



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des sciences et de la technologie

Département de génie civil

Pour l'obtention du diplôme de master académique

En : travaux publics

Spécialité : voies et ouvrages d'arts

Présenté par : BAHI Saif Eddine

Encadré par : Prof HOUAM Abdelkader

**MEMOIRE**

**Etude d'un remblai sur sol mou renforcé par des murs en ballast.**

Présenté et soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2020, devant le jury composé de :

**Dr. LAOUAR Mohamed Salah**

**Dr. BOUCHOUCHA Abdallah**

**Prof HOUAM Abdelkader**

**Promotion : juin 2020**



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**Republique Algerienne Democratique Et Populaire**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
جامعة العربي التبسي – تبسة

**Université Larbi Tébessi – Tébessa –**  
**Faculté des sciences et de la technologie**

**Département de génie civil**

**Pour l'obtention du diplôme de master académique**

**En : travaux publics**

**Spécialité : voies et ouvrages d'arts**

**Présenté par : BAHI Saif Eddine**

**Encadré par : Prof HOUAM Abdelkader**

**MEMOIRE**

**Etude d'un remblai sur sol mou renforcé par des murs en ballast.**

**Présenté et soutenu publiquement, le 29 / 06 / 2020, devant le jury composé de :**

**Dr. LAOUAR Mohamed Salah**

**Dr. BOUCHOUCHA Abdallah**

**Prof HOUAM Abdelkader**

**Promotion : juin 2020**

# DEDICACES

Tous d'abord je remercie le bon dieu qui m'a donné le courage et la volonté pour arriver à ce stade de fin d'étude.

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents Lakhdar & Malika qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ils ont sacrifié toute leurs vies afin de ma voir devenir ce que je suis.

Ma chère sœur Selma qui m'a aidé beaucoup durant mes études, ma sœur SOUHIR & MOHAMED qui sont m'encourage toujours, ils ont été à mes côtés et m'ont soutenu durant toute ma vie.

Mes grandes mères.

Mes oncles.

À mon encadreur Pr. HOUAM Abd El Kader pour la patience, l'aide, la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce projet. Son soutien, sa présence et ses conseils avisés m'a donné le courage de préserver tout au long de notre étude. Durant tout l'encadrement.

Toutes mes enseignants.

Toute la famille.

Toute mes amies de la promotion de VOA 2020.

Tous ce qui m'aime et que j'aime.

# REMERCIEMENT

Avant tout nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la chance d'étudier, et nous avoir armé par la force, le courage et la patience afin d'accomplir cette mission de formation MASTER.

Je remercie mes chers Parents BAHY Lakhdar et DERBAL Malika, qui se sont consacrés à m'inculquer la bonne éducation et qui ont su offrir en moi tout ce qui se trouve de plus beau en ce monde ; sans oublier mon frère " Mohamed" et mes sœurs Selma et SOUHI qui m'ont soutenu largement.

Je remercie bien fort mon encadreur le Pr. HOUAM Abd El Kader, qui m'a confié ce travail et l'avez suivie avec compétence et rigueur. C'est grâce à son disponibilité constante et l'encadrement réservé sans relâche que j'ai pu réaliser ce travail.

Un grand merci qui s'adresse également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier.

Nous remercions tous nos enseignants durant toute notre formation et tout le personnel administratif de l'université.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre de ma grande famille :

Mes grands-mères : BAHY FATMA, DERBAL CHAHBA,

Mes oncles : TURKI ET AMARA, HICHEM ET LOTFI.

Je remercie mes amis ainsi que mes collègues de MASTER avec que

J'ai passé de bon moment.

Je remercie bien quelqu'un qui m'a aidé beaucoup (F).

J'exprime ici ma gratitude aux personnes qui de près ou de loin ont

Contribué à l'établissement de cette mémoire.

## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction Générale</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Etude des remblais sur sols mous</b>	
1-Introduction	<b>04</b>
2-Définition Des Sols Compressible	<b>05</b>
2-1 les argiles	<b>05</b>
2-2 Les tourbes	<b>05</b>
2-3 Les limons	<b>06</b>
3-Propriétés Caractéristiques Des Sols Compressibles	<b>06</b>
3-1Caractéristiques des argiles	<b>06</b>
3-2 Structure moléculaire microscopique des argiles	<b>07</b>
3-2-1 Kaolinite : $(Si_4O_{10}) Al_4 (OH)_8$	<b>07</b>
3-2-2 Montmorillonite : $(OH)_4 Si_8 (Al_3+10/3, Mg_{2/3}) O_{20}, n H_2O (6)$	<b>08</b>
3-2-3 Illite : $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$	<b>08</b>
4-Technologie de mise en place	<b>09</b>
5- Conclusion	<b>10</b>
<b>Chapitre II : Notions sur les Ballasts</b>	
1-Introduction	<b>12</b>
2-Définition	<b>12</b>
3-Nature et origine du ballast	<b>13</b>
4-Fonctions du ballast	<b>15</b>
5-Types de détériorations du ballast	<b>18</b>
5-1Détérioration par usure mécanique	<b>18</b>
5-2 Détérioration par pollution	<b>20</b>
5-3 Détérioration par l'altération	<b>21</b>
6- Les caractéristiques du ballast	<b>22</b>
6-1 Les caractéristiques géologiques	<b>22</b>
6-2 Caractéristiques Géotechniques	<b>23</b>
<b>Chapitre III : Remblais sur des sols mous : hypothèses de rupture et de tassement</b>	
1-Introduction	<b>29</b>
2-Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles	<b>30</b>
2-1Problèmes de stabilité	<b>30</b>
2-2 Problèmes de tassement	<b>30</b>
2-2-1 Rupture générale par poinçonnement	<b>31</b>

2-2-2 Rupture par glissement (rotationnelle)	32
3- Approches pour la prévision des tassements	33
3-1 Méthodes d'évaluation de l'amplitude des tassements	33
3-2 Méthodes d'évaluation des temps de tassement	34
3-3 Détermination expérimentale du coefficient de consolidation	36
4-Techniques de renforcement des remblais sur sols compressibles	39
5- Conclusion	40
<b>Chapitre IV : Etude Numérique D'un Remblai Sur Sol Mou Muni De Murs En Ballast</b>	
1-Introduction	42
2- Présentation des modèles utilisées dans le logiciel PLAXIS	43
2-1Dimensionnement du model de remblais sans ballast	43
2-2Dimensionnement du model de ballast avec murs en ballast	49
2-2-1 2ème cas : Remblais avec murs en ballast (100 fois)	49
2-2-2 3ème cas : Remblais avec murs en ballast (200 fois)	55
<b>Chapitre V : Interprétations des résultats</b>	
<b>Conclusion Générale</b>	<b>68</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>69</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Chapitre I : Etude Des Remblais Sur Sols Mous</b>	
<b>Figure I.1</b> Schéma type de remblais sur sols mous	<b>05</b>
<b>Figure I.2</b> Structure élémentaire de la Kaolinite	<b>08</b>
<b>Figure I.3</b> Structure élémentaire de la Montmorillonite	<b>08</b>
<b>Figure I.4</b> Structure élémentaire de L' Illite	<b>09</b>
<b>Figure I.5</b> Constitution de remblais.	<b>10</b>
<b>Chapitre II : Notions Sur Les Ballasts</b>	
<b>Figure II.1</b> Représentation schématique d'une structure classique de voie ferrée	<b>13</b>
<b>Figure II.2</b> Classification des roches	<b>14</b>
<b>Figure II.3</b> Composition de la structure d'une voie ferrée . LGV, ligne ` grande vitesse	<b>16</b>
<b>Figure II.4</b> Différentes contraintes que subis le ballast	<b>17</b>
<b>Chapitre III : Remblais Sur Des Sols Mous : Hypothèses De Rupture Et De Tassement</b>	
<b>Figure III.1</b> Rupture par poinçonnement	<b>32</b>
<b>Figure III.2</b> Glissement avec fissuration	<b>32</b>
<b>Figure III.3</b> Glissement sans fissuration	<b>33</b>
<b>Figure III.4</b> Processus des méthodes du chemin de contraintes	<b>34</b>
<b>Figure III.5</b> Processus de consolidation des sols fins	<b>35</b>
<b>Figure III.6</b> Explication du phénomène de tassement dans le temps sous une charge donnée	<b>36</b>
<b>Figure III.7</b> Détermination du Cv par la méthode du logarithme du temps (Casagrande)	<b>37</b>
<b>Figure III.8</b> courbes de consolidation réelle	<b>38</b>
<b>Chapitre IV : Etude Numérique D'un Remblai Sur Sol Mou Muni De Murs En Ballast</b>	
<b>Figure IV.1</b> Coupe du model de calcul 1er (Remblais Sans Ballast)	<b>43</b>
<b>Figure IV.2</b> Position de la nappe phréatique.	<b>44</b>
<b>Figure IV.3</b> Maillages par éléments finis du projet.	<b>46</b>
<b>Figure IV.4</b> Incréments de déplacement dus au changement de niveau d'eau.	<b>46</b>
<b>Figure IV.5</b> Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de défaillance le plus applicable du remblai au stade final.	<b>47</b>
<b>Figure IV.6</b> Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.	<b>47</b>
<b>Figure IV.7</b> Contours de la surpression interstitielle après consolidation.	<b>48</b>
<b>Figure IV.8</b> Contraintes effectives dans le remblai.	<b>48</b>
<b>Figure IV.9</b> Coupe du modèle de calcul, 2ème cas (Remblais avec Ballast)	<b>49</b>
<b>Figure IV.10</b> Position de la nappe phréatique	<b>49</b>
<b>Figure IV.11</b> Maillages de déformé par éléments finis du projet.	<b>51</b>
<b>Figure IV.12</b> Incréments de déplacement dus au changement de niveau d'eau	<b>52</b>
<b>Figure IV.13</b> Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.	<b>52</b>
<b>Figure IV.14</b> Contours de la surpression interstitielle après consolidation.	<b>53</b>

<b>Figure IV.15</b> Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de rupture le plus probable du remblai au stade final.	<b>53</b>
<b>Figure IV.16</b> Contraintes effectives dans le remblai après l'augmentation du niveau d'eau.	<b>54</b>
<b>Figure IV.17</b> Maillages déformé par éléments finis du projet.	<b>56</b>
<b>Figure IV.18</b> Incréments de déplacement.	<b>57</b>
<b>Figure IV.19</b> Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de rupture le plus probable du remblai au stade final.	<b>57</b>
<b>Figure IV.20</b> Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.	<b>58</b>
<b>Figure IV.21</b> Contours de surpression interstitielle après consolidation	<b>58</b>
<b>Figure IV.22</b> Contraintes effectives dans le système.	<b>59</b>
<b>Figure IV.23</b> Evolutions de la surpression interstitielle sous le remblai pour les 3 cas de calcul.	<b>59</b>
<b>Figure IV.24</b> Evolutions du facteur de sécurité pour les trois cas de construction à long terme.	<b>60</b>
<b>Figure IV.25</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système sans Ballast.	<b>60</b>
<b>Figure IV.26</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.	<b>61</b>
<b>Figure IV.27</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.	<b>61</b>
<b>Chapitre V : Interprétations des résultats</b>	
<b>Figure V.01</b> Evolutions de la surpression interstitielle sous le remblai pour les 3 cas de calcul.	<b>64</b>
<b>Figure V.02</b> Evolutions du facteur de sécurité pour les trois cas de construction à long terme.	<b>65</b>
<b>Figure V.03</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système sans Ballast.	<b>66</b>
<b>Figure V.04</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.	<b>66</b>
<b>Figure V.05</b> Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour de système avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.	<b>67</b>

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Chapitre II : Notions Sur Les Ballasts</b>	
<b>Tableau II.1</b> Normes de l'exécution de l'essai Deval	<b>25</b>
<b>Tableau II.2</b> Exemple d'essai Los Angeles pour du ballast utilisé en France	<b>27</b>
<b>Tableau II.3</b> Normes des essais géotechniques des granulats du ballast.	<b>27</b>
<b>Chapitre IV : Etude Numérique D'un Remblai Sur Sol Mou Muni De Murs En Ballast</b>	
<b>Tableau IV.1</b> les paramètres des matériaux utilisées dans la 1er cas (RSB)	<b>44</b>
<b>Tableau IV.2</b> les paramètres des matériaux utilisées dans la 2ème cas (Remblais avec Ballast).	<b>50</b>
<b>Tableau IV.3</b> les paramètres des matériaux utilisées dans la 3ème cas (Remblais avec Ballast).	<b>55</b>

## Résumé

Une route est au sens littéral une voie terrestre (au niveau du sol ou sur viaduc) aménagée pour permettre la circulation de véhicules à roues qui joue un rôle crucial dans le développement économique de tout pays. L'ingénierie des chaussées est un facteur clé pour concevoir et construire des routes pérennes qui sont la plupart des temps fondées sur des remblais.

L'objectif principal de la présente étude est de procéder à une analyse numérique du comportement d'un remblai de la route reposant sur une couche d'argile gonflante d'une fois et sur une plateforme renforcée par des murs en ballast de l'autre fois en utilisant un logiciel basé sur la méthode des éléments finis MEF (PLAXIS 2D v12).

Une analyse détaillée du remblai a été effectuée en fonction du temps de consolidation et de déplacement du remblai et le facteur de sécurité contre la rupture de la pente a été calculé pour les différentes combinaisons menant à la déduction du temps de consolidation tenant compte des conditions ainsi que des propriétés des matériaux du site. Le critère de Mohr-Coulomb a été utilisé pour la modélisation des matériaux constituant le remblai dans l'analyse MEF.

Mots-clés : Remblai, sol moue, ballast, Comportement, Chaussée, Nappe phréatique, Méthode des éléments finis, PLAXIS 2D v12.

## ملخص

تم إجراء تحليل مفصل للجسر كدالة لوقت الجسر والإزاحة للجسر وتم احتساب عامل الأمان ضد كسر المنحدر للمجموعات المختلفة مما أدى إلى خصم وقت الدمج مع مراعاة الظروف وبالتالي خصائص مواد الموقع. تم استخدام معيار (Mohr-Coulomb) لنمذجة المواد التي تشكل الجسر في تحليل (MEF).

الطريق (الاستماع) هو حرفياً طريق بري (على مستوى الأرض أو فوق جسر) تم ترتيبه للسماح بتداول المركبات ذات العجلات التي تلعب دوراً حاسماً في التنمية الاقتصادية لأي بلد. هندسة الرصف هي عامل رئيسي في تصميم وبناء الطرق الدائمة التي تعتمد في الغالب على السدود.

الكلمات الرئيسية: السد، طين التورم، السلوك، الرصيف، منسوب المياه، طريقة العناصر المحدودة، ( PLAXIS 2D )  
(8.1v).

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إجراء تحليل عددي لسلوك سد الطريق الذي يركز على طبقة من الطين المتورم مرة واحدة وعلى منصة معززة بجدران الصابورة للأخر. مرات باستخدام برنامج يعتمد على طريقة العناصر المحدودة MEF (PLAXIS 2D v12).

## **Abstract**

A road is literally a land route arranged to allow the circulation of wheeled vehicles which plays a crucial role in the economic development of any country. Pavement engineering is a key factor in designing and building perennial roads that are mostly based on embankments.

The main objective of this study is to carry out a numerical analysis of the behavior of a road embankment resting on a layer of swelling clay once and on a platform reinforced by ballast walls of the other. times using software based on the MEF finite element method (PLAXIS 2D v12).

A detailed analysis of the embankment was carried out as a function of the consolidation and displacement time of the embankment and the safety factor against breaking the slope was calculated for the different combinations leading to the deduction of the consolidation time taking into account the conditions thus properties of the site materials. The Mohr-Coulomb criterion was used for the modeling of the materials constituting the embankment in the MEF analysis.

Keywords: Embankment, Swelling clay, Behavior, ballast, embankment, phreatic Water, Finite element method, PLAXIS 2D v12.

# INTRODUCTION

La mémoire d'un sol (nature des roches altérées qui la constituent) est une source capitale dans la compréhension de son comportement dont la complexité est avérée. (Robert D. Holtz, Williams D. Kavacs 1991). Ce comportement linéaire et anisotrope dépend de deux facteurs majeurs, le premier, l'action physique et chimique de l'eau et de l'air contenu dans les interstices des particules constituant ce sol et le second, l'interaction des particules entre elles. Les sols mous ou très compressibles sont caractérisés par une faible résistance au cisaillement, une faible cohésion non drainée

Cu à court terme et un accroissement sensible de la cohésion non drainée par la consolidation. (Philippe Mestat et Michel Prat, 1999). Les pressions interstitielles diminuent sous l'application d'un chargement, donc une augmentation des contraintes effectives dans le sol. Après dissipation de ces pressions, le sol continu à se déformer, c'est le phénomène de consolidation secondaire lié au fluage du sol, le tassement qui se développe sous contrainte effective constante se poursuit pendant des milliers d'années. Les talus en remblai sur sols mous posent un problème de stabilité. Pour prédire la stabilité et le comportement de ce type de talus à long terme on doit étudier les tassements, et le mode de rupture.

Problèmes de stabilité Au - delà d'une certaine hauteur limite de remblai, il y a risque de rupture, se présentant généralement sous forme de glissement de talus. Les méthodes d'études de stabilité des pentes, permettent de déterminer cette hauteur limite pour un coefficient de sécurité donné, connaissant les caractéristiques géométriques du remblai et des couches de sol, le niveau de la nappe et les caractéristiques mécaniques du remblai et des sols de fondations qui sont la résistance au cisaillement, et le poids spécifique. La résistance au cisaillement à considérer est celle obtenue évidemment avant consolidation, c'est elle qui fournit le plus petit coefficient de sécurité. Pour mémoire, on indiquera la possibilité d'emploi du programme **PLAXIS 2D** basé sur les méthodes des éléments finis.

Il existe différentes méthodes de renforcement des sols compressibles, plus ou moins anciennes et plus ou moins développées et parmi toutes ces méthodes, on observe depuis quelques années le développement du renforcement des sols par des murs en ballast, qui peut concerner des domaines d'application un peu différents des méthodes « traditionnelles ». Ces techniques permettent de conserver le sol compressible en place, ce qui constitue un avantage économique et environnemental non négligeable.

Parmi les nombreuses méthodes d'amélioration de sols, le renforcement par colonnes ballastées constitue une technique intéressante pour l'amélioration en place des sols compressibles. Leurs avantages majeurs sont de réduire les tassements, d'augmenter la capacité portante des sols, d'accélérer la consolidation, l'élimination des risques de liquéfaction lors des séismes et sa mise en place rapide. Grâce à ces avantages, les procédés de renforcement sont considérablement développés dans le domaine de la construction géotechnique et cela à l'échelle internationale.

L'objectif de ce travail est plus particulièrement axé sur une étude paramétrique d'un remblai sur sol mou d'une fois et renforcé par des murs en ballast d'autre fois. On va évaluer l'influence de l'augmentation du coefficient de perméabilité du ballast sur le drainage de l'eau interstitielle et son influence sur le temps de consolidation et la stabilité du remblai.

Dans ce projet nous avons élaboré cinq (5) chapitres :

Chapitre I : Etude des sols mous.

Chapitre II : Notions sur les Ballasts.

Chapitre III : Remblais sur des sols mous : Hypothèses de rupture et de tassement.

Chapitre IV : Etude numérique d'un remblai sur sol mou muni de murs en ballast.

Chapitre V : Interprétations des résultats.

Et on achève le mémoire avec une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

## **Etude Des Sols Mous**

## Chapitre I

**Etude Des Sols Mous****1- Introduction**

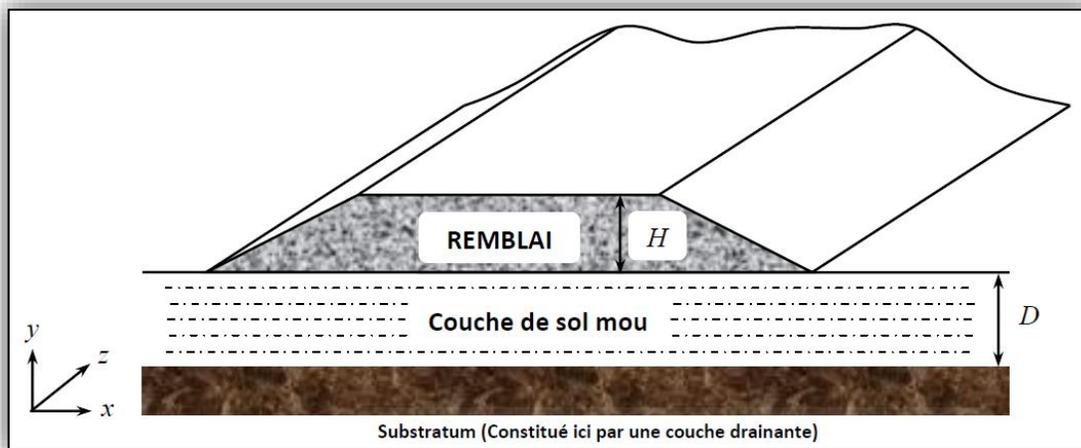
Tous les sols sont compressibles, c'est-à-dire qu'ils tassent lorsqu'on leur applique une charge verticale. L'amplitude et la vitesse de ce tassement varient dans de grandes proportions suivant le type de sol considéré. Les sols compressibles sont généralement de formation récente, inaptes à supporter un ouvrage d'art, mais pouvant, moyennant certaines précautions, servir de fondation à un remblai. Les remblais routiers, tout au moins ceux qui ont une hauteur importante, sont souvent édifiés sur des sols très compressibles. Ils sont en effet, le plus souvent, construits dans des zones de dépression comportant de grandes épaisseurs de tels sols, soit que le remblai serve lui-même à la traversée de la vallée, soit qu'il s'agisse du remblai d'accès à un ouvrage franchissant une rivière. Les sols compressibles sont caractérisés par [F. BERRABAH.2010] :

- Une nature le plus souvent argileuse avec une teneur en matières organiques plus ou moins importante mais rarement négligeable ;
- Une teneur en eau très forte, et un faible poids spécifique apparent (ces sols sont très généralement saturés) ;
- Une résistance au cisaillement très faible ;
- Une forte compressibilité se traduisant, même sous faible charge, par des amplitudes de tassement notables, la vitesse de tassement décroissant avec le temps, mais ne s'annulant pas en quelques années.

Ces sols, généralement de formation récents (quelques milliers d'années) contiennent presque toujours, en plus ou moins grande proportion, des matières organiques, on peut les diviser en trois catégories

[F. BERRABAH.2010. P.5] :

- Les vases et argiles molles ;
- Les tourbes ;
- Les sols de sebkha formés de vase argileuse ou de vase sableuse.



**Figure I.1** Schéma type de remblais sur sols mous [MAGNAN et all]

## 2- Définition Des Sols Compressible

### 2-1 les argiles

Les argiles sont des roches sédimentaires à grains fins, de taille inférieure à  $5 \mu\text{m}$ , composée pour une large part de minéraux spécifiques, silicates en général, d'aluminiums plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption. Elles absorbent l'eau et forment une pâte imperméable (perméabilité inférieure à  $0,2 \text{ mm/h}$ ), appelée couramment terre glaise, colorée par des oxydes de fer en ocre, rouge, vert. Les argiles peuvent être gonflantes, notamment celles de la famille des Montmorillonites lorsqu'elles absorbent l'eau et, au contraire, diminuer de volume sous l'effet de la sécheresse, allant jusqu'à fissurer en surface et même sur une profondeur de 2 m à 4 m. Par ailleurs, sous l'effet d'une charge, par exemple celle d'une construction, une partie de l'eau absorbée contenue entre les grains d'argile est chassée, ce qui a pour conséquence de provoquer un tassement sensible du sol [MAGNAN et all].

### 2-2 Les tourbes

Les tourbes sont des dépôts naturels organiques très compressibles, à hautes teneurs en matière organique, à très hautes teneurs en eau et à très hauts degrés de saturation, dont le contenu en fibres végétales décomposées constitue une structure anisotrope qui influence les résistances mécaniques. Le tassement de la tourbe ne suit généralement pas les lois classiques de la consolidation des argiles.

- La pression de reconsolidation est généralement difficile à déterminer, bien qu'il s'agisse vraisemblablement de sols normalement consolidés.
- La phase de consolidation est généralement très courte et malaisée à définir.
- La compression secondaire est souvent prédominante. Les indices de compression déterminées à l'œdomètre sont très forts (supérieurs à 1). La perméabilité a généralement une composante horizontale beaucoup plus forte que la composante verticale. Cette perméabilité diminue notablement au cours du tassement. [F. BERRABAH.2010]

### **2-3 Les limons**

Les limons, constitués de silt, de lœss et de, possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations. [F. BERRABAH.2010]

### **3- Propriétés Caractéristiques Des Sols Compressibles**

Les sols objets de ce guide (tourbes, vases, argiles molles, limons argileux ou lâches) ont en commun trois caractéristiques [DEELLPCC. 2017] :

- Une déformabilité élevée, fonction de la charge appliquée et du temps,
- Une faible perméabilité, qui varie avec les déformations du sol,
- Une résistance limitée, qui croît en général avec la profondeur. La mesure de ces propriétés est décrite dans les manuels de mécanique des sols. Dans la pratique française courante.
- La déformabilité est étudiée à l'œdomètre (essais de chargement par paliers, essais de fluage) et décrite par une relation semi-logarithmique entre l'indice des vides et la contrainte effective verticale.

### **3-1 Caractéristiques des argiles**

Les argiles sont des sols très sensibles à l'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories [DJAANI ET BENMANSOUR. 2011] :

- **Argiles plastiques** : indurées et très déformables.
- **Argiles raides** : indurées et présentent un comportement plus fragile que de la limite d'élasticité. Ceci à cause de la présence des carbonates et du quart microscopique.

### 3-2 Structure moléculaire microscopique des argiles

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liens covalents et les liaisons ioniques assurent l'assemblage des feuillets élémentaires.

Les forces de liaison entre feuillets sont principalement [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016] :

- Forces d'attraction moléculaires de qui sont des liaisons faibles
- Liaisons hydrogènes qui apparaissent avec des atomes fortement électronégatifs, comme l'oxygène.
- Substitutions isomorphes qui consistent en le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence. Ce dernier phénomène crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (remplacement d'un ion  $\text{Si}^{4+}$  par un ion  $\text{Al}^{3+}$  dans la couche octaédrique d'aluminium).

Les particules sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes. Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on en compte un grand nombre d'espèces, qui se distinguent par les défauts liés aux substitutions isomorphes au moment de la formation.

Trois types d'argile sont couramment rencontrés : la Kaolinite, la Montmorillonite et l'Illite.

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  chargées négativement comme la Smectite, l'Illite et la Kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau. [M. JOUINI; N. SIAD. 2016].

#### 3-2-1 Kaolinite : $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{Al}_4(\text{OH})_8$

C'est un empilement de feuillet double tétraédrique et octaédrique. Les liaisons sont dues à  $\text{H}^+$  et à des valences secondaires elles sont fermes. La kaolinite résulte d'une altération en climat chaud et humide ces caractéristiques sont relativement peu influencées par l'eau [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016].

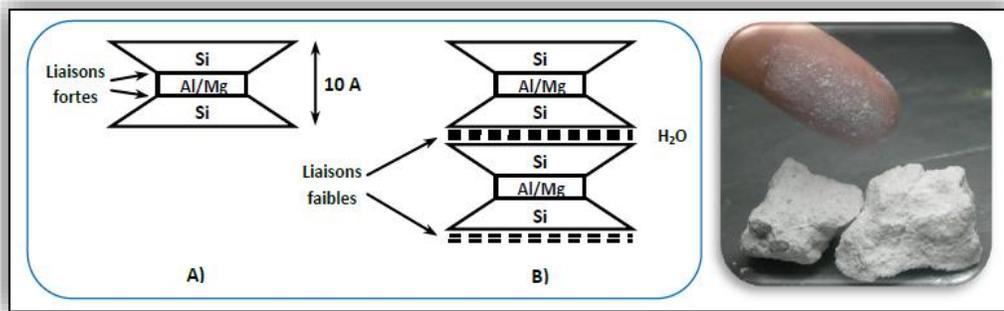


Figure I.2 Structure élémentaire de la Kaolinite [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016]

**3-2-2 Montmorillonite :  $(OH)_4 Si_8 (Al^{3+}10/3, Mg^{2+}2/3) O_{20}, n H_2O (6)$**

C'est un empilement de feuillets triples composés d'un feuillet octaédrique compris entre deux feuillets tétraédriques. La liaison entre les trois couches se fait par des valences secondaires et des liaisons ioniques elle est très faible et l'eau peut entrer entre les feuillets triples et causer ainsi un gonflement [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016].

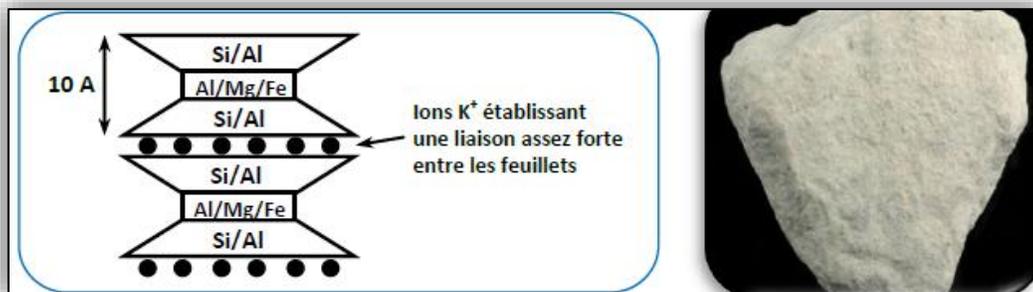
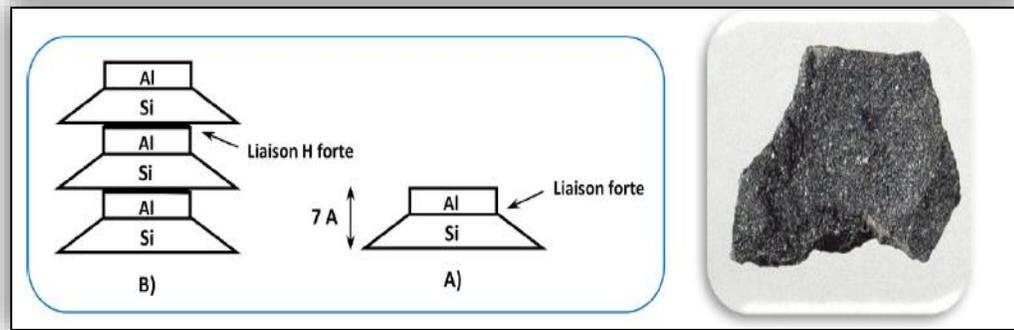


Figure I.3 Structure élémentaire de la Montmorillonite [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016.P]

**3-2-3 Illite :  $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$**

Formée des mêmes feuillets triples que la montmorillonite mais solidarisés avec des (ions  $K^+$ ) fermement, L'illite n'est pas gonflante. Elle provient de l'altération des sols des régions arides et aussi tempérées, Sa susceptibilité à l'eau est entre celle de kaolinite et de la montmorillonite [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016].



**Figure I.4** Structure élémentaire de L'Illite [M. JOUINI ; N. SIAD. 2016]

#### 4- Technologie de mise en place

En dehors de ses paramètres géométriques, le remblai intervient à la fois par son « histoire » et par les charges qu'il apporte sur le sol de fondation.

La construction du remblai, même si elle est continue et relativement rapide, n'est jamais immédiate. Les phénomènes de tassements dans les sols argileux, qui sont dominés par l'influence du facteur temps, seront donc très sensibles à l'influence de ce temps de chargement.

Par ailleurs, tout arrêt même de courte durée, dans le chargement, peut avoir une influence.

Les étapes de chargement qui sont relatives au problème de stabilité et qui conduisent à des arrêts d'un à plusieurs mois entre les étapes, ont bien sûr une grande importance vis-à-vis de la réduction de l'amplitude des tassements [F. SCHLOSSER, 1973].

Il convient cependant de remarquer que lorsque les coefficients de sécurité ont une valeur suffisante, le mode de construction du remblai n'a généralement que peu d'influence sur les tassements finaux ou tassements obtenus au bout de nombreuses années. C'est sur les temps de tassement que l'influence est prépondérante, [YASMINA AKOU, 1995].



**Figure I.5** Constitution de remblais.

### **5- Conclusion**

De ce premier chapitre, on a rappelé à définition au sol compressibles et leurs défèrent types dans la première partie, et on a parlé au Comportements et caractéristiques des remblais sur sols compressibles dans la partie suivante. On a conclu que le sol compressible ou le sol mou subissant des remblais doit être traité pour améliorer son comportement.

## **Chapitre II :**

### **Notions sur les Ballasts**

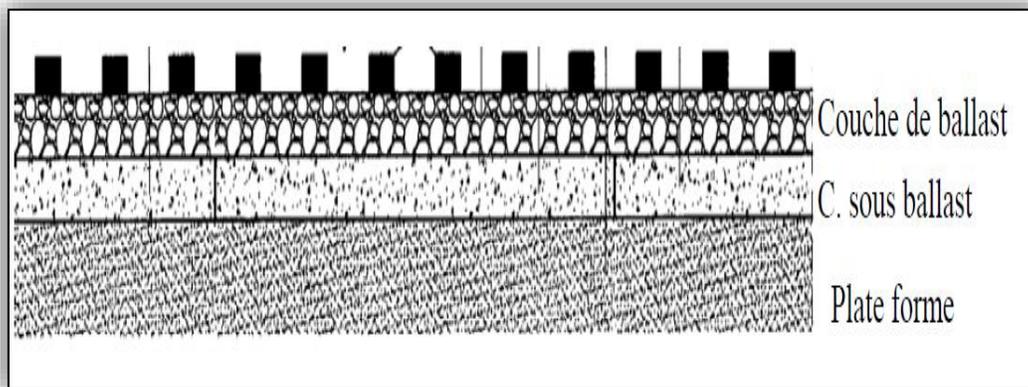
**Chapitre II****Notions sur les Ballasts****1- Introduction**

La stabilité des ouvrages en terre (déblais, remblais, digues) et des pentes naturelles est un Problème qui préoccupe les géotechniciens tant praticiens que chercheurs. Les désordres engendrés par la rupture des pentes sont généralement spectaculaires, souvent destructifs et parfois meurtriers. De nombreuses méthodes de calcul de stabilité ont été proposées. Celles-ci se différencient par les hypothèses admises par leurs auteurs (méthodes de calcul en équilibre limite, méthodes de calcul à la rupture, méthodes de calcul en déformations) et par la facilité de leur mise en œuvre (calculs à l'aide d'abaques, calculs automatiques à l'aide de logiciels), mais elles s'accordent toutes à définir un coefficient de sécurité global en fonction duquel la stabilité du talus étudié est considérée comme assurée ou compromise, ou par des coefficients de sécurité partiels affectant, d'une part, les sollicitations appliquées et, d'autre part, les propriétés mécaniques des sols. Diverses techniques de renforcement des talus ont par ailleurs été développées.

Elles se différencient par le procédé de leur réalisation, leur coût et leur durabilité. La présente communication passe en revue les différentes méthodes d'analyse de stabilité et de stabilisation des versants naturels ou artificiels instables actuellement utilisées pour l'élaboration des projets [M. JOUINI ; N. SIAD.2017].

**2- Définition**

Le ballast constitue la couche supérieure de la structure d'une voie ferrée sur laquelle repose les traverses supportant le rail. C'est un tapis de concassé rocheux dur, élastique, calibré, creux et compact, bloquant les traverses, dont le nivellement peut être réalisé au millimètre en emboîtant entre eux des grands cailloux de 2,5 à 5 cm de taille [F. AISSAT.2000].



**Figure II.1** Représentation schématique d'une structure classique de voie ferrée [F. AISSAT.2000].

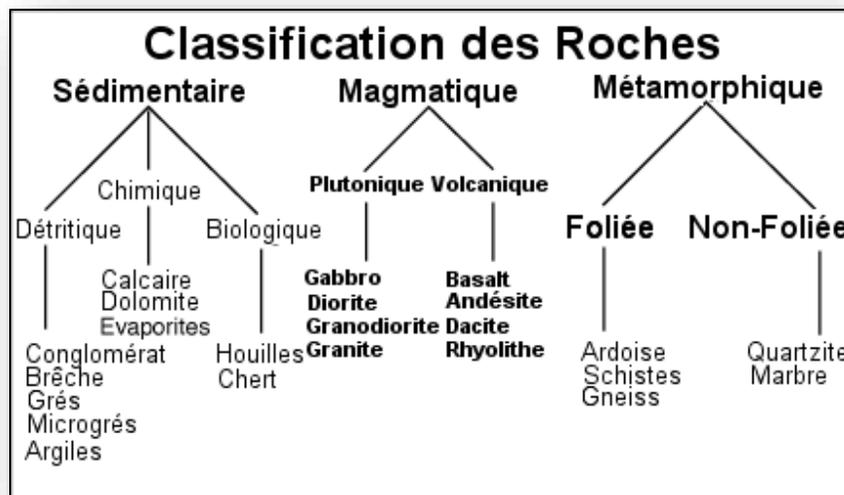
### 3- Nature et origine du ballast

Les granulats du ballast proviennent des produits de différentes natures (naturels ou artificiels). Parmi les produits naturels, citons les pierres concassées, les graviers et le sable. Parmi les produits artificiels citons les laitiers, les scories et les cendrées (d'usine ou de dépôts de locomotives).

Les qualités et défauts des pierres concassées dérivent des caractères des roches dont elles sont extraites [L. CHANANE.2008] :

- a) **Les roches magmatiques et métamorphiques**, sont des roches massives, compactes, exemptes de porosité, non gélive et dépourvues de stratification où de joints de clivage, et résistent parfaitement aux agents atmosphériques (ex : porphyre, granite, basalte, gneiss, diorite).
  
- b) **Les roches sédimentaires**, peuvent fournir des pierres suffisamment dures pour constituer un ballast de bonne qualité. Les roches siliceuses (grés, quartzites) résistent bien aux altérations dues aux agents atmosphériques. Les calcaires s'altèrent par dissolution et par l'abondance des joints. Cependant, les calcaires durs peuvent donner un ballast de bonne qualité. Les roches schisteuses, donnant de l'argile par altération, sont peu recommandables.

Un bon ballast doit présenter des qualités physico-mécaniques qui sont exprimées par les propriétés physiques correspondant à la résistance externe et interne aux contraintes qui s'exercent sur le matériau solide et les propriétés mécaniques correspondant à la dynamique interne et externe d'un matériau solide.



**Figure II.2** Classification des roches [SITE N°03]

- Ces propriétés physico-mécaniques sont les suivantes [L. CHANANE.2008] :

- **La densité** : qui doit être élevée pour mieux résister aux différents efforts auxquels le matériau est soumis. Un bon matériau devra avoir une densité apparente au moins égale à  $2,5 \text{ g/cm}^3$  par rapport à un optimum de masse volumique compris entre 2 et  $2,8 \text{ g/cm}^3$ .

- **La dureté** : le ballast doit être assez dur pour résister aux chocs ainsi qu'à l'usure par abrasion provoqués par les charges roulantes (broiement) et pour supporter l'action destructrice des outils de bourrage (émiettement).

- **l'angularité et la rugosité** : les granulats du ballast doivent présenter des surfaces assez rugueuses et des arêtes vives pour assurer la cohésion de la masse. Elles permettent donc aux éléments du ballast de s'assembler entre eux de façon à former un ensemble compact et cohérent. Cette cohésion assure le contact et le frottement ballast /traverses, le bon maintien en place et l'immobilisation de ses dernières par pénétration des arêtes vives des éléments de ballast dans la masse des traverses (bois, rugosité ou alvéoles du béton).

- **la perméabilité** : le ballast doit assurer un bon drainage ou écoulement des eaux pluviales avec une pente suffisante ; car l'eau qui reste dans le ballast y forme finalement de la boue, les traverses qui

s'appuient sont mal assises (traverses boueuses ou danseuses) ; cette eau se congèle en hiver, d'où gonflement du ballast et soulèvement de la voie. En outre, la voie gelée perd son élasticité.

- **l'élasticité** : permet d'amortir la transmission des charges reçues et d'atténuer l'amplitude des efforts dynamiques appliqués à l'ensemble du tapis de ballast. Pour qu'elle soit bonne, il faut que les pierrailles soient de dimensions suffisamment grandes et qu'elles soient bien calibrées.

- **la non-géivité** : plus un granulat est imperméable, plus il est mieux protégé et insensible aux effets du gel, qui se traduit par la résistance à l'écaillage et aux cycles d'imbibition-dessiccation en présence des eaux et des solutions minérales tels que les sels fondants.

- **la dilatation** : sous l'effet de réchauffement (expansion thermique) ou d'humidité, le matériau solide accuse une expansion, un gonflement ou une augmentation de son volume.

- **la rétraction/contraction** : elles correspondent à la réponse mécanique de raccourcissement, qui se traduit par un durcissement suite à une diminution de volume ou de longueur, ou bien c'est le retour du matériau solide à son état initial après dilatation.

#### **4- Fonctions du ballast**

Le ballast est un des éléments support de la voie, faisant partie des couches d'assise comprenant la couche de ballast, les sous couches et la plateforme, qui contribuent à assurer par leurs natures et leurs épaisseurs le bon comportement de la voie ferrée.

Cependant, les principales fonctions auquel le ballast est destiné, et qui sont étroitement liées aux propriétés physico-mécaniques et géométriques, sont les suivantes [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003] :

- La transmission, la répartition et la réduction sur la plate-forme et les couches sous-jacentes des charges statiques et dynamique exercées par les roues sur le rail ;
- La résistance aux forces triaxiales verticales, transversales (latérales) et longitudinales appliquées aux traverses sous l'effet du contact roue /rail pour assurer l'ancrage et la stabilité des rails sur la voie ferrée.

- Les forces verticales : correspondent aux charges dynamiques surimposées aux charges statiques. Les charges statiques sont le poids du train à l'arrêt combiné aux poids des éléments de la superstructure de la voie (rail, attaches, supports d'attaches et traverses), tandis que les charges dynamiques sont les forces de traction combinées aux accélérations / freinages et aux conditions de la voie.
- Les forces transversales : correspondent aux forces de compression diffusées ou agissantes parallèlement aux axes des traverses à partir du contact roue-rail. Les forces longitudinales : correspondent aux forces de compression exercées le long des rails générées par les charges dynamiques, l'effet de l'expansion et de contraction thermique du rail et des ondes vibratoires diffusées par les rails.

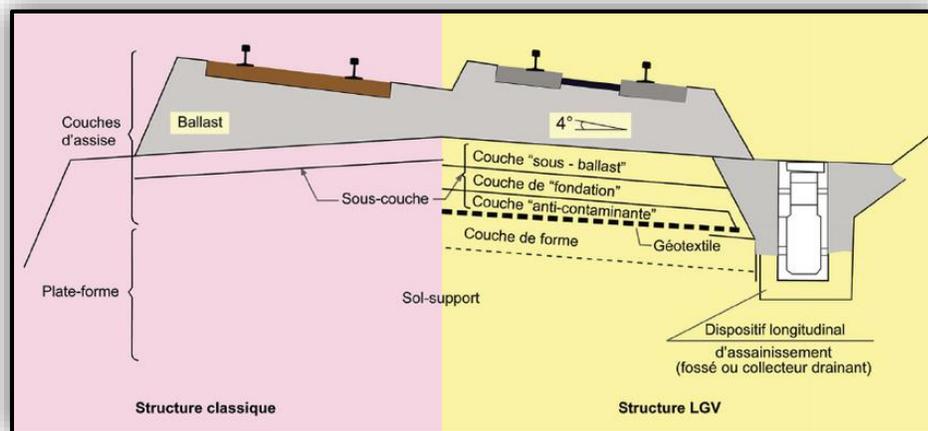
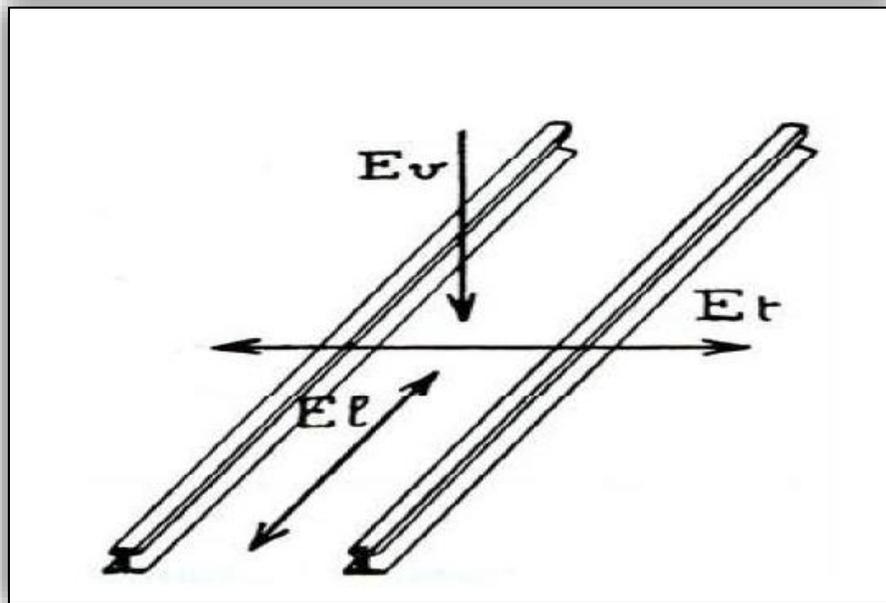


Figure II.3 Composition de la structure d'une voie ferrée LGV, ligne à grande vitesse [SITE N°03]



**Figure II.4** Différentes contraintes que subis le ballast [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003]

- Le drainage et l'évacuation rapide des eaux météoriques (zénithales) s'infiltrant dans la voie à travers les sous couches en raison de sa granulométrie particulière. La plateforme du terrassement doit présenter, de part et d'autre de son axe, une pente transversale d'au moins 3 cm par mètre pour assurer l'écoulement des eaux qui traversent la couche de ballast.
- L'amortissement et l'absorption du maximum de vibration et de chocs en provenance du contact rail-roue, en raison de son élasticité et ses propriétés rhéologiques. Ce rôle amortisseur du ballast résulte de la dissipation d'énergie par frottement de ses grains entre eux. La capacité d'amortissement du ballast s'accroît si l'on augmente l'épaisseur de la couche, cette épaisseur doit être d'autant plus forte que la vitesse et le trafic supporté par la voie sont plus élevés. Par contre, il est nécessaire que les sous-couches (couches d'assises) et la plate-forme contribuent le moins possible à la capacité d'amortissement. En effet ces couches plus profondes doivent avoir une durée de vie beaucoup plus longue, estimée à plus de 25 ans que celle du ballast, périodiquement renouvelé.
- Le « bourrage » du ballast sous la traverse conserve à la voie son nivellement correct et rapide. Il freine aussi les déplacements longitudinaux et transversaux car, dès qu'une tendance au déplacement se manifeste, il naît un frottement résistant entre la traverse et le ballast. 7

- Une fonction environnementale de plus en plus reconnue est due à de moindres émissions acoustiques qu'une voie sur dalles en béton, ou seule la nuisance sonore émise lors du passage de trains provient du contact roue/rail. Pour le cas du ballast à base de matériaux basiques, cette fonction est améliorée au maximum, en raison de l'absence des vides porositaires et fissuraux ( $P < 1 \%$ ) et des valeurs maximales de l'indice de continuité ( $I_c > 90\%$ ) accusées par la structure des minéraux formant les roches basiques.

### **5- Types de détériorations du ballast**

Les observations et l'expérience ont montré que le ballast ne se détériore pas d'une manière sensible sous les effets d'un seul processus, d'une cause unique. Généralement, c'est une combinaison de plusieurs facteurs provenant de diverses origines.

L'ensemble des travaux de recherche et d'analyse issues des études réalisées jusqu'à lors ont confirmé que les granulats du ballast provenant des roches calcaires sont très sensibles aux détériorations physiques (usure et fragmentation) et chimiques (souillure) et les causes principales en sont les suivantes [F. AISSAT.2000]. :

- L'usure mécanique ;
- La pollution ;
- L'altération physico-chimique.

D'autres parts, les granulats calcaires favorisent les tassements, de plus de 2 cm, après la mise en service de la voie. Ces tassements sont souvent de grandes amplitudes et de longueurs d'ondes, favorisant aussi des défauts inacceptables de nivellement, et augmentant par la suite des risques de basculement et de déraillement des véhicules.

#### **5-1 Détérioration par usure mécanique**

L'usure s'exprime par l'émoussement des angles sous l'effet de frottement et de chocs, sous l'influence de l'augmentation importante des vitesses et des charges des trains (trafics intenses), et au cours des opérations de bourrage.

Ces détériorations se trouvent amplifiées par [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003] :

- L'apparition des défauts en provenance :
  - Des véhicules eux-mêmes (effets de balourds) ;
  - De la voie : variation de la rigidité verticale et défauts géométriques de nivellement.

- L'introduction de matériel de mise en œuvre et d'entretien inadapté ;
- L'augmentation du trafic et des vitesses ;
- L'effet du comportement du ballast qui n'est pas homogène sur toute la longueur d'une voie, confirmant l'influence du substrat, c'est-à-dire des couches d'assise (couche de forme et sous-couches), où à certains endroits, le ballast ne « tient » pas et pénètre les couches d'assise, dont les matériaux se mélangent aux granulats, et ses performances diminuent ; on parle alors de « ballast contaminé ». Or, l'augmentation de la vitesse commerciale, la fréquence des circulations et du poids à l'essieu pourraient accélérer l'apparition de ce phénomène et le rendre plus dangereux.

Le ballast subit les usures mécaniques dues :

- **Aux techniques d'entretien :**

L'introduction de bourreuses lourdes conçues pour un concassé de roches très résistantes provoque l'effritement du ballast de qualité moyenne à médiocre généralement utilisé sur nos voies. Cet effritement des granulats peut être également provoqué lors du bourrage manuel où le ballast est introduit sous la traverse à l'aide d'une batte.

- **Aux défauts de nivellement et des bourrages :**

Qui exercent une action nocive sur les bogies de chaque véhicule qui réagissent sur les éléments de la voie (rail, traverses et attaches) en provoquant un comportement non uniforme de l'ensemble qui se met à osciller anormalement (phénomène de danse) transmettant des chocs intenses au ballast.

- **Aux modifications des conditions d'exploitation :**

(1) la mise en circulation de matériels lourds mène à l'apparition de sollicitations mécanique plus élevées, d'où le risque d'écrasement du ballast est d'autant plus grand que le dimensionnement initial n'a pas pris en compte cette évolution du trafic ;

(2) la mise en place des trains plus rapides induit une augmentation de l'usure du ballast et peut en résulter une attrition plus importante de ce dernier ;

(3) l'existence de défauts au niveau de la voie et des véhicules provoque une très forte augmentation des sollicitations anormales, d'où la désagrégation accélérée du ballast.

- Au droit des joints : au niveau des joints, le ballast est très sollicité mécaniquement ; le boudin en sautant d'un rail à l'autre, donne des coups à ce dernier, d'où l'application brutale de la traverse sur les ballasts, qui prend une couleur particulière (claire) et les grains s'arrondissent.
- Aux produits transportés ou déversés sur la voie : des produits abrasifs, tel que le sable quartzé, transportés ou utilisés par les machines pour éviter le patinage, peuvent par friction, accélérer la désagrégation du ballast.
- A la structure de la plate-forme : le ballast au contact d'une plate-forme rocheuse et dure, s'écrase et se transforme en poudre.
- A la raideur verticale de la voie : la dégradation de la géométrie de la voie est d'autant plus préjudiciable au confort des passagers que la vitesse est élevée. Or, cette dégradation est notamment liée à la raideur verticale de la voie. Aussi, la surveillance de l'évolution de cette valeur pourrait déboucher sur une maintenance préventive, c'est-à-dire des interventions visant à rétablir les valeurs normales de la voie ; elles doivent être non seulement correctes mais homogènes avant même l'apparition de défauts, au moyen de capteurs embarqués à bord d'un véhicule circulant à grande vitesse.

### **5-2 Détérioration par pollution**

La pollution a pour effet de rigidifier la couche de ballast et de diminuer sa perméabilité. Les causes de pollution du ballast sont multiples ; parmi lesquelles on distingue principalement les pollutions par [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003] :

Les fines : ce type de pollution à des sources et des origines diverses :

- Pollution par les fines produites par l'altération du ballast, qui viennent colmater ce dernier. Ce phénomène est très prononcé pour les calcaires tendres et les roches facilement altérables ;
- Pollution par les fines de la plate-forme, par exemple une plate-forme argileuse finit presque toujours, si le dimensionnement des couches d'assise n'a pas été correctement pensé, par contaminer la couche de ballast ;
- Pollution par les fines véhiculées par l'eau : le mauvais fonctionnement ou le sous dimensionnement du réseau de drainage provoquent l'inondation de la voie et la stagnation des eaux induisant des dépôts de fines dans le ballast. L'excès de pénétration des sels tels que les chlorures et les sulfates, diminue le module d'élasticité et accroît le fluage.

**Les sables :** du fait de sa consistance et son déplacement sous l'action des vents, principalement dans les zones côtières et désertiques, le sable s'introduit facilement dans les cavités du ballast donnant lieu à deux cas distincts :

- Remplissage partiel du lit de ballast par le sable ;
- Lit de ballast complètement remblayé par les sables.

**Les produits transportés par les wagons :** constituant la principale source d'infiltration de pollution en surface, combinée à l'usure des traverses.

**La végétation :** cette pollution provoque la diminution de la perméabilité et l'absence de désherbage risque de réduire le lit de ballast.

**Les zones industrielles :** les poussières rejetées dans l'atmosphère par les grandes usines sidérurgiques, les cimenteries, carrières et autres industries viennent se déposer sur le ballast et finissent par le colmater. De plus, ces poussières renferment des résidus chimiques qui peuvent se révéler très agressifs pour le ballast.

### **5-3 Détérioration par l'altération**

Le ballast, sous les actions conjuguées de l'eau, du climat et d'agents polluants, subit une altération physico-chimique, dont les effets se traduisent par une évolution de la granulométrie (apparition de fines) et une baisse des caractéristiques mécaniques. L'eau agit sur le ballast de différentes manières en provoquant [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003] :

La diminution de la portance dans les sols saturés accidentellement : dans les cas d'inondations de la plate-forme, l'apparition des pressions interstitielles et l'imbibition des matériaux sensibles à l'eau provoquent :

- Une diminution de la portance de la voie ;
- Un poinçonnement de la plate-forme par le ballast ;
- Une remontée des fines ;

**La réduction de l'élasticité du ballast :** l'imbibition des fines et des granulats du ballast lubrifie ce matériau, le frottement grain à grain diminue. Ainsi, le rôle d'amortisseur du ballast se trouve réduit du fait de la diminution de son élasticité.

**La pollution par des fines et des agents agressifs :** l'eau peut véhiculer :

- Le dépôt des fines et autres tels le sable, l'argile...remplit les vides en engendrant une forte diminution de la perméabilité globale. Ce phénomène va en s'aggravant jusqu'à la rigidification complète du lit de ballast.
- En présence d'agents agressifs pour le ballast calcaire, comme le gaz carbonique et l'acide sulfurique, il y a dissolution de ce dernier.
- Les effets de ces phénomènes sont d'autant plus importants que la roche de ballast soit poreuse, perméable et que les stagnations d'eau sont plus prolongées.

**L'altération par hydratation :** l'altération par hydratation entraîne la décomposition de la roche de ballast. Pour atténuer l'effet de ce phénomène, il est indispensable de dimensionner convenablement les ouvrages de drainage.

## **6- Les caractéristiques du ballast**

### **6-1 Les caractéristiques géologiques [A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.2003].**

#### **a) La composition minéralogique**

La connaissance précise de la composition minéralogique nous aide dans le choix des roches de ballast. L'homogénéité de la composition minéralogique est un critère important quant aux caractéristiques mécaniques des roches : si la composition est relativement homogène, elle confère à la roche un bon comportement mécanique. La présence de minéraux altérés (montmorillonite, schiste, marne,) réduit le comportement mécanique de la roche.

#### **b) La Texture**

La texture est l'agencement des minéraux dans les roches ; pour les roches magmatiques plutoniques qui présentent une texture grenue, le comportement mécanique est généralement très bon. Pour les roches sédimentaires, l'homogénéité de la composition joue un rôle beaucoup plus important que la texture.

#### **c) L'altération**

C'est le vieillissement naturel d'un matériau et son adaptation à de nouvelles conditions physico-chimiques différentes de celle qui régnaient lors de sa formation. Elle induit des modifications physiques, chimiques et minéralogiques dans les roches.

L'altération dépend de plusieurs facteurs et conduit à des mécanismes très diversifiés :

- 1- **L'hydrolyse** : fixation d'eau provoquant la destruction d'un corps et son remplacement par un autre. Exemples : feldspaths → kaolinite ; Anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) → gypse.
- 2- **L'altération météorique** : à l'échelle du massif, elle se propage de haut en bas et concerne uniquement les parties superficielles, dites stériles.
- 3- **Altération profonde** : dite aussi transformation hydrothermale ; elle se propage de bas en haut et concerne le massif en entier. Les minéraux tels que : les argiles, les hydroxydes de fer, zéolites, la pyrite, le charbon et les inclusions organiques peuvent, dans le cas où ils constitueraient un pourcentage important, avoir des effets néfastes sur les caractéristiques mécaniques des roches.

#### **d) La tectonique**

La connaissance de la tectonique nous permettra, d'une part, de situer les roches par rapport aux contraintes de déformation et d'autre part, de retrouver les périodes d'accalmie ayant permis la formation de roches homogènes, massives et dures.

### **6-2 Caractéristiques Géotechniques**

#### **a) Caractéristiques physiques (géométriques)**

##### **a) -1 Granulométrie**

Les dimensions des éléments du ballast influent sur la résistance de la voie aux sollicitations (élasticité) et sur la mise en œuvre.

Les granulométries dans les différents réseaux ferroviaires sont : 25/40 mm, 25/50 mm, et 25/55 mm. Celle utilisée actuellement en Algérie est de 25/50 mm. Elle est de 32/63 mm dans certains pays européens.

##### **a) -2 Forme des granulats**

La forme des éléments de ballast utilisé pour la voie ferrée doit être polyédrique et à arêtes vives. Une couche de ballast comportant des granulats cuboïdes ou angulaires de dimension mixtes, confère normalement à la voie une élasticité et une résistance très élevées. Les granulats ne doivent donc être ni trop long, ni trop plats.

Une bonne angularité des granulats permet d'augmenter le frottement intergranulaire. L'état de surface (degré de rugosité et de friction) de granulats influe sur :

- L'aptitude à la résistance mécanique du ballast ;
- La compacité des sous-couches et les couches de formes ;
- L'adhérence avec les traverses.

#### **a) -3 Homogénéité des granulats**

De par son influence négative sur le comportement mécanique du ballast, la proportion en poids des granulats friables ou altérés ne doit pas dépasser :

- La limite normale de 3% ;
- La limite absolue de 6%.

Il est bien établi que l'utilisation du ballast hétérogène, formé de roches de nature, de dureté et d'âge différents, s'altère très rapidement.

#### **a) -4 Propreté des granulats**

Le ballast doit être débarrassé de toute matière polluante (poussière, sable, fines et débris). Le pourcentage de matière polluante ne doit pas excéder 1% de la masse granulaire. Cette propreté peut être obtenue par lavage.

#### **b) Caractéristiques mécaniques**

Le ballast est soumis à de multiples sollicitations que les traverses lui transmettent :

- Des charges concentrées (verticales, transversales, et longitudinales) ;
- Des vibrations, qu'il doit diffuser jusqu'à la plate-forme.
- Le temps et l'environnement détériorent ses caractéristiques mécaniques et physiques.

Pour ses raisons, les granulats de ballast doivent satisfaire à certaines conditions relatives à leurs résistances mécaniques tel que la dureté, celle-ci doivent être envisagé sur le double aspect de :

- La résistance à l'attrition (usure par frottement réciproque des granulats) ;
- La résistance à la fragmentation par chocs.

## b) -1 Résistance à l'attrition et à l'usure (Essai Micro-Deval)

### 1- But et définition

Par définition, le coefficient Micro la masse du passant au tamis de 1,6 mm de l'échantillon après passage en machine sur la masse initiale.

Le but de l'essai est la mesure de la résistance à l'usure produite pour certaines roches car elle n'est pas la même à sec ou en présence d'eau.

### 2- Principe de la méthode

L'essai Micro-Deval à eau (MD) dans un cylindre en rotation, en présence d'eau par frottement entre les granulats d'un échantillon et une charge abrasive. La masse de la charge abrasive varie suivant les classes granulaires.

### 3- Matériel nécessaire

- Un appareil Micro-Deval.
- Des billes de 10mm  $\pm$  0,5 de diamètre.
- Un jeu de tamis 1,6-4-6,3-
- Une étuve
- Une balance de précision
- Un bac ou un plat

<b>Granularité</b>	25/55 mm
<b>Echantillon</b>	44 pierres 5000 $\pm$ 50 g
<b>Charge de frottement</b>	aucune
<b>Nombre de rotation</b>	10000 avec 2000 rotations/Heure
<b>Maille de tamis</b>	1,60 mm
<b>Calcul du coefficient Deval</b>	Deval = $2800/m$ m étant la masse sèche, en grammes, de la fraction du matériau passant, après l'essai, au tamis de 1,6 mm.

**Tableau II.1.** Normes de l'exécution de l'essai Deval [Site N° 01].

**m** : masse en gramme des éléments des dimensions inférieures à 1,60 mm formés au cours de l'essai.

**b) -2 La résistance à la fragmentation par chocs et l'usure par frottement**

Le ballast, sous l'effet des contraintes qui lui sont transmises, évolue par ;

- Frottement des granulats entre eux ;
- Chocs engendrés par les traverses.

Ces deux phénomènes ont été reproduits en laboratoire pour mesurer la résistance combinée à la fragmentation par chocs et l'usure par frottement réciproque des granulats connue sous l'appellation d'essai Los Angeles ;

**1- But et définition**

Par définition, le coefficient Los Angeles est le rapport entre la fraction passante au tamis de 1,6 mm de l'échantillon après passage en machine sur la masse initiale.

Cet essai a pour but de mesurer la résistance par chocs des éléments d'un échantillon de granulats dont leur propriété pourrait être modifiées lors du malaxage ou le transport en camion.

**2- Principe**

Le principe de la méthode consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite par fragmentation, en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation.

**3- Matériel nécessaire**

- Un appareil Los Angeles
- Un jeu de tamis 4-6 ; 10-14 ; 15-16 ; 25-31,5 ou encore série de 2 tamis correspondant au
- Borne de la classe granulaire étudié (exemple : si classe granulaire 10/14 alors tamis de 10 et 14 mm seront nécessaires),
- Une étuve ( $105^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ}$ ),
- Une machine Los Angeles,
- Un bac destiné à recueillir les matériaux,
- Un tamis de 1,6 mm,
- Une balance de précision 1 g,
- 7 à 12 boulets selon la granulométrie (sphère de diamètre 47 mm d'un poids compris entre 420 et 445 g).

<b>Masse échantillon</b>	5000 g 25/40 : 3000 g 40/50 : 2000 g
<b>Charge de frottement</b>	12 boulets
<b>Masse de boulets</b>	5280 g
<b>Nombre de rotation</b>	1000
<b>Maille des tamis</b>	1,60 mm
<b>Granularité</b>	25/50 mm

**Tableau II.2** Exemple d’essai Los Angeles pour du ballast utilisé en France [Site N° 01]

**b) -3 Dureté relative global (DRG)**

Il existe une relation entre les valeurs de l’essai Delval et l’essai Los Angeles. Cette relation traduit la dureté relative globale d’une roche.

Dans le cas du ballast, la valeur de la dureté relative est la plus faible des deux valeurs obtenues successivement à partir des couples de coefficients : (DS – LA) puis (DH - LA).

Dans le cas des graves, la valeur de la dureté relative est obtenue à partir du seul couple de coefficient (MDE, LA).

Où :

- MDS : Micro-Deval sec ;
- MDE : Micro-Deval en présence d’eau ;
- LA : Los Angeles.

Pays	Essai LA (%)	Essai MDE (%)	DRG
Algérie	< 40	< 35	
France	< 25	< 20	> 14 (Norme Européenne)
Canadian National Railways	< 20	/	/
Southern Pacific Transportation Company (Canada)	< 25	/	/
USA	< 35	< 30 MDS < 27	> 18

**Tableau II.3** Normes des essais géotechniques des granulats du ballast. [Site N° 01]

## **Chapitre III :**

### **Remblais sur des sols mous : hypothèses de rupture et de tassement**

### Chapitre III

## Remblais sur des sols mous : hypothèses de rupture et de tassement

### 1- Introduction

Les règles de dimensionnement des remblais sur sols compressibles (coefficient global de sécurité de  $F=1,5$  dans la pratique française courante) permettent de limiter les charges supportées par le sol à des valeurs pour lesquelles ses déformations (tassements et mouvements horizontaux) sont finies, même si elles sont importantes et peuvent durer pendant de très longues périodes. Dans les conditions usuelles, le tassement se produit pour une faible part pendant la construction du remblai, pour l'essentiel pendant la phase dite de consolidation primaire et pour le reste pendant la période dite de compression secondaire ou de fluage. Le tassement immédiat (pendant la mise en place des couches successives du remblai) se développe en général à volume de sol constant, de sorte qu'il s'accompagne de déplacements horizontaux d'amplitude équivalente.

Le tassement de consolidation primaire tend vers sa valeur finale en suivant une loi exponentielle. Le tassement de compression secondaire augmente comme le logarithme du temps. Des surpressions interstitielles subsistent pendant tout le processus de déformation du sol, y compris pendant la phase de fluage finale. Il faut garder à l'esprit que ce processus en trois phases se réinitialise chaque fois que l'on applique une nouvelle charge au sol, c'est à dire en particulier quand on vient « recharger » le remblai pour le ramener à son niveau théorique.

Le procédé de « pré chargement » ou de sur consolidation du sol (application pendant les travaux de construction d'une charge supérieure au poids final du remblai et de ce qu'il porte) est l'une des techniques permettant de contrôler ce processus.

Les amplitudes finales du tassement sont en général déduites d'essais de compressibilité à l'œdomètre.

Le tassement total est habituellement supérieur de 10 à 20% au tassement déduit de la courbe de compressibilité œdométrique, ce qui correspond aux effets du fluage et des mouvements horizontaux du sol. Toutefois, dans les sols hétérogènes comportant des alternances de sols sableux et argileux, les essais réalisés sur la partie la plus argileuse des carottes peuvent donner une image pessimiste de la déformabilité des sols et aussi de sa perméabilité. Les variations de la pression interstitielle dans les sols compressibles sous les remblais accompagnent les tassements de consolidation et permettent de contrôler l'état des

contraintes effectives dans le sol et donc sa résistance. Elles peuvent aussi être utilisées pour contrôler la stabilité du remblai pendant les travaux de construction [M. JOUINI ; N. SIAD.2017].

## **2- Problèmes posés par la construction des remblais sur sols compressibles**

La construction des remblais sur sols compressibles pose souvent des problèmes difficiles. Il faut d'abord éviter de provoquer la rupture du sol porteur qui peut compromettre la suite de la construction et créer des dommages importants sur les structures avoisinantes. Il se pose ensuite le problème de tassements, aux effets plus lents mais tout aussi néfastes. Lorsque ces tassements sont importants et qu'ils n'ont pas été pris en considération dès le début de la construction, ils peuvent [M. JOUINI ; N. SIAD.2017] :

- Entraîner une déformation du remblai le rendant inapte à son usage initial ;
- Provoquer des poussées parasites sur des structures enterrées proches (pieux, palplanches, etc.) jusqu'à leur rupture.

### **2-1 Problèmes de stabilité**

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai [M. JOUINI ; N. SIAD.2017].

### **2-2 Problèmes de tassement**

Les tassements calculés doivent être pris en compte dans l'épaisseur totale du remblai à mettre en place pour obtenir à terme la cote prévue au projet. En particulier, il faut analyser la stabilité en tenant compte de l'épaisseur totale du remblai, tassements compris. En cas de construction du remblai par étapes avec des tassements importants à chaque étape, il faut se préoccuper de la largeur de la plate-forme du remblai à chaque étape : une analyse géométrique montre que, pour obtenir la largeur souhaitée du remblai en fin de construction, il ne faut pas définir chaque étape en découpant en tranches horizontales le profil théorique du remblai, mais raidir les pentes des talus ou construire le remblai sur une emprise plus large.

Si cette précaution n'est pas prise, la plate-forme finale est trop étroite et doit être élargie, ce qui est à la fois difficile à réaliser et coûteux [M. JEDIDI.2003].

**a- Mouvements horizontaux**

L'amplitude maximale des déplacements horizontaux des sols compressibles sous les remblais représente en général 15% de l'amplitude du tassement. Ces déplacements conservent la même forme pendant la consolidation, ce qui facilite leur prévision et leur contrôle par des mesures inclinométriques. Les mouvements horizontaux peuvent être plus importants pendant la construction du remblai (conditions non drainées). On peut les limiter en améliorant les conditions de drainage du sol. Les mouvements horizontaux des sols compressibles sous les remblais sont l'une des causes principales des efforts parasites sur les ouvrages avoisinants [M. JEDIDI.2003].

**b- Efforts parasites sur les ouvrages avoisinants**

Les tassements sous les remblais créent des efforts de frottement négatif sur les pieux qui se trouvent dans leur zone d'influence (y compris à l'extérieur du remblai dans certains cas). D'autre part, les mouvements horizontaux du sol exercent aussi des efforts « parasites » horizontaux sur ces pieux. Ces efforts supplémentaires doivent être pris en compte dans le calcul des fondations profondes. Ils peuvent être limités, voire pratiquement supprimés, si le remblai est construit suffisamment à l'avance. Les mouvements verticaux et horizontaux du sol peuvent également produire des efforts supplémentaires sur les ouvrages de soutènement situés en contrebas. Enfin, la construction d'un remblai sur sol compressible provoque un tassement de la surface du sol sur une certaine distance (fonction de l'épaisseur des sols compressibles) au-delà du pied des talus du remblai. Ce tassement peut provoquer la fissuration d'ouvrages fondés superficiellement dans la zone d'influence du remblai. En particulier, l'élargissement des remblais sur sols compressibles est une opération complexe qui doit être étudiée avec soin [M. JEDIDI.2003].

**2-2-1 Rupture générale par poinçonnement**

Dans le cas où la croûte superficielle surmontant le sol mou est inexistante, le comportement du remblai est similaire à celui d'une poutre en flexion. Des fissures de traction peuvent se produire dans la partie inférieure du remblai, provoquant ainsi son affaissement et par la suite le poinçonnement de la couche molle. Il s'ensuit la formation de bourrelets de part et d'autre du talus [M. JOUINI ; N. SIAD.2017]

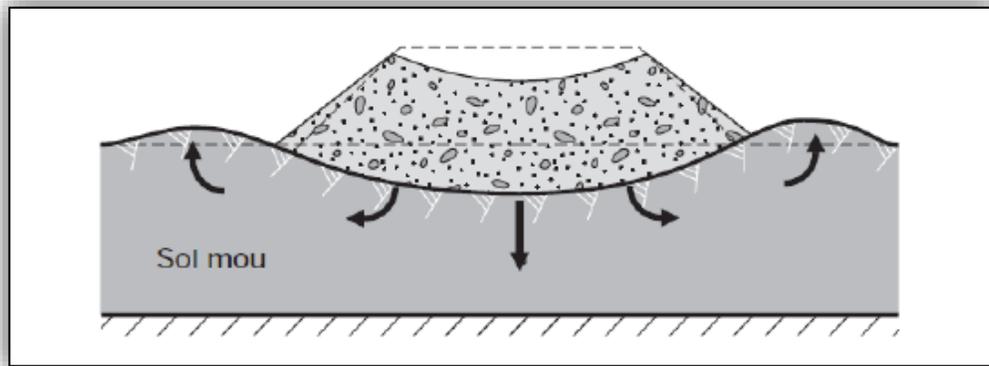


Figure III.1 Rupture par poinçonnement [MAGNAN ET AL, 1984]

### 2-2-2 Rupture par glissement (rotationnelle)

#### a- Avec fissuration

Lorsque la croûte est mince, elle peut transmettre au remblai des déplacements horizontaux provoqués par le chargement de la couche molle, d'où l'apparition d'une fissure verticale dans le corps du remblai annulant toute résistance au cisaillement. (Qu'on rencontre dans le cas d'un remblai cohérent) [M. JOUINI ; N. SIAD.2017].

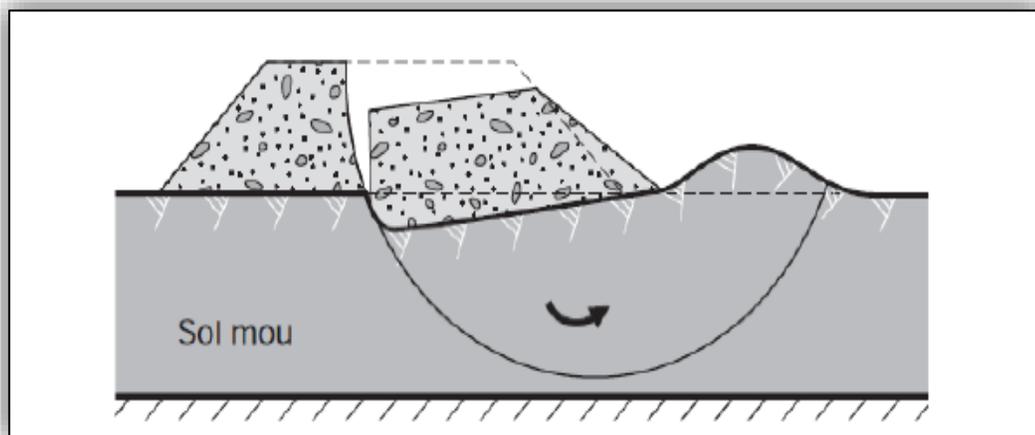
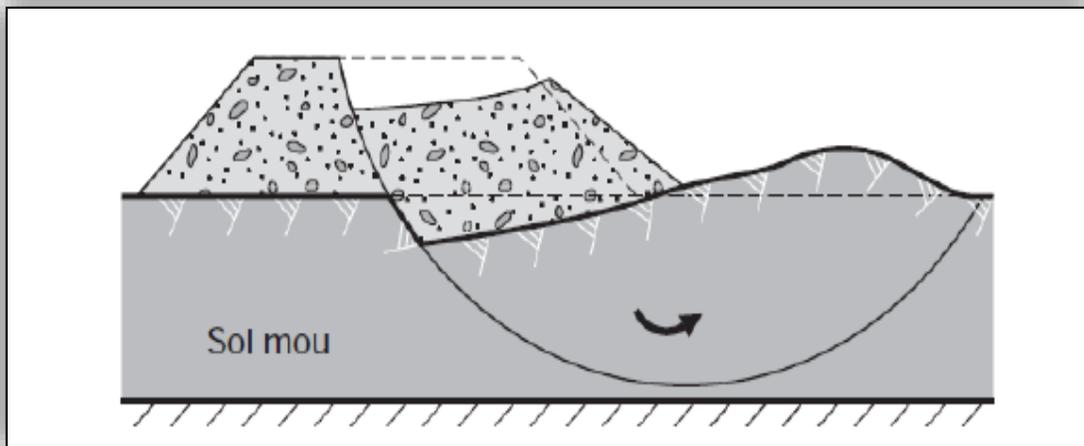


Figure III.2 Glissement avec fissuration [MAGNAN ET AL, 1984]

#### b- Sans fissuration

Si, au contraire, la croûte superficielle est épaisse, elle ne transmettra pas les déplacements horizontaux de la couche molle et le remblai ne sera pas fissuré. C'est le cas d'un remblai purement pulvérulent [M. JOUINI ; N. SIAD.2017].



**Figure III.3** Glissement sans fissuration [MAGNAN ET AL, 1984]

### 3- Approches pour la prévision des tassements

Les tassements provoqués à la surface d'un massif de sol sont dus aux déformations du squelette solide c'est-à-dire au réenchevêtrement des grains.

Si les lois de comportement des sols étaient connues, on pourrait calculer les tassements de la manière suivante [M. JOUINI ; N. SIAD.2017] :



Malheureusement, notre connaissance des lois de comportement d'un sol est trop sommaire pour que l'on puisse utiliser une méthode aussi globale.

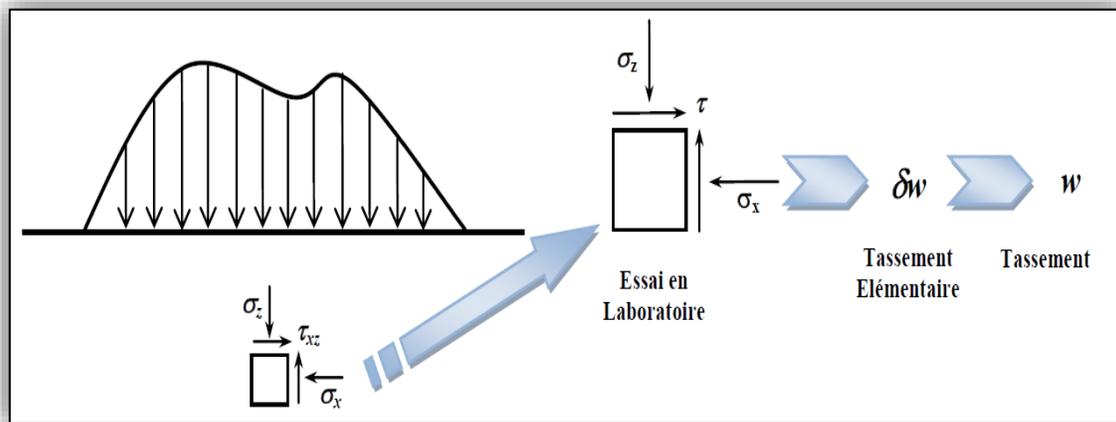
Les méthodes utilisées sont différentes suivant que l'on s'intéresse à l'amplitude ou aux temps de tassements. Les premières ne font pas intervenir explicitement le temps, alors que les secondes sont très intimement liées à ce facteur [F. SCHLOSSER, 1973].

#### 3-1 Méthodes d'évaluation de l'amplitude des tassements

Ce sont des méthodes plus ou moins globales que l'on pourrait appeler méthodes du chemin de contraintes (stress path method) et qui peuvent se résumer dans le processus suivant [M. JOUINI ; N. SIAD.2017] :

- Détermination des contraintes dans le massif de sol par la théorie de l'élasticité ou par toute autre méthode.
- Prélèvements d'échantillons de sols en différents endroits (généralement sous l'axe de la fondation), auxquels on applique en laboratoire et dans des conditions analogues à celles en place, les états de contraintes trouvés précédemment ;
- Mesure des déformations des échantillons donnant les tassements élémentaires ;
- Détermination des tassements à partir des tassements élémentaires.

Ce processus est justifié par le fait que les contraintes sont moins « sensibles » que les déformations, aux écarts qui peuvent exister entre le sol réel et celui de la théorie élastique par exemple

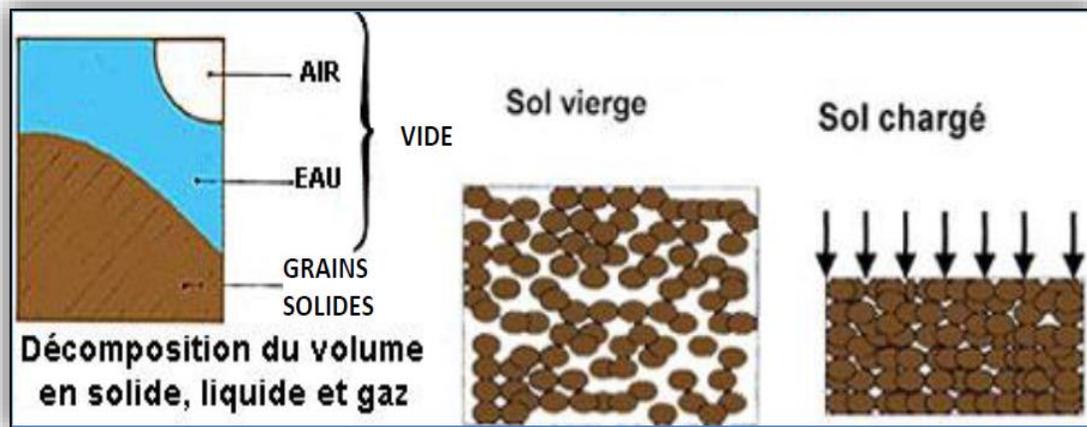


**Figure III.4** Processus des méthodes du chemin de contraintes [F. SCHLOSSER, 1973]

### 3-2 Méthodes d'évaluation des temps de tassement

De telles méthodes sont moins globales et analysent plus les phénomènes qui se produisent au moment des tassements dans les sols fins. Les plus classiques distinguent dans le temps deux phases [M. JOUINI ; N. SIAD.2017] :

- La consolidation primaire.
- La compression secondaire.



**Figure III.5** Processus de consolidation des sols fins [F. SCHLOSSER, 1973]

Sans détailler, rappelons seulement que dans la consolidation primaire, le facteur temps intervient par la viscosité de l'eau interstitielle. Sous l'action des charges appliquées, l'eau interstitielle est mise en pression (presque instantanément), et cette pression se dissipe lentement en raison de la viscosité ; il se produit simultanément un réenchevêtrement des grains solides. Au fur et à mesure de cette consolidation primaire, il y a transfert des contraintes de l'eau interstitielle sur le squelette solide [F. SCHLOSSER, 1973].

Dans la deuxième phase de compression secondaire, on admet le plus généralement que le facteur temps intervient par la viscosité structurale. Cette viscosité est, en grande partie, due à la couche d'eau adsorbée qui entoure les particules d'argile et dont les propriétés physiques sont assez différentes de celles de l'eau naturelle. Durant cette phase la surpression interstitielle reste pratiquement nulle et il y a réenchevêtrement très progressif des particules solides.

Il convient de remarquer qu'en dehors du fait qu'il existe une phase de dissipation de la surpression interstitielle et une autre phase de tassement durant laquelle cette surpression reste nulle, la distinction entre consolidation primaire et compression secondaire est assez arbitraire. En effet, durant la consolidation primaire, une part du tassement est due à la viscosité structurale et par suite durant cette phase les deux phénomènes sont confondus.

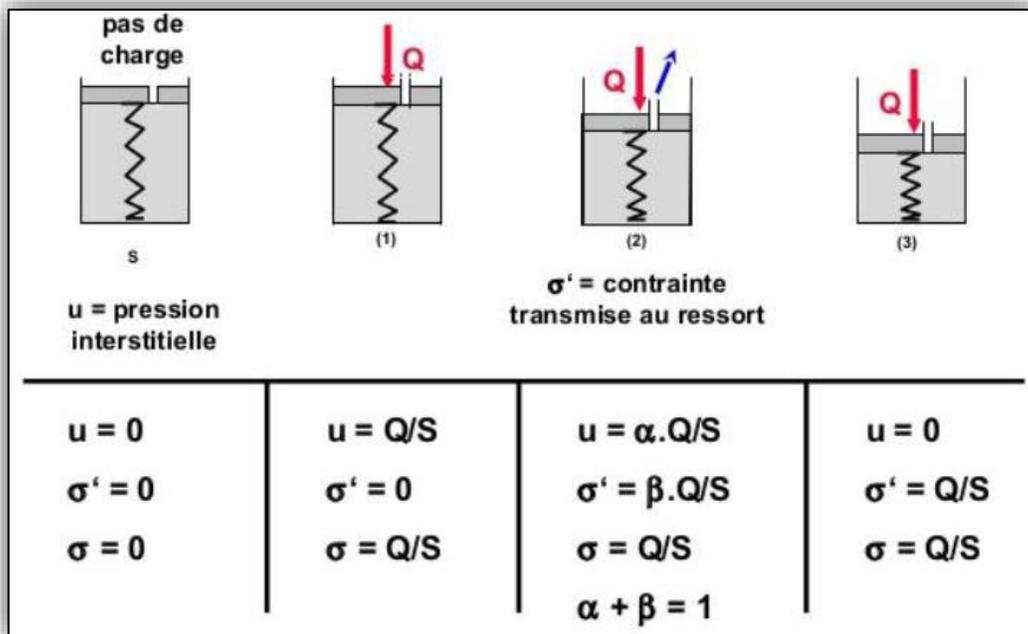


Figure III.6 Explication du phénomène de tassement dans le temps sous une charge donnée [F. SCHLOSSER, 1973]

Par ailleurs, l'importance relative de la consolidation primaire par rapport à la compression secondaire est fonction de l'épaisseur de l'échantillon, les échantillons de très faible épaisseur ayant une consolidation primaire très courte (influence du chemin de drainage) en même temps qu'un tassement instantané relativement important.

### 3-3 Détermination expérimentale du coefficient de consolidation

L'utilisation d'un œdomètre permet cette détermination. On mesure les tassements d'une éprouvette de sol en fonction du temps pour un intervalle de chargement donné, et on établit une courbe de consolidation définie précédemment.

$$C_v = \frac{T_{v_{90}} \cdot d^2}{t_{90}}$$

A partir de là, deux méthodes sont classiques, en utilisant la résolution de Terzaghi :

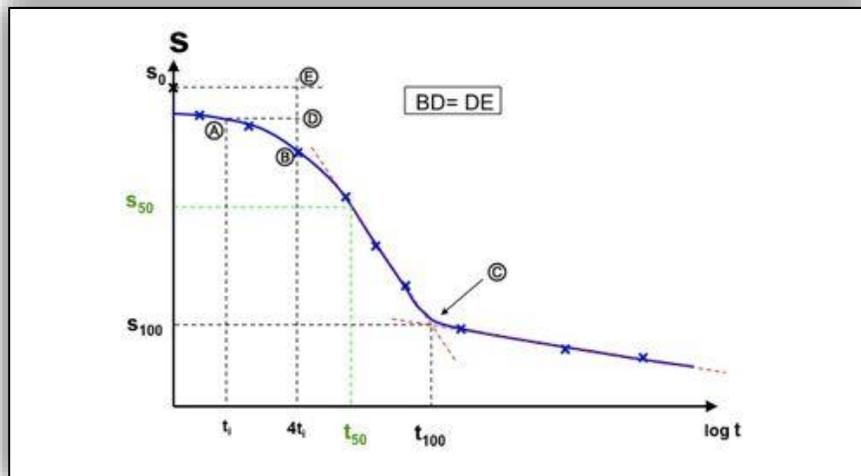
- Méthode de la racine carrée du temps ;
- Méthode du logarithme du temps.

**a- Méthode de la racine carrée du temps (Méthode De Taylor)**

Cette méthode graphique a été proposée par Taylor, elle consiste à dessiner le tassement en fonction de. La première partie de la courbe est une droite, puisque si  $U < 60 \%$ , on a  $T_v = \pi/4 U^2$ , on trace donc la droite expérimentale correspondante (D1).

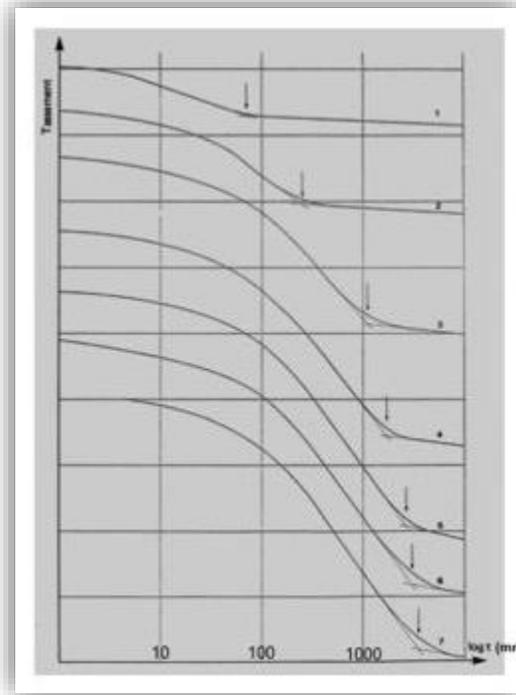
Un tassement immédiat ( $S_i$ ) apparaît sur la courbe qui n'est pas pris en compte pour la détermination de  $C_v$ . A partir du point d'intersection de cette partie droite de la courbe, on obtient l'ordonnée à l'origine  $s_0$ . Ensuite on trace à partir de  $s_0$  une droite D2 dont la pente est égale à 1,15 fois la pente de la partie droite obtenue précédemment et on considère que le point d'intersection de cette nouvelle droite avec la courbe expérimentale correspond à  $U = 90 \%$ , ce qui permet de déterminer  $t_{90}$  et de calculer le coefficient de consolidation [site d'internet N°01].

Avec pour  $U = 90 \%$ ,  $T_v = 0,848$ .



**Figure III.7** Détermination du  $C_v$  par la méthode du logarithme du temps (Casagrande) [site d'internet N°01]

**b- Méthode du logarithme de temps (Méthode de Casagrande) :**



**Figure III.8** courbes de consolidation réelle [site d'internet N°01]

On représente cette fois le tassement en fonction de  $\log t$ .

Cette courbe présente 3 parties [site d'internet N°01] :

- Une portion initiale à concavité tournée vers le bas, qui a une forme parabolique ;
- Une portion linéaire qui correspond au temps où il y a proportionnalité entre le degré de consolidation et le  $\log Tv$  ;
- Une nouvelle portion linéaire de pente plus faible qui décrit la consolidation secondaire, à noter que à partir de la théorie, cette dernière portion devrait avoir une asymptote horizontale.

La compression initiale (instantanée) n'apparaît pas dans le graphique. Pour déterminer la valeur de  $s_0$ , on utilise la construction ci-après. En se plaçant dans la première partie de la courbe et en appliquant la proportionnalité entre  $U$  et  $Tv^2$ , on choisit un temps  $t$  et un temps  $4t$  et on considère que le tassement entre  $t = 0$  et  $t$  est égal au tassement entre  $t$  et  $4t$ . Ceci donne l'ordonnée de  $s_0$ .

Puis on considère les deux parties linéaires de la courbe expérimentale, que l'on prolonge, l'intersection des deux droites définit le  $s_{100}$  : point C sur le graphique.

On détermine le  $S_{50} = \frac{s_0 + s_{100}}{2}$  qui donne la valeur de  $t_{50}$

On calcule alors,

Avec pour  $U = 50 \%$ ,  $T_v = 0,196$ .

$$C_v = \frac{T_{v50} \cdot d^2}{t_{50}}$$

#### **c- Comparaison des deux méthodes**

Les résultats obtenus ne sont pas obligatoirement concordants, cependant, on obtient des valeurs de  $C_v$  souvent du même ordre de grandeur.

La valeur moyenne obtenue est retenue avec un seul chiffre significatif car on considère que cela est suffisant pour la pratique [site d'internet N°01].

#### **d- Détermination de K à partir des résultats des essais de consolidation**

Pour un intervalle de chargement donné, il est possible de calculer la valeur de  $k$  en utilisant la définition de ; il suffit de calculer la valeur de  $mv$  dans l'intervalle de charge.

Cette méthode permet d'estimer la valeur du coefficient de perméabilité pour les sols de perméabilité très faible [site d'internet N°01].

### **4- Techniques de renforcement des remblais sur sols compressibles**

Les techniques classiquement utilisées pour la construction des remblais sur sols compressibles sont les suivantes [F. BERRABAH.2010] :

A- Dispositions constructives relatives au remblai :

- Construction par étapes ;
- Banquettes latérales ;
- Surcharge temporaire ;
- Remblais allégés ;
- Renforcement par géosynthétiques.

B- Modifications du sol supportant le remblai :

- Substitution du mauvais sol ;
- Drains verticaux ;
- Consolidation atmosphérique ;
- Colonnes ballastées ;
- Plots ballastés pilonnés ;

- Injection solide ;
- Colonnes de mortier sol-ciment, réalisées par jet (technique souvent appelée « jet grouting ») ;
- Colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment ;
- Remblai sur inclusions rigides.

### **5- Conclusion**

D'après les conséquences des sols expansifs sur l'ouvrage géotechnique en surface et souterrain, plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols moue. Ces différentes recherches s'orientent sur les ajouts qui minimisent le potentiel de gonflement et la pression de gonflement.

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux. Quelques exemples sont cités concernant l'utilisation de produits chimiques servant à la stabilisation des sols argileux [HACHICHI ET AL].

Le choix des techniques de stabilisation les plus utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que :

- Les considérations économiques ;
- La nature du sol à traiter ;
- La durée de l'opération ;
- La disponibilité des matériaux à utiliser.
- les conditions de l'environnement.

## **Chapitre IV :**

# **Etude Numérique D'un Remblai Sur Sol Mou Muni De Murs En Ballast**

## Chapitre IV

# Etude Numérique D'un Remblai Sur Sol Mou Muni De Murs En Ballast

### 1- Introduction

La méthode des éléments finis (MEF) a connu, depuis 1970 environ, une extension fantastique, qui va de pair avec le développement et l'accroissement de puissance des ordinateurs. C'est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie.

L'utilisation de cette méthode en géotechnique est très courante, surtout pour les grands projets. Par exemple, on peut réaliser des analyses par éléments finis pour vérifier la stabilité d'un ouvrage en interaction avec son environnement, de contrôler les valeurs des déplacements et des contraintes admissibles et d'aider au dimensionnement des structures [A. LAHMAD et al.,2011].

À chaque étape de calcul, PLAXIS simule la construction, les analyses numériques produisent des informations sur les moments fléchissant, les efforts tranchants, les déformations et les pressions interstitielles. Cependant, l'utilisation efficace du logiciel exige [A. LAHMAD et al.,2011] :

- ✓ Les spécifications soigneuses des frontières et des conditions initiales (la pression des terres et la présence de la nappe phréatique) ;
- ✓ Le choix du modèle de comportement avec des paramètres semblables d'entrée pour représenter les propriétés des couches de sol (résistance au cisaillement, paramètres de rigidité et de perméabilité) ;
- ✓ Les méthodes pour interpréter et évaluer les prévisions des analyses

Le but de cette étude est l'identification de l'influence de la variation de coefficient de perméabilités d'une part et l'absence ou l'existence des colonnes ballastées dans un milieu du sol moue d'autre part.

Afin de réduire le temps de consolidation on utilise les colonnes ballastées avec différents coefficients de perméabilités. Les calculs ont été réalisés à partir d'une série d'analyses par éléments finis (EF). Ensuite, des figures et graphes qui montrent les effets de ces paramètres ont été présentées. Ces figures fournissent quelques références utiles pour la conception et la construction des remblais dans les états semblables de construction.

## 2- Présentation des modèles utilisés dans le logiciel PLAXIS

Les modèles de référence ont été pris comme base pour cette campagne de modélisation en 2 dimensions.

### 2-1 Dimensionnement du model de remblais sans ballast

Cas de remblai de 2 couches de gravier sur une plateforme se forme de deux couches de matériaux (couche N°01 : argile, couche N°02 : tourbe) la structure de chaussée de 12 m (Niveau de la nappe phréatique coïncide de 1 m de l'argile)

#### a- Dimensions du modèle :

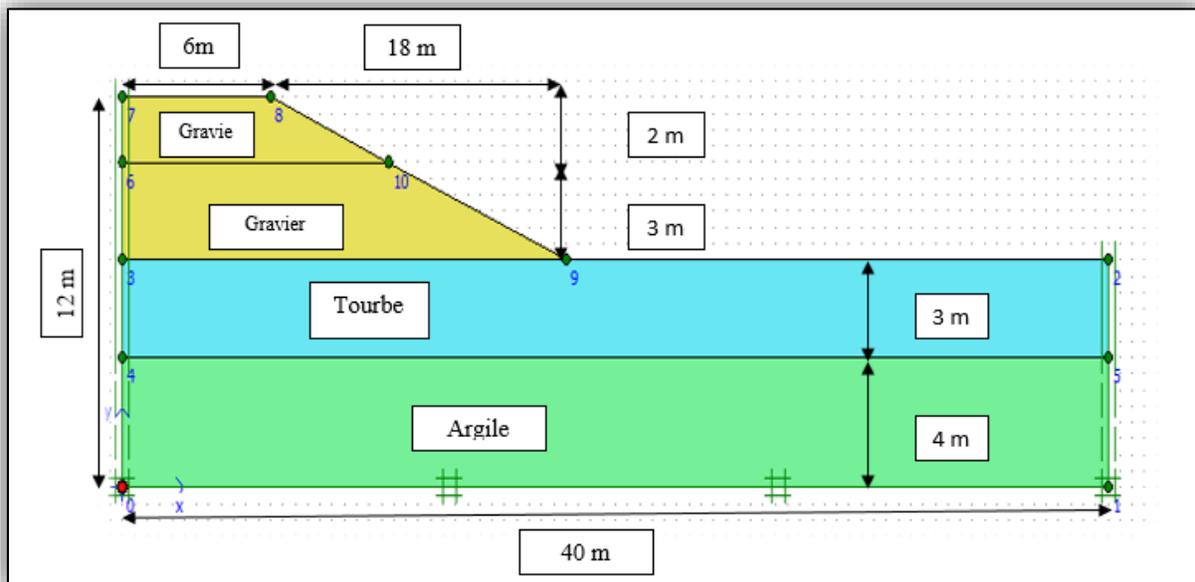


Figure IV.1 Coupe du model de calcul 1<sup>er</sup> (Remblais Sans Ballast)

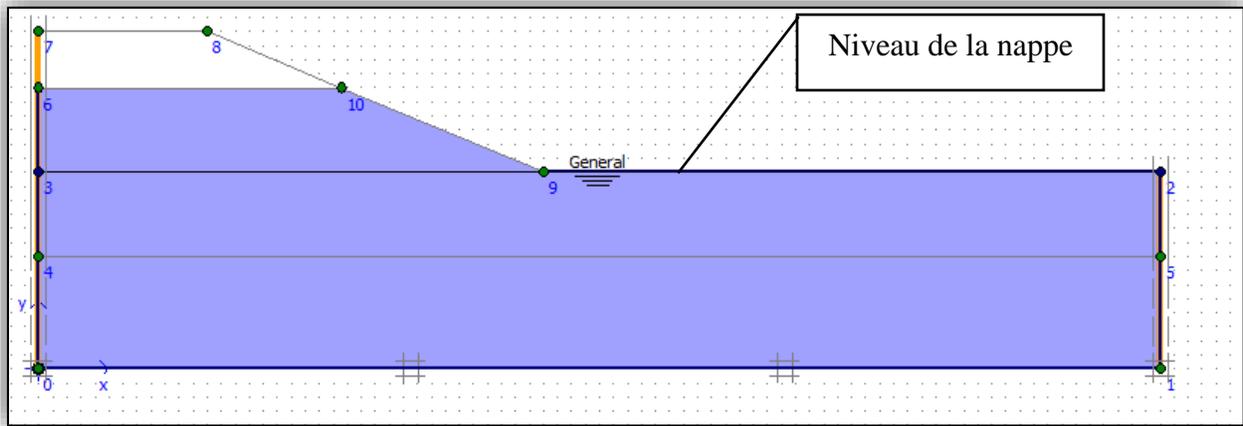


Figure IV.2 Position de la nappe phréatique.

**b- Paramètres des matériaux :**

Tableau IV.1 les paramètres des matériaux utilisées dans la 1<sup>er</sup> cas (RSB)

	Nom	C1: argile	C2: tourbe	C3/C4: gravier	Unités
Modèle type	Modèle	Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	-
Type de comportement		undrained	undrained	drained	
Poids volumique saturé	$\gamma_{unsat}$	15	16	16	KN /m3
Poids volumique un saturé	$\gamma_{sat}$	18	20	20	KN /m3
Perméabilité horizontale	$K_x$	0.0017	0.002	0.5	m/day
Perméabilité verticale	$K_y$	0.0017	0.0017	0.5	m/day
Module d'Young	$E_{ref}$	1000	500	3000	KN/m2
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.33	0.35	0.22	-
Cohésion	C	10	5	1	KN/m2
Angle de frottement	$\Phi$	20	20	30	-
Angle de dilatation	$\Psi$	0	0	0	-
Facteur de rigidité de l'interface	Rint	Rigide	Rigide	Rigide	-

**c- Liste des phases :**

La stabilité des remblais sur sols mous est critique à court terme, également que le cercle le plus défavorables est centré sur la droite à mi-pente. C'est toujours un cercle profond qui est sur la plateforme.

Le calcul s'effectue par le logiciel Plaxis 2D.

On va construire le remblai par étapes, le principe de cette méthode est de construire des hauteurs successives juste suffisantes ( $F > 1.5$ ) et d'attendre la consolidation du sol due à la 1<sup>ère</sup> couche puis le deuxième.

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 ...	0
✓ <Phase 1>	1	0	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	1
✓ <Phase 2>	2	1	Consolidation	Staged Construction	200....	1
✓ <Phase 3>	3	2	Consolidation	Staged Construction	5.00 ...	3
✓ <Phase 4>	4	3	Consolidation	Minimum pore pressure	67.7...	3
✓ <Phase 5>	5	1	Phi/c reduction	Incremental multipliers	5.00 ...	1
✓ <Phase 6>	6	3	Phi/c reduction	Incremental multipliers	5.00 ...	3
✓ <Phase 7>	7	4	Phi/c reduction	Incremental multipliers	30.2...	3

**Phase N°01 :** on va construire un remblai de H=3 m.

**Phase N°02 :** on attend la consolidation de la 1<sup>ère</sup> couche avec le temps de consolidation égale à 200 jours.

**Phase N°03 :** la construction de la 2<sup>ème</sup> couche de la hauteur H= 2 m.

**Phase N°04 :** consolidation de 2<sup>ème</sup> couche.

**Phase N°05 :** analyse à court terme à partir du phase N°01.

**Phase N° 06 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°03.

**Phase N°07 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°04.

**d- Résultats de calcul :**

Les résultats obtenus après analyse ont pour but l'observation et la déduction de l'influence de certains paramètres sur le comportement du modèle et les résultats que PLAXIS fourni.

Afin d'identifier les paramètres influençant sur le comportement du remblai, nous avons choisi plusieurs cas d'étude.

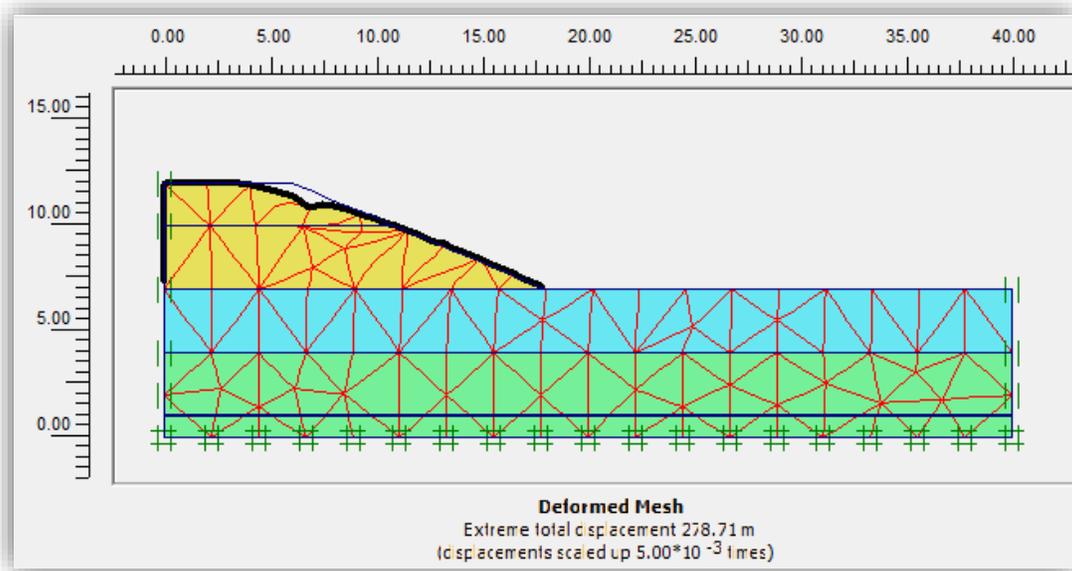


Figure IV.3 Maillages par éléments finis du projet.

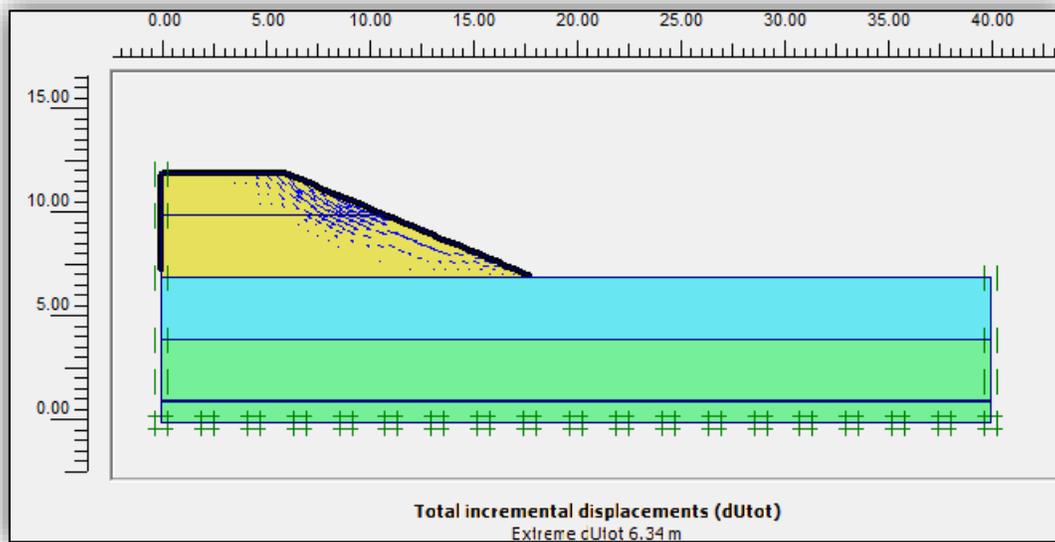


Figure IV.4 Incréments de déplacement dus au changement de niveau d'eau.

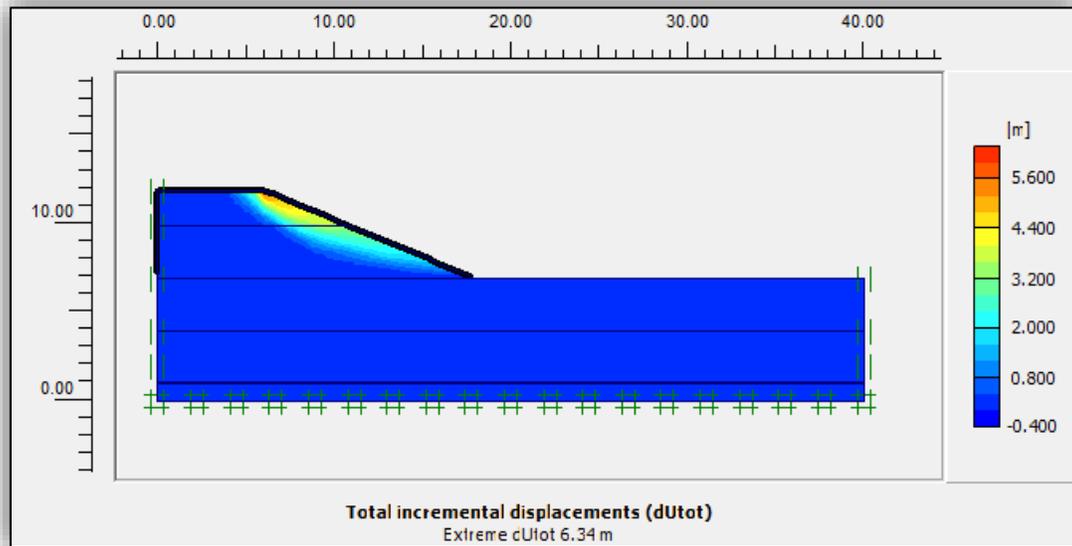


Figure IV.5 Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de défaillance le plus applicable du remblai au stade final.

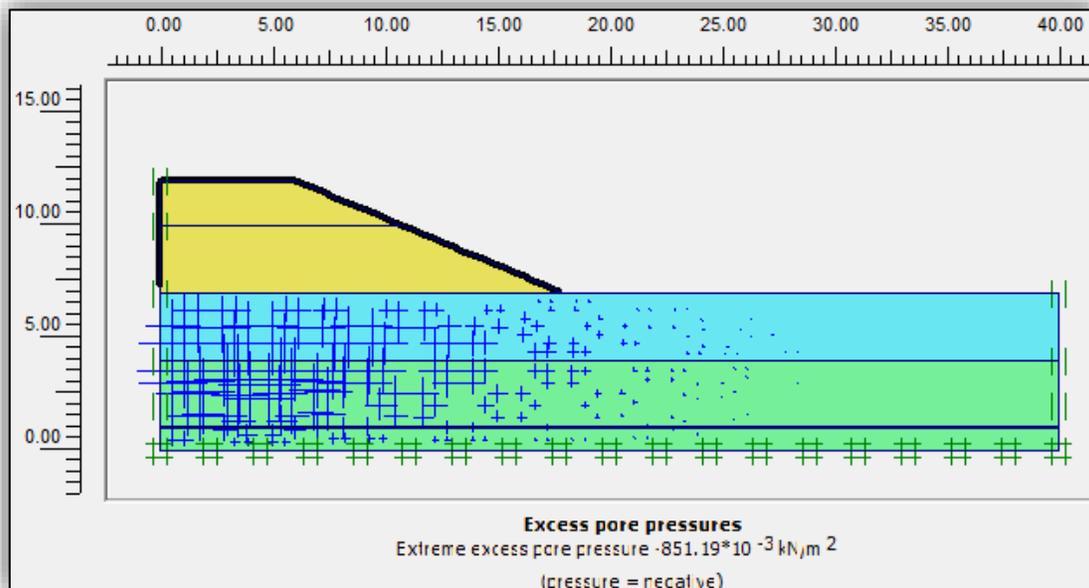


Figure IV.6 Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.

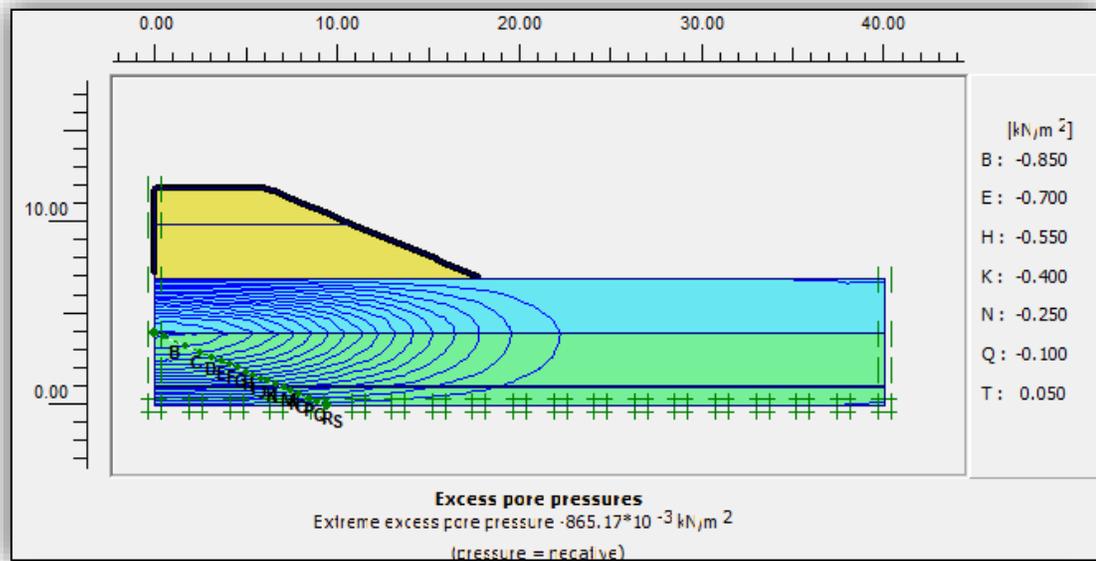


Figure IV.7 Contours de la surpression interstitielle après consolidation.

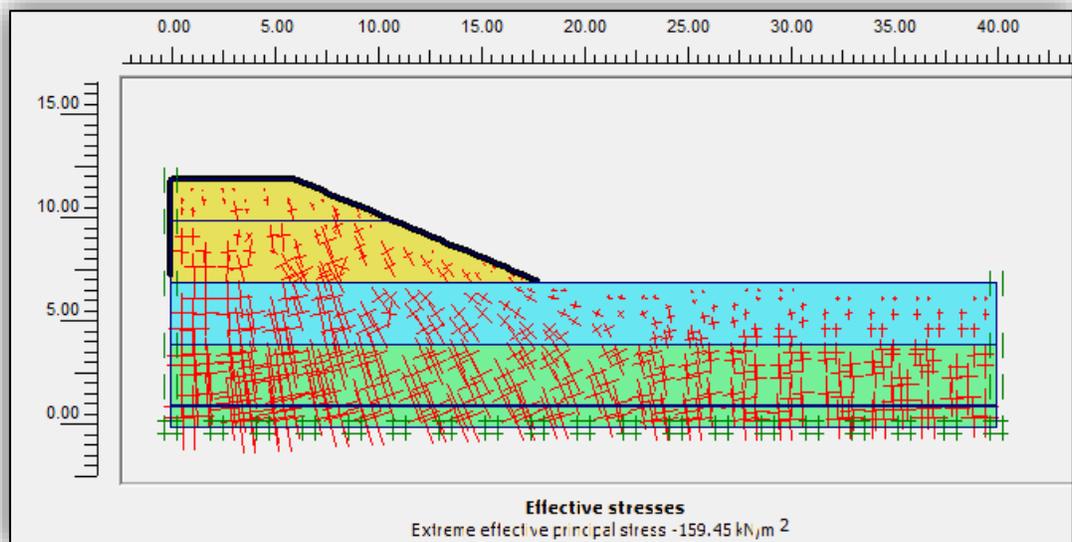


Figure IV.8 Contraintes effectives dans le remblai.

2-2 Dimensionnement du model de ballast avec murs en ballast

2-2-1 2<sup>ème</sup> cas : Remblais avec murs en ballast (100 fois)

a- Dimensions du modèle : les coordonnées des points qui forme le 2<sup>ème</sup> modèle.

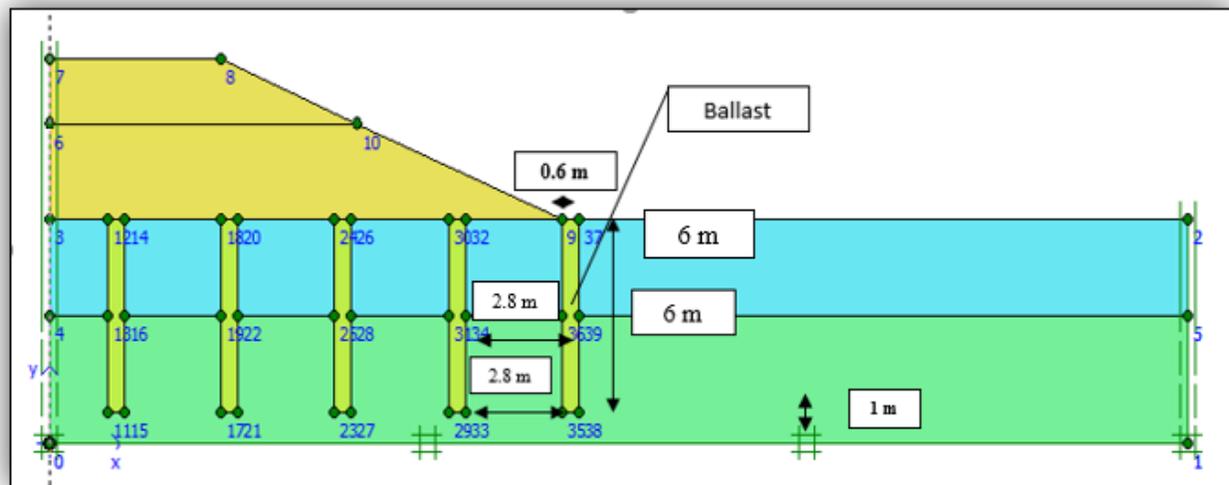


Figure IV.9 Coupe du modèle de calcul, 2<sup>ème</sup> cas (Remblais avec Ballast)

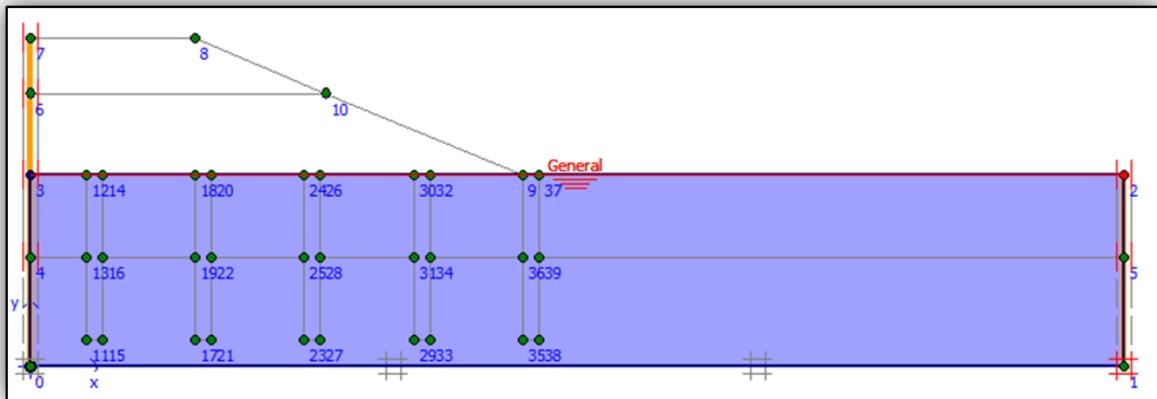


Figure IV.10 Position de la nappe phréatique

## b- Paramètres des matériaux :

Tableau IV.2 les paramètres des matériaux utilisées dans la 2ème cas (Remblais avec Ballast).

	Nom	C1: argile	C2: tourbe	Ballaste	C3/C4: gravier	Unités
Modèle type	Modèle	Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	Mohr- Coulomb	-
Type de comportement		non drainé	non drainé	drainé	drainé	
Poids volumique saturé	$\gamma_{\text{unsat}}$	15	16	17	16	KN /m <sup>3</sup>
Poids volumique un saturé	$\gamma_{\text{sat}}$	18	20	20	20	KN /m <sup>3</sup>
Perméabilité horizontale	$K_x$	0.0017	0.002	0.17	0.5	m/day
Perméabilité verticale	$K_y$	0.0017	0.0017	0.17	0.5	m/day
Module d'Young	$E_{\text{ref}}$	1000	500	5000	3000	KN/m <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.33	0.35	0.25	0.22	
Cohésion	C	10	5	1	1	KN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\Phi$	20	20	35	30	
Angle de dilatation	$\Psi$	0	0	0	0	
Facteur de rigidité de l'interface	$R_{\text{int}}$	0.5	0.5	0.5	0.5	

**c- Liste des phases :**

On va faire les mêmes étapes de calcul présenté dans le 1<sup>er</sup> cas, la différence ici est l'ajoute des murs en ballast de 6 m de hauteur et 0.6 m d'épaisseur espacé entre ses axes avec 3.4 m le long de 18 m de largeur du remblai.

**Phase N°01 :** on va construire un remblai de H=3 m.

**Phase N°02 :** on attend la consolidation de la 1ère couche avec le temps de consolidation égale à 150 jours.

**Phase N°03 :** la construction de la 2ème couche de la hauteur H= 2 m.

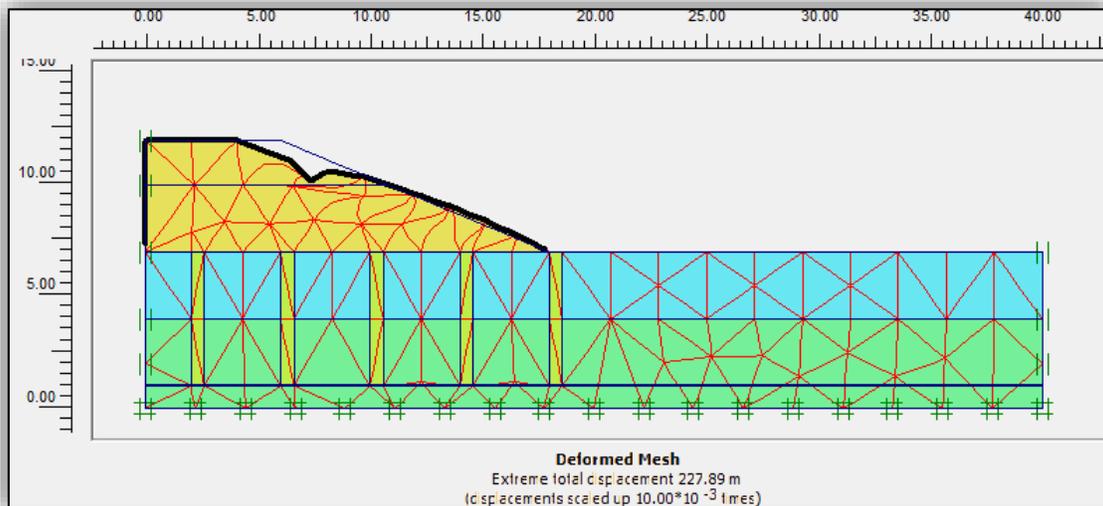
**Phase N°04 :** consolidation de 2ème couche.

**Phase N°05 :** analyse à court terme à partir du phase N°01.

**Phase N° 06 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°03.

**Phase N°07 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°04.

**d- Résultats de calcul des phases :**



**Figure IV.11** Maillages de déformé par éléments finis du projet.

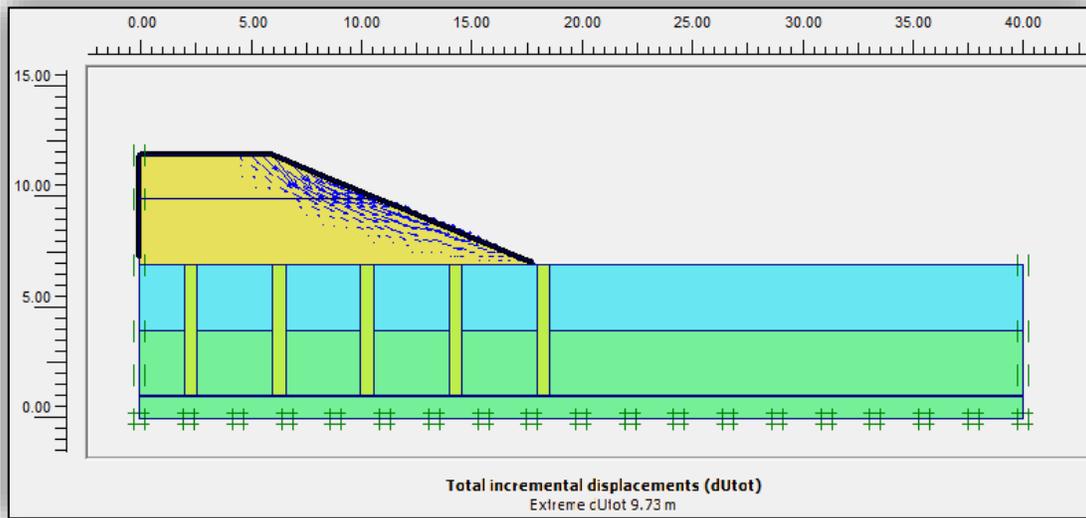


Figure IV.12 Incréments de déplacement dus au changement de niveau d'eau.

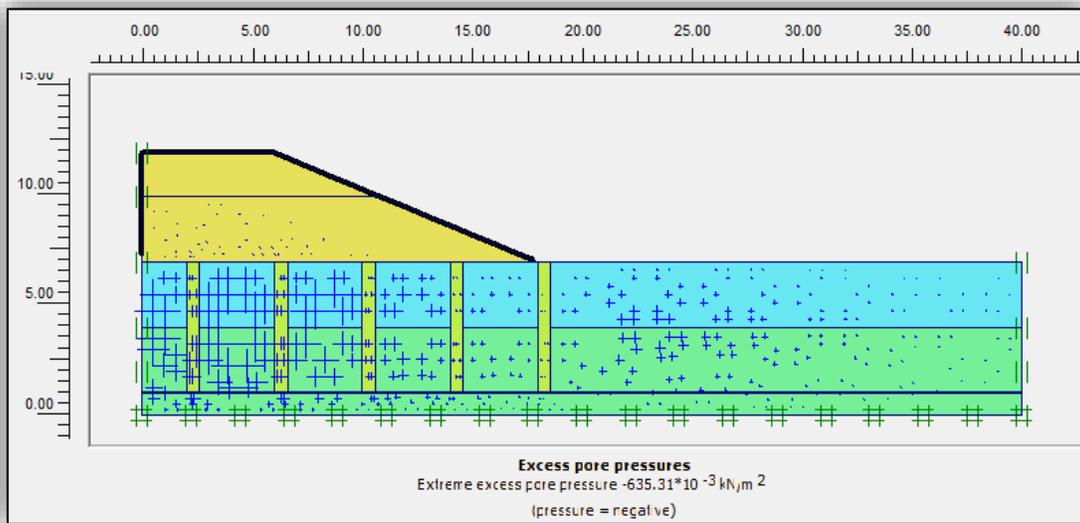


Figure IV.13 Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.

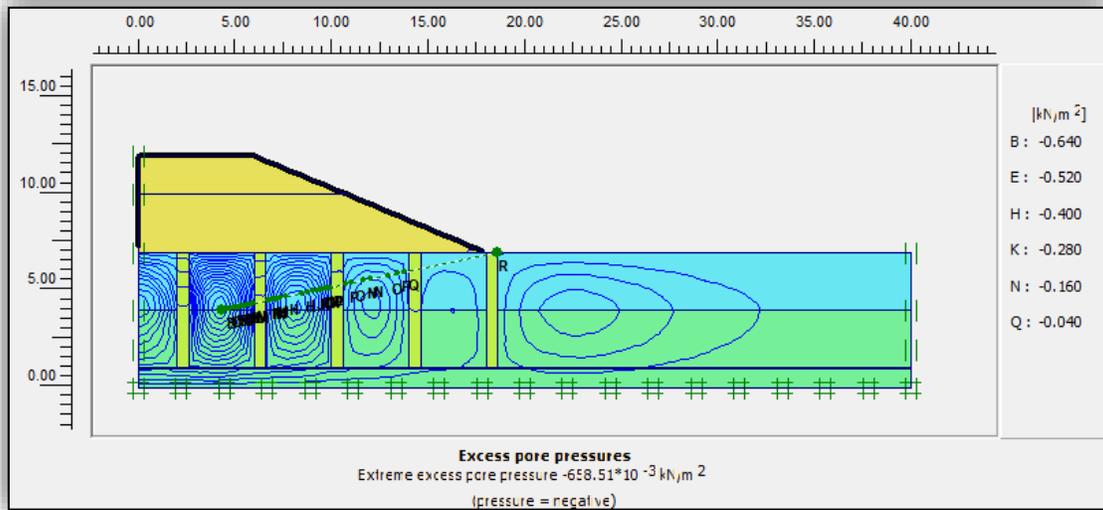


Figure IV.14 Contours de la surpression interstitielle après consolidation.

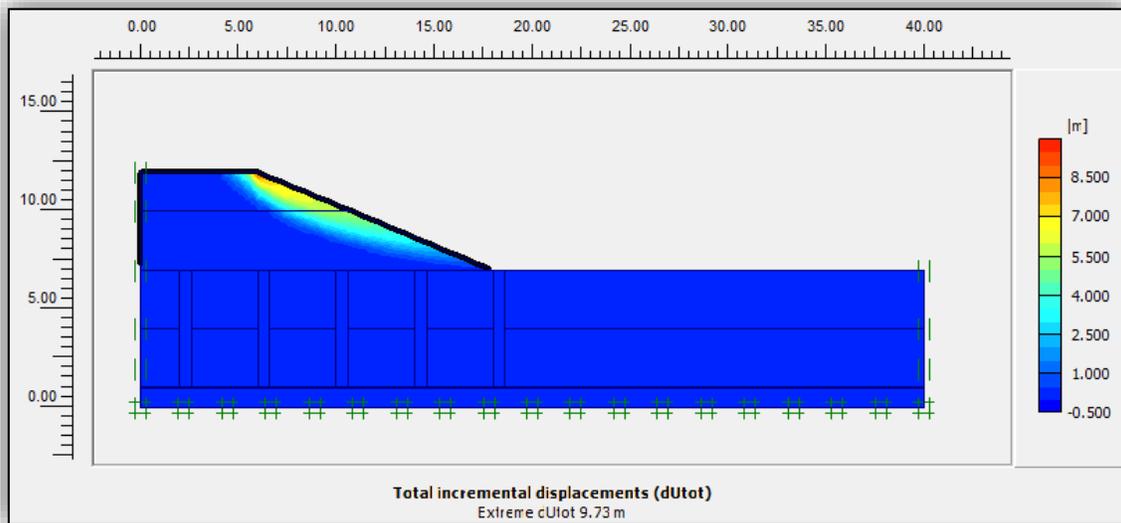


Figure IV.15 Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de rupture le plus probable du remblai au stade final.

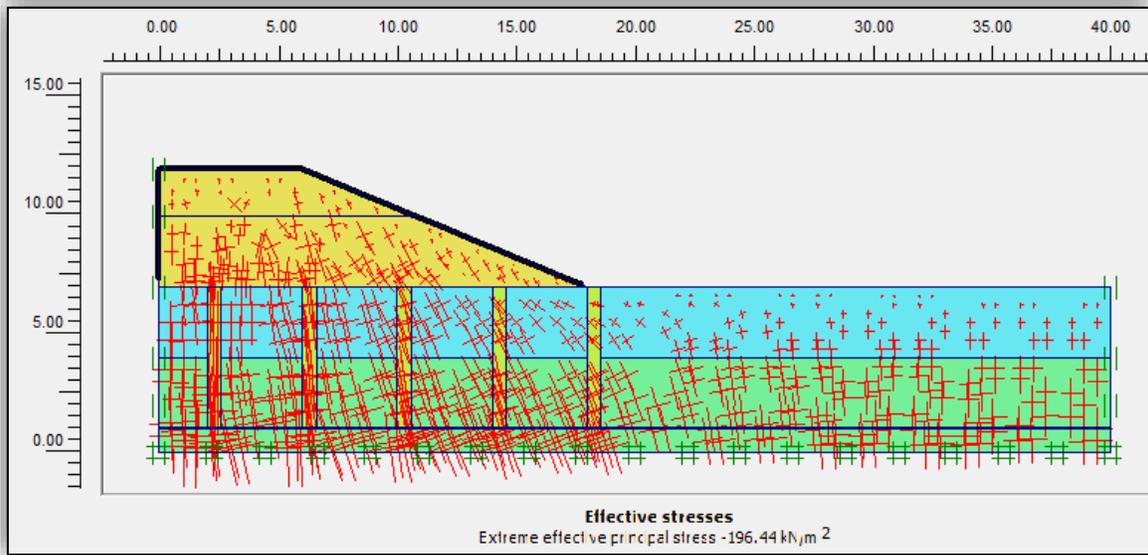


Figure IV.16 Contraintes effectives dans le remblai après l'augmentation du niveau d'eau.

**2-2-2 3<sup>ème</sup> cas : Remblais avec murs en ballast (200 fois) :**

**a- Dimensions du modèle :**

Même dimensionnement du modèle de 2<sup>ème</sup> cas.

**b- Paramètres des matériaux :**

**Tableau IV.3** les paramètres des matériaux utilisées dans la 3<sup>ème</sup> cas (Remblais avec Ballast).

	Nom	C1: argile	C2: tourbe	Ballast	C3: gravier	Unités
Modèle type	Modèle	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Type de comportement		non drainé	non drainé	drainé	drained	-
Poids volumique saturé	$\gamma_{unsat}$	15	16	17	16	KN /m <sup>3</sup>
Poids volumique un saturé	$\gamma_{sat}$	18	20	20	20	KN /m <sup>3</sup>
Perméabilité horizontale	$K_x$	0.0017	0.002	0.34	0.5	m/day
Perméabilité verticale	$K_y$	0.0017	0.0017	0.34	0.5	m/day
Module d'Young	$E_{ref}$	1000	500	5000	3000	KN/m <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson	$\nu$	0.33	0.35	0.25	0.22	
Cohésion	C	10	5	1	1	KN/m <sup>2</sup>
Angle de frottement	$\Phi$	20	20	35	30	-
Angle de dilatation	$\Psi$	0	0	0	0	-
Facteur de rigidité de l'interface	$R_{int}$	Rigide	Rigide	Rigide	Rigide	-

**c- Liste des phases :**

On va faire les mêmes étapes de calcul présenté dans le 1er cas, la différence ici est l'ajoute des murs en ballast de caractéristique différente qu'il est utilisé dans la 2<sup>ème</sup> cas mais de même dimensionnement.

**Phase N°01 :** on va construire un remblai de H=3 m.

**Phase N°02 :** on attend la consolidation de la 1ère couche avec le temps de consolidation égale à 120 jours.

**Phase N°03 :** la construction de la 2ème couche de la hauteur H= 2 m.

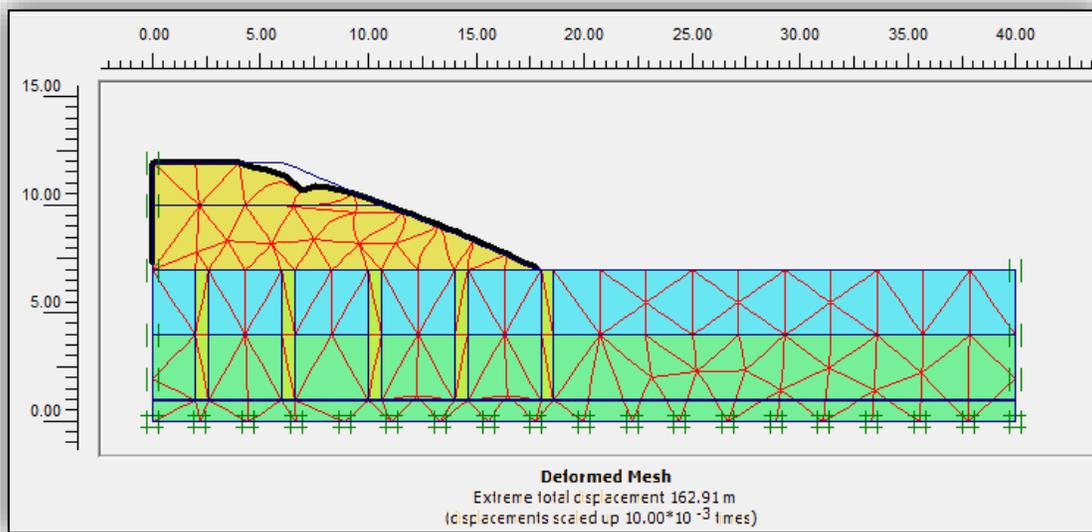
**Phase N°04 :** consolidation de 2ème couche.

**Phase N°05 :** analyse à court terme à partir du phase N°01.

**Phase N° 06 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°03.

**Phase N°07 :** analyse de stabilité à court terme à partir du phase N°04.

**d- Résultats de calcul des phases :**



**Figure IV.17** Maillages déformé par éléments finis du projet.

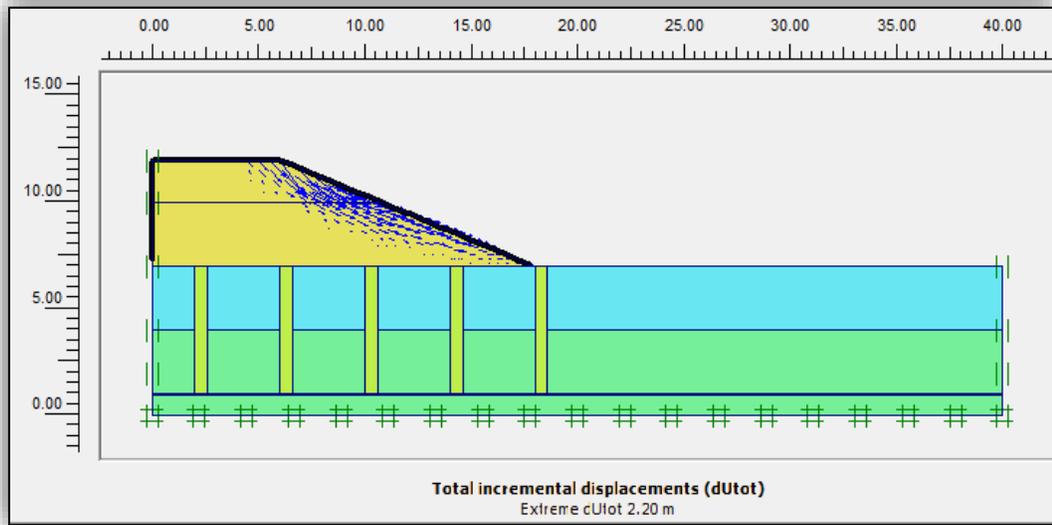


Figure IV.18 Incréments de déplacement.

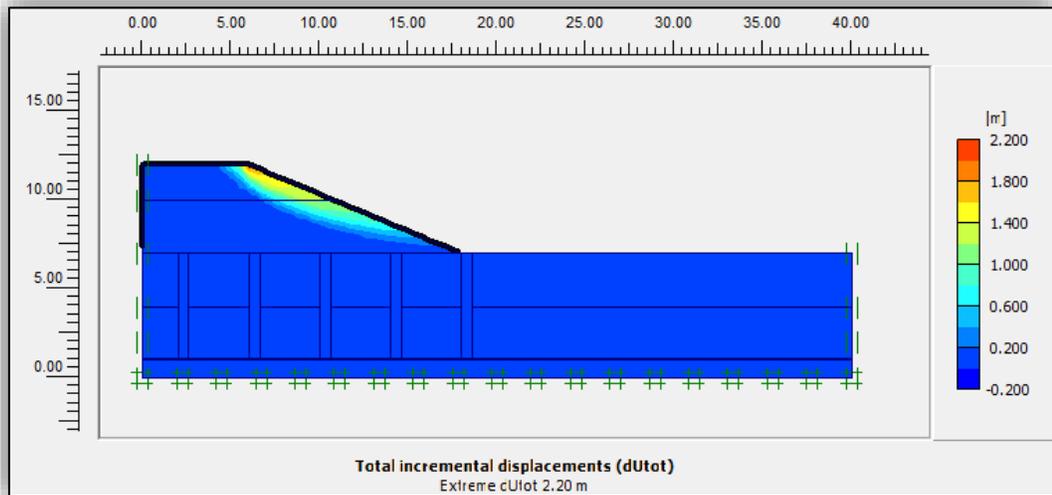


Figure IV.19 Ombrages des incréments de déplacement total indiquant le mécanisme de rupture le plus probable du remblai au stade final.

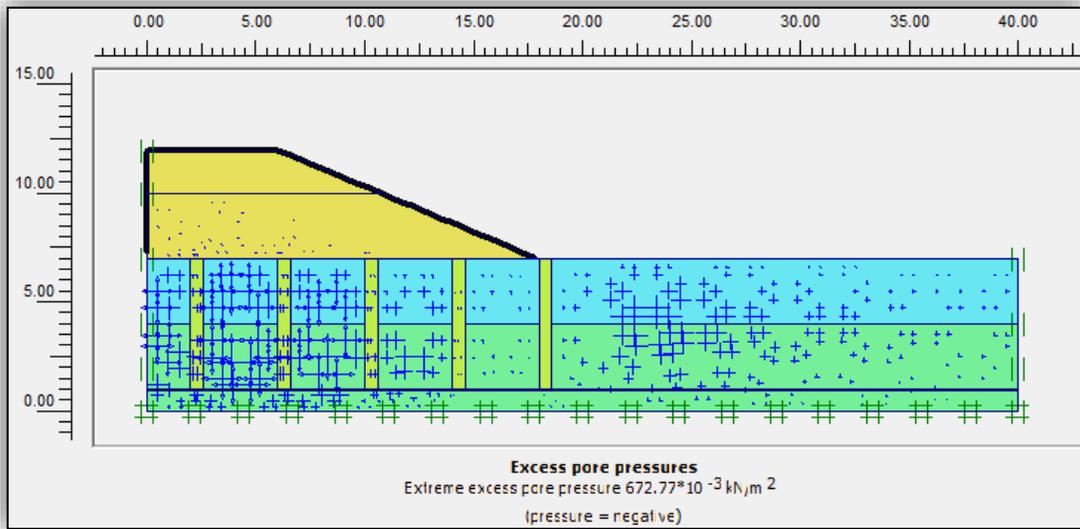


Figure IV.20 Surpression interstitielle après la construction non drainée du remblai.

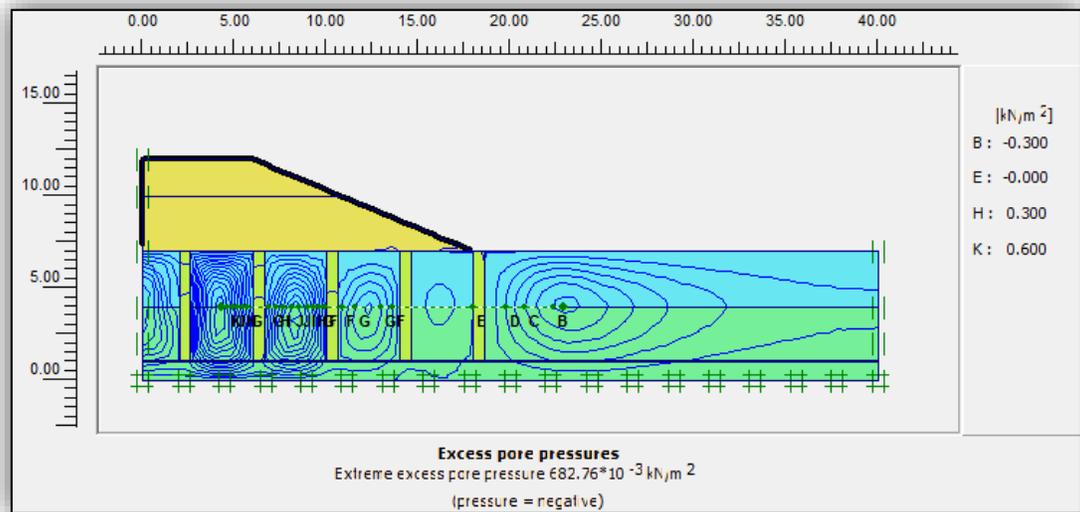


Figure IV.21 Contours de surpression interstitielle après consolidation.

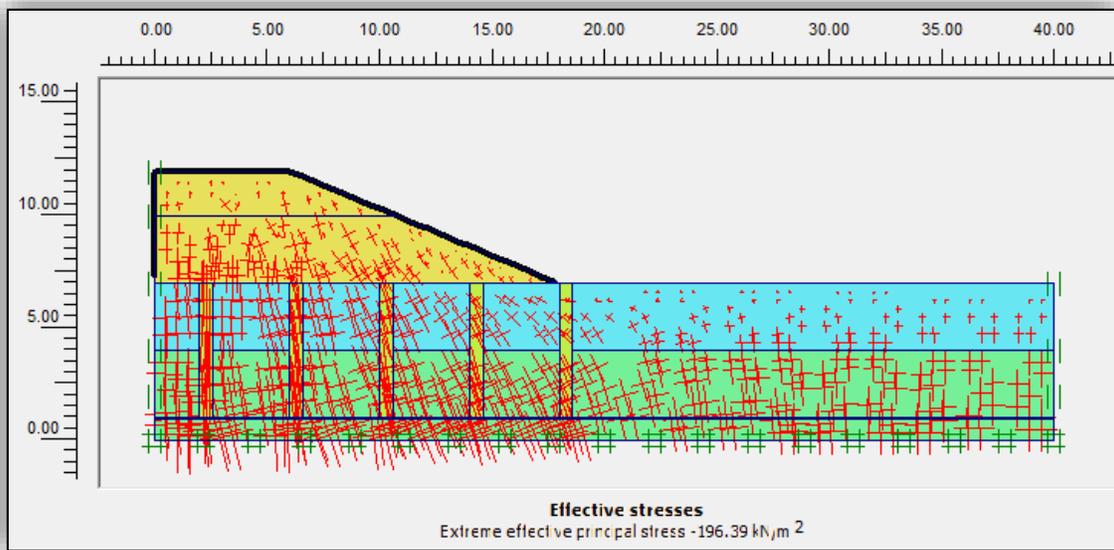


Figure IV.22 Contraintes effectives dans le système.

1-1 Les graphes :

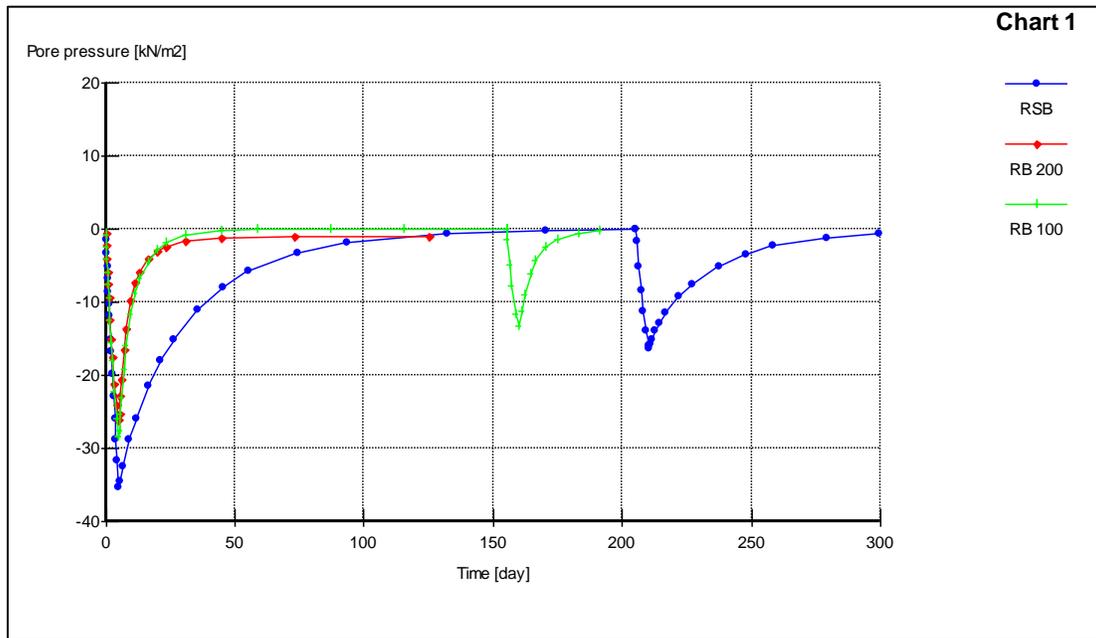


Figure IV.23 Evolutions de la surpression interstitielle sous le remblai pour les 3 cas de calcul.

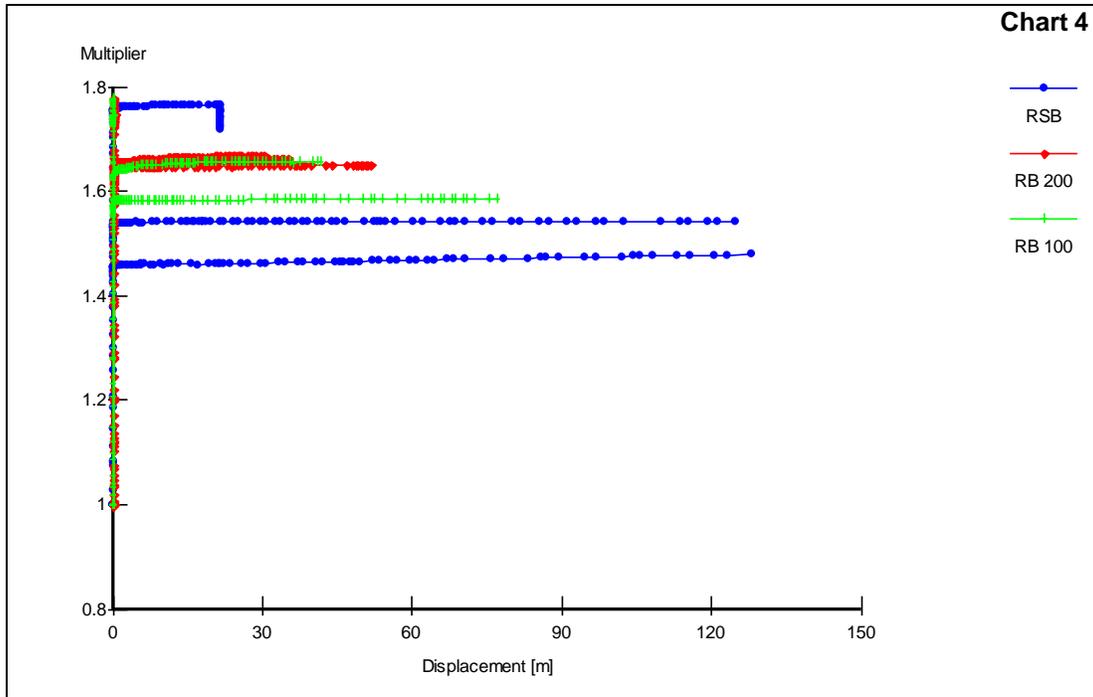


Figure IV.24 Evolutions du facteur de sécurité pour les trois cas de construction à long terme.

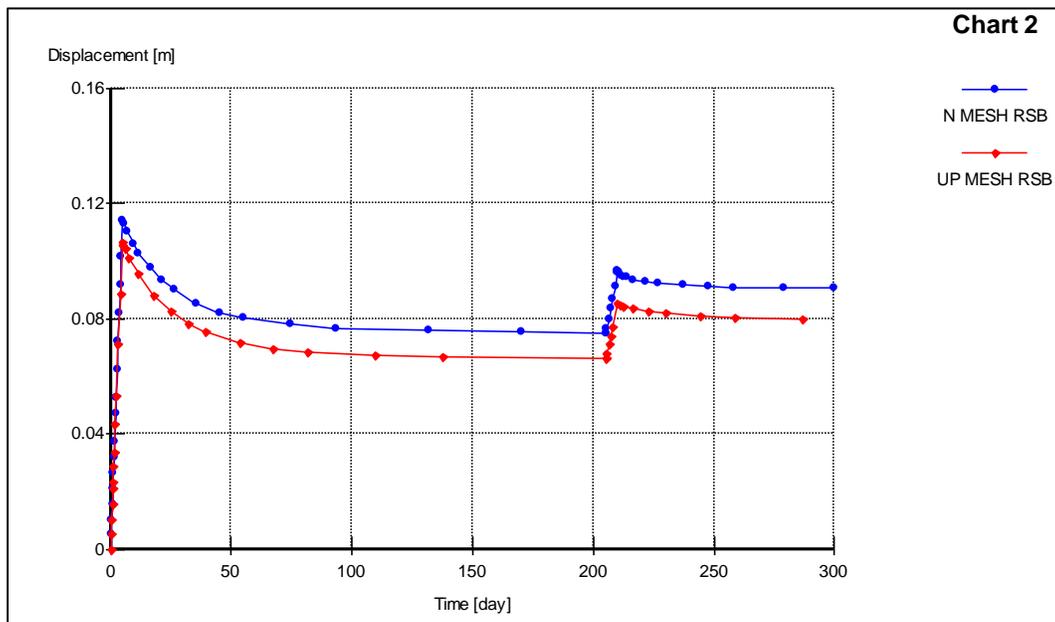


Figure IV.25 Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système sans Ballast.

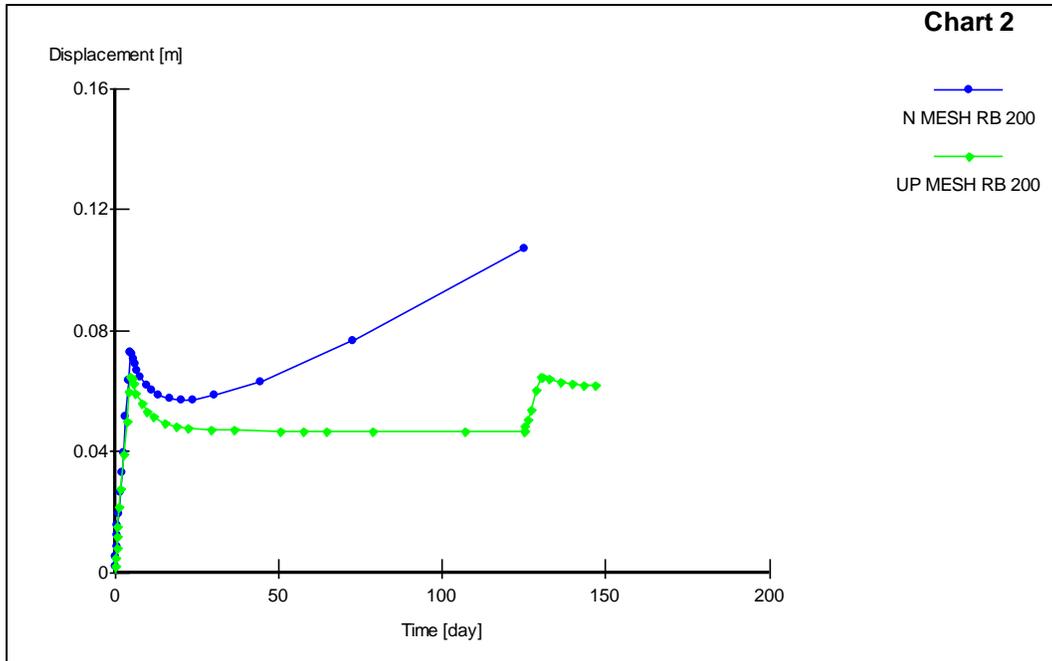


Figure IV.26 Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.

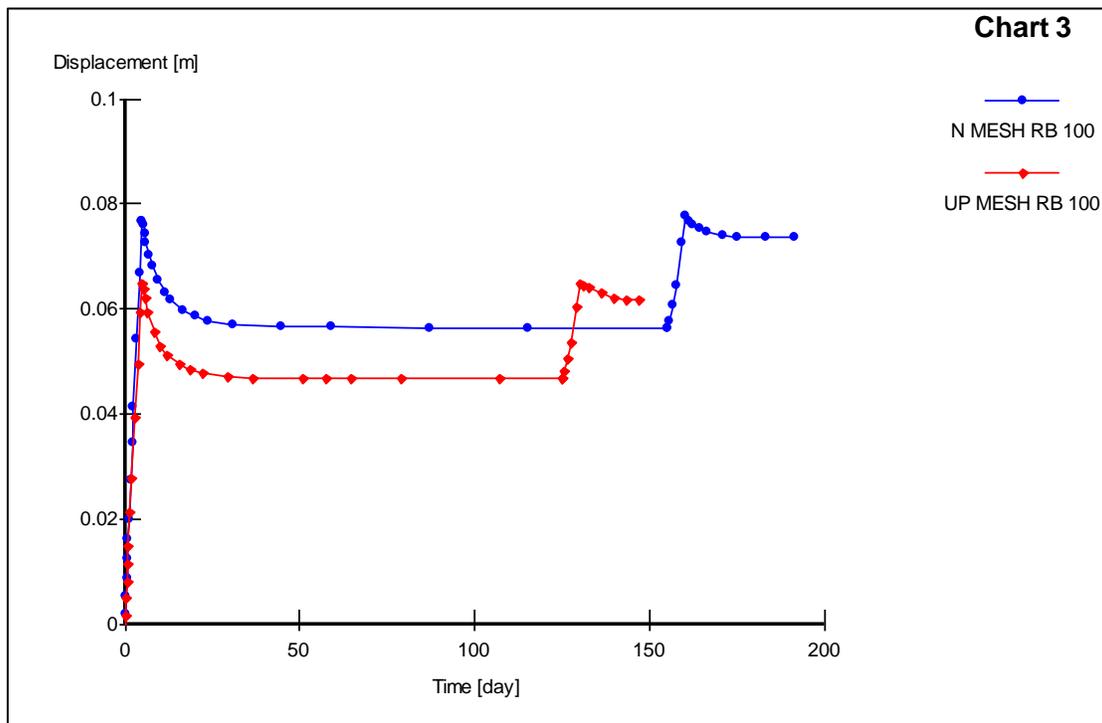


Figure IV.27 Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.

Avec :

- ✓ **RSB** : remblai sans ballast.
- ✓ **RB 100** : remblai sur plateforme renforcé par des murs en ballast avec coefficient de perméabilité égale à 100 fois que de l'argile.
- ✓ **RB 200** : remblai sur plateforme renforcé par des murs en ballast avec coefficient de perméabilité égale à 200 fois que de l'argile.

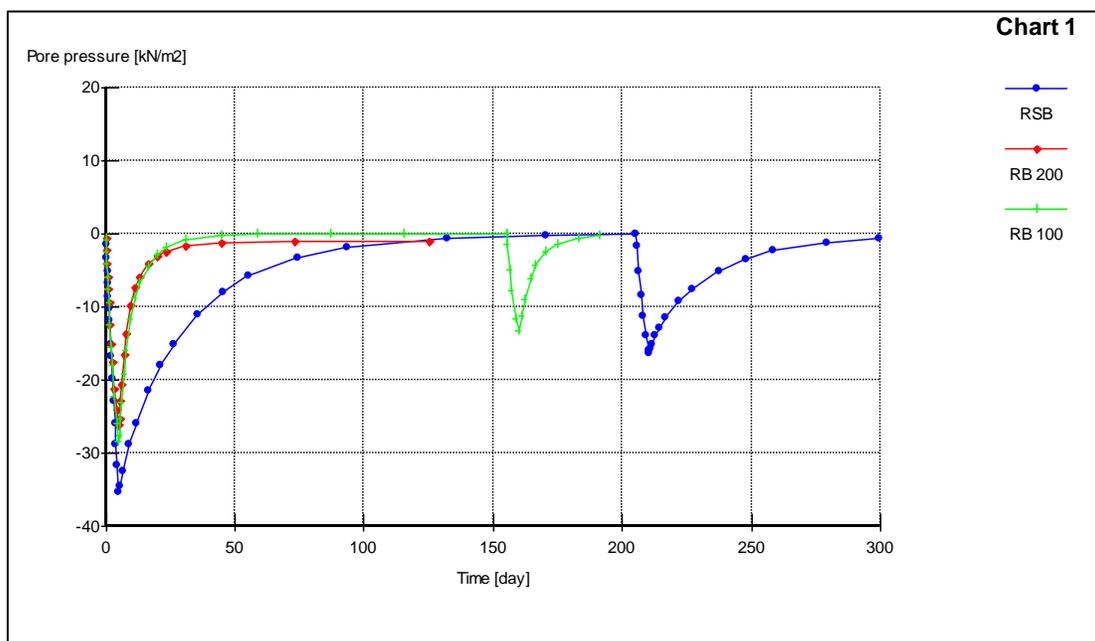
## **Chapitre V :**

# **Interprétations des résultats**

## Chapitre V

## Interprétations des résultats

A partir des trois cas que nous venons d'étudier à savoir remblais sans ballast, remblai sur plateforme renforcé par murs en ballast de coefficient de perméabilité 100 fois que l'argile, et autre cas d'étude remblai sur plateforme munis de murs en ballast de coefficient de perméabilité 200 fois que l'argile, nous pouvons émettre les constatations suivantes :



**Figure V.01** Evolutions de la surpression interstitielle sous le remblai pour les 3 cas de calcul.

Ce graphe représente l'évolution de la surpression interstitielle sous le remblai pour les 3 cas d'études :

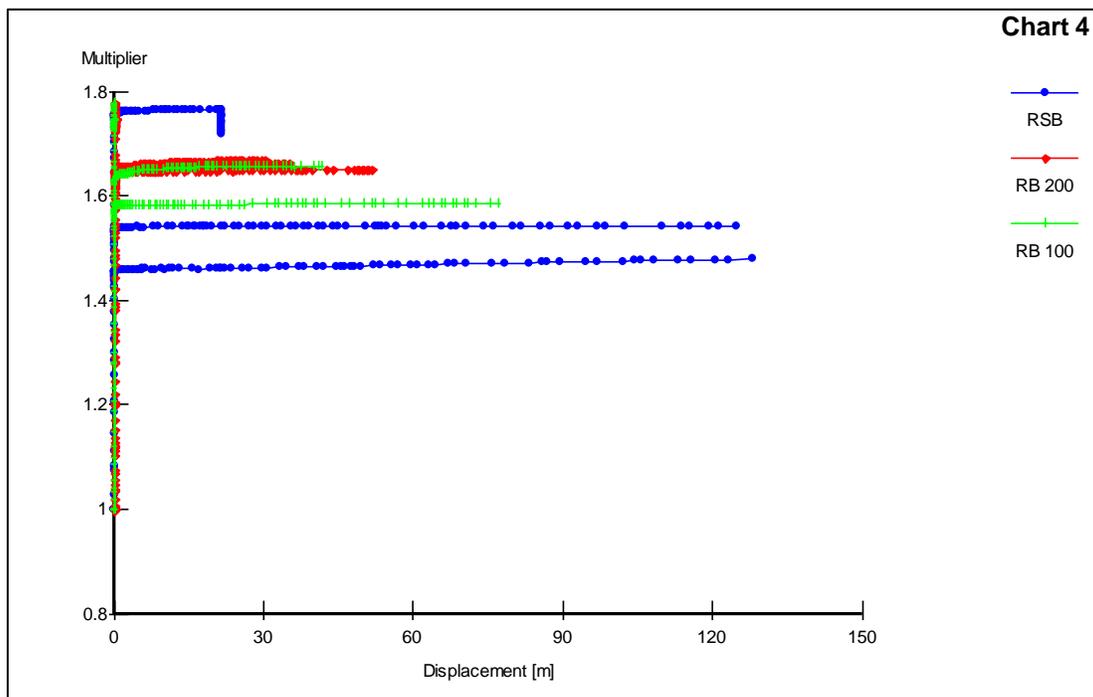
**1<sup>er</sup> cas d'étude** : remblais sans ballast le temps de consolidation est plus long que les autres cas d'études.

**2 -ème cas d'étude** : pour le remblai constituant sur la plateforme renforcé par le ballast de coefficient de perméabilité égale à 100 fois que l'argile, on constate que le temps de consolidation diminue à 150 jours comme la courbe verte représente.

**3-ème cas d'étude :** pour le remblai constituant sur la plateforme renforcé par le ballast de coefficient de perméabilité égale à 200 fois que l'argile, on constate que le temps de consolidation diminue à 120 jours comme la courbe rouge représente.

On utilise les ballasts afin d'accélérer la perméabilité (drainage d'eau interstitielle),

On utilise deux types de ballast différent

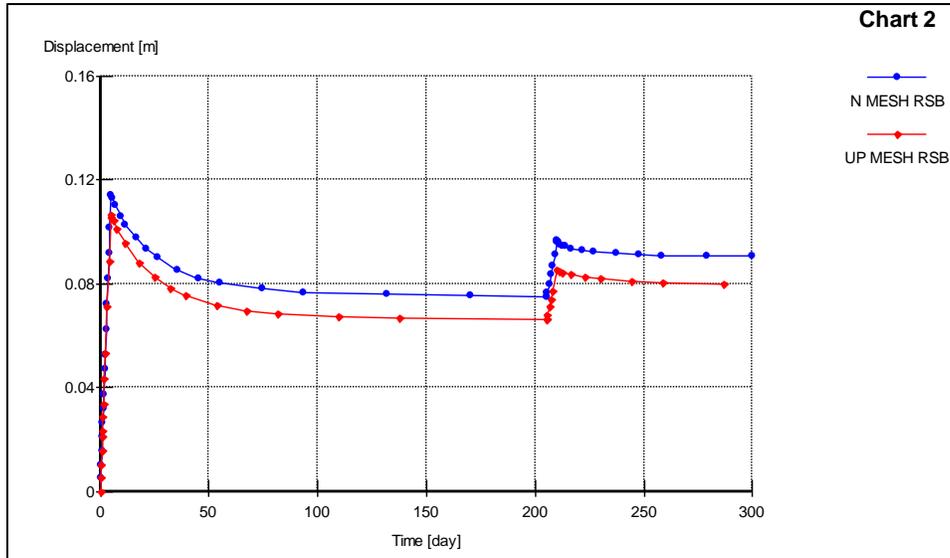


**Figure V.02** Evolutions du facteur de sécurité pour les trois cas de construction à long terme.

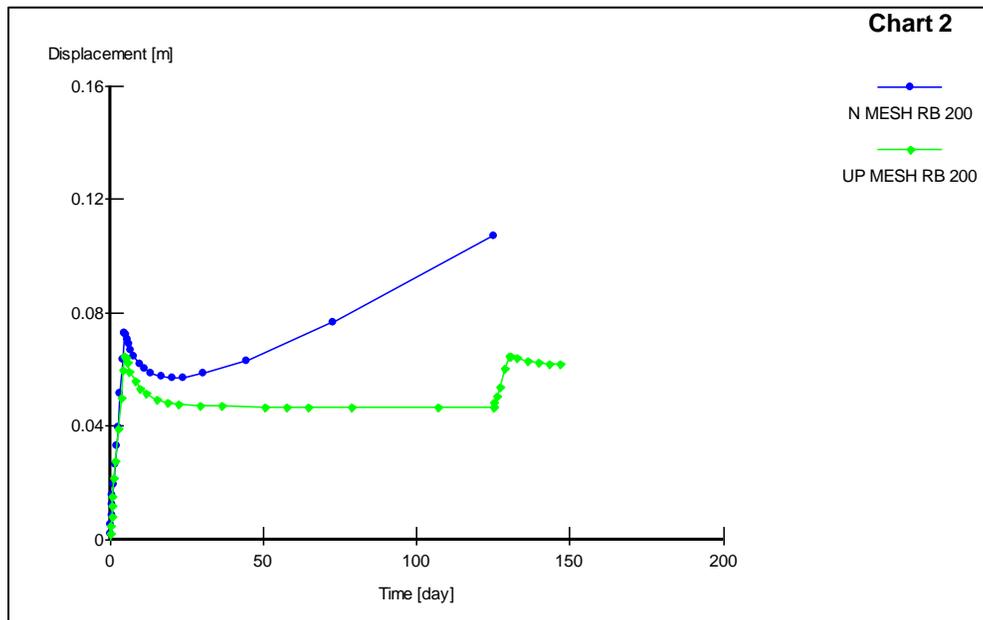
Pour la figure n 2 qui représente l'évolution du facteur de sécurité pour les 3 cas de construction à long terme.

- **1<sup>er</sup> cas :** le coefficient de sécurité est plus grand après la réalisation des étages de remblais jusqu'à 1.75 avec plus déplacement.
- Pour les deux autres cas (remblais sur plateforme renforcé par des colonnes ballastées) le coefficient de sécurité à long terme égale à 1.75 sans déplacement.

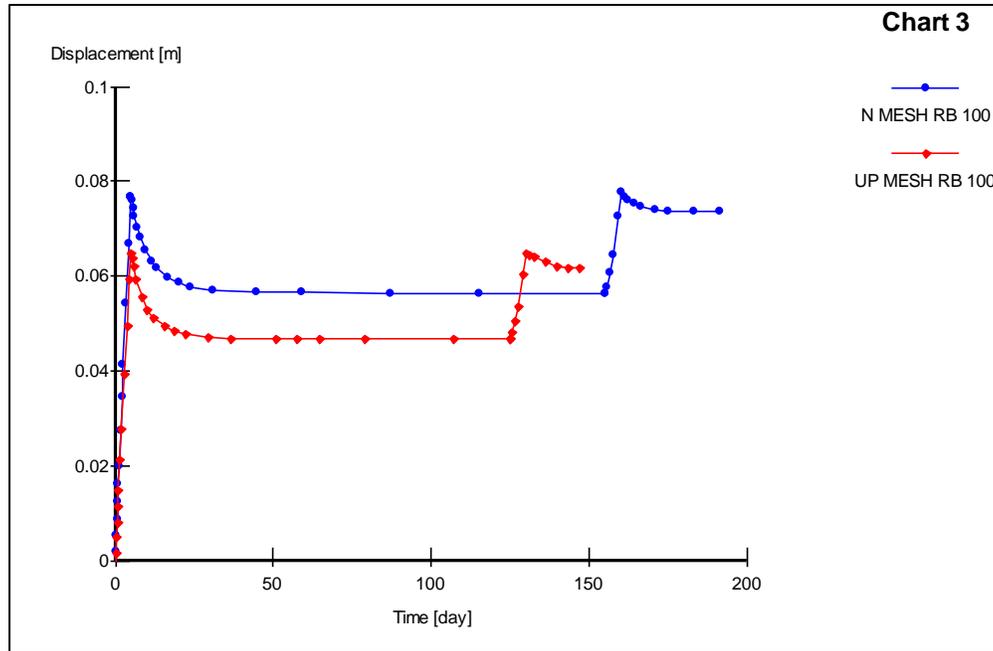
Le renforcement de la plateforme avec les murs en ballast augmente la résistance mécanique du sol. Il permet de stabiliser le sol mou et réduire les déplacements du remblai en accélérant le drainage.



**Figure V.03** Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système sans Ballast.



**Figure V.04** Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour du système avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.



**Figure V.05** Tassements de la pointe du remblai à l'aide du calcul de maillage mis à jour de système avec Ballast dont la perméabilité est 100 fois celle de l'argile.

Pour les figures 03, 04, 05, qui représentent le tassement de la pointe du remblai à l'aide de maillage mis à jour des trois cas de calcul, on constate que :

- Le déplacement du normale millage est supérieur qu'après le mettre à jour du maillage pour les 3 cas de calcul.
- Le déplacement de système avec Ballast dont la perméabilité est 200 fois celle de l'argile est le plus petite que les autres systèmes.

## CONCLUSION

Concernant les stations L'examen des tableaux de temps de consolidation et des tableaux de déplacement présenté en annexe de la mémoire.

Après avoir étudié l'influence de l'augmentation de valeur de coefficient de perméabilité du ballast sur le temps de consolidation des remblais analysés précédemment, nous pouvons émettre les constatations suivantes :

- Les murs en ballast est parmi les méthodes de renforcement des sols mous qui permettent d'augmenter la résistance du sol.
- L'augmentation de coefficient de perméabilité accélère le drainage de l'eau interstitielle.
- Lorsqu'on augmente la valeur du coefficient de perméabilité du ballast le coefficient de sécurité augmente aussi donc il permet de stabiliser le remblai, d'accélérer la perméabilité et de réduire le temps de consolidation du remblai

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **M. JOUINI ; N. SIAD.** *Simulation paramétrique du comportement d'un remblai de sol pulvérulent reposant sur une couche d'argile gonflante par le logiciel PLAXIS, cas de l'évitement de la ville de Tébessa, mémoire Master.* Département De Génie Civil. UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI - TEBESSA.2016. P.126.
- **F. BERRABAH.** *Étude Du Comportement Des Remblais Renforcés Par Des Géosynthétiques Sur Sols Marécageux, Magister.* Département De Génie Civil Et Hydraulique. Université Mohamed Khider– Biskra. 2010.P.154.
- **Abramento M., Castro G.R., Campos S.J.A.M.,** *Short and long-term analysis of a reinforced embankment over soft soil.* 7th International Conference on Geotextiles, Nice 2002, France, Vol. 1, pp. 139-142., 2002.
- **Abduljawad, S.N., Bayomy, F., Al-Shaikh, A.M. and Al-Amoudi, O.S.B.,** "Influence of Geotextiles on Performance of Saline Sebkhah Soils". ASCE Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n. 11, pp. 1939-1960, 1994.
- **ZIGHMI, Imène-Bassma.** *Etude numérique de l'influence des paramètres géotechniques sur le comportement des sols renforcés par colonnes ballastées.* Tizi Ouzou.
- **MAGNAN, Jean-Pierre et PILOT, Georges.** *Amélioration des sols.*
- **PTC.FAYAT.** *Amélioration de sols PTC.* 2015.
- **B. Mazouz.** *MODELISATION PAR ELEMENT FINIS D'UNE SEMELLE FILANTE Flexible Soumise A L'action Des Sols Argileux Gonflant,* THÈSE présentée pour l'obtention du diplôme de MASTER en Génie-Civil. 2010.
- **M.JEDIDI.** *Cours\_sans-inclusions\_ouvrages-maritimes\_procedes-generaux-de-construction.* Paris: s.n., 2003.

- **K. ARAB ; H. BOUZIANE.** *Caractérisation géotechnique des granulats de la région de Sétif en vue de leur utilisation comme matériau de ballast, 2009.* Université Ferhat Abbas-Setif.P.60
- **M.H. ACHIRI ; G. KERKOUR,** *Contribution à l'étude des formations crétacées du versant sud du Djebel Gustar : perspectives pour agrégats. Mémoire de PFE,* Université de Sétif. 2007. 45 p.
- **F. AISSAT.** *Propriétés géologiques du ballast utilisé par les chemins de fer algériens, 2000Mémoire PFE, ENP.* Alger. 59 p.
- **J. ALIAS.** *La voie ferrée : techniques de construction et d'entretien.* Editions Eyrolles, 1984.514 p.
- **K. BENOUARETH.** *Gisement de calcaire Djebel Youcef. Rapport géologique .*2004. 19 p.
- **A. DEBBACHE.** *Gisement de calcaires de Kef Errand. Rapport géologique.* 2008.10 p.
- **L.CHANANE.** *Influence des qualités du ballast sur la circulation des trains. Mémoire de Magister, ISFF, 2008.*Alger. 60 p.
- **A. FATTAH ; A. GHEMMOUR.** *Influence des caractéristiques géomécaniques et pétrographiques sur la qualité d'un ballast. Mémoire PFE, ENP, 2003.*Alger. 88 p.
- **A. LAHMAD<sup>1</sup>, K. ABBECHÉ<sup>2</sup> et L. ZEGHICHI<sup>1</sup>,** *Étude de l'effet des paramètres géotechniques et de calcul sur l'interaction sol-structures,* Conférence Paper ,October 2011. 1- Département de génie civil et d'hydraulique, Faculté de Technologie, Université de M'sila, B.P. 166, Ichbilia, M'sila 28 000, Algérie ([lahmadiazz@yahoo.fr](mailto:lahmadiazz@yahoo.fr), [zoghichi2004@yahoo.fr](mailto:zoghichi2004@yahoo.fr)) ,2- Laboratoire de recherche LARHYA, Département de génie civil, Université de Batna, Batna 05 000, Algérie ([abbechek@yahoo.fr](mailto:abbechek@yahoo.fr) ).

- Site D'internet N° 01 :  
[http://tice.inplnancy.fr/modules/sciences\\_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap8/courbes-oedometrique.html](http://tice.inplnancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap8/courbes-oedometrique.html)
- Site D'internet N° 02 :  
[https://www.lejdc.fr/decize-58300/actualites/les-chaussees-deformees-un-casse-tete-pour-les-automobilistes-et-la-municipalite\\_11719979/](https://www.lejdc.fr/decize-58300/actualites/les-chaussees-deformees-un-casse-tete-pour-les-automobilistes-et-la-municipalite_11719979/)
- Site D'internet N° 03 :  
[https://www.researchgate.net/figure/Composition-de-la-structure-dune-voie-ferr-e-LGV-ligne-grande-vitesse\\_fig1\\_237152586](https://www.researchgate.net/figure/Composition-de-la-structure-dune-voie-ferr-e-LGV-ligne-grande-vitesse_fig1_237152586)
- Site D'internet N°04 :  
<https://viagallica.com/auvergne/roches.htm>