

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID DE TLEMCEM
Faculté de technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master en génie civil

Spécialité : Structure

ANALYSE DES ECOULEMENTS AUTOUR DES FICHES DES PALPLANCHES

Présenté par :

- **Mr. GHAF FOUR Mohammed El Amine**
- **Mr. AYAD Abdeldjalil**

Soutenu publiquement le 04/07/ 2021, devant le jury composé de:

Mr. BEDJA OUI Mohammed Chakib
Mme. BENCHOUK Assia
Mme. SMAIL Nadia
Mr. ROUISSAT Bouchrit

President
Examinatrice
Encadrant
Co-encadrant

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

En premier lieu on tient à exprimer notre remerciement les plus vifs et les plus sincères à ALLAH, le CLÉMENT et le MISÉRICORDIEUX de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Comme nous tenons à exprimer notre reconnaissance à notre encadrant et co-encadrant, madame SMAIL Nadia et monsieur ROUISSAT Bouchrit pour leurs précieux conseils, leurs orientations et encouragements.

Nos sincères remerciements vont à Mr. CHERRAK Hichem pour ses conseils, son aide concernant le logiciel Geostudio et sa gentillesse.

Nos remerciements iront également vers tous ceux qui ont accepté avec bienveillance de participer au jury de ce mémoire.

Dédicace

*Avec mes sincères sentiments d'amour et gratitudes Les plus profondes
Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour tous leurs
sacrifices, leur patience, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout
au long de mes études.*

*A la mémoire de Ma grand-mère et mes grands- pères. Que dieu ait leurs
âmes dans sa sainte miséricorde.*

*A ma grand-mère maternelle, Que dieu lui donne une longue et joyeuse
vie.*

*A mon cher frère qui m'a aidé dans mon travail. Et que je lui souhaite
une vie pleine de réussite et de prospérité.*

*A mes sœurs adorables, que dieu les protège et leurs offre la chance et le
bonheur.*

*A tous les amis et mes Proches et à tous personnes ayant contribués à ce
travail De près ou de loin.*

Ghaffour Mohammed El Amine

Dédicace

Avec tout mon amour éternel et avec l'intensité de mes émotions.

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui m'ont donné tout le courage, la tendresse et la patience.

A ma très chère Mère je n'oublie pas ses sacrifices : l'amour qu'elle m'a donné et Pour ses encouragements. Je te souhaite la joie et de bonne santé.

*A mes frères, ma chère sœur, et ces belles filles Nessma et Amale.
Et surtout à tous mes chers amis.*

*A mon ami et mon binôme Ghaffour Mohammed El Amine.
Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs.*

Ayad Abd eldjilil

Résumé :

Les rideaux de palplanche sont largement utilisés dans le domaine du génie civil et des travaux publics (systèmes d'excavation, les blindages, les barrages, la stabilisation des pentes, les structures caissons, les diverses protections...etc).

En présence d'eau, des écoulements se manifestent autour des fiches de palplanches. Ces écoulements sont sensiblement verticaux ascendant devant la fiche. Les forces d'écoulement liées à ce flux ascendant diminuent le poids apparent du sol : il s'ensuit une réduction de la pression passive disponible devant la fiche. A la limite, ces forces peuvent provoquer des désordres couramment désignés sous le terme de renard pouvant déboucher sur une boulangerie. La boulangerie est un phénomène de surface qui survient lorsque le gradient hydraulique vertical y atteint sa valeur critique. Plusieurs paramètres peuvent participer à l'initiation de ce phénomène : hétérogénéités en perméabilité, influence de l'ancrage des fiches, valeurs des gradients hydrauliques ainsi que l'influence des gradients de charge développés, notamment au pied aval des fiches.

Tout en s'articulant autour de ces considérations, le présent travail concerne une analyse paramétrée et comparative relative aux paramètres d'écoulement autour des fiches de palplanches. L'analyse a été guidée à travers la modélisation numérique par le biais du code de calcul Geostudio. Les paramètres d'influence considérés sont en relation avec les perméabilités des sols atténuants aux fiches, les profondeurs d'ancrage des fiches ainsi que les gradients de charges entre les faces amont et aval des fiches. Cette étude a permis de mettre en évidence et d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les conditions d'écoulement, notamment en matière de charges d'eau, de pressions interstitielles et de gradients hydrauliques.

Mots clés : Palplanches, écoulement, pressions interstitielles, gradient hydraulique.

Abstract:

Sheet piling is widely used in civil engineering and public works (excavation systems, shoring, dams, slope stabilization, caisson structures, various protections, etc.).

In the presence of water, flows occur around the sheet piles. These flows are essentially vertical and rise in front of the sheet pile. The flow forces associated with this upward flow decrease the apparent weight of the soil, resulting in a reduction of the passive pressure available in front of the sheet pile. At the limit, these forces can provoke disorders commonly called foxing which can lead to bolting. The bolting is a surface phenomenon which occurs when the vertical hydraulic gradient reaches its critical value. Several parameters can participate in the initiation of this phenomenon: permeability heterogeneities, influence of the anchorage of the plugs, values of the hydraulic gradients as well as the influence of the load gradients developed, in particular at the downstream foot of the plugs.

While articulating around these considerations, the present work concerns a parameterized and comparative analysis of the flow parameters around the sheet piles. The analysis was guided through numerical modeling using the Geostudio calculation code. The influence parameters considered are related to the permeabilities of the soils around the piles, the anchorage depths of the piles and the load gradients between the upstream and downstream faces of the piles. This study allowed to highlight and evaluate the influence of these parameters on the flow conditions, especially in terms of water loads, pore pressures and hydraulic gradients.

Key words: Sheet piles, flow, pore pressures, hydraulic gradient.

ملخص :

تُستخدم جدران الدعامات الصفائحية على نطاق واسع في مجال الهندسة المدنية والأشغال العامة (أنظمة الحفر، التدرّيع، السدود، تثبيت المنحدرات، الهياكل على شكل صندوق، وسائل الحماية المختلفة ... إلخ). في وجود الماء، تظهر التدفقات حول الدعامات الصفائحية. هذه التدفقات تكون رأسية بشكل ملحوظ، تصاعدياً أمام الدعامات الصفائحية. تعمل قوى التدفق المرتبطة بهذا التدفق الصاعد على تقليل الوزن الظاهر للتربة: ينتج عن ذلك انخفاض في الضغط السليبي المتاح أمام الدعامات. في النهاية، يمكن أن تسبب هذه القوى اضطرابات معروفة بشكل شائع تحت مصطلح الثعلب، والتي يمكن أن تؤدي إلى ما يعرف بـ "la boullance". هذه الأخيرة هي ظاهرة سطحية تحدث عندما يصل التدرج الهيدروليكي العمودي إلى قيمته الحرجة. يمكن أن تشارك العديد من الخصائص في بدء هذه الظاهرة: عدم التجانس في النفاذية، وتأثير تثبيت الدعامات الصفائحية، وقيم التدرجات الهيدروليكية بالإضافة إلى تأثير تدرجات الحمل التي تم تطويرها، لا سيما عند سفح المصب للدعامات. بناءً على هذه الاعتبارات، يمكن القول إن هذا العمل يتعلق بتحليل محدد ومقارن لخصائص التدفق حول الدعامات. تم توجيه التحليل من خلال النمذجة الرقمية باستخدام كود الكمبيوتر Geostudio. ترتبط خصائص التأثير التي تم النظر فيها بنفاذية التربة المخففة للدعامات، وأعماق التثبيت للدعامات وكذلك تدرجات الحمل بين جانبي الدعامات (المنبع، المصب). مكنت هذه الدراسة من إبراز وتقييم تأثير هذه الخصائص على ظروف التدفق، لا سيما من حيث أحمال المياه والضغطات المسامية والتدرجات الهيدروليكية.

الكلمات المفتاحية : الدعامات الصفائحية، التدفق، الضغوطات المسامية، التدرج الهيدروليكي.

TABLE DES MATIERE

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION GENERALE : | 1 |
| CHAPITRE I : ASPECTS CONCEPTUELS SUR LES PALPLANCHES | 3 |
| 1. INTRODUCTION : | 4 |
| 2. HISTORIQUE : | 4 |
| 3. DEFINITION : | 5 |
| 4. TYPOLOGIE DES PALPLANCHES : | 6 |
| 5. PALPLANCHE METALLIQUE : | 7 |
| 5.1 Définition : | 7 |
| 5.2 Caractéristiques : | 7 |
| 5.3 Types de palplanches métalliques : | 8 |
| 5.3.1 La différence entre l'acier laminé à chaud et l'acier laminé à froid : | 8 |
| 5.3.2 Les différents types de profilés : | 9 |
| a) Palplanches plates AS 500 : | 11 |
| b) Rideaux mixtes : | 14 |
| 5.4 Les serrures : | 15 |
| 5.5 Raccords : | 15 |
| 5.6 Les éléments d'assemblage (rigidifications) : | 16 |
| 5.6.1. Liernes : | 16 |
| 5.6.2. Poutre de couronnement : | 16 |
| 5.6.3. Les appuis : | 17 |
| a) Les boutons : | 17 |
| b) Les tirants d'ancrage : | 17 |
| 5.7 Mise en œuvre : | 21 |
| 5.7.1 Battage : | 21 |
| 5.7.2 Vibrofonçage : | 22 |
| 5.7.3 Mise en place avec presse hydraulique : | 24 |
| 5.8 Enclenchement d'un rideau de palplanches : | 24 |
| 5.9 L'arrachage des palplanches : | 25 |
| 5.10 Recépage des palplanches : | 25 |
| 5.11 Principaux d'étanchement des palplanches : | 25 |
| 5.11.1 Etanchement vertical : | 25 |
| 5.11.2 Etanchement horizontal : | 28 |
| 5.12 Avantage des palplanches : | 28 |
| 5.13 Inconvénient des palplanches : | 29 |
| 5.14 Corrosion des palplanches : | 29 |
| 5.15 La protection contre la corrosion : | 30 |
| 6. METHODE DE CALCUL DES RIDEAUX DE PALPLANCHES : | 31 |
| 6.1 Définition de la poussée et de la butée : | 31 |
| 6.2 Etats limites de rupture selon L'Eurocode : | 33 |
| 6.3 Conditions d'appui d'un rideau dans le sol : | 33 |
| 6.3.1 Rideau Rigide : | 34 |
| 6.3.2 Rideau Flexible Ancré en tête : | 34 |
| 6.4 Principe de fonctionnement : | 35 |
| 6.5 Stabilité d'un écran de soutènement : | 36 |
| 6.5.1 Rideau ancré et simplement buté en pied : | 36 |
| 6.5.2 Rideau non ancré en tête et encastré en pied : | 38 |
| 6.5.3 Mur encastré en pied et ancré en tête : | 39 |
| 7. CONCLUSION : | 42 |

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE II : LES ECOULEMENTS AUTOUR DES RIDEAUX DE PALPLANCHES | 43 |
| 1. INTRODUCTION : | 44 |
| 2. DEFINITION : | 44 |
| 3. L'ÉCOULEMENT DE L'EAU DANS LE SOL : | 44 |
| 3.1 La charge hydraulique : | 44 |
| 3.2 La hauteur piézométrique : | 45 |
| 3.3 Perte de charge : | 46 |
| 3.4 La pression interstitielle : | 46 |
| 3.5 Gradient hydraulique : | 47 |
| 3.6 Vitesse de l'eau dans les sols : | 48 |
| 3.7 Loi de Darcy (1856) : | 50 |
| 3.7.1 Le principe de la loi de Darcy : | 50 |
| 3.7.2 Limite de validité de la loi de Darcy : | 52 |
| 3.8 Perméabilité des sols : | 52 |
| 3.8.1 Coefficient de perméabilité : | 52 |
| 3.8.2 Perméabilité moyenne équivalente des terrains stratifiés : | 53 |
| a) Écoulement en série (l'écoulement vertical) : | 53 |
| b) Écoulement en parallèle (l'écoulement horizontal) : | 54 |
| 3.9 Réseau d'écoulement : | 54 |
| 3.9.1 Exploitation des réseaux d'écoulement : | 56 |
| 3.9.2 Méthodes de détermination : | 56 |
| 3.9.3 Calcul du débit sous le rideau de palplanches : | 58 |
| 3.10 Forces d'écoulement : | 59 |
| 4. ACTION DE L'EAU SUR UN RIDEAU DE PALPLANCHES : | 59 |
| 5. ECOULEMENTS PERMANENTS AUTOUR D'UN RIDEAU DE PALPLANCHES : | 60 |
| 6. LES MECANISMES DE L'ÉROSION INTERNE : | 61 |
| 6.1 La boullance : | 61 |
| 6.2 Phénomène de renard hydraulique : | 62 |
| 7. CONCLUSION : | 63 |
| | |
| CHAPITRE III : ANALYSE PARAMETREE DES ECOULEMENTS AUTOUR DES RIDEAUX DE PALPLANCHES | 64 |
| 1. CONTEXTUALISATION DU TRAVAIL DANS LE CADRE MEMOIRE : | 65 |
| 2. PRESENTATION DU LOGICIEL : | 65 |
| 2.1 Consistance : | 65 |
| 2.2 Objectif des principaux modules : | 67 |
| 3. CONSISTANCE DE LA MODELISATION : | 67 |
| 3.1 Géométrie du modèle : | 67 |
| 3.2 Caractéristique de matériau : | 67 |
| 4. RESULTATS DE LA MODELISATION : | 68 |
| 4.1. Influence de la profondeur de la fiche : | 68 |
| 4.1.1. Cas 1 : sans ancrage de la fiche : | 68 |
| 4.1.2. Cas 2 : Ancrage à 1m : | 71 |
| 4.1.3. Cas 3 : Ancrage à 3m : | 74 |
| 4.1.4. Cas 4 : Ancrage à 6m : | 77 |
| 4.1.5. Cas 5 : Ancrage à 9m : | 80 |
| 4.2. Influence de la perméabilité des sols : | 83 |
| 4.3. Influence du gradient de charge amont-aval : | 85 |
| 5. ANALYSE DES RESULTATS : | 89 |
| 5.1. Influence de l'ancrage de la fiche des palplanches : | 89 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.1. Analyse qualitative des écoulements :..... | 95 |
| 5.1.2. Analyse quantitative :..... | 96 |
| 5.2. Influence de perméabilité des sols : | 97 |
| 5.3. Influence des gradients de charges amont aval : | 98 |
| CONCLUSION GENERALE : | 101 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :..... | 103 |

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

| | |
|---|----|
| Fig I.1. Les palplanches à module..... | 5 |
| Fig I.2. Les palplanches plates | 5 |
| Fig I.3. Exemples de l'utilisation de palplanches en acier | 7 |
| Fig I.4. L'acier laminé à chaud est idéal pour les produits où des tolérances rigoureuses ne sont pas requises..... | 8 |
| Fig I.5. L'acier laminé à froid est idéal pour les produits demandant des dimensions exactes et des caractéristiques de surface améliorées..... | 9 |
| Fig I.6. Palplanche de profile U..... | 10 |
| Fig I.7. Palplanche de profile Z..... | 10 |
| Fig I.8. Palplanche de profile Omega | 10 |
| Fig I.9. Rideaux de Coffrage (RC)..... | 10 |
| Fig I.10. Palplanche en U..... | 11 |
| Fig I.11. Palplanche en Z..... | 11 |
| Fig I.12. Palplanche Plates : coupe transversale | 11 |
| Fig I.13. Les palplanches raccords et les palplanches pliées | 12 |
| Fig I.14. Gabions circulaires avec 1 arc | 12 |
| Fig I.15. Gabions circulaires avec 2 arcs..... | 12 |
| Fig I.16. Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35° | 13 |
| Fig I.17. Gabions cloisonnés | 13 |
| Fig I.18. Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120° | 13 |
| Fig I.19. Gabions en palplanches | 13 |
| Fig I.20. Installation du gabarit | 14 |
| Fig I.21. Enclenchement des palplanches..... | 14 |
| Fig I.22. Fonçage Jusqu'à la fermeture du gabion..... | 14 |
| Fig I.23. Les rideaux mixtes tubes | 14 |
| Fig I.24. Les rideaux mixtes caisson | 15 |
| Fig I.25. Les rideaux mixtes HZ/AZ | 15 |
| Fig I.26. Serrure à la jonction de deux palplanches..... | 15 |
| Fig I.27. Différents types de raccordements | 16 |
| Fig I.28. Palplanche de profile U..... | 16 |
| Fig I.29. Assemblage des liernes aux palplanches (cas des profils en U et des profils en Z) | 16 |
| Fig I.30. Schéma des éléments d'assemblage | 16 |
| Fig I.31. Exemples de l'utilisation des butons..... | 17 |
| Fig I.32. schéma montrant les efforts de la poussé et glissement | 18 |
| Fig I.33. schéma explicatif de l'effort de soulèvement | 18 |
| Fig I.34. Les différentes parties du tirant | 18 |
| Fig I.35. Schéma de principe d'un tirant d'ancrage injecté..... | 19 |
| Fig I.36. Types de tirant..... | 20 |
| Fig I.37. Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC) | 21 |
| Fig I.38. Chantier de battage de palplanches..... | 22 |
| Fig I.39. Principe mécanique du vibreur | 23 |
| Fig I.40. Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE) | 23 |
| Fig I.41. Principe de la presse hydraulique..... | 24 |
| Fig I.42. Enclencheur automatique..... | 25 |
| Fig I.43. Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné..... | 26 |
| Fig I.44. Illustration de la mise en œuvre du produit hydrogonflant. | 26 |
| Fig I.45. Etanchement avec la soudure..... | 26 |
| Fig I.46. Etanchement avec combinaison bentonite ciment | 26 |

| | |
|---|----|
| Fig I.47. Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures | 27 |
| Fig I.48. Illustration pour l'installation d'un système de drainage | 27 |
| Fig I.49. Etanchement horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée | 28 |
| Fig I.50. Etanchement d'une fouille avec un radier | 28 |
| Fig I.51. Elément métallique dans l'environnement marin..... | 29 |
| Fig I.52. Principe de la butée et de la poussé | 32 |
| Fig I.53. Mode de rupture d'un mur de palplanches | 33 |
| Fig I.54. Equilibre d'un rideau rigide | 34 |
| Fig I.55. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante (dans chaque cas on a représenté de gauche à droite la distribution des contraintes, la courbe des moments fléchissants et la déformée)..... | 34 |
| Fig I.56. Distributions de pression des terres sur un soutènement simplement encastré en fiche (a), ancré en tête (c) et déformations associées de l'ouvrage (respectivement (b) et (d)).... | 36 |
| Fig I.57. Mécanisme de rupture d'un écran simplement butée..... | 36 |
| Fig I.58. Rideau ancré en tête simplement buté en pied. | 37 |
| Fig I.59. Cas de l'écran en présence d'eau | 38 |
| Fig I.60. Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête | 38 |
| Fig I.61. Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré..... | 39 |
| Fig I.62. Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement d'après Blum (1931), cité par Delattre (2001) | 40 |
| Fig I.63. Distribution idéalisée de la pression des terres..... | 40 |
| Fig I.64. Résolution par la méthode de la poutre équivalente..... | 41 |
| Fig I.65. Schémas d'interaction sol-écrans de soutènement. | 42 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Fig II.1. Valeur de la charge en entrée (point A) et en sortie (point B) d'un écoulement horizontal, et détermination de la perte de charge..... | 45 |
| Fig II.2. Illustration de la mesure par piézomètre..... | 46 |
| Fig II.3. Gradient hydraulique..... | 47 |
| Fig II.4. (a) illustration de la vitesse réelle de l'eau s'écoulant à travers un sol ; (b & c) hypothèse d'un milieu homogène ou les filets d'eau sont rectiligne pour la définition de la vitesse fictive (vitesse de Darcy) | 48 |
| Fig II.5. Trajectoires réelles des filets liquides | 49 |
| Fig II.6. Tube de courant (conduit élémentaire) - Expérience de Darcy -..... | 50 |
| Fig II.7. Zones d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent . (D'après Taylor, 1948.) | 51 |
| Fig II.8. Schéma d'un écoulement en série. (verticale) | 53 |
| Fig II.9. Schéma d'un écoulement en parallèle. (horizontal)..... | 54 |
| Fig II.10. Schématisation d'un réseau d'écoulement | 54 |
| Fig II.11. La trajectoire de l'eau dans le sol..... | 55 |
| Fig II.12. Exemple d'un réseau hydraulique autour d'une palplanche..... | 55 |
| Fig II.13. Un réseau d'écoulement sous un rideau de palplanches..... | 56 |
| Fig II.14. Réseau d'écoulement | 57 |
| Fig II.15. Bilan des forces s'exerçant sur un volume élémentaire du sol..... | 59 |
| Fig II.16. Types d'écoulement permanent derrière un rideau de palplanches : (a) alimentation verticale ;(b) alimentation horizontal [d'après Houy (1986)]..... | 60 |
| Fig II.17. Les forces mises en jeu lors de la boullance..... | 61 |
| Fig II.18. Développement d'un phénomène de boullance sous un rideau de palplanches | 62 |

Fig II.19. Illustration du phénomène de renard dans une retenue d'eau par rideau de palplanche
 (a) Réseau d'écoulement sans perturbation, (b) Erosion interne en début de phénomène, le conduit s'élargit depuis la sortie, (c) renard hydraulique développé, rupture proche. 62

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Fig III.1. Présentation du logiciel GEOSTUDIO 2012..... | 66 |
| Fig III.2. Les modules du logiciel Geostudio 2012..... | 66 |
| Fig III.3. Modèle servant à la modélisation (sans ancrage) | 68 |
| Fig III.4. Modèle de maillage (sans ancrage) | 68 |
| Fig III.5. Réseau d'écoulement (sans ancrage) | 69 |
| Fig III.6. Variations des pressions d'eau interstitielles (sans ancrage)..... | 69 |
| Fig III.7. Variations des gradients hydrauliques (sans ancrage) | 70 |
| Fig III.8. Variations des intensités de vitesses (sans ancrage) | 70 |
| Fig III.9. Variations de débit (sans ancrage)..... | 71 |
| Fig III.10. Modèle de maillage (ancrage à 1m) | 71 |
| Fig III.11. Réseau d'écoulement (ancrage à 1m) | 72 |
| Fig III.12. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 1m)..... | 72 |
| Fig III.13. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 1m)..... | 73 |
| Fig III.14. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 1m) | 73 |
| Fig III.15. Variations de débit (ancrage à 1m)..... | 74 |
| Fig III.16. Modèle de maillage (ancrage à 3m) | 74 |
| Fig III.17. Réseau d'écoulement (ancrage à 3m) | 75 |
| Fig III.18. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 3m)..... | 75 |
| Fig III.19. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 3m)..... | 76 |
| Fig III.20. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 3m) | 76 |
| Fig III.21. Variations de débit (ancrage à 3m)..... | 77 |
| Fig III.22. Modèle de maillage (ancrage à 6m) | 77 |
| Fig III.23. Réseau d'écoulement (ancrage à 6m) | 78 |
| Fig III.24. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 6m)..... | 78 |
| Fig III.25. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 6m)..... | 79 |
| Fig III.26. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 6m) | 79 |
| Fig III.27. Variations de débit (ancrage à 6m)..... | 80 |
| Fig III.28. Modèle de maillage (ancrage à 9m) | 80 |
| Fig III.29. Réseau d'écoulement (ancrage à 9m) | 81 |
| Fig III.30. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 9m)..... | 81 |
| Fig III.31. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 9m)..... | 82 |
| Fig III.32. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 9m) | 82 |
| Fig III.33. Variations de débit (ancrage à 9m)..... | 83 |
| Fig III.34. Modèle géométrique pour une fiche de 9m - $K= 10^{-5}$ m/s | 83 |
| Fig III.35. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9m - $K= 10^{-5}$ m/s | 84 |
| Fig III.36. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9m - $K= 10^{-5}$ m/s | 84 |
| Fig III.37. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9m - $K= 10^{-5}$ m/s | 85 |
| Fig III.38. Modèle géométrique pour une fiche de 9m - $K= 10^{-3}$ m/s, gradient de charge amont-aval..... | 85 |
| Fig III.39. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9m - $K= 10^{-3}$ m/s | 86 |
| Fig III.40. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9m - $K= 10^{-3}$ m/s..... | 86 |
| Fig III.41. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9m - $K= 10^{-3}$ m/s | 87 |
| Fig III.42. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9m - $K= 10^{-5}$ m/s | 87 |

| | |
|---|----|
| Fig III.43. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9m - $K = 10^{-5}$ m/s | 88 |
| Fig III.44. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9m - $K = 10^{-5}$ m/s | 88 |
| Fig III.45. Profil montrant le plan à 0.5m | 89 |
| Fig III.46. Variation de la charge hydraulique à 0.5m | 90 |
| Fig III.47. Variation de la pression interstitielle à 0.5m | 90 |
| Fig III.48. Variation du gradient à 0.5m | 90 |
| Fig III.49. Variation de la charge hydraulique à 1m | 91 |
| Fig III.50. Variation de la pression interstitielle à 1m | 91 |
| Fig III.51. Variation du gradient à 1m | 91 |
| Fig III.52. Variation de la charge hydraulique à 3m | 92 |
| Fig III.53. Variation de la pression interstitielle à 3m | 92 |
| Fig III.54. Variation du gradient à 3m | 92 |
| Fig III.55. Variation de la charge hydraulique à 5m | 93 |
| Fig III.56. Variation de la pression interstitielle à 5m | 93 |
| Fig III.57. Variation du gradient à 5m | 93 |
| Fig III.58. Variation de la charge hydraulique à 8m | 94 |
| Fig III.59. Variation de la pression interstitielle à 8m | 94 |
| Fig III.60. Variation du gradient à 8m | 94 |
| Fig III.61. Combinaison des variations des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques en fonction des profondeurs des fiches | 96 |
| Fig III.62. Variations en profondeur des gradients hydrauliques en fonction des ancrages des fiches comparés aux gradients critiques des sols atténuant | 96 |
| Fig III.63. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s | 97 |
| Fig III.64. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s | 97 |
| Fig III.65. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-3}$ m/s | 98 |
| Fig III.66. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-3}$ m/s | 99 |
| Fig III.67. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-5}$ m/s | 99 |
| Fig III.68. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-5}$ m/s | 99 |

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

| | |
|---|---|
| Tableau I.1. Domaines d'utilisation des palplanches | 6 |
|---|---|

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Tableau II.1. Ordre de grandeur de la perméabilité de différents types des sols..... | 52 |
|--|----|

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Tableau III.1. Propriétés des sols utilisés pour la modélisation. | 67 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tableau III.2. Variation des caractéristiques des écoulement en fonction de la profondeur des fiches de palplanches | 95 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau III.3. Influence de la perméabilité des sols sur les paramètres d'écoulement autour de la palplanche | 98 |
|---|----|

| | |
|---|-----|
| Tableau III.4. Influence de la perméabilité des sols sur les paramètres d'écoulement autour de la palplanche avec gradient de charge amont-aval..... | 100 |
|---|-----|

LISTE DES NOTATIONS

Ka : coefficient de poussée de Rankine

Kp : coefficient de butée de Rankine

γ : le poids volumique du remblai

H : la hauteur du remblai

φ : angle de frottement interne du sol

Fa : force de poussée exercée sur la face amont du rideau

Fp : force de butée sur la face avale

z : altitude du point par rapport à un plan de référence.

u : pression interstitielle

γ_ω : poids volumique de l'eau (10 kN/m³).

v : vitesse de l'eau au point considéré.

g : accélération due à la pesanteur.

v : vitesse fictive

n : porosité du milieu

S : aire totale de la section

S_v : aire occupée par les vides

h_p : hauteur piézométrique

Δh : perte de charge

L : longueur d'écoulement

i : gradient hydraulique

Q : le débit volumique (m³/s) filtrant.

K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s)

S : la surface de la section étudiée (m²)

Re : nombre de Reynolds

d : le diamètre.

ρ : la masse volumique du fluide.

μ : la viscosité dynamique.

K_h : Conductivité hydraulique équivalente horizontal.

K_v : Conductivité hydraulique équivalente vertical.

Nh: Nombre de chutes d'équipotentialité

Nt : Nombre de tubes de courant

H : perte de charge totale

a : distance entre deux lignes de courants,

b : distances entre deux lignes équipotentiellles.

P : force verticale descendante

A : poussée d'Archimède (la force verticale ascendante)

j : force d'écoulement

γ_{sat} : poids Volumique du sol saturé

γ' : poids Volumique déjaugé

i_c : gradient hydraulique critique

LISTE DES ABREVIATIONS

PVC : Polychlorure de vinyle

SA : Sans ancrage

Anc 1m : Ancrage à 1m

Anc 3m : Ancrage à 3m

Anc 6m : Ancrage à 6m

Anc 9m : Ancrage à 9m

icrit : Gradient critique

La mécanique des sols classique a évolué autour de quelques modèles simplifiés qui ne correspondent pas suffisamment aux propriétés de la plupart des sols réels pour effectuer des prédictions utiles et sûres ...puisque nous ne pouvons pas changer le sol pour l'adapter à la mécanique des sols, peut être que nous devrions changer la mécanique des sols pour l'adapter au sol. La théorie qui ne parvient pas à s'adapter à leur comportement est la problématique, et non pas les sols.

D'après Vaughan, P. R. (1989). (Traduit de l'anglais)

Introduction générale :

Largement utilisées dans les applications géotechniques, les palplanches sont des lames métalliques enfoncées verticalement dans le sol, flexibles de par leur faible épaisseur.

Les palplanches sont utilisées pour de nombreuses applications pouvant être soit temporaires, soit permanentes. On pourra par exemple citer : la construction de batardeau, la réalisation de fondations, le renforcement de berges (quais, protection contre l'érosion ou les crues), la stabilisation de pentes, le creusement de tranchées et le soutènement provisoire (fouilles).

L'action de l'eau sur un écran de soutènement en palplanches se manifeste de deux façons : directement par des pressions hydrauliques appliquées sur les faces de l'écran. Ces pressions sont déterminées par l'étude de l'écoulement dans le sol. Indirectement par une modification des forces de pression de terres passive (butée) et active (poussée). L'écoulement augmente les contraintes effectives à l'amont du rideau, donc accroît la poussée, et diminue les contraintes effectives à l'aval, donc réduit la butée. L'écoulement a donc un effet défavorable sur la stabilité du rideau.

Le développement d'un renard hydraulique est conditionné par le gradient hydraulique, de la différence de niveau Δh et de l'évolution des pressions interstitielles. Ainsi, lorsque l'écoulement de l'eau autour de la structure est long, l'eau ne développe pas la force pour pouvoir emporter des grains du sol. De même, si les grains du sol ont une grande cohésion (comme pour l'argile) il n'y a pas de transport de grain. Alors que dans un massif sableux qui présente une grande différence de niveau d'eau amont-aval et une faible longueur du cheminement hydraulique la probabilité du développement d'un renard hydraulique est importante.

Dans un écoulement autour d'une fiche de palplanche, la composante verticale ascendante de la force d'écoulement génère un gradient hydraulique i vertical ascendant. Cette composante verticale de la force d'écoulement s'oppose directement à la pesanteur avec un gradient suffisamment élevé, les grains sont entraînés par l'eau : c'est le phénomène de boullance.

Les aspects conceptuels liés à la réalisation des rideaux de palplanches doivent garantir une sécurité suffisante en maîtrisant les paramètres d'écoulement, notamment en matière de charges hydrauliques, de pressions interstitielles et de gradients hydrauliques.

Tous ces aspects méritent une analyse approfondie tant sur le plan sécuritaire que sur le plan économique.

C'est autour de cette thématique que le présent travail est engagé par l'intermédiaire d'une analyse paramétrée et comparative intégrant quelques critères conceptuels (profondeur de la fiche), les caractéristiques des sols atténuant aux rideaux de palplanche (perméabilité) ainsi que les conditions d'écoulement relatives au gradient des charges sur les deux faces amont et aval du rideau.

Le mémoire a débuté par une contribution bibliographique qui a permis la compréhension et la maîtrise de l'ensemble des aspects liés à la thématique du travail et qui a ciblé deux volets importants relatifs aux modes conceptuels et aux écoulements autour des rideaux de palplanches.

Le recours à la modélisation est souvent une action incontournable pour l'évaluation des paramètres liés aux écoulements autour de ce type de structure. Ainsi, et en relation avec les objectifs du mémoire, une série de modélisations numériques guidées par le code de calcul Geostudio, a été engagée avec une analyse paramétrée et comparative en fonction des variations des profondeurs des fiches, des gradients de charges amont aval et de la perméabilité des sols dans lesquels ces palplanches sont battues.

Sur le plan de la structure du mémoire, et afin d'assurer, à la fois, une cohérence des différentes sections du mémoire et une adéquation avec ses objectifs assainis, la rédaction a suivi, chronologiquement, les chapitres ci-dessous:

Chapitre 1 : Aspects conceptuels sur les palplanches.

Chapitre 2 : Les écoulements autour des rideaux de palplanches.

Chapitre 3 : Analyse paramétrée des écoulements autour des rideaux de palplanches.

Chapitre I : Aspects conceptuels sur les palplanches

1. Introduction :

La nécessité de chercher de nouvelles techniques de réalisation des ouvrages et l'augmentation du taux des dégâts des structures sous l'influence de plusieurs paramètres ont poussé les ingénieurs et les chercheurs à utiliser des modes efficaces, utiles et économiques de construction, tels que les palplanches, qui ont trouvé une vaste utilisation dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

Les rideaux de palplanche sont largement utilisés dans le domaine du génie civil et des travaux publics (systèmes d'excavation, les blindages, les barrages, la stabilisation des pentes, les structures riveraines...)

Bien qu'il existe plusieurs autres matériaux (tels que le bois, le béton armé ... Etc.) qui sont utilisés pour les palplanches, les palplanches en acier sont les plus courantes. Les murs de palplanches en acier sont classés comme des murs souples et ont une rigidité relativement plus faible par rapport à d'autres murs, tels que les murs en suspension. Ces structures peuvent être influencées par le milieu environnant (l'eau de mer, environnement, ou sols agressifs).

2. Historique :

Depuis l'empire Romain, puis pendant la Renaissance jusqu'au début du XXème siècle, les palplanches en bois furent utilisées pour former des enceintes ou batardeaux à l'intérieur desquels on épuisait l'eau ou bien on coulait du mortier pour poser les fondations d'un ouvrage en milieu humide (pile de pont, radier d'écluse ou de barrage, etc.). Les serrures étaient étanchées avec de l'étope ou de la bourre de laine ou de lin.

Les palplanches en bois étaient battues avec une sonnette ou un mouton mus par un contrepoids.

Ensuite, des années 1910 jusqu'aux 1960 on utilisa des palplanches en béton armé. Il fut utilisé pour concevoir des palplanches plus résistantes face à flexion imposée par la poussée des terres. Les palplanches en acier ont également fait leur apparition dès les années 1910. En raison du coût élevé du métal, elles ne devinrent compétitives seulement depuis les années 1960.

Pendant les années 1960, le coût du fer diminua de manière importante ce qui fit croître de manière exponentielle l'utilisation de l'acier dans les méthodes de soutènement, en raison de leur solidité, élasticité, facilité et rapidité de mise en place .

La palplanche en PVC à base de résine de plastique est apparue au cours des années 2000 en complément de la palplanche acier dans certains domaines mais aussi comme alternative à la palplanche bois qui contribue à la déforestation et à la pollution des sols (à cause des traitements). De plus, elle apporte une solution à la corrosion des palplanches acier tout en conservant un domaine d'utilisation vaste et une facilité de mise en œuvre dans les zones de faibles profondeurs.

La palplanche en fibre de verre a suivi celle du PVC pour les mêmes raisons mais en apportant une résistance bien plus importante que celle du PVC. (1)

3. Définition :

Les pieux sont de longues sections structurales avec un système de verrouillage vertical et battues dans le sol qui créent un mur continu. Les murs sont souvent utilisés pour retenir le sol ou l'eau. La palplanche transfère la pression du côté élevé du mur au sol devant le mur.

Les palplanches sont utilisées pour diverses applications, à la fois permanentes et temporaires. Les pieux temporaires fournissent l'accès sûr pour la construction et sont alors enlevés ; cependant, ils sont parfois laissés en place. Les pieux permanents demeurent dans le sol et servent de structures de soutènement permanentes telles que le renforcement des digues, le maintien des murs ... etc.

On distingue :

- Des palplanches à fort module d'inertie.
- Des palplanches plates à faible inertie.

Les profils les plus couramment employés sont ceux en U et en Z, car ils présentent une grande inertie et sont donc adaptés aux applications de soutènement.

Les palplanches plates sont un profil à part présentant une faible inertie. Elles sont donc utilisées dans les cas où le mur est soumis à la traction. Pour un mur travaillant en flexion, on leur préfère des profils de plus forte inertie (en U par exemple). (2)

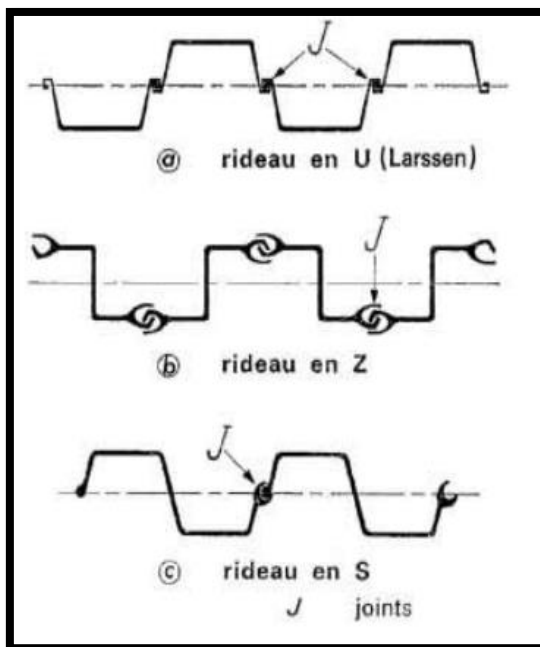


Fig I.1. Les palplanches à module (4)

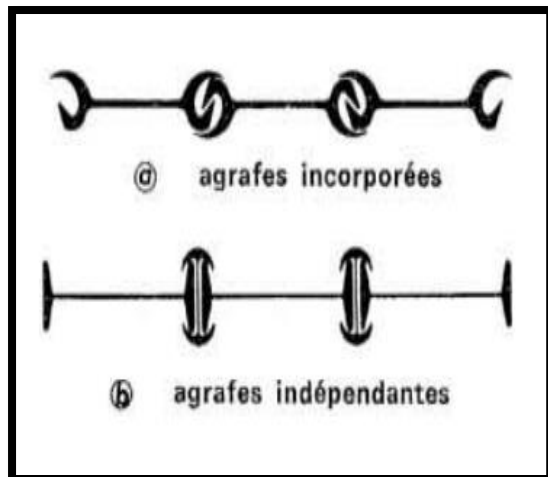


Fig I.2. Les palplanches plates (4)

4. Typologie des palplanches :

Presque tous les matériaux utilisés dans la construction peuvent être utilisés pour réaliser des palplanches (Palplanche en bois, palplanche en béton armé, palplanche en acier, palplanche en PVC, palplanche en fibre de verre).

Le Tableau 1 permet de comprendre Les types de terrains, les domaines d'utilisation et les avantages des différents matériaux des palplanches.

Tableau I.1. Domaines d'utilisation des palplanches (1)

| Types | Bois | Béton armé | Acier | PVC | Fibre de verre |
|-------------------------------|--|--|---|---|---|
| Terrains | Sols pulvérulents et argileux. | Sols pulvérulents et argileux. | Schiste, calcaire, Argiles, sols pulvérulents. | Schiste, calcaire, Argiles, sols pulvérulents. | Schiste, calcaire, Argiles, sols pulvérulents. |
| Domaines d'utilisation | Batardeau, Quai d'accostage. | Employé avant l'utilisation des palplanches en acier. | Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Tous types d'ouvrages (batardeau, blindage, murs soutènements,) | Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Principalement quai d'accostage et protection de berge. | Réalisation d'ouvrage en site aquatique ou en présence d'eau. Principalement quai d'accostage et protection de berge. |
| Profils | Trapézoïdale, Rectangulaire | Rectangulaire | U, Z, plat, Mixte, Caisson, HZ | U, Z, plat. | U, Z, plat. |
| Avantages | Économique, Esthétique, Élasticité, Réparation. | Résistance | Solidité, Durabilité, Élasticité, Facilité, Rapidité de mise en œuvre, 100% recyclable. | Très bonne résistance, Esthétique, Durabilité, 100% recyclable, Résistance à l'environnement. | Haute résistance, Esthétique, Durabilité, 100% recyclable, Résistance à l'environnement. |
| Inconvénients | Durabilité, Résistance à l'environnement, Résistance | Fissuration lors du battage, Faible étanchéité, Poids important, Non réutilisable. | Coût, Corrosion, Nuisances sonores à la mise en place. | Fluctuation du cours du PVC → augmentation des coûts de production, Nuisances sonores à la mise en place. | Coût, Nuisances sonores à la mise en place. |
| Longévité | Trentaine d'années sans traitement | 50 ans | De 50 à 100 ans en fonction de l'environnement et du traitement anticorrosion. | + /- 50 ans | +/- 70 ans |

5. Palplanche métallique :

Les palplanches en bois ou en béton sont devenues d'utilisation très rare. Les palplanches sont aujourd'hui généralement en acier (3), PVC et fibre de verre. Mais le plus courant l'acier.

5.1 Définition :

L'acier est la forme la plus courante de palplanches car il a une bonne résistance aux fortes sollicitations d'entraînement, une excellente étanchéité à l'eau et peut être augmenté en longueur par soudage ou boulonnage. Ils sont reliés par emboîtement.

Les palplanches sont des profilés métalliques qui peuvent être assemblés pour former un mur de soutènement appelé rideau de palplanche ou un écran imperméable.

Les palplanches métalliques sont particulièrement bien adaptées pour la réalisation d'ouvrages de soutènement et d'étanchement en site aquatique et d'une manière plus générale, en présence d'eau dans la nappe phréatique. Elles sont très couramment utilisées aujourd'hui encore pour la réalisation d'ouvrages provisoires tels que batardeaux et blindages de fouilles sous la nappe, et d'ouvrages définitifs tels que murs de quais maritimes ou fluviaux, soutènements de rives et protections de berges. (4)

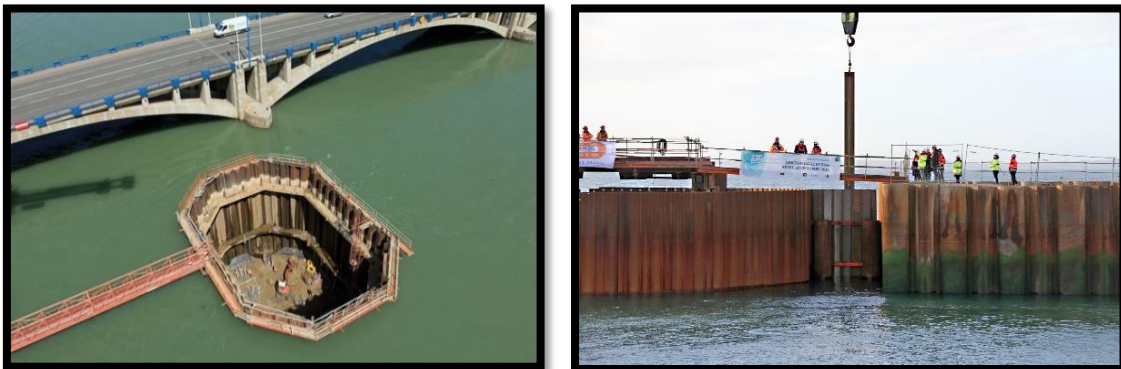


Fig I.3. Exemples de l'utilisation de palplanches en acier

5.2 Caractéristiques :

Le poids au mètre linéaire varie selon le profil, de 20 à plus de 120 Kg et l'épaisseur de 5 à plus de 20 mm (chiffres indicatifs). La longueur livrée varie de 1 à plus de 30 mètres. (5)

5.3 Types de palplanches métalliques :

Les principaux types de palplanches métalliques à module en forme de U, Z, caisson et de palplanches plates. Les types de palplanches métalliques sont obtenues par laminage à chaud ou profilage à froid.

5.3.1 La différence entre l'acier laminé à chaud et l'acier laminé à froid :

a) Acier laminé à chaud :

L'acier laminé à chaud est un acier qui a été pressé à de très hautes températures au-delà de 1.700°F, ce qui est au-dessus de la température de re-cristallisation pour la plupart des aciers. Ceci rend l'acier plus facile à mettre en forme, et il en résulte des produits plus faciles à travailler.

Il requiert généralement moins de traitement que l'acier laminé à froid, ce qui le rend beaucoup moins cher.

L'acier laminé à chaud est idéal quand les tolérances dimensionnelles ne sont pas aussi importantes que la force globale du matériel, et où la finition de surface n'est pas une préoccupation majeure. Quand la finition de surface est un souci, la mise à l'échelle peut se faire par ponçage, sablage ou décapage par bain d'acide. Une fois la mise à l'échelle faite, diverses brosses ou finitions miroir peuvent être aussi appliquées. L'acier décalaminé offre aussi une meilleure surface pour la peinture et autres revêtements de surface. (6)



Fig I.4. L'acier laminé à chaud est idéal pour les produits où des tolérances rigoureuses ne sont pas requises. (6)

b) Acier laminé à froid :

L'acier laminé à froid est principalement un acier laminé à chaud qui a subi d'autres traitements. Une fois que l'acier laminé à chaud a refroidi, il est ensuite re-laminé à température ambiante pour atteindre les dimensions exactes et une meilleure qualité de surface.

En termes de caractéristiques physiques, les aciers travaillés à froid sont généralement plus durs et plus résistants que les aciers standards laminés à chaud. Comme le métal est formé à des températures plus basses, la dureté de l'acier, la résistance à la tension de rupture, et la résistance à la déformation sont tous augmentés en raison du durcissement.

Il n'est pas surprenant que l'acier laminé à froid est souvent utilisé pour des applications plus précises techniquement, ou quand l'esthétique est importante. Mais à cause du traitement additionnel pour les produits finis à froid, ils reviennent à un prix plus élevé. (6)



Fig I.5. L'acier laminé à froid est idéal pour les produits demandant des dimensions exactes et des caractéristiques de surface améliorées. (6)

Les palplanches de tôle laminées à froid offrent moins de résistance à l'eau, mais peuvent être plus rentables et disponibles. Les palplanches de tôle laminées à chaud sont plus traditionnelles et offrent une meilleure résistance à l'eau. L'assemblage d'étanchéité peut être ajouté à toutes les formes de palplanches afin d'en réduire la perméabilité. (6)

5.3.2 Les différents types de profilés :

Les différents types de palplanches se distinguent par leur procédé de fabrication et leurs principales caractéristiques de forme :

- Palplanches laminées à chaud de forme U, Z.
- Palplanches laminées à chaud à âme plate,
- Palplanches profilées à froid de forme U, Z et de profil RC (rideau de coffrage).

Les profilés en Z et en U sont utilisés pour supporter des charges de flexion. Les profilés plats sont utilisés pour supporter des charges de traction. Les profilés en Z et en U peuvent être employés indépendamment ou combinés avec des pieux tubulaires ou des pieux HP pour les cloisons combinées.

- Palplanches Profilées à froid :

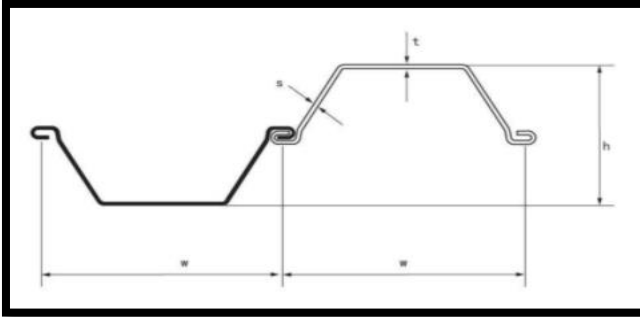


Fig I.6. Palplanche de profile U (7)

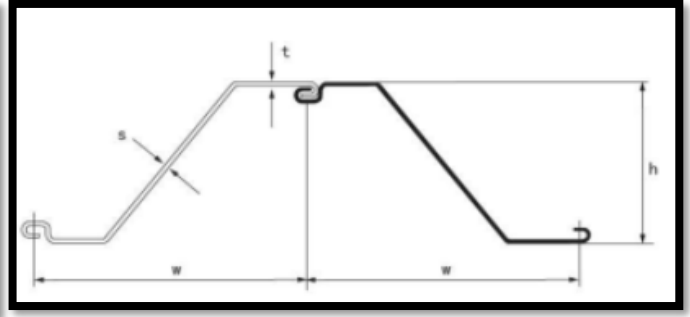


Fig I.7. Palplanche de profile Z (7)

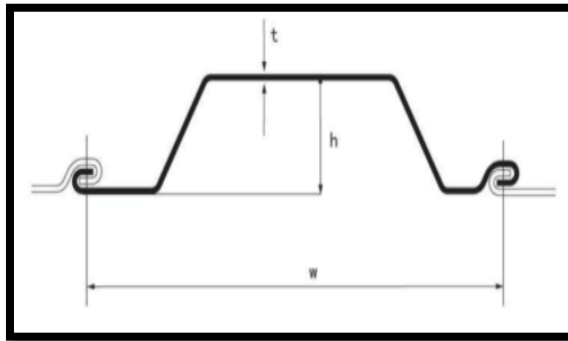


Fig I.8. Palplanche de profile Omega (7)

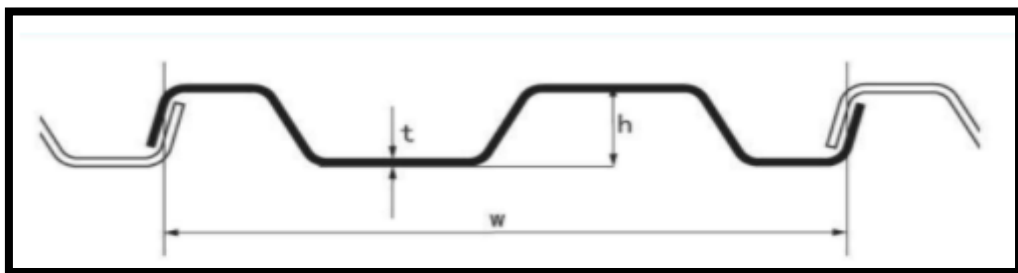


Fig I.9. Rideaux de Coffrage (RC) (7)

- Palplanches Profilées à chaud :

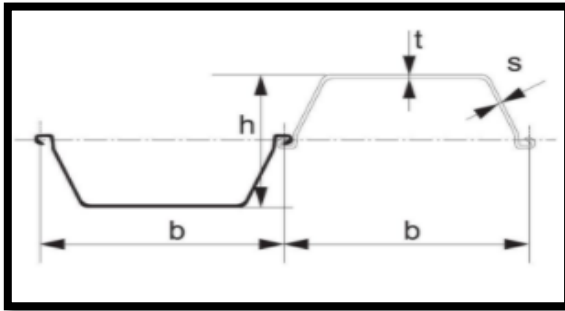


Fig I.10. Palplanche en U (7)

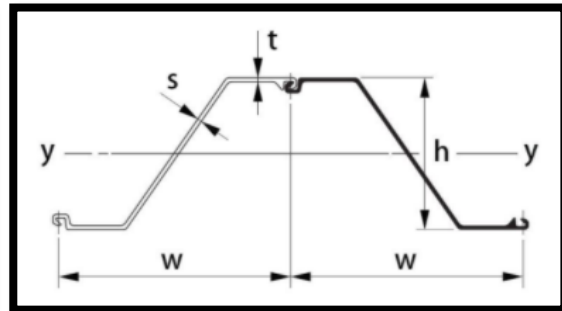


Fig I.11. Palplanche en Z (7)

Les palplanches utilisées pour la construction des cellules de gabions sont des palplanches plates. Elles se caractérisent par une très grande résistance au dégrafage alors que leur module de résistance à la flexion est faible à cause de leur profil mince. Pour obtenir une forte résistance au dégrafage, on utilise des serrures spéciales. (8)

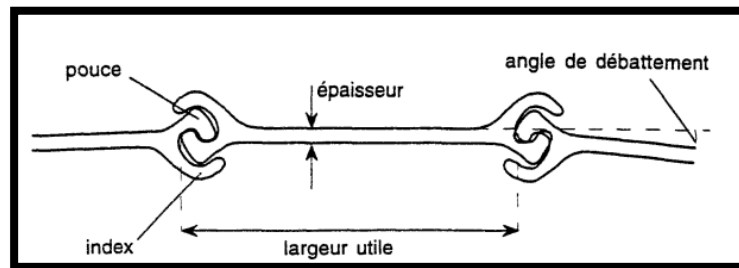


Fig I.12. Palplanche Plates : coupe transversale

a) Palplanches plates AS 500 :

Les palplanches plates sont conçues pour former des structures cylindriques – généralement fermées – retenant un remblai de sol. La stabilité des constructions ainsi construites est garantie par le poids du massif interne du sol. Les palplanches plates sont surtout utilisées dans les projets où les couches de roches sont proches du niveau du sol, où la profondeur d'excavation est très importante ou lorsque l'ancrage serait difficile ou même impossible.

Les structures de palplanches plates sont réalisées sous forme de gabion circulaire ou de parois cloisonnées selon les caractéristiques du site ou les exigences particulières du projet.

Les efforts qui se développent dans ces profils de palplanches sont essentiellement des forces de traction horizontales nécessitant des serrures spécialement conçues pour la résistance au dégrafage, correspondant à la force horizontale dans l'âme de la palplanche.

Les applications principales des palplanches plates sont les suivantes :

- Batardeaux/cales sèches très profonds (temporaires ou permanents)
- Murs de quai en eau profonde
- Brise-lames (maritimes) (9)

- Utilisation des gabions cellulaires :

Les gabions sont utilisés dans le cas de travaux en milieu maritime ou fluvial. Ils servent essentiellement comme moyen de soutènement pour de l'eau, des terres ou les deux conjointement, ils peuvent servir d'ouvrages provisoires (c'était là leur utilisation initiale) ou permanents. Leur utilisation se justifie dans le cas de profondeur d'eau ou de dénivellation importante. (8)

- Palplanches raccords et palplanche pliées :

Nous pouvons fournir les palplanches raccords nécessaires à l'assemblage des gabions entre eux. Lorsque l'angle de débattement des gabions dépasse $4,5^\circ$ ($4,0^\circ$ si $L > 20$ m), il est possible d'employer des palplanches pliées pour réaliser des ouvrages de faible rayon. Le pliage est réalisé en usine. (10)

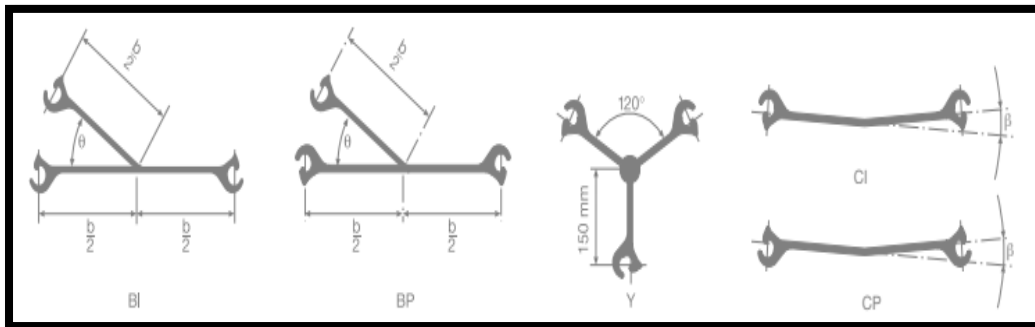


Fig I.13. Les palplanches raccords et les palplanches pliées (10)

Types des gabions :

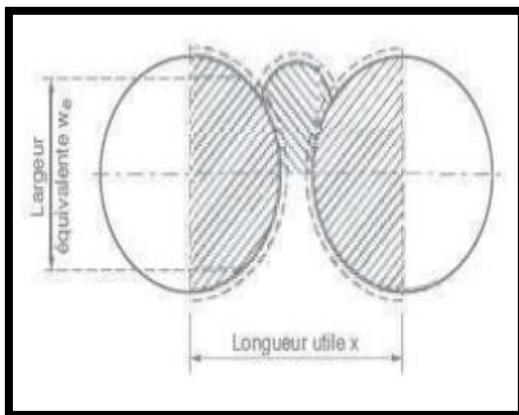


Fig I.14. Gabions circulaires avec 1 arc (10)

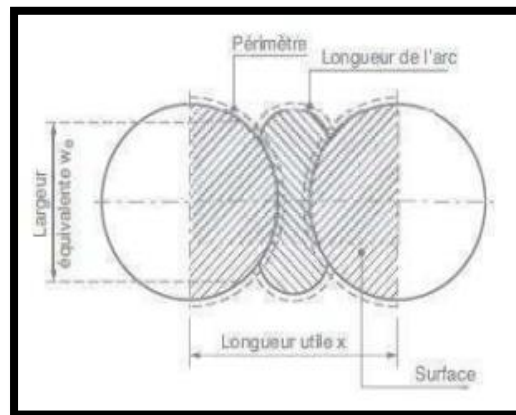


Fig I.15. Gabions circulaires avec 2 arcs (10)

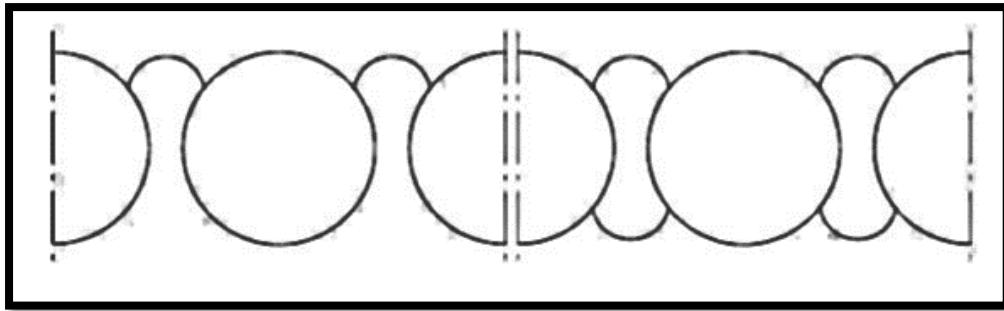


Fig I.16. Gabions circulaires avec des palplanches raccords à 35° (10)

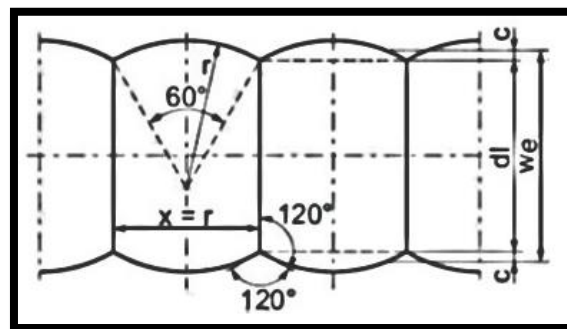


Fig I.17. Gabions cloisonnés (10)

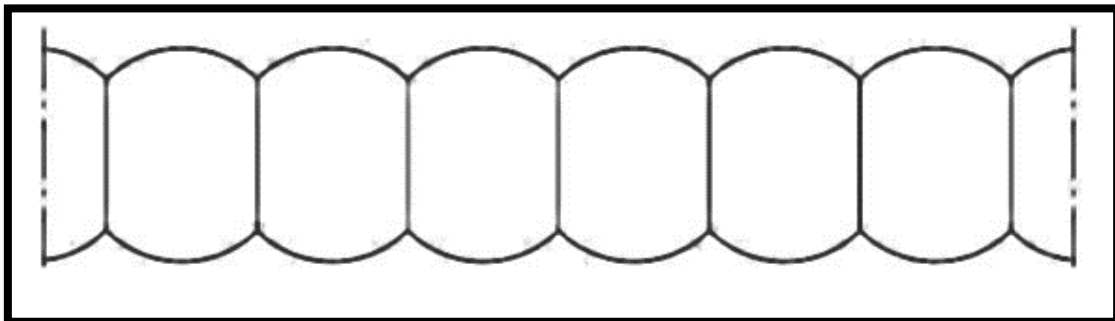


Fig I.18. Gabions cloisonnés avec des palplanches raccords à 120° (10)

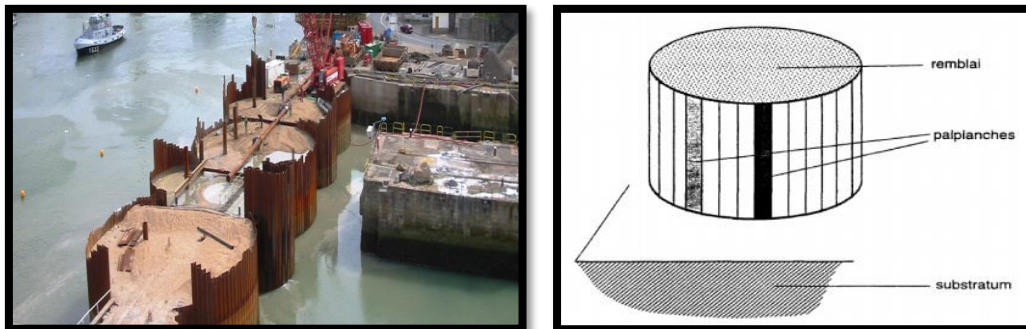


Fig I.19. Gabions en palplanches (10)

- Réalisation des gabions circulaires : (10)



Fig I.20. Installation du gabarit Fig I.21. Enclenchement des palplanches Fig I.22. Fonçage Jusqu'à la Fermeture du gabion

b) Rideaux mixtes :

Un rideau mixte est un système combiné qui se compose d'un pieu principal et d'une palplanche intermédiaire. L'utilisation de différentes combinaisons de rideaux mixtes permet de supporter des charges très élevées. En raison de l'effet d'arc, les pieux principaux supportent toutes les charges, et les palplanches intermédiaires n'ont qu'une fonction de retenue de la terre et de transfert de charge, et peuvent être plus courtes que les pieux principaux. (9)

Les combinés sont particulièrement utilisés dans les fouilles profondes et les environnements marins lourds dans lesquels une forte résistance et une longévité sont des éléments clés. (7)

• Les rideaux mixtes tubes ou caisson :

L'assemblage de deux profilés de palplanches ou l'assemblage de palplanches et de tubes, donne un rideau mixte qui résiste à la haute pression donc aux hautes profondeurs. Les tubes ou caissons constituent les éléments principaux qui reprennent les efforts horizontaux mais aussi les charges verticales de structure. Les palplanches intercalaires permettent de transmettre les efforts horizontaux de la poussée des terres et hydrostatique aux tubes ou caissons. (1)

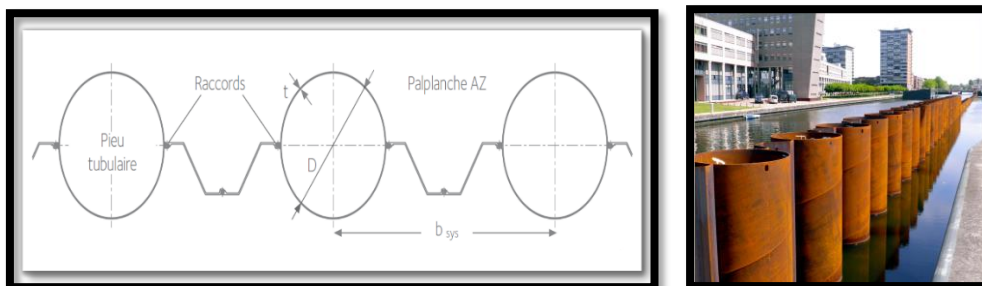


Fig I.23. Les rideaux mixtes tubes

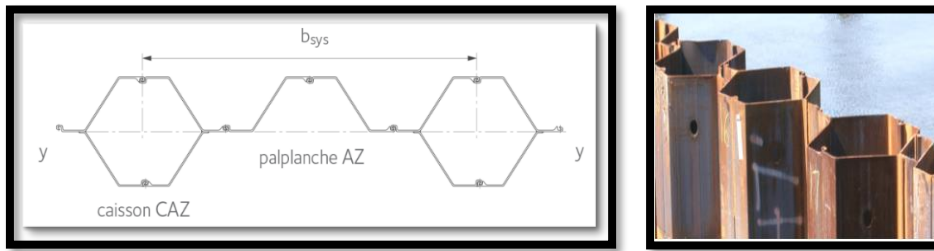


Fig I.24. Les rideaux mixtes caisson

• Les rideaux mixtes HZ/AZ:

L'assemblage de profilés en Z et d'HEB forme un rideau mixte. Les profilés en H sont utilisés comme éléments porteurs et les palplanches intermédiaires AZ utilisées comme éléments intercalaires. Ce type d'assemblage permet non seulement de reprendre les efforts de poussée des terres et hydrostatiques, mais aussi de reprendre une charge verticale importante. (1)

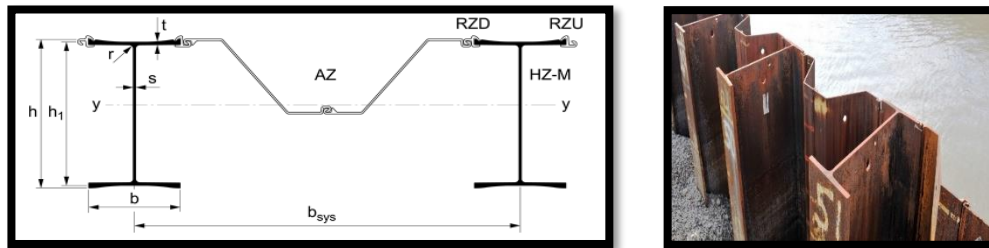


Fig I.25. Les rideaux mixtes HZ/AZ

5.4 Les serrures :

Des serrures permettent d'assembler des rideaux de palplanches continus en les fixant les uns aux autres. Les premiers profilés possédant de telles serrures ont été utilisés aux Etats Unis vers 1910. (11) Les serrures ont initialement été réalisées en rapportant des éléments secondaires aux profilés principaux, la liaison étant obtenue par rivetage. (12)



Fig I.26. Serrure à la jonction de deux palplanches

5.5 Raccords :

Les palplanches sont accrochées les unes aux autres grâce à des rails et sont fermées dans les angles à l'aide de clefs de fermetures. Il existe principalement quatre clefs de fermeture qui s'utilisent en fonction du degré de l'angle ou de la position des palplanches pour la fermeture à savoir, Dos/Dos, Ventre/Dos ou Ventre/ventre. (1)

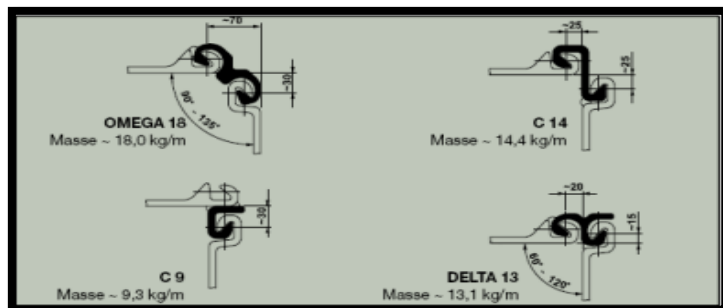


Fig I.27. Différents types de raccordements (1)

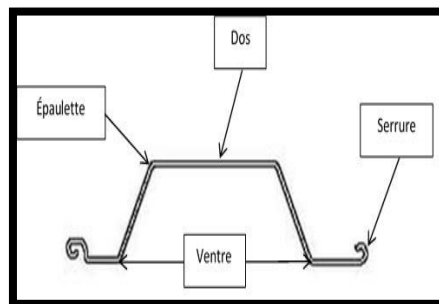


Fig I.28. Palplanche de profil U

5.6 Les éléments d'assemblage (rigidifications) :

5.6.1. Liernes :

Les liernes sont disposés régulièrement sur la hauteur de l'écran pour assurer la rigidité longitudinale, auquel elles sont souvent fixées par boulonnage ainsi disposées au droit des niveaux d'ancrage et servent d'appui aux têtes d'ancrage. (13)

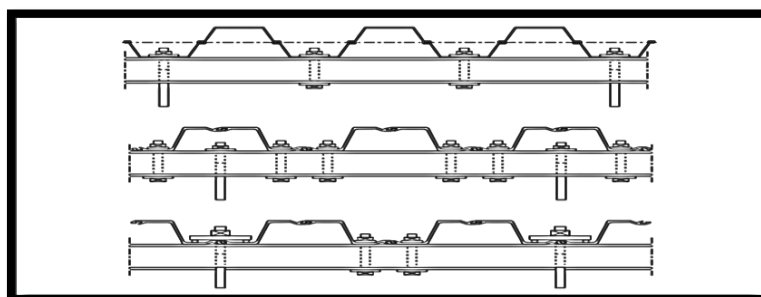


Fig I.29. Assemblage des liernes aux palplanches (cas des profils en U et des profils en Z) (13)

5.6.2. Poutre de couronnement :

Cette poutre assure plusieurs fonctions : Un élément de rigidification longitudinale de l'ouvrage ou chaînage. Transmettre des efforts au rideau de palplanches. Elle sert ainsi d'appui pour d'éventuel butons et constituer un élément architectural de l'ouvrage. (13)

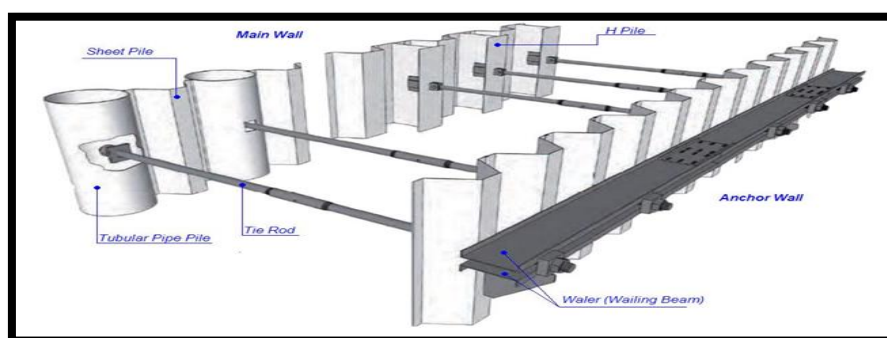


Fig I.30. Schéma des éléments d'assemblage

5.6.3. Les appuis :

Les appuis de mur sont constitués par le sol en fiche et par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de mur. L'appui de la fiche provient de la capacité du sol à se mobiliser contre les déplacements du l'écran, mobilisation d'une butée dans le cas du mouvement de translation de l'écran, mobilisation d'une butée et contre butée, et donc d'un encastrement dans le cas d'une rotation en fiche de l'écran. Les caractéristiques des sols de fondation, ainsi que la rigidité de l'écran et la dimension de sa fiche, déterminent le fonctionnement de cet appui en fiche. (13)

a) Les butons :

Ce système est surtout utilisé pour le cas des tranchées. Un buton ou étréssillon est un élément métallique externe permettant la reprise des forces de poussées c.-à-d. en disposant deux écrans face à face ou sur le côté. Le recours aux butons peut être réalisé sur plusieurs lits en l'adoptant comme solution provisoire ou définitive pour maintenir les rideaux. En solution provisoire, il permet de maintenir l'écran de soutènement jusqu'à la réalisation du plancher qui remplacera cet appui. En solution définitive, le buton est maintenu aussi pendant la mise en service de l'ouvrage. (14)



Fig I.31. Exemples de l'utilisation des butons

b) Les tirants d'ancrage :

Les tirants d'ancrage sont utilisés pour des efforts de traction. Ils transmettent les forces d'une structure (mur, fondation, ...) au terrain dans lequel ils sont scellés. Ils sont généralement précontraints. (15)

Deux principes de fonctionnement :

- Soutènement :

Le tirant permet de stabiliser un mur de soutènement en reportant les efforts induits par la poussée naturelle du terrain et les charges d'exploitation au-delà du cercle de glissement. Les efforts sont transmis au terrain par la longueur scellée. Le tirant est généralement précontraint afin de contrôler le déplacement de la paroi lors des différentes phases de construction. (15)

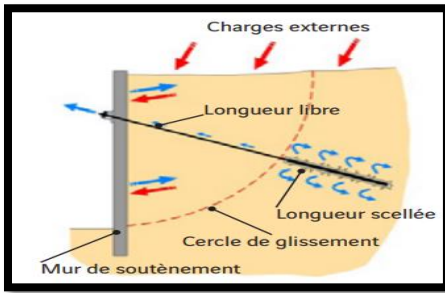


Fig I.32. schéma montrant les efforts de la poussée et glissement

Ancrage de structure :

Le tirant a pour but de générer un effort sur une structure, soit pour compenser un effort de soulèvement, soit pour comprimer la fondation sur le terrain. Il doit mobiliser un volume de terrain ayant un poids suffisant pour compenser l'effort souhaité. La longueur scellée est prévue pour transmettre les efforts au terrain, et la longueur libre est définie en fonction du volume de terrain recherché. La force de précontrainte revêt une importance capitale pour limiter ou supprimer le mouvement vertical. Dans le cas d'efforts répétés, elle supprime les risques de fatigue sur le scellement. (15)

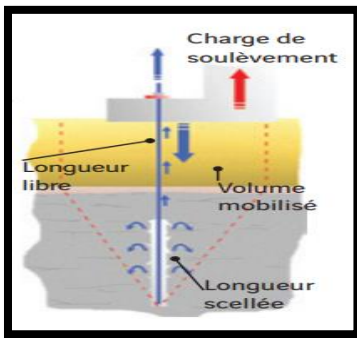


Fig I.33. schéma explicatif de l'effort de soulèvement

Force de précontrainte

Elle peut être inférieure à la force de service du tirant. Elle est définie en fonction des déplacements acceptables de la structure.

Longueur libre

Elle est comprise entre la tête du tirant et le début de la longueur scellée. Elle permet l'allongement du câble lors de sa mise en tension et la transmission des forces à la longueur scellée.

Tête d'ancrage

C'est elle seule qui assure la liaison mécanique entre l'armature du tirant et la structure. Sa résistance et sa pérennité doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Longueur scellée

Elle transmet l'effort au sol, à la profondeur définie par l'auteur du projet. La transmission de l'effort s'effectue par le scellement, réalisé par injection de coulis de ciment dans le terrain.

Fig I.34. Les différentes parties du tirant (15)

on distingue :

- Les tirants d'ancrage actifs ou précontraints :

Les tirants d'ancrage actifs, ou tirants précontraints, sont constitués d'armatures en acier de précontrainte (barres, fils ou câbles) mises en place dans un forage, et dont l'une des extrémités est scellée dans le sol à l'aide d'un coulis, l'autre étant bloquée contre l'ouvrage à ancrer après mise en tension.

- Les tirants passifs :

Dans le cas général, les tirants passifs sont constitués du tirant proprement dit, qui peut être une barre d'acier, un profilé métallique, etc., travaillant la traction et qui est attaché à l'une de ses extrémités à la structure. La reprise des efforts est faite soit par un dispositif d'ancrage (rideau de palplanches métalliques, plaque en béton armé, dalles de frottement, etc.), soit par frottement entre le sol et le profilé qui est généralement battu dans le sol. L'amélioration de ce frottement peut être obtenue par une injection d'un mortier sous très faible pression. (16)

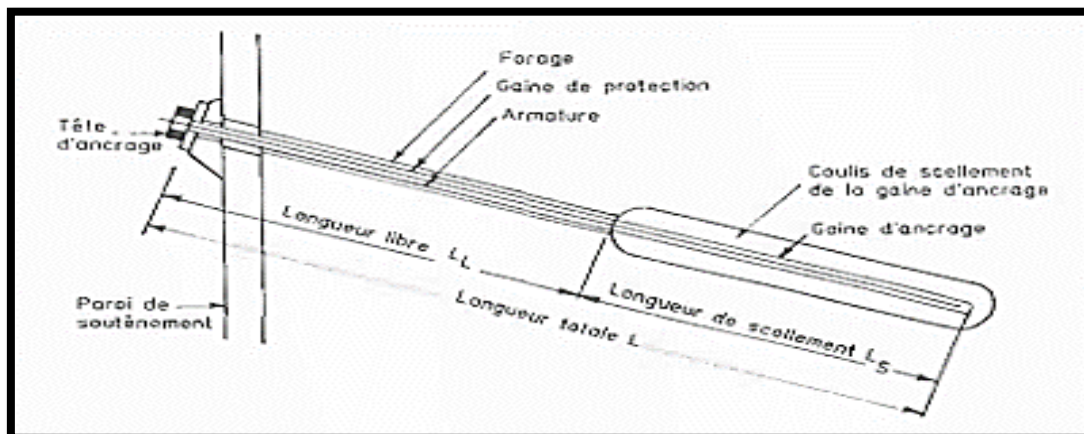
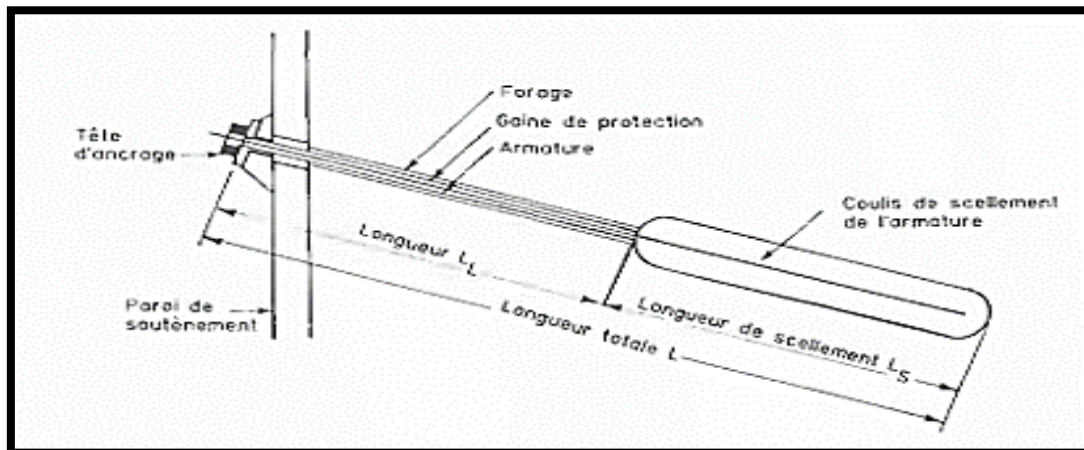


Fig I.35. Schéma de principe d'un tirant d'ancrage injecté. (16)

Les tirants passifs sont simplement fixés sur le rideau au moment de leur installation et mis en traction par la force de poussée du massif de sol. Selon la technique d'installation dans le sol, trois types de tirants passifs sont distingués (d'après Houy 1986) : (32)

- Les tirants fixés sur un corps d'ancrage (autre rideau de palplanches, plaque en béton armé, bloc de béton, dalle drainant...etc.). ce sont généralement des barres rondes en acier ;
- Les tirants enfoncés dans le sol par battage. La résistance est obtenue par le frottement latéral, ou par l'intermédiaire d'une gaine de mortier réalisé par injection ;
- Les tirants mis en place dans un trou réalisé au préalable par battage ou forage et scellés dans le sol par un coulis de ciment.

La figure montre quelques types de tirants passifs qui se distinguent essentiellement par leur mise en œuvre et leur domaine d'application :

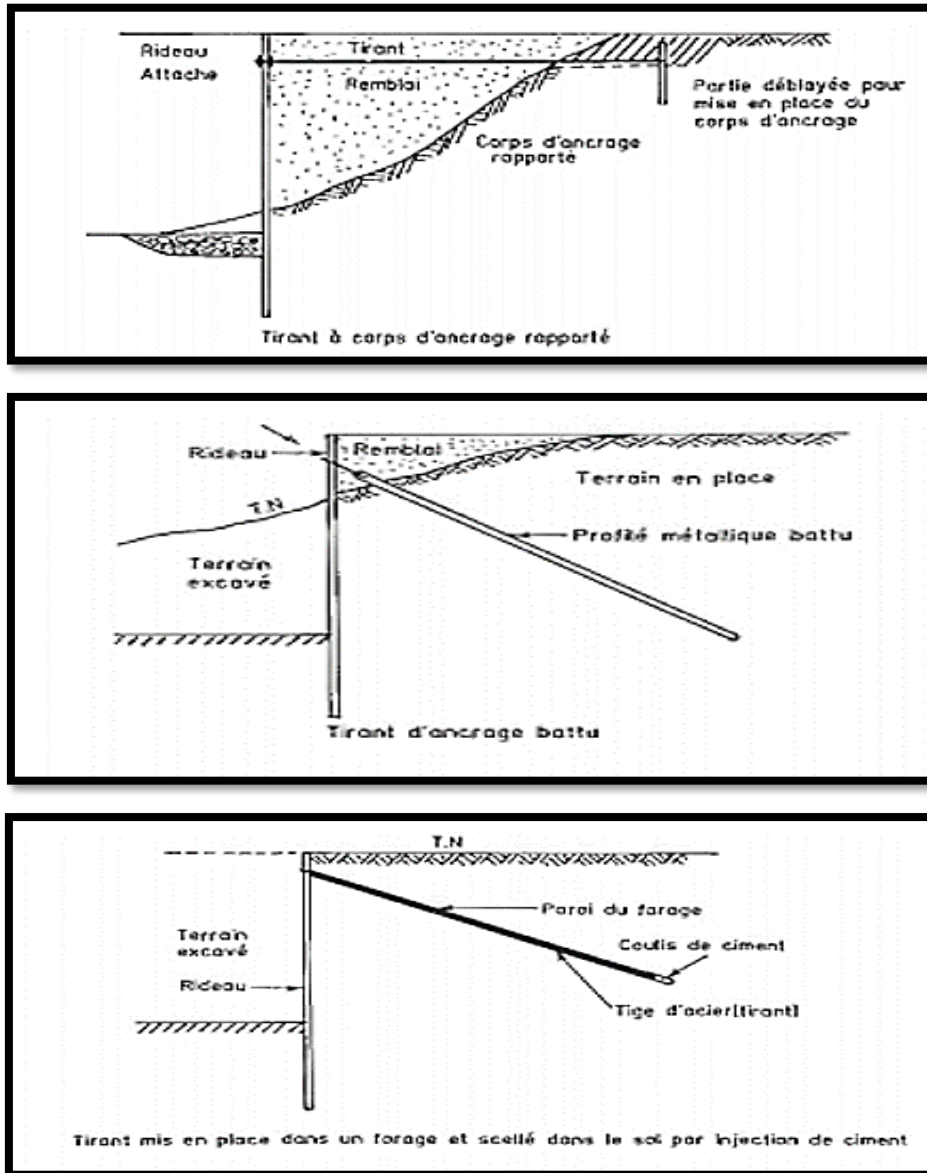


Fig I.36. Types de tirants (16)

5.7 Mise en œuvre :

La mise en œuvre des palplanches verticalement dans le sol se fait généralement par battage, vibrage ou par presse hydraulique.

5.7.1 Battage :

a) Principe du marteau hydraulique :

Pour les marteaux hydrauliques, un cycle d'opération débute par la levée de la masse frappante monobloc. La soupape P positionnée sur le circuit de pression est ouverte et la soupape R placée dans le circuit de retour est fermée. Une fois que la course de levage prééglée, en fonction de l'énergie souhaitée, est atteinte alors le fonctionnement des soupapes s'inverse. La masse est alors libérée. Après l'impact, le cycle se répète automatiquement.

La masse frappante est guidée en haut et en bas. Grâce au gaz pressurisé, le marteau peut fonctionner sous toutes les inclinaisons, même horizontalement. A chaque impact, la masse frappante percute une enclume. Elle est la pièce maîtresse, pour le transfert de l'énergie, du casque de battage qui a différentes formes en fonction du type de palplanche à mettre en fiche.

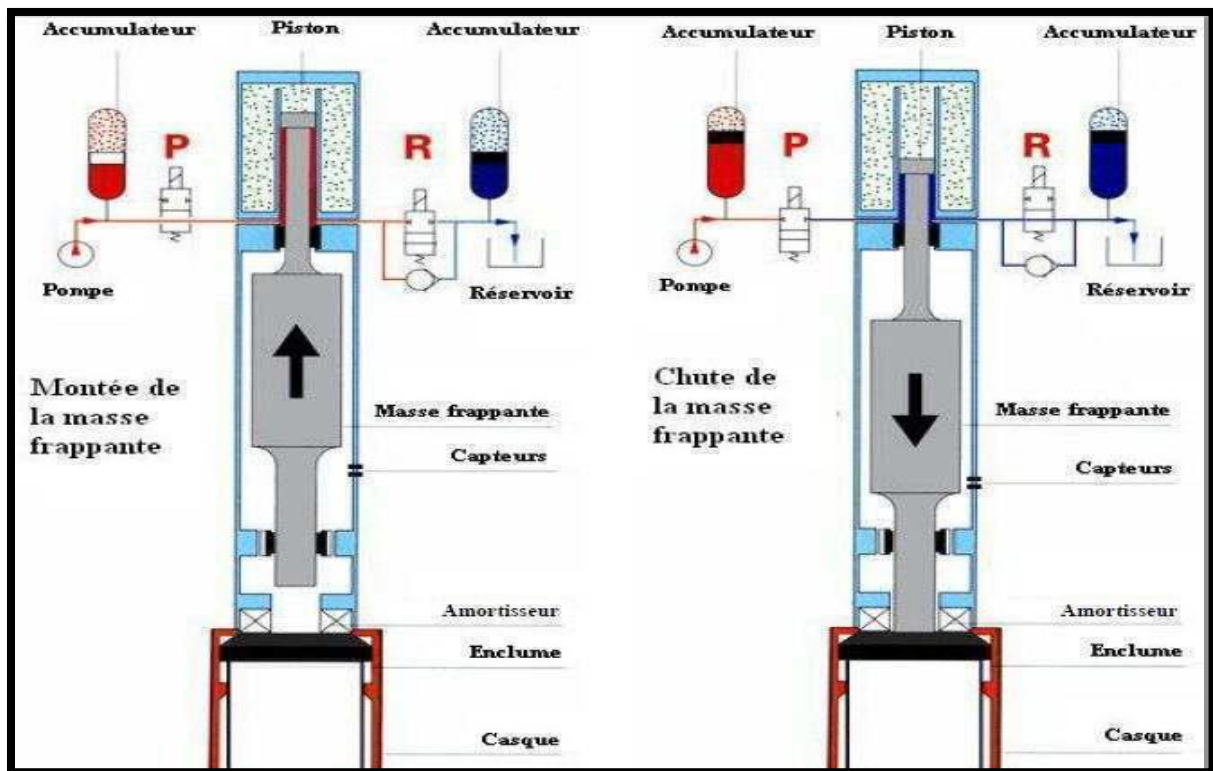


Fig I.37. Principe de fonctionnement du marteau hydraulique (brochure IHC) (4)

b) Matériels :

Le fonçage par battage d'un élément rigide dans le sol nécessite l'utilisation d'un mouton et d'un système de guidage.

Le mouton venant se poser sur l'élément à foncer, il est indispensable d'utiliser un système de guidage. Il se fait principalement suivant deux méthodes (le mât de battage ou le guide de battage).

i) Mât de battage :

En mode guidé sur mât, le porteur hydraulique (engin de chantier) est équipé d'un mât de guidage sur le quel coulisse le mouton dans un système de rails : le mouton est solidaire du mât. Le positionnement et le contrôle de la verticalité ou de l'inclinaison sont grandement facilités. Ce mode est le plus adapté à la mise en œuvre d'éléments inclinés.

ii) Guide de battage :

En mode pendulaire, le mouton est suspendu au câble d'une grue à flèche. Avant de positionner le mouton sur l'élément à battre, il est nécessaire de le maintenir dans un guide ou châssis de fonçage à la différence de la méthode précédente.

iii) Moutons ou marteaux :

Le choix du système de battage approprié est essentiel pour foncer convenablement les palplanches et parvenir à la cote souhaitée en toute sécurité. Les différents types de moutons utilisables pour le fonçage par battage sont :

- les moutons à chute libre.
- les moutons diesel.
- les moutons hydrauliques à double effet.
- les trépiedeurs ou les moutons à double effet à l'air comprimée et à frappes rapides. (4)



Fig I.38. Chantier de battage de palplanches

5.7.2 Vibrofonçage :

a) Principe :

Les vibrations générées par le vibreur puis transmises au sol par l'intermédiaire du profilé permettent l'enfoncement de celui-ci si l'énergie est suffisante pour vaincre la résistance du sol. le profilé s'enfonce alors sous son propre poids et celui du vibreur avec des vitesses de pénétration pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres par minute.

La vibration est générée par des balourds de masse m ou masses excentriques, en nombre pair, tournant à la même vitesse, mais en sens opposés, de sorte que les composantes horizontales (F_h) de la force centrifuge (FC) s'annulent. La résultante est une force verticale (F_v) d'intensité sinusoïdale.

Actuellement, les masses excentriques sont entraînées par des moteurs hydrauliques, alimentés par une centrale à débit variable. La motorisation hydraulique présente de nombreux avantages tels qu'un bon rapport poids et la puissance, une grande souplesse d'utilisation avec des performances élevées et des possibilités de réglage de la vitesse de rotation et donc de la fréquence des masses excentriques. Selon le vibreur hydraulique, les masses excentriques tournent à des vitesses comprises entre 1200 et 3000 t/mn, soit des fréquences de 20 à 50 Hz.

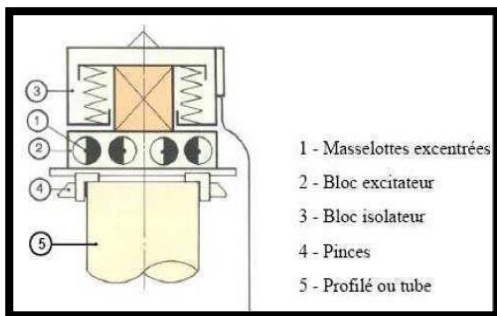


Fig I.39. Principe mécanique du vibreur (5)

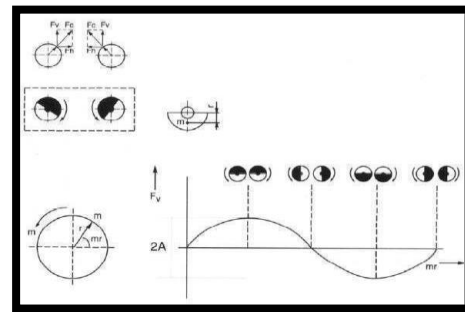


Fig I.40. Principe de fonctionnement d'un vibreur (brochure ICE) (5)

b) Matériels :

Le fonçage par vibration d'un élément rigide dans le sol nécessite l'utilisation d'un vibreur et d'un système de guidage.

i) Systèmes de guidage :

Les systèmes de guidage qui sont utilisés pour foncer les palplanches par vibration sont les mêmes que ceux utilisés pour le battage.

ii) Vibrateurs hydrauliques :

Les vibrateurs les plus couramment utilisés sont alimentés par un groupe hydraulique. Il en existe deux grandes familles, les vibrateurs à moment fixe (fréquence standard et haute fréquence) et les vibrateurs à moment d'excentricité variable. Le vibreur est constitué essentiellement d'un boîtier vibrant, d'un étrier de suspension, d'un casque et d'une masse statique.

Les vibrateurs à fréquence standard présentent à la fois une bonne robustesse, une amplitude importante et une force centrifuge élevée. Ils sont adaptés au vibrofonçage de palplanches et de profilés de grandes dimensions, en conditions difficiles.

Les vibrateurs à haute fréquence combinent une faible amplitude de la force et une fréquence élevée. Le moment excentrique réduit signifie que le vibreur atteint rapidement son régime de travail en limitant donc le phénomène de sensibilité des sols lors des phases de démarrage et d'arrêt.

Les vibrateurs à moment d'excentricité variable fonctionnent avec un déphasage des masses excentriques, lors des phases de démarrage et d'arrêt, ce qui permet de ne pas générer de vibrations dans le sol lorsque la fréquence de fonctionnement est inférieure à 33 Hz. Ils peuvent être pilotés par un ordinateur pour permettre de contrôler, à l'aide de mesures in situ, le niveau des vibrations transmises à l'environnement. Les vibrateurs hydrauliques ainsi que les marteaux hydrauliques peuvent être utilisés aussi bien en site terrestre, à l'air libre, qu'en site aquatique sous l'eau. (5)

5.7.3 Mise en place avec presse hydraulique :

a) Principe :

Ce système est plus lent que les systèmes de vibrofonçage et battage. Il peut rencontrer quelques difficultés dans les terrains durs. Les trois premières palplanches doivent être mises en place grâce à un gabarit conçu spécialement pour la presse. Ensuite cette presse s'auto porte de palplanche en palplanche et assure sa stabilité en s'accrochant sur les trois dernières palplanches mises en place. En s'appuyant sur les trois dernières palplanches Par des mouvements répétitifs, la presse enfonce la totalité de la palplanche. Le procédé pour l'extraction des palplanches est identique que la mise en place, la presse soulève par étapes les palplanches les unes après les autres. Son avantage est : Peu de nuisances sonores et pas de vibration.

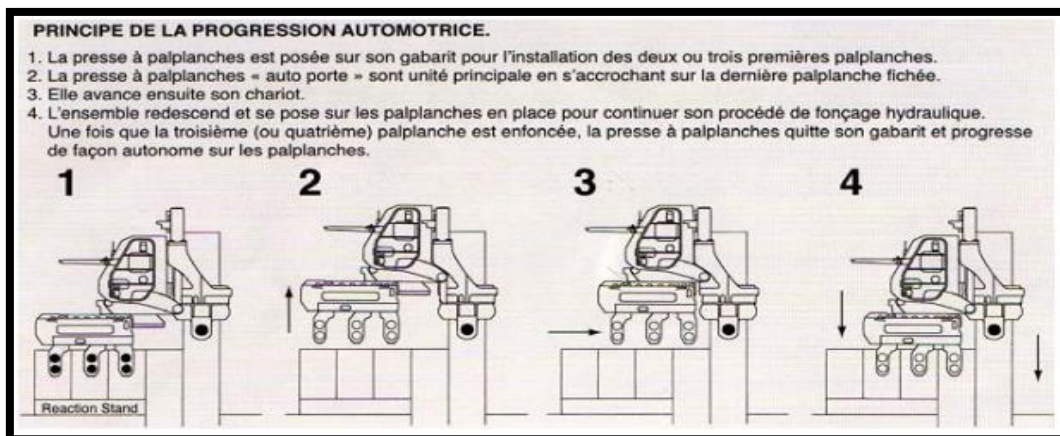


Fig I.41. Principe de la presse hydraulique (4)

b) Matériels :

On distingue les engins suivants : presse hydraulique, groupe électrogène, pelle à câble ou grue et une pelle hydraulique. (4)

5.8 Enclenchement d'un rideau de palplanches :

Cette opération consiste à enclencher la palplanche à mettre en œuvre, dans la serrure de Celle déjà fichée. L'emboîtement a un triple but : (5)

- Fournir un guidage au cours de l'enfoncement.
- Solidariser les palplanches, afin de réaliser un rideau contenu offrant une résistance plus grande à la flexion.
- Réaliser l'étanchéité du rideau.

L'enclenchement des profilés présentant des risques importants, notamment de chutes de hauteur et de heurts, il est conseillé d'utiliser un enclencheur, système simple pouvant s'adapter sur différents profils par changement de drapeau. Il permet l'enclenchement des palplanches à distance.

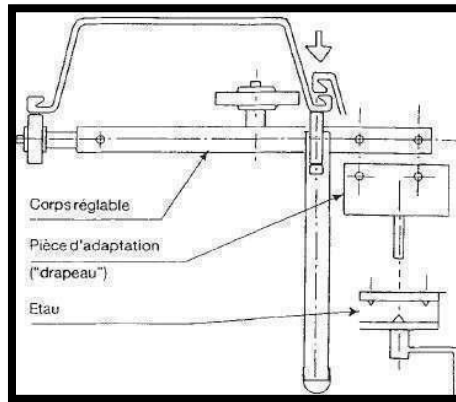


Fig I.42. Enclencheur automatique (5)

5.9 L'arrachage des palplanches :

Les palplanches mises en œuvre pour des ouvrages provisoires doivent être le plus souvent arrachées en fin de chantier. Cette opération doit être effectuée à l'aide des appareils spécifiquement conçus et adaptés, associant les effets de traction et de vibration. La traction doit être réalisée dans l'axe du profilé pour limiter l'effet dû à l'élimination brutale de l'effort résistant. (4)

5.10 Recépage des palplanches :

Le recépage consiste à découper la tête des profilés de manière à les aligner à la hauteur voulue. Tout recépage supérieur à 20cm doit faire l'objet d'un examen des relevés d'enfoncement afin de vérifier que la fiche prévue a été atteinte.

Les opérations d'oxycoupage doivent être réalisées par une personne qualifiée. L'élément à couper doit être maintenu par l'engin de levage jusqu'à sa découpe complète. Afin qu'il ne se balance pas, il convient d'assurer sa stabilité par des points d'attache. (4)

5.11 Principaux d'étanchement des palplanches :

On distingue deux types d'étanchement : (5)

5.11.1 Etanchement vertical :

Il consiste principalement à rendre étanche les serrures des palplanches, plusieurs systèmes d'étanchement possibles dépendant de degré d'étanchéité souhaité.

a) Produit hydrocarboné mis en œuvre à chaud :

Le comportement de ce produit lors de sa mise en œuvre sous certaines conditions est résumé ci-après :

- application sur métal -10°C à $+70^{\circ}\text{C}$.
- durcissement sous pluie.
- séchage sous UV.

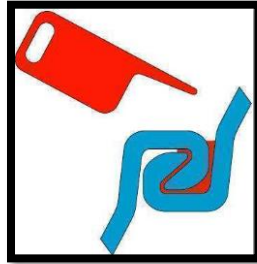


Fig I.43. Remplissage des serrures enclenchées avec un produit hydrocarboné (5)

b) Produit hydrogonflant mis en œuvre à froid :

- application sur métal humide.
- polymérisation sous UV.

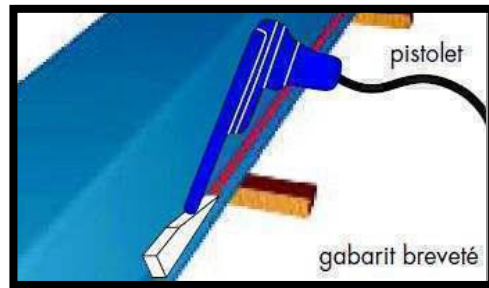


Fig I.44. Illustration de la mise en œuvre du produit hydrogonflant. (5)

c) Soudure :

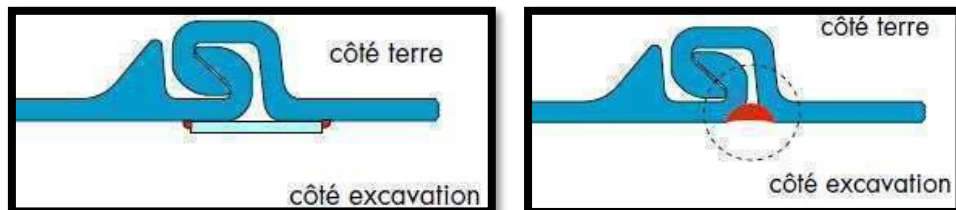


Fig I.45. Etanchement avec la soudure (5)

d) Rideau de palplanches combinées avec une paroi bentonite ciment :

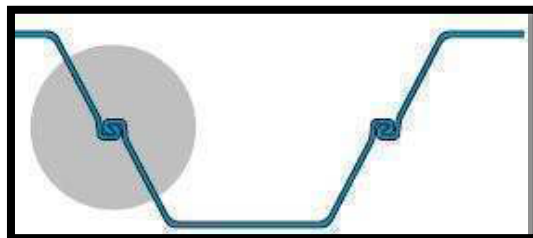


Fig I.46. Etanchement avec combinaison bentonite ciment (5)

e) Réparation des défauts d'étanchement dans les serrures :

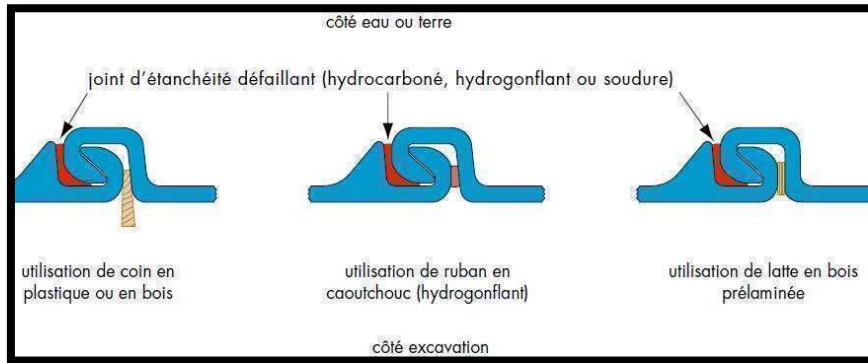


Fig I.47. Illustration de la réparation des défauts d'étanchement dans les serrures (5)

f) Etanchement par installation d'un système de drainage :

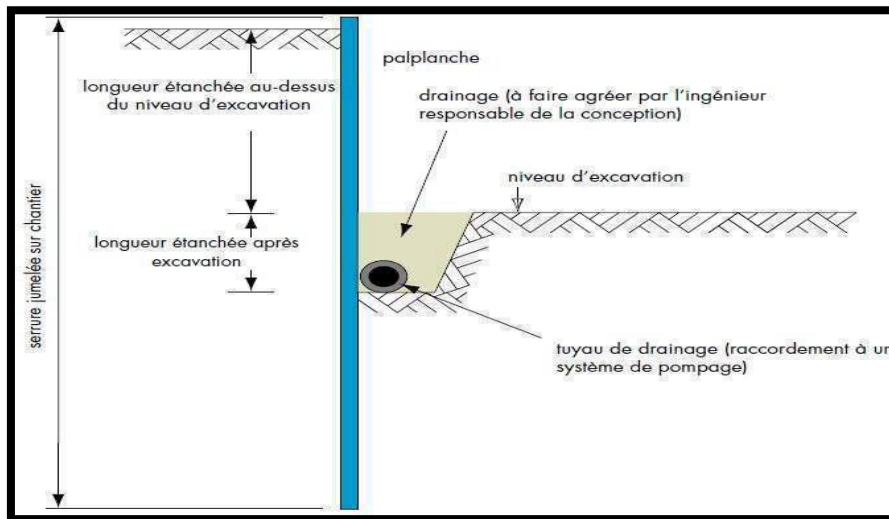


Fig I.48. Illustration pour l'installation d'un système de drainage (5)

g) Etanchement avec arcoseal :

L'application d'Arcoseal se fait généralement en usine mais elle reste tout à fait possible à l'air libre sur le chantier dès lors que l'on veille scrupuleusement à protéger les serrures de la pluie et de l'humidité avant l'application. Porté à une température de 115 °C à 135 °C (un brassage continu est nécessaire), le joint d'étanchéité est versé dans les serrures en respectant les plans d'exécution et en tenant compte du sens de progression du fonçage et de la position des serrures par rapport à la pression hydrostatique. La serrure munie d'Arrosa devra toujours être placée à l'avancement.

h) Etanchement avec wadit :

Nous recommandons d'utiliser ce produit en le réchauffant à l'huile thermique et réglé par un thermostat. Cela permet généralement d'éviter toute surchauffe locale de la masse de scellement.

Lorsque des serrures de rideau de palplanches sont scellées avec wadit, les palplanches doivent absolument être logées à l'horizontale. Il faut surveiller en tous cas que les pièces en acier soient propres, sèches et sans graisse, sinon la masse de scellement ne pourra pas adhérer à l'acier. Si l'acier est neuf, il faut éliminer la peau de laminage collée sur la surface (elle est composée aussi de graisses et d'huiles).

5.11.2 Etanchement horizontal :

La jonction étanche se trouve entre le mur de la palplanche et un élément d'ouvrage horizontal. On trouve deux types d'étanchement : (13)

a) L'étanchéité avec la dalle de couverture :

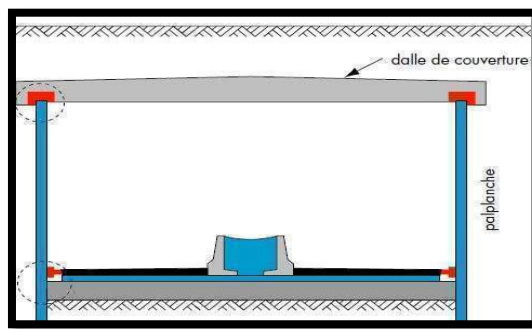


Fig I.49. Etanchement horizontal dans le cas d'un tunnel ou une structure enterrée (13)

b) L'étanchéité avec la dalle de fond :

Dalle de fond (radier)

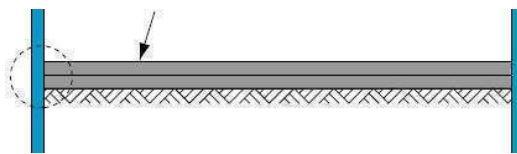


Fig I.50. Etanchement d'une fouille avec un radier (13)

5.12 Avantage des palplanches :

- La continuité du rideau facilite la gestion de la nappe.
 - Peut servir de soutènement définitif (habillage possible pour l'aspect visuel).
 - Peut avoir un rôle porteur.
 - Une option durable faite d'acier recycle. Les pieux peuvent souvent être réutilisés.
 - Disponible dans de nombreuses combinaisons de taille et de poids.
 - Barrières immédiates pour empêcher la perte de terre et la desquamation pendant l'excavation.
 - Les palplanches en acier permanent sont conçues pour offrir une longue durée de vie.
- (17)

5.13 Inconvénient des palplanches :

- Effet barrage potentiel sur la nappe.
- Impossibilité de mise en œuvre dans les terrains contenant des blocs ou des bancs durs.
- Mise en œuvre impliquant des nuisances importantes.
- Le défaut des palplanches en acier est la corrosion. (17)

5.14 Corrosion des palplanches :

La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant. elle entraîne souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, ou de son environnement, ou les deux au même temps. Pour l'acier, la corrosion se traduit par la formation de rouille. Ce produit composé d'oxydes plus ou moins hydratés ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'eau à température ordinaire. Cette corrosion est dite aqueuse.

Les milieux corrosifs les plus courants sont l'atmosphère, le sol et l'eau. L'eau de mer et l'eau douce sont suffisamment chargées en sels pour être des éléments actifs des piles de corrosion, au contact de l'acier nu. L'eau de pluie et l'eau de condensation de l'humidité atmosphérique ne sont pas chargées de sel et leurs conductivités électriques sont faibles. Cependant, lorsque l'atmosphère contient des impuretés telles que du dioxyde de soufre (SO_2), du dioxyde de carbone (CO_2), des chlorures en bord de mer, et autres composés, l'eau de pluie ou de condensation s'en trouve chargée, devient conductrice et, par suite, peut favoriser la corrosion. L'eau étant un des éléments nécessaires à la corrosion, il est évident que les structures en acier exposées à l'atmosphère, occasionnellement au contact de l'eau (pluie, condensation), subiront une corrosion moindre que celles constamment ou surtout alternativement immergées et émergées. (5)

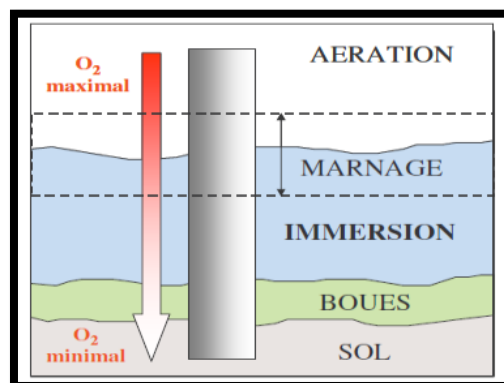


Fig I.51.Elément métallique dans l'environnement marin. (5)

5.15 La protection contre la corrosion :

La durée de protection est principalement fonction de l'épaisseur de la couche de galvanisation. Les trois facteurs les plus déterminants, de cette épaisseur, sont :

L'épaisseur de paroi de l'acier : les épaisseurs minimales locales et moyennes en fonction de l'épaisseur de l'acier sont données par la norme de galvanisation.

La composition de l'acier : plus particulièrement sa teneur en silicium et en phosphore. Ces dernières déterminent la « réactivité » de l'acier vis-à-vis du zinc fondu. Les aciers réactifs donnent des couches épaisses de couleur gris terne présentant un aspect rugueux et irrégulier.

Rugosité de l'acier : un acier dont la surface est fort rugueuse présente une surface spécifique importante et réagira dès lors de manière plus violente avec le zinc fondu. (5)

Pour éviter la corrosion, il faut protéger les matériaux susceptibles d'être corrodés. Les méthodes suivantes sont disponibles pour éviter la corrosion des palplanches en acier.

- Conception de la palplanche en tenant compte de la tolérance de corrosion.
- Revêtement en béton pour éviter la corrosion.
- Revêtement de la palplanche pour éviter la corrosion quatre types sont disponibles en ce qui concerne cette méthode : par peinture ; en utilisant une doublure organique : en utilisant de la vaseline Doublure ; ou en utilisant un revêtement inorganique.
- Méthode de protection électrolytique Deux types sont disponibles en ce qui concerne cette méthode : en fournissant de l'extérieur une source d'alimentation de protection à éviter la corrosion (méthode d'alimentation externe) ou en attachant un alliage tel que l'aluminium et le magnésium au matériau en acier comme anode sacrificielle (méthode de l'anode galvanique).
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par inhibiteurs de corrosion.
- Protection électrochimique.
- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Protection cathodique.

Il est nécessaire de sélectionner la méthode de prévention de la corrosion la plus optimale en fonction de la conception et du site état. (18)

6. Méthode de calcul des rideaux de palplanches :

6.1 Définition de la poussée et de la butée :

On admet que le rideau est encastré dans le sol sous l'effet d'une force de butée et d'un contre butée due au refoulement du terrain par le pied de la palplanche.

Imaginons qu'un écran vertical soit encastré à la surface d'un massif de sable. Si l'on procède à un remblayage par dépôt successif de couches horizontales minces d'un côté du mur, tout en appliquant une résultante F du côté opposé de façon à empêcher tout déplacement, on exerce à la fin du remplissage une force F_0 horizontale (du fait de l'absence de frottements entre la paroi et le sol) appelée poussée au repos telle que représentée sur la Fig.52. (2)

Si à présent on réalise une translation horizontale du mur, deux cas sont possibles :

a) Butée :

Si d'une part le déplacement est imposé vers l'intérieur du remblais (à droite), la force F croît jusqu'à une valeur maximale F_p qui correspond à la mobilisation totale de la butée.

La butée du terrain et la seule force qui empêche le rideau de pivoter du point d'attache du tirant d'ancrage. Cette butée est calculée avec le coefficient de butée de Rankine :

$$F_p = 1/2 K_p \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (\text{I.1})$$

K_p : coefficient de butée de Rankine

γ : le poids volumique du remblai

H : la hauteur du remblai

La contrainte de butée (passive) est : $\sigma_p = K_p \cdot \gamma \cdot h \quad (\text{I.2})$

φ : angle de frottement interne du sol

Avec : $K_p = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (\text{I.3})$

où : $K_p = 1/K_a \quad (\text{I.4})$

b) Poussé :

Si d'autre part, partant d'une situation initiale identique, le déplacement se fait en éloignant la paroi du remblai, alors F décroît jusqu'à une valeur F_a inférieure à F_0 et qui traduit l'établissement de l'état de poussée.

Cette poussée est calculée avec le coefficient de poussée de Rankine :

$$F_a = 1/2 K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (I.5)$$

K_a : coefficient de poussée de Rankine

La contrainte de poussée (active) est : $\sigma_a = K_a \cdot \gamma \cdot h \quad (I.6)$

Avec : $K_a = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (I.7)$

Remarque :

On utilisera la méthode de Rankine. Les contraintes actives et passives auront alors comme formules générales (φ et $C \neq 0$):

$$\begin{cases} \sigma_a = K_a \cdot \sigma' - 2C \sqrt{K_a} \\ \sigma_p = K_p \cdot \sigma' + 2C \sqrt{K_p} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sigma_a = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sigma' - 2C \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \\ \sigma_p = \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cdot \sigma' + 2C \text{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \end{cases} \quad (I.8)$$

On notera en particulier que le déplacement Δ_p nécessaire à la mobilisation totale de l'état de butée est beaucoup plus important que celui Δ_a causant la situation de poussée. Si H est la hauteur hors fiche du mur, on admettra les ordres de grandeur suivants :

$$\Delta_p \approx H / 100 \text{ et } \Delta_a \approx H / 1000 \quad (I.9)$$

Dans ces deux cas extrêmes, on parle de poussée et butée limites correspondant à la rupture du massif de sol.

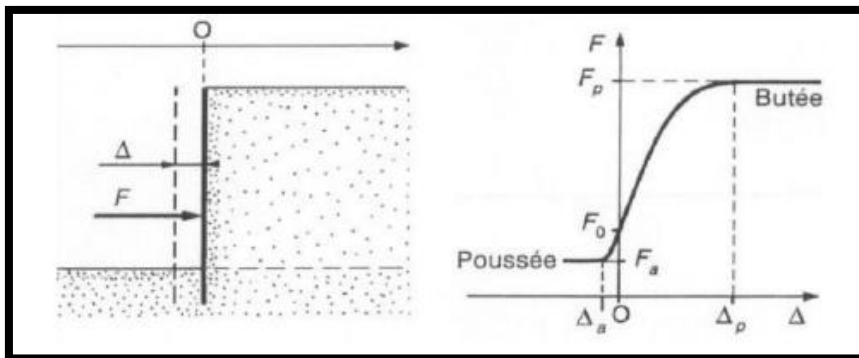


Fig I.52. Principe de la butée et de la poussée (2)

6.2 Etats limites de rupture selon L'Eurocode :

L'Eurocode7 exige la vérification d'une liste d'états limites pour la réalisation des écrans de soutènements. La conception du rideau de palplanches se fait en considérant quatre modes majeurs de rupture (Fig.53.) que sont :

1. **Le renversement du rideau** : celui-ci pivote sous la pression des terres.
2. **Le glissement d'ensemble** : une partie du massif incluant la paroi connaît un large mouvement.
3. **La destruction de l'ancrage** : il peut être arraché, ou avoir la tête brisée.
4. **La rupture de la structure** : les palplanches plient et une rotule plastique apparaît.

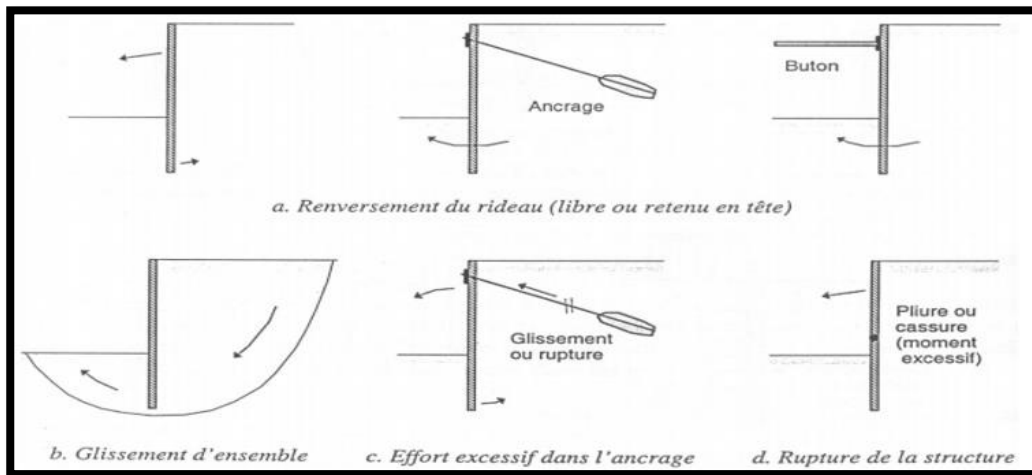


Fig I.53. Mode de rupture d'un mur de palplanches (2)

- Les phénomènes (1) et (2) peuvent être évités en calculant la longueur minimale de fiche du rideau.
- L'arrachage (3) peut être écarté par un dimensionnement adapté du tirant.
- La rupture interne (4) est exclue en vérifiant que le moment de flexion et l'effort tranchant dans la paroi restent inférieurs aux valeurs admissibles par les palplanches. (2)

6.3 Conditions d'appui d'un rideau dans le sol :

Un rideau de palplanches assure la stabilité des parois d'une fouille ou d'un remblai. Sur sa face côté terre (face amont) s'applique la poussée des terres équilibrée par la réaction du sol au-dessous du fond de fouille et par la traction dans le tirant si le rideau est ancré en tête. La distribution des contraintes de poussée sur le rideau dépend de la nature du sol, de sa stratification, des conditions hydrauliques, etc., aussi étudierons-nous les conditions d'appui du rideau dans le sol en supposant pour simplifier qu'il est sollicité uniquement par une force horizontale F croissante.

6.3.1 Rideau Rigide :

Si le rideau n'est pas ancré en tête, il subit une rotation autour d'un centre de rotation situé au-dessous du fond de fouille. Le moment développé par la force F est équilibré par les efforts de butée et de contre-butée mobilisés de part et d'autre du centre de rotation (Fig.54.a). Si le rideau est ancré en tête, la contre-butée ne peut se développer en arrière du rideau. Seuls des efforts de butée s'exercent sur toute la hauteur en fiche. La rupture se produit par rotation autour du point d'ancrage lorsque la butée maximale est mobilisée (Fig.54.b).

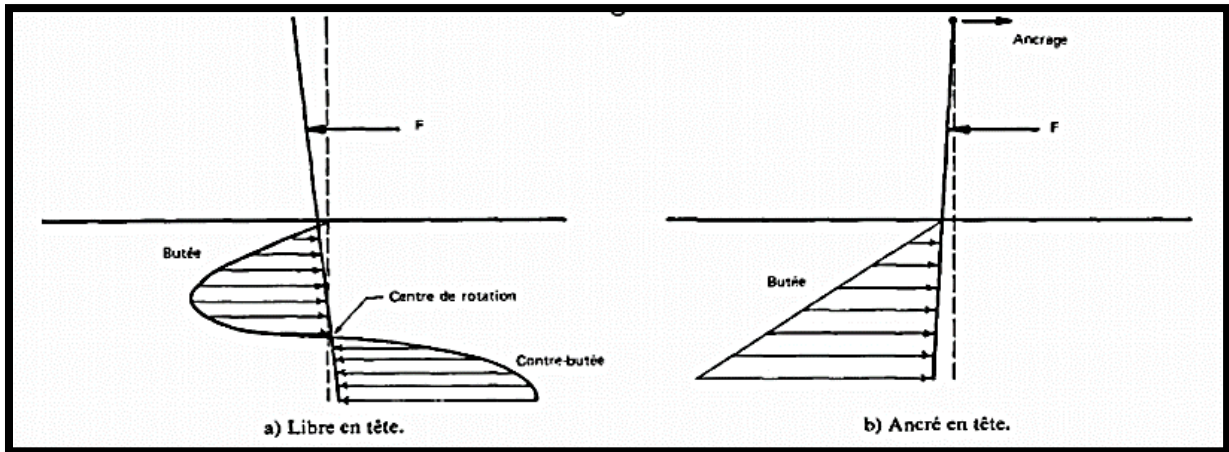


Fig I.54. Equilibre d'un rideau rigide (19)

6.3.2 Rideau Flexible Ancré en tête :

Les conditions d'appui dans le sol sont beaucoup plus complexes que dans le cas d'un rideau rigide et l'allure de la distribution des efforts sur la partie en fiche varie considérablement suivant l'intensité de F .

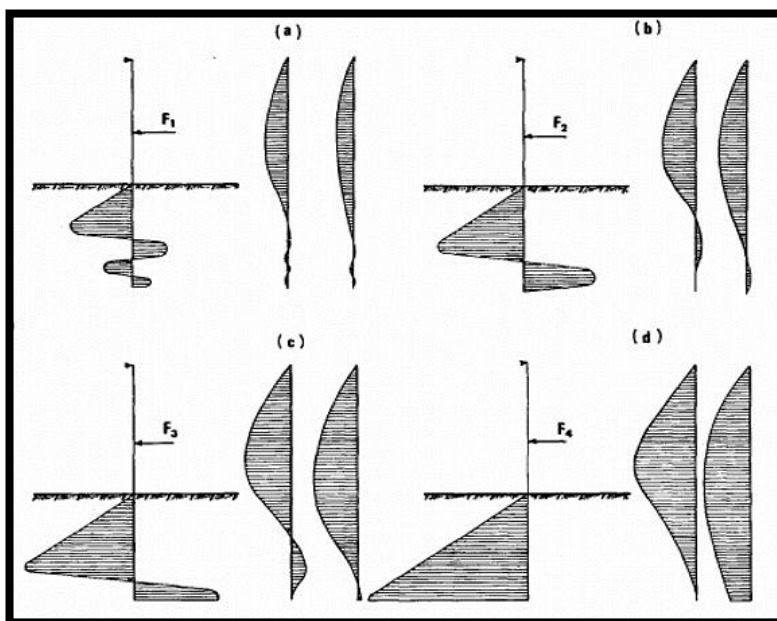


Fig I.55. Comportement d'un rideau ancré en tête soumis à une force horizontale croissante (dans chaque cas on a représenté de gauche à droite la distribution des contraintes, la courbe des moments fléchissants et la déformée). (19)

Pour des valeurs F_1 très faibles de F , la réaction du sol est proportionnelle aux déplacements du rideau et le sol se comporte comme un milieu pseudo-élastique (Fig.55.a).

A partir d'une valeur F_2 , la réaction du sol sur le rideau se réduit à une butée et à une contre-butée (Fig.55.b). Tant que F est inférieur à une valeur F_3 il n'y a pas déplacement du pied du rideau.

Lorsque F atteint la valeur F_3 , le pied du rideau se déplace vers l'amont et ce déplacement mobilise la contre-butée maximale. Le moment d'encastrement passe par un maximum et l'on dit qu'il y a encastrement complet dans le sol (Fig.55.c).

Lorsque F continue à croître, la butée augmente tandis que la contre-butée diminue ; le rideau est dit partiellement encasté. Enfin pour la valeur F_4 la contre-butée disparaît et la butée maximale est mobilisée sur toute la hauteur en fiche. Le rideau qui est alors en équilibre limite est dit simplement buté en pied (Fig.55.d). Remarquons que la réaction du sol est la même que dans le cas d'un rideau rigide ancré en tête (Fig.54.b).

En pratique la fiche adoptée pour un rideau flexible est généralement comprise entre la fiche correspondant à l'encastrement complet et celle correspondant à la butée simple. (19)

6.4 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement des rideaux de palplanches est celui d'une structure chargée par la poussée des terres et de l'eau soutenue et résistant en flexion pour mobiliser des appuis constitués, d'une part, par le sol en fiche (partie enterrée du rideau en pied) et d'autre part s'il y a lieu par des tirants ou butons disposés dans la partie libre de l'écran.

Le rideau est généralement fiché de façon significative dans le terrain : de façon typique, la fiche constitue 30 à 50% de sa hauteur totale dans le cas des rideaux ancrés, cette valeur pouvant atteindre 70% dans le cas de rideaux non ancrés. En permettant la mobilisation d'un appui au sein du terrain, cette fiche joue un rôle déterminant dans l'équilibre de l'ouvrage. La nature de cet appui est variable suivant les propriétés du terrain, la longueur en fiche de l'écran et sa rigidité et la distribution des autres appuis, tirants et butons. Elle peut se réduire à un appui simple, pour des écrans très rigides, ancrés en partie supérieure et dont la fiche est courte tandis que, pour des écrans ne possédant pas d'appui en partie supérieure, elle s'apparente à un encastrement. Dans le cas général, l'écran se trouve en fait partiellement encasté dans le terrain.

Les appuis en partie supérieure de l'écran sont généralement présents dès que la hauteur libre dépasse 4 à 5 m, voire 3 à 4 m, de façon à limiter les déplacements en tête de l'ouvrage et à assurer sa stabilité. Il s'agit alors de tirants permettant de renvoyer les efforts d'appui suffisamment loin en arrière de l'écran, au sein d'une partie stable du massif de sol. Il peut également s'agir de butons, dans le cas où l'effort d'appui peut être renvoyé à une autre structure faisant face à l'écran (cas des tranchées ouvertes, par exemple).

Ces appuis sont généralement distribués sur la hauteur à raison d'un niveau d'appui tous les 3 à 5 m. certaines configurations d'ouvrages peuvent toutefois conduire à des distributions différentes. C'est le cas, par exemple, des quais ou des soutènements de berges de rivière, généralement simplement ancrés en tête, au-dessus du niveau de l'eau.

La répartition longitudinale des appuis pour chaque niveau est variable suivant la nature des appuis et l'intensité des efforts à reprendre. Si les appuis sont constitués par des tirants, ces derniers sont généralement répartis à raison d'un tirant tous les 2 à 5 m. cet espacement horizontal est généralement plus important dans le cas des butons Fig.56. (12)

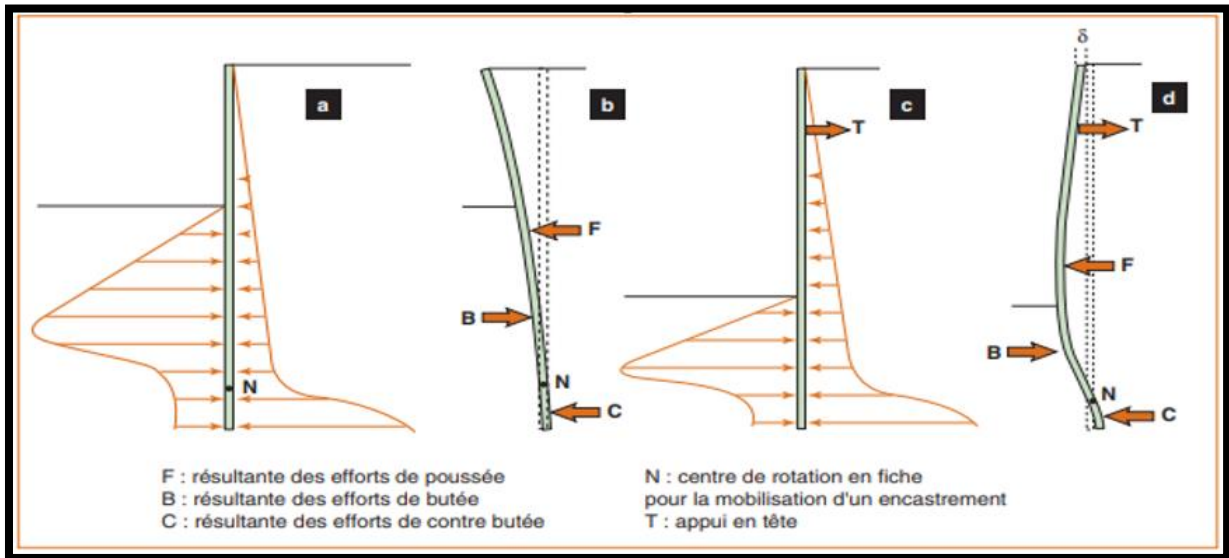


Fig I.56. Distributions de pression des terres sur un soutènement simplement encastré en fiche (a), ancré en tête (c) et déformations associées de l'ouvrage (respectivement (b) et (d)) (12)

6.5 Stabilité d'un écran de soutènement :

6.5.1 Rideau ancré et simplement buté en pied :

Un rideau ancré en tête est dit simplement buté en pied lorsque sa fiche est suffisamment faible pour permettre une rotation du rideau autour de son point d'ancrage et un déplacement du pied mobilisant la butée maximale. Chaque face ne supporte que des contraintes de butée ou des contraintes de poussée, il n'y a pas de contre buté. Le moment maximal se produit le plus souvent vers le bas de la partie libre de la palplanche.

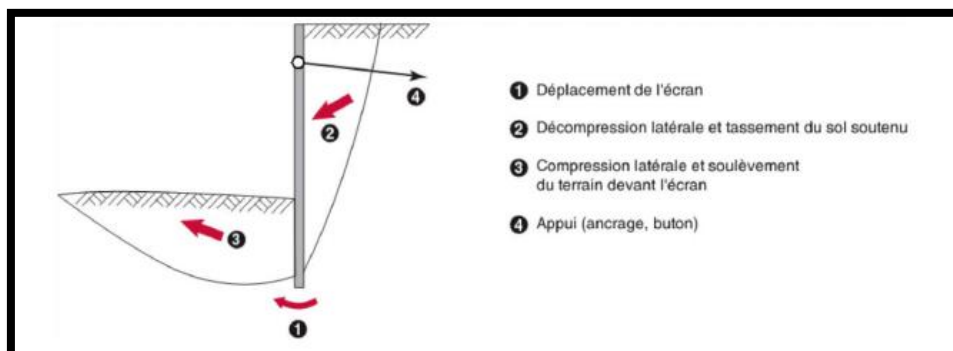


Fig I.57. Mécanisme de rupture d'un écran simplement butée (2)

Le diagramme des efforts exercés sur le rideau, dans le cas d'un sable, est représenté sur la figure suivante. Les inconnues à déterminer sont la fiche D et l'effort d'ancrage T. L'équilibre statique du rideau fournit les deux équations nécessaires au dimensionnement.

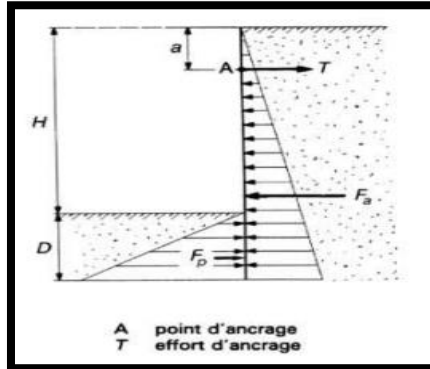


Fig I.58. Rideau ancré en tête simplement buté en pied. (2)

A: Moment résultant nul au point d'ancrage A :

$$F_a \left[\frac{2}{3} (H + D) - a \right] = F_p \left[\frac{2}{3} D + H - a \right] \quad (\text{I.10})$$

Fa : force de poussée exercée sur la face amont du rideau

Fp : force de butée sur la face avale, le coefficient 2/3 étant dû à la répartition triangulaire des pressions.

B: Résultante horizontale nulle :

$$T = F_a - F_p \quad (\text{I.11})$$

Le problème est statiquement déterminé, l'équation en moment est un polynôme de 3^o (degré) en D avec une seule racine réelle positive. L'équilibre horizontal des efforts permet ensuite le calcul de la force T à appliquer au tirant. (2)

NB : cas de la présence de l'eau Nous avons jusqu'ici supposé implicitement que le matériau était sec. Dans le cas où l'eau est présente dans le massif, le calcul doit la prendre en compte. La stabilité de l'ouvrage se calcule alors en incluant les efforts dus à l'eau et calculés séparément. Comme indiqué sur la Figure. S'il y a écoulement d'eau dans le massif, il faudra commencer par résoudre le problème hydraulique. (2)

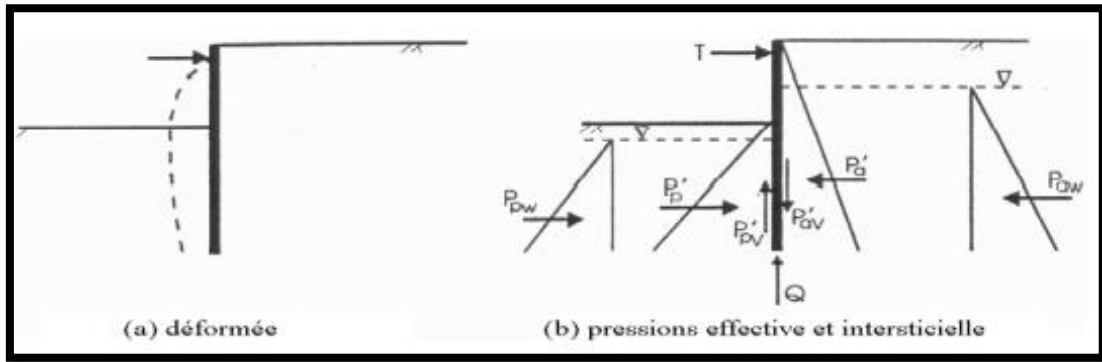


Fig I.59. Cas de l'écran en présence d'eau (2)

6.5.2 Rideau non ancré en tête et encastré en pied :

Un rideau non ancré, battu dans un sol pulvérulent, subit une rotation autour d'un point O situé dans sa partie en fiche. La figure ci-après montre les déplacements du rideau et les efforts normaux correspondant. (5)

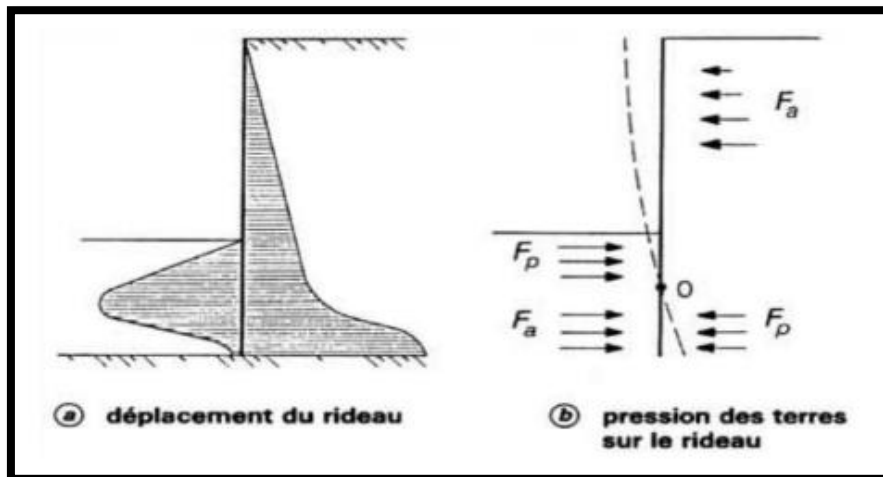


Fig I.60. Calcul à l'état limite d'un rideau encastré et non ancré en tête (5)

Le calcul peut se faire par la méthode de Rankine, à partir des hypothèses simplificatrices suivantes : (5)

- Le sol des deux côtés du rideau, au-dessus du point de rotation O, est en état d'équilibre limite.
- Les efforts de contre buté sont équivalents à une force horizontale F_c appliquée au niveau du centre de rotation O.
- On prend généralement une hauteur de contre butée égale à 20 % de la hauteur de butée z_0 .

Dans ce cas les inconnues du problème sont la hauteur de butée z_0 et la force de contre butée F_c . La valeur de z_0 est déterminée en écrivant l'équilibre des moments autour du point O, ce qui donne une équation du troisième degré en z_0 , analogue à celle donnant la valeur de la fiche D dans le cas où le rideau est simplement butée en pied. La fiche du rideau a alors pour expressions : (5)

$$D = \frac{H}{K_p^2 - 1} + Z_0 + 0.2Z_0 - 1 \quad (\text{I.12})$$

La force de contre butée F_c s'obtient en écrivant qu'en projection horizontale la résultante générale des forces s'exerçant sur le rideau est nulle, soit : $F_c = F_p - F_a$. (I.13)

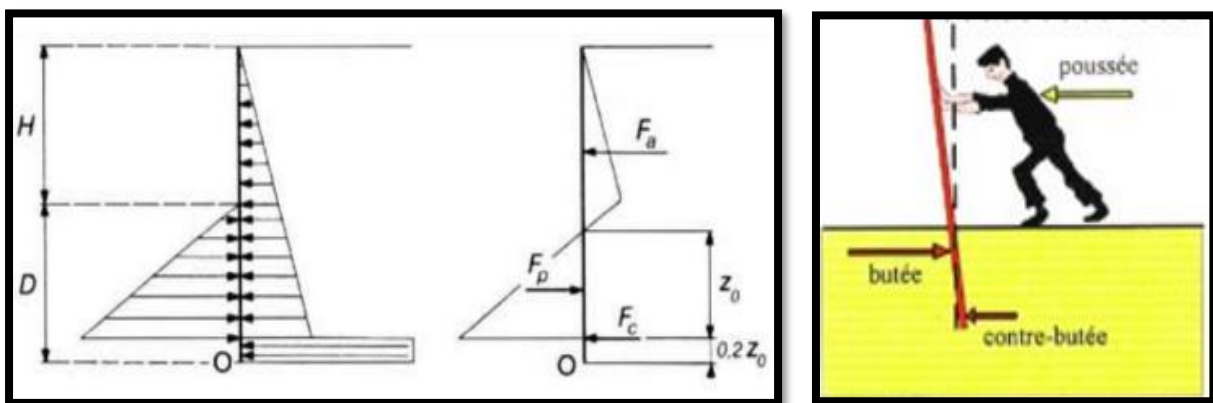


Fig I.61. Hypothèses admises pour le calcul d'un rideau non ancré (5)

Il est alors possible de déterminer la valeur maximale du moment fléchissant dans le rideau à partir du diagramme des pressions, et de choisir un type de palplanche d'inertie convenable.

6.5.3 Mur encastré en pied et ancré en tête :

Hypothèses :

Blum (1931) analyse l'effet de l'allongement de la fiche sur la répartition de la pression des terres, du moment et du déplacement de l'écran. Il observe que: (2)

- les ouvrages courts ($H < 3\text{m}$) sont simplement butés dans le sol.
- L'allongement de la fiche entraîne l'apparition d'un moment dit d'encastrement, et la fiche est alors encastrée dans le sol.
- un très grand allongement de la fiche ne produit pas d'augmentation significative de l'encastrement et que la longueur optimale d'encastrement est celle pour laquelle la tangente à la déformée en pied passe par le point d'ancrage.

- La déformée d'un rideau diminue en profondeur, et le moment maximal est celui qui se trouve vers le milieu de la palplanche. Il faut s'assurer que le moment au point d'ancrage n'a pas une valeur plus forte.

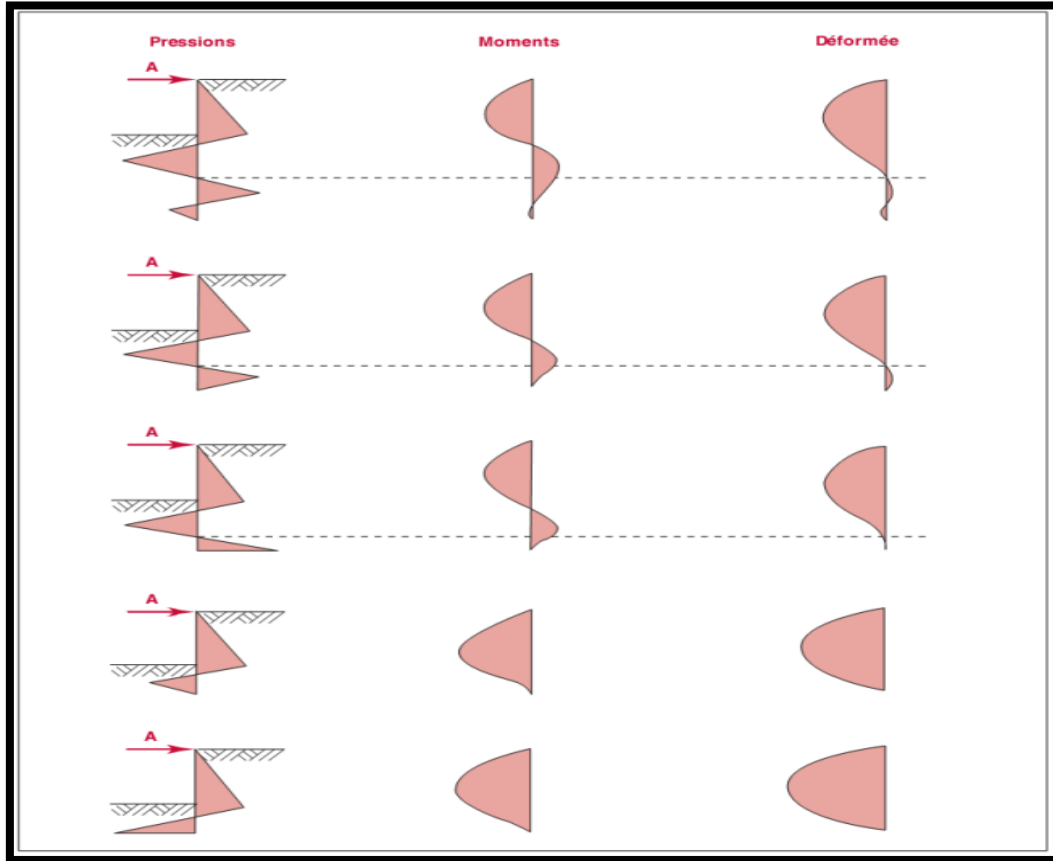


Fig I.62. Influence de la longueur de la fiche sur le moment et les déplacements dans l'écran de soutènement d'après Blum (1931), cité par Delattre (2001) (4)

Blum propose ensuite afin de simplifier le calcul de représenter les efforts de contrebutée par une force localisée passant par le centre de rotation, avec une majoration de la fiche f_0 comme représenté dans la figure suivante: (2)



Fig I.63. Distribution idéalisée de la pression des terres. (4)

Levée de l'indétermination

La résolution des trois inconnues requiert une troisième équation. Pour lever l'indétermination, Blum fait appel à la flexibilité de l'écran théorie des poutres équivalentes et propose deux solutions : (2)

A: Première approche :

Il estime que la longueur de fiche optimale est celle qui permet d'obtenir une tangente à la déformée en pied passant par l'ancrage. On intègre cette condition en calculant la déformée selon la théorie de la résistance des matériaux. Ce travail est fastidieux (méthode de la ligne élastique).

B: Deuxième approche :

Il est fournie par Blum qui remarque que dans le rideau, les points de moment nul, inflexion de la déformée et de pression des terres nulle, inflexion du moment sont voisins, donc il propose de les confondre. On peut alors couper l'écran en deux poutres isostatiques sur appui simple au niveau de ce point, et résoudre le problème (Balay).

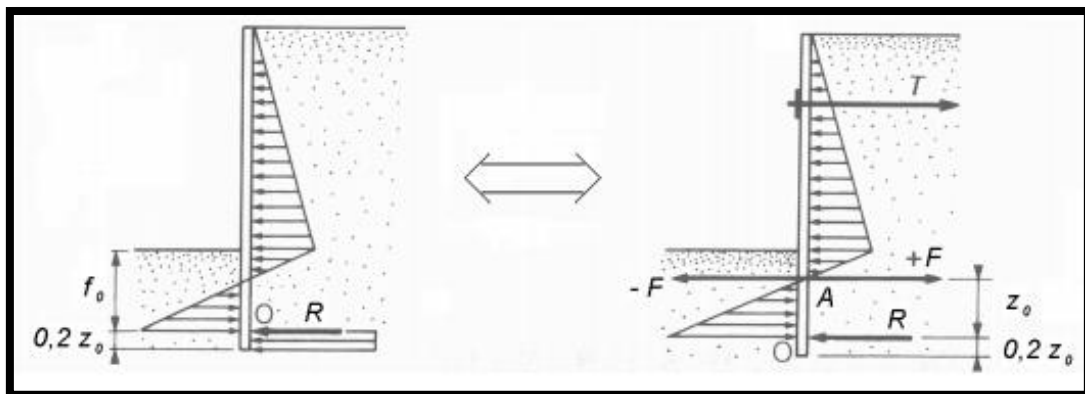


Fig I.64. Résolution par la méthode de la poutre équivalente. (2)

On commence par calculer la profondeur du point de pression des terres nulle. En pratique, lorsque φ est compris entre 25° et 30° on peut admettre $a=0.1H$. L'équilibre de la poutre supérieure donne les valeurs de T et F , déduire par la suite les valeurs de R et z_0 avec celui de la poutre inférieure.

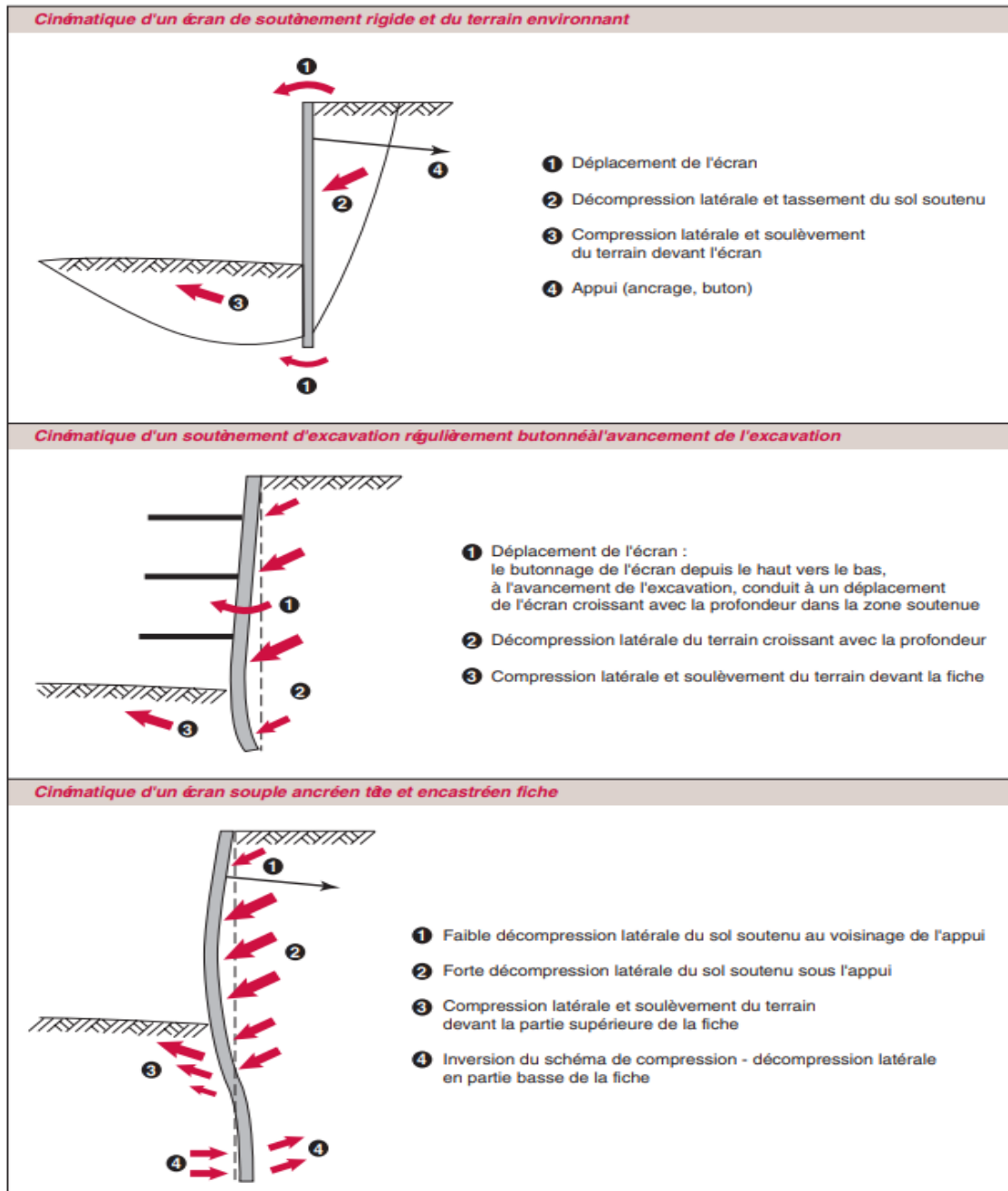


Fig I.65. Schémas d'interaction sol-écrans de soutènement. (36)

7. Conclusion :

Les structures de support flexibles (palplanches) sont construites pour retenir des terrains et l'eau.

Dans ce chapitre, on a présenté les éléments constituant l'ensemble d'un rideau de palplanches. Ensuite on a donné le type, l'utilisation et la mise en œuvre d'un rideau de ce dernier. Pour la localisation d'étanchement, on a donné les méthodes qui concernent la protection contre la corrosion.

Enfin, on a mis en évidence des méthodes qui assurent la Stabilité de l'écran de soutènement.

Chapitre II : Les écoulements autour des rideaux de palplanches

1. Introduction :

L'objectif d'un ouvrage hydraulique est de répondre à deux fonctions principales : l'imperméabilité de la structure et la résistance mécanique (la stabilité). Donc, les deux conditions qui assurent le bon fonctionnement d'un ouvrage hydraulique sont interdépendantes.

Dans ce chapitre, l'accent sera mis sur les mouvements de l'eau dans les sols. La perméabilité est le paramètre clef caractérisant l'écoulement de l'eau dans les sols. Pour introduire ce paramètre nous serons amenés à définir au préalable un certain nombre de notions telles que la vitesse fictive, la charge hydraulique ou bien le gradient hydraulique. Aussi il traitera de l'équation de Darcy qui est le fondement de toutes les théories d'écoulement.

2. Définition :

L'eau peut s'écouler à travers tous les sols mais le phénomène d'écoulement à une intensité très variable d'un sol à un autre. Cette intensité varie en fonction des vides entre les particules du sol et les frottements contre ces particules. (20)

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. (21)

3. L'écoulement de l'eau dans le sol :

3.1 La charge hydraulique :

Le potentiel hydraulique en un point, h , exprimée en mètre (m) (appelé aussi charge hydraulique), est l'énergie de l'eau en ce point. Cette énergie est la somme d'une énergie potentielle, et d'une énergie cinétique. Dans les écoulements souterrains, le terme d'énergie cinétique est très souvent négligeable devant la pression et l'énergie potentiel. (22)

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.1})$$

Avec

z : altitude du point par rapport à un plan de référence.

u : pression interstitielle, pression de l'eau au point considéré (en prenant pour origine la pression atmosphérique).

γ_w : poids volumique de l'eau.

v : vitesse de l'eau au point considéré.

g : accélération due à la pesanteur.

En mécanique des sols, le terme $\frac{v^2}{2g}$ est toujours très faible par rapport aux autres termes, car la vitesse d'écoulement de l'eau est toujours faible. Pour une vitesse de 10 cm/s, qui n'est jamais atteinte en pratique, $\frac{v^2}{2g} \approx 0,5$ mm seulement. On peut donc le négliger et écrire :(23)

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} \quad (\text{II. 2})$$

3.2 La hauteur piézométrique :

Le potentiel hydraulique est de ce fait généralement exprimé dans la dimension d'une hauteur (en mètres) et se dénomme alors hauteur piézométrique.

La hauteur piézométrique est la distance $h_p = z + \frac{u}{\gamma_w}$ rapportée au plan de référence, en d'autres termes h_p est la cote à laquelle remonterait l'eau dans un tube placé au point M. (24)

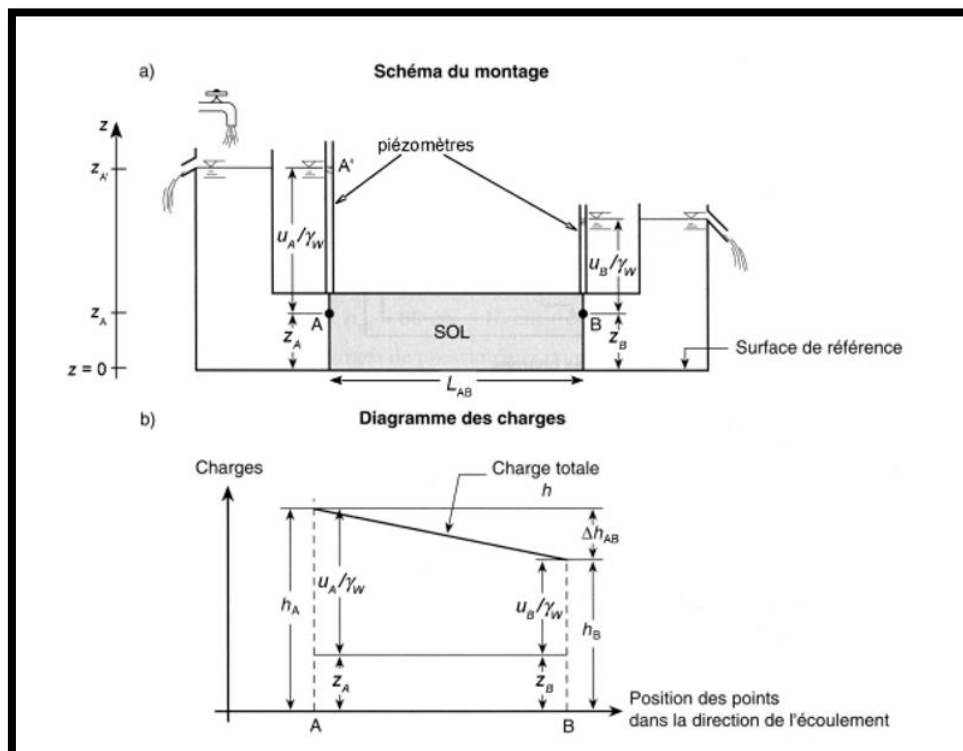


Fig II.1. Valeur de la charge en entrée (point A) et en sortie (point B) d'un écoulement horizontal, et détermination de la perte de charge. (25)

3.3 Perte de charge :

L'interaction de l'eau avec les grains du sol génère une dissipation d'énergie, il existe donc une perte de charge hydraulique le long d'une ligne de courant. Le paramètre fondamental est la variation de charge entre deux points pris dans le sens de l'écoulement M puis N (Fig.2). La variation de charge dh est négative : $dh = h_M - h_N$. (26)

La perte de charge est la quantité : $-dh = h_M - h_N$ (II.3)

- Dans le cas de l'écoulement d'un fluide parfait (incompressible et non visqueux) dans un sol, la charge reste constante entre deux points le long de l'écoulement. (25)
- Dans le cas de l'eau qui a une viscosité non nulle, il y a interaction (frottement) de l'eau en circulation avec les grains du sol engendrant une dissipation d'énergie ou de charge. On constate alors entre deux points le long d'un écoulement une perte de charge. (25)

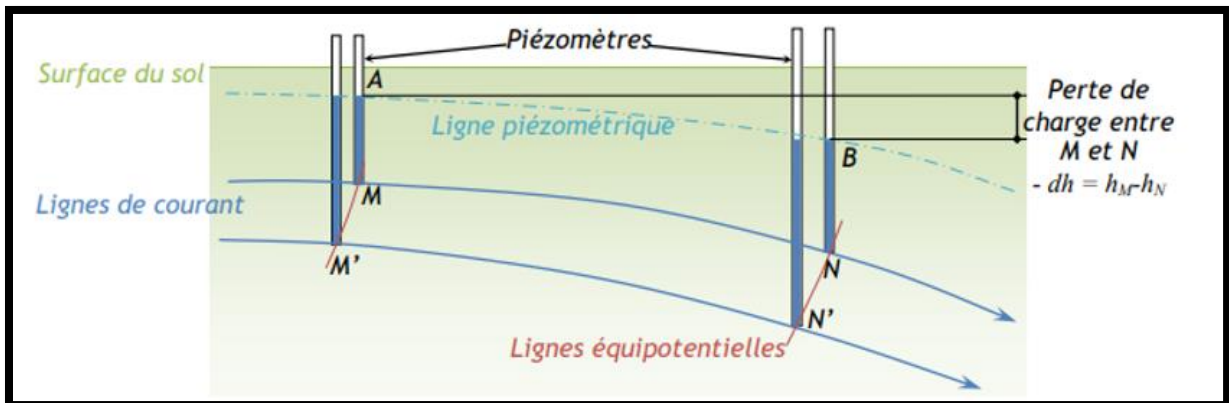


Fig II.2. Illustration de la mesure par piézomètre (26)

3.4 La pression interstitielle :

La pression interstitielle u se mesure via la hauteur d'eau dans un piézomètre, tube allant jusqu'au point M. Sans écoulement entre M et le point haut de l'eau dans le tube A, la charge hydraulique est la même en ces deux points (26) : $h_M = h_A$ (II.4)

Avec
$$h_M = z_M + \frac{u_M}{\gamma_w} \quad \text{et} \quad h_A = z_A \quad (\text{II.5})$$

D'où
$$u_M = \gamma_w (h_M - z_M) \quad (\text{II.6})$$

La pression interstitielle est proportionnelle à la hauteur dans le piézomètre. Deux points ayant une même charge, et donc une même hauteur d'eau dans les tubes piézométriques, sont sur une ligne équipotentielle. La surface piézométrique est l'ensemble des points correspondants au niveau d'eau dans les piézomètres. Sa trace dans le plan est la ligne piézométrique. (26)

3.5 Gradient hydraulique :

Le gradient hydraulique (i) est une grandeur non dimensionnelle utilisée pour exprimer la perte de charge entre deux points. Il est exprimé comme le rapport entre la différence de charge Δh (entre les deux points considérés) et la longueur d'écoulement (L) entre les deux points A et B. (27)

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_A - h_B}{L} = \frac{\text{perte de charge}}{\text{longueur traversée}} \quad (\text{II.7})$$

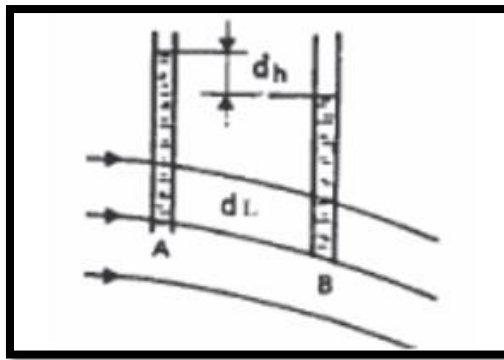


Fig II.3. Gradient hydraulique

La charge hydraulique h_M est fonction des coordonnées spatiales du point M considéré. Le gradient hydraulique pris dans sa formulation générale est le vecteur \vec{i} défini comme : (26)

$$\vec{i} = -\overrightarrow{\text{grad}} h = \begin{pmatrix} -\partial h / \partial x \\ -\partial h / \partial y \\ -\partial h / \partial z \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

A noter :

- Cette relation définie dans un milieu unidirectionnel se généralise aisément dans un milieu à deux ou trois dimensions. On a alors :

$$\vec{i} = \left(-\frac{\partial h}{\partial x}; -\frac{\partial h}{\partial y}; -\frac{\partial h}{\partial z} \right) = -\overrightarrow{\text{grad}} h \quad (\text{II.9})$$

(Négatif à cause de la décroissance de charge)

- Si $\vec{i} = 0$, ($h_1 = h_2 = \text{cte}$) la charge hydraulique est la même en tout point du milieu ; l'eau interstitielle est dite en équilibre hydrostatique.
- Par contre, si $h_1 > h_2$ il y a écoulement de M vers N ((dans le sens de l'écoulement) et la perte de charge $h_M - h_N$ correspond à l'énergie perdue en frottement. La perte de charge est à la fois le moteur et la conséquence de l'écoulement.
- Lorsque dans un écoulement le gradient hydraulique est le même en tout point, l'écoulement est dit uniforme.
- $\ll i \gg$ est une quantité sans dimension, positive dans le sens du courant .
- En tout point M du sol, le vecteur \vec{i} et la ligne de courant sont tangents et sont orientés dans le même sens.
- En tout point M du sol, le vecteur de vitesse est tangent à la ligne de courant et orienté dans le même sens. (28)

3.6 Vitesse de l'eau dans les sols :

L'eau qui s'écoule dans un sol circule dans les interstices entre les grains qui forment des canaux de tailles variables. Les trajectoires réelles des filets liquides sont assez tortueuses (Fig. 4.a) et il n'est pas possible de définir les vitesses réelles de l'eau. Comme on s'intéresse essentiellement au mouvement global du fluide on définit des trajectoires fictives rectiligne (Fig.4.b, c) et des vitesses moyennes.

Soit q est le débit de l'eau s'écoulant dans un tube de sol au travers d'une surface d'aire totale S (grains + vides) telle que défini sur la figure 4.b. (25)

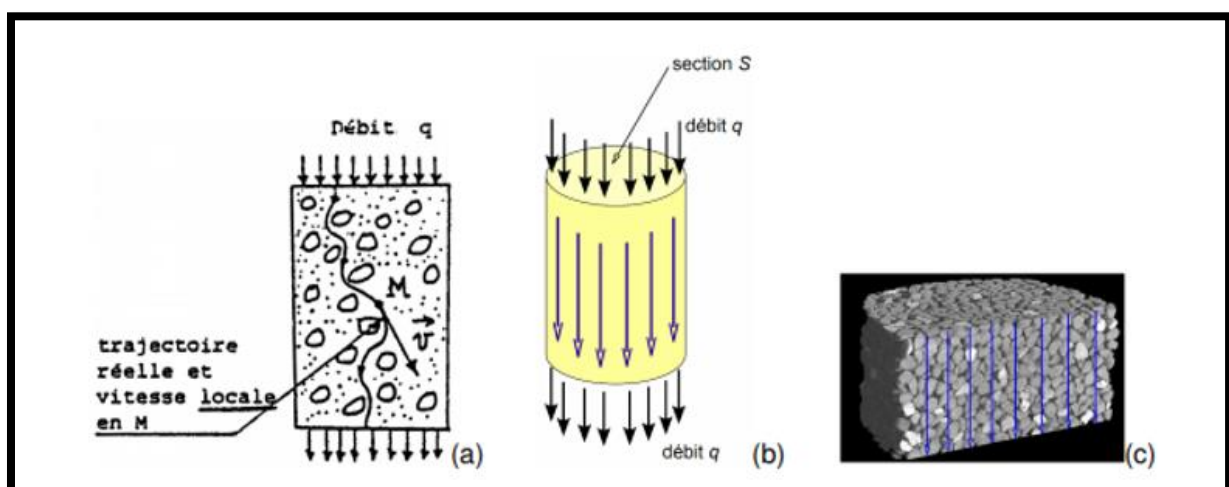


Fig II.4. (a) illustration de la vitesse réelle de l'eau s'écoulant à travers un sol ; (b & c) hypothèse d'un milieu homogène ou les filets d'eau sont rectiligne pour la définition de la vitesse fictive (vitesse de Darcy) (25)

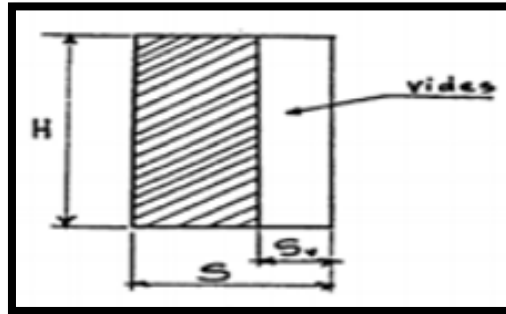


Fig II.5.Trajectoires réelles des filets liquides (28)

Par définition, la vitesse de décharge de l'eau dans le sol, notée v , est égale au rapport :

$$v = \frac{q}{S} \quad (\text{II .10})$$

En pratique, c'est la vitesse de décharge v (appelée aussi vitesse de percolation) qui est utilisée dans les calculs de débits. C'est une vitesse fictive, apparente.

En considérant que l'eau ne circule que dans les vides, on peut définir la vitesse moyenne réelle, notée $\langle\langle v' \rangle\rangle$, définie par : $v' = \frac{q}{S_v}$ (II .11)

Soit n la porosité du milieu : $n = \frac{S_v}{S} \Rightarrow S_v = n \cdot S$ (II .12)

Pour un cylindre de section S et de hauteur H (Fig.5)

$$S_v = n \cdot S \Rightarrow S_v = n \cdot S \quad (\text{II .13})$$

S = aire totale de la section, et S_v = aire occupée par les vides .

La vitesse réelle moyenne a donc pour valeur :

$$v' = \frac{q}{S_v} = \frac{q}{n \cdot S}; \quad (\text{II .14})$$

$$\text{D'où : } v' = \frac{v}{n} \quad (\text{II .15})$$

Dans toutes les expériences de mesure de perméabilité, on utilise la vitesse fictive v puisque c'est, en fait, la seule mesurable par l'intermédiaire de la mesure du débit. (28)

3.7 Loi de Darcy (1856) :

La loi de Darcy est la loi fondamentale de l'hydraulique des sols. Cette loi expérimentale exprime que la vitesse fictive v de l'eau et le gradient hydraulique i sont proportionnels : (25)

$$v = k \cdot i \quad (\text{II .16})$$

3.7.1 Le principe de la loi de Darcy :

La loi de Darcy est une loi physique qui exprime le débit d'un fluide incompressible filtrant au travers d'un milieu poreux supposé isotrope à l'échelle de travail. La circulation de ce fluide entre deux points est déterminée par la conductivité hydraulique ou le coefficient de perméabilité du substrat et par le gradient de pression du fluide. Dans le cas d'un cours d'eau ou d'un réservoir alimentant une nappe, ce gradient est lié à la hauteur de l'eau.

le débit Q d'un fluide incompressible qui s'écoule en régime stationnaire travers d'un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH .

$$Q = K * S * \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (\text{II .17})$$

avec :

- Q : le débit volumique (m^3/s) filtrant.
- K : la conductivité hydraulique ou « coefficient de perméabilité » du milieu poreux (m/s), qui dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide.
- S : la surface de la section étudiée (m^2)
- i : Le gradient hydraulique ($i = \Delta H/L$), où ΔH est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon, L est la longueur de l'échantillon. (21)

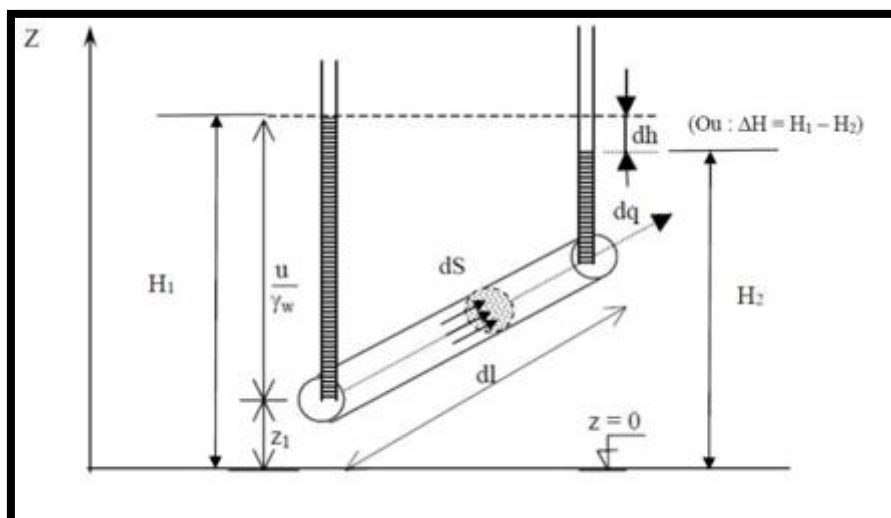


Fig II.6. Tube de courant (conduit élémentaire) - Expérience de Darcy -

Les expériences réalisées par **Reynolds** (1883) lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire et turbulent**.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un **nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds R_e** donné par la relation :

$$R_e = \frac{v d}{\mu / \rho} \quad (\text{II .18})$$

Ou,

v : la vitesse.

d : le diamètre.

ρ : la masse volumique du fluide.

μ : la viscosité dynamique.

La figure suivante représente la variation du gradient hydraulique dans un sol en fonction de la vitesse.

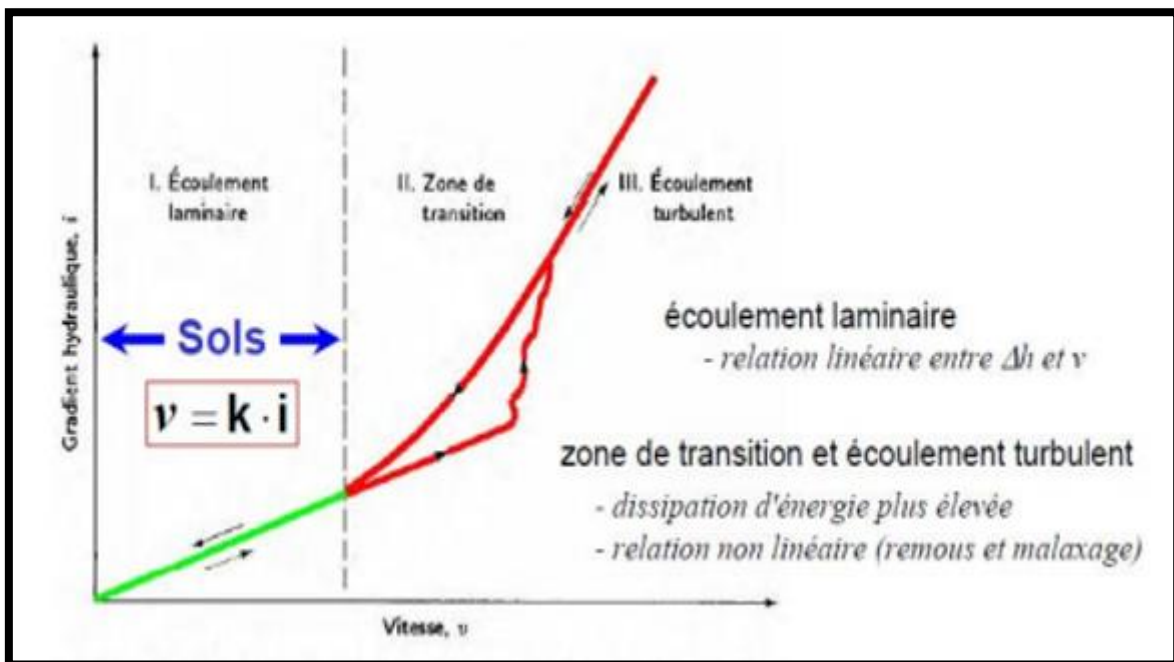


Fig II.7. Zones d'écoulement laminaire et d'écoulement turbulent. (D'après Taylor, 1948.)

3.7.2 Limite de validité de la loi de Darcy :

La validité de l'équation de Darcy n'est pas universelle pour toutes les conditions d'écoulement liquide dans les milieux poreux. Schneebeli (1956) a montré que la relation entre le débit et le gradient hydraulique n'est plus linéaire. Aux grandes vitesses d'écoulement, on constate une déviation par rapport à la loi de Darcy, le débit croît moins rapidement lorsque on augmente la perte de charge à des valeurs relativement élevées, cette déviation se manifeste d'autant plus vite que la granulométrie du sol devient plus grossière.

On peut aussi observer des phénomènes qui s'écartent de la loi de Darcy à d'autre extrémité de la gamme de vitesse d'écoulement notamment aux faibles gradients et dans les petits pores (sols très peu perméables, argiles).

La loi de Darcy n'est valable que dans les conditions suivantes :

- milieu homogène isotrope,
- écoulement en régime laminaire,
- écoulement permanent. (24)

3.8 Perméabilité des sols :

3.8.1 Coefficient de perméabilité :

Le coefficient de proportionnalité k , entre la vitesse de décharge et le gradient hydraulique, a la dimension d'une vitesse (on l'exprime en cm/s ou m/s). La perméabilité est l'aptitude d'un milieu poreux (sol) à transmettre de l'eau ou d'autre fluide sous l'effet d'un gradient hydraulique. Le coefficient de perméabilité d'un sol est une caractéristique intrinsèque au sol, Ce coefficient dépend non seulement des propriétés du matériau poreux (de la granulométrie du sol, de sa nature et de sa structure) mais encore du fluide. (28)

La perméabilité varie beaucoup avec la nature du terrain. Le tableau 1 ci-après donne les intervalles de valeurs correspondant aux perméabilités de différents types de sol :

Tableau II.1. Ordre de grandeur de la perméabilité de différents types des sols (28)

| Type de sol | Ordre de grandeur de la perméabilité k en [m/s] | Degré de perméabilité |
|---------------------------------------|---|--------------------------|
| Graviers moyens à gros | $10^{-3} < k < 10^{-1}$ | Très élevé |
| Petits graviers, sable | $10^{-5} < k < 10^{-3}$ | Assez élevé |
| Sable très fin, sable limoneux, loess | $10^{-7} < k < 10^{-5}$ | Faible |
| Limon compact, argile silteuse | $10^{-9} < k < 10^{-7}$ | Très faible |
| Argile franche | $10^{-12} < k < 10^{-9}$ | Pratiquement imperméable |

3.8.2 Perméabilité moyenne équivalente des terrains stratifiés :

Dans le cas des terrains stratifiés, chaque couche a sa propre perméabilité qui influe sur la perméabilité d'ensemble du massif. Le terrain perméable d'épaisseur totale H et composé de (n) couches successives d'épaisseur (h1, h2,, hn) et de coefficient de perméabilité (k1, k2,, kn) respectivement. Un sol stratifié horizontalement en plusieurs couches homogènes et isotropes constitue un cas particulier de milieu hétérogène d'intérêt. Comme la conductivité hydraulique varie d'un horizon à l'autre, le comportement hydraulique un tel sol sera différent selon la direction de l'écoulement. L'écoulement vertical dans un tel sol est considéré comme un écoulement en série alors que l'écoulement horizontal est considéré comme un écoulement en parallèle. (31)

a) Écoulement en série (l'écoulement vertical) :

La conductivité hydraulique équivalente de tels sols peut être facilement déterminée. La figure suivante représente un écoulement en série.

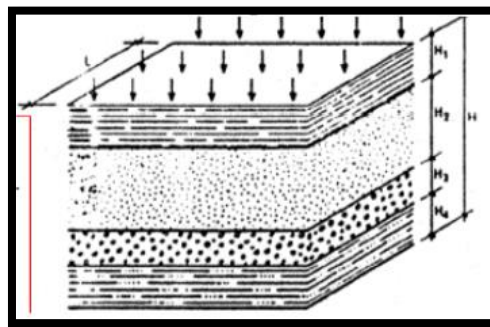


Fig II.8. Schéma d'un écoulement en série. (verticale) (31)

- le débit passe successivement dans chacune des couches,
- les débits dans chacune des couches sont égaux .
- la perte de charge dans le système est égale à la somme des pertes de charge dans chacune des couches,
- la conductivité hydraulique équivalente s'énonce :

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{k_i} \quad \text{ou encore :} \quad k_v = \frac{H}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{k_i}}$$

(II .19)

Kv = Conductivité hydraulique équivalente vertical.

b) Écoulement en parallèle (l'écoulement horizontal) :

Quant à l'écoulement parallèle, il est représenté schématiquement par la figure suivante :

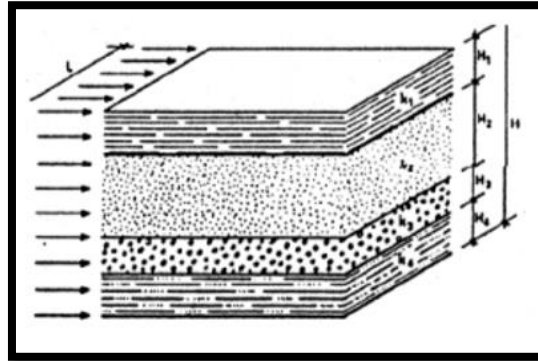


Fig II.9. Schéma d'un écoulement en parallèle. (horizontal) (31)

- le débit total est égale à la somme des débits de chaque couche .
- la perte de charge est la même pour toutes les couches des pertes de charge dans chacune des couches,
- la conductivité hydraulique équivalente s'énonce :

$$k_h = \frac{1}{H} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} k_i \cdot H_i$$

(II .20)

3.9 Réseau d'écoulement :

L'écoulement se caractérise par un réseau composé de lignes de courant, le long desquelles l'eau circule, et de courbes équipotentiels, c'est-à-dire à charge h constante. Les lignes de courant sont perpendiculaires aux lignes équipotentiels, le réseau d'écoulement est orthogonal. Les lignes de courant étant les trajectoires d'écoulement, en chaque point le vecteur vitesse d'écoulement y est tangent (Fig.10). Le même débit Δq existe entre deux lignes de courant voisines (tube de courant) ; entre deux équipotentiels voisines, on trouve la même perte de charges Δh . A partir des conditions limites connues et des éventuelles mesures de pression in situ, la reconstruction numérique du réseau est réalisable. (26)

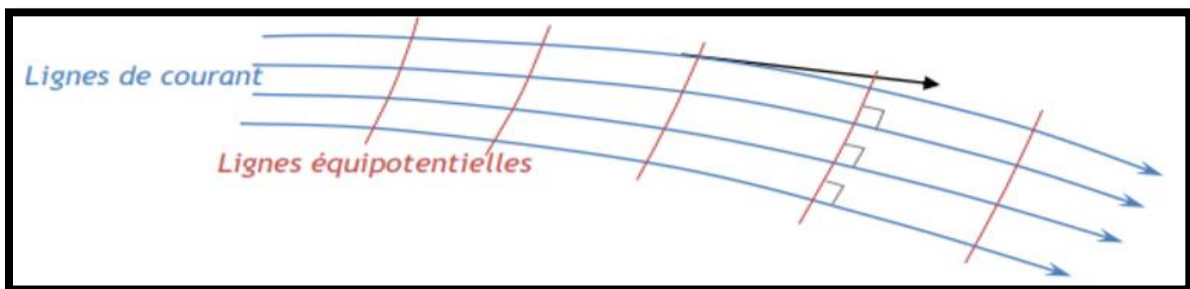


Fig II.10. Schématisation d'un réseau d'écoulement (26)

Le réseau d'écoulement Dans un sol, les molécules d'eau suivent une trajectoire sinueuse et irrégulière qu'elle est difficile à décrire.

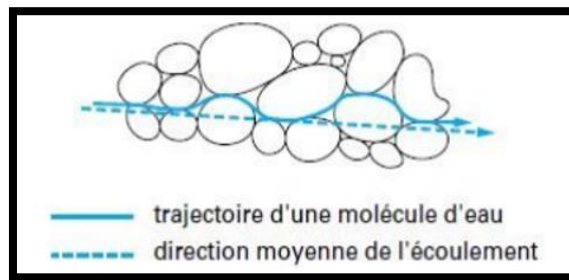


Fig II.11. La trajectoire de l'eau dans le sol

Deux lignes de courant voisines déterminent un tube de courant, l'eau y circule sans en sortir, le débit est donc constant. La détermination des réseaux d'écoulement est primordiale pour la compréhension de problèmes concrets comme le calcul des débits pour les barrages et les assèchements d'une zone de fouille, ou le calcul de la pression interstitielle nécessaire dans l'étude de la stabilité des talus, des barrages, murs de soutènement en terre ou rideaux de palplanche. Le gradient hydraulique i , est d'autant plus important que les lignes équipotentiels sont rapprochées et la différence de niveau Δh est grande. Dans le cas de la palplanche fichée dans un sol perméable constitué de sable (Fig.12), on remarque que les gradients hydrauliques les plus élevés sont situés à son pied. (26)

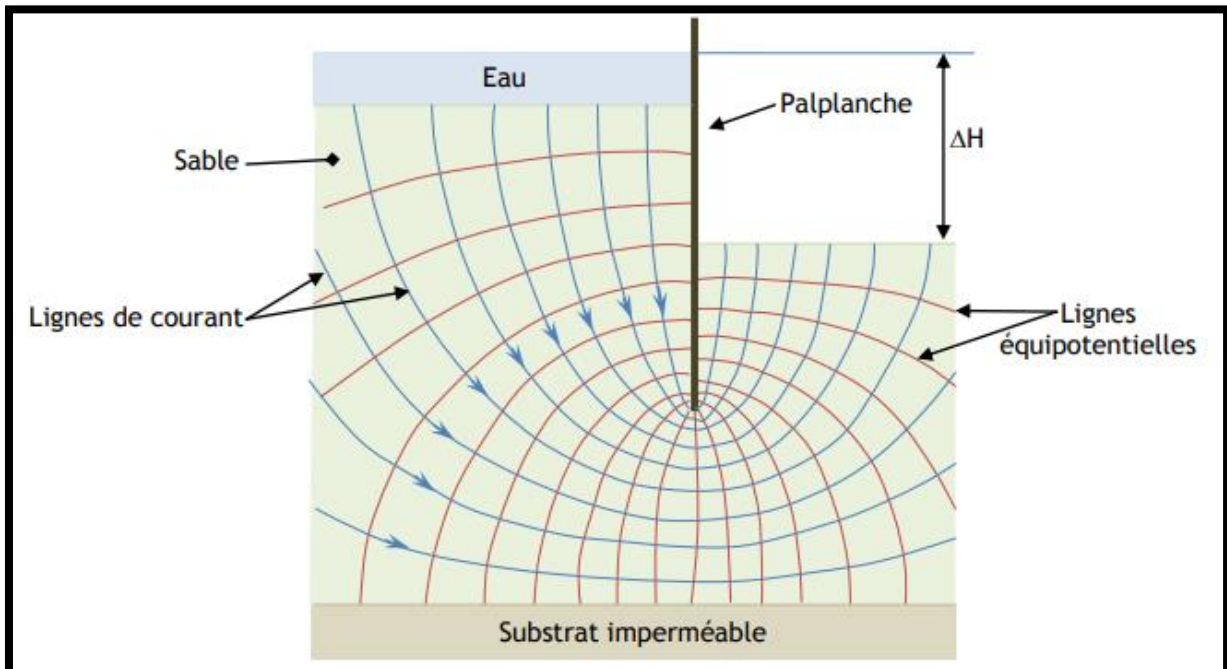


Fig II.12. Exemple d'un réseau hydraulique autour d'une palplanche (26)

3.9.1 Exploitation des réseaux d'écoulement :

Les réseaux d'écoulement permettent de résoudre deux problèmes pratiques très courants en Mécanique des Sols :

- le calcul des débits : barrages, assèchements d'une fouille, ...
- le calcul de la pression interstitielle utilisée pour l'étude de la stabilité des talus, des barrages en terre, des murs de soutènement, des rideaux de palplanches, ...

Considérons un réseau d'écoulement sous un rideau de palplanches (Fig.13). Le rideau est supposé de longueur infinie. Il est fiché dans une couche de limon surmontant une argile. Le rapport de perméabilité permet de considérer l'argile imperméable vis-à-vis du limon. (23)

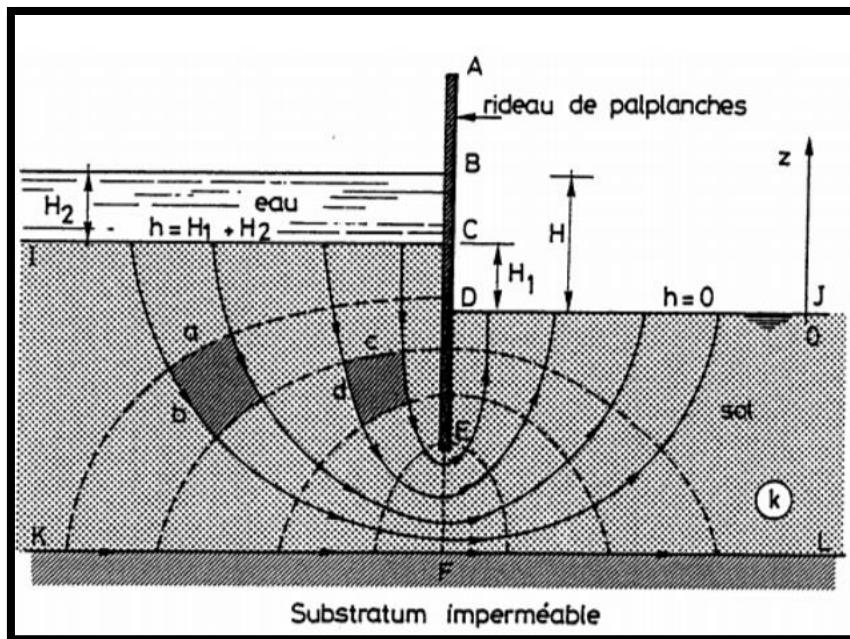


Fig II.13. Un réseau d'écoulement sous un rideau de palplanches (23)

Le plan de référence pour les altitudes et les charges hydrauliques est le plan DJ. Les conditions aux limites sont les suivantes :

- DJ : surface filtrante, ligne équipotentielle ($h = 0$)
- IC : surface filtrante, ligne équipotentielle ($h = H_1 + H_2$)
- CED : surface imperméable, ligne de courant
- KFL : surface imperméable, ligne de courant

3.9.2 Méthodes de détermination :

La loi de Darcy permet d'évaluer le débit connaissant le réseau d'écoulement. D'après la Fig. 14 les termes suivants sont définis comme suit : (29)

Nh: Nombre de chutes d'équipotentialité (nombre d'intervalles entre les lignes équipotentiellles),

Nt : Nombre de tubes de courant,

dq : Débit dans un canal d'écoulement (entre deux lignes de courant adjacentes),

Δh: Perte de charge entre deux lignes équipotentiellles adjacentes.

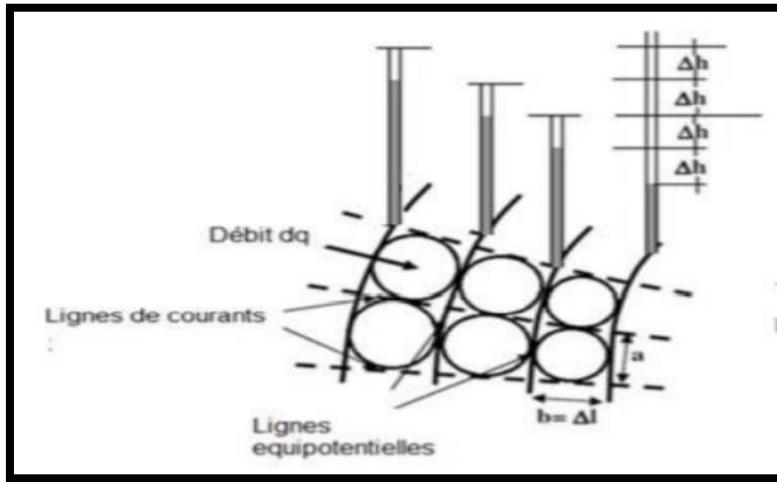


Fig II.14. Réseau d'écoulement (29)

Considérons une maille du réseau de dimension $a \times b$ par unité de largeur tel que : (29)

a = distance entre deux lignes de courants,

b = distances entre deux lignes équipotentiellles.

Les lignes de courant et les lignes équipotentiellles sont tracées de telle sorte qu'il y ait : (23)

- le même débit Δq entre deux lignes de courant voisines,
- le même intervalle de perte de charge Δh entre deux équipotentiellles voisines.

Les lignes du réseau forment des quadrilatères curvilignes. Considérons l'un d'eux de largeur a et de longueur b . Le débit de l'eau Δq à travers ce quadrilatère et sur une épaisseur unité est : (23)

$$\Delta q = v \cdot \Delta S = v \cdot a \cdot 1 \quad \text{avec} \quad v = k \cdot i = k \cdot \frac{\Delta h}{b} \quad (\text{II} .21)$$

$$\text{Soit :} \quad \Delta q = k \cdot \frac{\Delta h}{b} \cdot a \quad (\text{II} .22)$$

Si nous considérons un autre quadrilatère de largeur c et de longueur d , nous aurons de même :

$$\Delta q = k \cdot \frac{\Delta h}{d} \cdot c \quad (\text{II .23})$$

Donc : $a/b = c/d = \text{etc...}$ (même débit Δq)

Pour tous les quadrilatères le rapport de la largeur à la longueur est le même. Le problème revient donc à déterminer deux familles de courbes orthogonales, satisfaisant aux conditions aux limites et telles que les quadrilatères curvilignes formés soient semblables. Cette détermination peut être faite à la main par approximations successives en prenant le plus souvent

$$a/b = 1 \quad (\text{23})$$

3.9.3 Calcul du débit sous le rideau de palplanches :

Le calcul est généralement mené pour 1 m de longueur d'ouvrage. Entre les équipotentiels extrêmes ($h = H_1 + H_2$ et $h = 0$), il y a n_h intervalles (ici $n_h = 9$, Fig.13) donc l'intervalle de charge hydraulique Δh entre deux équipotentiels voisines est : (23)

$$\Delta h = \frac{H_1 + H_2}{n_h} = \frac{H}{n_h} \quad (\text{II .24}) \quad (H : \text{perte de charge totale})$$

On en déduit :

$$\Delta q = k \cdot \frac{a}{b} + \frac{H}{n_h} \quad (\text{II .25})$$

Si n_t est le nombre d'intervalles entre les lignes de courant extrêmes (nombre de tubes de courant, ici $n_t = 5$, Fig.13), le débit total est

$$q = n_t \cdot \Delta q \quad (\text{II .26})$$

$$\text{Soit : } q = k \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{n_t}{n_h} \cdot H \quad (\text{II .27})$$

pour un réseau à mailles « carrées » : $a = b$

$$q = k \cdot \frac{n_t}{n_h} \cdot H \quad (\text{II .28})$$

3.10 Forces d'écoulement :

Lorsqu'il y a un écoulement, il y a une perte de charge par dissipation d'énergie par frottements eau/grains du sol. En plus de la poussée d'Archimède, des forces dirigées dans le sens de l'écoulement apparaissent sur les grains du sol. (30)

La figure 15 montre le bilan des forces s'exerçant sur un volume élémentaire du sol, il correspond à trois forces : (30)

-Le poids : C'est la force verticale descendante $P = \gamma_{sat} \cdot \Delta V$ avec γ_{sat} le poids Volumique du sol saturé,

-La poussée d'Archimède : C'est la force verticale ascendante égale à $A = \gamma_w \cdot \Delta V$, avec γ_w , le poids volumique de l'eau (10kN/m³)

-La force d'écoulement : Dirigée dans le sens de l'écoulement, elle est égale à $j = \gamma_w \cdot i$. La stabilité des sols traversés par l'eau dépend de cette force d'écoulement qui est d'autant plus grande que la vitesse de circulation l'est. j est une force volumique et i le gradient hydraulique (sans dimension).

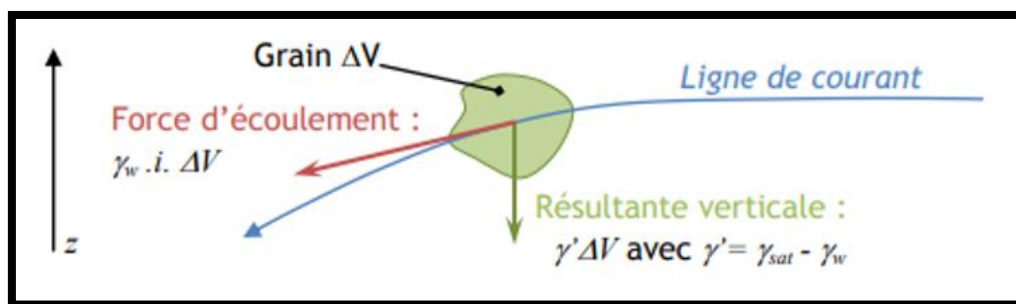


Fig II.15. Bilan des forces s'exerçant sur un volume élémentaire du sol (26)

Les forces d'écoulement sont souvent de même ordre de grandeur que la résultante de pesanteur et de poussée d'Archimède. Elles sont donc à prendre en compte dans les calculs de stabilité des ouvrages. (30)

4. Action de l'eau sur un rideau de palplanches :

L'action de l'eau sur un écran de soutènement se manifeste de deux façons :

- Directement par des pressions hydrauliques appliquées sur les faces de l'écran. Ces pressions sont déterminées par l'étude de l'écoulement dans le sol ou des phénomènes de consolidation.
- Indirectement par une modification des forces de pression de terres passive (butée) et active (poussée). L'écoulement augmente les contraintes effectives à l'amont du rideau, donc accroît la poussée, et diminue les contraintes effectives à l'aval, donc réduit la butée. L'écoulement a donc un effet défavorable sur la stabilité du rideau. (32)

5. Écoulements permanents autour d'un rideau de palplanches :

La réalisation d'un écran de soutènement modifie le régime hydraulique naturel. Lorsque le régime permanent est atteint, deux types d'écoulement peuvent s'établir dans un sol homogène selon leur mode d'alimentation d'après Houy (1986) : (32)

- Écoulement à alimentation vertical, qui se produit généralement dans le cas des rideaux en site fluvial ou maritime (Fig.16.a) ;
- Écoulement à alimentation horizontale, qui correspond au cas des rideaux de soutènement en site terrestre (Fig.16.b). La présence de l'écran risque alors de faire monter le niveau de l'eau à l'amont et de le faire baisser à l'aval.

Pour un massif de sol hétérogène, le type d'écoulement est difficile à prévoir. Toutefois, dans tous les cas, l'écoulement vers l'aval au voisinage du rideau est vertical ascendant

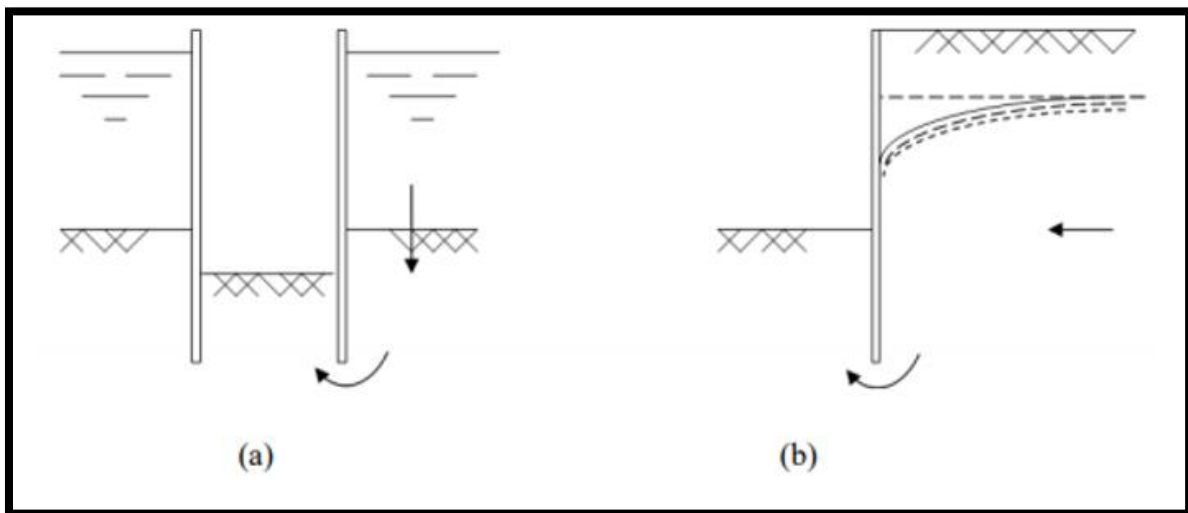


Fig II.16. Types d'écoulement permanent derrière un rideau de palplanches : (a) alimentation verticale ;(b) alimentation horizontale [d'après Houy (1986)] (32)

Lorsque le pied du rideau est encastré dans une couche de sol imperméable, il n'y a pas d'écoulement possible. Les pressions hydrauliques qui agissent de part et d'autre du rideau sont des pressions hydrostatiques. Lorsque l'excavation est réalisée sous le niveau de la nappe phréatique, ou en site aquatique, la stabilité de la fouille peut ne pas être assurée à cause de l'écoulement de l'eau les conditions les plus défavorable sont alors rencontrées dans le cas des sables lâches. Pour éviter ce type de difficultés, la nappe phréatique est rabattue par des systèmes de drainage ou de pompage situés à proximité de l'ouvrage (ce qui pose d'autres problèmes de tassement des terrains situés autour du chantier). (32)

6. Les mécanismes de l'érosion interne :

6.1 La boullance :

Dans un écoulement la composante verticale ascendante de la force d'écoulement génère un gradient hydraulique i vertical ascendant. Cette composante verticale de la force d'écoulement s'oppose directement à la pesanteur (figure 17) ; avec i suffisamment élevé, les grains sont entraînés par l'eau : c'est le phénomène de boullance. (26)

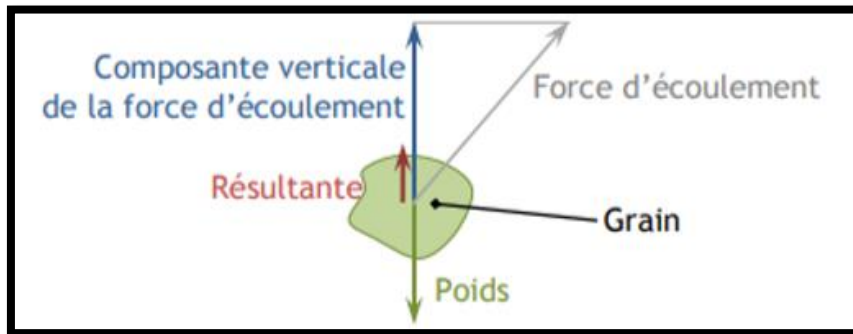


Fig II.17. Les forces mises en jeu lors de la boullance (26)

On définit un gradient hydraulique critique, i_c , pour lequel la résultante des forces est nulle et donc les grains du sol à la limite d'être entraînés :

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (\text{II .29})$$

Il est nécessaire de vérifier que les gradients hydrauliques ascendants sont inférieurs au gradient critique lors de construction de barrage ou digue en terre, mais aussi lors de fouille dans un sol ou de construction sur un sol où ce phénomène est possible.

L'arrachement des grains est la première phase de l'érosion interne. Il crée de nouvelles conditions d'écoulement éventuellement plus menaçantes : augmentation des vides, modification des assemblages de composition des sols... Le sol devient plus décharné et plus perméable, permettant à l'eau de circuler à vitesse plus importante et/ou dans de nouveaux écoulements. (26)

La boullance s'observe en particulier, dans des situations où le gradient hydraulique est temporairement augmenté au droit d'une zone d'étanchéité : construction à sec derrière un batardeau, mise en chômage d'un canal, assèchement d'une écluse ou pied d'un écran de soutènement étanche (figure 18). (33)

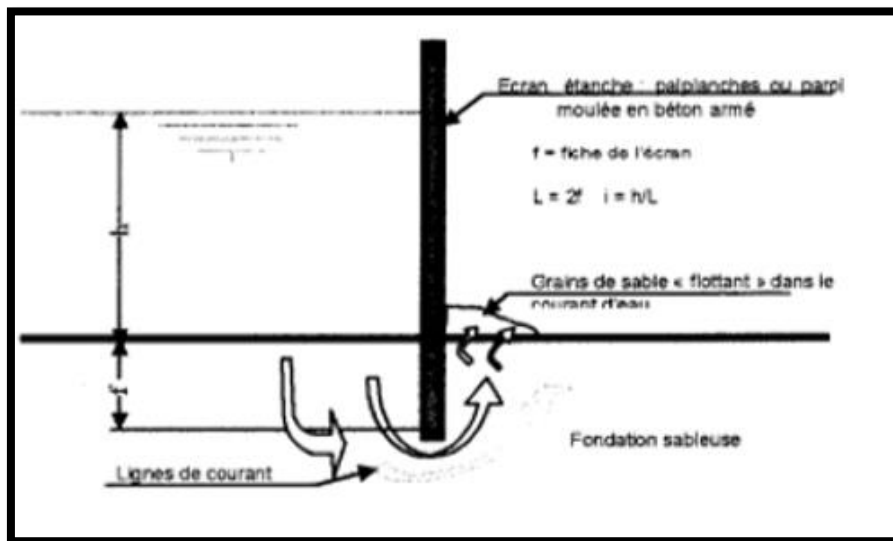


Fig II.18. Développement d'un phénomène de boulangerie sous un rideau de palplanches (33)

6.2 Phénomène de renard hydraulique :

Le phénomène d'arrachement comme la boulangerie est susceptible d'être accompagné d'un transport important des grains, déstabilisant les sols. Le phénomène de renard apparaît dans des écoulements en milieu perméable comme les barrages ou digues en terre, dans la direction d'écoulement de l'amont vers l'aval. Localement les vitesses d'écoulement augmentant peuvent atteindre le seuil d'entraînement des grains fins qui progressivement va « raviner » les lignes de courant de l'intérieur.

Les éléments plus importants vont alors être entraînés, l'érosion progresse de manière régressive le long d'une ligne de courant, formant un conduit où s'engouffre l'eau de manière irréversible (figure 19).

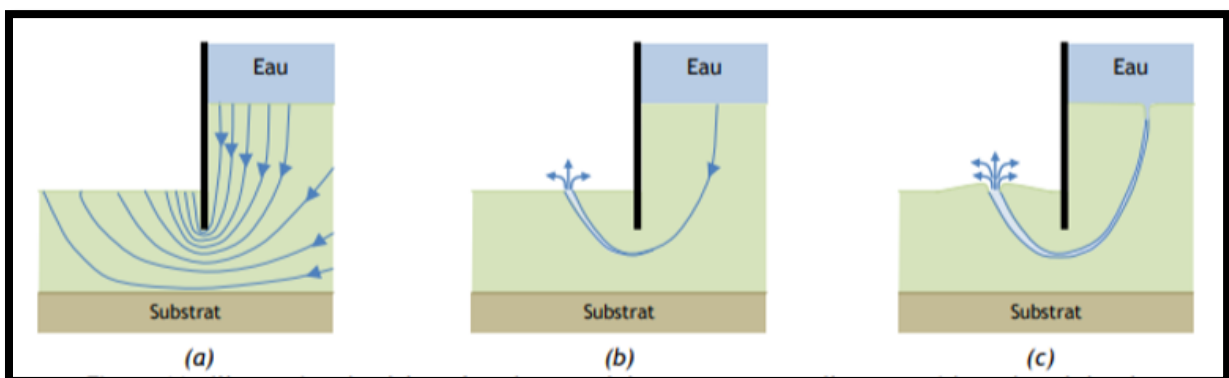


Fig II.19. Illustration du phénomène de renard dans une retenue d'eau par rideau de palplanche (a) Réseau d'écoulement sans perturbation, (b) Erosion interne en début de phénomène, le conduit s'élargit depuis la sortie, (c) renard hydraulique développé, rupture proche. (26)

Le développement d'un renard hydraulique est conditionné par le gradient hydraulique au sein de la structure, de la différence de niveau Δh et de la propension de la structure à libérer des particules. Ainsi, lorsque l'écoulement de l'eau dans la structure est long, l'eau ne développe pas la force pour pouvoir emporter des grains du sol. De même, si les grains du sol ont une grande cohésion (comme pour l'argile) il n'y a pas de transport de grain. Alors que dans un massif sableux qui présente une grande différence de niveau d'eau amont-aval et une faible largeur de remblai la probabilité du développement d'un renard hydraulique est importante. (26)

7. Conclusion :

L'utilisation généralisée des rideaux de palplanches dans le domaine de Génie Civil, d'hydraulique et de travaux publics (excavation, blindages, caissons de structures, barrages, stabilisation des pentes ...etc.) nécessite des précautions conceptuelles rigoureuses et ce en vue des enjeux sécuritaires et économiques que peuvent engendrer les pathologies y associées.

Ces enjeux dépendent à la fois des caractéristiques des palplanches, celles du terrain dont lesquels elles sont battues et des conditions d'écoulements, notamment autour des fiches.

L'ensemble de ces aspects ont été traités dans ce chapitre pour mettre en valeur l'influence des paramètres conjugués relatifs à la conception des rideaux de palplanches et à l'environnement dans lequel, ces rideaux sont exécutés.

Chapitre III : Analyse paramétrée des écoulements autour des rideaux de palplanches

1. Contextualisation du travail dans le cadre mémoire :

L'action de l'eau sur un écran de soutènement se manifeste soit par des pressions hydrauliques appliquées sur les faces de l'écran, soit par une modification des forces de pression de terres passive (butée) et active (poussée). L'écoulements augmente les contraintes effectives à l'aval, donc réduit la butée.

Lorsque le pied du rideau est réalisé dans une couche de sol imperméable, il n'y a pas d'écoulement possible. Les pressions hydrauliques qui agissent de part et d'autre du rideau sont des pressions hydrostatiques. en présence de nappe phréatique, ou en site aquatique, la stabilité peut ne pas être assurée à cause de l'écoulement de l'eau. Les conditions les plus défavorable sont alors rencontré dans le cas des sables lâches. la réalisation d'un écran de soutènement modifie le régime hydraulique naturel.

Toutes ces conditions dépendent étroitement des critères conceptuels, notamment les profondeurs d'ancrage des rideaux, des caractéristiques des sols avoisinants, des conditions de charges amont et aval ainsi que des conditions d'écoulement autour des rideaux.

La présente analyse intègre ces paramètres pour évaluer les conditions sécuritaires relatives à la conception des rideaux de palplanches. Elle est menée avec l'étude des pressions interstitielles, des gradients hydrauliques, des intensités de vitesse et des débits de percolation.

Pour atteindre ces objectifs, un modèle numérique guidé par le code de calcul Geostudio a été élaboré en fonction des situations ci-dessous :

- Influence de la profondeur d'ancrage des rideaux,
- Influence des caractéristiques des sols atténuants aux rideaux, notamment leur perméabilité,
- Influence des conditions de charges de part et d'autre des rideaux.

2. Présentation du Logiciel :

2.1 Consistance :

GEOSTUDIO est un logiciel de modélisation destiné aux études géotechnique et géologique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les écoulements des eaux autour les palplanches et d'autres problèmes liés à la géotechnique et géologique. (34)

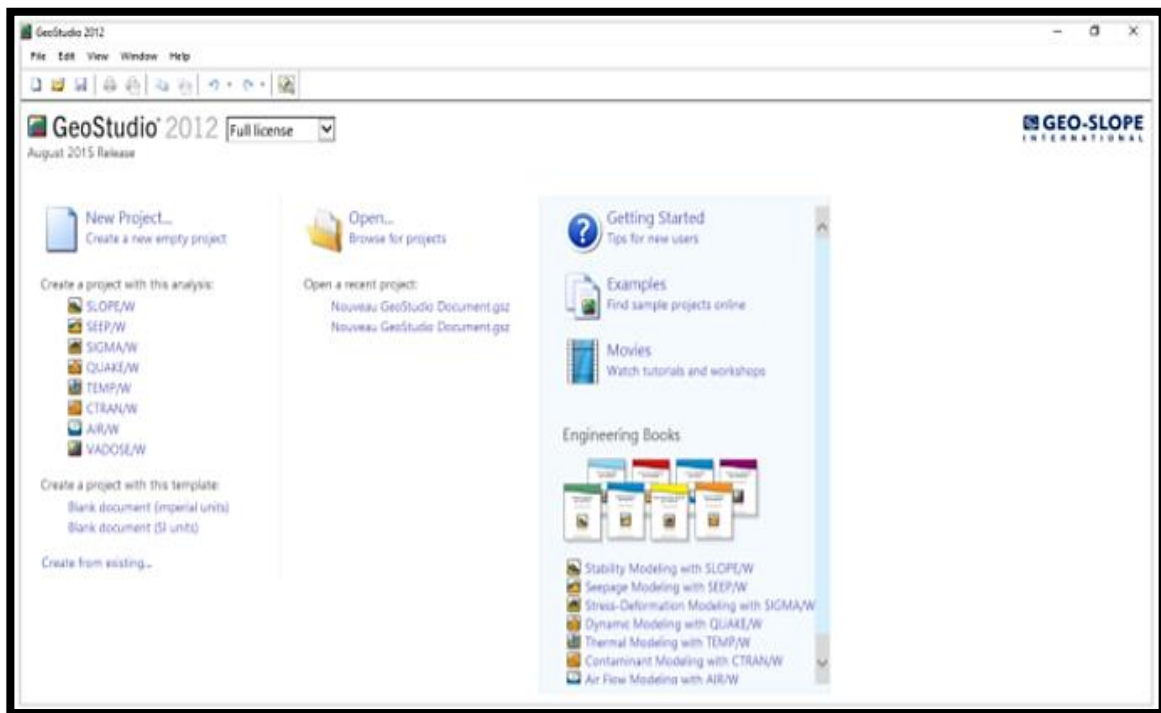


Fig III.1. Présentation du logiciel GEOSTUDIO 2012

Il permet de :

- Combiner les analyses dans un seul projet intégré
- Dessiner directement la géométrie ou importer des fichiers CAO
- Résoudre plusieurs analyses simultanément.
- Interpréter les résultats avec visualisation et graphiques. (29)

Le choix de ce logiciel a été motivé par sa diversité du fait qu'il est constitué d'une suite de différents modules :(SLOPE/W, SEEP/W, QUAKE/W, SIGMA/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W et VADOSE/W) qui peuvent être utilisés pour des problèmes variés (évaluation des barrages et des digues, infiltration, succion, séisme, liquéfaction...), par sa performance, sa souplesse, etc. (35)









| | | |
|---|------------------|---|
|  | SLOPE/W™ | Slope stability analysis. |
|  | SEEP/W™ | Groundwater seepage analysis. |
|  | SIGMA/W™ | Stress-deformation analysis. |
|  | QUAKE/W™ | Dynamic earthquake analysis. |
|  | TEMP/W™ | Thermal analysis. |
|  | CTRAN/W™ | Contaminant transport analysis. |
|  | AIR/W™ | Air flow analysis. |
|  | VADOSE/W™ | Vadose zone and soil cover analysis. |

Fig III.2. Les modules du logiciel Geostudio 2012 (34)

2.2 Objectif des principaux modules :

SEEP/W : Permet de calculer les infiltrations des eaux (par la méthode des éléments finis).

SIGMA/W : Permet d'analyser les problèmes de la relation contraintes –déformations (par la méthode des éléments finis)

QUAKE/W : Permet de définir le comportement d'un terrain sous l'effet d'un séisme (par la méthode des éléments finis).

TEMP/W : Permet d'analyser les problèmes géotechniques du sol (par la méthode des éléments finis). Et autres logiciels.

SLOPE/W : Permet de calculer le coefficient de sécurité d'un talus naturel ou artificiel par les méthodes d'analyses classiques. (34)

CTRAN/W : modélisation du mouvement d'une contamination dans des matériaux poreux.

AIR/W : analyse des interactions entre l'eau et l'air du sol dans des matériaux poreux.

VADOSE/W : analyse de flux en dessous de la surface du sol, dans la zone non saturée et qui rejoignent le régime de l'eau dans le sol. (35)

3. Consistance de la modélisation :

Les cas de modélisation traités sont relatifs aux conditions ci-dessous :

- variation de la profondeur de la fiche de rideau de 1,3,6 et 9m.
- considération de deux types de sols atténuants $K= 10^{-3}$ m/s et $K= 10^{-5}$ m/s.
- considération de gradients de charges entre l'amont et l'aval de rideau.

3.1 Géométrie du modèle :

Le projet est symétrique il sera modélisé par un modèle géométrique plan (2D) de 50 m de largeur sur 20 m de profondeur avec 10 m d'hauteur d'eau côté amont. Et un rideau de palplanche de 20 m d'hauteur et d'une épaisseur 0.3 m.

3.2 Caractéristique de matériau :

Tableau III.1. Propriétés des sols utilisés pour la modélisation.

| Nature de matériau | K_s à saturation (m/s) | Teneur en eau résiduelle | Teneur en eau à saturation |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Matériau 1 | 10^{-3} | 0,045 | 0,43 |
| Matériau 2 | 10^{-5} | 0,045 | 0,43 |

4. Résultats de la modélisation :

4.1. Influence de la profondeur de la fiche :

Les figures de 3 à 33 donnent respectivement pour chaque cas relatifs à la variation de la profondeur de la fiche de rideau de palplanche, pour un sol de perméabilité $K= 10^{-3}m/s$ et un gradient de charge nul entre l'amont et l'aval du rideau :

4.1.1. Cas 1 : sans ancrage de la fiche :

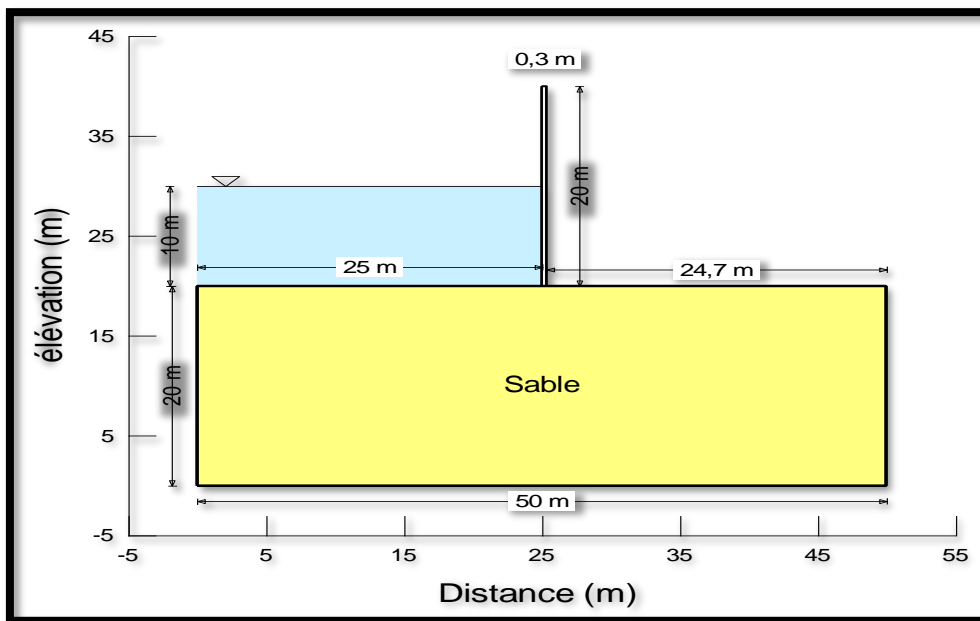


Fig III.3. Modèle servant à la modélisation (sans ancrage)

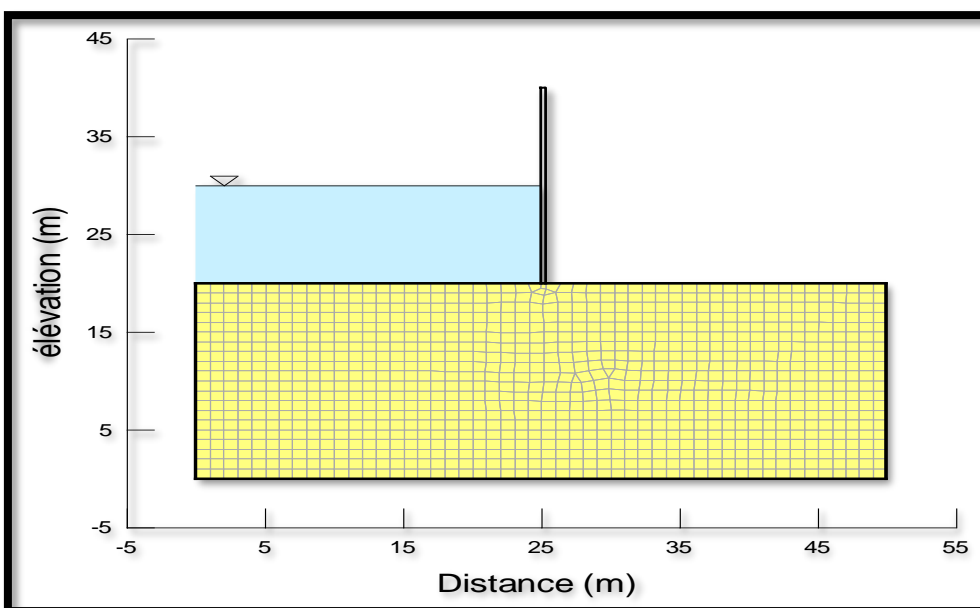


Fig III.4. Modèle de maillage (sans ancrage)

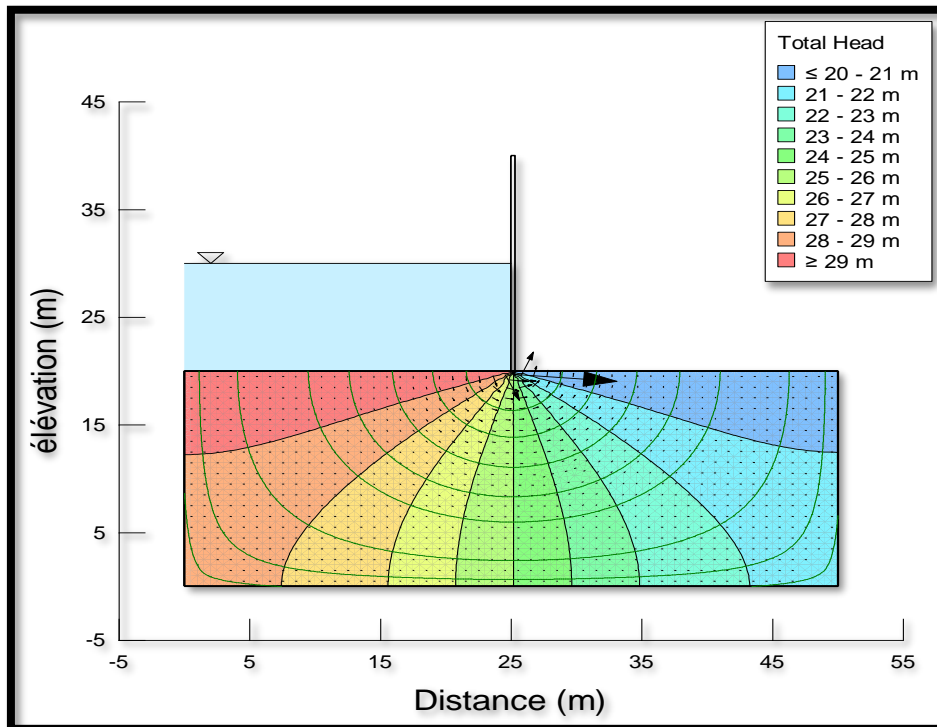


Fig III.5. Réseau d'écoulement (sans ancrage)

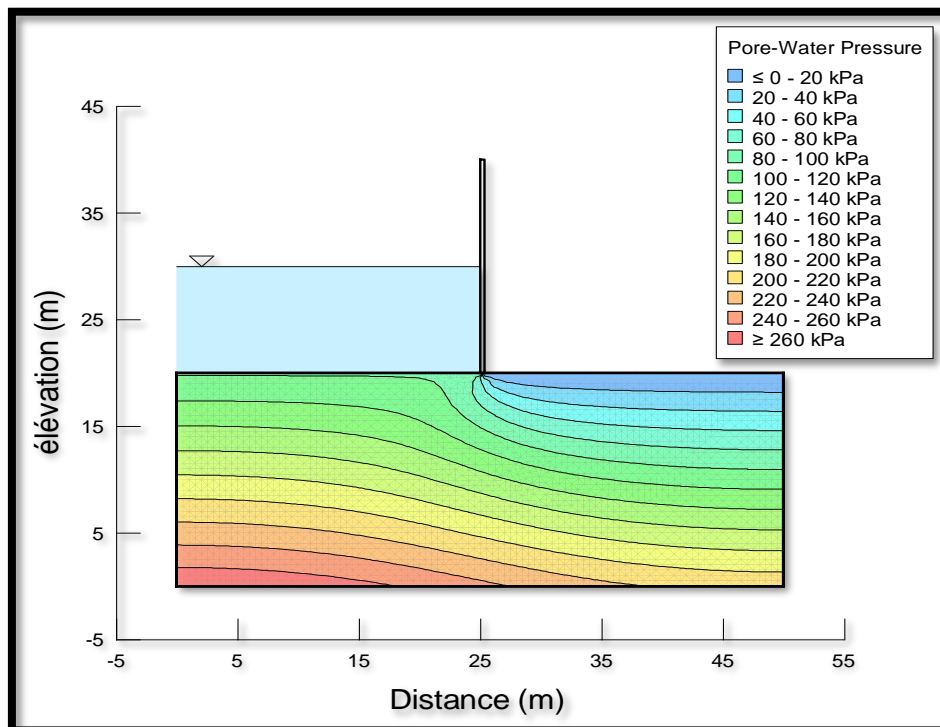


Fig III.6. Variations des pressions d'eau interstitielles (sans ancrage)

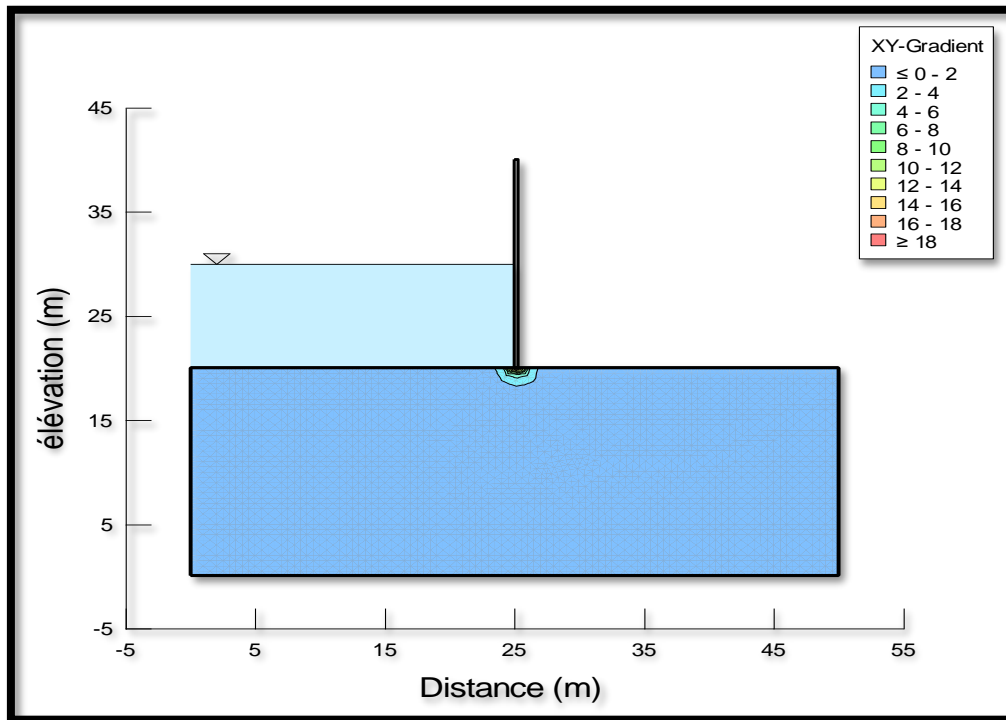


Fig III.7. Variations des gradients hydrauliques (sans ancrage)

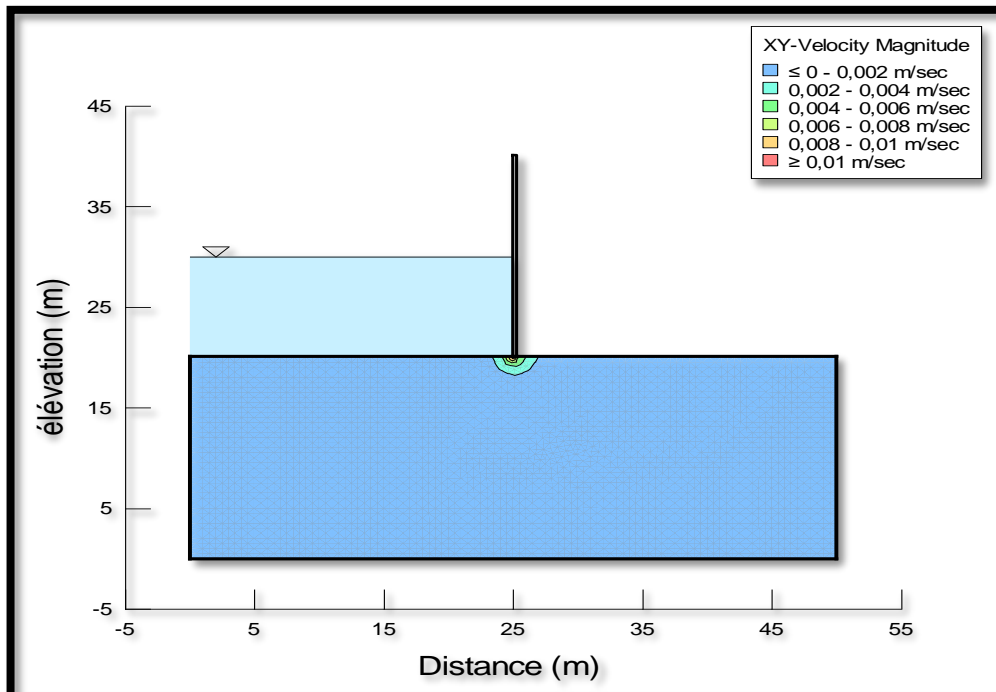


Fig III.8. Variations des intensités de vitesses (sans ancrage)

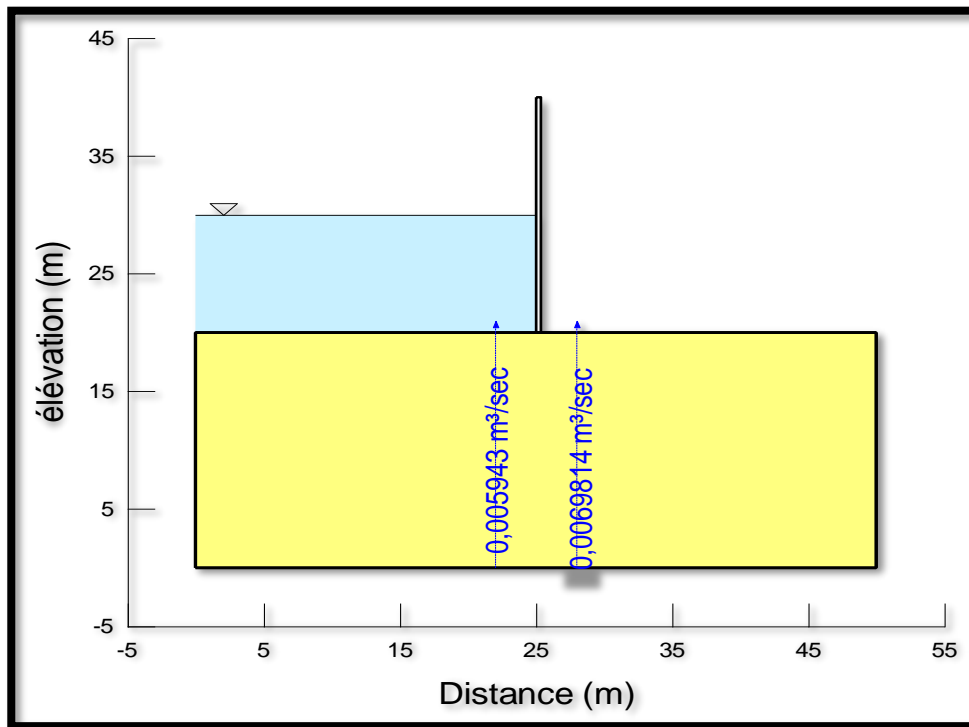


Fig III.9. Variations de débit (sans ancrage)

4.1.2. Cas 2 : Ancrage à 1m :

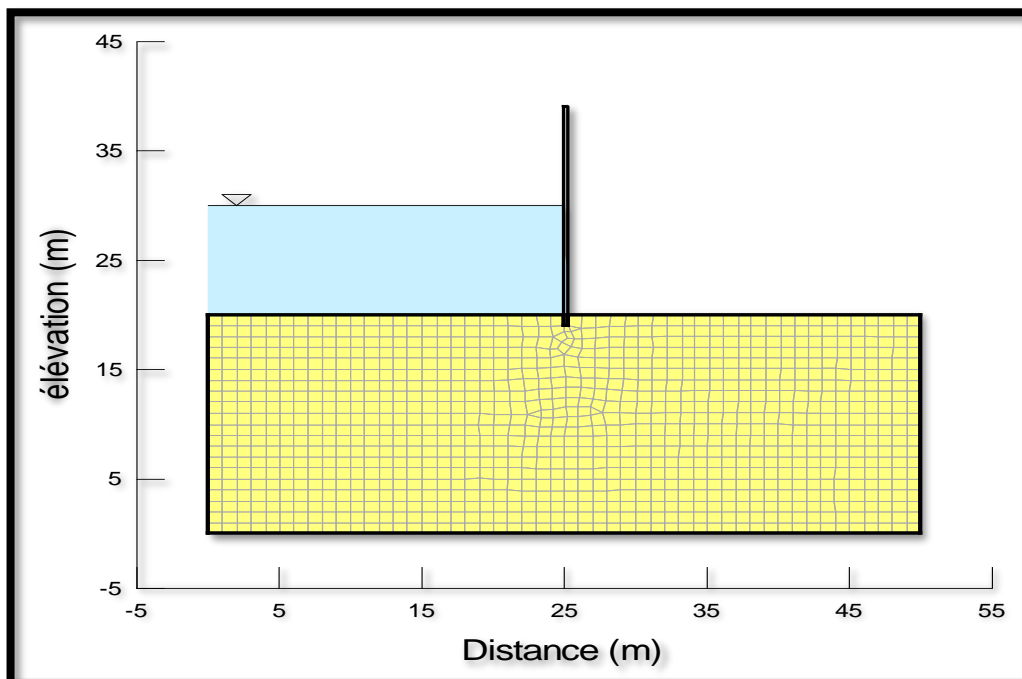


Fig III.10. Modèle de maillage (ancrage à 1m)

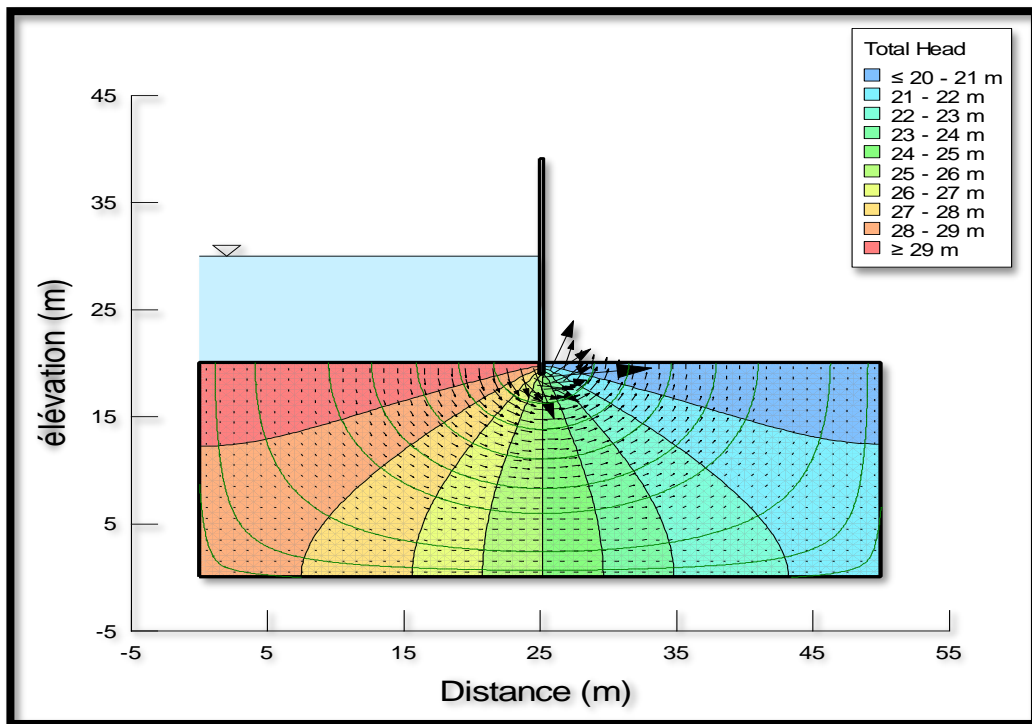


Fig III.11. Réseau d'écoulement (ancrage à 1m)

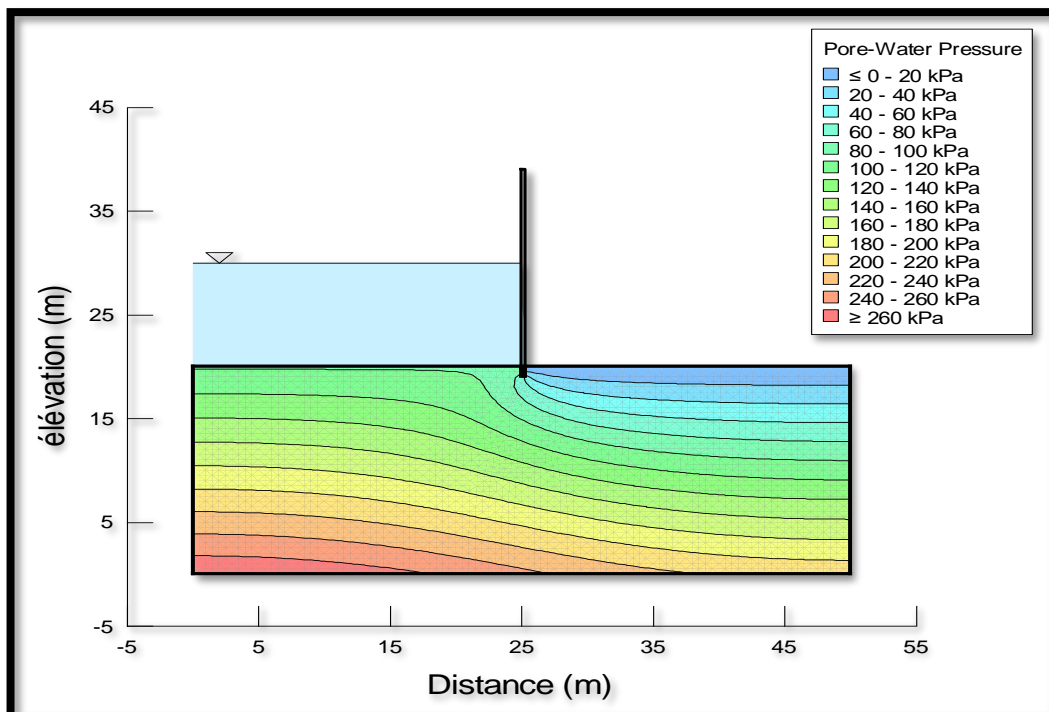


Fig III.12. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 1m)

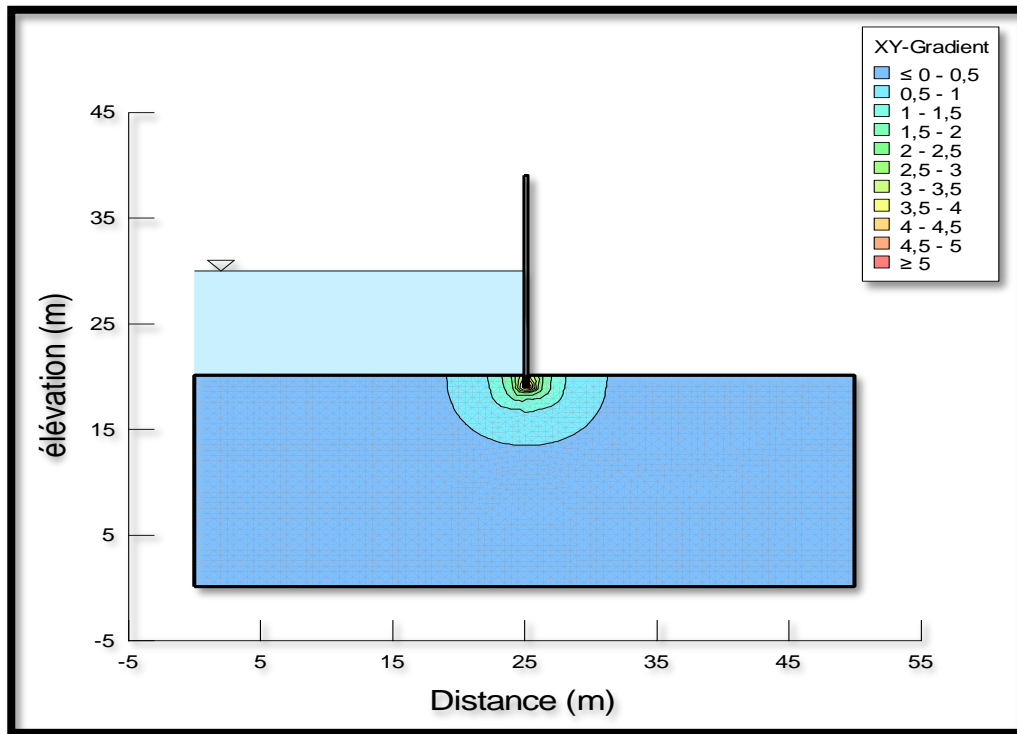


Fig III.13. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 1m)

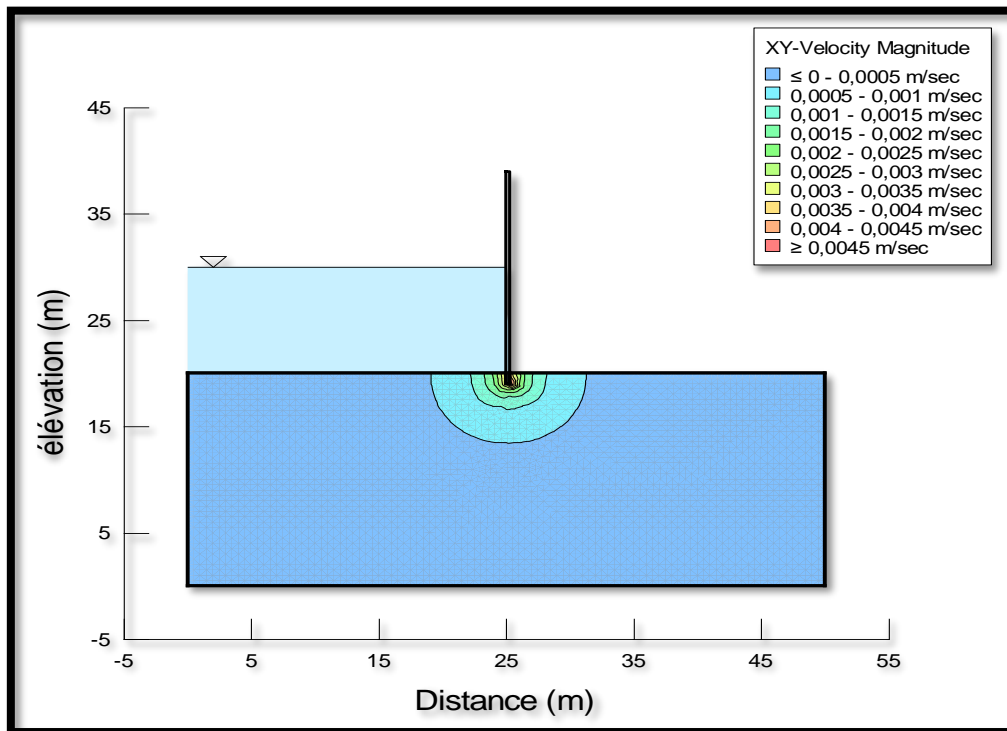


Fig III.14. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 1m)

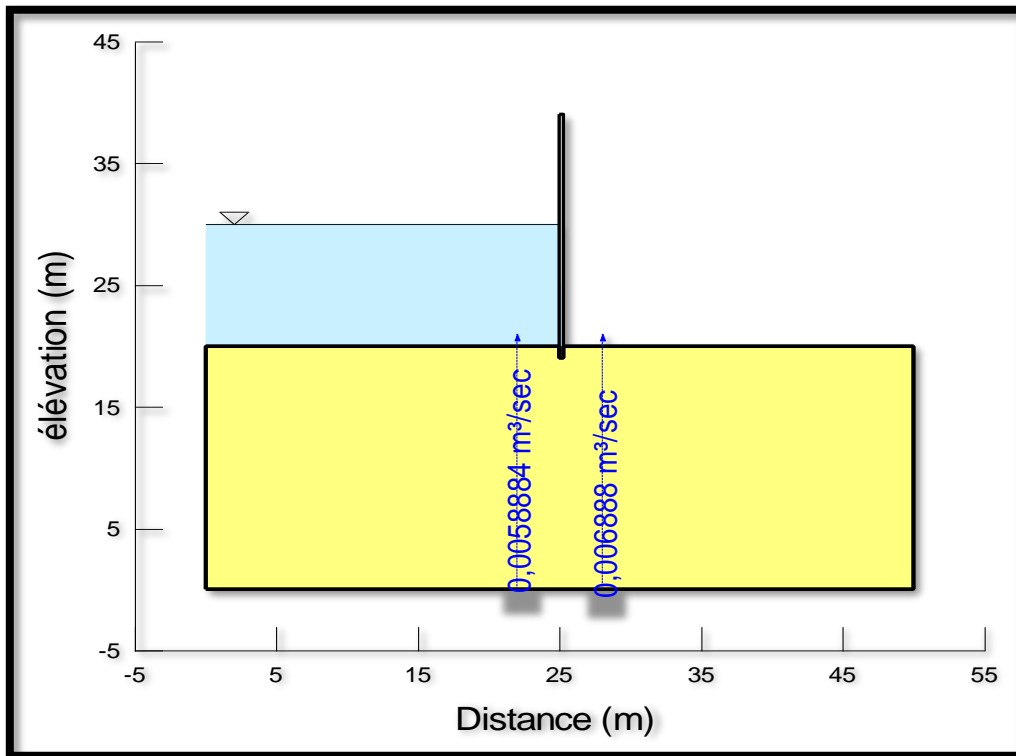


Fig III.15. Variations de débit (ancrage à 1m)

4.1.3. Cas 3 : Ancrage à 3m :

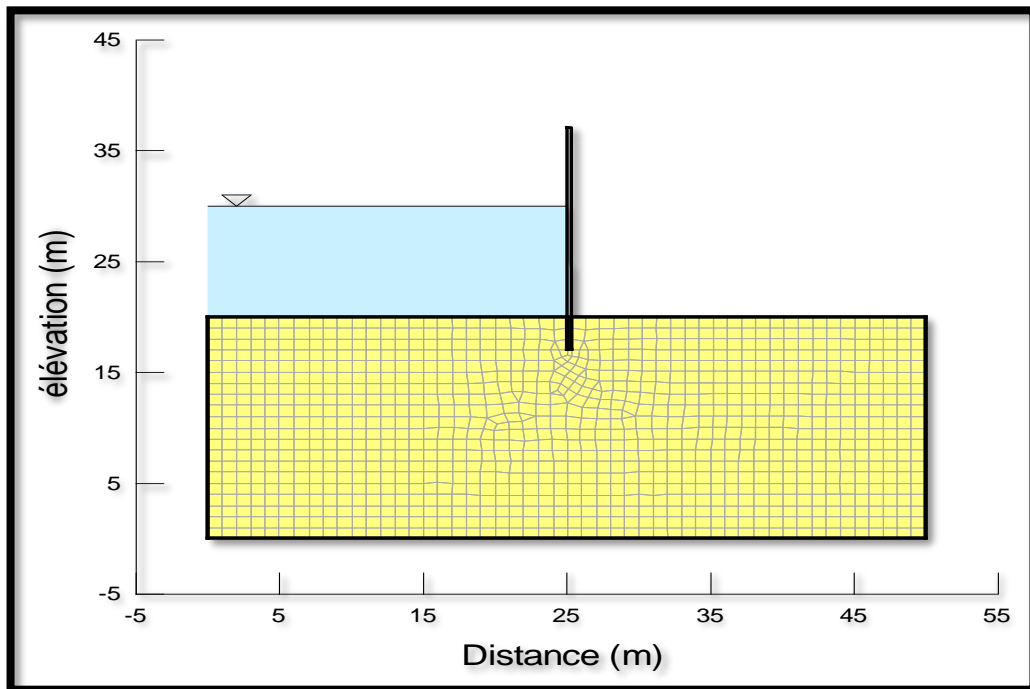


Fig III.16. Modèle de maillage (ancrage à 3m)

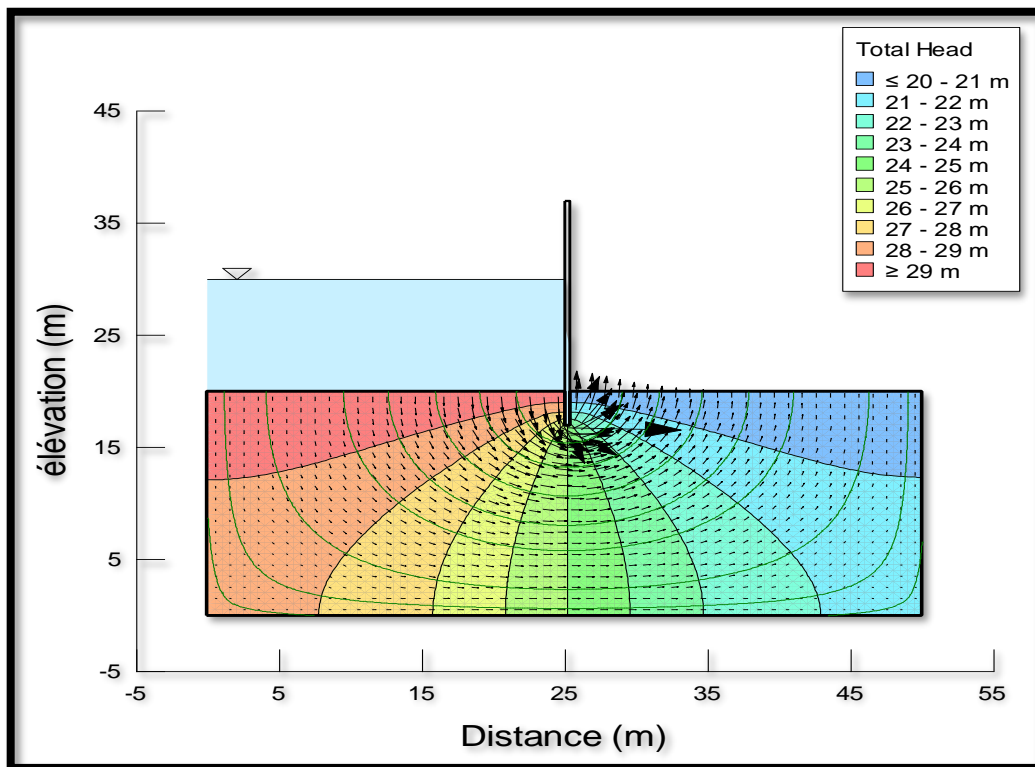


Fig III.17. Réseau d'écoulement (ancrage à 3m)

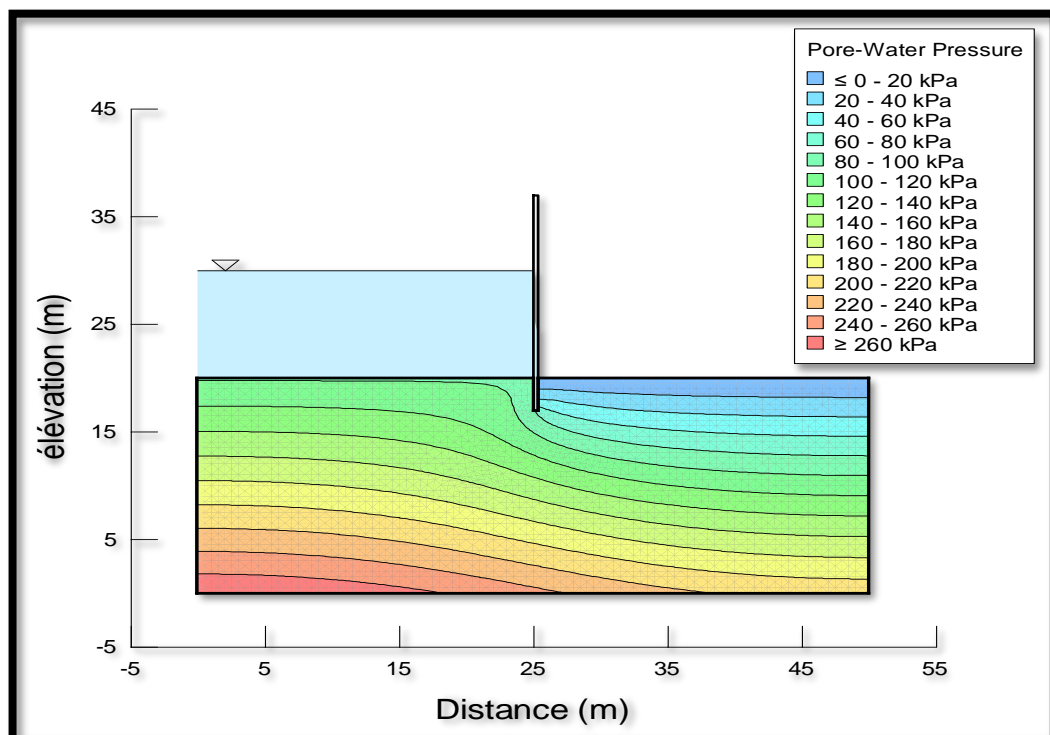


Fig III.18. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 3m)

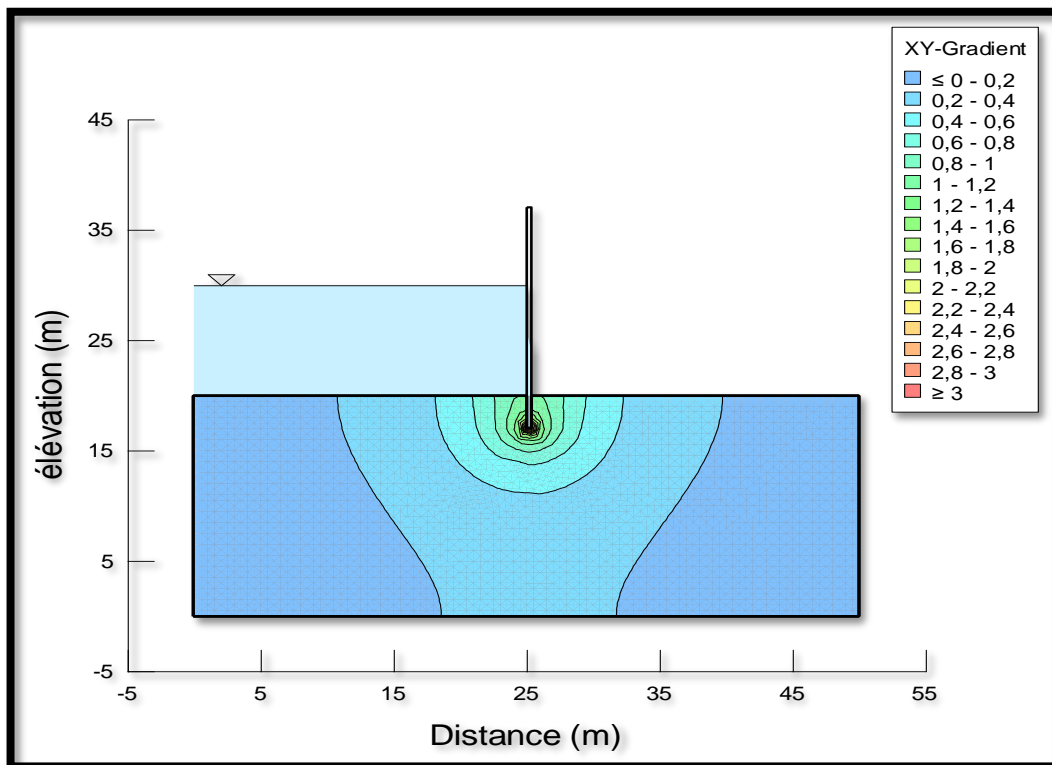


Fig III.19. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 3m)

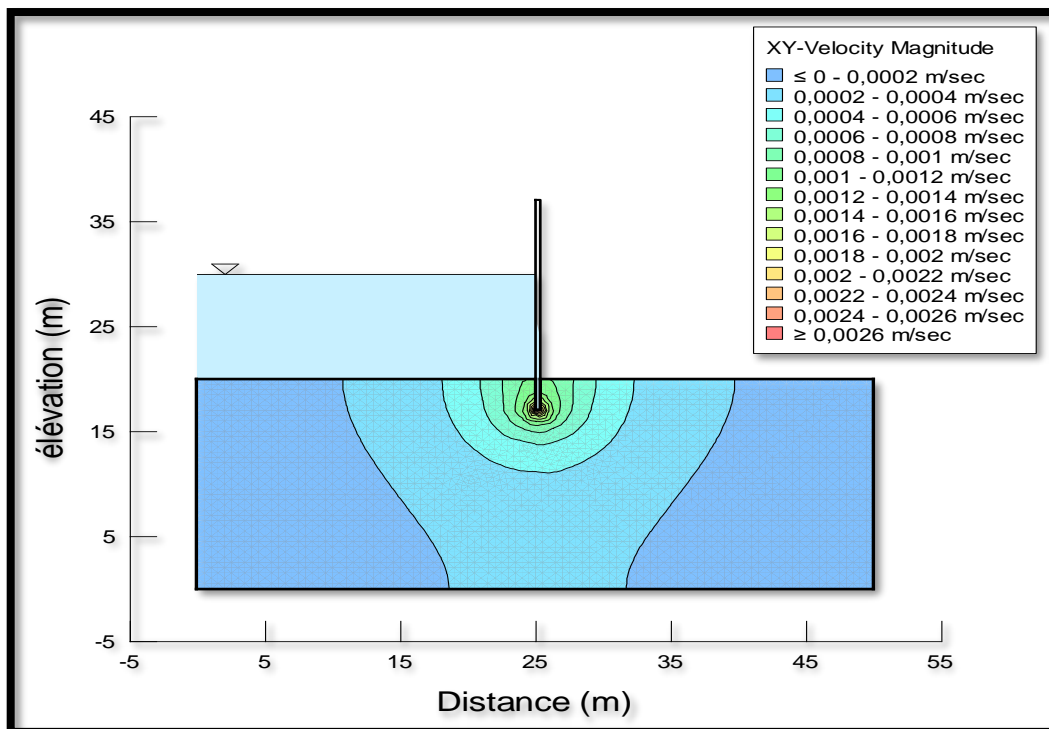


Fig III.20. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 3m)

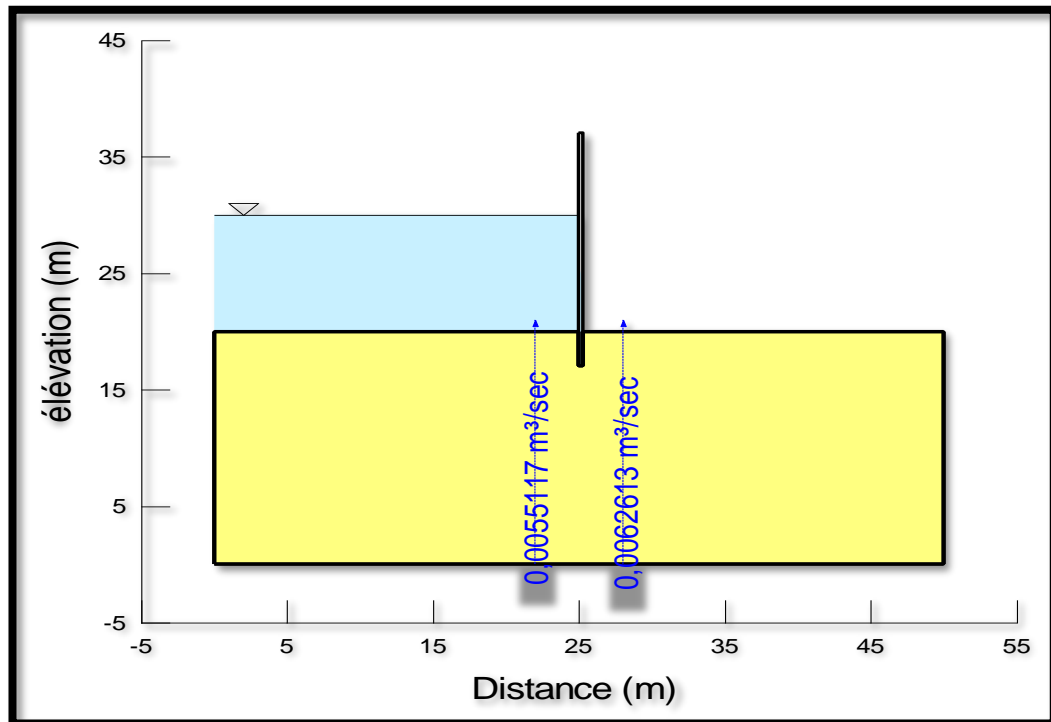


Fig III.21. Variations de débit (ancrage à 3m)

4.1.4. Cas 4 : Ancrage à 6m :

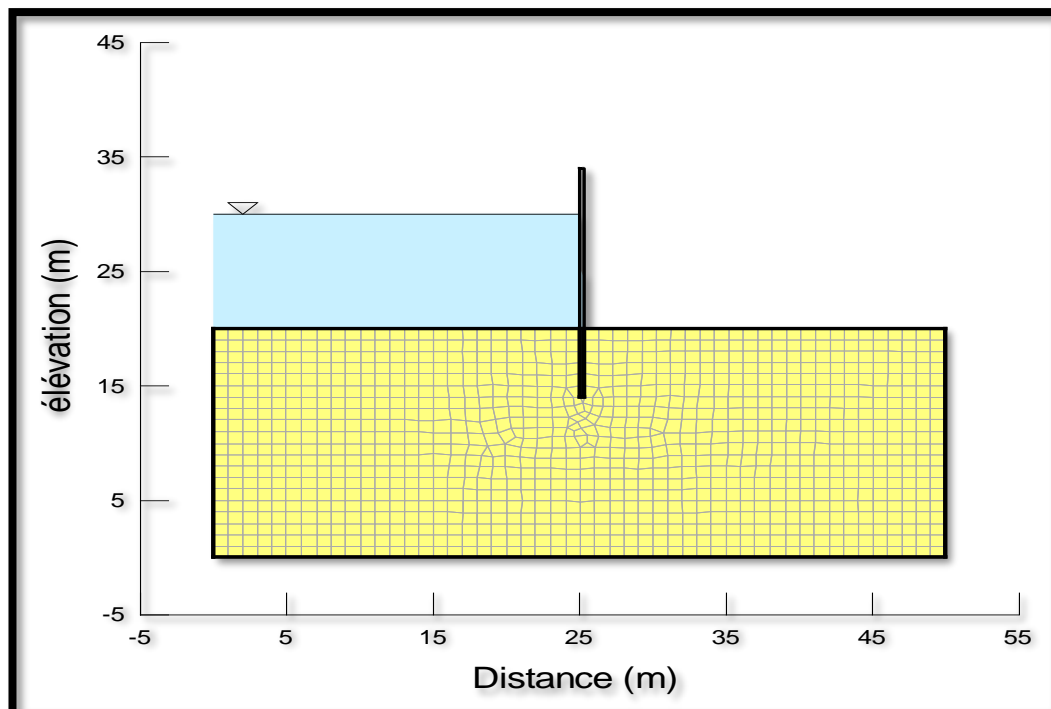


Fig III.22. Modèle de maillage (ancrage à 6m)

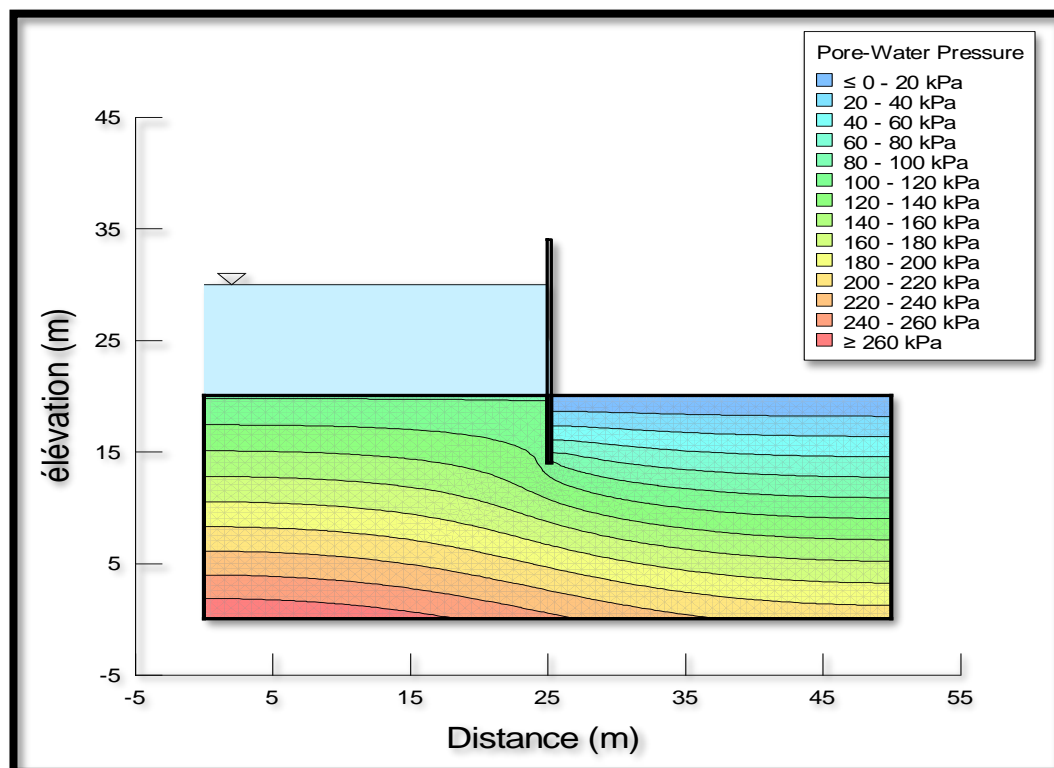
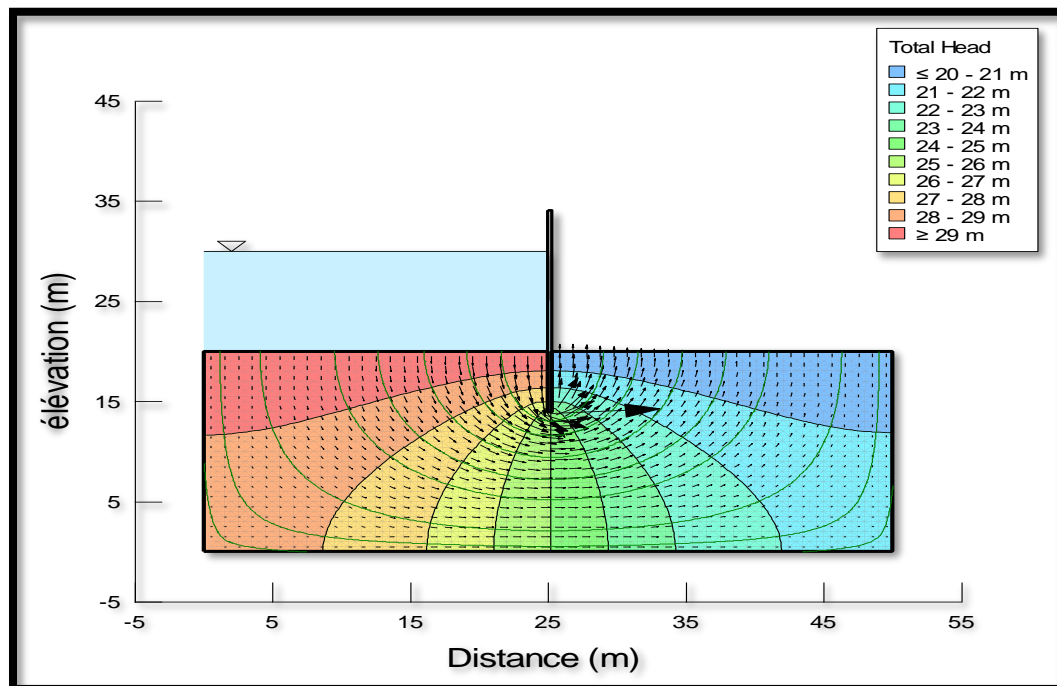


Fig III.24. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 6m)

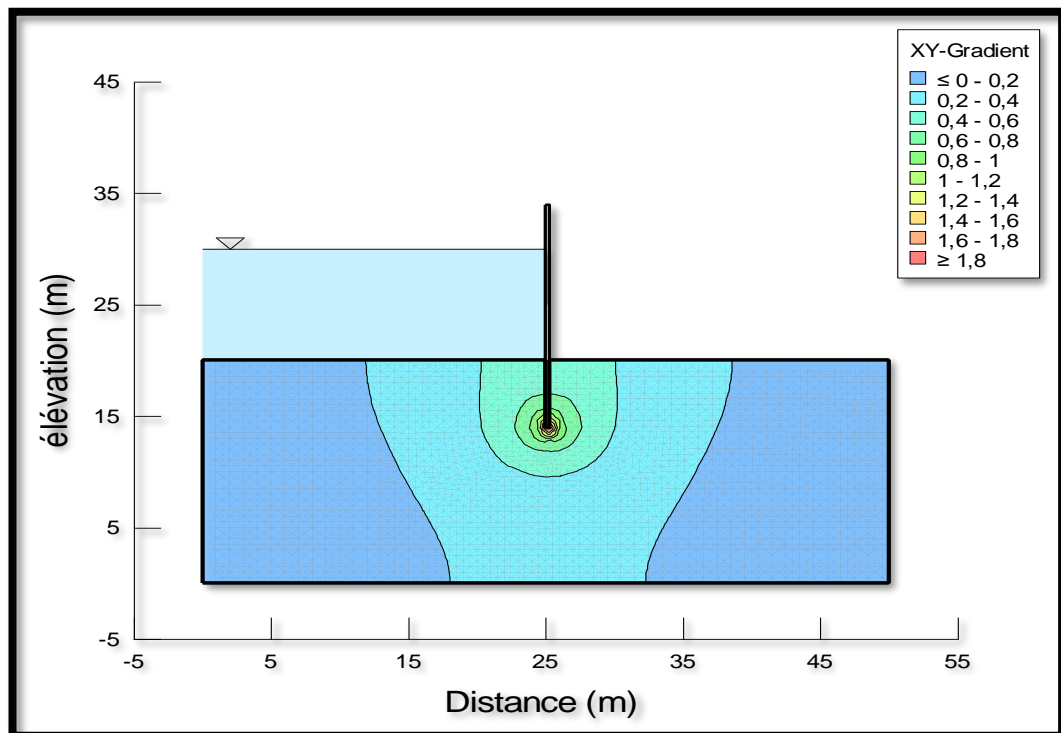


Fig III.25. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 6m)

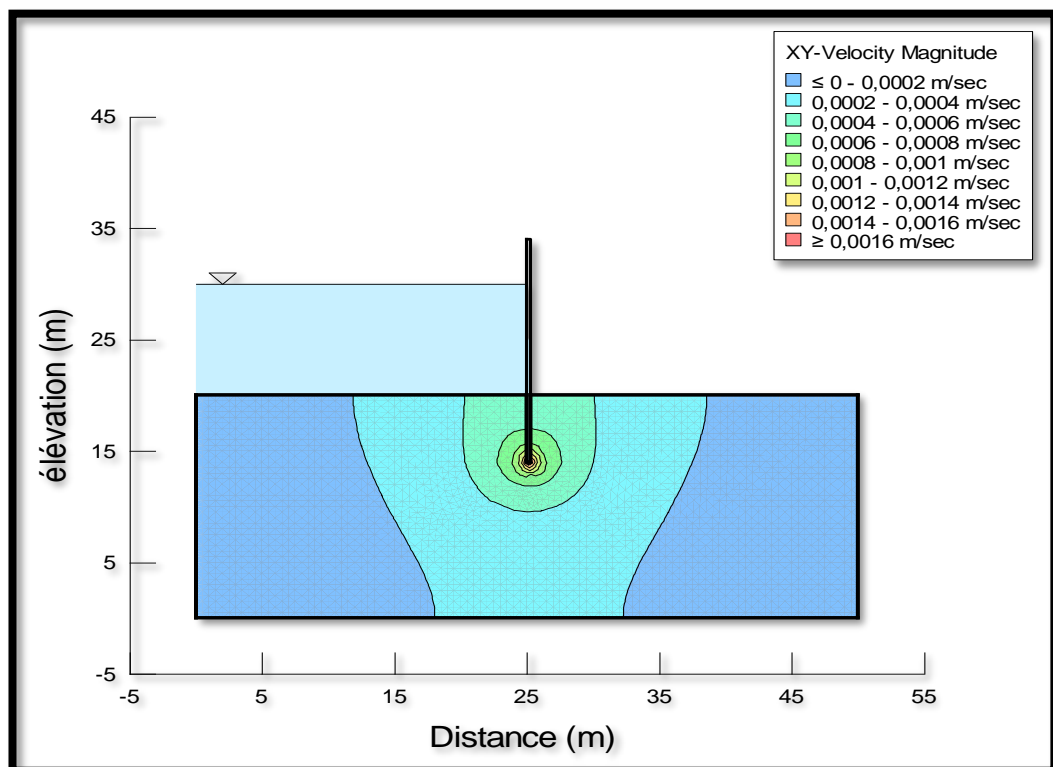


Fig III.26. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 6m)

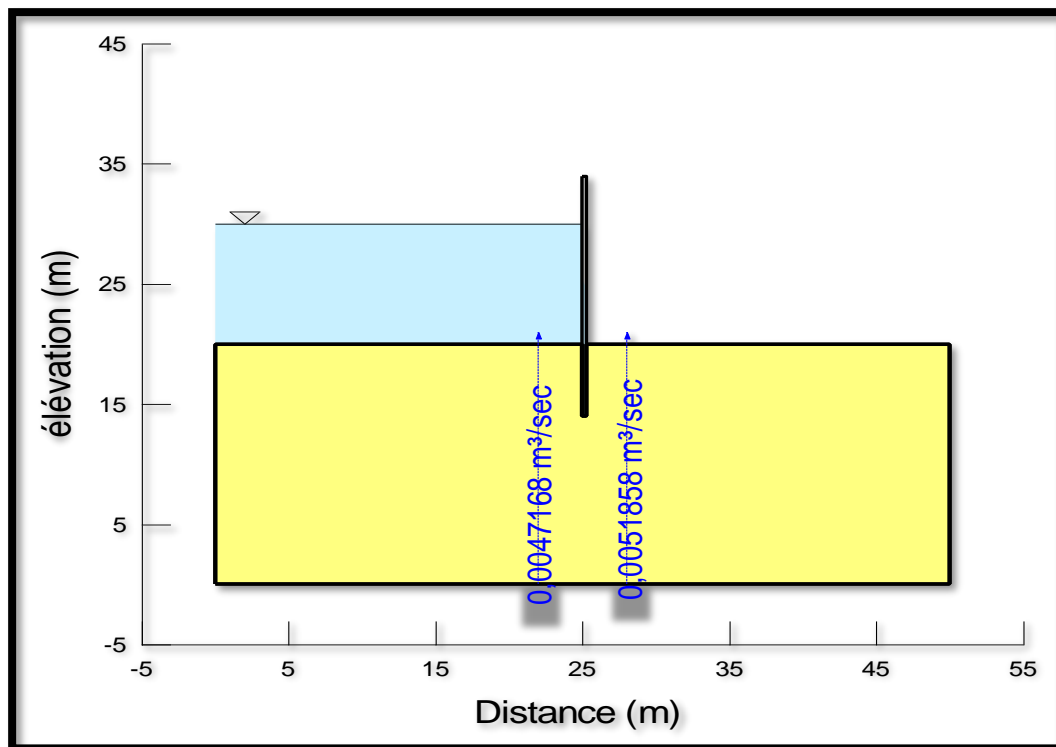


Fig III.27. Variations de débit (ancrage à 6m)

4.1.5. Cas 5 : Ancrage à 9m :

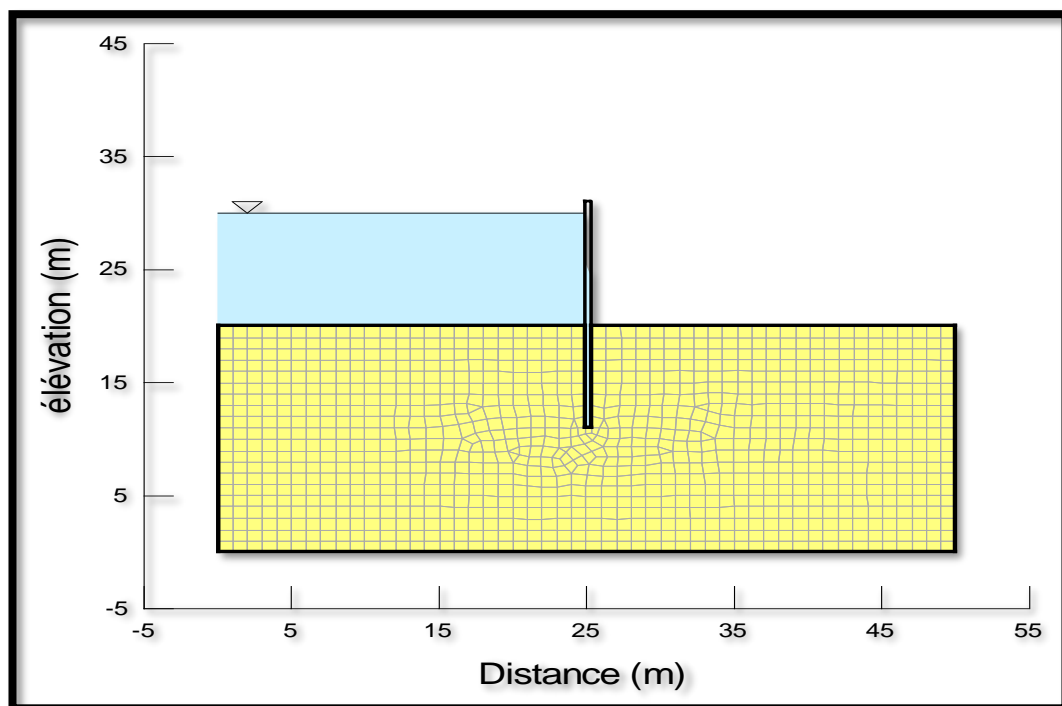


Fig III.28. Modèle de maillage (ancrage à 9m)

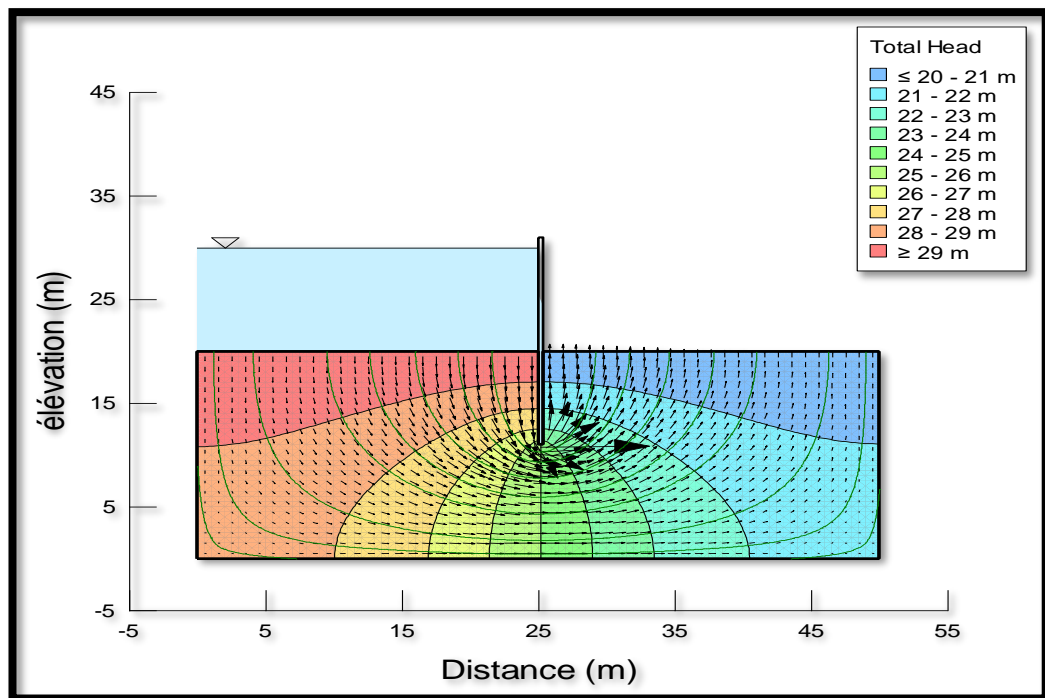


Fig III.29. Réseau d'écoulement (ancrage à 9m)

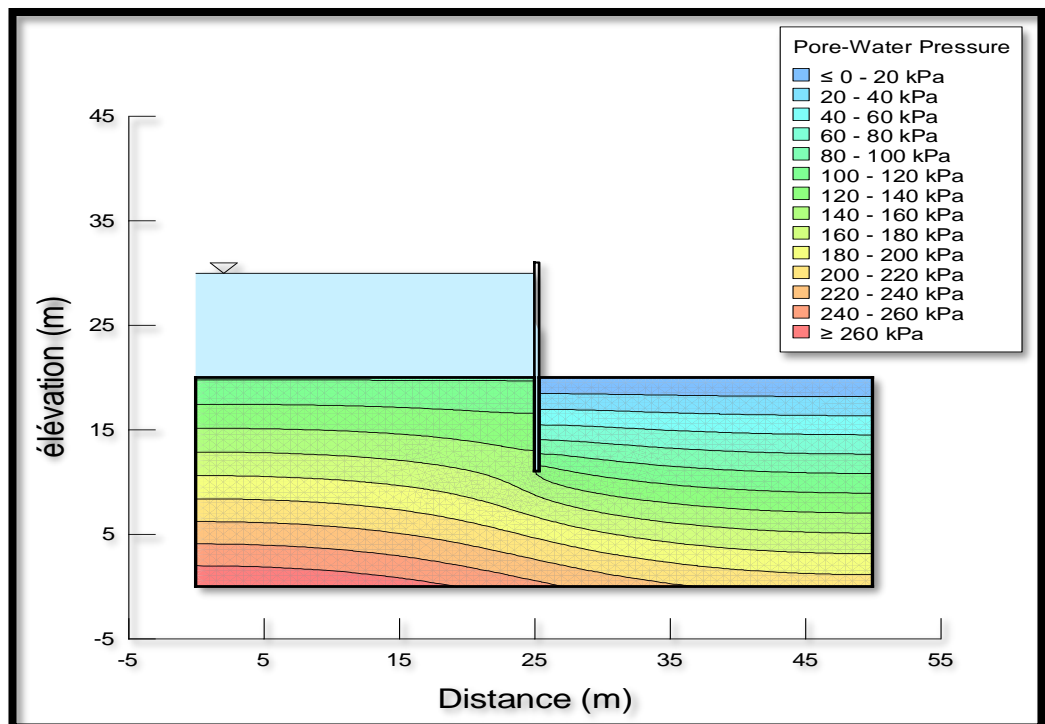


Fig III.30. Variations des pressions d'eau interstitielles (ancrage à 9m)

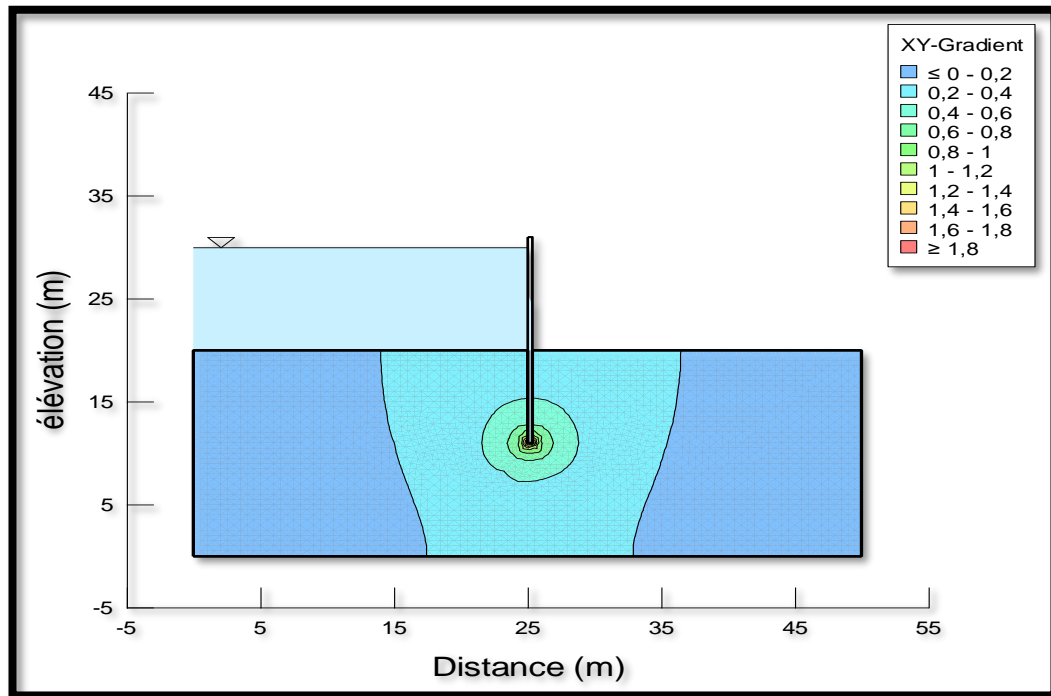


Fig III.31. Variations des gradients hydrauliques (ancrage à 9m)

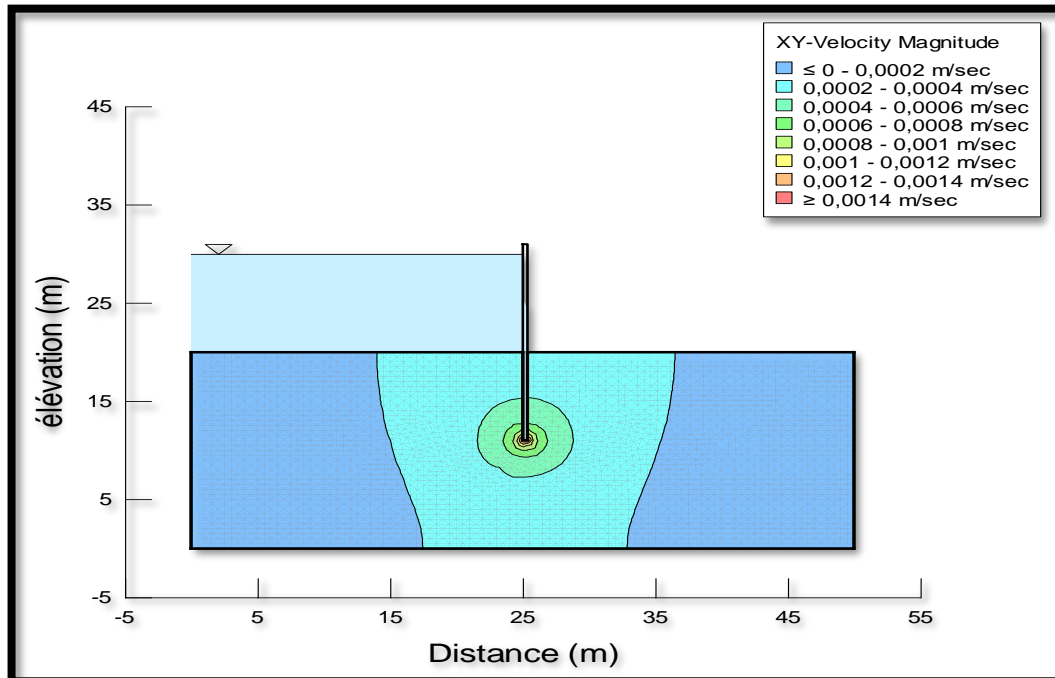


Fig III.32. Variations des intensités de vitesses (ancrage à 9m)

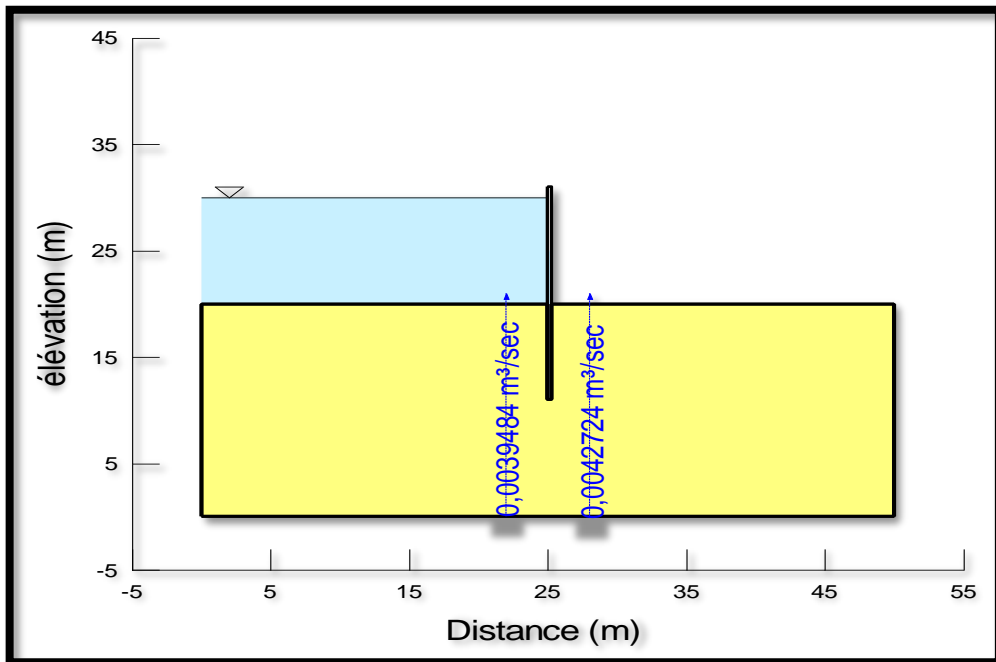


Fig III.33. Variations de débit (ancrage à 9m)

4.2. Influence de la perméabilité des sols :

Cette série de modélisation concerne l'influence de la perméabilité des sols ($K= 10^{-5}$). Les figures de 34 à 37 donnent respectivement, pour une fiche de 9m, le modèle géométrique, le réseau d'écoulement, la variation de la pression interstitielle ainsi que celle relative au gradient hydraulique.

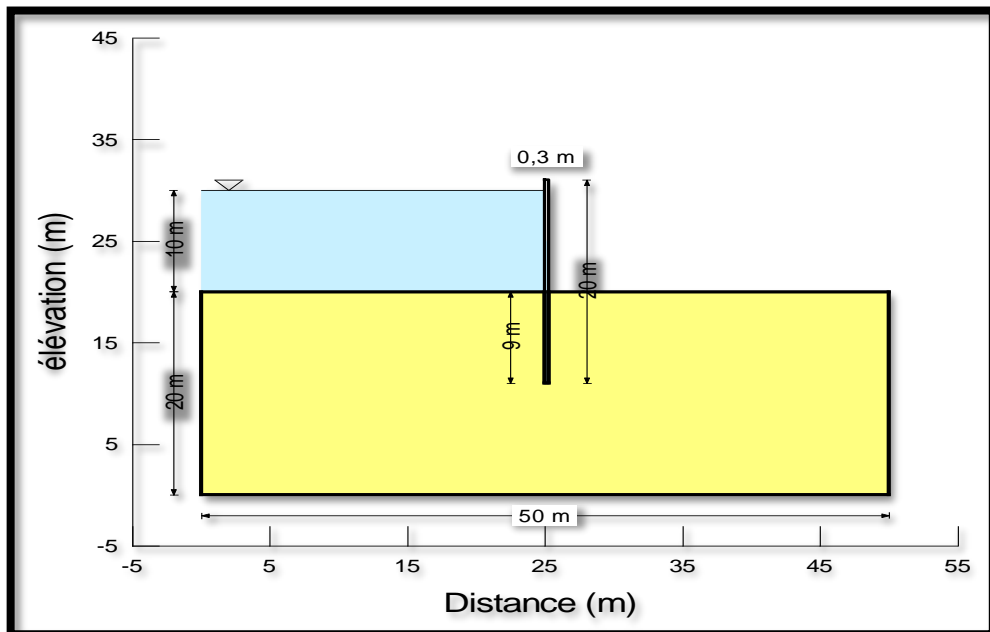


Fig III.34. Modèle géométrique pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

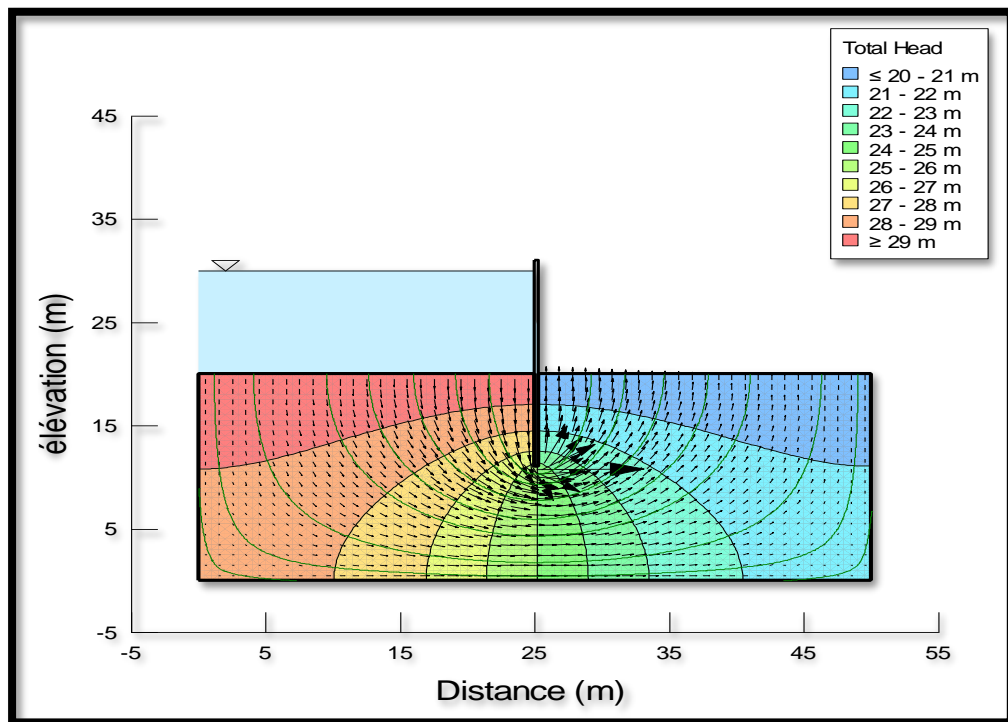


Fig III.35. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

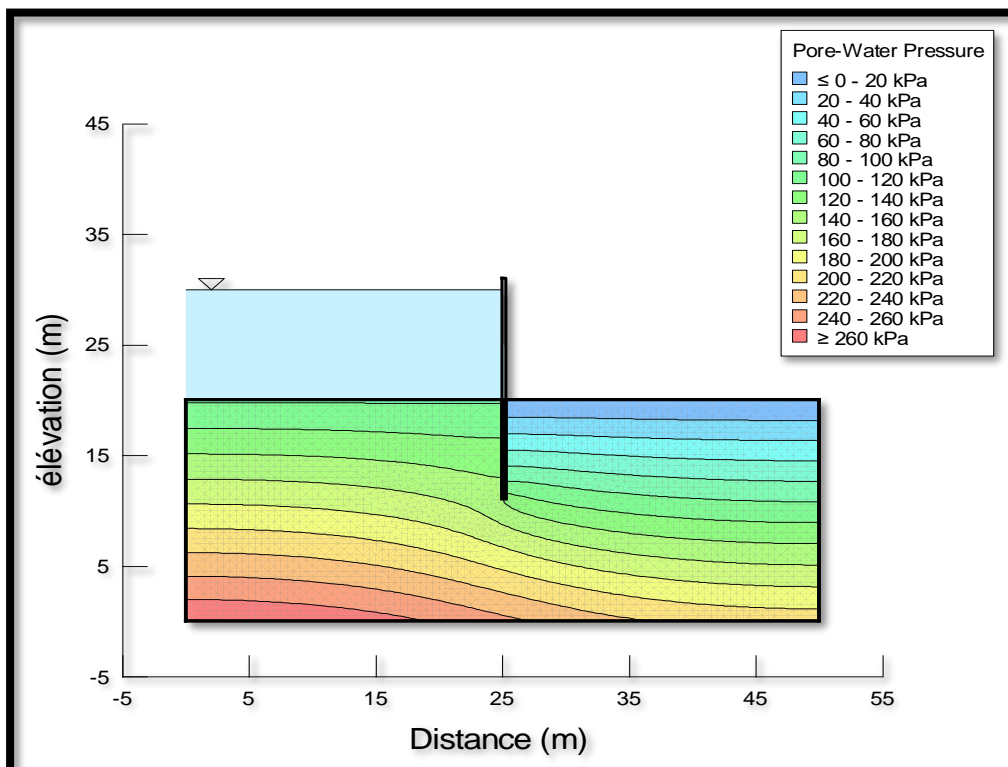


Fig III.36. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

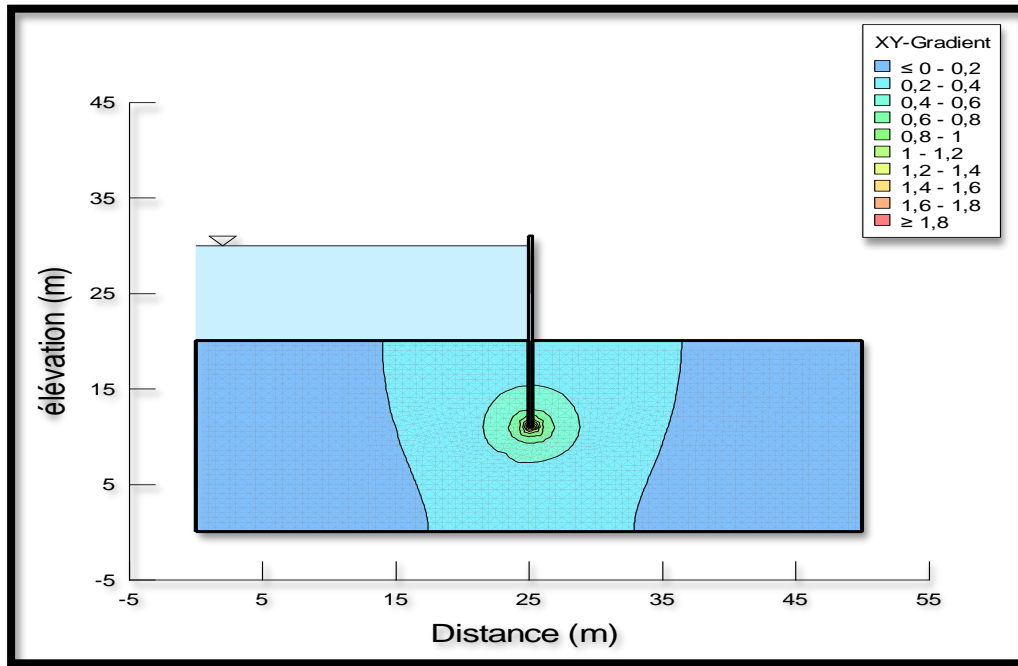


Fig III.37. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

4.3. Influence du gradient de charge amont-aval :

Les figures de 38 à 41 donnent respectivement, pour une perméabilité $K = 10^{-3}$ m/s, le modèle géométrique, le réseau d'écoulement, la variation de la pression interstitielle ainsi que celle relative au gradient hydraulique.

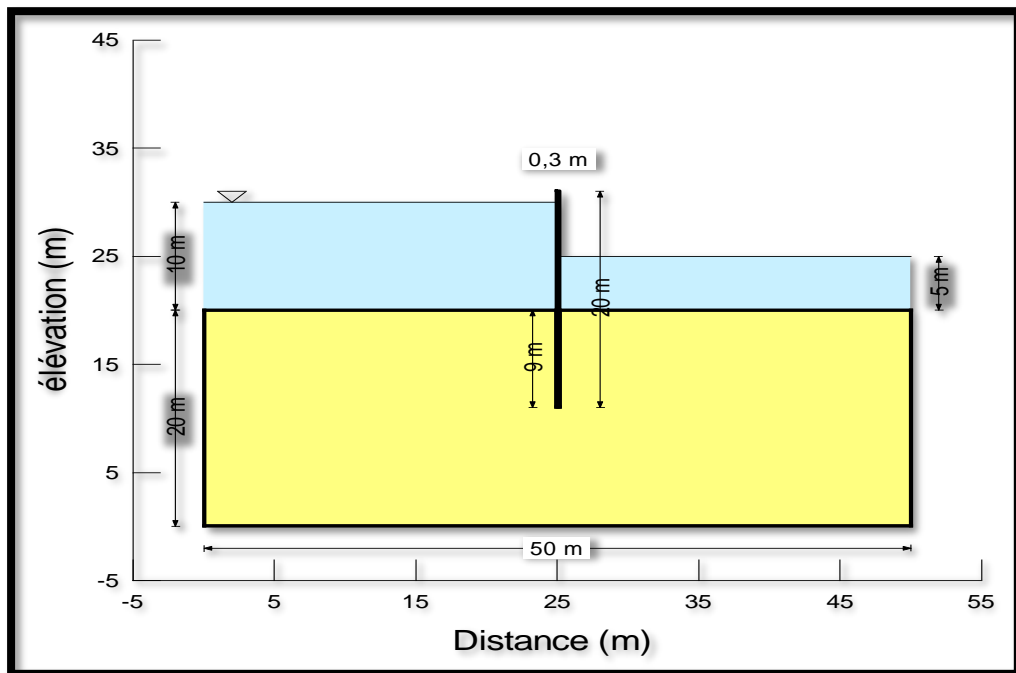


Fig III.38. Modèle géométrique pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-3}$ m/s, gradient de charge amont - aval

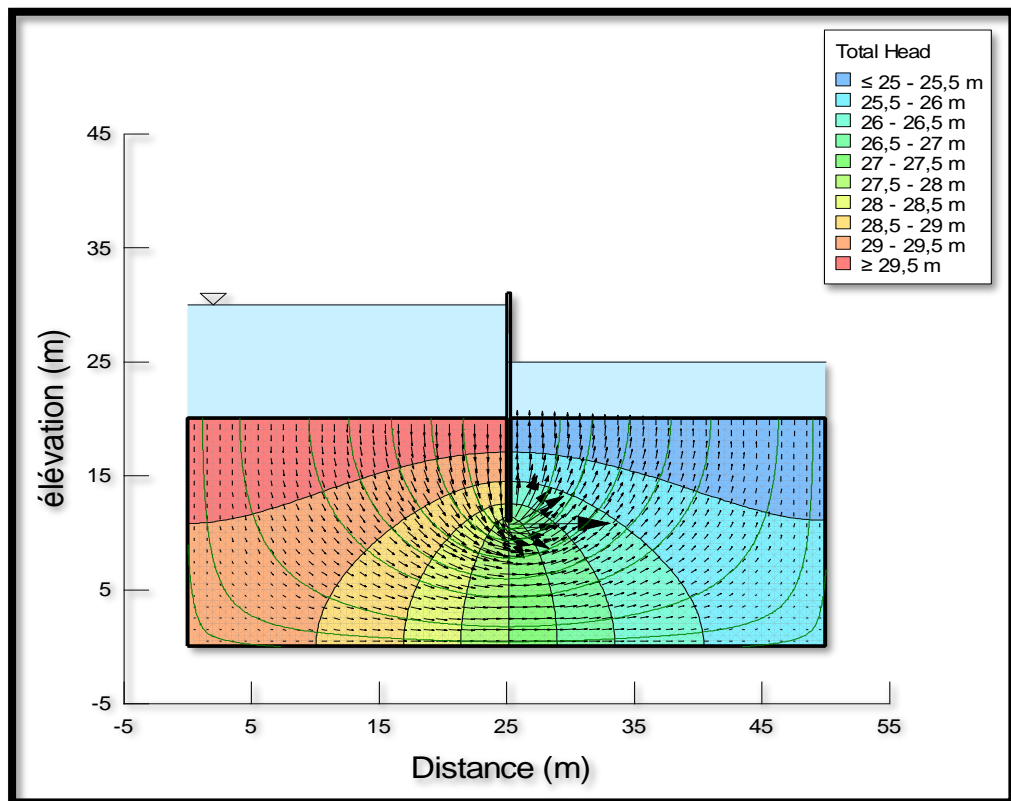


Fig III.39. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-3}$ m/s

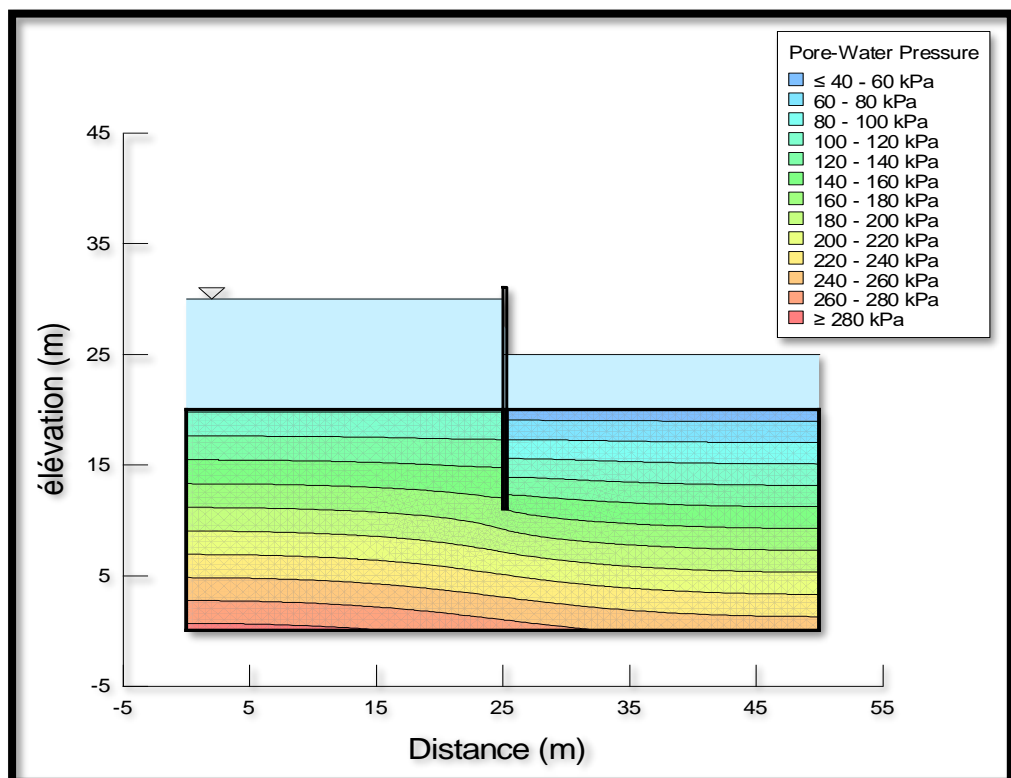


Fig III.40. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-3}$ m/s

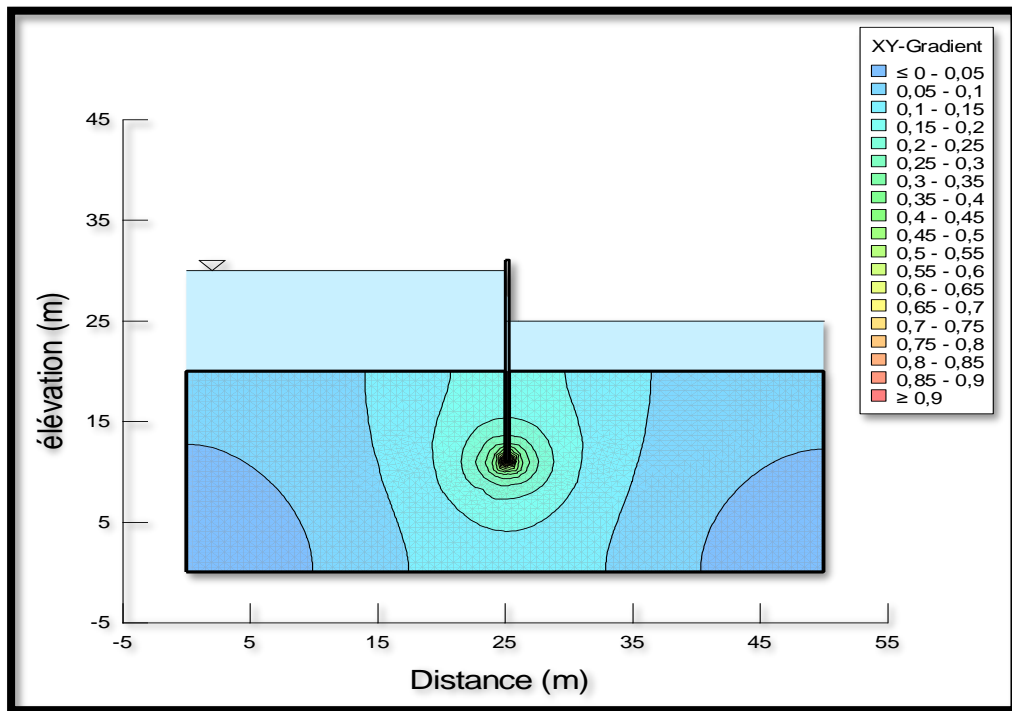


Fig III.41. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-3}$ m/s

Les figures de 42 à 44 donnent respectivement, pour une perméabilité $K = 10^{-5}$ m/s, le réseau d'écoulement, la variation de la pression interstitielle ainsi que celle relative au gradient hydraulique.

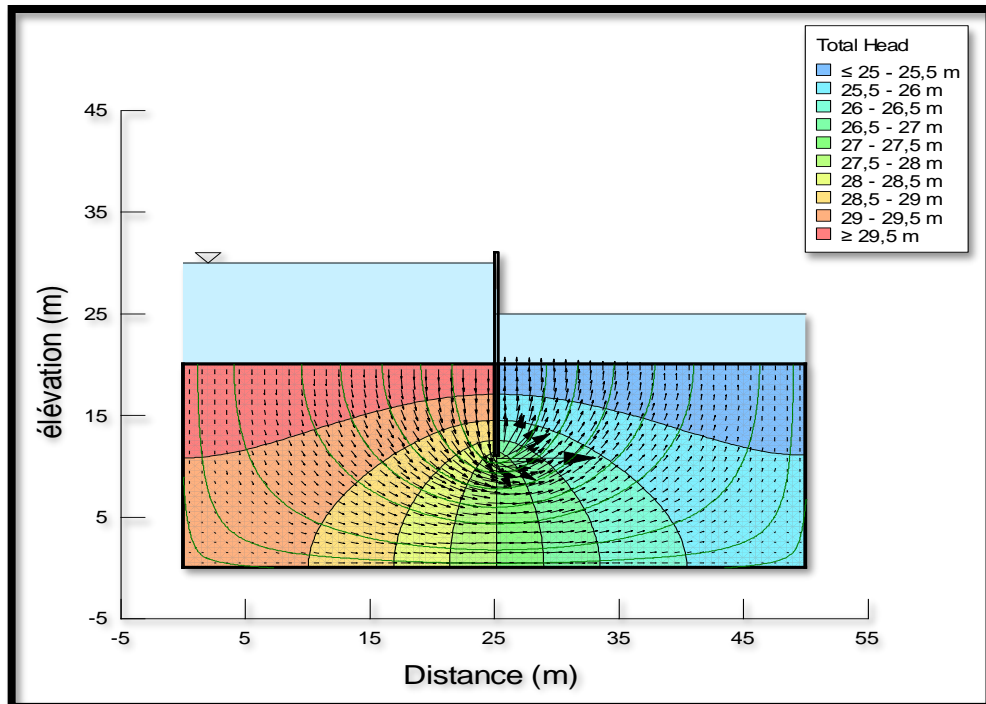


Fig III.42. Réseau d'écoulement pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

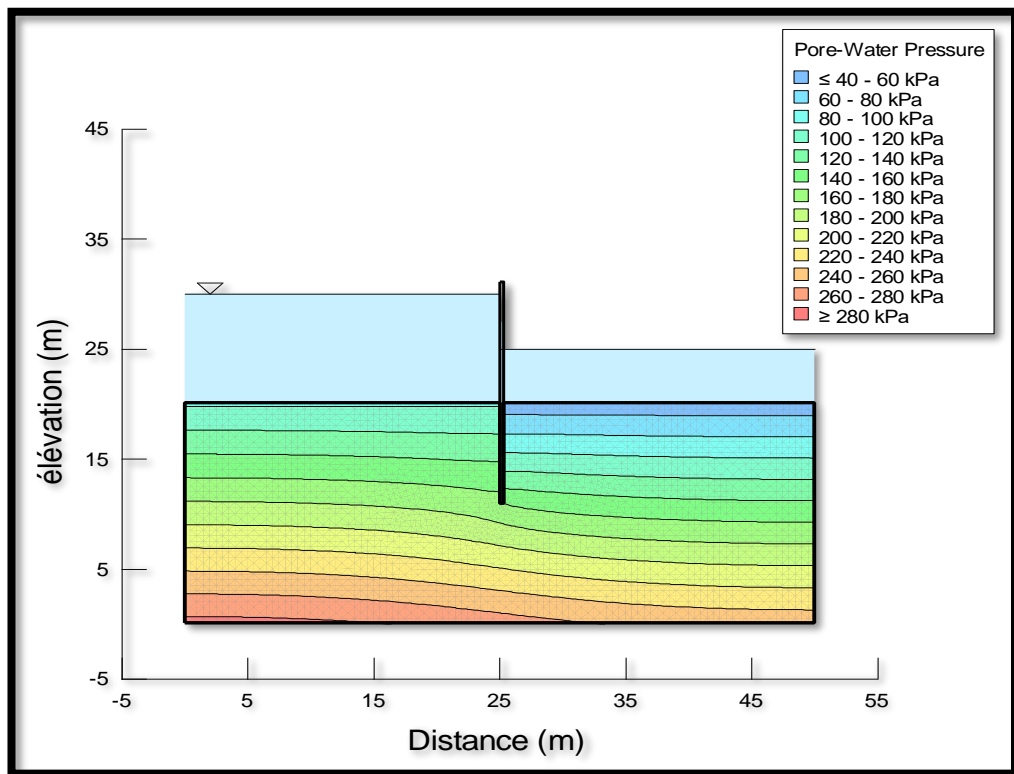


Fig III.43. Variations des pressions d'eau interstitielles pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

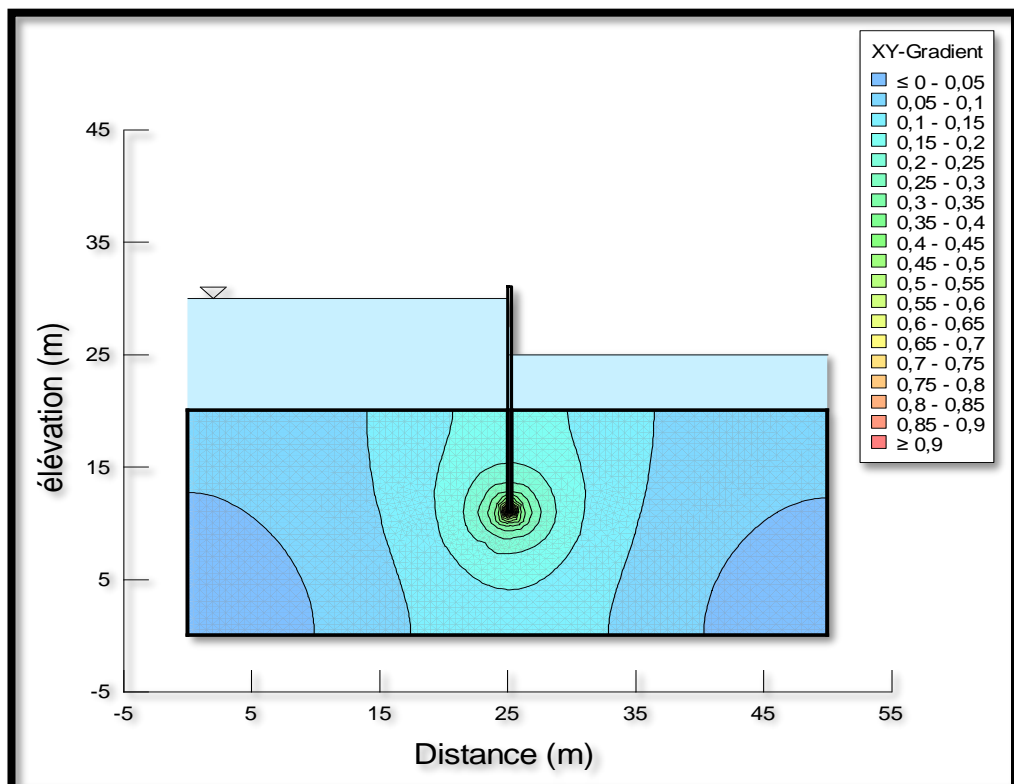


Fig III.44. Variations des gradients hydrauliques pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

5. Analyse des résultats :

5.1. Influence de l'ancrage de la fiche des palplanches :

L'analyse des écoulements autour du rideau de palplanche est menée en considérant des plans horizontaux à différentes profondeurs au niveau desquels seront reportées les variations des paramètres (Charge d'eau, pressions interstitielles, gradients hydrauliques et débits de fuites). Ces plans sont situés respectivement à 0.5, 1, 3, 5 et 8 m de profondeur. Ce choix n'est pas fortuit, il a été adopté de sorte que ces plans interceptent à chaque fois la profondeur des fiches de palplanches.

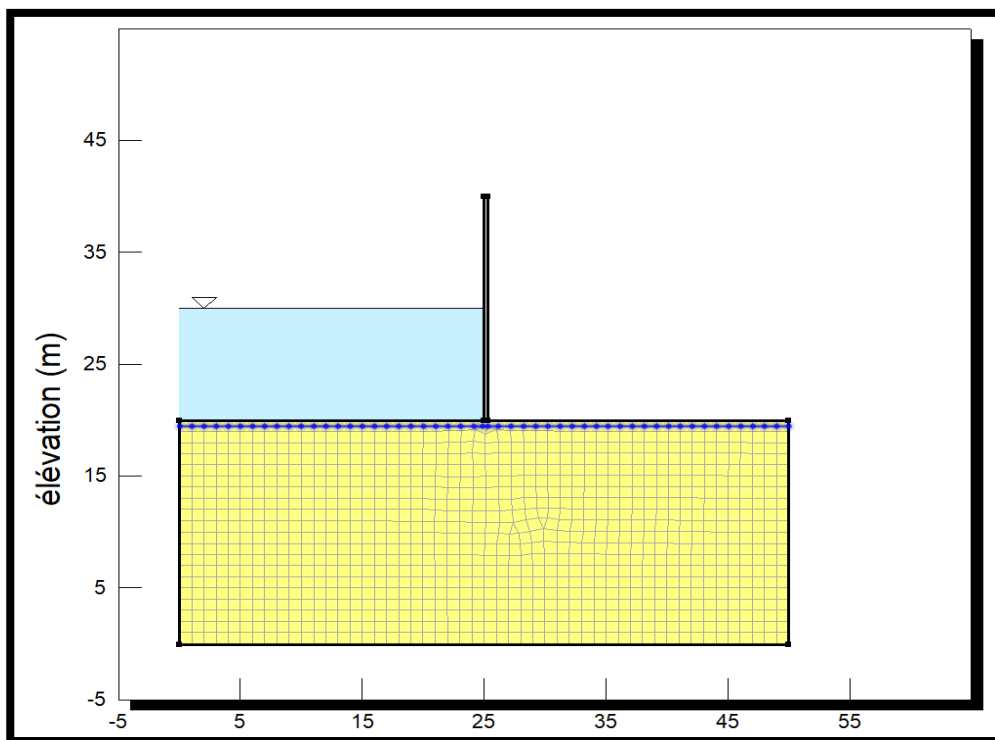


Fig III.45. Profil montrant le plan à 0.5m

Les figures de 46 à 60 donnent, pour chaque position du plan en profondeur les variations des charges d'eau, des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques.

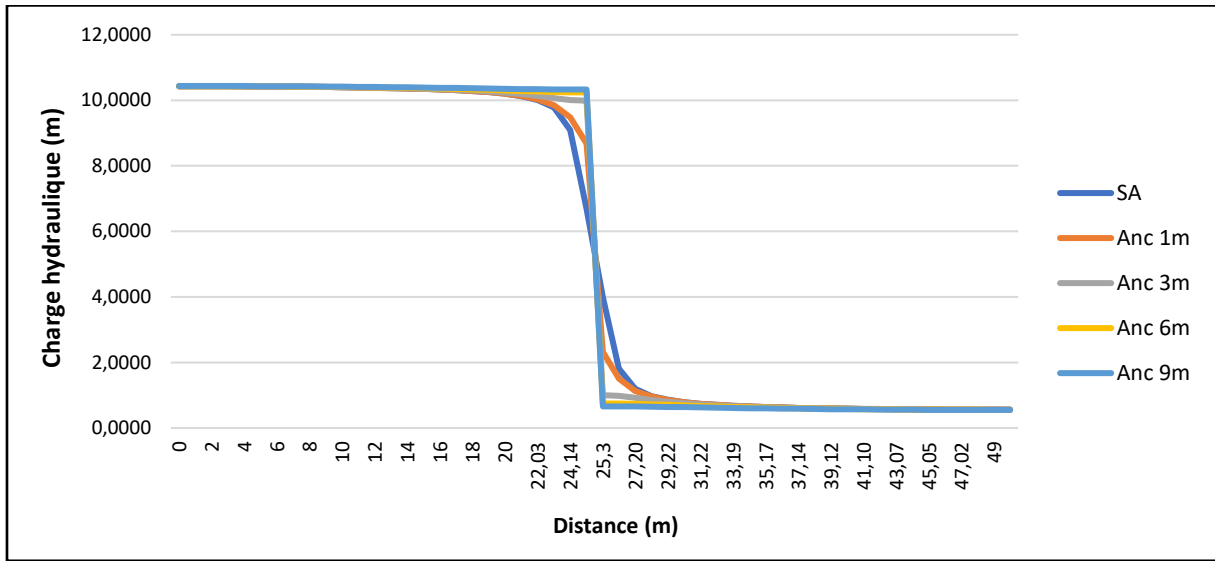


Fig III.46. Variation de la charge hydraulique à 0.5m

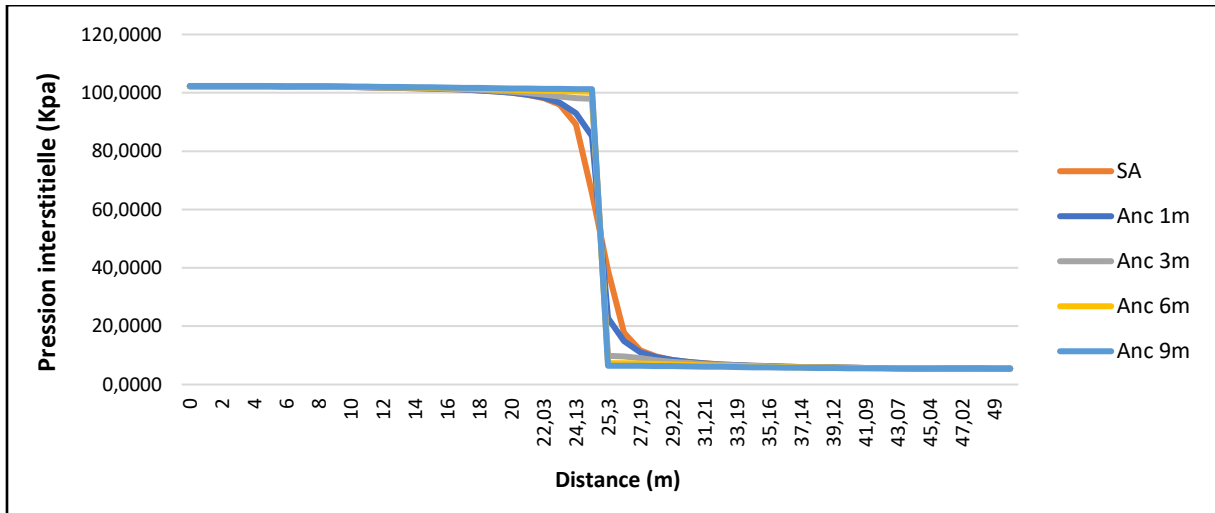


Fig III.47. Variation de la pression interstitielle à 0.5m

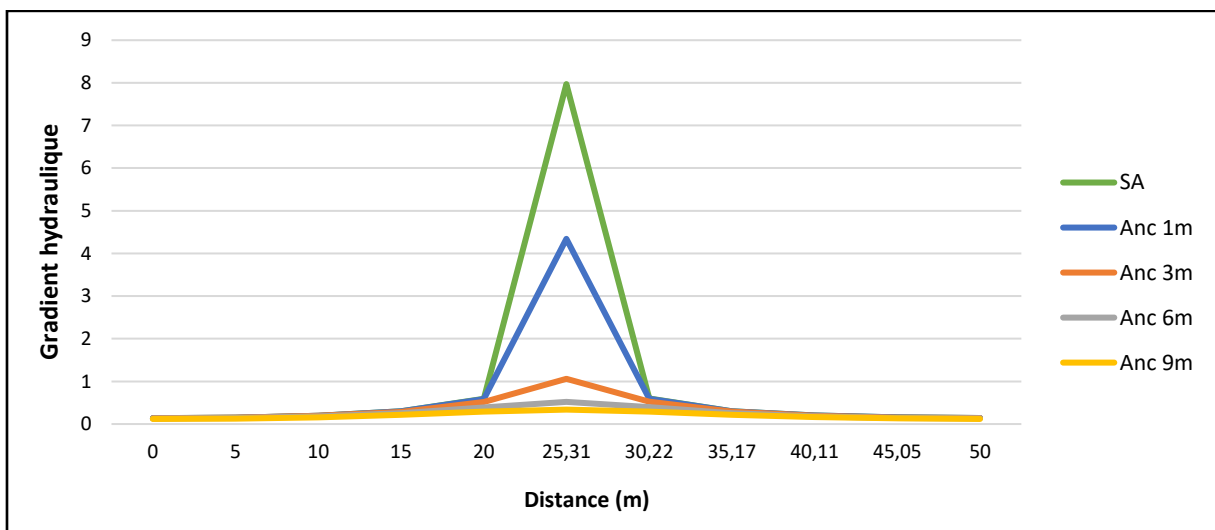


Fig III.48. Variation du gradient à 0.5m

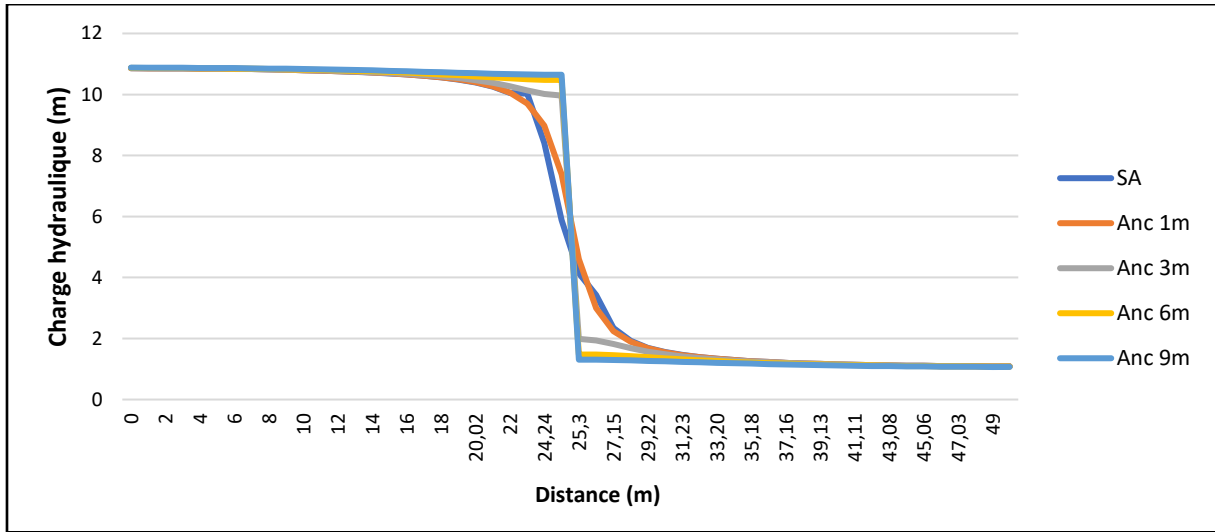


Fig III.49. Variation de la charge hydraulique à 1m

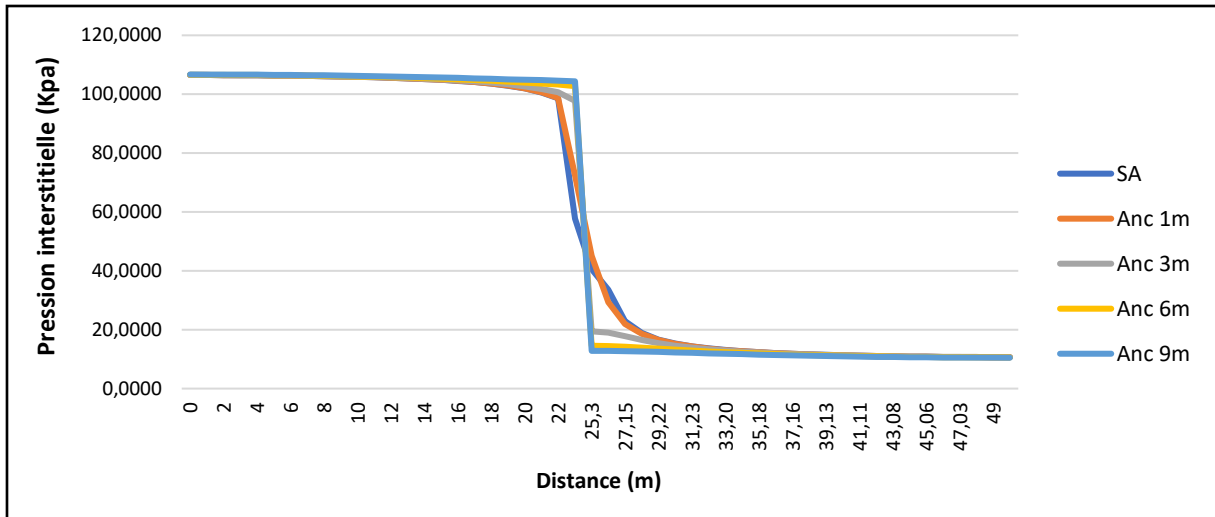


Fig III.50. Variation de la pression interstitielle à 1m

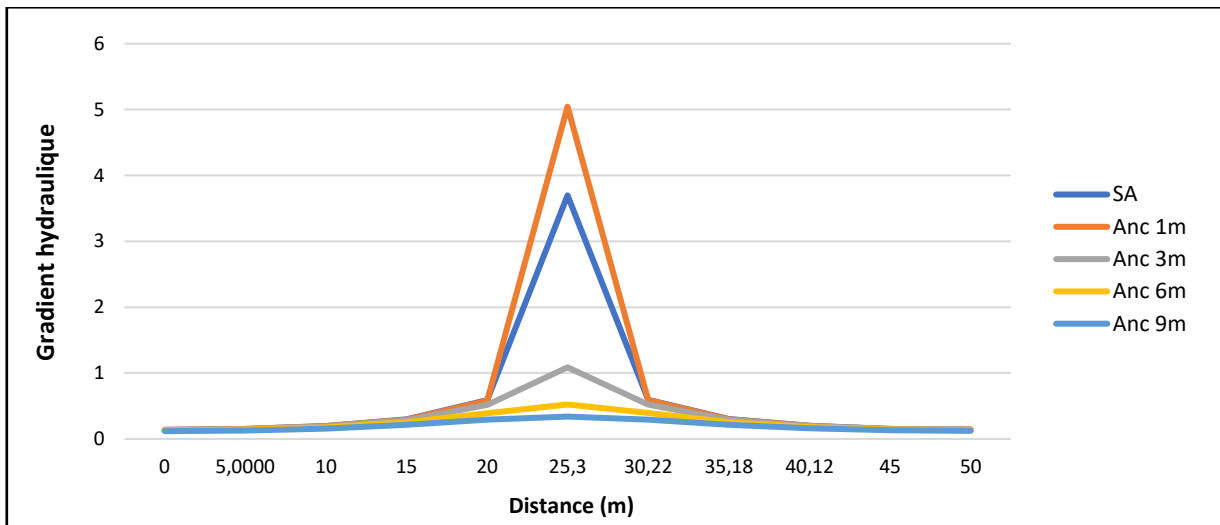


Fig III.51. Variation du gradient à 1m

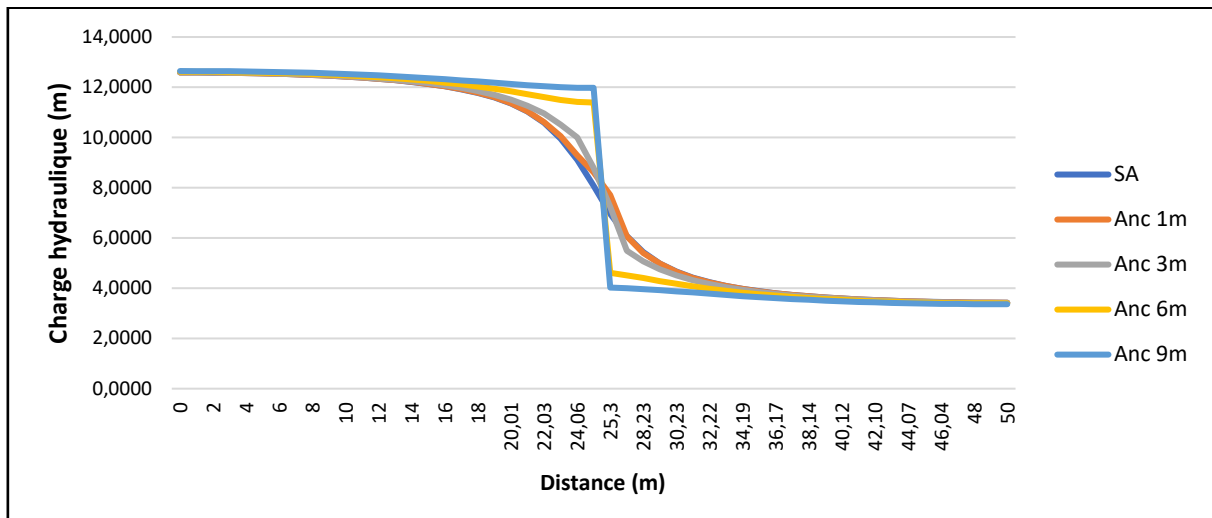


Fig III.52. Variation de la charge hydraulique à 3m

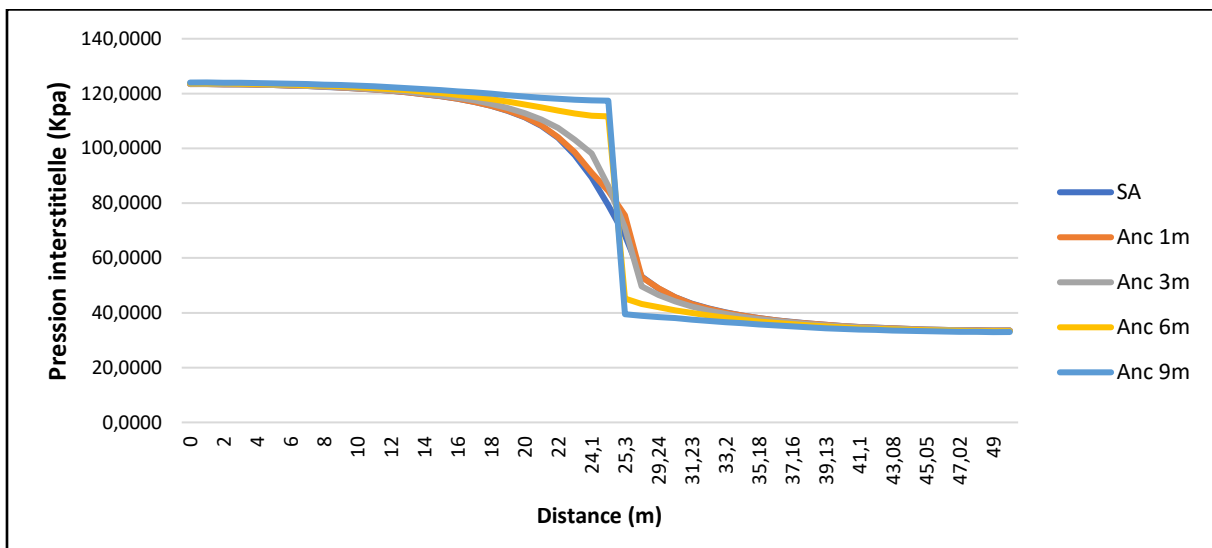


Fig III.53. Variation de la pression interstitielle à 3m

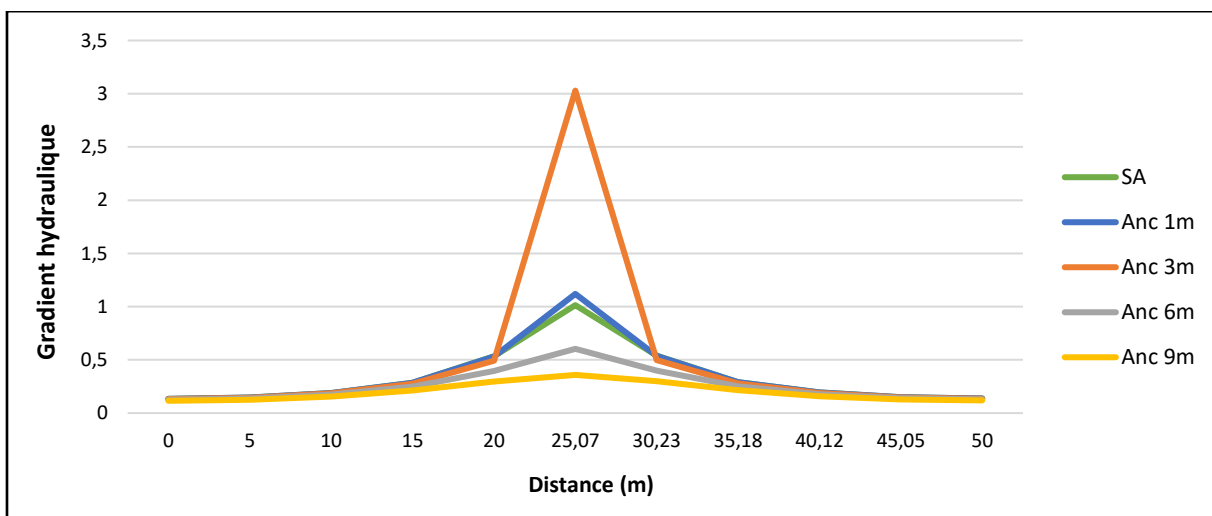


Fig III.54. Variation du gradient à 3m

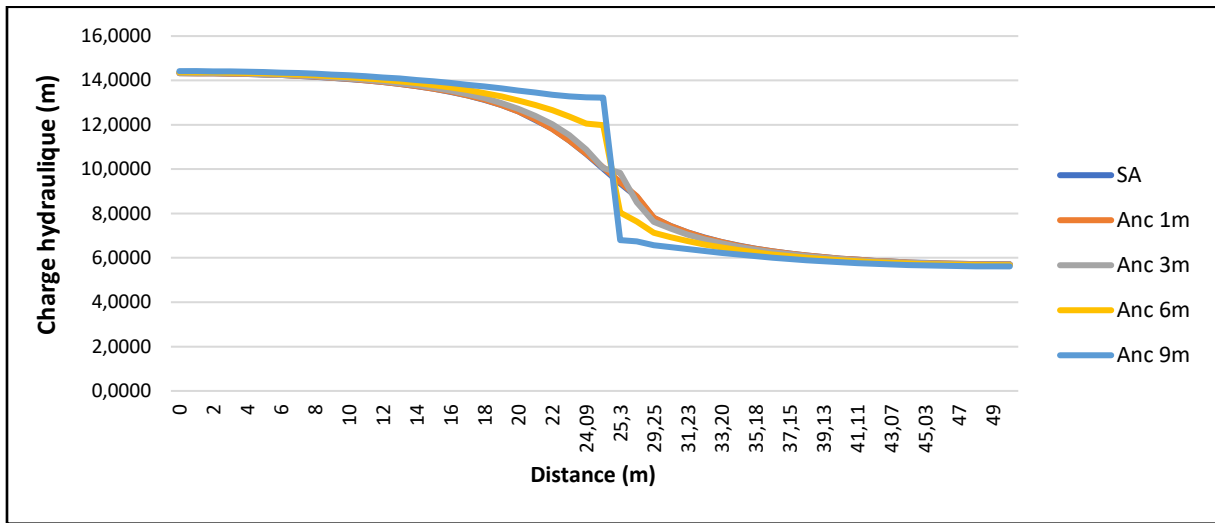


Fig III.55. Variation de la charge hydraulique à 5m

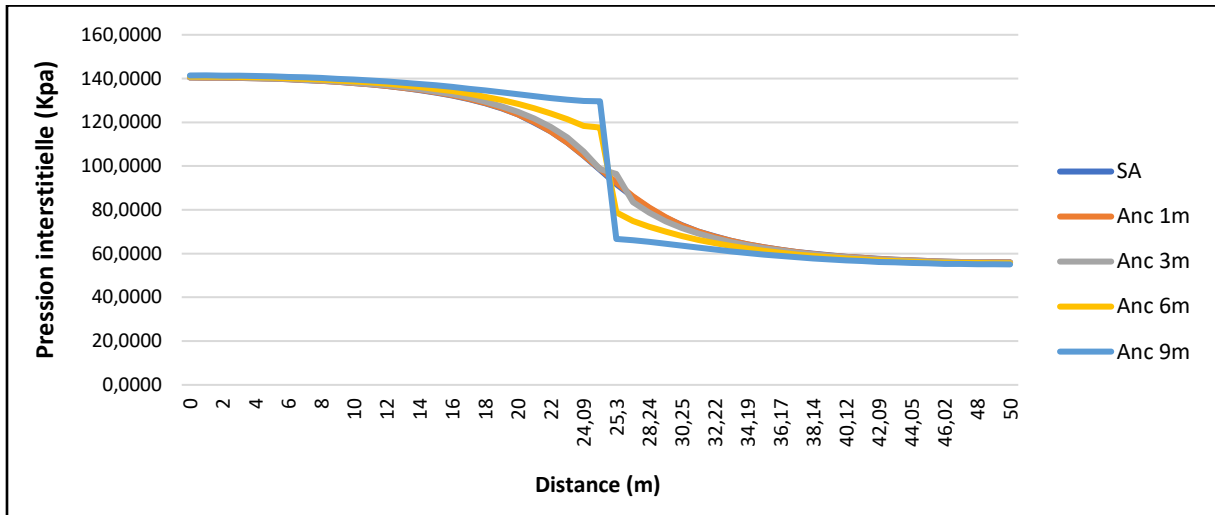


Fig III.56. Variation de la pression interstitielle à 5m

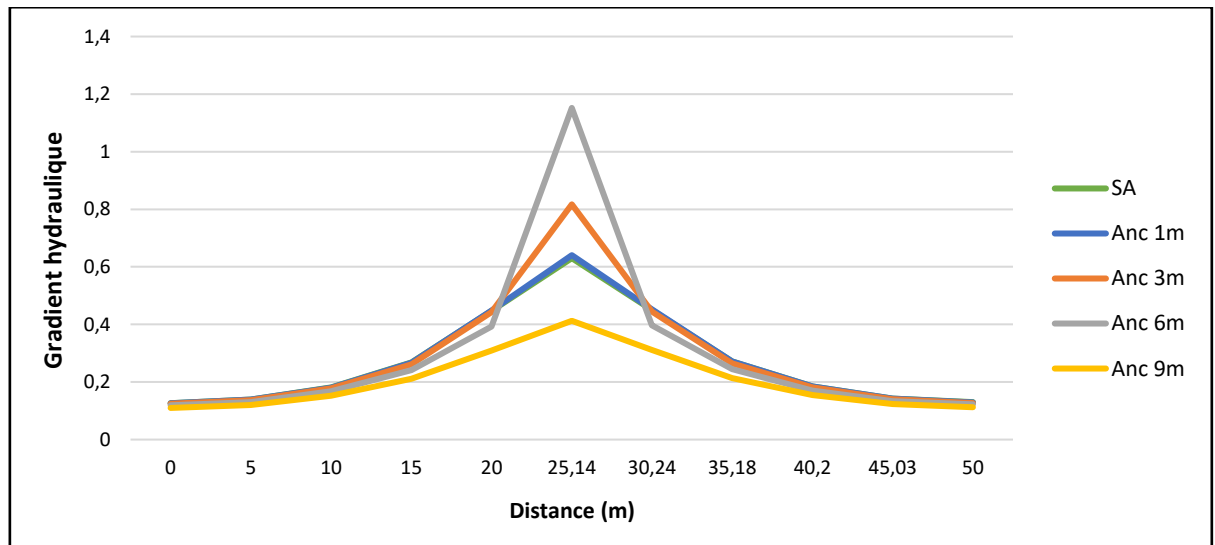


Fig III.57. Variation du gradient à 5m

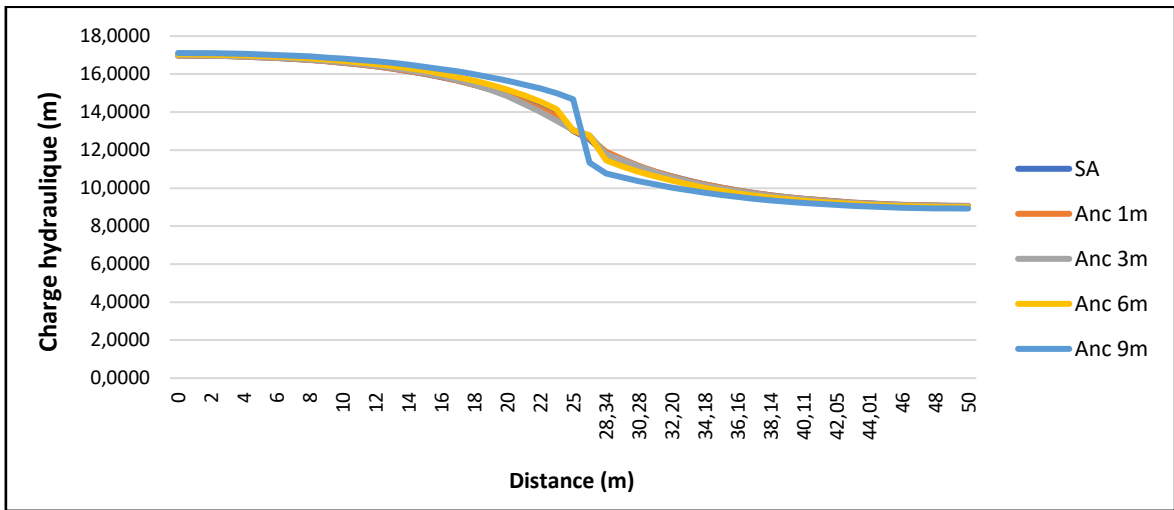


Fig III.58. Variation de la charge hydraulique à 8m

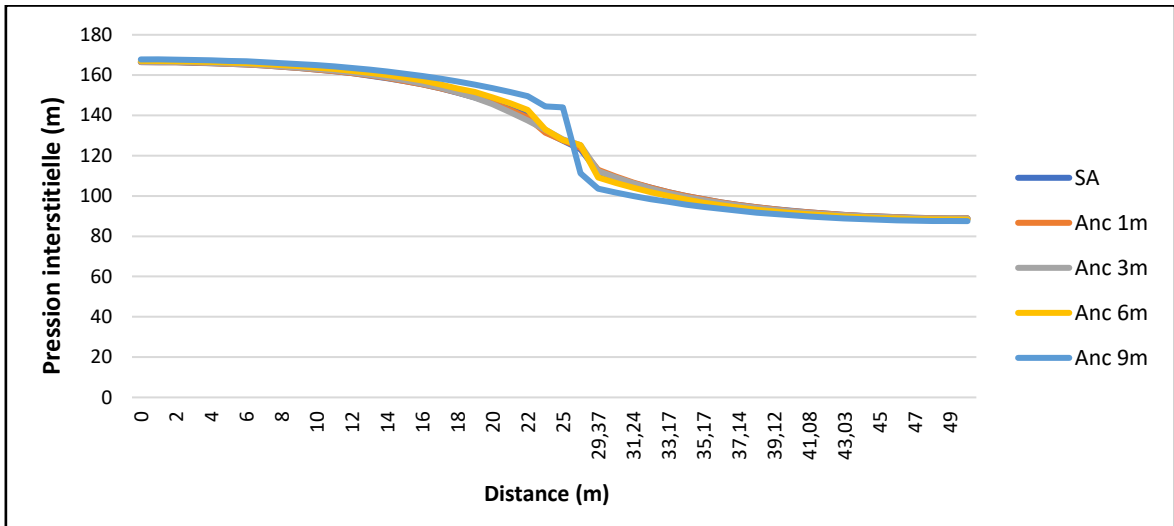


Fig III.59. Variation de la pression interstitielle à 8m

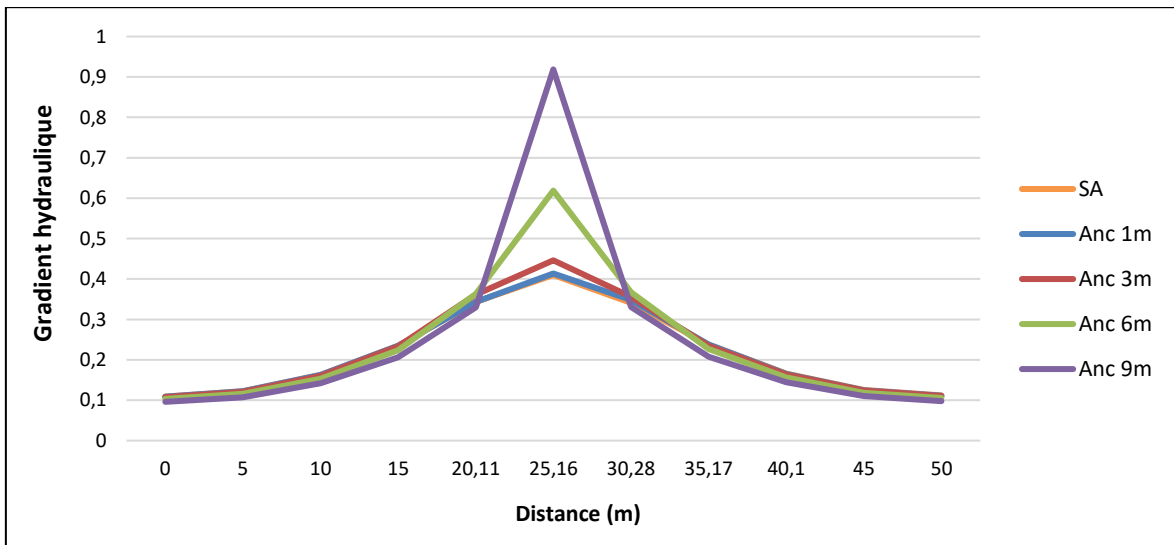


Fig III.60. Variation du gradient à 8m

5.1.1. Analyse qualitative des écoulements :

Cette partie d'analyse qualitative est basée sur l'allure amont-aval des courbes de variation des paramètres d'écoulement. En effet :

- Le gradient hydraulique i , est d'autant plus important que les lignes équipotentielles sont rapprochées et la différence de niveau Δh est grande. Le rapprochement des lignes équipotentielles est inversement proportionnel à la profondeur fiche.
- Pour les palplanches de faible profondeur des fiches, les gradients de charges et de pressions interstitielles sont enregistrées à l'amont de la fiche. A partir des fiches de profondeur 3 m (soit le tiers de la charge), les gradients sont enregistrés au contact du pied aval de la palplanche.
- L'influence des longueurs des contours souterrains par rapport aux gradients des charges et à la perméabilité des sols est prépondérante.
- Pour des faibles profondeurs des fiches, les gradients de pressions interstitielles et de charges sont plus prononcés. Avec l'augmentation des profondeurs des fiches, ces gradients deviennent plus modérés et sont fortement influencés par le gradient des charges et des longueurs d'écoulement.
- Le déclenchement du phénomène de boulangerie au pied aval des fiches est précédé par un retard dépendant des valeurs de pressions interstitielles et des gradients hydrauliques.

Le tableau 2 récapitule les variations des charges hydrauliques, des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques au pied aval des fiches de palplanches.

Tableau III.2. Variation des caractéristiques des écoulement en fonction de la profondeur des fiches de palplanches.

| Profondeur | Charge hydraulique (m) | Pression interstitielle (KPa) | Gradient hydraulique |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Fiche de 1 m | 1.25 | 12.30 | 0.58 |
| Fiche de 3 m | 3.87 | 38.03 | 0.49 |
| Fiche de 6 m | 6.48 | 63.60 | 0.38 |
| Fiche de 9 m | 9.89 | 98.40 | 0.33 |

- Les risques d'érosion régressive qui peuvent précéder des phénomènes de boulangerie sont influencés par les pertes de charges et des profondeurs des fiches, indépendamment des valeurs de pressions interstitielles comme le montre la figure 61.

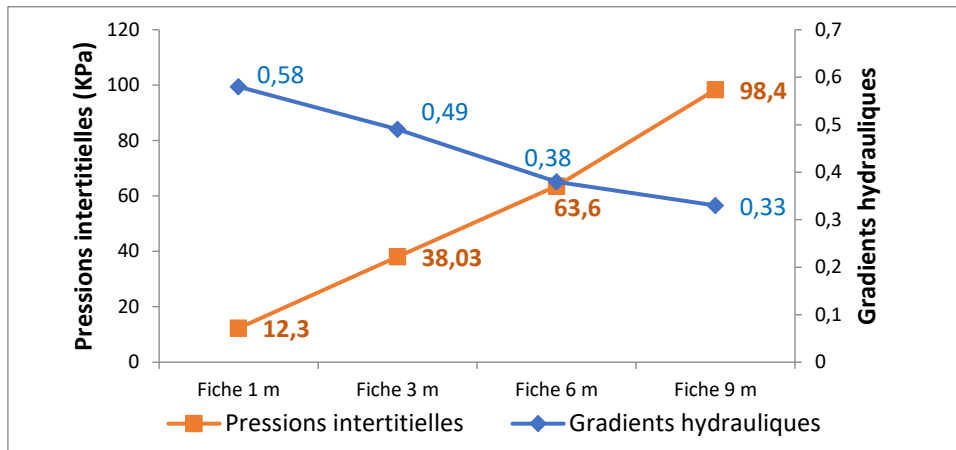


Fig III.61. Combinaison des variations des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques en fonction des profondeurs des fiches

5.1.2. Analyse quantitative :

Afin de juger le risque d'entraînement des grains en fonction des paramètres d'influence, notamment les valeurs des gradients hydrauliques au pied aval des palplanches, il a été tracer la figure 62 qui donne les variations en profondeur des gradients hydrauliques en fonction des ancrages des fiches de palplanches. Sur le même graphique, il a été reporté les gradients critiques de certains sols atténuants dont la perméabilité avoisine celle introduite dans la modélisation.

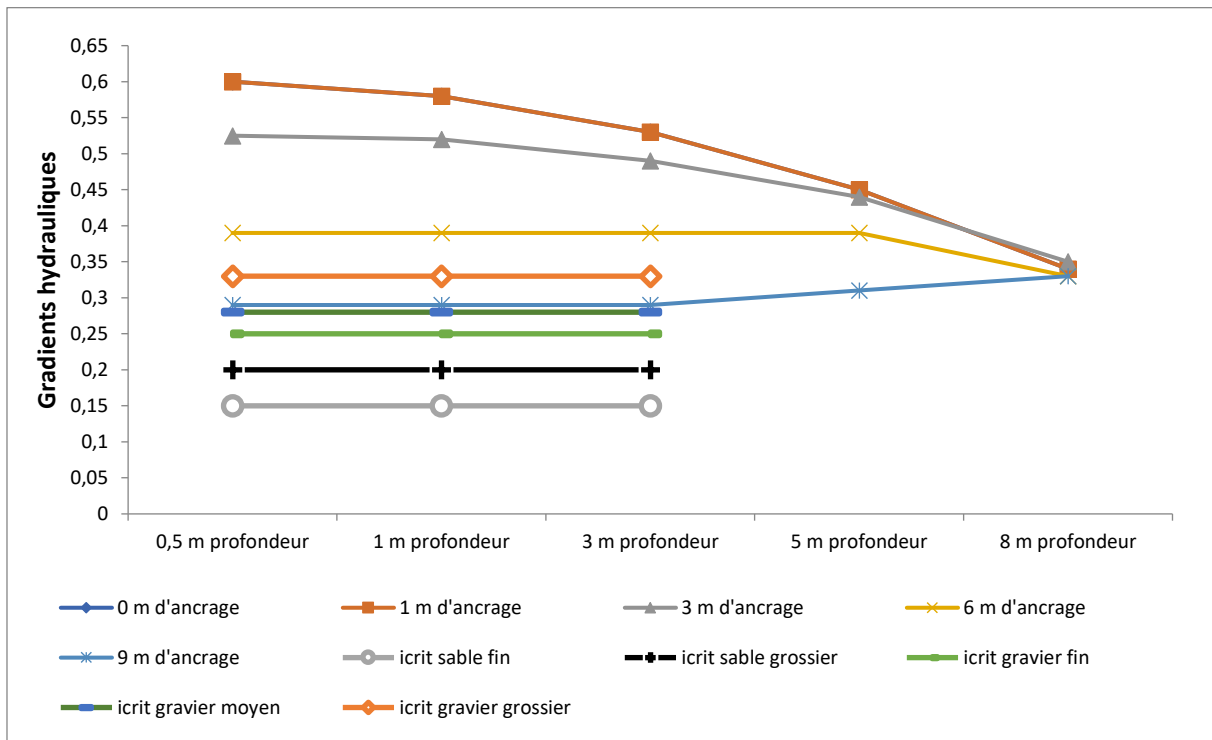


Fig III.62. Variations en profondeur des gradients hydrauliques en fonction des ancrages des fiches comparés aux gradients critiques des sols atténuant

La boullance est un phénomène de surface qui survient lorsque le gradient hydraulique vertical y atteint sa valeur critique. Ce phénomène est souvent localisé en raison des hétérogénéités en perméabilité. Le soulèvement généralisé est plus brutal, dans les zones devant la fiche des palplanches et est susceptible de mettre en cause la stabilité de l'écran de soutènement.

D'après la figure 62, des précautions conceptuelles doivent être prises en fonction de la profondeur des fiches, de la nature des sols atténuant et des gradients critiques admissibles de ces derniers.

5.2. Influence de perméabilité des sols :

Dans cette partie de la modélisation, le modèle géométrique est similaire au modèle précédent avec diminution de la perméabilité des sols de 10^{-3} à 10^{-5} m/s. L'analyse des résultats est menée en considérant uniquement le cas d'une fiche de 9 m de profondeur. Les figures de 63 à 64 donnent respectivement les variations des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques pour un sol de perméabilité $K = 10^{-5}$ m/s.

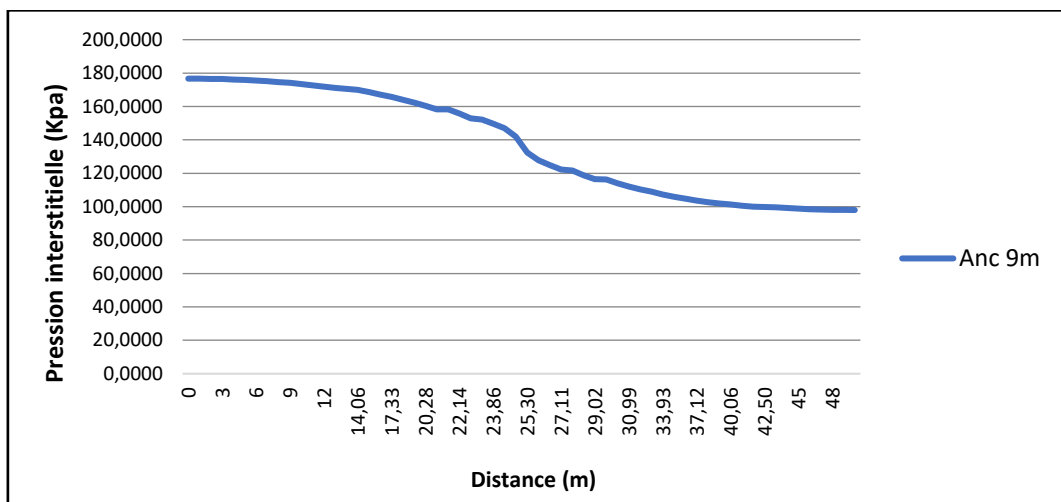


Fig III.63. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

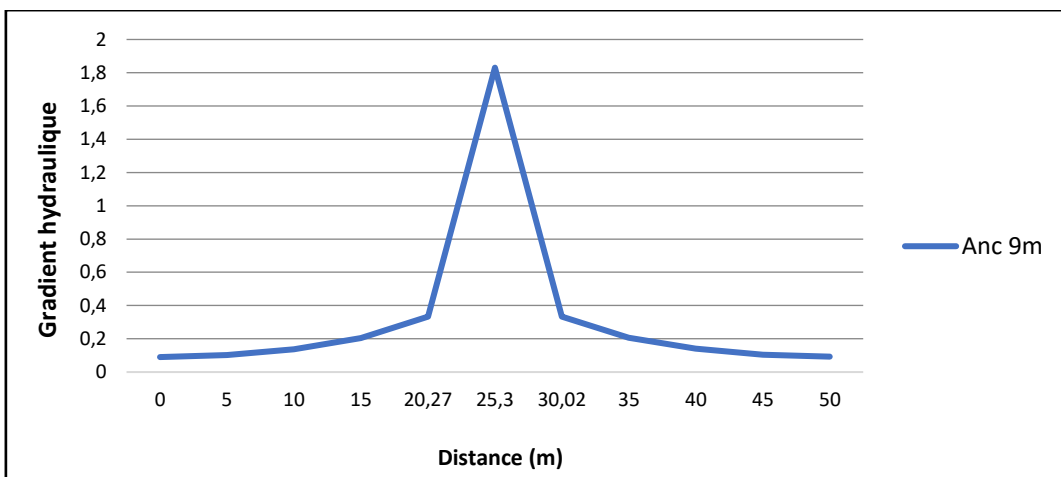


Fig III.64. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m - $K = 10^{-5}$ m/s

Le tableau 3 récapitule la comparaison des gradients hydrauliques et des pressions interstitielles en fonction de la perméabilité des sols au niveau de la zone aval de la fiche des palplanches.

Tableau III.3. Influence de la perméabilité des sols sur les paramètres d'écoulement autour de la palplanche.

| $K = 10^{-5} \text{ m/s}$ | | $K = 10^{-3} \text{ m/s}$ | |
|--|--------|---------------------------|--------|
| Gradients hydrauliques | | | |
| Distance 30.02 m | 0.33 | Distance 30.02 m | 0.33 |
| Distance 35 m | 0.206 | Distance 35 m | 0.208 |
| Pressions interstitielles (KPa) | | | |
| Distance 30.02 m | 114.08 | Distance 30.02 m | 101.67 |
| Distance 35 m | 105.98 | Distance 35 m | 94.59 |

On constate que l'influence de la perméabilité des sols atténuant à la fiche de palplanches n'est pas significative.

5.3. Influence des gradients de charges amont aval :

Afin d'analyser l'influence du gradient des charges amont aval sur les paramètres d'écoulement, une série de modélisation a été engagée avec deux types de sols de perméabilité $K = 10^{-3} \text{ m/s}$ et $K = 10^{-5} \text{ m/s}$.

Les figures de 65 à 68 donnent respectivement les variations des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques pour les deux cas de perméabilité. la fiche de la palplanche est toujours maintenue à 9 m de profondeur.

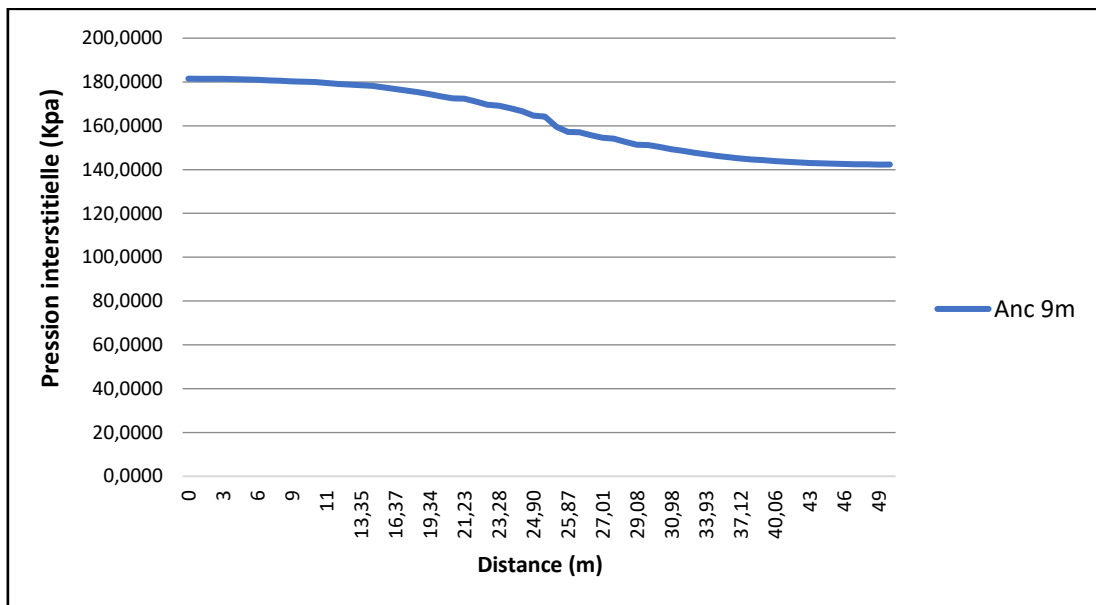


Fig III.65. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-3} \text{ m/s}$

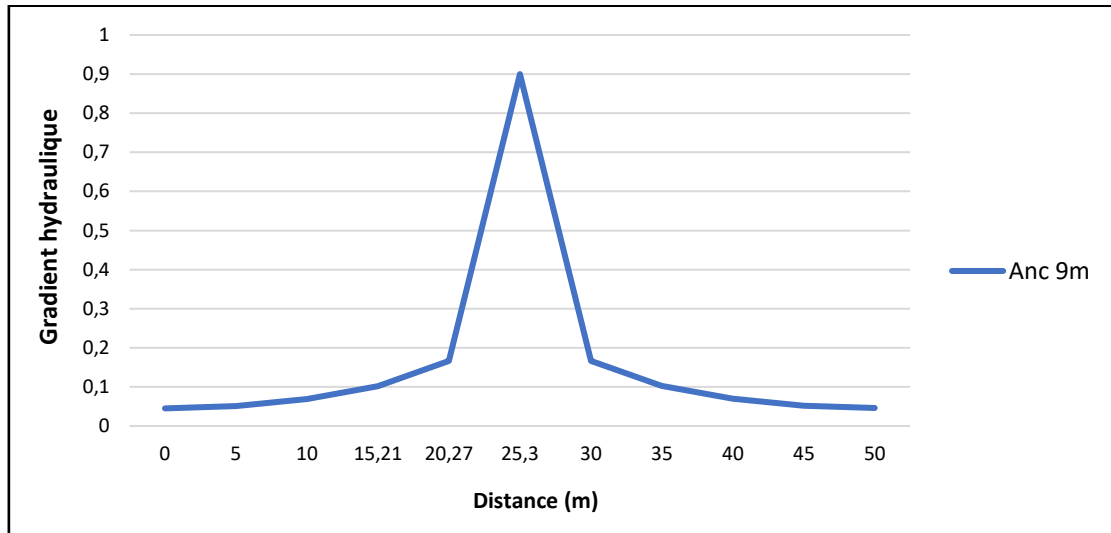


Fig III.66. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-3}$ m/s

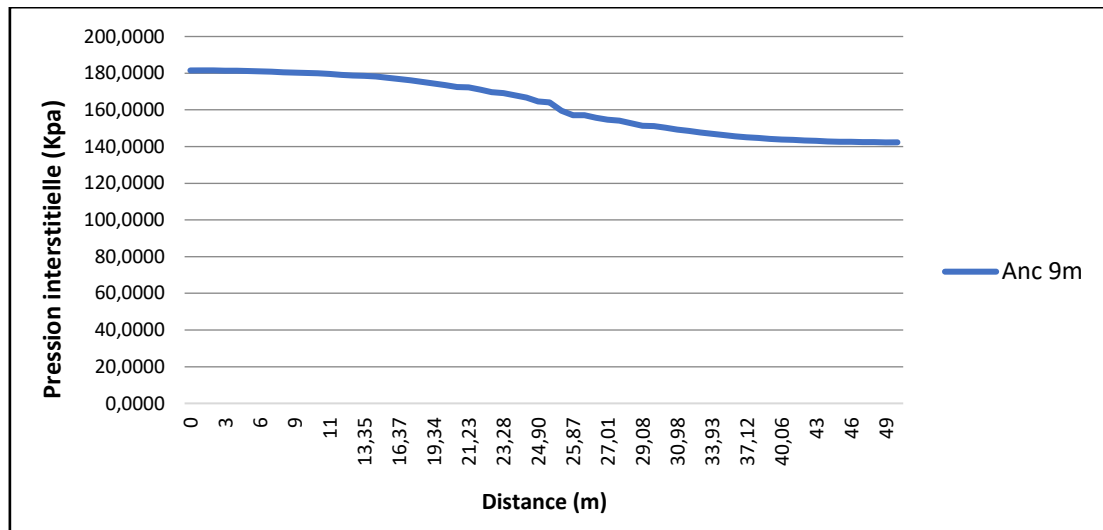


Fig III.67. Variations des pressions interstitielles pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-5}$ m/s

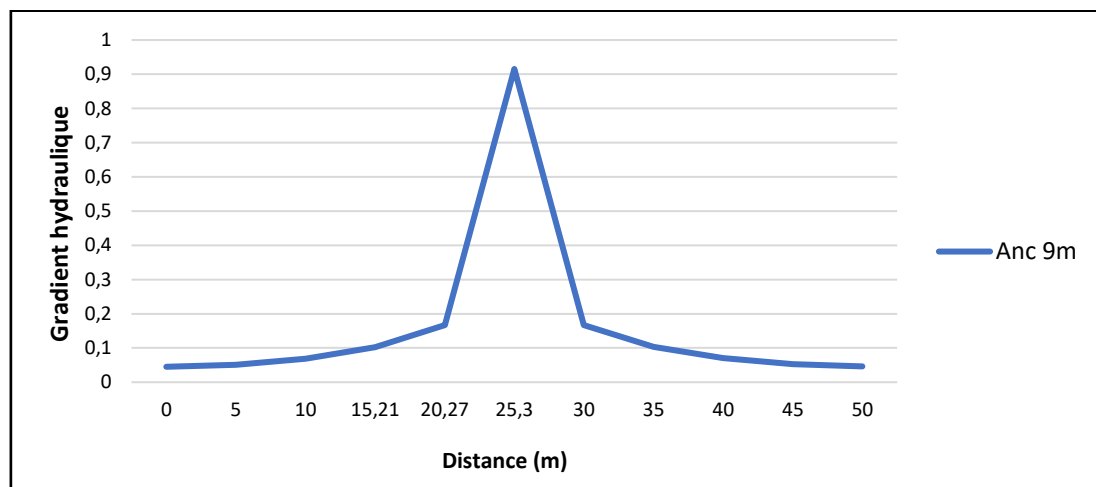


Fig III.68. Variations du gradient hydraulique pour une fiche de 9 m avec gradient de charge - $K = 10^{-5}$ m/s

Le tableau 4 récapitule les variations des gradients hydrauliques et des pressions interstitielles en fonction de la perméabilité des sols au niveau de la zone aval de la fiche des palplanches pour le cas d'un gradient de charge amont-aval.

Tableau III.4. Influence de la perméabilité des sols sur les paramètres d'écoulement autour de la palplanche avec gradient de charge amont-aval.

| K = 10⁻⁵ m/s | | K = 10⁻³ m/s | |
|--|--------|--------------------------------|--------|
| Gradients hydrauliques | | | |
| Distance 30 m | 0.16 | Distance 30 m | 0.16 |
| Distance 35 m | 0.10 | Distance 35 m | 0.10 |
| Pressions interstitielles (KPa) | | | |
| Distance 30 m | 150.37 | Distance 30 m | 150.30 |
| Distance 35 m | 146.33 | Distance 35 m | 146.25 |

On constate que l'influence de la perméabilité des sols atténuant à la fiche de palplanches n'est pas significative sur les pressions interstitielles et les gradients hydrauliques.

Aussi, et par rapport au cas d'absence de gradient de charge amont aval, une réduction considérable des gradients hydrauliques est enregistrée avec une augmentation significative des pressions interstitielles dans la zone aval immédiate de la fiche de la palplanche. Ceci est provoqué par l'influence de la charge aval sur les caractéristiques de l'écoulement ascendant à l'aval de la fiche.

Conclusion générale :

Les aspects conceptuels liés à la réalisation des rideaux de palplanches doivent garantir une sécurité suffisante en maîtrisant les paramètres d'écoulement, notamment en matière de charges hydrauliques, de pressions interstitielles et de gradients hydrauliques.

L'analyse des conditions d'écoulement autour des rideaux de palplanches doit déboucher sur l'appréciation et l'évaluation des paramètres qui peuvent porter préjudice à la stabilité des structures. Le développement d'un renard hydraulique ou de bouillonnement est conditionné par le gradient hydraulique, la différence de niveau Δh et l'évolution des pressions interstitielles

Pour les rideaux de palplanches, la zone critique, en relation avec les critères de sécurité admissibles est située autour des fiches et principalement au pied aval. La profondeur d'ancrage des fiches de palplanches est sans aucun doute l'élément essentiel autour duquel la conception est définie. Les caractéristiques des sols atténuant ainsi que le développement des gradients de charges sont aussi des paramètres à ne pas négliger dans la conception.

L'analyse numérique paramétrée et comparative engagée dans le présent mémoire a été menée en étudiant l'évolution des pressions interstitielles, des charges d'eau et des gradients hydrauliques en fonction des paramètres d'influence (profondeur des fiches, perméabilité des sols et gradients de charges amont aval)

Les principales conclusions à synthétiser à travers l'analyse peuvent être résumées en ce qui suit:

- Pour les palplanches de faible profondeur des fiches, les gradients de charges et de pressions interstitielles sont enregistrés à l'amont de la fiche. A partir des fiches de profondeur 3 m (soit le tiers de la charge), les gradients sont enregistrés au contact du pied aval de la palplanche.
- L'influence des longueurs des contours souterrains, par rapport aux gradients des charges et à la perméabilité des sols est prépondérante.
- Pour des faibles profondeurs des fiches, les gradients de pressions interstitielles et de charges sont plus prononcés. Avec l'augmentation des profondeurs des fiches, ces gradients deviennent plus modérés et sont fortement influencés par le gradient des charges et des longueurs d'écoulement.
- Les risques d'érosion régressive qui peuvent précéder des phénomènes de bouillonnement sont influencés par les pertes de charges et des profondeurs des fiches, indépendamment des valeurs de pressions interstitielles.

- Des précautions conceptuelles doivent être prises en fonction de la profondeur des fiches, de la nature des sols atténuant et des gradients critiques admissibles de ces derniers. La comparaison des gradients hydrauliques enregistrés autour des fiches de palplanches aux gradients critiques de certains matériaux est très instructive et peut orienter éventuellement les choix conceptuels en fonction de la nature des sols.
- L'influence de la perméabilité des sols atténuant à la fiche de palplanches, par rapport aux autres paramètres, n'est pas significative sur l'évolution des pressions interstitielles et des gradients hydrauliques.
- Les gradients de charges amont aval ont une influence considérable sur les pressions interstitielles et les gradients hydrauliques dans la zone aval immédiate de la fiche de la palplanche.

Références bibliographiques :

- (1). **Salim, A., et al.** Synthèse Scientifique et Technique. École d'ingénieur du groupe ei.CESI. 2010-2013, p. 49.
- (2). **Schlosser et François.** cours de mécanique des sols II, notes de cours rideaux de palplanches. techniques de l'ingénieur traité construction, Ecole nationale des travaux publics de l'état. 2006-2007.
- (3). **Arafati, N.** le sujet Contribution à l'étude des problèmes de déchargement dans les massifs de sol Application à la modélisation des ouvrages de soutènement. Thèse de Doctorat de l'école national des ponts et chaussées, Spécialité : géotechnique. 1996.
- (4). **Charef khodja, K.** Modélisation de l'interaction sol-structure pour le cas des palplanches (Cas d'un écran de palplanches à AZEFFOUN). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou. 2010-2011.
- (5). **Hadj Abderrahmane, S.** Etude de l'interaction de l'interaction d'un rideau de palplanches avec le sol de fondation pour les ouvrages portuaires. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou. 2012.
- (6). **La compagnie :** Reliance foundry. <https://www.reliance-foundry.com/blog/acier-lamine-chaud-contre-froid-fr?fbclid=IwAR32XyaYKhIct8M6Ph7htew5HnFC1KUHLhgPtzzmz2JHKQrxH1UWL00VSI>
- (7). **La compagnie :** Grand piling. <https://www.palplanches-acier.fr/category/sheet-pile-combi-combined-walls-system-4.html>
- (8). **Corfdir, A.** Analyse de la stabilité d'ouvrages en Gabions cellulaires par la théorie du calcul à la rupture. Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées. Spécialité : Structure et Matériaux. Paris : s.n., 1997.
- (9). **Palplanches,** Arcelormittal. <https://projects.arcelormittal.com/foundationolutions/fr/produits/gamme-de-produits/palplanches-en-acier/palplanches-plates/language/FR>
- (10). **Arcelormittal Palplanche.** Catalogue générale. 2019. [AMCRPS Gen Cat FR 2019 web.pdf](#)
- (11). **Bekaoui, I.** Modélisation tridimensionnelle du sol retenu par un rideau de palplanches avec les scénarios de déformation sous l'effet de corrosion. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, Université Ahmed Draia Adrar. 2019-2020.
- (12). **Guide technique .** Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des rideaux de palplanches métallique. Laboratoire central des ponts et chaussées. juillet 2003.
- (13). **Balegh, B.** Analyse analytique et numérique d'un rideau de palplanches corrodées. Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès. 2018.
- (14). **Mokeddem, A.** Modélisation géomécanique et probabiliste des rideaux de palplanches : Prise en compte de l'interaction sol-structure et la variabilité spatiale du sol . Thèse de doctorat . Ecole doctorale sciences physiques de l'ingénieur . Spécialité : Mécanique . Université de Bordeaux. 2018.
- (15). **Le groupe Freyssinet.** Systèmes d'ancrage pour la géotechnique. 2014.
- (16). **FASCICULE 51.** instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art. Ouvrages de soutènement. Décembre 1985.

- (17). **Fixot, J.** Analyse comparative de la norme NF P 94 282 sur les écrans de soutènement. Mémoire présenté en vue d'obtenir Le diplôme d'ingénieur CNAM (Conservatoire national des arts et métiers). Spécialité : Construction - Aménagement. 2013.
- (18). **NIPPON STEEL CORPORATION.** Steel sheet piles.Tokyo.Japan . 2019. [Nippon steel .pdf](#)
- (19). **Josseume, H.** Méthode de calcul des rideaux de palplanches Etude bibliographique. Réf. 1495-PP 177-212. 1974.
- (20). **Namane, A et Nor, M.Y.** Erosion régressive interne dans les barrages en remblais, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master. Spécialité : Ingénierie Des infrastructures de Base et Géotechnique, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen.2016.
- (21). **Ouandjeli, A.** Etanchéisation d'un barrage (Barrage de SOUK TLETA sur l'oued de BOUGDOURA), En vue de l'obtention d'un diplôme master en génie civil. Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou. 2017-2018.
- (22). **Couturier, B et al.** Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai. Revue Français de géotechnique N° 136 3e trimestre, comité français des barrages ci réservoirs.2011.
- (23). **Léreau, J.** Cours : Géotechnique 1, Chapitre 2. Institut National des sciences appliquées de toulouse , Département de sciences et technologies pour l'ingénieur,2005-2006 .
- (24). **Saidi, D.** La protection des barrages contre le gradient de sortie,Mémoire de Master, Spécialité : Ouvrage Hydraulique. Université Mohamed khider –Biskra.2019.
- (25). **Sibille, L.** Eléments de géotechnique : écoulements, stabilité des pentes, parois de soutènement souples IUT Génie Civil et Construction Durable Module MXG6. Licence. France. 2017. cel-01784598.
- (26). **Desodt, C et Horsin Molinaro,H.** Phénomènes de boulangerie et d'érosion régressive (renard hydraulique) dans les barrages. Université Paris-Saclay, 2016.
- (27). **Reddi, L.N.** SEEPAGE IN SOILS : principes and applications. 416 pages, 2003.
- (28). **Bensmaine, A.** Analyse numérique de la stabilité des fouilles en présence d'écoulement. Thèse de doctorat, Université Mohamed khider –Biskra .2016.
- (29). **Amara, N et Dib G. C.** Contribution à la conception des barrages en zones sahariennes Cas du barrage de LAOUINA - wilaya de Béchar , Mémoire de projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master en génie civil. Option : Géotechnique, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen. 2019-2020.
- (30). **Dr. Lehabab ep. Boukezzi, Z.** Polycopié Les barrages en remblai de terre. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF.
- (31). **Cours: : Hydraulique souterraine.** <http://www.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/Partie-1.-Bases-Physiques-et-Th%C3%A9oriques-de-lHydraulique-Souterraine.pdf>
- (32). **Khater, I.** Estimation des pressions de terre passive et active en présence d'écoulement dans les fouilles de largeur limitée. Thèse de Doctorat,Spécialité : science hydraulique,Université Mohamed Khider – Biskra,2019.

(33). Fagon, Y. et al. Ouvrages de navigation et écoulements souterrains Phénomènes, surveillance, prévention et réparation. Centre d'études Techniques Maritimes Et Fluviales,2002.

(34). Benhamidouche, W et Bedira, F. Analyse de l'effet des infiltrations sur la stabilité d'un barrage en terre (Application au cas du barrage de soubella-wilaya de Msila). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master,Université Mohamed Boudiaf - M'sila . 2017-2018.

(35). Chiheb, M et Griou, S. Analyse de la stabilité de la pente en utilisant la modélisation numérique : application au glissement de terrain du centre hospitalier universitaire « ISAAD Hassani » Beni Messous-Alger. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master, Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana. 2017-2018 .

(36). Dellatre, L. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées. Réf 4308 – pp 35-55, septembre-octobre 2001.