au dessèchement dû au ramollissement et à l'affaiblissement de la masse de sol comme si elle touchait la surface phréatique, un système de drainage sous la forme d'un tapis horizontal, d'un prisme de roche, d'un drain cheminée ou d'une combinaison des systèmes doit être installé. Le système de drainage maintient la ligne phréatique bien dans le corps du barrage pour permettre un drainage adéquat du remblai et de la fondation, dans cette partie une illustration de quelques techniques en plusieurs angles : présentation de système, la conception et la mise en place).

1 Contrôle des infiltrations à travers les remblais

Les drains sont généralement fournis sous la forme d'un prisme, d'un tapis horizontal ou d'un drain cheminée, etc., afin de contrôler les eaux d'infiltration, l'installation de tels drains réduit la pression interstitielle dans la partie aval du barrage et augmente ainsi la stabilité hydromécanique du barrage et influençant ainsi sur l'économie de la construction. Ces drains sont constitués de matériaux grossiers classés dans lesquels les infiltrations sont collectées et déplacées vers un point où elles peuvent être évacuées en toute sécurité. Afin d'empêcher le mouvement du matériau fin du barrage vers le drain, un filtre multicouche, généralement appelé filtre ou filtre inversé, est fourni. Les différents types de drains couramment utilisés sont illustrés et décrits ci-dessous (Narita 2000).

2 Drainage du remblai

2.1 Prisme de drainage

Le but d'un drain de pied est de collecter les infiltrations provenant de deux sources :

- les drains cheminée/Tapis
- les infiltrations de fondation en dessous de pied aval du barrage (infiltration sous-jacente).

Dans tous ces cas, le débit intercepté devrait entraîner une réduction de la pression hydrostatique sous le barrage et protéger le pied aval contre l'érosion (Fig.1).

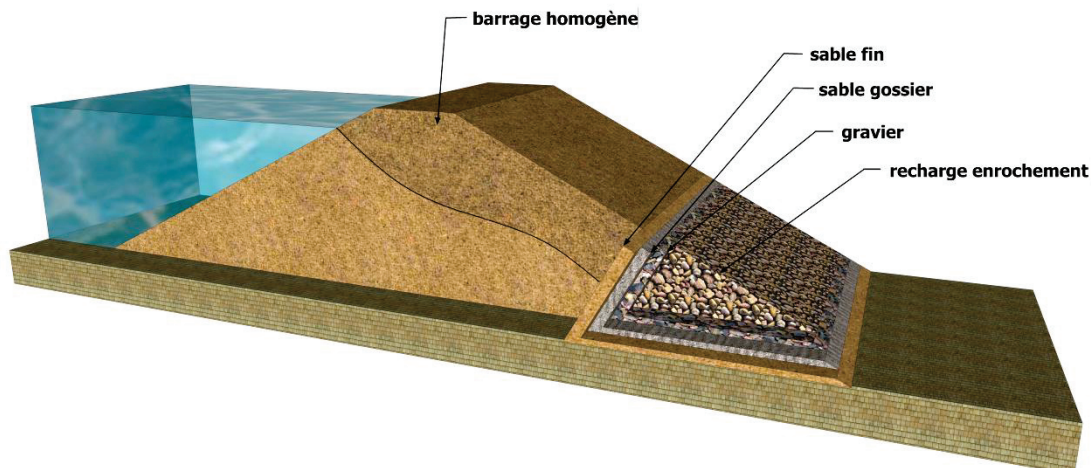


Fig. 1 Présentation du prisme de drainage.

2.1.1 La conception

Le prisme de drainage est constitué de pierres de taille variant généralement de 15 à 20 cm et un filtre gradué en couches prévu comme une zone de transition, entre le remblai homogène du remblai et de roche. Le filtre se compose généralement de trois couches de sable fin, de sable grossier et de gravier, selon les exigences des critères de filtrage. La hauteur du prisme est généralement maintenue entre 25 et 35 % de la hauteur du réservoir. Le sommet de drain rocheux doit être suffisamment plus haut que la profondeur de l'eau de suintement de manière à empêcher l'action de fluctuation de niveau de l'eau (IS 9429 1999).

2.1.2 La mise en place du prisme

La conception et la disposition du prisme ont changé au fil du temps, ces types de drains sont le plus souvent construits près du pied aval du remblai, bien que, dans certaines applications, ils soient placés sous le pied aval, une pratique qui devrait généralement être évitée car le retrait d'une partie de pied serait nécessaire en cas des réparations sont nécessaires.

2.1.3 Contrôle et surveillance

Le drain prisme permet trois observations clés dans un tel programme de surveillance:

- la mesure du débit.
- la détection d'infiltrations nuageuses.
- l'accumulation de sédiments (particules de sol).

Les trois peuvent être réalisés dans un puits d'inspection installé soit à l'extrémité de décharge du drain de pied, soit le long de l'alignement du drain de pied. Un puits d'inspection se compose généralement d'un dispositif de mesure du débit (soit un déversoir, soit un canal) et un piège à sédiments en amont du dispositif de mesure (Hart 2018).

2.2 Tapis drainant

Le filtre horizontal s'étend du pied aval du barrage vers l'intérieur jusqu'à une distance variant de 25 à 33% de la base du barrage (Fig.2), généralement une longueur égale à trois fois les hauteurs du barrage est suffisante, la couverture doit être correctement conçue selon les critères de filtrage et doit être suffisamment antérieure pour s'écouler efficacement (Messaid and Boudoukha 2008; Hadjira and Naima 2014).

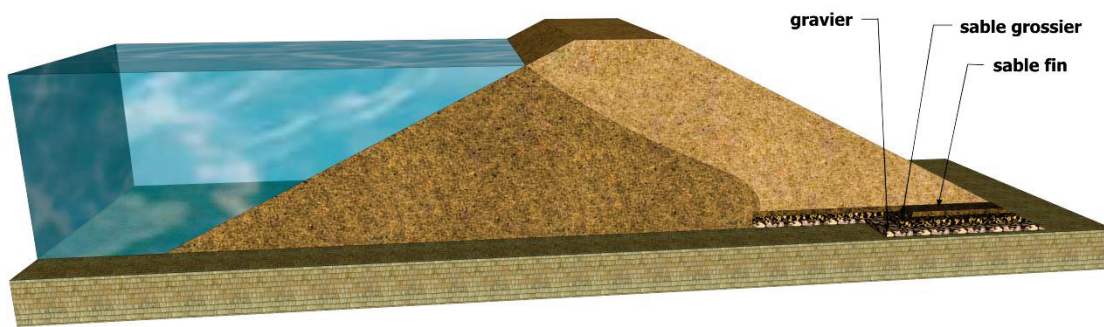


Fig. 2 Présentation du tapis drainant.

2.2.1 La conception

Le paramètre géométrique le plus efficace du drain est sa longueur, tandis que sa hauteur et son angle n'ont aucun effet. Chahar 2004 à donner des solutions analytiques pour déterminé la longueur de tapis en utilisant les paramètres géométriques du barrage.

$$l_* = \frac{1 + n^2}{2n^2} \left(0.3m + n + F_{B^*}(m + n) + T_* + \frac{n^2 - 1}{\sqrt{1 - n^2}} d_* - \sqrt{\left[0.3m + n + F_{B^*}(m + n) + T_* - d_* \sqrt{1 + n^2} \right]^2 - n^2} \right) \quad (II.1)$$

Sachant que :

$$F_{B^*} = \frac{F_B}{h}; T_* = \frac{T}{h}; d_* = \frac{d}{h}; l_* = \frac{l}{h} \quad (II.2)$$

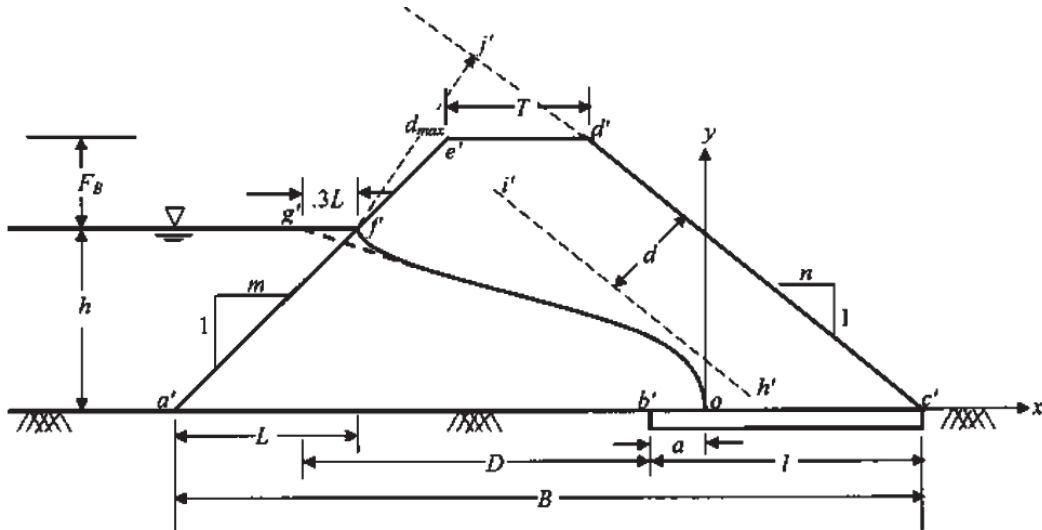


Fig. 3 Définition des paramètres géométriques de la digue. (Chahar 2004)

Al-Janabi et al. 2020 ont fixé la valeur 0.5m d'épaisseur du tapis pour un barrage homogène avec une hauteur moyenne.

2.2.2 La mise en place du tapis

Un exemple de tapis drainant à deux couches est illustré sur la figure 4. Dans cette application illustrée à côté d'un conduit d'évacuation, le filtre de premier couche est placé sur la fondation pour protéger contre l'érosion du sol causée par les infiltrations de la fondation dans le pied aval (Fig.4(a)), au-dessus de cette couche, la deuxième couche de gravier est placée afin d'assurer le drainage de l'eau collectée jusqu'au pied en aval du barrage(Fig.4(b)), au-dessus de cela, un autre filtre est placé, ce qui empêche l'érosion sus-jacente dans le tapis drainant (Fig.4(c)), ces couverture de filtre alors pour fonction de protéger les deux voies d'infiltration(fonation, remblai) (FEMA 2011).



Fig. 4 La mise en place d'un tapis drainant. (NRCS, Alabama 2011)

Le tapis drainant a été placé sur la surface du substratum rocheux au pied aval du remblai. la conduite à droite de la photo représente le collecteur principale du prisme draiant en aval non encore recouvert.

2.3 Drain cheminée

Le filtre horizontal aide non seulement à faire descendre la ligne phréatique dans le corps du barrage, mais assure également le drainage de la fondation et contribue à une consolidation rapide, mais le filtre horizontal essaie de rendre le sol plus antérieur dans le sens horizontal et provoque ainsi une stratification, lorsqu'une stratification à grande échelle se produit, un tel filtre devient inefficace, la surface phréatique peut s'approcher et peut-être même atteindre la face aval du barrage lorsque le rapport d'anisotropie atteint une valeur de l'ordre de 30 à 40, [Sazzad and Rahman \(2017\)](#) ont montré que un filtre de cheminée bien conçu fournit un contrôle positif pour produire une surface phréatique qui est bien à l'intérieur du remblai, comme illustré à la [figure 5](#).

Dans son application des analyses de risques pour les barrages, le Département de l'intérieur des États-Unis, Bureau of Reclamation (Reclamation) attribue des avantages substantiels en termes de réduction des risques à la présence d'un filtre bien conçu. La présence d'un tel filtre

entraîne l'attribution d'une probabilité de 0,01 ou moins (très improbable ou moins) (URS 2010).

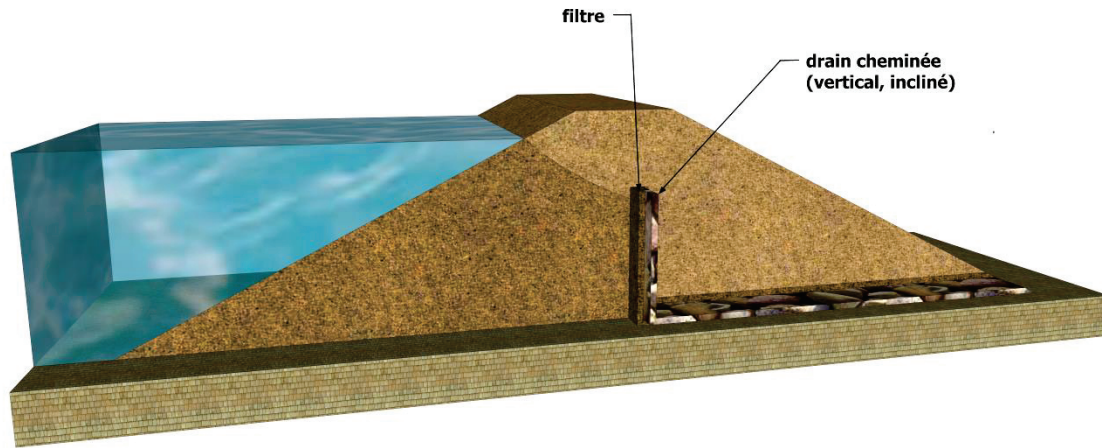


Fig. 5 Drain de cheminée en remblai stratifié.

2.3.1 La conception du drain cheminée

Le drain vertical est poursuivi entre la base du remblai et le niveau normal des eaux plus 0,20 à 0,30 m, ou bien le niveau des plus hautes eaux, de manière à être sûr que la ligne de saturation ne pourra pas passer plus haut que le drain. Ce drain vertical est raccordé au pied aval par un tapis drainant horizontal, ou par des cordons drainants.

Dans les grands barrages, le drain vertical (ou incliné) est construit couche par couche comme les zones du remblai, et de même pour ses filtres. On a donc un drain grossier et deux filtres plus fins.

Pour les petits barrages, il est réalisé en matériau perméable (drainant) respectant les conditions de filtre avec le remblai qui l'entoure. Le matériau utilisé (sable plutôt uniforme) est dit auto-filtrant.

Le drain est construit en creusant dans le remblai tous les 5 à 6 couches compactées, une tranchée large de 0,5 à 1,5 m, puis en y déversant un sable auto-filtrant (pas de filtre entre ce sable et le matériau du remblai). On recommande dans ce cas de choisir un sable 0-5 mm vérifiant : $D_{05} > 0,08$ mm (propreté) et $D_{15} > 0,1$ mm (perméabilité). Il est possible de diminuer l'épaisseur du drain cheminée (minimum de 0,50 m) au fur et à mesure de la montée du remblai en fonction de la valeur de $H^2 \sqrt{V}$ correspondant à la cote inférieure de la tranche considérée (drain cheminée avec deux ou trois épaisseurs en tout).

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'épaisseur minimale préconisée. Cette dernière est, en général, largement surabondante en ce qui concerne le débit des infiltrations, mais elle permet d'avoir une sécurité à long terme vis-à-vis d'un colmatage partiel par des fines et /ou par des carbonates. La nature des matériaux du remblai peut conduire à adopter des épaisseurs plus importantes. Les largeurs de godet disponibles sont aussi à prendre en compte (Alonso et al. 1997).

Tab. 1 Épaisseur minimale du drain cheminée en sable. (Alonso et al. 1997)

$H^2\sqrt{V}$	< 30	30 à 100	100 à 300	300 à 700	700 à 1500
Épaisseur en (m)	0,50	0,80	1,00	1,20	1,50

(H et V correspondent à l'altitude et le volume du barrage).

2.3.2 La mise en place

a. Un nouveau barrage

Les conditions de mise en place ont une grande importance dans le choix des épaisseurs de filtre. Un filtre horizontal peut être plus mince qu'un filtre incliné, car il est plus facile à régler, sauf si l'on emploie des machines spéciales pour compacter les matériaux du filtre sur la pente (exemple de Briones, U.S.A.), il faut donner à un filtre incliné ou vertical une épaisseur horizontale suffisante pour que les engins puissent rouler (2,50 à 4m). Dans le cas des filtres verticaux minces, notamment multicouches, on est amené à utiliser des coffrages de séparation, glissant à la limite des couches (exemple de Sasumua, Grand Assouan). On peut aussi creuser des tranchées superposées dans le remblai et mettre en place le filtre par couches successives de 1 à 3 m de profondeur.

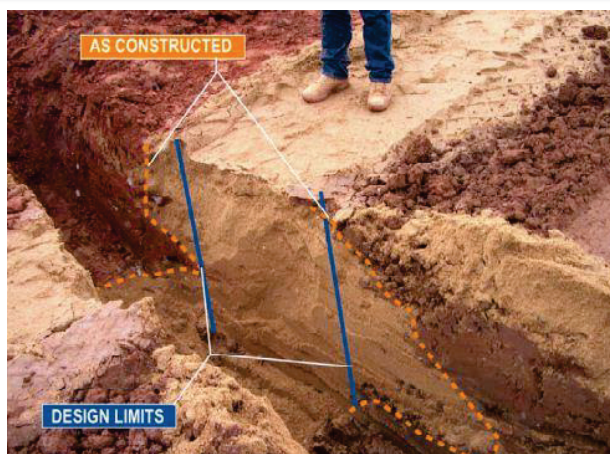


Fig. 6 Problème de réalisation de drain cheminée verticale mince. (Pabst et al. 2011)

La figure 6 un problème de réalisation d'un drain cheminée, donc il est très important de limiter la contamination des couches drainantes lors de la mise en place. Des précautions particulières doivent être prises lors de l'épandage pour éviter la ségrégation qui peut conduire à des incompatibilités granulométriques locales. Cela est particulièrement important pour :

- les filtres de granulométrie étendue
- le long des rives
- au contact de surfaces en béton où l'on épaissit généralement les filtres.

On limite généralement à 50 ou 70 mm la dimension maxima des éléments des filtres à granulométrie étendue et on sature le matériau pour le mettre en place de manière à réduire la ségrégation (Post and Guerber 1973).



Fig. 7 Réalisation d'un drain vertical avec un sable 0-5 mm. (Irstea bordeaux, 2011)

b. Barrages existants

l'ajout d'une cheminée à un barrage existant nécessiterait l'enlèvement d'une partie du remblai existant, les modifications apportées aux barrages existants placent généralement la cheminée plus en aval que ce qui serait utilisé pour une nouvelle construction, lorsque la cheminée est située en aval, il faut prévoir une surcharge suffisante pour assurer une protection du talus aval contre le glissement à la pleine charge du réservoir, de la même manière, un court tapis drainant ajouté au barrage existant car la cheminée à laquelle elle se raccorde est plus en aval (Pabst et al. 2011).

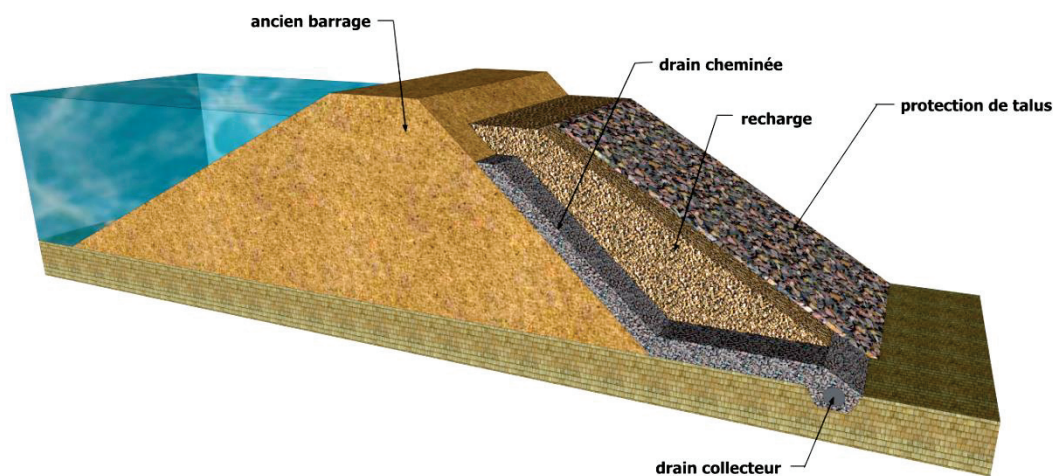


Fig. 8 Simple section montre le drain cheminée ajouté à un barrage existant.

3 Drainage de la fondation

Lorsqu'une infiltration à grande échelle se produit à travers la fondation perméable, recouverte d'une fine couche moins perméable, il est possible que l'eau bouillonne près du pied du barrage

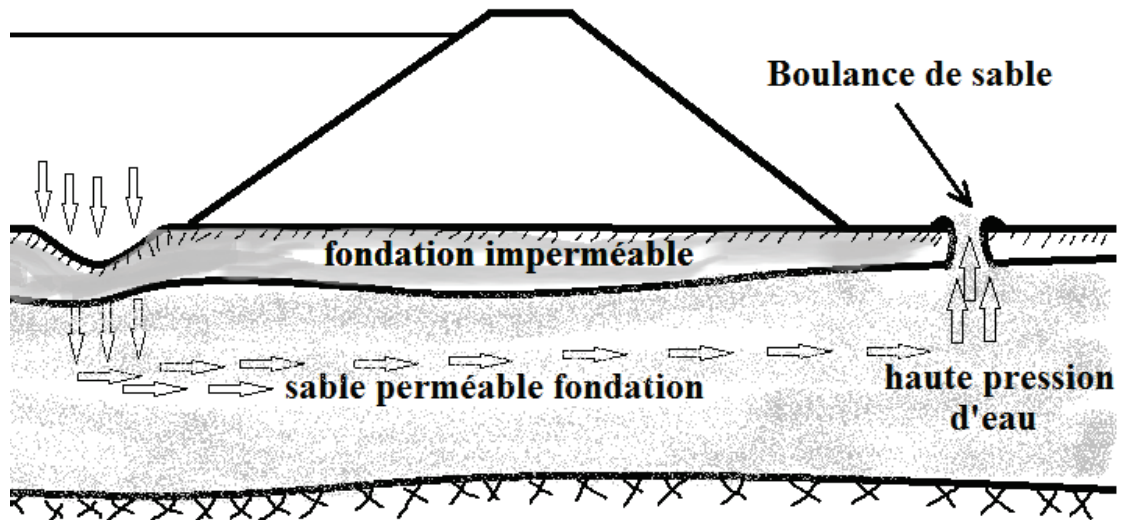


Fig. 9 Phénomène d'ébullition du sable.

3.1 Puits de secours

Une telle précédente possibilité de défaillance peut être contrôlée en construisant des puits de secours à travers la couche imperméable supérieure, le rabattement de la nappe est contrôlé avec le débit de pompage, la nappe rabatu annule les forces d'écoulement à la surface donc il n'y a pas des forces de soulèvement de sol ce qui rend le pied aval plus stable, le forage doit être doté de filtre bien choisie afin d'éviter l'éboulement de sol enveloppant le tubage.

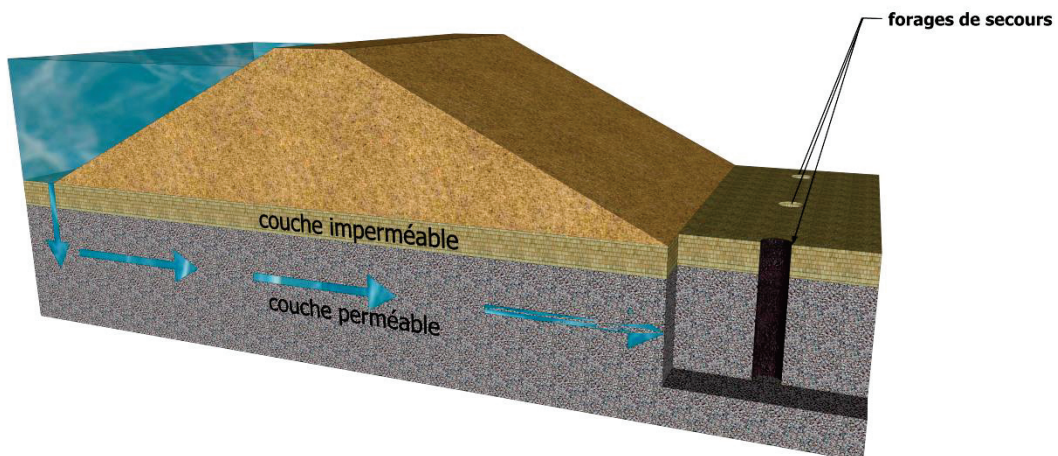


Fig. 10 Présentation des puits de secours.

3.2 Tranchées de drainage

Les drains de pied aval doivent être constitués d'un tuyau perforé entouré d'un drain de gravier qui, lui-même, est entouré d'un filtre à sable. Un exemple du drain est présenté à la [figure 11](#) et [12](#). Bien que les conditions de fondation varient, cette disposition est considérée comme le minimum nécessaire pour un drainage efficace. Dans le cas des fondations perméables, on ne saurait trop insister sur l'importance de recueillir les infiltrations, surtout, de réduire la pression interstitielle.

Des drains de pied à un étage (un drain composé uniquement de sable filtrant et d'un tuyau de drainage) peuvent également être envisagés dans l'intérêt de minimiser les coûts, les drains de pied en une seule étape ne sont pas recommandés en raison des incertitudes concernant les conditions de fondation et la performance de la structure lors du premier remplissage ([Garg 2011](#)).

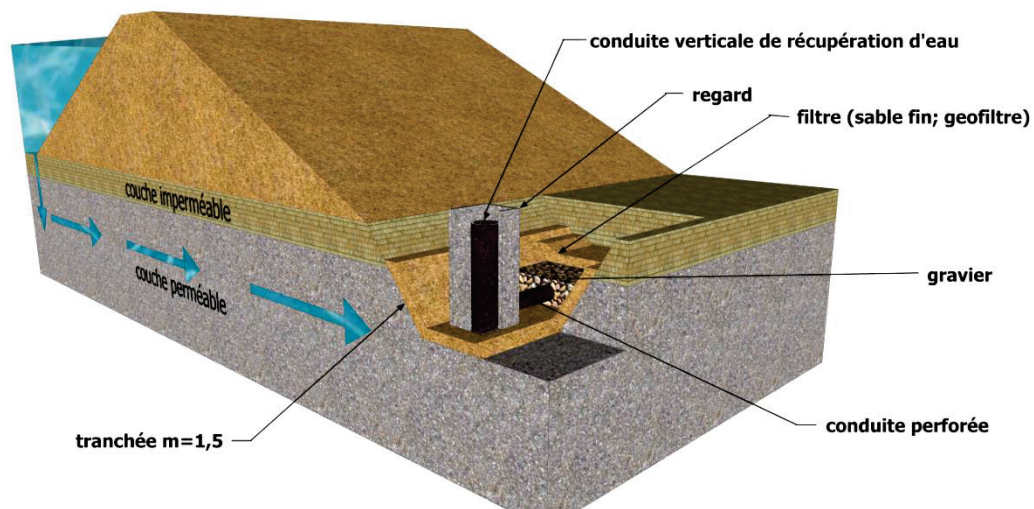


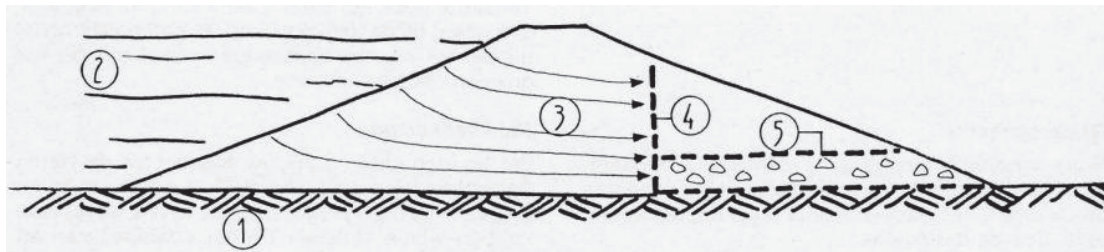
Fig. 11 Eléments constitutifs du drain tranchée.



Fig. 12 drainage par tranchée en cour de réalisation. (Pabst et al. 2011)

4 Drains de géotextile

Une nappe verticale de géotextile peut également jouer le rôle de drain dans un barrage en terre, ce drain intercepte les lignes de courant qui sans cela risqueraient de provoquer de suintements sur le talus aval du barrage, les eaux ainsi collectées sont dirigées par la nappe de géotextile vers le drain enveloppé de géotextile situé au pied aval, ce principe a été utilisé au barrage de Brugnens (France) par le centre technique de génie rural des eaux et des forêts (GIROUD 1979).



- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1- terrain naturel | 2- eau dans la retenue |
| 3- lignes de percolation | 4- géotextile vertical interceptant |
| 5- géotextile enveloppant le drain. | |

Fig. 13 Coupe schématique de barrage Brugnens (France). (GIROUD 1979)

5 Ce que le géotextile apporte par rapport aux solutions traditionnelles

Il est plus facile à mettre en place que de sable (sous l'eau, sur les pentes, dans les tranchées), il permet des solutions plus efficaces que les solutions traditionnelles, en tant que filtre il ne peut pas être entraîné par l'eau grâce à sa continuité, il a des propriétés contradictoires une

grande perméabilité associée à une grande capacité de rétention des particules, une solution économique (l'achat des matériaux, la mise en place, l'entretien) (GIROUD 1979).

6 Critères de choix des matériaux de filtre

Les principaux essais qui permettent de qualifier les matériaux (hors la granulométrie) sont les suivants :

- Mesure du coefficient de friabilité des sables.
- Essai Los Angeles (chocs) et essai Micro-Deval (usure) pour les graviers.
- Equivalent de sable, essai au bleu de méthylène (la présence d'argile peut entraîner une cohésion et donc une fissuration du matériau), teneur en matières organiques.

7 Les tuyaux de drainage

Les tuyaux de drainage sont constitués de conduite perforée avec un diamètre de 3 mm, bien que le guide pratique du U.S. Corps of Engineers autorisent des pertuits proches espacé de 6.5 mm, Gaj and Madramootoo (2020) ont conclu que l'utilisation de pertuits rectangulaires est hydrauliquement plus avantageuse que les trous circulaires dans la gamme des tuyaux ondulés.

Aujourd'hui, le matériau le plus couramment utilisé pour les tuyaux de drainage est le tuyau en plastique, généralement en PVC ou en polyéthylène haute densité (PEHD).

7.1 les tuyaux en PVC

il est recommandé d'utiliser des tuyaux à joint d'étanchéité à cloche, les tuyaux avec joints collés peuvent développer des problèmes de contraintes induites par les changements de température qui se produisent après l'installation, c'est-à-dire que les tuyaux sont posés et collés dans des conditions chaudes, puis refroidissent et tentent de se rétracter après l'enfouissement, en outre, les joints collés sont plus rigides et plus susceptibles d'être endommagés par un tassement ou un déplacement que les joints à emboîtement. et les joints à emboîtement.

7.2 les tuyaux en PEHD

les tuyaux ondulés sont les plus couramment utilisés, Le PEHD ondulé est disponible en deux types : le tuyau ondulé à paroi simple et le tuyau profilé (à double paroi, avec une paroi intérieure lisse et une paroi extérieure ondulée. Les inspections par caméra ont permis

d'identifier un grand nombre d'installations de tuyaux d'évacuation en PEHD à simple paroi qui ont été gravement endommagés pendant ou après l'installation. Les dommages signalés comprenaient une grande déformation de la section transversale, des fissures importantes et même l'effondrement du tuyau. En raison des préoccupations concernant les dommages causés aux tuyaux PEHD à paroi simple, ce type de tuyau n'est pas recommandé pour les tuyaux de drainage dans les systèmes de collecte et de contrôle des infiltrations pour les barrages. Les tuyaux profilés en PEHD se sont avérés performants et sont recommandés pour les travaux de drainage.

Conclusion

Quel que soit la perméabilité d'un barrage en terre, il y a toujours des infiltrations dans son massif, il n'existe pas d'étanchéité parfaite pour ce type d'ouvrage, la conception des dispositifs de drainage constitue une préoccupation majeure en vue de leur rôle dans la sécurité des barrages.

Le prisme de drainage un système adopté pour les petites digues afin d'intercepter les eaux infiltrées du remblai et protège le pied aval contre les gradients de sortie, le drain ne doit être installé à l'intérieur du barrage afin de prévoir toutes modifications de talus aval.

Pour les barrages d'hauteur modéré (de 15 à 60 m) le système de drainage par tapis est très utilisé, le drain est à double fonction, drainé les eaux viennent du remblai ainsi de la fondation, le drain maintiens bien la surface phréatique à l'intérieur du remblai, mais pour l'anisotropie supérieur à 30 les deux systèmes deviennent inefficaces.

La consolidation du remblai modifie l'anisotropie du corps du barrage, ce qui a un impact sur la configuration de la ligne phréatique. Par conséquence, pour les grands barrages, il est recommandé d'utilisé un drain cheminée, même si cela entraine des débits de fuites et des gradients élevés. il est également conseillé de le compléter par un diaphragme d'étanchéité.

Une combinaison des systèmes est très utilisé dans le cas des grands barrages afin de profiter de tous les avantages de chaque système, mais il nécessite une bonne connaissance du comportement de la digue en présence d'écoulement en régime permanent, transitoire avec différentes situations du barrage (vidange rapide, séisme, comportement à long terme....).

**CHAPITRE III : Critères de sélection des filtres
granulaires et géotextiles**

Introduction

Le dispositif filtre/drain est un élément particulièrement important d'un barrage en remblai. Nombre d'accidents et de rupture sont imputables à l'absence de filtres et/ou de drains, ou encore à une mauvaise conception ou réalisation du système filtre/drain pouvant conduire à une érosion interne ou un drainage insuffisant. La sécurité des barrages en remblai dépend donc d'une conception et d'une construction adéquate des systèmes de filtres et de filtres/drains.

Dans ce chapitre on présente un manuel pratique de choix et de la sélection des filtres à sable ainsi géotextile basé sur les recommandations de (FEMA 2011; URS 2010; Pabst et al. 2011; GIROUD 1979; Luetlich et al. 1992; IS 9429 1999; MIRAFI guide pratique).

1 Filtre granulaire

1.1 Traçage de la courbe granulométrique du sol en contact avec le filtre

Tracer les courbes granulométriques des matériaux du sol de base et déterminer si les sols de base ont une teneur en argile dispersive.

La sélection du sol de base pour les sols in situ est plus compliquée en raison de la plus grande variabilité des dépôts de sols naturels que des remblais, ce processus de sélection ne fait pas de différence entre les barrages existants et les nouveaux barrages car cela n'est pas pertinent. Lors de l'évaluation des filtres pour les dépôts de sol de fondation complexes, les concepteurs doivent soigneusement considérer les voies d'infiltration potentielles et le type de mécanisme d'érosion interne qui doit être atténué.

1.2 Analyse de la courbe granulométrique

Déterminer si le sol de base contient des particules plus grosses que le tamis n° 4 d'U.S standard tamis soit 4.75 mm, et si le sol de base est à granulométrie variable ou potentiellement sujet à une instabilité interne.

1.2.1 Stabilité interne des sables

Les sols sensibles à la suffusion présentent une granulométrie discontinue et contiennent un pourcentage plus élevé de particules grossières, selon Burenkova (1993), la stabilité interne d'un sol dépend des facteurs d'uniformité conditionnelle (h' et h''), définis comme suit:

$$h' = \frac{d_{90}}{d_{60}}; h'' = \frac{d_{90}}{d_{15}} \quad (\text{III.1})$$

- Les zones I et III représentent les zones des compositions suffusives.
- La zone II représente une zone de compositions non suffusive.
- la zone IV représente une zone des sols artificiels.

Le champ pour les sols non-suffusifs (zone II) est décrit d'une façon approximative par l'inégalité suivante (Fig.1):

$$0.76 \log(h'') + 1 < h' < 1.86 \log(h'') + 1 \quad (\text{III.2})$$

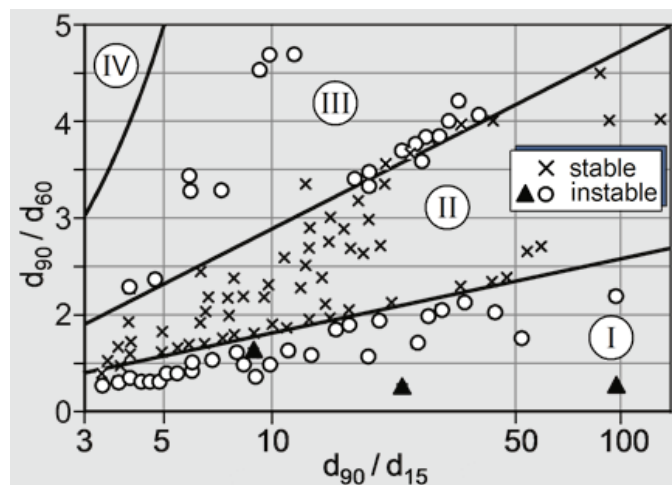


Fig. 1 Critère de stabilité interne. (Burenkova 1993)

1.3 Reclassement du sol

Le reclassement du sol de base au début de la procédure est une étape critique qui doit être suivie, afin d'obtenir un filtre correctement conçu. Le concept de reclassement a été développé pour corriger les granulométries à forte pente peuvent être intérieurement instables, et le reclassement permet de corriger ce phénomène. Puisque les particules de gravier n'ont pas de capacité de

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

rétenion des particules dans les sols à granulométrie large ou à granulométrie variable, le filtre résultant ne répondra pas aux critères de rétenion des particules pour le sol de base) (Fig.2).

Tamis	original %des passants	Ajustement	% des passants
3"	100.0		
1 1/2"	85.7		
3/4"	74.6		
3/8"	65.9		
#4	57.9	(57.9 / 57.9) x 100	100.0
#8	54.6	(54.6 / 57.9) x 100	94.3
#16	49.0	(49.0 / 57.9) x 100	84.6
#30	42.6	(42.6 / 57.9) x 100	73.6
#50	32.2	(32.2 / 57.9) x 100	55.6
#100	19.8	(19.8 / 57.9) x 100	34.2
#200	13.0	(13.0 / 57.9) x 100	22.5
1 min	9.9	(9.9 / 57.9) x 100	17.1
4 min	5.4	(5.4 / 57.9) x 100	9.3
19 min	2.9	(2.9 / 57.9) x 100	5.0
60 min	1.6	(1.6 / 57.9) x 100	2.8

Fig. 2 Exemple de reclassement d'un sol. (Pabst et al. 2011)

1.4 Classement du sol de base

L'étape suivante de la procédure consiste à classer la granulométrie du sol de base dans l'une des quatre catégories suivantes conformément au tableau ci-dessous.

Les différents sols n'ont pas la même capacité à s'éroder sous l'effet de l'eau qui les traverse, une argile plastique non dispersive sera plus résistante à l'érosion que les limons non plastiques en raison des liaisons chimiques entre les particules d'argile. Les graviers seront plus résistants à l'érosion que les sables fins en raison du poids plus élevé de leurs particules et de la force de traction nécessaire pour déplacer une particule. C'est pourquoi les sols sont classés en catégories en fonction de leur teneur en fines (pourcentage de particules plus fines que le tamis n° 200). Le schéma ci-dessous représente les étapes à suivre afin de classer un sol de base (Fig.3).

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

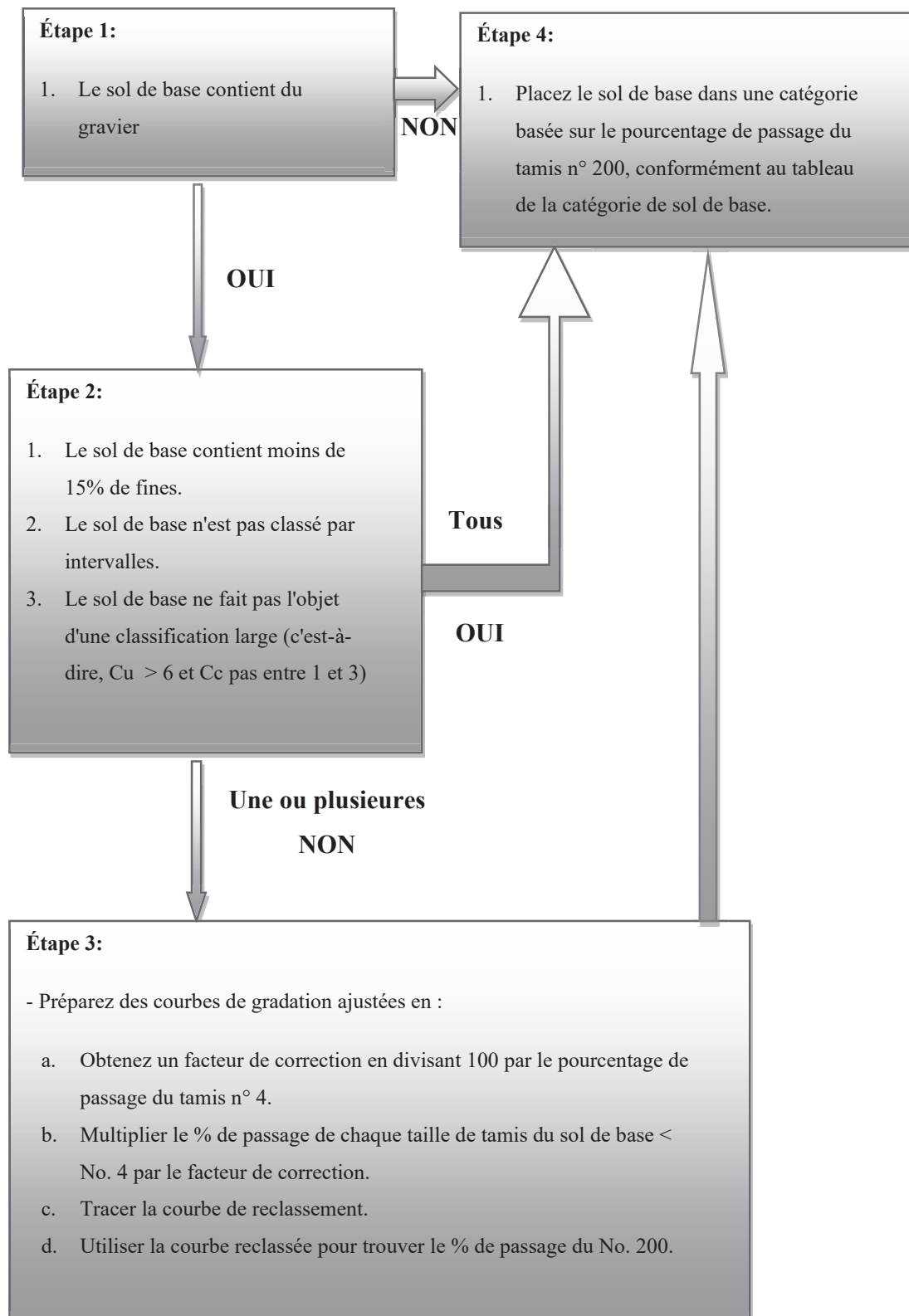


Fig. 3 Schéma des étapes de classement des sols de base. (Pabst et al. 2011)

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

1.4.1 Coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un sol, il se calcule de la façon suivant:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{III.3})$$

- La granulométrie est dite **étalée** si $C_u \geq 6$.
- La granulométrie est dite **uniforme** si $C_u < 6$.

1.4.2 Coefficient de courbure

Permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre D10 et D60.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (\text{III.4})$$

Ainsi, si le sol est bien gradué, on a la présence d'une grande variété de diamètres. Lorsque $1 < C_c < 3$, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Un C_c trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D10 et D60, la granulométrie est alors mal graduée.

Tab. 1 Classement des sols de base. (Thior et al. 2019)

Catégorie du sol de base	Pourcentage de grains plus fins que le tamis n° 200 (0,075 mm) (après le reclassement du sol)	Description du sol de base
1	>85	Limons fins et argiles
2	40-85	Limons, argiles, sables limoneux et sables argileux
3	15-39	Sables et graviers limoneux et argileux
4	<15	Sables et graviers

1.5 Critère de rétention de filtre

Pour satisfaire les exigences de rétention des particules, il est nécessaire de déterminer la taille maximale admissible du D_{15F} , la sélection est basée sur le D_{85B} du sol de base reclassé selon de tableau ci-dessous (Tab.2). Inscrivez cette valeur dans la courbe granulométrique avec un point A de cordonné ($d(mm)$; D_{15F}).

Tab. 2 Critères de rétention. (FEMA 2011)

Catégorie de sol de base	Filtrage -Maximum D_{15F}
1	Le D_{15F} maximum doit être $\leq 9 * D_{85B}$, mais pas inférieur à 0,2 mm, sauf si les sols sont dispersifs. Les sols dispersifs nécessitent un D_{15F} maximal qui est $\leq 6,5 * D_{85B}$, mais pas moins de 0,2 mm.
2	Le D_{15F} maximum doit être $\leq 0,7$ mm, sauf si le sol est dispersif, auquel le D_{15F} maximum doit être $< 0,5$ mm.
3	-Pour les sols non dispersifs, le D_{15F} maximum doit être : $\leq \left[\frac{40 - A}{25} \right] [(4 * D_{85B}) - 0,7mm] + 0,7mm$ A : Pourcentage de passage au tamis n° 200 (0.075mm) -Lorsque $4 * D_{85B}$ est inférieur à 0,7 mm, on prend 0,7 mm. -Pour les sols dispersifs, on prend 0,5 mm.
4	Le D_{15F} maximum doit être $\leq 4 * D_{85B}$ du sol de base après le reclassement du sol.

1.6 Critère de perméabilité

Pour satisfaire aux exigences de perméabilité, déterminez la valeur minimale, admissible D_{15F} :

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

$$D_{15}F \geq 5 * D_{15}B, \text{ mais pas moins de } 0,1 \text{ mm.} \quad (\text{III.5})$$

Tracer ce point comme un point **B**

1.7 Limites du contenu en fines et en matières surdimensionnées

Afin de limiter la quantité de fines et de matériaux surdimensionnés pour les filtres, des limites sont placées sur le **D₅F** minimum et le **D₁₀₀F** maximum selon le [tableau 3](#).

Tab. 3 Critères de taille (maximale et minimale) des particules. (Pabst et al. 2011)

Catégorie du sol de base	D ₁₀₀ F maximum	D ₅ F minimum
Toutes les catégories	< 51mm	0,075 mm (Tamis n° 200)

La limite **D₅F** est indiquée par le point **I** et **D₁₀₀F** par le point **J**.

Pour limiter le potentiel de ségrégation, déterminer **D₉₀F** à partir du [tableau 4](#)

Tab. 4 Critères de la ségrégation. (Pabst et al. 2011)

Catégorie du sol de base	Si D ₁₀ F (mm)	D ₉₀ F maximum
Toutes les catégories	< 0,5	20
	0,5-1	25
	1-2	30
	2-5	40
	5-10	50
	>10	60

La limite **D₉₀F** est représentée par le point **K**.

1.8 Prévention des écarts

Des contraintes supplémentaires sont introduites dans cette étape, cela se fait en limitant la différence entre la limite inférieure et supérieure du pourcentage de passage à un maximum de 35

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

points de pourcentage, Ceci est représenté graphiquement dans la figure 4 par la barre bleu LM, qui a une longueur maximale de 35 points de pourcentage, la barre peut être déplacé sur le graphe, mais le point L ne peut pas se déplacer à gauche d'une ligne tracée entre les points A et K et ne peut pas se déplacer plus à droite que le point B. Comme décrit à l'étape suivante, la barre LM peut être déplacée vers un emplacement conforme à l'utilisation prévue du filtre.

- Pour les filtres à grains plus fins destinés à se concentrer sur la rétention des particules, la barre serait positionnée à droite.
- Les filtres plus grossiers se concentrant sur la perméabilité, la barre sera positionnée à gauche.

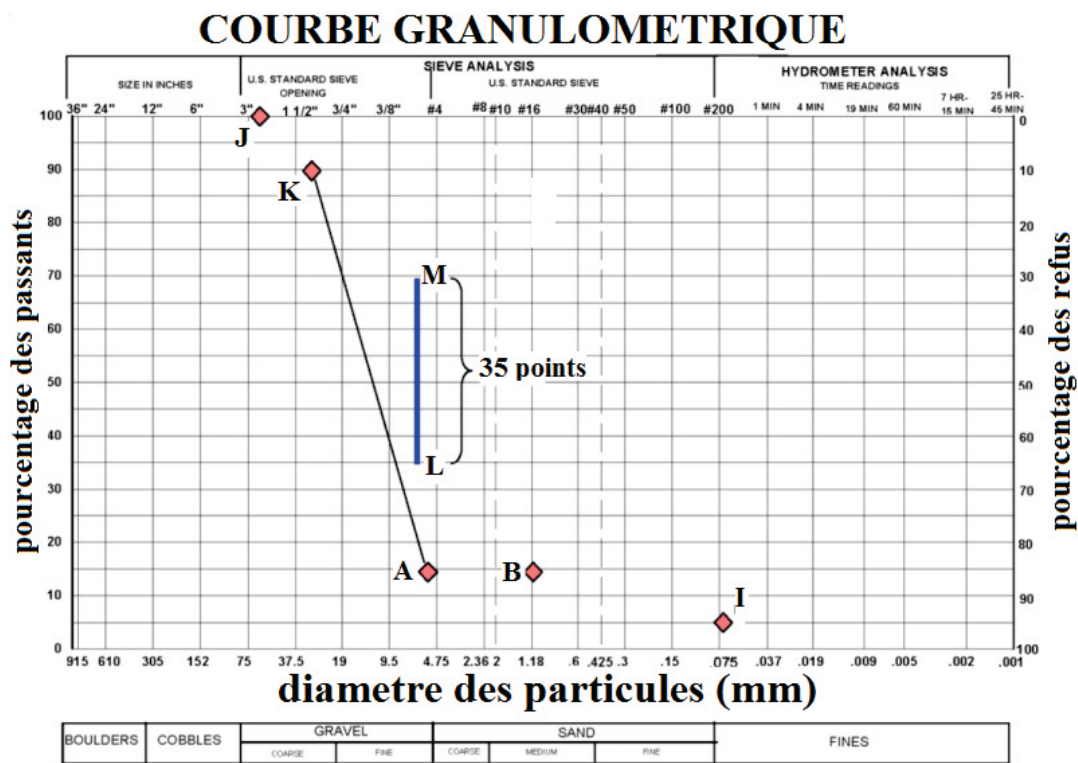


Fig. 4 Un exemple des limites (points de contrôle) pour un sol de base catégorie 2. (Pabst et al. 2011)

1.9 La sélection finale du filtre

En général, la méthode pour sélectionner la bande de gradation à l'intérieur des limites peut être faite en trois étapes :

CHAPITRE III: Critères de sélection des filtres granulaires et géotextiles

- Commencez par les granulométries les plus petites car c'est là que se situent les contraintes de rétention des particules et de perméabilité (points **A**, **B** et **I**), si la rétention des particules est le critère le plus critique, la gradation doit être fixée plus près du point **B**. Si les critères de perméabilité sont plus importants, la bande de gradation doit être plus proche du point **A**.
- Situez la barre **LM** en fonction du degré d'uniformité souhaité pour la granulométrie, si une gradation plus uniforme est souhaitée, déplacez la barre vers la droite, près du point **B**, si une gradation plus large est souhaitée, déplacez la barre vers la gauche, près de la ligne **AK**.
- Sélectionnez la gamme de gradation pour les plus grandes tailles de grain, cette partie de la bande de gradation à le moins de contraintes (seulement les points **J** et **K**) et offre plus de flexibilité, En général, les bandes de gradation devraient avoir les mêmes pentes ou des pentes légèrement plus plates que celles observées dans la plage de 30% à 60% des passants, la gradation devrait également s'incurver vers la gauche, de manière similaire à la relation observée entre les points **J** et **K** (Fig.5).

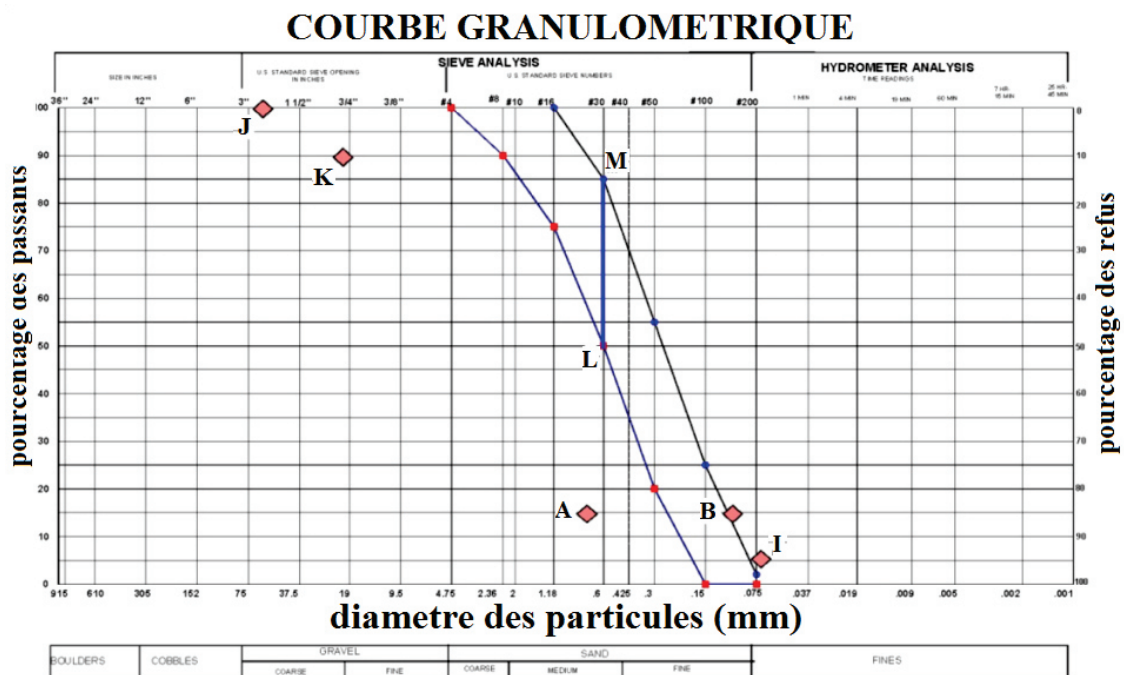


Fig. 5 Exemple de gradation d'un filtre de rétention. (Pabst et al. 2011)

2 Filtre géotextile

2.1 Définition des exigences d'application du filtre

La première étape du processus de conception consiste à comprendre quelles sont les exigences du filtre dans le cadre de l'application, cela implique de déterminer le type de matériau de drainage qui sera utilisé à côté du filtre géotextile, puis de définir la caractéristique préférée (rétention ou perméabilité) pour l'application.

- Le matériau de drainage doit être identifié pour les raisons suivantes:
- les supports de drainage présentant une grande quantité de vides ou de volume poreux pourraient influencer le choix du critère de rétention.
- les supports de drainage présentant des points de contact aigus (tels que les graviers très anguleux) influencera les exigences de survivabilité.

2.2 Définir les conditions aux limites

Évaluer la contrainte et la pression de confinement au voisinage du filtre est importante pour les raisons suivantes :

2.2.1 Les Conditions mécaniques

- Pour les sols à gros grains, des pressions de confinement élevées ont tendance à augmenter la densité relative I_D du sol, ainsi la résistance du sol au mouvement des particules, ceci affecte la sélection des critères de rétention.
- Pour les sols à grains fins, des pressions de confinement élevées diminuent la conductivité hydraulique du sol k_s , et augmentent le potentiel d'extrusion du sol à travers le filtre géotextile.

2.2.2 Les conditions d'écoulement

Il est important de définir les conditions d'écoulement car les critères de rétention pour les conditions d'écoulement en régime permanent sont différents de celles d'un écoulement dynamique.

2.3 Déterminer les exigences de rétention

La plupart des critères de conception de filtre couramment utilisés ont été développés spécifiquement pour des conditions d'écoulement en régime permanent ou des conditions d'écoulement dynamique (Fig.6 ; Fig.7).

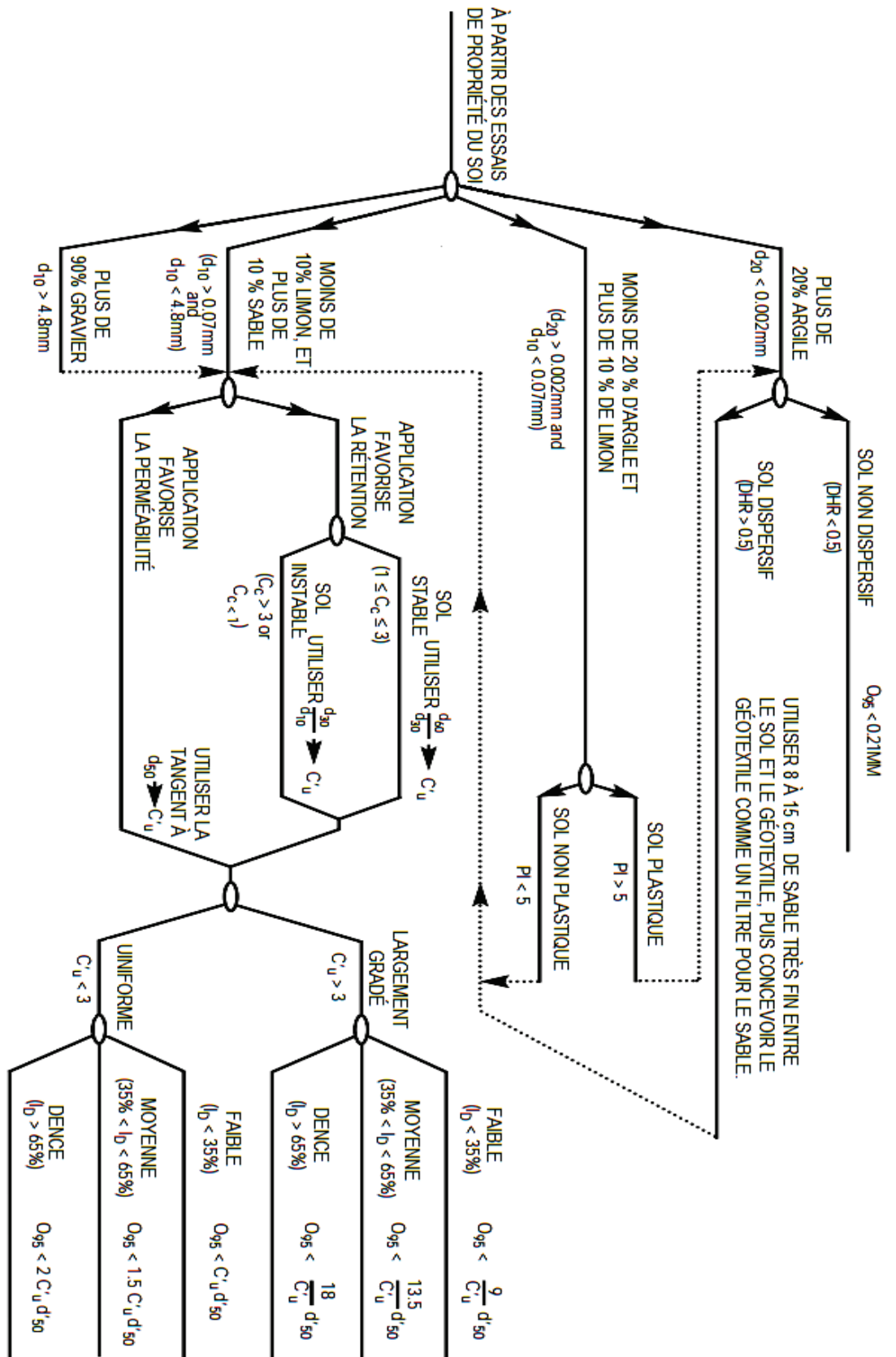


Fig. 6 Critères de rétention du sol dans des conditions d'écoulement en régime permanent. (Luettich et al. 1992)

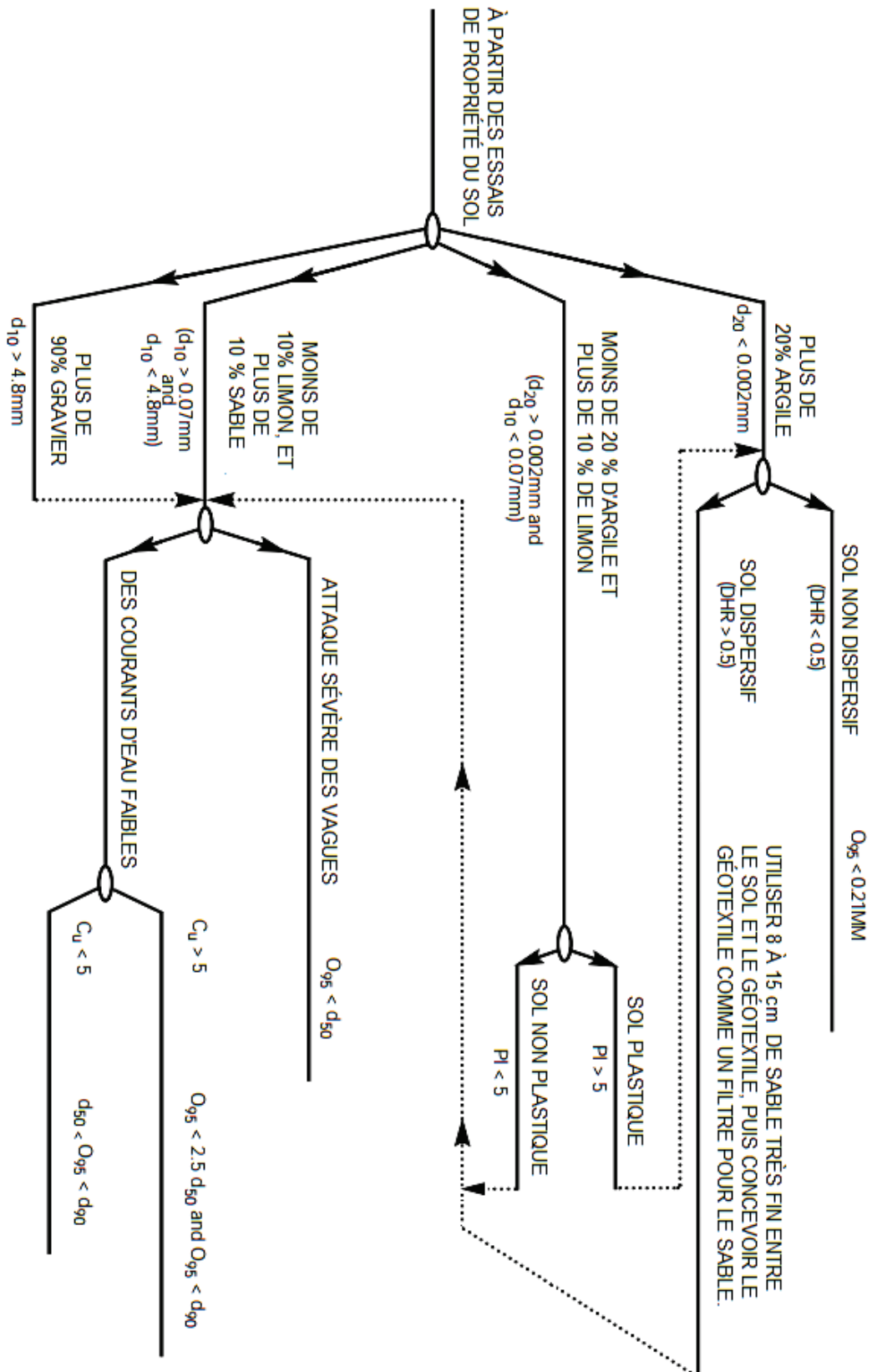


Fig. 7 Critères de rétention du sol dans des conditions d'écoulement dynamiques. (Luettich et al. 1992)

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} ; C'_u = \sqrt{\frac{d_{100}}{d_0}} \quad (III.6)$$

PI : indice de plasticité. ; **ID** : indice de densité.

O₉₅ : d'ouverture du géotextile. ; **HDR**: Double Hydrometer Ratio (la dispersion).

C_c : coefficient de courbure.

2.3.1 Indices de plasticité IP

L'indice de plasticité **IP**, c'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol, il s'exprime donc par la relation:

$$I_p = W_L - W_P \quad (III.7)$$

Plus **IP** est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants (Tab.5).

Tab. 5 Indice de plasticité de sol.

Indice de plasticité IP	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	plastique
>40	Très plastique

2.3.2 Indice de densité ID

Pour caractériser l'état de densité d'un dépôt de sol pulvérulent (type gravier et sable), on est amené à calculer son indice de densité **ID** (Tab.6).

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100 \quad (III.8)$$

- **e_{min}** : indice des vides dans l'état le plus compact.
- **e_{max}** : indice des vides dans l'état le moins compact.
- **e** : indice des vides in situ.

Tab. 6 Etat de compacité des sols.

Indice de densité I_D	Etat de compacité du sol
0-15	Très faible compacité
15-35	Peu compact
35-65	Compacité moyenne
65-85	Compact
85-100	Très compact

2.3.3 Essai de dispersion (Double Hydrometer Ratio)

La méthode est de comparer la tendance des particules fines d'un sol à sédimenter respectivement dans l'eau distillée sans agitation mécanique (sédimentation normale) et dans une solution défloculante avec agitation mécanique (sédimentation dispersée), la différence entre ces deux types de sédimentations montre la tendance à la dispersion naturelle du sol examiné (Fig.8 ; Tab.7) (Pham 2008).

$$\text{HDR} = \frac{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m sans dispersion}}{\% \text{fine} < 5 \mu\text{m avec dispersion}} = \frac{A}{B} \quad (\text{III.9})$$

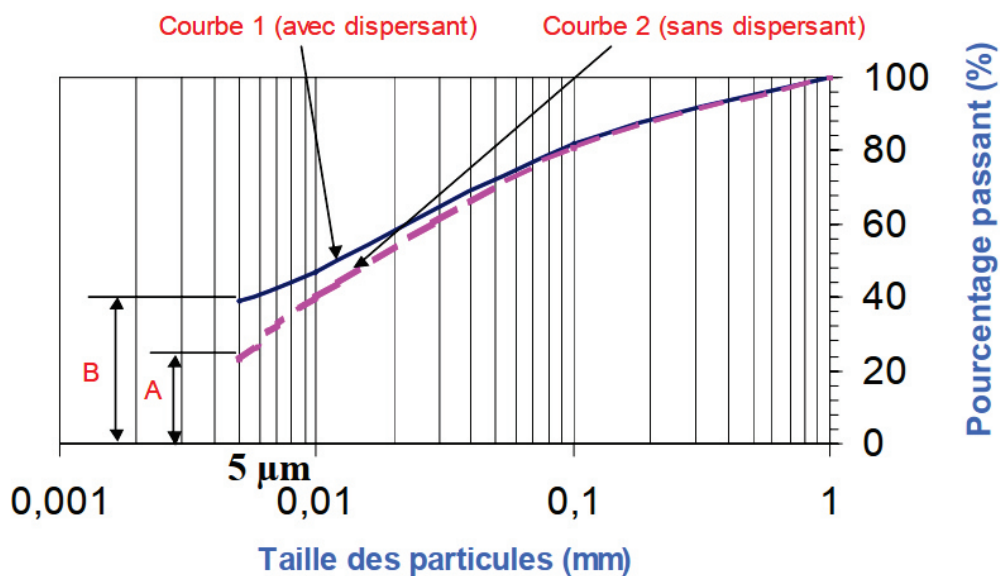


Fig. 8 Résultat de Double Hydrometer Test.

Tab. 7 Classification de la dispersion des sols. (Sherard et al. 1976a)

Dispersion du sol HDR	Etat du sol
$0 < \text{HDR} < 0.3$	Non dispersif
$0.3 < \text{HDR} < 0.6$	Probablement
$\text{HDR} > 0.6$	dispersif

2.4 Exigence de perméabilité

2.4.1 Définir la conductivité hydraulique du sol (k_s)

Pour les applications critiques, telles que les barrages en terre, la perméabilité du sol doit être mesurée en laboratoire en utilisant des échantillons représentatifs du terrain et pour les applications non critiques, peut être estimée à partir la taille de particule D_{15} du sol.

2.4.2 Définir le gradient hydraulique pour l'application (i_s)

Le gradient hydraulique (i_s) variera en fonction de l'application du filtre.

2.4.3 Déterminer la perméabilité minimale admissible du géotextile ($K_{\text{géo}}$)

Après avoir déterminé la conductivité hydraulique du sol et le gradient hydraulique, l'équation suivante peut être utilisée pour déterminer la perméabilité minimale admissible du géotextile (Giroud, 1988) :

$$K_{\text{géo}} > i_s * K_s \quad (\text{III.10})$$

2.5 Exigences en matière d'anti-colmatage

Pour minimiser le risque de colmatage, les critères de (FEMA 2011) suivants devraient être respectés:

- Utilisez la plus grande taille d'ouverture (O_{95}) qui satisfait aux critères de rétention.
- Pour les géotextiles non tissés, utiliser la plus grande porosité (n) disponible, mais pas moins de 30 %.
- Pour les géotextiles tissés, utilisez le plus grand pourcentage de surface ouverte disponible, mais pas moins de 4 %.

2.6 Déterminer les exigences de survie

Le type de matériau de drainage placé à côté du géotextile et les techniques de construction utilisées pour placer ces matériaux peuvent endommager le géotextile. Pour assurer la survie de la construction, il faut spécifier les propriétés de résistance minimales qui correspondent à la gravité de l'installation.

Utiliser le tableau de la [figure 9](#) pour sélectionner les propriétés de résistance du géotextile requises pour assurer la survie de l'installation à divers degrés.

RÉSISTANCE À LA TRACTION (Kg)	ALLONGEMENT (%)	RÉSISTANCE DES COUTURES (Kg)	RÉSISTANCE À LA PERFORATION (Kg)	RÉSISTANCE À L'ÉCLAITEMENT (Kg)	DECHIRURE TRAPEZOIDALE (Kg)
112	< 50% *	101	41	178	25
71	≥ 50%	64	25	86	25
82	< 50% *	73	30	138	25
51	≥ 50%	46	18	63	18
112	< 50% *	101	41	178	25
92	≥ 50%	83	36	112	36
112	< 50% *	101	41	132	25
71	≥ 50%	64	25	86	25

Fig. 9 Exigences de la résistance de survie. (AASHTO 1996)

2.7 Déterminer les exigences de durabilité)

Certaines installations ou applications de filtres géotextiles entraînent une exposition prolongée au soleil, dans ce cas, des additifs tels que le noir de carbone ou le dioxyde de titane sont recommandés pour conférer au géotextile une résistance supplémentaire à la dégradation due aux rayons ultraviolets.

Si l'application du géotextile entraîne une exposition importante aux produits chimiques (comme dans les applications de confinement des déchets dans les décharges), la compatibilité chimique du géotextile doit être vérifiée.

2.8 Diverses considérations de conception

D'autres considérations doivent être prises en compte dans la conception des filtres géotextiles sont les suivantes :

- la structure du géotextile.
- l'abrasion du géotextile due à une action dynamique.
- le contact intime entre le sol et le géotextile.
- les facteurs de colmatage biologique et biochimique
- le facteur de sécurité

Conclusion

La méthodologie présentée est considérée comme un manuel pratique pour la sélection des filtres granulaires et géotextiles pour les applications non critique, dans le cas où l'application met en danger les vies humaines en cas de défaillance de filtre (état critique) comme les barrages, la sélection du filtre doit être accompagné d'une série des essais afin de vérifier la performance du filtre en grandeur réel, la bonne connaissance des conditions aux limites aux quelles le filtre à exposer influence sur le choix du type filtre, la sélection, l'économie, la durabilité et la mise en place. La mise en place du filtre infecte le bon fonctionnement et la durabilité du filtre, le contrôle de la pose et une étape très sensible dans la réalisation.

**CHAPITRE IV : Etude numérique et
expérimentale d'un système de drainage par
drains**

Introduction

Le travail qui suit vise à fournir un outil permettant de dimensionner l'espacement et la longueur des drains d'une série de drains parallèles installés dans la partie aval d'une digue en terre en fonction de la géométrie du barrage et du niveau d'eau en amont. Cette technique, adoptée pour les petits barrages ne dépassant pas 15 m de hauteur, présente certains avantages tels que la facilité d'utilisation, la disponibilité des matériaux de construction et la rentabilité. Avant de vérifier l'influence de l'espacement et de la longueur des drains sur le débit de fuite, la pression interstitielle, la ligne phréatique et la stabilité hydromécanique de la structure, des expérimentations sur un modèle physique ont permis de valider le modèle numérique, une étude paramétrique numérique réalisée pour plusieurs combinaisons d'espacement-longueur des drains et application numérique sur un barrage réel (réservoir de Oued El Magroune) en intégrant le système de drainage proposé et ceux avec le système de drainage existant (drain horizontal).

1 Matériels et méthodes

Pour atteindre l'objectif de la recherche, un diagramme est présenté pour identifier les étapes et les méthodes utilisées dans l'analyse de ce système de drainage montré dans la (Fig.1).

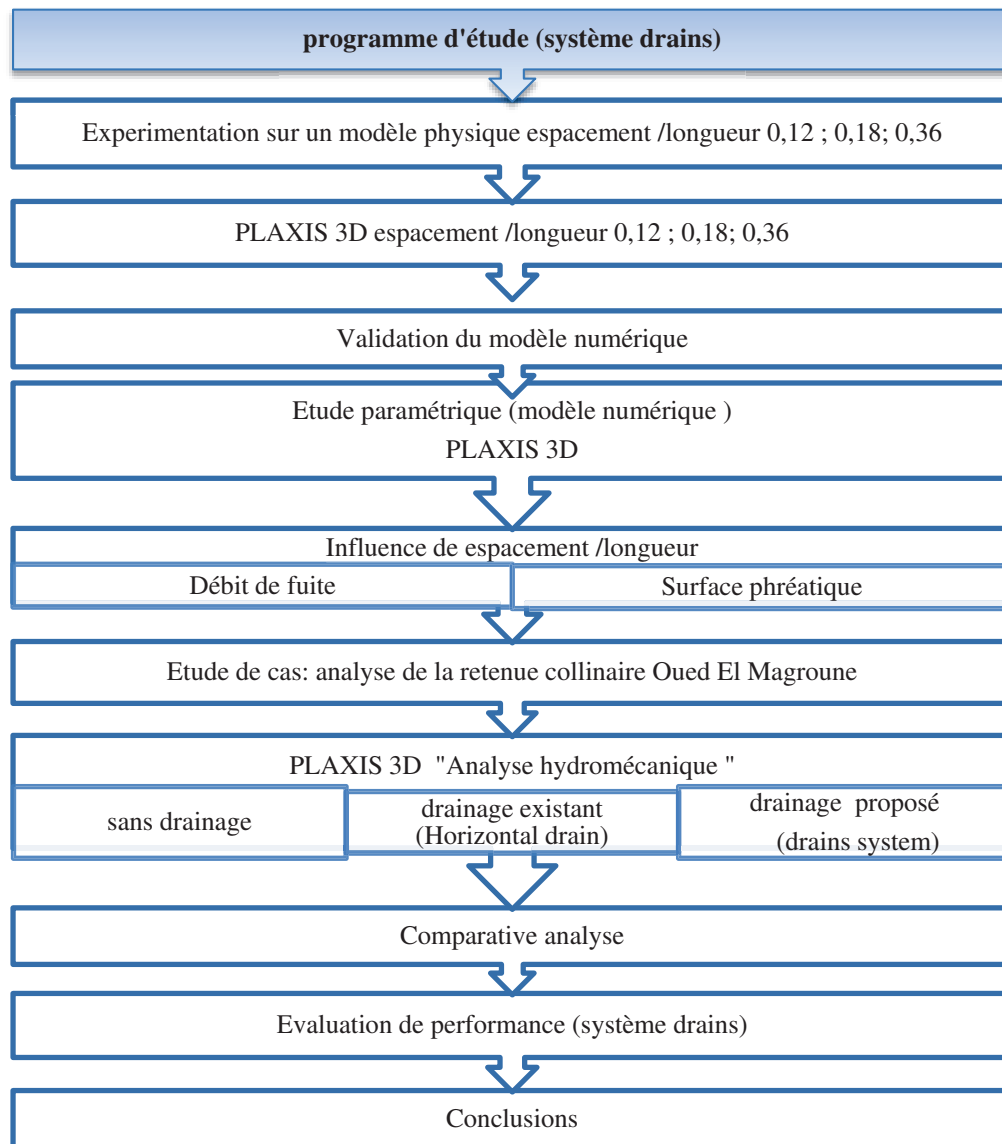


Fig. 1 Schéma méthodologique de l'étude.

2 Etude expérimental

2.1 Présentation de l'équipement

Le réservoir est conçu en laboratoire pour répondre aux exigences de l'essai, se compose d'un banc solide de dimensions 200 cm de longueur, 40 cm de largeur et 50 cm de hauteur qui contient une façade en verre transparent afin d'aider à observer facilement les niveaux d'eau avec une plaque verticale qui contient un ensemble de 9 piézomètres connectés au réservoir.

Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

CHAPITRE I V:

Les piézomètres mesurent la pression interstitielle de l'eau à chaque emplacement des prises de pression situées au milieu. Un tuyau d'entrée d'alimentation en eau est prévu en amont pour permettre à l'eau de s'écouler dans le réservoir. De tuyau de trop-plein réglables en hauteur afin de contrôler le niveau d'eau (Fig.2).

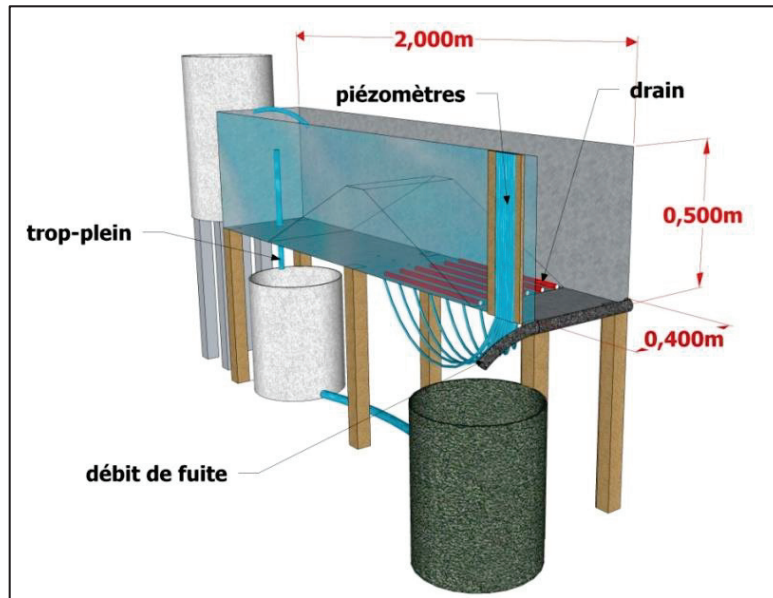


Fig. 2 Vue générale de l'appareil.

2.2 Mesure de perméabilité du sable

Cette méthode de mesure consiste à maintenir une charge hydraulique constante dans l'échantillon saturée. Le flux traversant l'échantillon est engendré par un gradient de charge hydraulique constant. Les conditions du régime permanent seront atteintes lorsque le débit d'eau entrant est égal au débit sortant de l'échantillon. La perméabilité est calculée en utilisant la loi de Darcy (Fig.3).

$$K = \frac{V \cdot L}{t \cdot DH \cdot S} \quad (IV.1)$$

- K : perméabilité du sol (m/s)
- L : longueur de l'échantillon (m)
- t : temps (s)
- DH : la charge hydraulique (m)
- S : la section de l'échantillon (m²)

Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

CHAPITRE I V:

Cette méthode de mesure peut être appliquée aussi bien aux échantillons intacts qu'aux échantillons remaniés. Il est certain qu'avec cette méthode, on peut obtenir des résultats assez précis pour un temps d'essais assez importants.

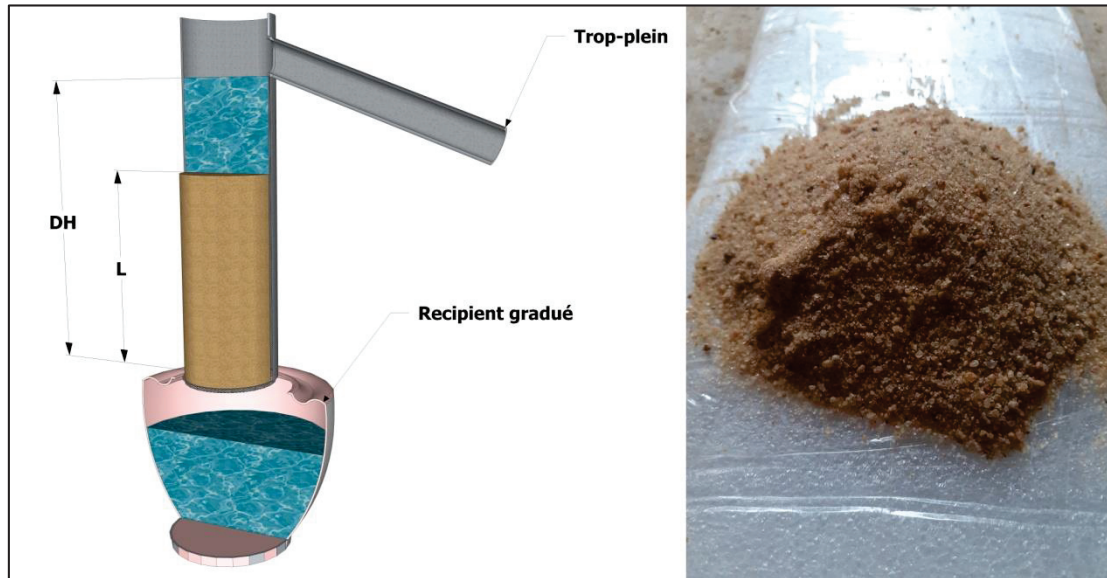


Fig. 3 Vue générale de perméamètre.

2.3 Préparation du modèle physique.

La préparation du modèle physique pour chaque configuration Espacement/Longueur ce fait avec les étapes suivantes (Fig.4):

- Tamisage du sable fin d'obtenir une fraction inférieur à 2mm.
- Protection des trous des piézomètres en contact avec le sable par un filtre fin pour retenir les particules de sable afin d'éviter le colmatage des tuyaux des piézomètres.
- Installation des drains avec un écartement et une position (x) bien déterminée.
- En utilisant un cône, on renverse le sable de telle façon d'assurer une répartition régulière du sable.
- Le compactage se fait avec une dame de bois, en appliquant sur les couches une petite énergie de compactage bien déterminée pour avoir une porosité régulière du sable d'une part et éviter les tassements critiques lors du remplissage d'autre part.



Fig. 4 La mise en place du modèle physique.

2.4 Programme des essais

Trois digues ont été construites en sable de perméabilité $K=5.2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, les modèles ont été placés à l'intérieur de réservoir rectangulaire, chacune d'une longueur de 132 cm, largeur de 40 cm et hauteur de 30 cm (Fig.5).

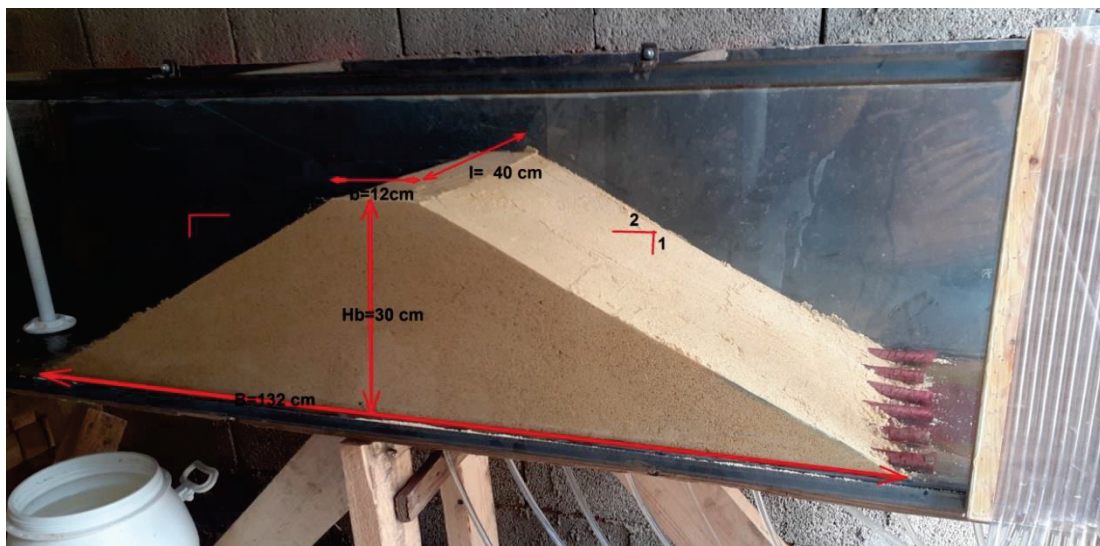


Fig. 5 Vue générale du modèle physique.

CHAPITRE I V: Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage par drains

Pour le but de maintenir le talus aval contre le glissement et l'érosion régressive en cas d'apparition d'une surface de suintement, une butée constitué de gravier séparé avec un filtre a été installé dans la partie aval de la digue (Fig.6).



Fig. 6 Butée de protection du talus aval.

Les trois modèles étaient homogènes avec une configuration de drainage différente dont $E/P = [0.12 ; 0.18 ; 0.36]$ (Fig.7).



Fig. 7 Configurations de drainage des trois modèles physiques.

La [figure 8](#) représente les drains utilisés dans le barrage modèle, on a choisi un drain en métal à parois mince bien perforé pour but de minimiser la résistance d'entrée de l'eau et d'assurer une perméabilité très élevée.

L'enrobage sert à empêcher les particules de sable de colmater le drain d'une part et protéger la digue contre l'érosion d'autre part.

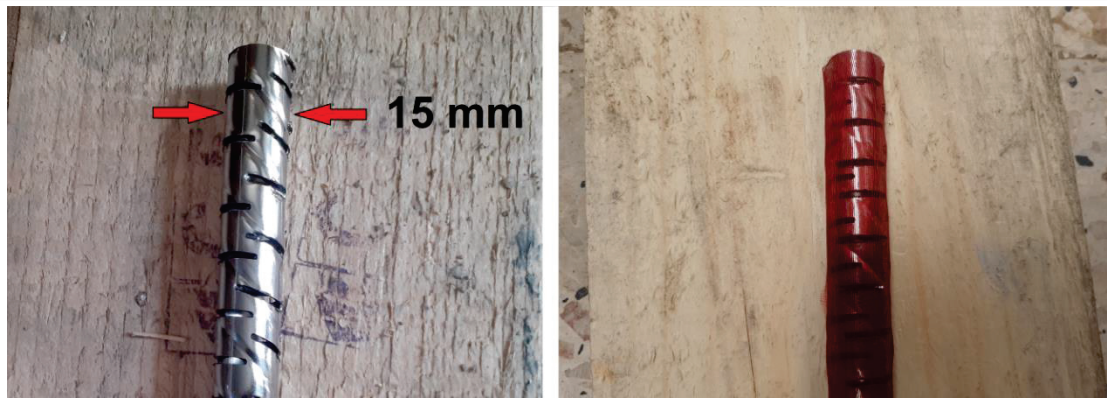


Fig. 8 Les drains utilisés dans le modèle physique.

Le déroulement de l'essai, se fait par remplissage par palier afin d'éviter l'immersion rapide de la digue jusqu'à attendre le niveau max d'eau 27.5cm inférieur à H_b pour ne pas avoir une surverse d'eau, on mesure les pressions et le débits après avoir un régime permanent de l'écoulement.

3 La modélisation numérique

3.1 Présentation du logiciel PLAXIS 3D

PLAXIS 3D est un programme d'éléments finis tridimensionnels, qui a été développé spécifiquement pour l'analyse de la déformation, de la stabilité et de l'écoulement dans l'ingénierie géotechnique. Le logiciel est doté de fonctions permettant de traiter divers aspects des problèmes géotechniques complexes.

3.2 Le modèle numérique

Chaque modèle physique du programme expérimental doit être modélisé avec la même géométrie, la même conductivité hydraulique de la recharge de la digue et les mêmes configurations $E/P = [0.12, 0.18, 0.36]$ des drains décrites précédemment dans la section du travail expérimental, la figure 9 représente le modèle numérique étudié.

$H_b = 30$ cm, $m, n = 2$, $B = 132$ cm, $b = 12$ cm $K = 5.2 \cdot 10^{-4}$ m/s et la largeur du barrage $I = 40$ cm

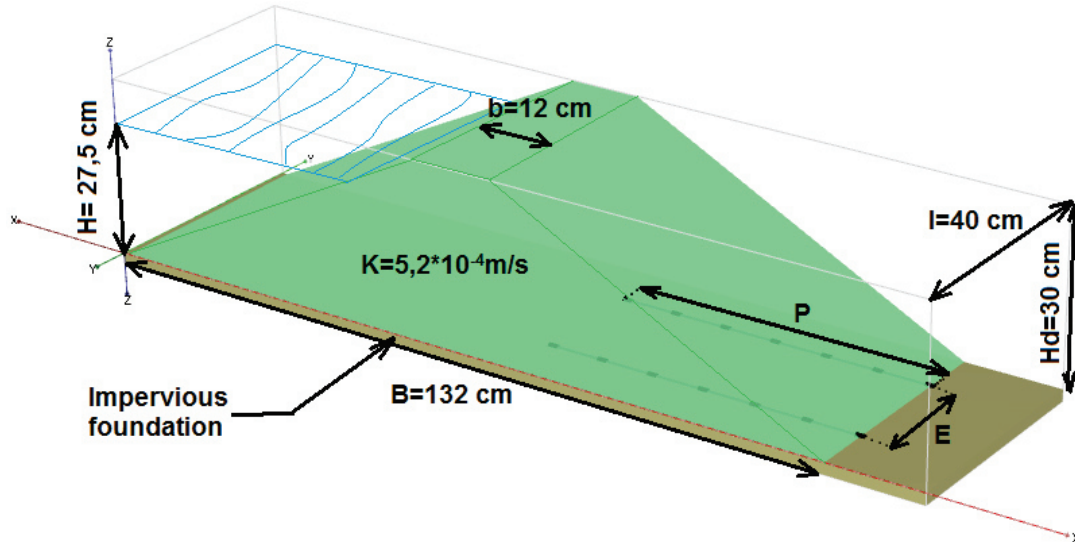


Fig. 9 Modèle numérique PLAXIS 3D.

3.2.1 Le maillage

PLAXIS 3D permet une génération automatique de maillage, la géométrie doit être divisée en éléments triangulaires à 6 nœuds fins afin de réaliser le calcul par éléments finis. Après la sélection de l'option maillage "very fine" pour avoir une précision de calcul des pressions interstitielles et une ligne de saturation très douce .

Lin et al. (2020) montre l'effet de la densité des mailles sur le facteur de sécurité d'une pente, la différence est d'environ 26% entre une maille grossière et une maille fin.

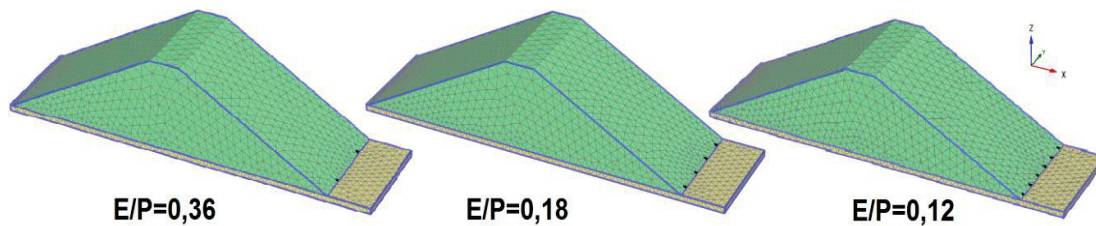


Fig. 10 Maillage des trois modèles.

3.2.2 Conditions aux limites

Une fois que le modèle géométrique a été créé et le maillage des éléments finis généré, la définition des conditions hydrauliques limites est une étape très importante, sachant que le niveau d'eau en amont a été fixé à une valeur de 27,5 cm, en aval le niveau est presque nul, la

fondation du barrage est imperméable, dans les paramètres des "**conditions du modèle**" ferme les "**Boundry YMin**" et "**Boundry YMax**" pour bloquer le flux aux extrémités y_{\min} et y_{\max} .

Avant de commencer le calcul, l'option "**steady state groundwater flow**" a été choisie comme type de calcul (Fig.11 ; Fig.12).

Dans la deuxième partie on modélise avec un remplissage par palier à fin d'étudier le comportement de la ligne de saturation, le débit de fuite et la pression interstitielle.

4 Résultat et discussion

4.1 Ligne de saturation

La [figure 13](#) représente la surface phréatique du modèle numérique et celle du modèle physique ($E/P = 0.36$) après l'injection de colorant.

On note qu'il y a un rabattement de la nappe aval et qu'il existe une compatibilité entre les lignes de saturation des deux modèles, ce qui signifie que les drains fonctionnent correctement et que PLAXIS3D il a pu simuler l'écoulement tridimensionnel avec une précision proche de réalité.

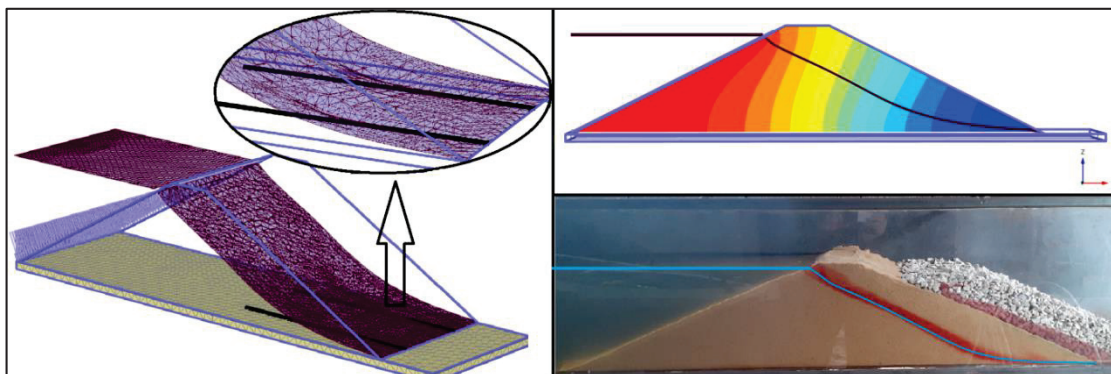


Fig. 11 La surface phréatique obtenue par la modélisation et celle de l'expérimentation pour $E/P=0.36$.

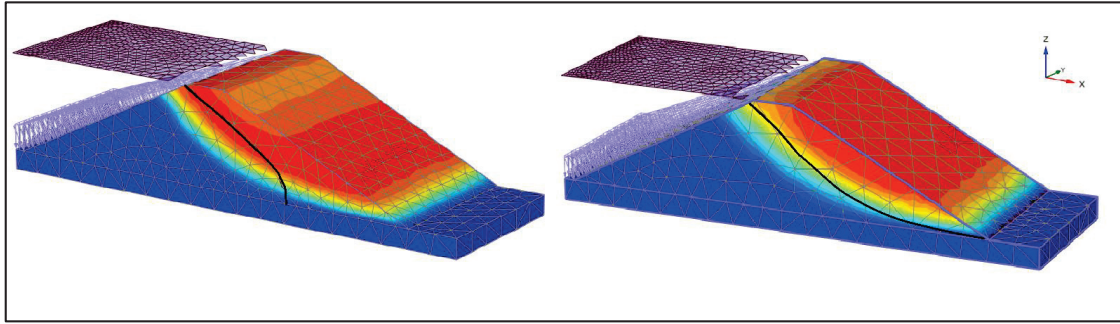


Fig. 12 La forme de la ligne de saturation de drainage par drains à droite et celle de tapis à gauche.

L'augmentation de la pression de l'eau a tendance à diminuer la résistance au cisaillement sur les plans de rupture, donc à chaque fois le cercle de glissement est non affecté par la ligne de saturation on va y avoir une bonne stabilité de remblai. L'avantage de drainage par les drains, la ligne de saturation prend la forme concave peut servir à réduire les charges hydrauliques sur la pente en aval du barrage.

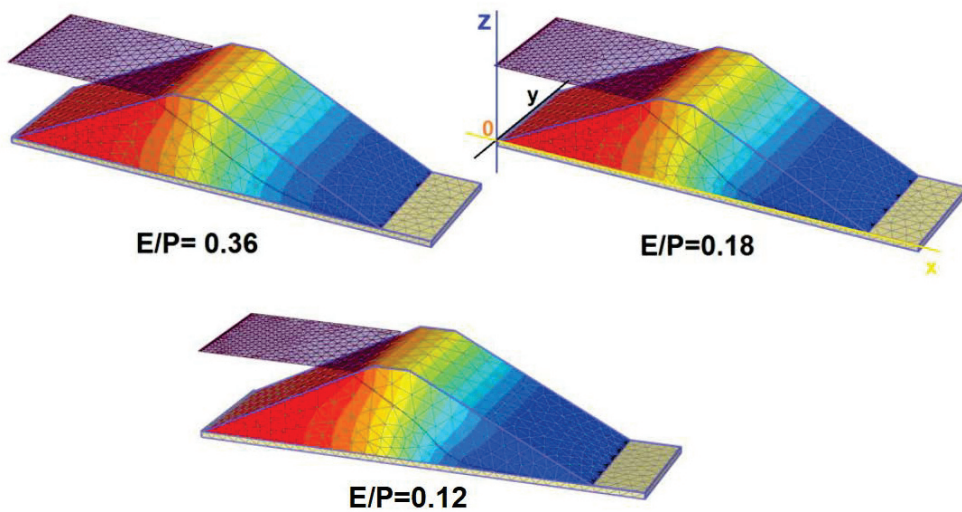


Fig. 13 Présentation des lignes de saturation des trois modèles avec niveau d'eau constant.

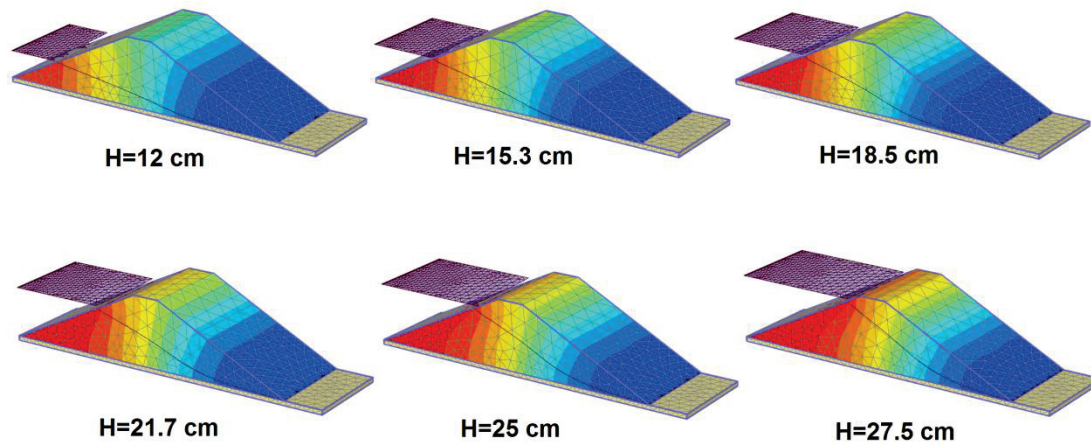


Fig. 14 Présentation des lignes de saturation avec différent niveau d'eau pour un écartement $E/P=0.36$ des drains.

Pendant l'expérimentation, il est difficile de tracer la ligne phréatique avec précision, mais pendant le remplissage de la digue, la sensibilité des drains a été observée avec les hauteurs d'eau des piézomètres et la variation du débit des drains.

On note qu'à chaque fois que l'espacement des drains diminue, le rabattement de la surface phréatique augmente (Fig.13).

4.2 Les pressions interstitielles

Les résultats des expérimentations montrent une diminution remarquable des pressions interstitielles chaque fois que la distance entre les drains diminue, donc l'espacement des drains influence le rabattement de la surface phréatique (Tab.1).

On peut observer qu'il y a une cohérence entre les résultats de la modélisation et de l'expérimental, de sorte que le fonctionnement des drains ne pose aucun problème pendant le remplissage normal du barrage (Fig. 15).

Tab. 1 Données des pressions interstitielles mesurées pendant les essais.

x/B	Charge (cm)		
	E/P=0,36	E/P=0,18	E/P=0,12
0,46	19,4	17,8	17,4
0,54	15,1	12	9,8
0,62	9	4,7	2
0,69	5,3	2,6	1,7
0,76	3,4	2	1,6
0,84	2,2	1,6	1,5
0,92	1,4	1	0,8
1,00	0	0	0

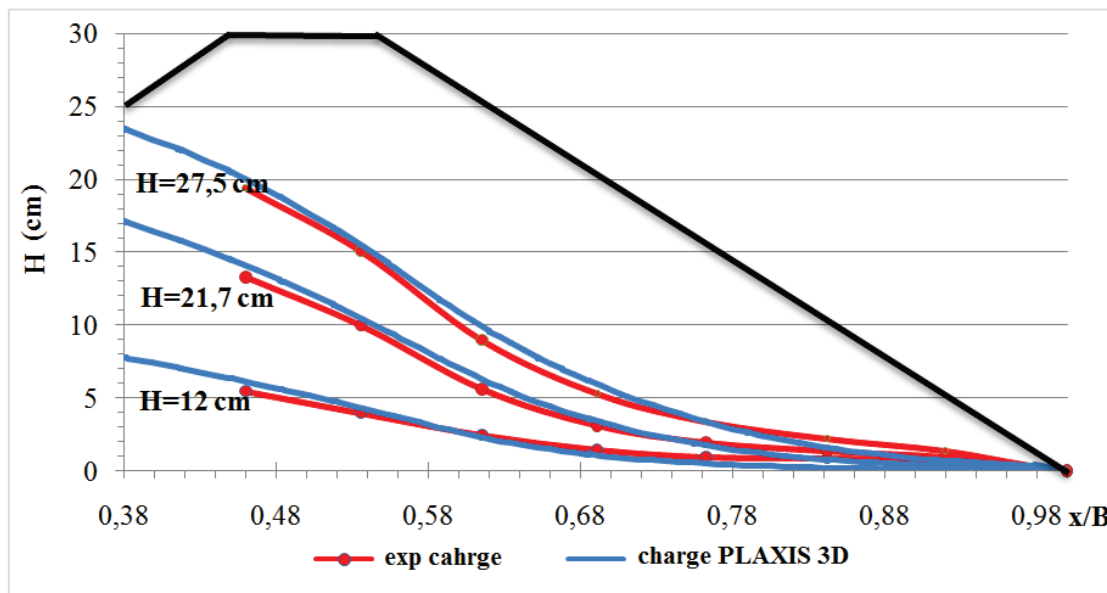


Fig. 15 Variation des pressions interstitielles obtenues par la modélisation et celle du modèle expérimental en fonction du niveau d'eau pour E/P=0,36.

L'effet des trois dispositions des drains aval sur les paramètres hydrauliques (le débit d'infiltration et la pression interstitielle à l'intérieur du barrage) sont étudiés et comparés avec les résultats expérimentaux pour vérifier le modèle numérique. A cet effet, le coefficient de détermination (R^2) est utilisé comme une mesure statistique de la proximité des données avec la droite de régression ajustée ($x=y$) (Refaiy et all 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (IV.2)$$

Etude numérique et expérimentale d'un système de drainage
CHAPITRE I V :
par drains

- y_i : les données observées obtenues à partir du modèle numérique.
- \hat{y}_i : les données prédites de l'équation $f(x_i)$.
- \bar{y} : la valeur moyenne des données observées obtenues à partir du modèle numérique.

Tab. 2 Exemple de calcul de coefficient de détermination R^2 .

N=° P	(x)	La charge H Plaxis3D (cm)	La charge H exp (cm)	$(y_i - \hat{y}_i)^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
P1	60,7	20	19,4	0,36	234,158005
P2	70,7	15,3	15,1	0,04	112,407116
P3	81,2	9,96	9	0,9216	27,6909827
P4	91,2	5,3	5,3	0	0,3626716
P5	100,7	3,4	3,4	0	1,68422716
P6	111,2	1,41	2,2	0,6241	10,8094827
P7	121,5	0,705	1,4	0,483025	15,9422744
P8	132	0,07	0	0,0049	21,4163272
P9	142	0	0	0	22,069116
		\bar{y}		$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$
		6,23833333		2,073625	212,382198
				R^2	
				0,990236352	

La [figure 16](#) montre la compatibilité des pressions obtenus par la modélisation et celle mesurées des piézomètres du modèle physique avec un coefficient de détermination R^2 qui dépasse 93%.

A chaque fois le rapport de l'écartement E/P diminue, la courbe des charges commence à s'aplatir toute en approchant des drains.

On observe que dans la partie où se trouvent les drains la charge mesurée est légèrement supérieure à celle de la charge calculée, parce que le logiciel Plaxis ignore la résistance d'entrée de l'eau, il considère le drain est sans paroi.

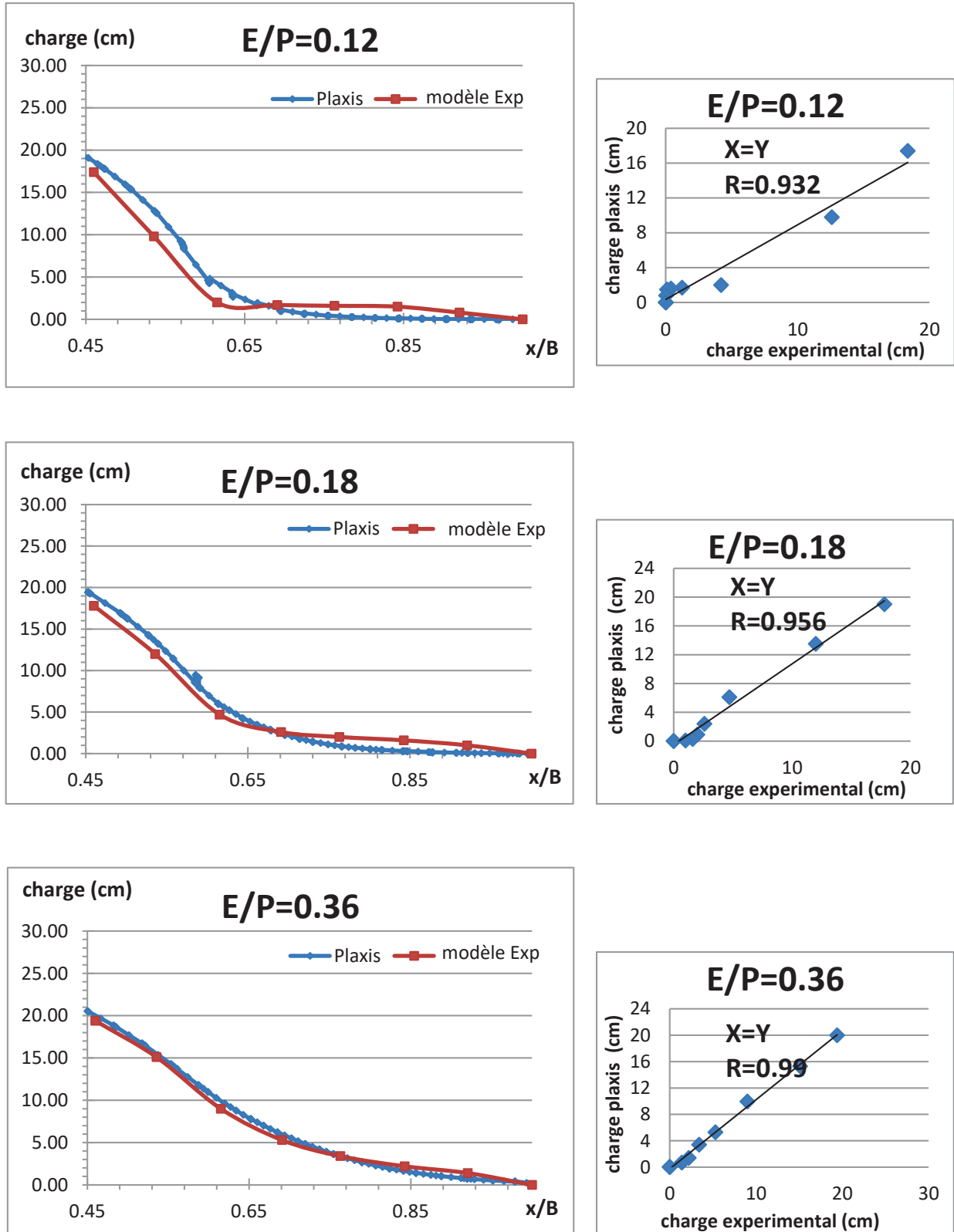


Fig. 16 Résultats des pressions interstitielles des modèles physiques et numériques.

4.3 Les débits

Le logiciel nous permet de calculé les débits des drains, en plus les débits qui s'écoulent entre les drains sous forme d'une lame d'eau, les résultats sont présenté dans le tableau ci-dessous.

Tab. 3 Résultats des débits de fuite du modèle physique et numérique.

E/P	Débit drains (l/s)	Débit plan M(l/s)	Débit total calculé (l/s)	Débit essai (l/s)
0,36	0,021514	0,0001156	0,0216296	0,02382022
0,18	0,023827	0,000007174	0,023834174	0,02462354
0,12	0,024583	0,000003265	0,024586265	0,0253248

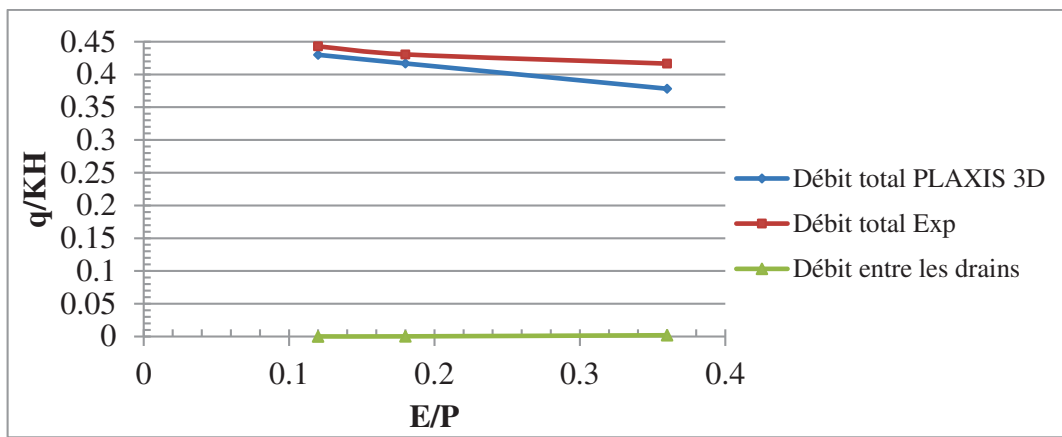


Fig. 17 Débits de fuite du modèle physique et numérique en fonction de l'écartement E/P des drains.

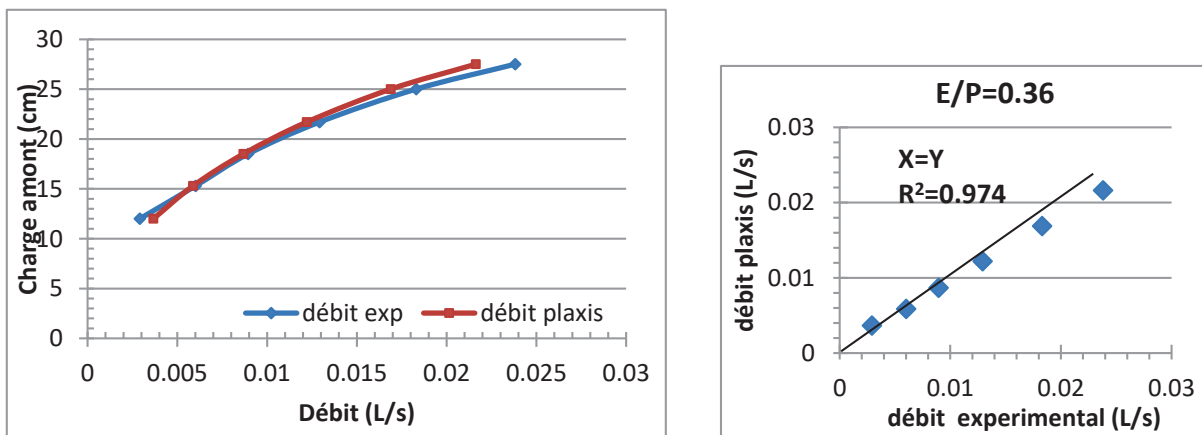


Fig. 18 Débits de fuite en fonction de la charge d'eau amont pour $E/P=0.36$.

La [figure 18](#) montre la sensibilité du fonctionnement du drain pour de faibles niveaux d'eau en amont. Le débit d'infiltration mesuré lors de l'expérimental est légèrement plus élevé que le débit d'infiltration de PLAXIS 3D avec un écart ne dépassant pas 10% pour un espacement maximal des drains, et 3% pour des valeurs de $E/P < 0,2$ ([Fig 16](#) ; [Fig 17](#)).

Il existe plusieurs facteurs qui influencent la précision de la compatibilité du débit de suintement tels que (la perméabilité mesurée, l'incertitude des mesures et de la géométrie du modèle physique, l'influence du K_h/K_v ...).

Concernant la fine couche d'eau entre les drains, il est recommandé d'installer une tranchée drainante pour drainer la couche d'eau afin de protéger l'aval de l'érosion d'une part et de collecter les flux de tous les drains d'autre part.

4.4 Erosion interne

Pour une vitesse d'écoulement 0.398 cm/s on va y avoir un gradient 7.6 ce qui nécessite une protection contre l'érosion en utilisant un filtre granulaire classifié or un enrobage composé de gravier et un filtre géotextile, La première application de ce type a été faite pour les tranchées drainantes de barrage Valcros (1970) ce système a fait l'objet de nombreuses observations et mesures. Après Valcros, le filtre géotextile et utilisé comme filtre pour de nombreux drains canaux ou dans les barrages ([GIROUD 1979](#)).

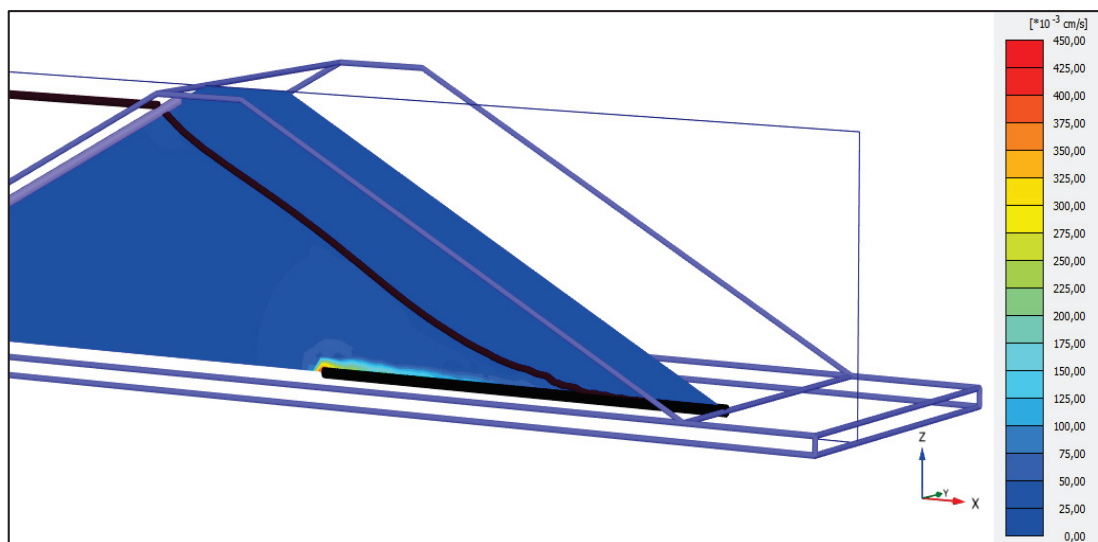


Fig. 19 Diagramme des vitesses d'une coupe longitudinale du barrage au niveau de drain.

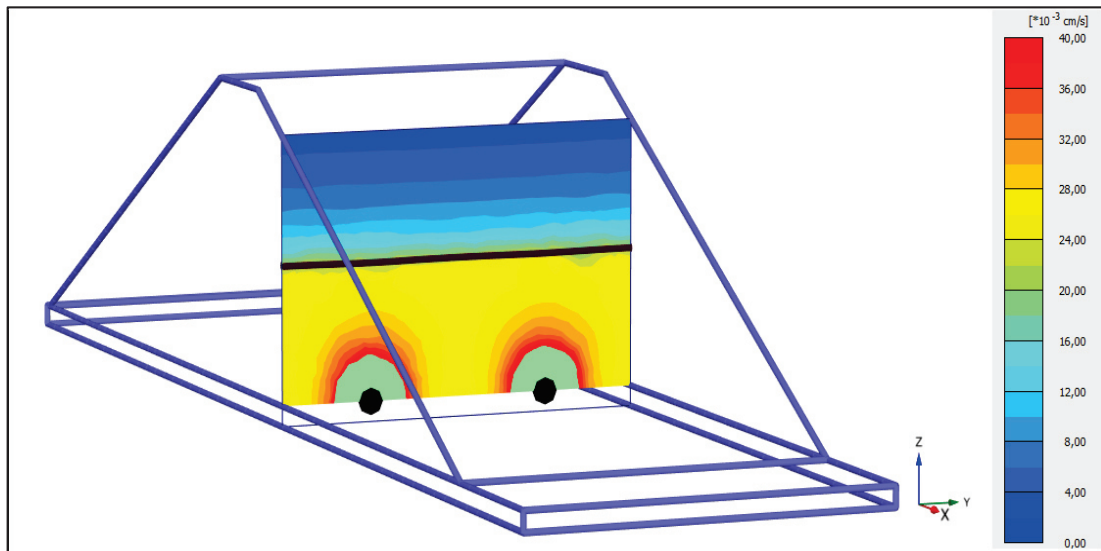


Fig. 20 Diagramme des vitesses d'une coupe transversale du barrage au niveau de l'entrée du drain.

5 La technique du drainage

La technique traditionnelle consiste à recouvrir le drain de plusieurs couches de granulats de finesse croissante, du bas vers le haut. D'abord un enrobage de cailloux de granulométrie 20/40, suivi d'une couche de gravier 10/20 et d'une autre de gravillons 5/15. Le tout est recouvert par une épaisseur de sable 0/3 et de la terre de remblai imperméable. Certains intervenants placent la terre avant le sable, solution défendue par l'Agence Qualité Construction, d'autres font l'inverse sans pour autant affecter la qualité du drainage. En terrain à grains fins (argileux, limoneux, sablonneux), le drain doit être protégé du colmatage par un géotextile.

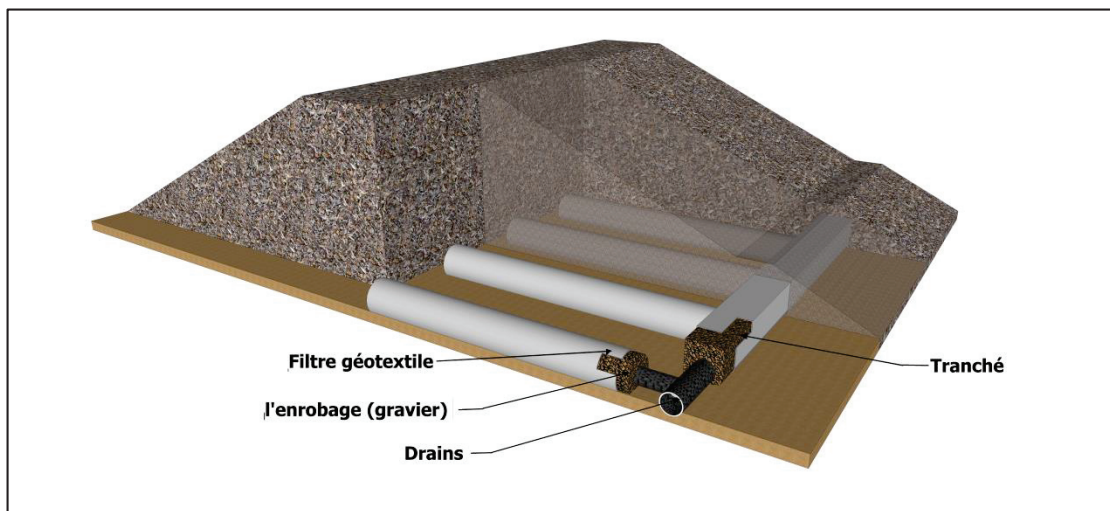


Fig. 21 Exemple drainage par tranchée.

Conclusion

Dans ce travail, cette étude est considérée comme une contribution à la détermination de l'espacement et de la longueur optimale d'un système de drainage installé dans la partie aval d'une digue en terre, le système consiste à installer des drains parallèles formant une surface de drainage discontinue, le modèle numérique utilisant le logiciel PLAXIS 3D a été validé par des expérimentations réalisées en laboratoire sur un modèle physique, la comparaison des résultats des expérimentations physiques et de PLAXIS 3D montre un bon accord pour le débit et un très bon accord pour la pression interstitielle, les drains rabattent la surface phréatique aval et assurent la stabilité de la digue tous le long de l'éassé. la surface phréatique est sensible à la variation de plan d'eau amont ce qui signifie le bon fonctionnement des drains .

**CHAPITRE V : Etude paramétrique du système
de drainage par drains**

Introduction

Les barrages en terre sont sujets aux infiltrations, et des infiltrations inadéquates peuvent causer des problèmes de stabilité lorsqu'une pression d'eau élevée et une saturation dans le remblai et les sols de fondation se développent et conduisent à une réduction de la résistance au cisaillement du barrage pouvant entraîner sa défaillance. L'infiltration dépend de divers facteurs, y compris la géométrie du remblai, la composition matérielle du sol, le niveau d'eau en amont, la méthode de construction adoptée (Sushant Kumar 2021). Des contre-mesures spécifiques peuvent être utilisées pour éviter les pertes massives par infiltration - telles que des filtres, des drains, des couvertures d'argile, des pentes latérales plus plates et l'utilisation de géosynthétique dans le barrage (Omofunmi et al 2017). Le présent chapitre vise à étudier l'écartement et la longueur optimal d'un système de drainage installé dans la partie aval d'une digue en terre homogène et donné un outil de dimensionnement de l'écartement des drains en fonction de rabattement de la nappe aval, à l'aide d'un modèle numérique. Pour montrer l'efficacité de ce drain, une analyse numérique comparative d'une digue réelle du réservoir de l'Oued El Magroune a été faite entre la digue avec un drain existant et celle équipée de drains parallèles.

1 Matériels et méthodes

1.1 Les caractéristiques du modèle

Étude de l'écartement (**E**) et la Longueur (**P**) des drains dans un barrage (5, 8, 10, 12,15m) homogène isotrope fondé sur une fondation imperméable avec des fruits présenté dans le tableau 1 et une largeur de la crête $\frac{b}{H_b} = \{0.4, 0.6\}$ dont la formule de dimensionnement de la crête ci-dessous et applicable.

$$b = 3.6\sqrt[3]{H_b} - 3 \quad (\text{Rolley et al. 1977}). \quad (\text{V.1})$$

Tab. 1 Les fruits admissibles pour une digue homogène. (UU, LL, EE, & EE)

Hauteur de la digue (barrage)	Type de barrage (m)	Fruit des talus	
		Amont (m ₁)	Aval (m ₂)
H < 5m	-Homogène	2.5	2
5 ≤ H < 10 m	- Homogène granulométrie étendue	2	2
	- Homogène à fort % d'argile	2.5	2.5
10 ≤ H < 20 m	- Homogène granulométrie étendue	2.5	2.5
	- Homogène à fort % d'argile	3	2.5

1.2 Cas étudié

Le barrage choisi pour la modélisation est constitué de terre homogène isotrope, reposant sur une fondation imperméable, avec :

- **m,n** : successivement la pente de l'amont et de l'aval de la digue.
- **Hb** : hauteur du barrage.
- **b** : largeur de la crête.
- **B** : largeur de la base du barrage.
- **h** : profondeur la surface de suintement avec drainage (système de drains).
- **Hs** : profondeur de la surface de suintement sans drainage.
- **E** : espacement des drains.
- **P** : longueur du drain.

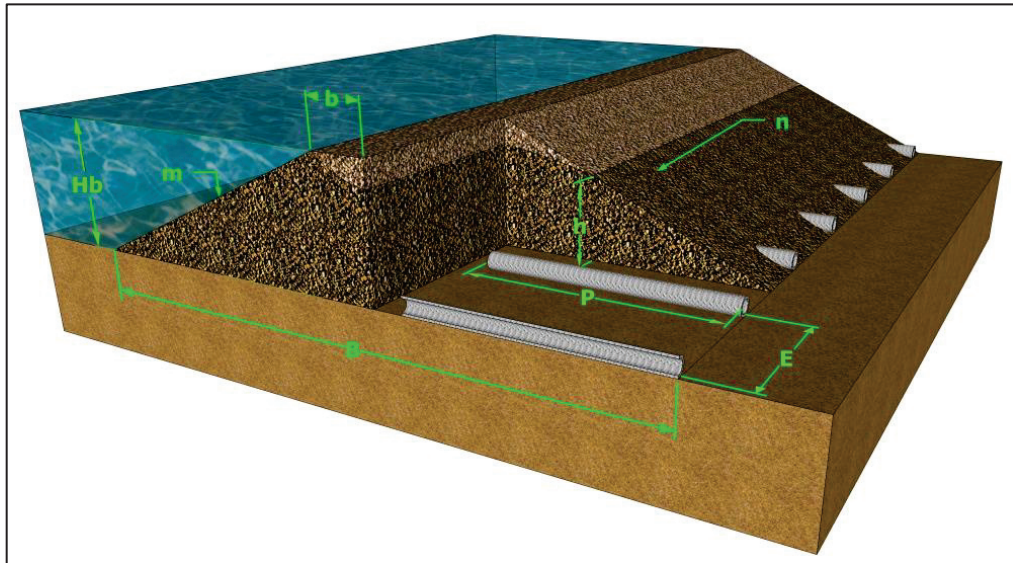


Fig. 1 Les paramètres du modèle étudié.

2 Manipulation

Chahar (2004) montre que la ligne phréatique ne dépend que de la géométrie de la section du barrage et qu'elle acquiert une position identique pour des sols de perméabilités différentes dans un milieu isotrope.

À chaque fois on fixe la longueur des drains (P), on joue sur leurs écartement (E), on modélise l'écoulement tridimensionnel à travers la digue après avoir défini la géométrie (Hb , b , n , m , P , E) et les conditions aux limites hydraulique de chaque combinaison P - E , sachant que $H_{eau} = Hb$

Dans le plan de symétrie de deux drains successifs (plan médian (M)) ou la ligne de saturation prend la position la plus défavorable (Fig.2). On essaie de caractériser les effets de drainage sur les stabilités hydromécanique de la digue.

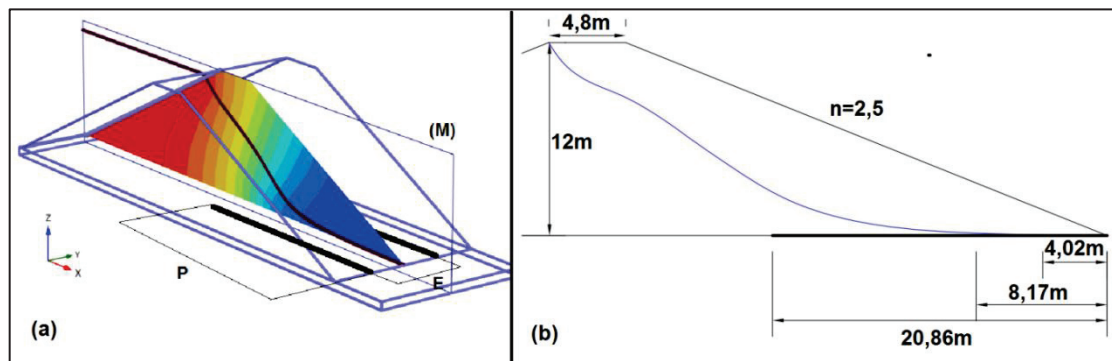


Fig. 2 (a) Diagramme de la charge hydraulique dans le plan médian (M), (b) ligne phréatique entre deux drains de $E/P=0,29$.

2.1 Le rabattement spécifique

C'est un paramètre de forme qui nous permet de suivre le rabattement de la nappe phréatique aval, à chaque fois la valeur de R_s est grande donc on a un très bon rabattement de la nappe (Fig.4).

A l'aide de logiciel AUTOCAD, on calcule la surface S entre la ligne de saturation sans drainage et la ligne après le rabattement de chaque E-P (Fig.3).

On calcule le rabattement spécifique :

$$R_s = \frac{S}{LH} \quad (V.2)$$

Dont $L = b+n \cdot Hb$ (V.3)

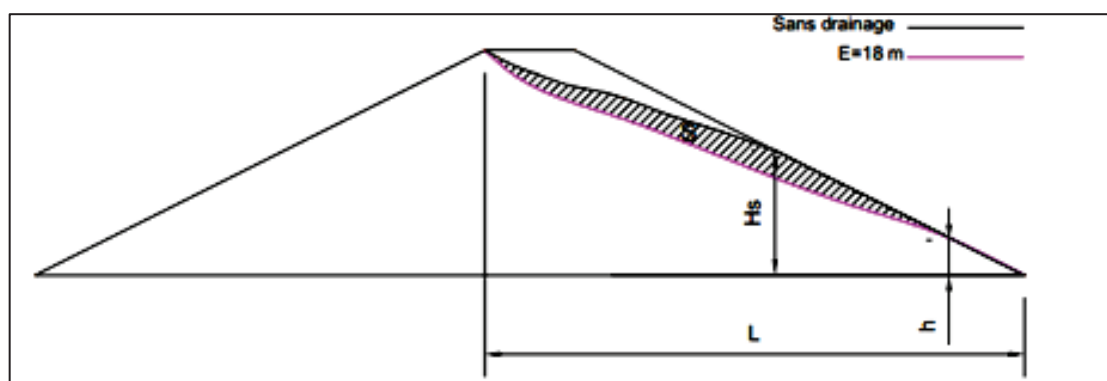


Fig. 3 Illustration de rabattement spécifique.

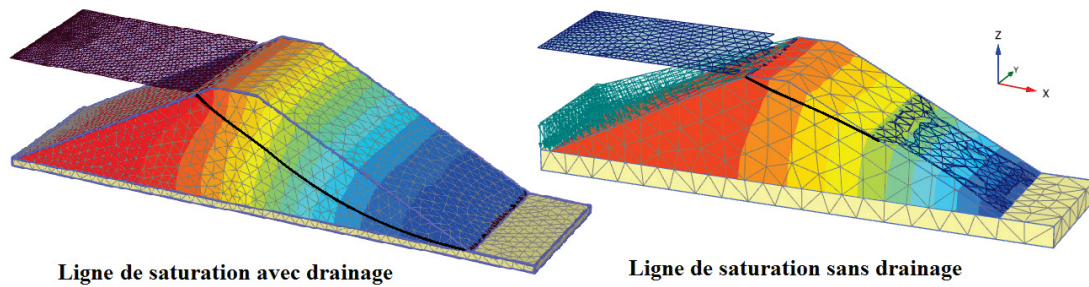


Fig. 4 Ligne de saturation avant et après drainage.

3 Résultats de l'étude paramétrique

3.1 Mécanisme d'écoulement

Les résultats ont montré qu'il existe deux régimes d'écoulement distincts, saturé et non saturé :

- La condition saturée se produit lorsque le niveau d'eau est égal ou supérieur au diamètre du drain.
- La condition non saturée lorsque le niveau d'eau est inférieur au diamètre du drain.

Pour le cas saturé, lorsque les drains sont totalement immergés dans l'eau, dans ce cas, la direction dominante de l'écoulement dans le sol entourant le drain était verticale. Pour le cas non saturé, la direction dominante de l'écoulement était horizontale, l'écoulement horizontal se produisait dans l'espace entre les drains car il n'y avait pas d'écoulement au-dessus des drains (Fig.5).

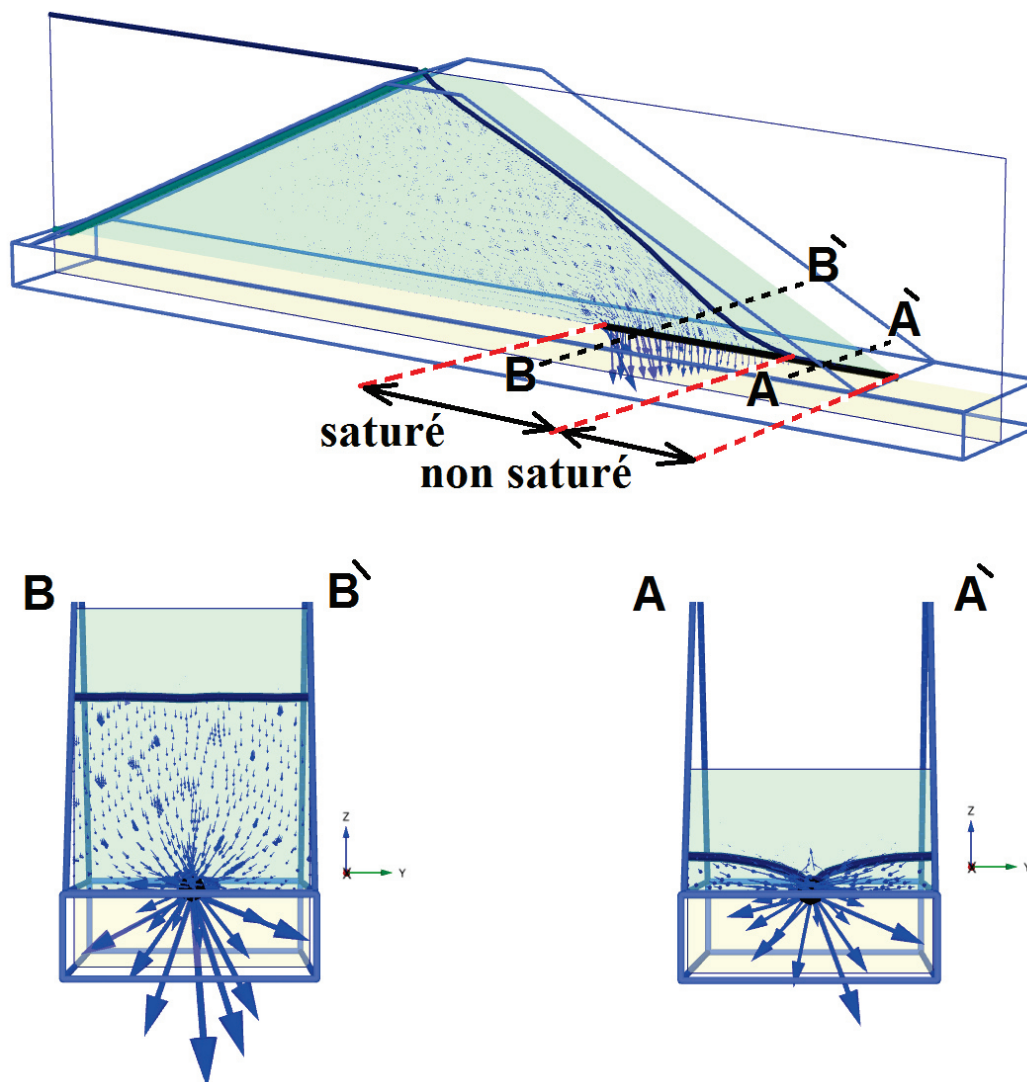


Fig. 5 Mécanisme d'écoulement des eaux de drainage pour $E/Hb = 0,6$.

3.2 Influence de l'écartement des drains

Après la modélisation on trace pour chaque longueur des drains P et l'écartement E la ligne de saturation (avec et sans drainage) et on déduit à chaque fois la valeur de h de suintement pour un barrage de 10 m.

3.2.1 Rabattement de la surface phréatique

La figure 6 montre que la surface phréatique recule vers l'amont à chaque fois que le rapport E/P diminue. Au-delà d'une certaine valeur de E/P , une surface de suintement apparaît et cette surface augmente au fur et à mesure que la valeur de E/P augmente en se rapprochant du plan (M) dans la partie aval du barrage.

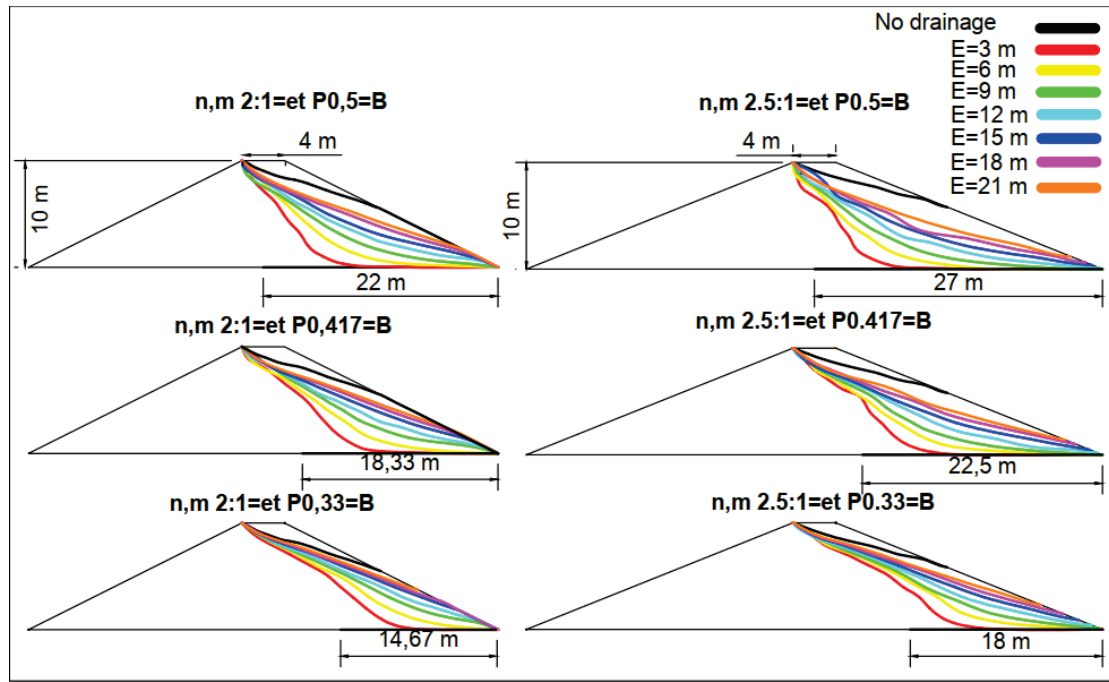


Fig. 6 Exemple de scénario de la ligne de saturation du plan médian (M) en fonction de E/P.

L'influence de l'écartement des drains E/P sur le rabattement de la surface phréatique est très remarquable, à chaque fois on augmente l'écartement ou la longueur des drains on observe une diminution de rabattement spécifique ce qui signifie une remontée de la surface phréatique aval, plusieurs paramètres influent le rabattement de nappe d'eau en aval, d'après la figure 7 on cite la longueur P du drain, l'écartement E et la pente du talus.

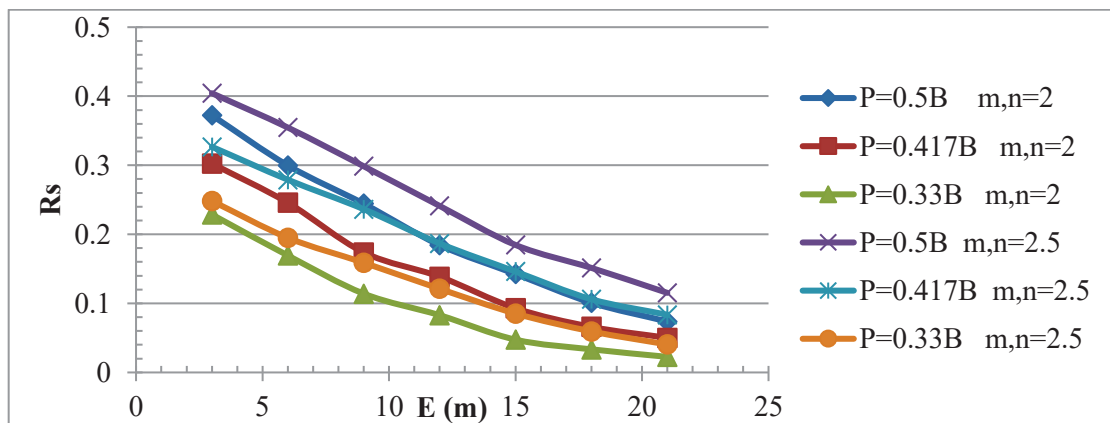


Fig. 7 Influence des paramètres géométriques E/P sur le rabattement de la nappe d'eau aval.

3.2.2 La hauteur et le fuit aval du barrage

La ligne de saturation dépend que de la géométrie du barrage, la hauteur et la longueur des drains doivent être aussi dépendent de la géométrie afin d'avoir une flexibilité de dimensionnement, on a choisie E/H et P/B comme paramètres adimensionnelles, la base du barrage B dépend de la hauteur, la largeur de la crête et les pentes des talus de la digue, [Chahar \(2004\)](#) indique que la longueur du drain horizontal est moins affectée par le changement de la largeur de la crête et l'aplatissement de la pente en amont, alors qu'elle est plus sensible au changement de la pente en aval ([Fig.8 ;Fig.9](#)).

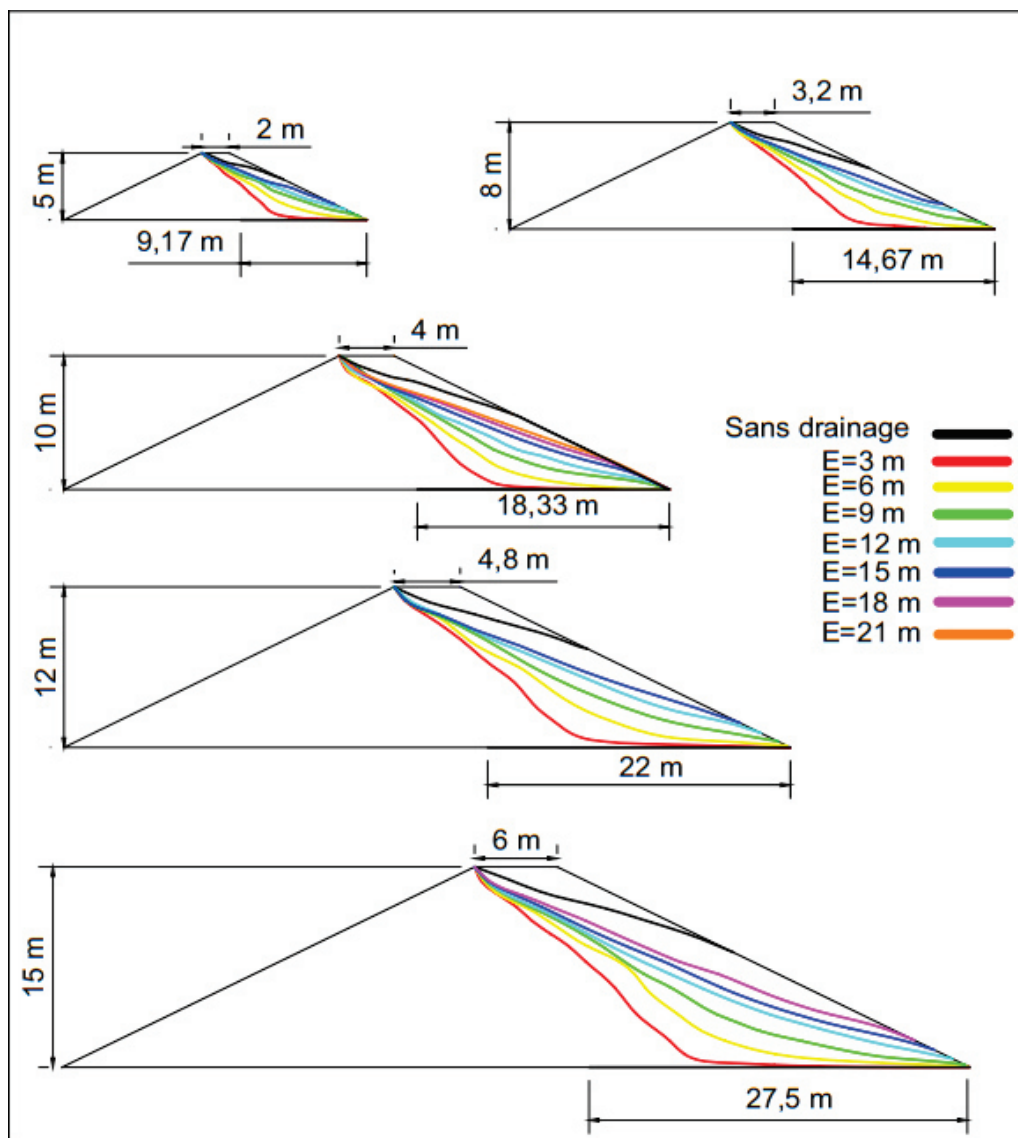


Fig. 8 scénario de la ligne phréatique pour $m,n=2$.

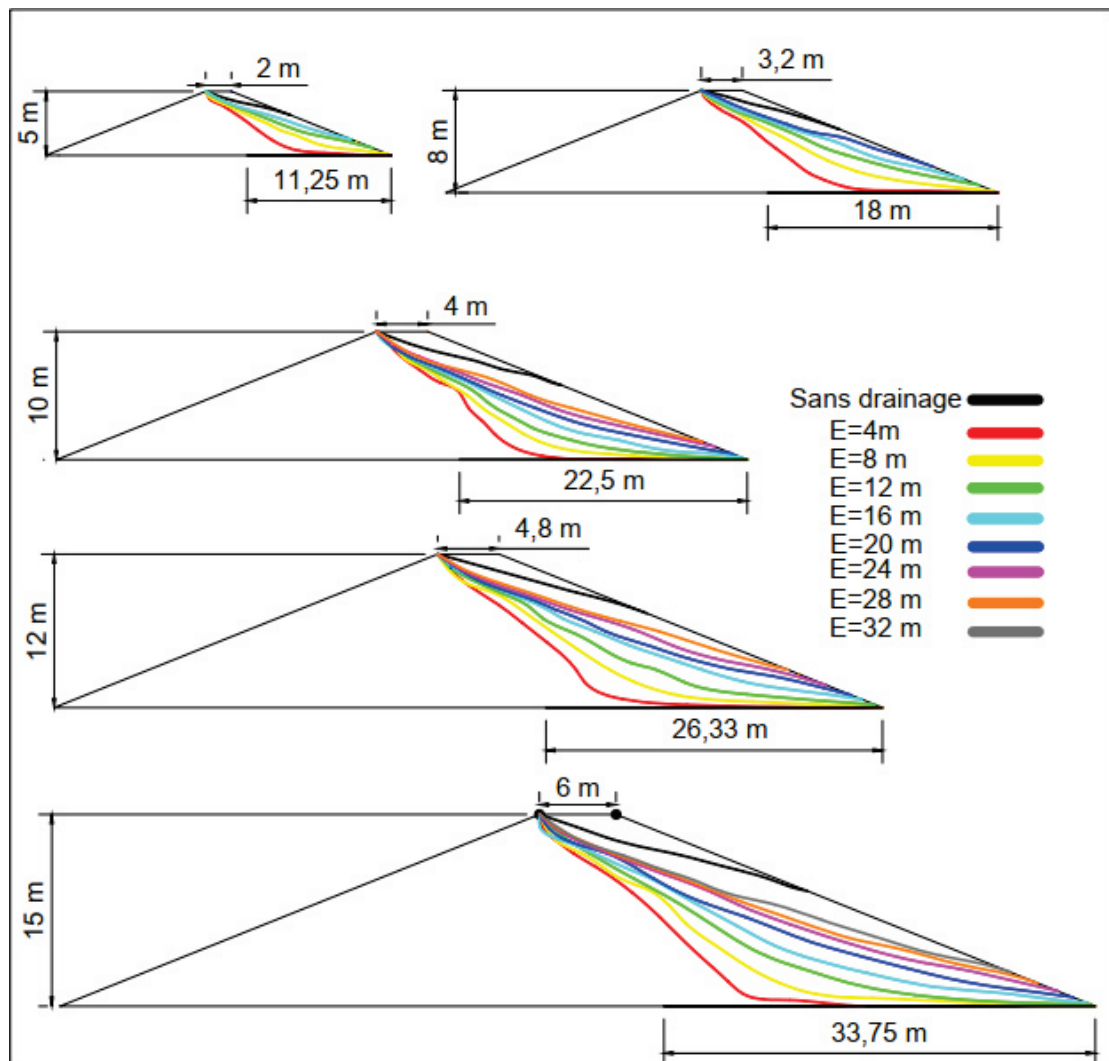


Fig. 9 Scénario de la ligne phréatique pour $m,n=2.5$.

3.2.3 La surface de suintement

La figure 10 nous montre que à partir de la valeur $E/P=0,3$ la surface de suintement commence à apparaitre et elle est très sensible au changement de l'écartement des drains au-delà de 0.3.

L'apparition de la surface de suintement donne la naissance à l'érosion du talus aval et bien que la rupture de barrage en suite.

Le rôle d'un drain dans un barrage en terre c'est maintenir la surface phréatique à l'intérieur de talus aval afin d'assurer la stabilité de la digue.

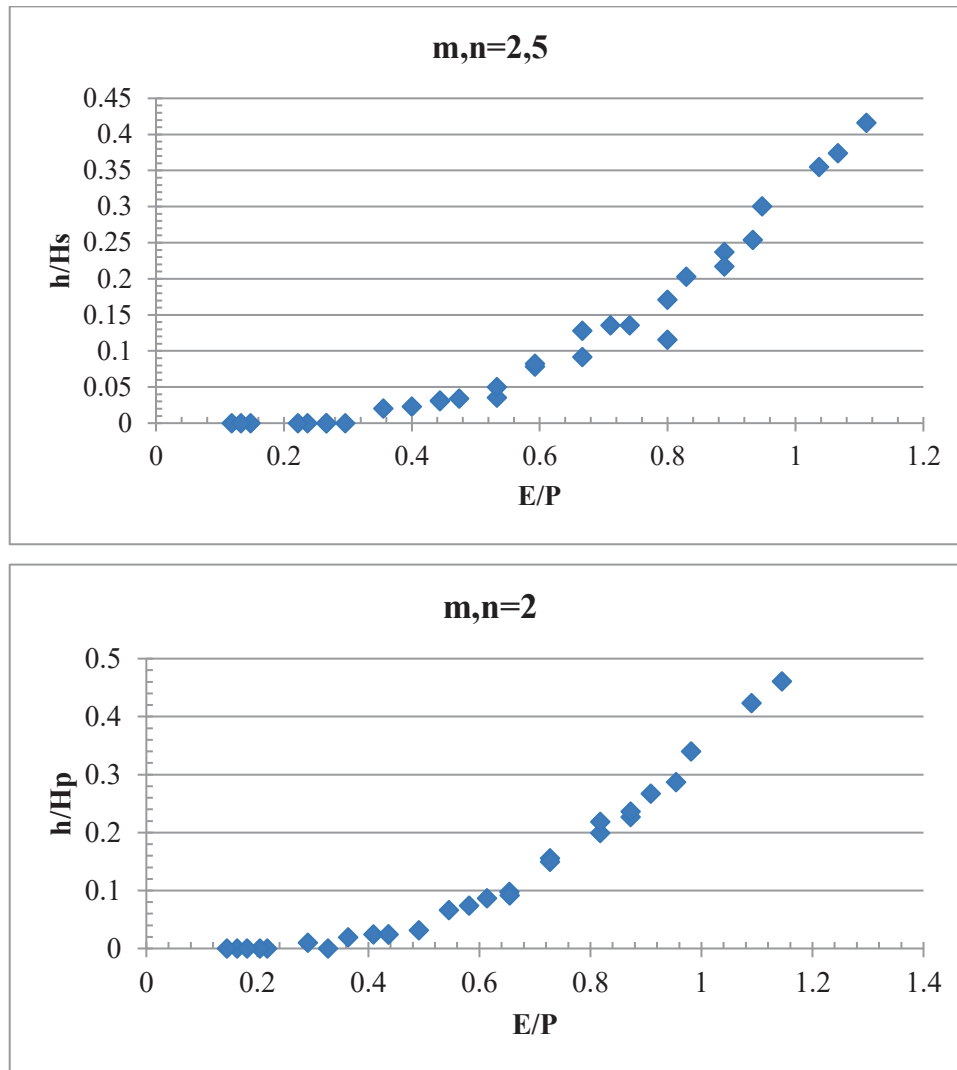


Fig. 10 Influence de l'écartement des drains sur l'apparition de la surface de suintement.

3.2.4 Le facteur de sécurité

La variation de facteur de sécurité est proportionnelle avec le rabattement de la nappe aval, et pour les petites digues le facteur de sécurité est très sensible à la variation de la position de la surface phréatique, cette surface croise le cercle de glissement et provoque une augmentation des grandeurs des moments moteurs de glissement. Si l'on effectue les calculs de stabilité d'un ouvrage de hauteur inférieure à 10 m il faut prendre un coefficient de sécurité élevé, supérieur à 2 dans certains cas (Alonso et al. 1993).

A chaque fois le barrage possède une pente de talus aval plus grande il est recommandé de bien rabattre la nappe aval pour assurer la sécurité de l'ouvrage (Fig.11).

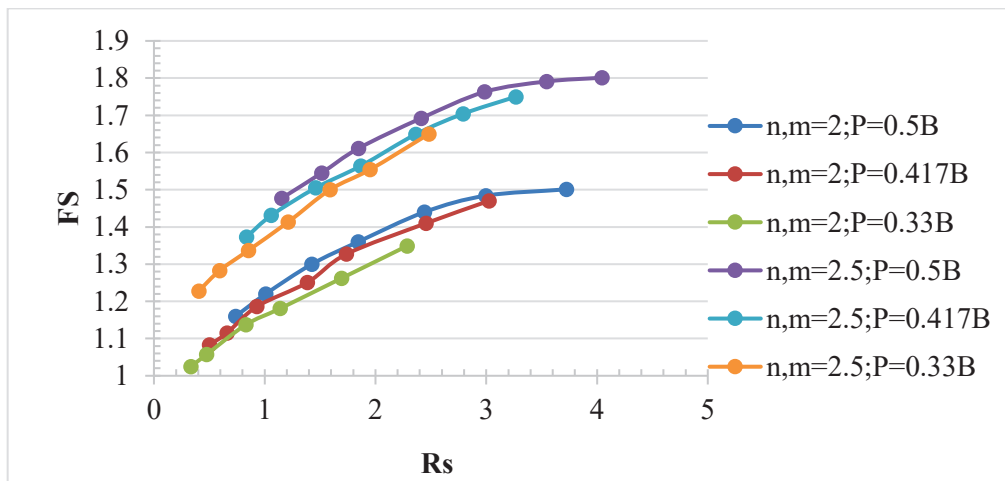


Fig. 11 Facteur de sécurité en fonction de rabattement de la nappe aval.

4 La stabilité mécanique

Le rôle d'un drain est d'éviter la surface de suintement et avoir un débit minimum, généralement, il faut prévoir un système efficace de drainage afin d'évacuer les eaux infiltrées et de protéger les talus contre l'érosion (Hadjira and Naima 2014).

Dans ce contexte, pour le plan médian (M) on a retiré toutes les valeurs de l'écartement E et de la longueur P qui présentent une surface de suintement tangentielle à la droite (i) qui correspondent à une surface de suintement aval égale à zéro, donc des pressions interstitielles nulles, mais la stabilité mécanique n'est pas encore vérifiée (Fig.12).

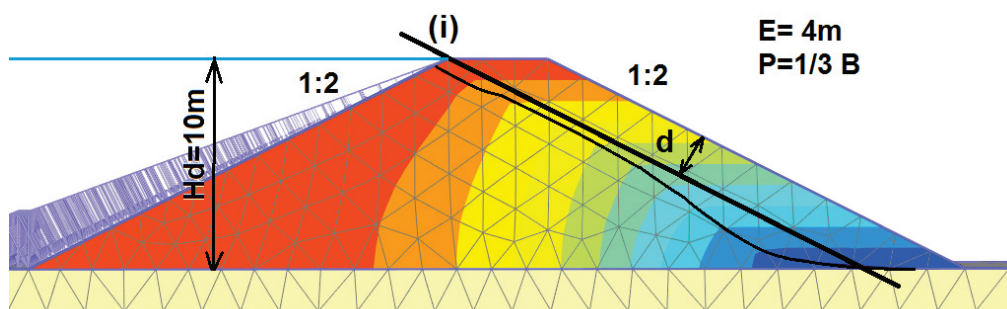


Fig. 12 La position maximale admissible qu'une surface phréatique pourrait atteindre.

Chahar (2004) confirme que la valeur de d dépende seulement de la géométrie de barrage, elle est linière avec la largeur de la crête et non linière avec la pente aval, la valeur de d est donnée par la formule :

$$d = \frac{b}{\sqrt{1+n^2}} \quad (V.4)$$

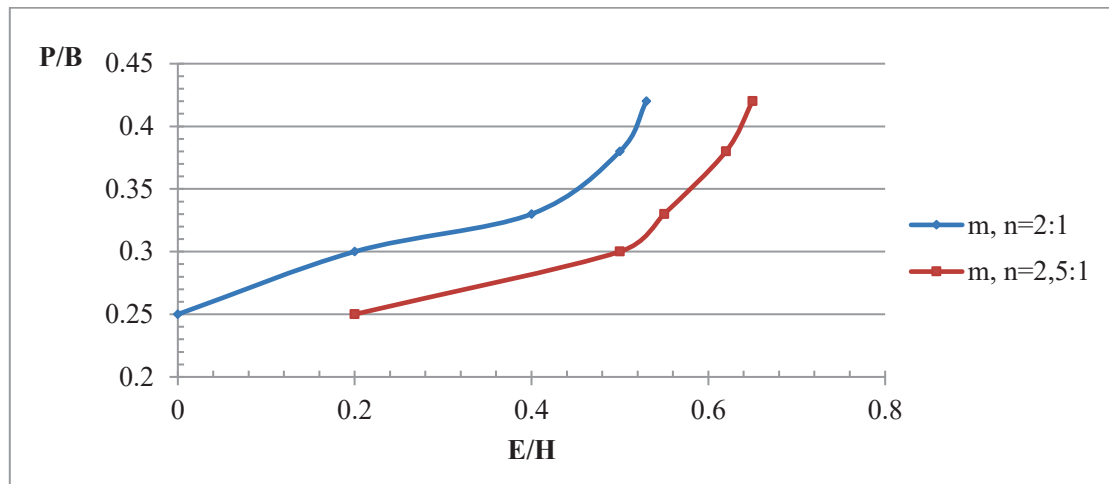


Fig. 13 La longueur des drains en fonction de l'espacement maximal admissible pour une pente donnée.

La figure 13 présente les écartements des drains max admissible pour une valeur donnée de longueur des drains, toutes les combinaisons **E-P** de ce graphe donnent une ligne phréatique tangentielle à la droite (i).

L'espacement maximal admissible **E** des drains augmente remarquablement pour la longueur des drains **P** inférieure à 0,33 **B** et 0,3 **B** pour les pentes des talus avals successivement 2 et 2,5. Au-delà de ces valeurs, la pente des deux courbes augmente, et l'écartement **E** augmente légèrement avec la longueur du drain **P** ce qui signifie qu'il n'y a pas de gain économique.

5 Débit de fuite

Dans un drainage horizontal, l'écoulement est bidimensionnel et la surface phréatique s'arrête à une distance de $\frac{1}{2}$ la hauteur d'eau à l'entrée du drain horizontal (Casagrande 1937). Par contre, par ces drains, l'écoulement est tridimensionnel, l'eau s'infiltré tout le long du tuyau, la dissipation des pressions interstitielles est progressive, ce qui donne la forme concave de la surface phréatique et l'efficacité de ces drains (voir Fig.4 ci-dessus).

D'après les figures 14 et 15, pour des raisons hydrauliques (débit de fuite), il est recommandé de prendre la valeur maximale de **P** inférieure à $\frac{1}{3}$ **B** afin d'avoir un débit de fuite inférieur ou proche de celui d'un drain horizontal de $\frac{1}{3}$ **B** de longueur.

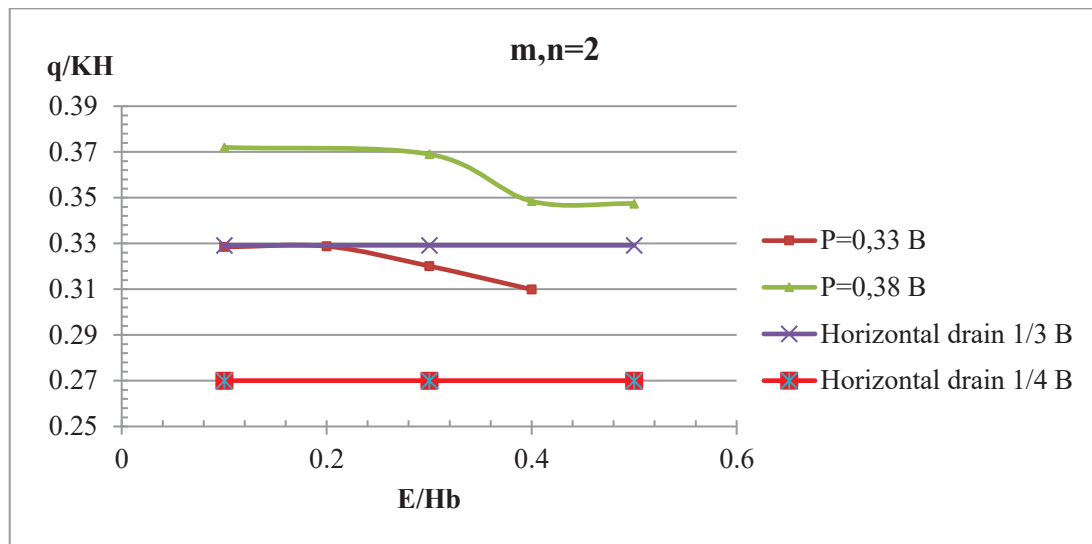


Fig. 14 Débit de fuite en fonction de l'espacement pour des longueurs de drain bien définies avec une pente de $m,n=2$.

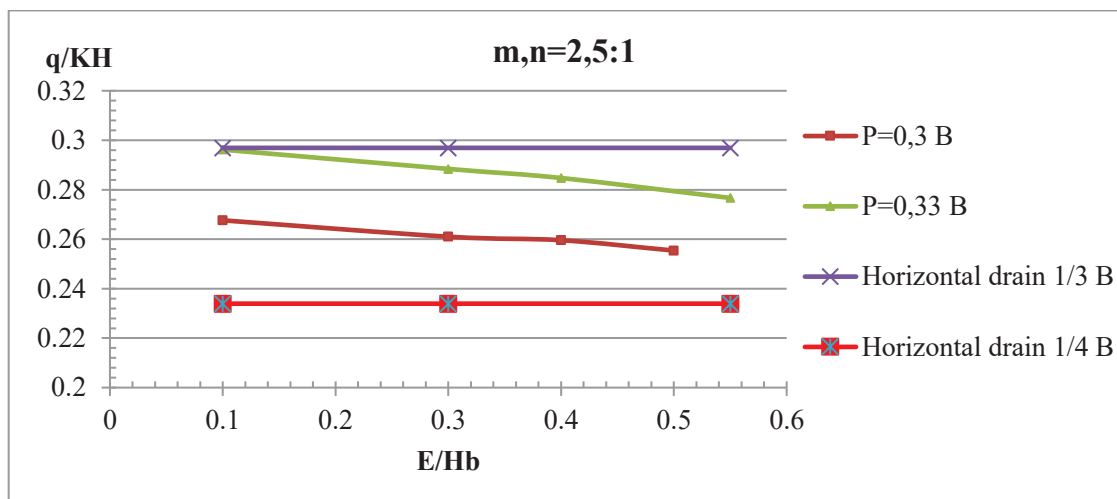


Fig. 15 Débit de fuite en fonction de l'espacement pour des longueurs de drain bien définies avec une pente de $m,n=2.5$.

6 Modélisation de la retenue collinaire (Oued El Magroune)

Dans cette section, une digue homogène de 15m (Oued El Magroune, Souk Ahras, Algérie) a été modélisée, tout en intégrant une série de drains parallèles et une comparaison avec le système de drainage existant a été faite, la figure 16 montre la géométrie de la digue.

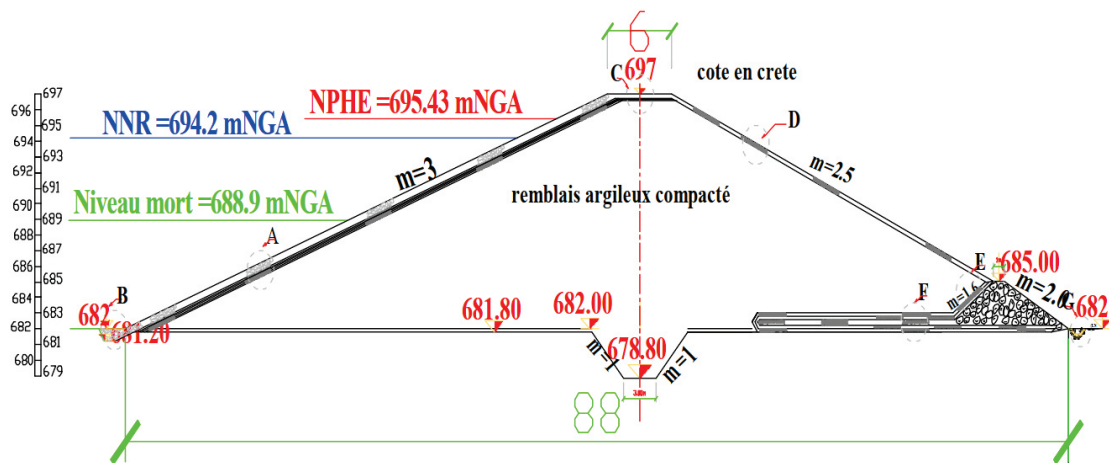


Fig. 16 Géométrie du réservoir (Oued El Magroune).

6.1 Caractéristiques géotechniques de remblai du barrage (Oued El Magroune)

Ce chapitre vise à effectuer une analyse comparative de la stabilité hydromécanique d'une retenue réelle en utilisant deux approches différentes : d'une part, en prenant en compte son système de drainage (tapis drainant), et d'autre part, en utilisant le système de série des drains.

La modélisation de la structure est réalisée en tridimensionnel selon une coupe transversale du lit mineur du barrage, la structure à modéliser est constituée de deux parties fondamentales, le corps de la digue du barrage et sa fondation.

Le remblai de la digue est constitué d'argiles sableuses graveleuses modérément plastiques à plastiques, peu à moyennement compressibles, la digue fondée sur des argiles colluviales après décapage de la terre végétale et de la couche altérée sur une épaisseur totale de 40 à 50 cm (Tab.2).

Tab. 2 Les caractéristiques géotechniques du remblai.

Paramètre	Fondation	Remblai
Teneur en eau naturelle (Wn)	18,75 %	20,63 %
Densité sèche (gd)	1,63 t/m ³	1,603 t/m ³
Densité humide (gh)	1,94 t/m ³	1,93 t/m ³
Densité de saturation (gsat)	2,02 t/m ³	2,0 t/m ³
Degré de saturation (Sr)	79,15 %	82,8 %
Limite de liquidité (Wl)	59,7 %	54,12 %
Indice de plasticité (Ip)	26,52 %	29 %
Compressibilité (Pc)	1,50 bars	/
Coefficient de gonflement (Cg)	0,067	0,071
Perméabilité (K)	1,19.10 ⁻⁹ m/s	2,02.10 ⁻⁹ m/s
Cohésion (C)	0,68 bars	0,74 bars
Angle de frottement (φ)	25.34 °	25,08 °

6.2 Le modèle numérique

Une modélisation numérique de la digue réelle avec les trois configurations de drainage (sans drainage, avec le drain existant (tapis drainant) et avec une série de drains parallèles) a été réalisée, en gardant les mêmes caractéristiques géométriques et hydrauliques du barrage (Fig. 10).

Pour le système de drains, la longueur des drains $P=0,3B$ et un espacement maximal admissible $E=1/2Hd$ sont choisis.

L'analyse de stabilité nécessite la connaissance de la géométrie et des caractéristiques des matériaux qui constituent le corps de la digue et sa fondation, à l'état de fonctionnement normal, deux phases de calcul sont nécessaires :

- La première consiste en l'analyse plastique, pour comprendre les différentes déformations de la digue et les débits de fuite.

- La seconde comprend le calcul du facteur de sécurité de la rupture finale par la méthode de "réduction $c-\phi$ ", qui consiste à réduire les paramètres c et ϕ des matériaux jusqu'à obtenir la rupture.

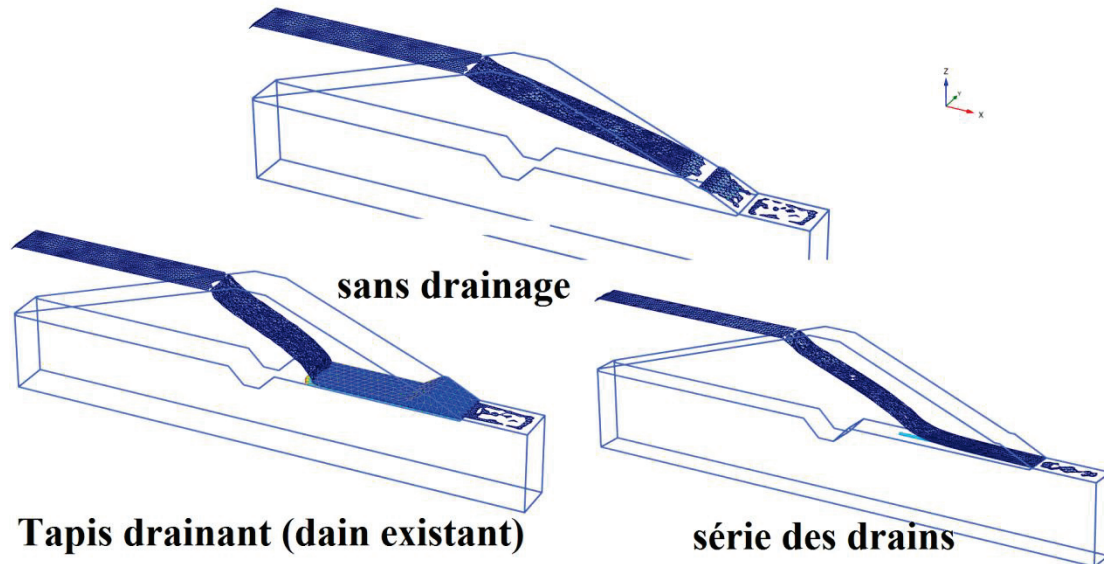


Fig. 17 Les trois configurations de drainage étudiées.

7 Résultats de la modélisation du réservoir (Oued El Magroune)

7.1 La stabilité

Le coefficient de sécurité calculé pour le talus aval de la digue sans drainage en fonctionnement normal ($F_s=3.085$) est supérieur à 1.5, le barrage est mécaniquement stable, la digue du barrage a de bonnes caractéristiques géotechniques (voir [Tableau 2](#)), mais la surface d'infiltration provoquera une instabilité hydromécanique qui rend le drainage essentiel dans les barrages ([Fig.18](#)).

Le facteur de sécurité du barrage avec le drainage existant (tapis drainant) donne un coefficient ($F_s=3.437$) supérieur à $F_s > 1.5$, donc pour cette étape de calcul le barrage est largement stable ([Fig.18](#)).

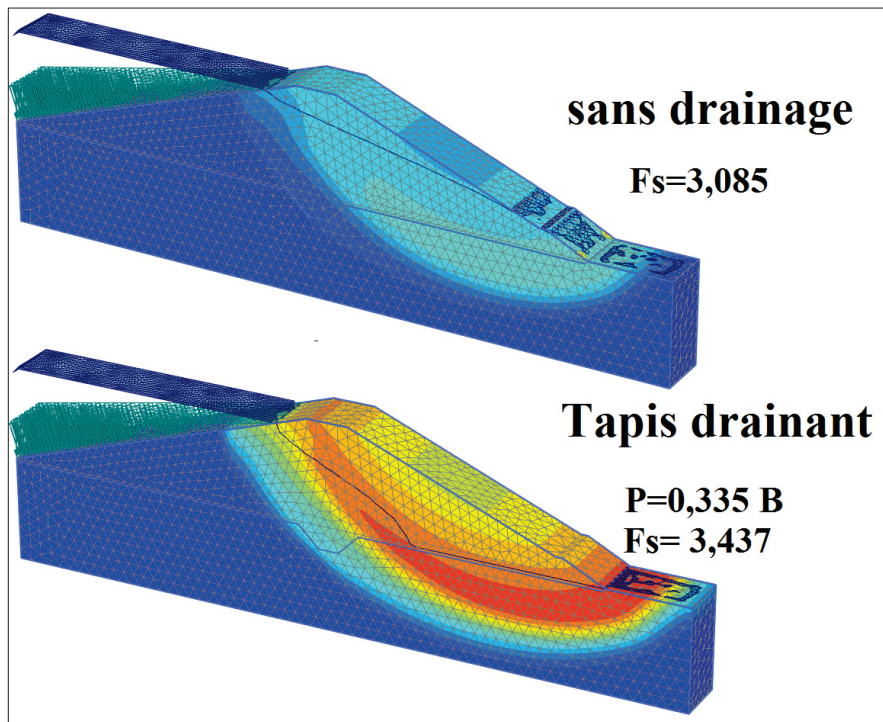


Fig. 18 Le facteur de sécurité de la digue d'Oued El Magroune obtenu par PLAXIS 3D.

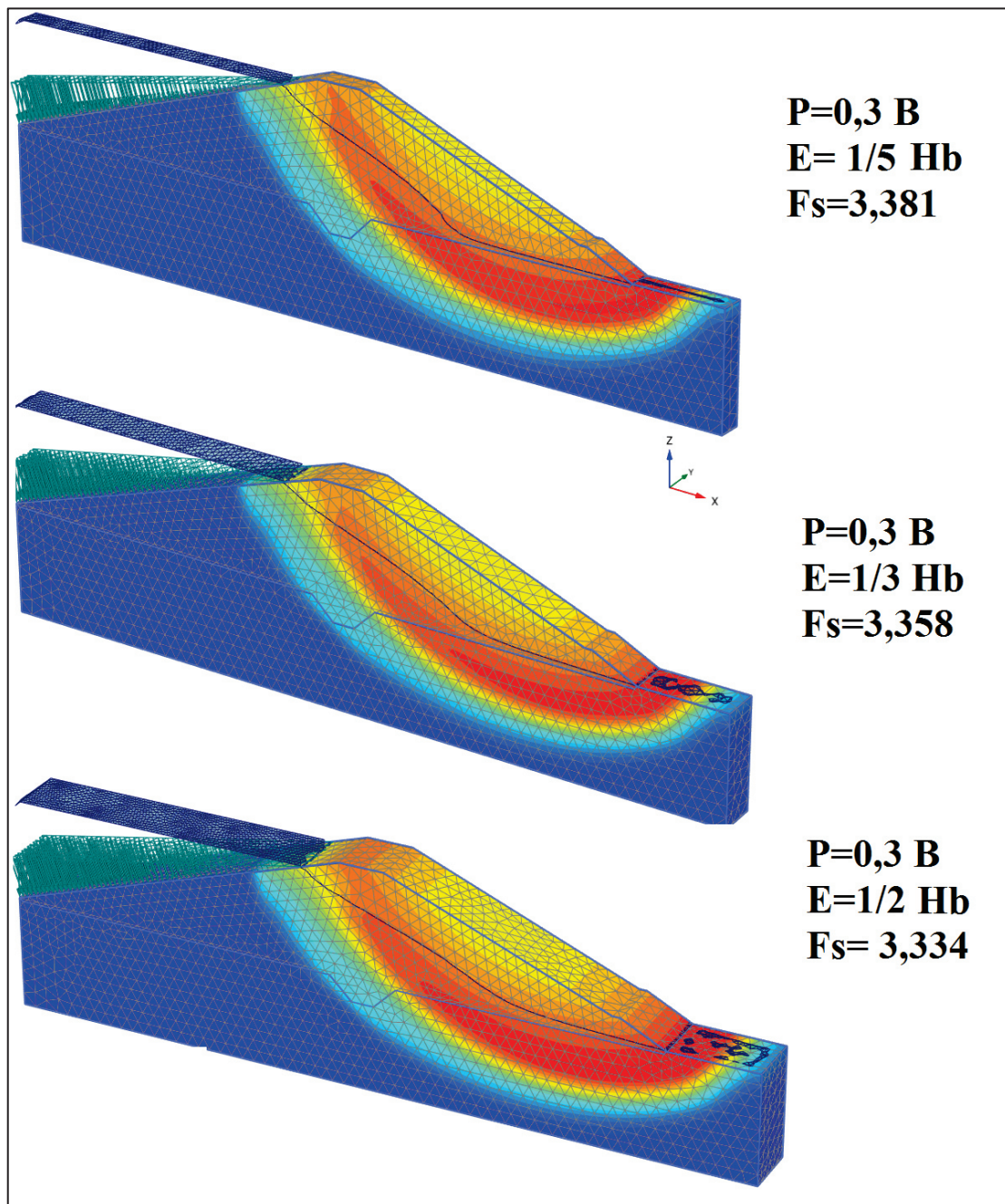


Fig. 19 Le facteur de sécurité de la digue de Oued El Magroune obtenu par PLAXIS 3D pour l'espacement $E = [3\text{m}, 5\text{m}, 7.5\text{m}]$ des drains.

En comparant les résultats obtenus lors du calcul du coefficient de sécurité de la digue avec le drainage existant et celui trouvé par la modélisation avec le système de drains, on constate que les résultats sont proches avec une erreur qui ne dépasse pas 3% pour un espacement maximal admissible des drains $E = 1/2 Hb$, sachant que la longueur du drain P est inférieure à 3,1 m par rapport au drain existant pour le cas étudié ($P_{\text{drain}} = 0,3B$, $P_{\text{Tapis drainant}}=0,335B$).

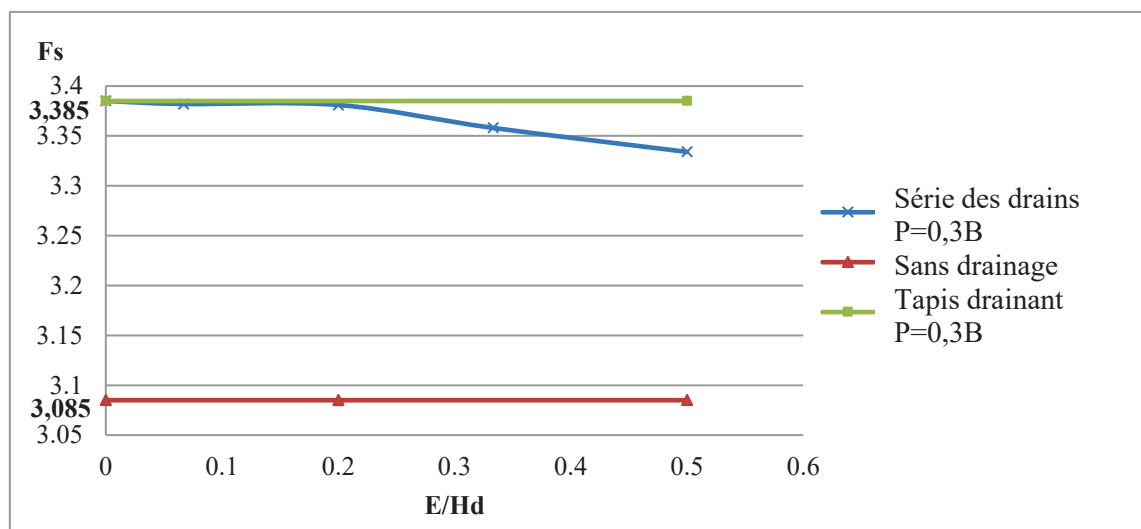


Fig. 20 Variation du facteur de sécurité en fonction de l'espacement des drains pour $P=0,3B$.

La figure 20 montre, pour un tapis drainant de longueur $P=0,3B$ le $F_s = 3,385$, l'espacement des drains de $E=0 Hb$ jusqu'à $E=0,2 Hb$ le facteur de sécurité est constant, il n'y a donc aucune influence sur la position de la surface phréatique, les drains se comportent comme un Tapis, au-delà de $E=0,2 Hb$ le facteur de sécurité diminue progressivement avec un pourcentage maximal de 1,5% entre la digue équipée de drains avec un espacement maximal admissible $E=0,5Hb$ et celle équipée d'un tapis drainant de même longueur $P=0,3 B$.

7.2 Débit de fuite

La figure 21 montre les vecteurs de vitesse d'écoulement, le flux dominant est infiltré à travers la digue avec un gradient hydraulique à l'entrée du drain variant entre 2,4 et 5,3 successivement entre $E= 0$ et $E=0,5Hb$, ce qui nécessite des filtres internes de protection contre l'érosion soigneusement conçus.

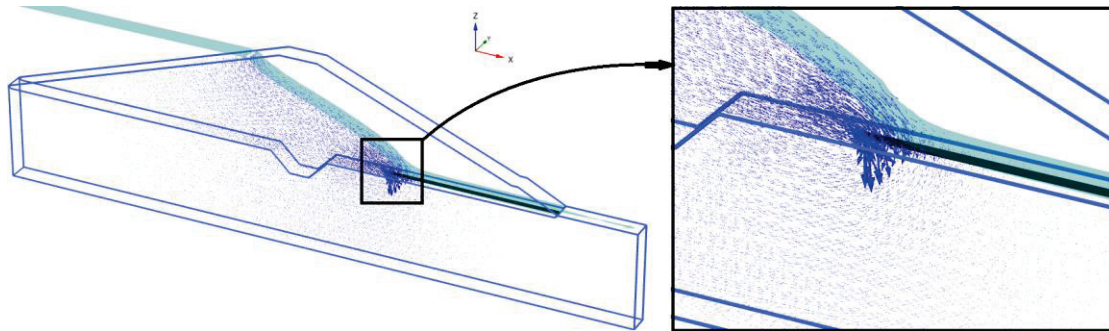


Fig. 21 Vecteurs de vitesse d'écoulement vers le drain de $P=0,3 B$.

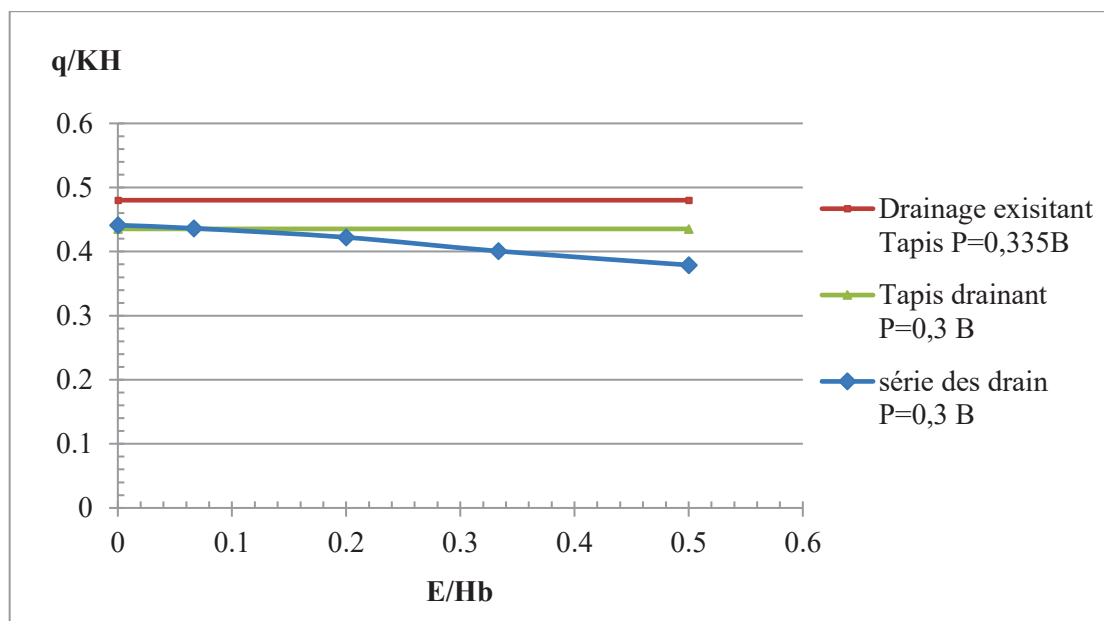


Fig. 22 Débit de fuite en fonction de l'espacement E des barrages avec $P=0,3 B$.

La figure 22 montre que le débit diminue progressivement lorsque l'espacement entre les drains augmente, le débit total de la digue équipée de drains est inférieur de 8 à 20% à celui d'un tapis existant de la même digue, selon l'espacement des drains choisi, et de 13% à celui d'une digue équipée d'un tapis de même longueur P que le système de drainage.

Conclusion

Sur la base des études numériques paramétriques et l'analyse du réservoir d'Oued El Magroune, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Pour les drains, il existe deux régimes d'écoulement distincts ; saturé et non saturé, selon l'immersion du drain dans l'eau, l'infiltration verticale de l'eau vers les drains est dominante dans le régime saturé et l'horizontale dans le cas du régime non saturé.
- Une longueur de drain **P** compris entre $[1/4 ; 1/3] \mathbf{B}$ est recommandée afin d'avoir un débit inférieur ou proche de celui d'un tapis drainant de $1/3 \mathbf{B}$ de longueur et un espacement optimal des drains.
- Les drains se comportent comme un tapis pour un espacement entre les drains **E** inférieur à $0,2 \mathbf{Hb}$, il est recommandé de prendre un espacement supérieur à cette valeur tout en respectant la faisabilité technique et le coût de construction.
- Pour une longueur de drain $\mathbf{P} = 1/3 \mathbf{B}$, la valeur maximale de l'espacement **E** est limitée par la valeur $0,4 \mathbf{Hb}$ pour une pente aval (1:2) et $0,55 \mathbf{Hb}$ pour (1:2,5).
- Le débit total du réservoir de l'Oued El Magroune équipé de ces drains est inférieur de 8 à 20% (selon l'espacement des drains) à celui du tapis drainant existant.
- Le coefficient de sécurité du réservoir de l'Oued El Magroune avec le drain existant et celui trouvé avec ce système de drains sont proches avec une erreur qui ne dépasse pas 3% pour un espacement maximal admissible des drains $\mathbf{E} = 1/2 \mathbf{Hb}$.

**CHAPITRE VI : Etude technico-économique du
système de drainage par drains**

Introduction

Les devis estimatifs de projets de construction jouent un rôle important dans les prises de décision initiales du projet bien que la portée ne soit pas finalisée et que très peu d'information sur la conception soit disponible au cours des premières étapes du projet (Sonmez 2004).

Dans ce chapitre on essaie d'étudier le gain économique apporté par la méthode de drainage par série de drains par rapport au drainage par un tapis drainant, nous avons besoin d'identifier des ressources nécessaires pour la réalisation et d'estimer les coûts de chaque tâche et le coût total de réalisation de chaque système de drainage.

1 Un Projet

Est un ensemble finalisé d'activités et d'actions entreprises dans le but de répondre à un besoin défini dans des délais fixés et dans la limite de l'enveloppe budgétaire allouée. Un projet comprend un objectif défini devant être livré dans un délai et à un coût convenu un système dynamique à maintenir en équilibre, chaque changement déséquilibre le projet (Fig.1).

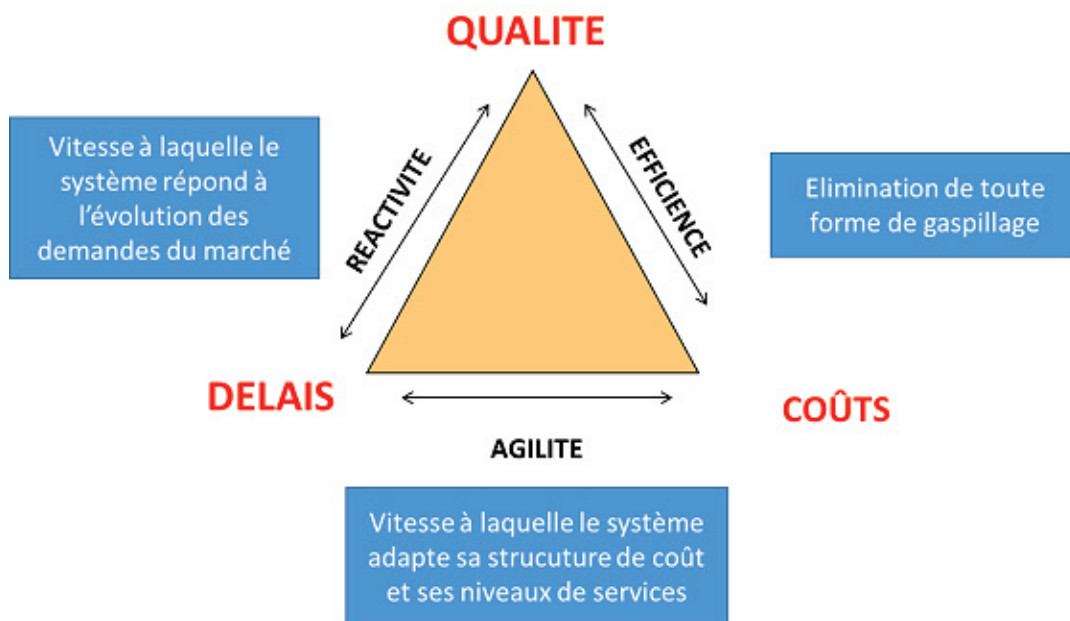


Fig. 1 Critère de réalisation d'un projet.

2 Le découpage d'un projet

La conduite d'un projet repose sur un découpage chronologique (phases) du projet en précisant :

- Ce qui doit être fait (tâches).
- Par qui cela doit être fait (Ressources).
- Comment les résultats doivent être présentés (Livrables).
- Comment les valider (Jalons).

2.1 Les tâches

Une tâche est une action à mener pour aboutir à un résultat, à chaque tâche, il faut associer :

- Un objectif précis et mesurable.
- Des ressources humaines, matérielles et financières adaptées.
- Une charge de travail exprimée en nombre de journées, et de travailleurs.
- Une durée ainsi qu'une date de début et une date de fin.

Dans cette partie on essaye d'établir un devis estimatif de réalisation d'un système de drainage (drains ; tapis horizontal) dans un barrage en terre, sans tenir compte les frais de l'excavation (Fig.2).

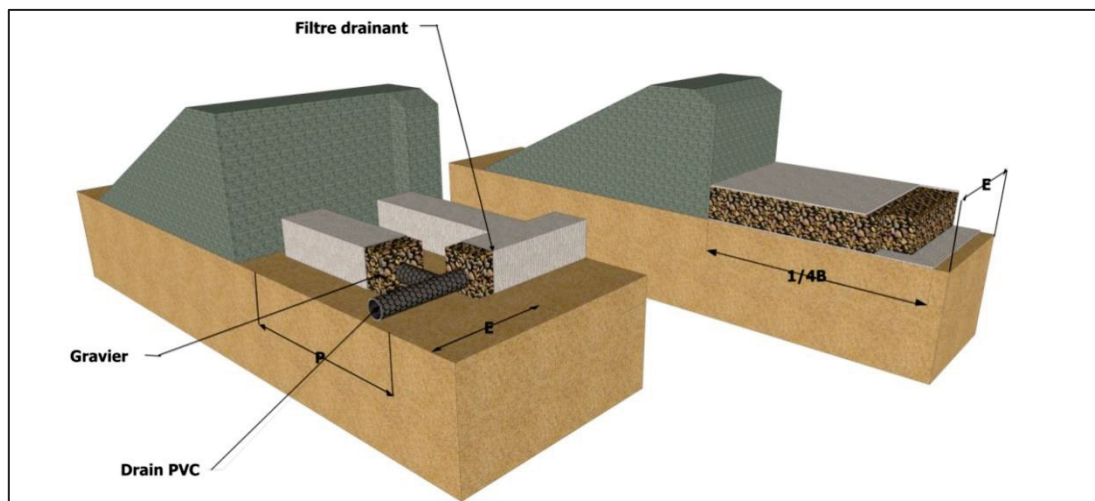


Fig. 2 Conception des systèmes de drainage (Drains, Tapis).

3 Eléments constitutifs de système de drainage

3.1 Tapis drainant

En général un tapis drainant simple est constitué du gravier entouré de sable ou d'un géotextile de section totale très largement suffisante pour évacuer le débit prévisible (Fig.3).



Fig. 3 Réalisation d'un tapis drainant. (Irstea-G2DR 2011)

Pour les barrages en terre homogène, il est préférable de prendre la longueur du tapis horizontal $L_{\text{Tapis}} = [1/4, 1/3] B$ (Hadjira & Naima 2014). Dans ce cas on a choisi la valeur ($L_{\text{Tapis}} = 1/4B$) la plus économique

Al-Janabi et al. (2020) conclut que pour un barrage en terre homogène avec une longueur de tapis drainant moyenne, l'épaisseur 0,5m est la meilleure configuration de conception.

3.2 Drainage proposé (Série des drains)

Le système de drainage est constitué de gravier et d'un drain en partie basse, Le diamètre du drain se détermine en fonction de la quantité d'eau à évacuer, il est recommandé d'utiliser un diamètre minimal intérieur de l'ordre de 100 mm. Le drain repose sur une couche de granulat de 5 à 10 cm d'épaisseur et en être recouvert de 20 cm au moins, l'ensemble étant complètement enveloppé par un géotextile d'au moins 200g/m² (DTU 20.1).

Dans notre cas on a supposé un drain de diamètre 160mm avec un diamètre intérieur 145 mm reposé sur une couche de 9 cm et enrobé par une couche de 25 cm dans une largeur du tranché 50 cm, l'ensemble enveloppé avec une couche de géotextile non tissé de 800g/m².

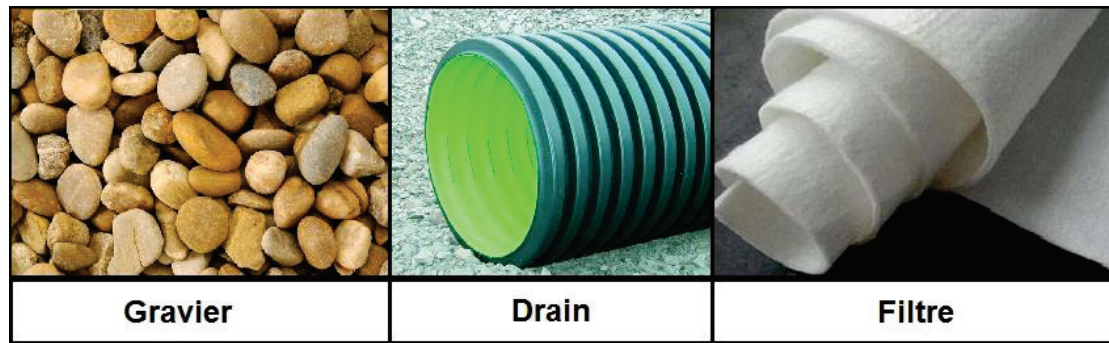


Fig. 4 Matériaux de construction pour les systèmes du drainage (Drains, Tapis).

4 Définition des ressources

Après la subdivision des tâches on doit relier chaque tâche avec une ressource correspondante soit matérielles soit humaines.

Dans une unité de largeur égale à **E** on a calculé les quantités des matériaux de chaque système de drainage (Tapis (m^2), Drains (mL)) pour le même barrage.

4.1 Les ressources humaines et matérielles pour réaliser un tapis

Pour réaliser un mètre carré du tapis il nous faut (Fig.5) :

- Deux couches (inférieure et supérieure) de Filtre de $1m^2$ chaque une d'elle.
- $0.5 m^3$ du gravier équivalent à 0.85 tonne.
- Les engins (chargeuse sur pneus, camion à benne basculante de 12 t, niveleuse, compacteur monocylindrique vibrant)
- Les moyennes humaines (compagnon professionnel de construction et un ouvrier d'exécution)

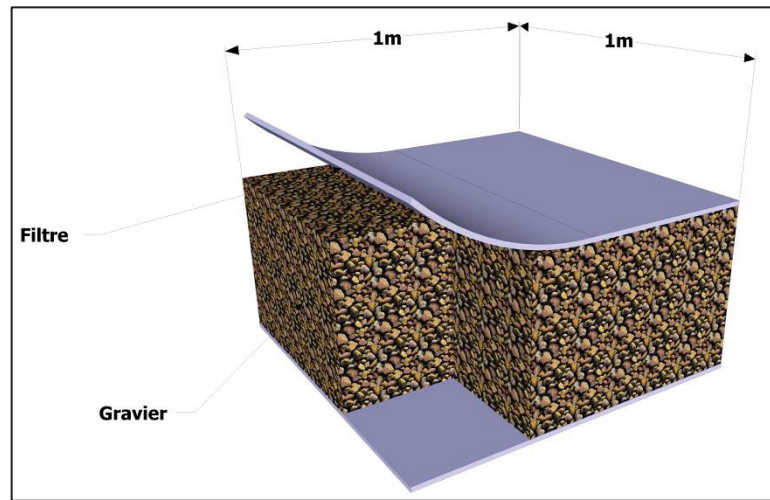


Fig. 5 Détail constitutif d'une unité de surface d'un tapis drainant.

4.2 Les ressources humaines et matérielles pour réaliser un des drains

Pour réaliser un tranché de 1ml il nous faut :

- 1.02 m de drain, les 2cm par mètre servent à l'emboîtement des collecteurs
- 0.368 tonne de gravier non classifié
- un tapis enveloppe l'ensemble avec 2.242 m de périmètre
- les engins (chargeuse sur pneus, camion à benne basculante de 12 t, plaque vibrante à guidage manuel) pour le transport et la mise en place des matériaux.
- les moyennes humaines (Compagnon professionnel construction, Ouvrier d'exécution construction).

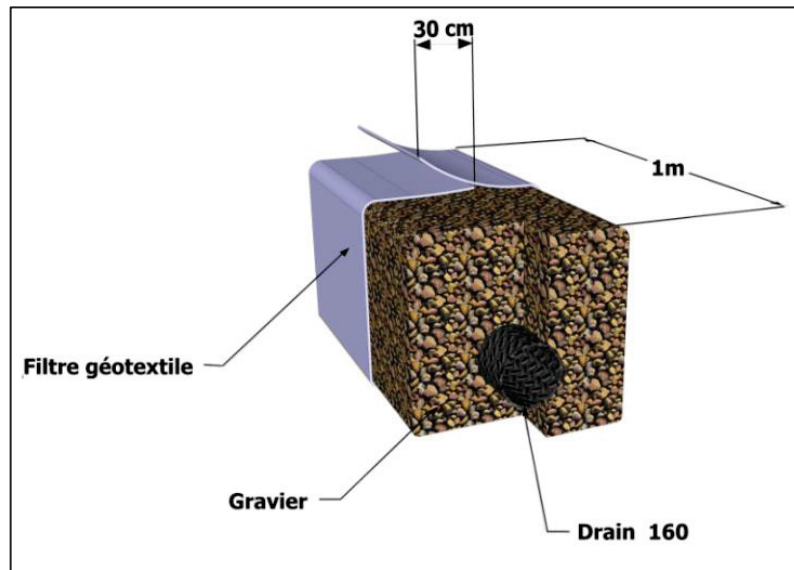


Fig. 6 Détail constitutif d'une unité de longueur d'une tranchée drainante.

5 Etude économique

5.1 Génération de prix

CYPE a créé le **Générateur de prix**, un outil informatique permettant d'obtenir des prix avec les prévisions de coût au plus proche de la réalité. Véritable base de données d'éléments de construction, il prend en compte toutes les options typologiques, géographiques et économiques qui influent sur le coût final d'un projet.

À l'aide de ce programme on a pu calculer les frais de la réalisation de deux systèmes de drainages pour une même unité de largeur **E** de chaque barrage.

Les tableaux 5 et 6 représentent les frais de réalisation d'un mètre linière de drainage par drains et un mètre carré d'un tapis drainant.

**Etude technico-économique du système de drainage par
drains**

CHAPITRE VI :

Tab. 1 Devis estimatif de réalisation d'un mètre linière (mL) de drain tranchée.

Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Tube perforé en PVC à double paroi, celle extérieure annelée et celle intérieure lisse, de 160 mm de diamètre nominal, longueur nominale 6 m.	1,02	mL	1054,78	1075,88
Filtre Géotextile non tissé composé de fibres de polypropylène unies par aiguilletage, avec une résistance à la traction longitudinale de 50,1 kN/m, une résistance à la traction transversale de 56,5 kN/m, une ouverture de cône à l'essai de perforation dynamique selon NF EN ISO 13433 inférieure à 4,5 mm, résistance CBR au poinçonnement 10 kN et une masse surfacique de 800 g/m ² . Selon NF EN 13252.	2,242	m ²	655,28	1469,14
Grave filtrante sans classification.	0,368	t	1259,24	463,40
Chargeuse sur pneus de 120 kW/1,9 m ³ .	0,017	h	3386,25	57,57
Camion à benne basculante de 12 t de charge, de 162 kW.	0,017	h	3381,20	57,48
Plaque vibrante à guidage manuel, de 300 kg, largeur de travail 70 cm, réversible.	0,029	h	537,86	15,6
Compagnon professionnel construction.	0,161	h	469,60	75,61
Ouvrier d'exécution construction.	0,322	h	342,62	110,32
			Montant total HT	3324,99

Etude technico-économique du système de drainage par drains

CHAPITRE VI :

Tab. 2 Devis estimatif de réalisation d'un mètre carré (m²) du tapis horizontal.

Désignation	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Filtre géotextile non tissé composé de fibres de polypropylène unies par aiguilletage, avec une résistance à la traction longitudinale de 50,1 kN/m, une résistance à la traction transversale de 56,5 kN/m, une ouverture de cône à l'essai de perforation dynamique selon NF EN ISO 13433 inférieure à 4,5 mm, résistance CBR au poinçonnement 10 kN et une masse surfacique de 800 g/m ² . Selon NF EN 13252.	2	m2	655,28	1310,56
Grave filtrante sans classification.	0,85	t	1259,24	1070,35
Chargeuse sur pneus de 120 kW/1,9 m ³ .	0,017	h	3386,25	57,57
Camion à benne basculante de 12 t de charge, de 162 kW.	0,017	h	3381,20	57,48
Moto-niveleuse de 154 kW.	0,012	h	6303,66	75,64
Compacteur monocylindrique vibrant autopropulsé, de 74 kW, de 7,42 t, largeur de travail 167,6 cm.	0,029	h	4242,28	123,03
Compagnon professionnel construction.	0,133	h	469,6	62,46
Ouvrier d'exécution construction.	0,187	h	329,49	61,61
			Montant total	2818,70

5.2 Estimation des quantités et des frais de réalisation total

Les tableaux ci-dessous représentent le métré des tranchées et des tapis dans une unité de largeur **E** d'un barrage en terre de 10 m d'hauteur avec deux pentes des talus différentes et une différente configuration espace-longueur des drains :

- Pour les fruits **m,n=2** la longueur des tranchées **P=1/3B** avec des espacement variables **E=[1,2,3,4]** m.
- Pour le barrage de fruits **m,n=2.5**, deux longueurs de drains a été étudié **P=1/3B** et **P=0.3B** pour des espacement variable.

Pour le linière des drains on ajoute une valeur égale à **E** qui représente le tranché de collecte des d'eaux (voir la figure 2 ci-dessus).

Frais de réalisation total d'un tapis drainant :

$$\text{Frais total tapis} = \text{Quantité total en (m}^2\text{)} * \text{Prix unitaire du m}^2 \quad (\text{VI.1})$$

$$\text{Quantité total en (m}^2\text{)} = P * E \quad (\text{VI.2})$$

Frais total de réalisation des tranchées drainantes :

$$\text{Frais total tranchées} = \text{Quantité total en (mL)} * \text{Prix unitaire du mL} \quad (\text{VI.3})$$

$$\text{Quantité total en (mL)} = P + E \quad (\text{VI.4})$$

Les quantités étudiées correspondent à une unité de largeur de la digue égale à **E** pour les deux systèmes de drainages.

**Etude technico-économique du système de drainage par
drains**

CHAPITRE VI :

Tab. 3 Devis quantitatif et estimatif de réalisation du tapis horizontal.

Fruit m,n	P(m)	E (m)	surface total tapis (m2)	frais tapis (DA)
2	14,92	4	59,0832	166 537,82 DA
		3	44,3124	124 903,36 DA
		2	29,5416	83 268,91 DA
		1	14,7708	41 634,45 DA
2,5	16,43	5	67,14	189 247,52 DA
		4	53,712	151 398,01 DA
		3	40,284	113 548,51 DA
		1	13,428	37 849,50 DA
	18,25	5,5	81,2394	228 989,50 DA
		4	59,0832	166 537,82 DA
		3	44,3124	124 903,36 DA
		1	14,7708	41 634,45 DA

Tab. 4 Devis quantitatif et estimatif de réalisation des tranchées drainantes.

fruit m,n	P(m)	E (m)	longueur total drains (m)	frais drains (DA)
2	14,92	4	18,7708	62 412,72 DA
		3	17,7708	59 087,73 DA
		2	16,7708	55 762,74 DA
		1	15,7708	52 437,75 DA
2,5	16,428	5	21,428	71 247,89 DA
		4	20,428	67 922,90 DA
		3	19,428	64 597,91 DA
		1	17,428	57 947,93 DA
	18,25	5,5	23,5708	78 372,67 DA
		4	22,0708	73 385,19 DA
		3	21,0708	70 060,20 DA
		1	19,0708	63 410,22 DA

6 Résultat et discussion

6.1 Devis quantitatif

Dans les tableaux précédents on remarque que les frais de réalisation du tapis est très important que la réalisation des drains et les frais augmentent au fur et à mesure de la hauteur de l'ouvrage, malgré que le frais de réalisation d'un mètre linière de drains est très élevé par rapport au frais de réalisation d'un mètre carré de tapis, tout ça s'explique par les quantités (Fig.7 ; Fig.8).

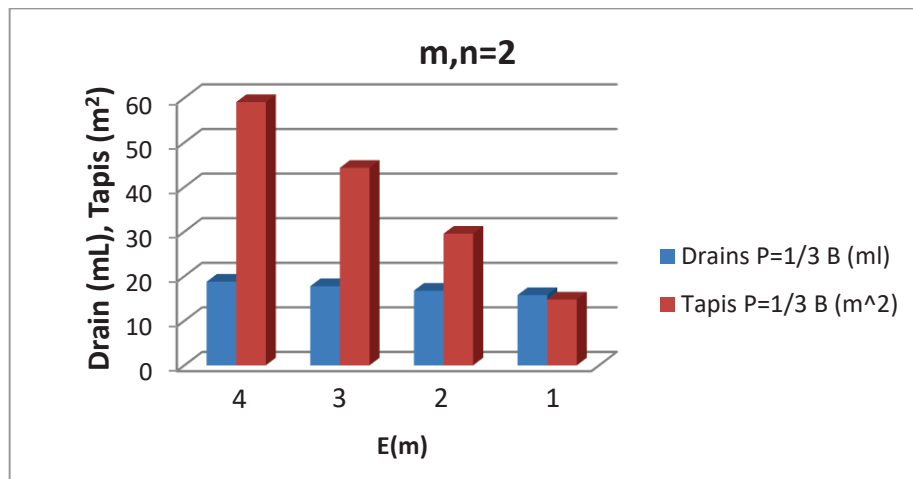


Fig. 7 Devis quantitatif de réalisation d'un système des drains et d'un tapis en fonction de l'espacement des drains pour $n=2$.

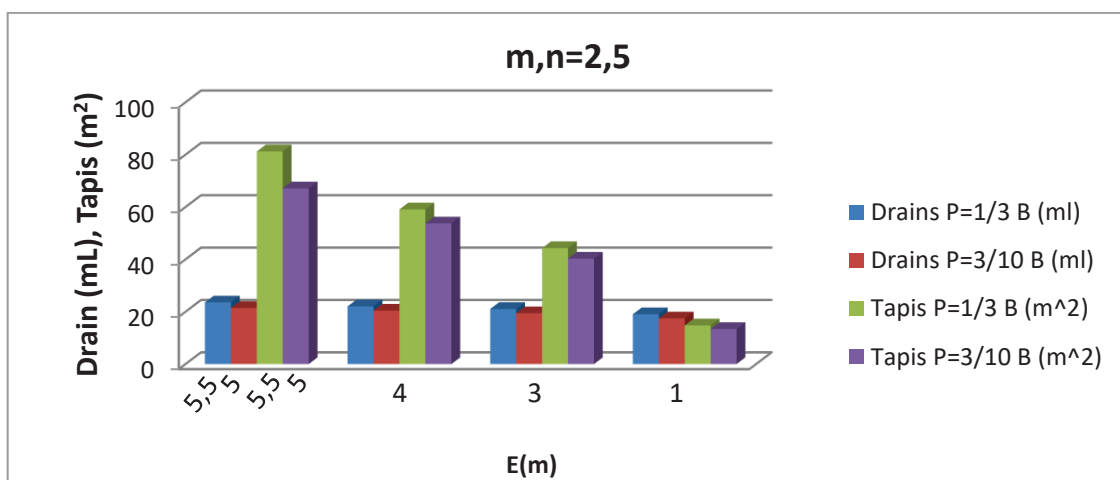


Fig. 8 Devis quantitatif de réalisation d'un système des drains et d'un tapis en fonction de l'espacement des drains pour $n=2.5$.

La disposition discontinue des drains permet de minimiser les quantités des matériaux constitutifs par rapport le tapis drainant grâce au vide entre les drains.

Pour des raisons économiques il est recommandé de choisir un écartement max admissible toute on assurant la stabilité hydromécanique du barrage.

6.2 Gain économique

Le cout de réalisation d'un tapis horizontal est exponentiel avec la hauteur du barrage par contre linière pour le système des drains, donc le drainage par drains est plus bénéfique.

Il est de (33-60 %) pour les digues de fruit $n=2$ et de (0-60%) pour les digues de $n=2.5$ par rapport les frais de réalisation d'un tapis drainant pour un espacement des drains entre $E=0.2$ H_b et l'espacement maximal admissible.

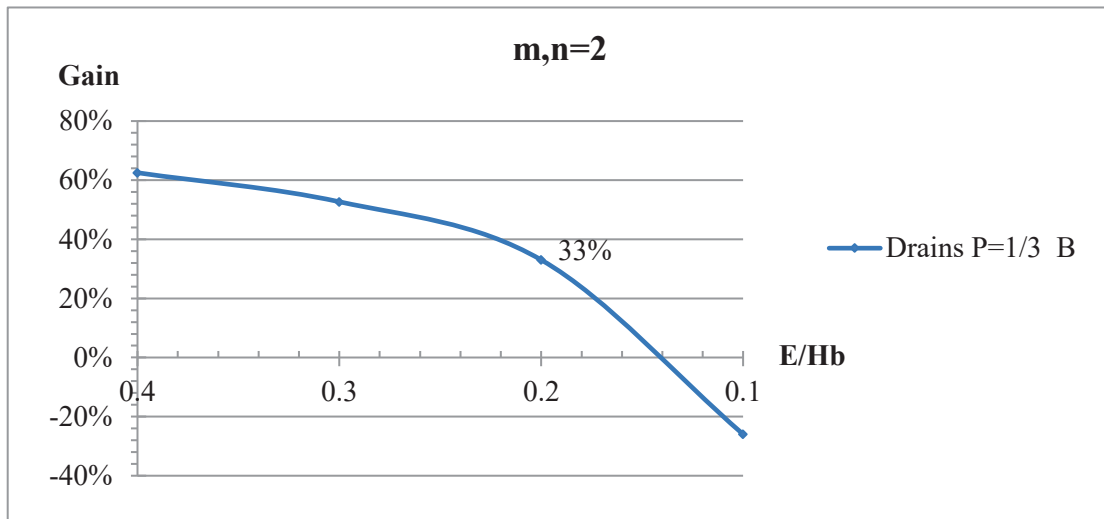


Fig. 9 Gain économique de système des drains par rapport à un tapis drainant pour une unité de largeur E pour un fruit $n,m=2$.

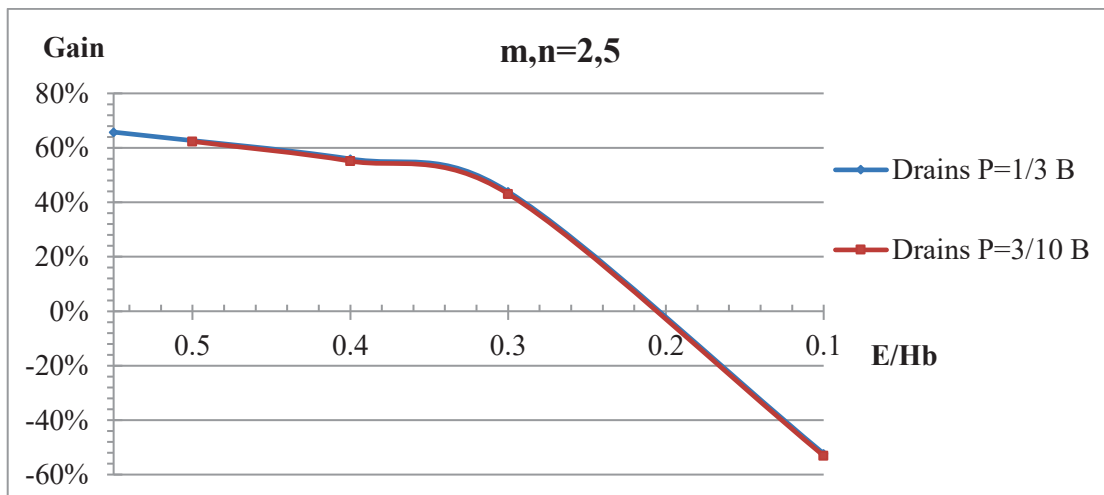


Fig. 10 Gain économique de système des drains par rapport à un tapis drainant pour une unité de largeur E pour un fruit $n,m=2.5$.

Conclusion

A travers ce travail, nous avons pu fournir un outil de dimensionnement des drains sur une base économique en tenant compte les paramètres géométriques du barrage, les résultats retirés de l'étude sont :

- Le cout de réalisation d'un mètre linière de tranchée drainante est plus élevé qu'un mètre carré d'un tapis drainant.
- La disposition discontinue de série des drains rend le système très économique grâce à la quantité réduite des matériaux au niveau des vides entre les drains.
- Le gain de système (série de drains) est de (33-60 %) pour les digues de fruit $n=2$ et de (0-60%) pour les digues de $n=2.5$ par rapport les frais de réalisation d'un tapis drainant pour un espacement des drains entre $E=0.2 Hb$ et l'espacement maximal admissible.
- Lors de la conception des drains il faut prendre l'écartement le plus grand possible comme un choix plus économique toute en assurant le bon fonctionnement et la stabilité hydromécanique de la digue.

Du point de vue économique, le système de drainage par drains est une technique très économique et techniquement valable et pratique.

Conclusion générale

Cette étude est considérée comme une contribution au dimensionnement de l'espacement et de la longueur optimale d'un système de drainage installé dans la partie aval d'une digue en terre. Le système consiste à installer des drains parallèles formant une surface de drainage discontinue. Une recherche bibliographique sur les défaillances des barrages en terre due aux infiltrations excessives à travers le corps à été faite, ainsi des techniques de drainage dans les barrages et le dimensionnement des filtres ont été présentés. Le modèle numérique utilisant le logiciel PLAXIS 3D a été validé par des expériences réalisées en laboratoire sur un modèle physique. L'étude paramétrique sur le modèle numérique a permis de proposer un outil de dimensionnement pour ce système de drainage. L'application est réalisée sur une digue réelle du réservoir de l'Oued El Magroune. Pour montrer l'efficacité de ce drain, une analyse numérique comparative entre la digue avec un drain existant et celle équipée de drains parallèles a été réalisée. Finalement, une étude économique à été faite pour évaluer la rentabilité du système.

Sur la base de ces études, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les recherches bibliographiques ont indiqué que la plupart des accidents sont étroitement liés à la pression de l'eau interstitielle dans le talus, il serait donc approprié de considérer l'effet de l'écoulement dans la conception des digues.
- Le choix et la mise en place des matériaux de conception des barrages en terre est une étape très importante pour assurer la sécurité vis-à-vis de l'érosion interne et la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage.
- Il faut tenir compte des interfaces (sol remblai-sol fondation, sol-rigide, sol filtre) lors de conception, modéliser le comportement de l'ouvrage avec des scénarios plus défavorables et contrôler avec soin pendant la réalisation et en fonctionnement.
- Une combinaison des systèmes de drainage est très utilisée dans le cas des grands barrages afin de profiter de tous les avantages de chaque système, mais elle nécessite une bonne connaissance du comportement de la digue en présence d'écoulement en régime permanent et transitoire avec différentes situations du barrage (vidange rapide, séisme, comportement à long terme...).

- La comparaison des résultats des expériences physiques et ceux de PLAXIS 3D montre un bon accord pour le débit et un très bon accord pour la pression interstitielle.
- Pour les drains, il existe deux régimes d'écoulement distincts, saturé et non saturé, selon l'immersion du drain dans l'eau, l'infiltration verticale de l'eau vers les drains est dominante dans le régime saturé et celle horizontale dans le cas du régime non saturé.
- Une valeur de longueur de drain P comprise entre $[1/4 ; 1/3] B$ est recommandée afin d'avoir un débit inférieur ou proche de celui d'un drain horizontal de $1/3 B$ de longueur et un espacement optimal des drains.
- Les drains se comportent comme un drain horizontal pour un espacement entre les drains E inférieur à $0,2 H_b$, il est recommandé de prendre un espacement supérieur à cette valeur tout en respectant la faisabilité technique et le coût de construction.
- Pour une longueur de drain $P = 1/3 B$, la valeur maximale de l'espacement E est limitée par la valeur $0,4 H_b$ pour une pente aval (1 :2) et $0,55 H_b$ pour (1:2,5).
- Le débit de fuites total du barrage de l'Oued El Magroune équipé de drains est inférieur de 8 à 20% (selon l'espacement des drains) à celui équipé du drain horizontal existant.
- Le coefficient de sécurité de la digue de l'Oued El Magroune avec le drain horizontal (drain existant) et celui trouvé avec ce système de drains sont proches avec une erreur qui ne dépasse pas 3% pour un espacement maximal admissible des drains $E = 1/2 H_b$.
- La disposition discontinue de série des drains rend le système très économique grâce à la quantité réduite des matériaux au niveau des vides entre les drains.
- Le gain de système (série de drains) est de (33-60 %) pour les digues de fruit $n=2$ et de (0-60%) pour les digues de $n=2.5$ par rapport aux frais de réalisation d'un tapis drainant pour un espacement des drains entre $E=0.2 H_b$ et l'espacement maximal admissible.

Perspectives

En ce qui concerne les perspectives de recherche à court terme, nous avons l'intention d'élargir nos études pour inclure l'analyse de la stabilité hydromécanique de la digue ainsi que le comportement des drains dans des situations rares et accidentelles, tels que les cas de vidange rapide et de séisme. Cette analyse impliquera une approche dynamique et transitoire de l'écoulement, ainsi qu'une étude du couplage hydro-mécanique.

Quant aux perspectives à long terme, nos objectifs sont les suivants : prendre en compte différentes hypothèses de colmatage de certains drains, et étudier les scénarios et les variations de la nappe phréatique, des pressions interstitielles, du débit de fuite et du gradient hydraulique à la fois dans la zone affectée et dans l'ensemble de la structure. Nous évaluerons l'impact de ces changements sur la stabilité de la digue.

Nous examinerons également la possibilité d'intervenir en cas de colmatage, en proposant des solutions techniques réalisables pour la réparation et la correction. De plus, nous étudierons la faisabilité d'inspecter et de maintenir le système dans son ensemble.

Références

- Abderrezak B (2021) EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT.
- Afiri R (2021) Moyens d'étanchéisation des fondations des barrages: Cas du barrage de Souk Tleta. Université Mouloud MAMMERI Tizi-Ouzou.
- Al-Janabi AMS, Ghazali AH, Ghazaw YM, Afan HA, Al-Ansari N, Yaseen ZM (2020) Experimental and numerical analysis for earth-fill dam seepage. *Sustainability* 12 (6):2490
- Alonso E, Bécue J, Bolle G, Brodin J, Brunel P, Cassard A, Degoutte G, Dore M, Lautrin D, Lefebvre J (1997) Barrages en remblai. Petits barrages: recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, DEGOUTTE G:67-113
- Alonso E, Bernede T, Morlier P (1993) Effet sur la stabilité des barrages en terre homogènes d'une variation des principaux paramètres. *Revue Française de Géotechnique* (63):23-37
- Bakiev M, Babajanov K, Maalem N, Djabbarova S, Yakubov K Modelling of horizontal pipe drainage for Sultansandjar dam. In: *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. vol 1. IOP Publishing, p 012021
- Beguín R (2011) Etude multi-échelle de l'érosion de contact au sein des ouvrages hydrauliques en terre. Université de Grenoble
- Bhowmik R, Shahu J, Datta M (2018) Failure analysis of a geomembrane lined reservoir embankment. *Geotextiles and Geomembranes* 46 (1):52-65
- Bosshard P (2009) China dams the world. *World Policy Journal* 26 (4):43-51
- Bouafia A (2000) Mécanique des sols appliquée : Problèmes résolus. Office des publications universitaires,
- Burenkova V (1993) Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. *Filters in geotechnical and hydraulic engineering Balkema, Rotterdam*:357-360
- Casagrande A (1937) Seepage through dams.
- Cascone E, Biondi G, Aliberti D, Rampello S (2021) Effect of vertical input motion and excess pore pressures on the seismic performance of a zoned dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 142:106566
- Chahar BR (2004) Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams. *Journal of irrigation and drainage engineering* 130 (6):530-536
- Dey A, Talukdar P (2022) Influence of drainage blanket clogging on response of homogeneous earthen dams. *Sādhanā* 47 (1):1-13
- Dunglas J, Loudière D (1973) Nouvelle conception des drains dans les barrages en terre homogène de petites et moyennes dimensions. *La Houille Blanche* (5-6):461-466
- Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J, Foster M (2003) Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 129 (4):307-314
- FEMA (2011) *Filters for Embankment Dams—Best Practices for Design and Construction*. Fema Washington, DC, USA,
- Gaj N, Madramootoo CA (2020) Effects of perforation geometry on pipe drainage in

- agricultural lands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 146 (7):04020015
- Garg SK (2011) *Irrigation Engineering and Hydraulic Structures*. Twenty Fourth Revised Edition:811-814
- GIROUD J-P (1979) Utilisation des géotextiles non-tissés dans les travaux hydrauliques. *Excavator* (425)
- Giroud JP (1988) Review of geotextile filter design criteria. In *Proceedings of First Indian Conference on Reinforced Soil and Geotextiles*:1-6
- GOURC J-P, DELMAS P RETOUR SUR DES OUVRAGES AVEC GÉOSYNTHÉTIQUES TOUJOURS EN SERVICE APRÈS PLUSIEURS DÉCENNIES.
- HADJIRA F, NAIMA B (2014) EFFETS DES DRAINS SUR LA STABILITE DES BARRAGES EN TERRE. *Courrier du Savoir scientifique et technique* 11 (11):09-15
- Hart BP, Ryan & Pabst, Mark & Freeman, Michael & Lowe, Nathan (2018) Considerations for Embankment Dam Toe Drain Design: An Inspection and Maintenance Perspective.
- Horikoshi K, Takahashi A (2015) Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment subjected to seepage flow. *Soils and Foundations* 55 (5):1293-1304
- IS 9429 (1999) *Drainage System for Earth and Rockfill Dams*. Code of Practice [WRD 9: Dams and Spillways]
- Jassam MG, Abdulrazzaq SS (2019) Theoretical Analysis of Seepage through Homogeneous and Non-homogeneous Saturated-Unsaturated Soil. *Journal of Engineering* 25 (5):52-67
- Kheiri G, Javdanian H, Shams G (2020) A numerical modeling study on the seepage under embankment dams. *Modeling Earth Systems and Environment* 6 (2):1075-1087
- Lakehal R, Djemili L (2017) Studying the effect of a variation in the main parameters on stability of homogeneous earth dams using design experiment. *Journal of Water and Land Development* 34 (1):173-179
- Lin H-D, Wang W-C, Li A-J (2020) Investigation of dilatancy angle effects on slope stability using the 3D finite element method strength reduction technique. *Computers and Geotechnics* 118:103295
- Luettich S, Giroud J-P, Bachus R (1992) Geotextile filter design guide. In: *Geosynthetics in Filtration, Drainage and Erosion Control*. Elsevier, pp 19-34
- Luo Y-l, Zhang C, Nie M, Zhan M-l, Sheng J-c (2016) An experimental study on embankment failure induced by prolonged immersion in floodwater. *Water Science and Engineering* 9 (1):81-86
- Mazumder S (2016) Solution to a system of linear algebraic equations. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*:103-167
- Messaid B, Boudoukha A (2008) A Design Chart for Positioning a Drainage Blanket in an Earth Dam. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 13
- MIRAFI geotextile filter design, application, and product selection guide. *Marine & Transportation Engineering*
- Moayed RZ, Rashidian V, Izadi E (2012) Evaluation of Phreatic Line in Homogenous Earth Dams with Different Drainage Systems. *Civ Eng Dept Imam Khomeini Int Uni Qazvin, Iran*
- Moraci N, Bilardi S, Mandaglio M (2022) Factors affecting geotextile filter long-term

- behaviour and their relevance in design. *Geosynthetics International* 29 (1):19-42
- Mouyeaux A, Bressolette P, Carvajal C, Peyras L, Bacconnet C, Breul P Développement d'un modèle éléments finis du mécanisme de glissement des barrages en remblai avec le code© Cast3M. In : *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 2015.
- Narita K (2000) Design and construction of embankment dams. Dept of Civil Eng, Aichi Institute of Technology
- Nguyen CD (2018) Étude expérimentale de l'impact de l'érosion par suffusion sur les propriétés physiques et mécaniques des sols. Thèse de doctorat de l'université d'Aix-Marseille spécialité : Mécanique des ... ,
- Omofunmi O, Kolo J, Oladipo A, Diabana P, Ojo A (2017) A review on effects and control of seepage through earth-fill dam. *Current Journal of Applied Science and Technology* 22 (5):1-11
- Pabst M, McDaniel T, Nuss LK, Knight K, Pimley L (2011) *Embankment Dams*.
- Pak A, Nabipour M (2017) Numerical study of the effects of drainage systems on saturated/unsaturated seepage and stability of tailings dams. *Mine Water and the Environment* 36 (3):341-355
- Peng S, Rice JD (2020) Inverse analysis of laboratory data and observations for evaluation of backward erosion piping process. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 12 (5):1080-1092
- Pham TL (2008) *Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide*. Ecole des Ponts ParisTech,
- Post G, Guerber P (1973) Conception du drainage dans les barrages en terre. *La Houille Blanche* (5-6):467-476
- Refaiy AR, AboulAtta NM, Saad NY, El-Molla DA (2021) Modeling the effect of downstream drain geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*
- Rolley R, Kreitmann H, Dunglas J, Pierrejean A, Rolland L (1977) *Technique des barrages en aménagement rural*.
- Romer Llanque Ayala G, Chagas da Silva Filho F, Ferreira Leme R, do Carmo Reis Cavalcanti M, Mahler CF (2020) Rapid drawdown in homogeneous earth dam considering transient flow and suction. *Ingeniería e Investigación* 40 (1):17-26
- Sato M, Kuwano R (2015) Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion. *Soils and Foundations* 55 (4):829-840
- Sazzad M, Rahman M (2017) Effect of clay blanket and chimney filter against seepage failure. *Int J of Adv Struct and Geotech Engg* 6 (2):77-83
- Sazzad M, Rahman M (2017) Effect of clay blanket and chimney filter against seepage failure. *Int J of Adv Struct and Geotech Engg* 6 (2):77-83
- Sherard JL, Dunnigan LP, Decker RS (1976) Identification and nature of dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102 (4):287-301
- Shin J-H, Kim H-M, Jang K-J (2009) Effect of pore water pressure on slope stability by using coupled finite element analysis. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 25 (2):25-35
- Sonmez R (2004) Conceptual cost estimation of building projects with regression analysis and neural networks. *Canadian Journal of Civil Engineering* 31 (4):677-683
- Sushant Kumar AKS, Munendra Kumar (2021) Modeling the effect of central impervious

- core and downstream filter geometry on seepage through earth dams. *Ain Shams Engineering Journal*
- Thior M, Sané T, Sy O, Descroix L, Ndiaye L-G, Sambou AK, Cissokho D, Solly B (2019) Caractéristiques granulométrique et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la Casamance, Sénégal.
- Tiligadas E (1988) Effect of different parameters on entrance resistance of corrugated plastic drains. *Agricultural water management* 13 (2-4):225-233
- Trivedi HK, Choudhari N, Gandhi S (2022) Geotextile Filters in Earthen Dam—A Review Study on Construction and Rehabilitation. *Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development*, Vol 2:79-94
- URS (2010) Chimney Filter/Drain Design and Construction Considerations. vol 1.
- UU R, LL E, EE I, EE S Manuel de conception et projets typiques des digues en terre.
- Valipour M (2012) A comparison between horizontal and vertical drainage systems (include pipe drainage, open ditch drainage, and pumped wells) in anisotropic soils. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 4 (1):7-12
- Wang S, Chen J-s, He H-q, He W-z (2016) Experimental study on piping in sandy gravel foundations considering effect of overlying clay. *Water Science and Engineering* 9 (2):165-171
- Wulandari S, Li A, Wahyudi H Effects of pore water pressure on cohesive-frictional slope stability by limit analysis. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. vol 1. IOP Publishing, p 012015
- Yaseen ZM, Ameen AMS, Aldlemy MS, Ali M, Abdulmohsin Afan H, Zhu S, Sami Al-Janabi AM, Al-Ansari N, Tiyyasha T, Tao H (2020) State-of-the Art-Powerhouse, Dam Structure, and Turbine Operation and Vibrations. *Sustainability* 12 (4):1676
- Zhang Y, Shi J, Fang W (2022) Analytical Solution for Deformation Characteristics of Buried High-Density Polyethylene Pipes Considering Temperature Variations. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 13 (2):04022011
- Zienkiewicz OC, Humpheson C, Lewis R (1975) Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique* 25 (4):671-689