

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

العلمي والبحث وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

— تلمسان — بالكايد جامعة أبي بكر

Université Aboubakar Belkadi – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

Département Génie Civil



MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

En GENIE CIVIL

Spécialité : GEOTECHNIQUE

Par : BENDIAB Nassira

Sujet

La qualité dans les ouvrages de terrassement

Soutenu publiquement, le 09 / 10 / 2025 devant le jury composé de :

HAMZAOUI Fethi

Université de Tlemcen

Président

BENAMAR Abderrahmane

Université de Tlemcen

Examineur

CHERIF BENMOUSSA MY

Université de Tlemcen

Encadreur

DAHO Illiese

Seror de Tlemcen

Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur HAMZAOUI Fethi, président du jury, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant cette soutenance et pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.

Je remercie également Monsieur BENAMAR Abderrahmane, examinateur, pour le temps qu'il a bien voulu consacrer à l'évaluation de ce mémoire et pour ses remarques constructives.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à Monsieur DAHO Illiesse, co-encadreur, pour son aide, son suivi et ses orientations pertinentes qui ont largement contribué à la qualité de ce travail.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur soutien et leur encouragement tout au long de cette étude.



Thanks

I dedicate this work to the memory of my father, may God rest his soul. His love, sacrifices, and values continue to inspire me every day.

I express my deepest gratitude to my mother for her affection, patience, and unwavering support throughout my journey.

My sincere thanks also go to my brothers for their presence, constant encouragement, and invaluable help during difficult times.

Thanks to their love, trust, and prayers, I was able to complete this work. May they find here the expression of my deepest respect and gratitude.

I would like to express my deepest gratitude to Mr. Benmansour Mohamed for mentoring me throughout this internship. His guidance, his wise advice, his patience, and his availability were of great help. I sincerely thank him for his trust and constant support.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la qualité dans les ouvrages de terrassement, depuis la reconnaissance du sol jusqu'à la mise en œuvre et le contrôle des travaux.

Il commence par la pathologie des terrassements généraux, où sont présentés les principaux défauts pouvant affecter les ouvrages, tels que les tassements, fissures et glissements, souvent causés par une mauvaise préparation du sol ou un compactage insuffisant.

Les généralités sur les ouvrages de terrassement rappellent les différentes étapes des travaux (déblais, remblais, nivellement, drainage) et soulignent l'importance du respect des normes et du guide des terrassements routiers (GTR).

La partie sur la reconnaissance et la caractérisation géotechnique des sols met en avant les essais de terrain et de laboratoire permettant de déterminer les propriétés du sol (granulométrie, plasticité, portance) pour adapter les techniques de mise en œuvre.

Sur les techniques de terrassement et leur mise en œuvre décrit les méthodes utilisées pour assurer la stabilité et la durabilité des ouvrages : compactage, stabilisation, gestion des eaux, et contrôle de la densité.

L'organisation de l'assurance qualité détaille les rôles des différents acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises, laboratoires) et l'importance du plan d'assurance qualité (PAQ) pour garantir la conformité des travaux.

Enfin, une étude de cas pratique illustre l'application de ces principes sur un projet réel de terrassement, en montrant comment le suivi et le contrôle de la qualité permettent d'obtenir un résultat fiable et durable.

Mots clés : Terrassements, Déblai, Remblai, Plan d'Assurance Qualité (PAQ), Maître d'ouvrage / Maître d'œuvre, Entreprises et laboratoires

ملخص

ركز هذا العمل على دراسة جودة أعمال الحفر، بدءًا من فحص التربة وصولًا إلى التنفيذ والإشراف على العمل

يبدأ بدراسة أمراض أعمال الحفر بشكل عام، مستعرضًا العيوب الرئيسية التي قد تؤثر على المنشآت، مثل الهبوط والتشققات والانحرافات الأرضية، والتي غالبًا ما تكون ناجمة عن سوء تحضير التربة أو عدم كفاية ضغطها.

تغطي المعلومات العامة عن أعمال الحفر مراحل العمل المختلفة (القطع، الردم، التسوية، الصرف)، مع التركيز على أهمية الالتزام بالمعايير ودليل أعمال (GTR) الحفر على الطرق.

يُسلط قسم فحص التربة الجيوتقني وتوصيفها الضوء على الاختبارات الميدانية والمخبرية لتحديد خصائص التربة (الحبيبات، اللدونة، قدرة التحمل) لتكييف تقنيات التنفيذ.

يصف قسم تقنيات أعمال الحفر وتطبيقها الأساليب المستخدمة لضمان استقرار ومتانة المنشآت: الضغط، التثبيت، إدارة المياه، والتحكم في الكثافة. (QAP) يُفصّل تنظيم ضمان الجودة أدوار مختلف الجهات المعنية (مالك المشروع، مدير المشروع، المقاولون، المختبرات) وأهمية خطة ضمان الجودة لضمان امتثال العمل. وأخيرًا، تُوضّح دراسة حالة عملية تطبيق هذه المبادئ على مشروع أعمال ترابية حقيقي، مُبيّنةً كيف يُساعد الرصد ومراقبة الجودة في تحقيق نتائج موثوقة ومستدامة.

الكلمات المفتاحية: أعمال الحفر، الحفر، الردم، خطة ضمان الجودة، مالك المشروع/مدير المشروع، المقاولون والمختبرات

Abstract

This work focuses on the quality of excavation work, from soil investigation to execution and supervision.

It begins with a general examination of excavation pathologies, reviewing the main defects that may affect structures, such as subsidence, cracks, and landslides, which are often caused by poor soil preparation or insufficient compaction.

General information on excavation works covers the various stages of work (cutting, backfilling, leveling, and drainage), emphasizing the importance of adhering to standards and the Guide to Road Excavation (GTR).

The geotechnical soil Investigation and characterization section highlights field and laboratory tests to determine soil properties (granularity, plasticity, bearing capacity) to adapt execution techniques.

The excavation techniques and application section describe the methods used to ensure the stability and durability of structures: compaction, stabilization, water management, and density control. the quality Assurance organization details the roles of the various stakeholders (project owner, project manager, contractors, laboratories) and the importance of the quality assurance plan (QAP) to ensure work compliance. finally, a case study illustrates the practical application of these principles to a real earthworks project, demonstrating how monitoring and quality control help achieve reliable and sustainable results.

Keywords: Earthworks, Excavation, Backfill, Quality Assurance Plan (QAP), Project Owner/Project Manager, Contractors and Laboratories

Notations et abréviations

c	Cohésion du sol
c'	Cohésion effective du sol
E	Module d'élasticité du sol (module d'Young)
E_{ref}	Module de référence
FS	Coefficient de sécurité
G	Module de cisaillement du sol (module de Coulomb)
K_0	Coefficient des terres au repos
K_x	Perméabilité du sol selon la direction des x
K_y	Perméabilité du sol selon la direction des y
L	Longueur du talus
U	La résultante des pressions interstitielles éventuelles
u	Pression interstitielle
W	Poids des terres
γ	Poids volumique du sol
γ_d	Poids volumique sec du sol
γ_h	Poids volumique humide du sol
γ_{sat}	Poids volumique saturé du sol
φ	Angle de frottement interne du sol
φ'	Angle de frottement interne effectif du sol
ν	Coefficient de Poisson
σ	Contrainte
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Contraintes principales majeure, intermédiaire et mineure
σ'	Contrainte effective
M_{sf}	Coefficient total de sécurité
τ_{ult}	Contrainte de cisaillement ultime du sol
T_{max}	Résistance au cisaillement
τ	Contrainte de cisaillement mobilisée

Liste les photos

Les photos	Pages
Photo 1.2.1.1) Glissements de terrain	5
Photo1.2.1.2) Types de glissements	5
Photo 1.2.2) Le retrait-gonflement des argiles	8
Photo 1.2.3) Les fissurations dans les terrassements	9
Photo1.2.2) Affaissements des terrassements	10
Figure 1.2.3) Le problème de l'érosion	11
Photo 1.2.4) Problèmes liés au gel/dégel des terrassements	12
Photo1.3.1) Rupture par poinçonnement	13
Photo1.4) Les coulées boueuses	16
Photo 2.3.1) nivellement du terrain	22
Figure2.3.2) Amélioration des caractéristiques mécaniques du terrain	24
Photo2.3.4) Optimisation des volumes de déblais/remblais	25
Photo2.5.1) Ouvrages routiers et autoroutiers	28
Photo 2.8.1) Bulldozer (ou Bouteur)	35
Figure 2.8.2) Pelle Hydraulique (ou Pelle Mécanique)	35
Figure 2.8.3) Niveleuse (ou Grader)	36
Photo 2.8.4) Chargeuse (ou Chargeuse Frontale)	37
Photo 2.8.5) Dumper (ou Tombereau)	38
Photo 3.1.1) Identification des couches du sol	40
Photo 3.1.2) Nature des matériaux – Classification GTR (NF P 11–300)	41
Photo 3.4.1.1) Réalisation du sondage SC2	45
Photo3.4.1.1) Caisses à carottes du sondage SC2	45
Photo 3.4.2) pénétromètre dynamique	46
Photo3.4.2) Types d'échantillons (remaniés, intacts)	48
Photo 3.6.1) La Teneur En Eau	49
Photo3.6.2) CASAGRANDE	50
Photo3.6.2) Le diagramme de CASAGRANDE	50
Photo3.6.3) L'analyse granulométrique par sédimentométrie	51
Photo 3.6.5.1) Propriétés mécaniques (œdomètre)	53
Photo 3.6.5.4) Essais de compactage (Proctor)	56
Photo 4.2.1) Terrassement de la grande masse	62
Photo 4.2.2) Terrassement en déblai	63

Photo 4.2.3) Terrassement en remblai	63
Photo 4.1.4) Terrassement mixte	64
Photo 4.4.1) Types et fonctions (chargeurs, niveleuses, compacteurs...)	67
Photo 4.4.4.1) Compacteurs à pneus lisses	71
Photo 4.4.4.2) Rouleaux à pied dameurs	72
Photo 4.4.4.3) Compacteurs vibrants : couches granulaires	72
Photo 4.6.1) Étapes du chantier de terrassement	78
Photo 4.6.2) Étapes Déblai Et Remblai par engins	80
Photo 5.3) Etapes du Plan Assurance Qualité (PAQ)	88
Photo 6.2.1) Situation géographique	99
Photo 6.2.2) Topographie	100
Photo 6.2.4) Vue Géologie du site	101
Photo 6.2.2) Cinq (05) zones de sismicité	101
Photo 6.3.2.2) Essai au pressiomètre ménard barrage	105

Sommaire

Sommaire	Pages
Remerciement	
Résumé	
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Pathologie des terrassements généraux	
1.1) Introduction	4
1.2) Les différents types de dégradations	4
1.2.1) Mouvements de terrain	4
1.2.1.1) Glissements de terrain	5
1.2.1.2) Types des glissements	5
1.2.2) Le retrait-gonflement des argiles	6
1.2.3) Les fissurations dans les terrassements	8
1.2.4) Affaissements des terrassements	9
1.2.5) Le problème de l'érosion	10
1.2.6) Problèmes liés au gel/dégel des terrassements	11
1.3) Problèmes liés aux remblais	13
1.3.1) Rupture par poinçonnement	13
1.3.2) Quelles sont les principales causes de l'instabilité des talus en terrassement ?	14
1.4) Les coulées boueuses	15
1.4.1) Causes principales	16
1.5) pathologie dimensionnement des travaux de terrassement	16
1.6) Le fluage des terrassements	17

1.7) Quelles sont les principales pathologies liées au compactage des terrassements ?	18
1.8) En quoi les actions naturelles comme le séisme provoquent-elles ces pathologies de terrassements	19
1.9) Conclusion	20
Chapitre 2: Généralités sur les ouvrages de terrassement	
2.1) Définition des terrassements	21
2.2) Rôle des terrassements dans les infrastructures	21
2.2.1) Rôle dans les infrastructures routières	21
2.2.2) Rôle dans les infrastructures hydrauliques	22
2.2.3) Rôle économique et logistique	22
2.3) Objectifs des travaux de terrassement	22
2.3.1) Nivellement du terrain	22
2.3.2) Amélioration des caractéristiques mécaniques du terrain	23
2.3.2.1) Principaux objectifs	23
2.3.2.2) Méthodes d'amélioration	23
2.3.3) Gestion des eaux	24
2.3.4) Optimisation des volumes de déblais/remblais	24
2.3.5) Sécurisation du site de construction	25
2.4) Classification selon le type de sol et les techniques utilisées	25
2.4.1) Classification selon le type de sol	26
2.4.1.1) Sols meubles ou pulvérulents	26
2.4.1.2) Sols cohérents	26
2.4.1.3) Sols graveleux et sablo-graveleux	26
2.4.1.4) Roches tendres et roches dures	26
2.4.2) Classification selon les techniques utilisées	27
2.4.2.1). Techniques mécaniques	27
2.4.2.2) Techniques chimiques	27
2.4.2.3). Techniques hydrodynamiques	27
2.4.2.4) Techniques thermiques	27
2.4.2.5). Techniques biologiques et environnementales	27
2.5) Types d'ouvrages nécessitant des travaux de terrassement	27
2.5.1) Ouvrages routiers et autoroutiers	28
2.5.2) Des pathologies ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, digues)	29

2.5.3) Pathologies réseaux d'assainissement liées aux terrassements	30
2.6) Types de terrassements	31
2.6.1) Terrassement en déblai	31
2.6.2) Terrassement en remblai	31
2.6.3) Terrassement grande masse	31
2.6.4) Terrassement en tranchée	31
2.6.5) Terrassement en fouille	32
2.6.6) Terrassement mécanique (selon les engins utilisés)	32
2.6.7) Terrassements spéciaux (renforcement ou amélioration du sol)	32
2.7) Étapes d'exécution des travaux des terrassements	32
2.7.1) Terrassements Routiers	32
2.7.3. 2) Préparation du terrain	34
2.7.3. 3) Choix et traitement des matériaux	34
2.7.3. 4) Mise en œuvre du remblai	34
2.8) Engins de terrassement : caractéristiques	34
2.8.1) Bulldozer (ou Bouteur)	34
2.8.2) Pelle hydraulique (ou Pelle mécanique)	35
2.8.3) Niveleuse (ou Grader)	36
2.8.4) Chargeuse (ou Chargeuse frontale)	37
2.8.5) Dumper (ou Tombereau)	38
2.9) Conclusion	39
Chapitre 3 : Reconnaissance et caractérisées géotechnique des sols	
3.1 Introduction	40
3.1) Objectifs de la reconnaissance géotechnique	40
3.1.1) Identification des couches du sol	40

3.1.2) Nature des matériaux – classification GTR (NF P 11–300)	41
3.2) Cadre normatif et missions géotechniques	42
3.3) Programme d’investigation préliminaire	43
3.4) Techniques de reconnaissance in situ	44
3.4.1) Le sondage carotté	44
3.4.1.1) Description des coupes de sondages	45
3.4.2) Essais au pénétromètre dynamique	46
3.4.3) Pressiomètre ménard	46
3.5) Prélèvement et conservation des échantillons	47
3.6) Essais en laboratoire	49
3.6.1) La Teneur en eau selon la norme (NF P 94 050)	49
3.6.2) Limite d’Atterberg (norme NF P 94–051)	50
3.6.3) L’analyse granulométrique par sédiment métrie	51
3.6.4) Caractéristiques physiques	52
3.6.4.1) masse volumique	52
3.6.4.2) densité	52
3.6.4.3) porosité	52
3.6.5) Propriétés mécaniques (œdomètre, cisaillement, triaxial)	53
3.6.5.1) Propriétés mécaniques (œdomètre)	53
3.6.5.2) Propriétés mécaniques (cisaillement)	53
3.6.5.3) Propriétés mécaniques (triaxial)	55
3.6.5.4) Essais de compactage (Proctor)	55
3.6.5.5) Essais de compactage (CBR)	56
3.7) Classification des sols (GTR, AASHTO, USCS)	57
3.8) Recommandations géotechnique	58
3.9) Conclusion	60

Chapitre 4 : Techniques de terrassement et leur mise en œuvre	
4.1 Introduction	61
4.2 Types de terrassement	61
4.2.1 Terrassement de la grande masse	61
4.2.2 Terrassement en déblai	62
4.2.3) Terrassement en remblai	62
4.2.4) Terrassement mixte	63
4.2.5) Terrassement de surface	64
4.2.6) Fouilles	64
4.3) Classification des matériaux selon le GTR	65
4.4) Matériels et engins de terrassement	66
4.4.1) Types et fonctions (chargeurs, niveleuses, compacteurs...)	66
4.4.2) Choix en fonction du terrain et du rendement attendu	68
4.4.3) Productivité et critères de sélection	69
4.4.4) Engins de compactage	70
4.4.4.1) Compacteurs à pneus lisses : sols granulaires	70
4.4.4.2) Rouleaux à pieds dameurs : argiles plastiques	71
4.4.4.3) Compacteurs vibrants : couches granulaires	73
4.4.4.4) Compacteurs mixtes des terrassements	73
4.5) Compactage : taux et humidité optimale	73
4.5.1) Type de terre avec grains (sables, cailloux)	74
4.5.2) Type de machine ce qu'on prend dépend des deux points là-haut	74
4.5.3) compactage (GTR)	75
4.6) Contrôle qualité et déroulement du chantier	76
4.6.1) Étapes du chantier de terrassement	77
4.6.2) Étapes déblai et remblai par engins	78
4.6.3) Contrôle de compactage avec terrassements	80
4.7) Achèvement des terrassements	81
4.7) Conclusion	82
Chapitre 5 : Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassement	
5.1) Introduction	83
5.1.1) Référentiel de qualité : GTR (Guide des Terrassements Routiers), normes NF P 11-300	83
5.1.2) Intégration de la qualité dans toutes les phases du projet	84
5.2) Rôle du plan assurance qualité (PAQ)	85

5.2.1) Etapes du plan assurance qualité (PAQ)	87
5.3) Organisation du contrôle qualité sur chantier	88
5.3.1) Mise en place du plan d'assurance qualité (PAQ)	90
5.4) Rôles des différents partenaires	91
5.5) Élaboration du plan d'assurance qualité (PAQ)	92
5.6) Schéma directeur de qualité (SDQ)	94
5.7) Déroulement d'un chantier de terrassement	96
5.7.1) Vérification de la bonne application de la démarche qualité	96
5.7.2) Le traitement des anomalies et non-conformités	97
5.7.3) L'adaptation éventuelle du ou des PAQ	98
5.9) Conclusion	98
Chapitre 6 : Étude de cas pratique d'un projet de terrassement	
6.1) Présentation générale du projet	99
6.1.1) Histoire et mise en service	99
6.1.2) Localisation	99
6.2) Topographie	99
6.2.1) Géologie du site	100
6.2.2) Sismicité de la région de Barrage de Ghrib	101
6.3) Reconnaissances in situ	102
6.3.1) Objectifs principaux	102
6.3.2) Principales méthodes de reconnaissance in situ	102
6.3.2.1) Sondages carottés de barrage de Ghrib	102
6.3.2.2) Essais de pénétration (barrage de Ghrib)	104
6.3.2.3) Essais de perméabilité (barrage de Ghrib)	106
6.3.2.4) Observations géotechniques – barrage de Ghrib	106
6.4) Essai de laboratoire – barrage de Ghrib	107
6.4.1) Analyse granulométrique	107

6.4.2) Limites d'Atterberg	108
6.4.3) Essais Proctor normal (NF P 94-093)	108
6.4.4) CBR (California bearing ratio)	108
6.4.5) Essais triaxiaux (CU, CD)	108
6.4.6) Perméabilité (essai Lefranc/constante de charge)	108
6.5) Analyse technico-économique	110
6.5.1) Problèmes techniques rencontrés	110
6.6) Conclusion	112
Conclusion générale	113
Références bibliographiques	



Introduction générale



Introduction générale

Les terrassements sont considérés comme des travaux de base les plus importants dans la construction de tout projet et c'est une étape clé au début d'un projet et c'est elle qui travaille à la préparation du site et à la modification de la surface pour qu'elle soit adaptée au projet que nous voulons accomplir et aux autres opérations associées, et aux autres qui définit les procédures à suivre pour garantir la qualité des travaux. Ce plan d'assurance qualité sera soumis à l'autorité de contrôle pour être approuvé ou modifié, et se décline en un plan de contrôle des travaux qui précise la mise en œuvre au site d'intervention. Le PAQ (plan d'assurance qualité) d'inclura également le plan de contrôle établi par le laboratoire de tests de matériaux

Les champs d'action pour garantir la conformité aux critères qualité, il doit définir les moyens de contrôle nécessaires (taux d'humidité, essai de compactage, essai à la plaque, l'équivalent sable, l'indice de plasticité, limite atte berg, etc.), ainsi que le mode opératoire des interventions. L'utilisation de capteurs de déformation, de taux d'humidité ou autres instrumentations pour le suivi de l'exécution est nécessaire.

Des essais réguliers en cours de travaux permettent d'indiquer les effets des travaux sur le site.

Malgré les contrôles mis en œuvre, les travaux de terrassement peuvent se révéler perturbés par d'éventuels aléas climatiques, tels que l'humidité du sol, la pluviométrie ou le vent.

Terrains d'essai l'entreprise s'assure que la mise en œuvre de l'opération sur le site est conforme au processus prévu. C'est-à-dire que les indicateurs de suivi prévus soient conformes à ce que dicte le plan de contrôle et selon des modalités à respecter.

Si des compensations doivent être instaurées pour remédier à des non-conformités, la recherche de solutions est préconisée plutôt que la recherche de responsabilités. La solution est d'adopter les meilleurs choix techniques, privilégier les travaux de préparation, réduire à l'extrême les zones à remblayer (compacité, portance, déformabilité) et faire l'impasse sur tout rajout de terre.

Quels sont les problèmes les plus courants affectant les travaux de terrassement ?

Des difficultés se rencontrent couramment dans les travaux de terrassement, celles-ci ne manquant pas d'impacter significativement la qualité, la sécurité et la pérennité des ouvrages, à l'instar des situations suivantes, illustratives d'une pluralité de problèmes habituellement rencontrés :

Tel que : instabilité des sols et tassements irréguliers, un remblai peut apparaître homogène, mais des tassements irréguliers peuvent être engendrés par l'hétérogénéité du terrain d'assise ou une compressibilité des sols sous-jacents, se soldant par le plus souvent par des fissures dans la construction, des affaissements localisés ou des déformations de nature inattendue ;

Glissements et éboulements de talus : les écroulements de talus insuffisamment dimensionnés ou mal soutenus, sont particulièrement probables sur des sols argileux, eux-mêmes souvent sensibles à l'eau, de même que les glissements de terrains en pente sur la lisibilité des actions en hygiène/sécurité des bâtiments, l'absence de blindage dans les tranchées ou des talus trop raides augmentant leur éventualité ;

Variabilité et incertitude géotechnique des sols Le même site peut avoir différentes natures de sol, localement plus compressibles ou instables, tout comme la teneur en eau, par nature, peut changer rapidement, impactant mécaniquement le sol, pesant sur la prévision des risques.

Infiltrations d'eau et problèmes d'hydrologie : l'eau parvient à s'infiltrer, à se frayer, dans les fissures ou dans les couches de sol, aboutissant à augmenter la pression hydrostatique et diminuer la liaison des terres, donc propices

Les défauts qui menacent le plus souvent la qualité des ouvrages de terrassement sont surtout d'ordres liés aux matériaux, aux conditions d'exécution des travaux, et à la vérification des performances, et qui peuvent jouer négativement sur la stabilité et la durabilité des ouvrages. Les problèmes ordinairement rencontrés sont les suivants :

Matériaux non appropriés, de mauvaise qualité utilisation des sols impropres, comportant des matières organiques, des éléments non conformes qui risquent de se décomposer ou susceptibles de nuire à la stabilité du remblai.

Des sols sensibles à l'eau mal traités ou non drainés, générant des soulèvements, tassements, glissements.

Compactage insuffisant du sol le compactage exigé (en pourcentage, du type 95-98,5% de la Proctor normal) est consistant : la non-conformité attendue entraîne des tassements imprévus, des affaissements et des défauts de portance des plateformes

Un taux d'humidité imprévisible au moment de la mise en œuvre affecte la valeur de la densité et génère une perte de compacité et de stabilité du sol compacté.

Problèmes de déformabilité et portance un excès de déformabilité des couches de forme s'était mesuré par des essais à la plaque ou au portance mètre, qui viennent fragiliser les ouvrages supérieurs en les fissurant ou en les affaissant.

La non-existence ou la pauvreté des essais de contrôle de la portance et des déformabilités durant et après les travaux pourra n'engendrer que des préjudices.

Chapitre 1 : Pathologie des terrassements généraux

Chapitre 2 : Généralités sur les ouvrages de terrassement

Chapitre 3 : Reconnaissance et caractérisation géotechnique des sols

Chapitre 4 : Techniques de terrassement et leur mise en œuvre

Chapitre 5 : Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassement

Chapitre 6 : Étude de cas pratique d'un projet de terrassement



Chapitre 1 : Pathologie des terrassements généraux



1.1) Introduction

La pathologie des terrassements généraux des ouvrages géotechniques, travaux de terrassement, désordres ou défaillances qui peuvent affecter leur stabilité et durabilité, montre que ces pathologies proviennent souvent d'un ensemble de causes souterraines (nature et états des sols) et environnantes (conditions hydrauliques, modalités d'exécution des travaux).

Éléments clés à la pathologie des terrassements : le comportement du sol, qui est toujours compliqué, difficile à appréhender, variable selon sa composition, sa teneur en eau, son état mécanique difficile à cerner en raison de la variabilité des principes d'exploration et de leur imprécision forcément ponctuelle, qui découlent du choix d'adopter des coefficients de sécurité élevés.

Les désordres géotechniques récurrents, au premier rang desquels figurent les tassements différentiels, glissements, affouillements, effondrements de murs de soutènement (ou de talus) et/ou déformations ou fissures (de structures prenant part au terrassement).

Les causes possibles peuvent être nombreuses : erreurs d'exécution, défauts du projet, instabilité des sols (naturels et de construction), sols indésirables (sols expansifs, effondra blés et liquéfiables) ou variations hydriques ou remblaiements sauvages.

Leurs conséquences peuvent être graves, provoquant notamment un simple handicap, des déformations ou fissures

I .2) Les différents types de dégradations

Les différents types de dégradations des terrassements peuvent être classés selon leur nature et leur origine, et se manifestent par divers désordres affectant la stabilité, la portance et la durabilité des sols et ouvrages associés

I .2.1) Mouvements de terrain

Les mouvements de terrain dans le cadre des travaux de terrassement produisent sur les sols ou sous-sols des déplacements plus ou moins rapides et amples qui peuvent remettre en cause la stabilité et la sécurité des ouvrages. Ils apparaissent suite à des phénomènes naturels ou anthropiques, sous différentes formes, à la suite de sollicitations naturelles (pluies intenses, fonte des neiges, séismes) ou anthropiques (terrains, déboisement, vibrations, exploitation aquifères)

1.2.1.1) Glissements de terrain

. Le glissement de terrain est un mouvement de masse de roches, débris, terres, boues, qui dévale sous l'effet de la pesanteur la pente d'un relief. Il s'installe là où les forces qui tirent la pente vers le bas viennent à dépasser la résistance des matériaux qui la constituent. [1]

– Causes principales des glissements de terrain

–Saturation en eau du sol : les précipitations importantes, la fonte des neiges ou des aquifères, les infiltrations d'eau dans le sol, viennent augmenter la pression interstitielle, contribuant à diminuer la cohésion et le frottement interne, favorisant un glissement.

–La nature et la structure du sol : la présence d'argiles sensibles à l'eau, de sols hétérogènes, de couches de sol plus faible constitue des faiblesses favorisant la rupture.

–Modifications morphologiques : l'augmentation des charges en amont (construction, remblais), une diminution des appuis en pied de pente (érosion, terrassements) provoquent la déstabilisation de la pente.

–Activités anthropiques : déforestations, construction, excavations, drainage défectueux, mais encore vibrations (machines, explosions) peuvent être à l'origine ou contribuer à l'aggravation d'un glissement [1]



Photo 1.2.1.1) glissements de terrain

1.2.1.2) Types des glissements

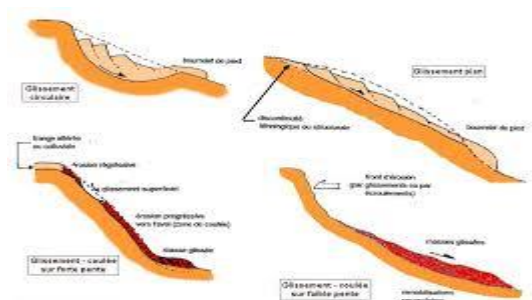


Photo 1.2.1.2) types des glissements [1]

-1.2.1.2) Tableau type des glissements

Type des glissements	Description principale	Caractéristiques clés
Glissement rotationnel (circulaire)	Mouvement le long d'une surface de rupture en forme d'arc de cercle la masse de sol tourne	Surface de rupture courbe, souvent dans des sols cohésifs. Glissement lent ou rapide, fréquent dans les argiles
Glissement translation (plan)	Mouvement le long d'une surface plane ou faiblement courbée, souvent une couche faible	Surface de rupture plane, déplacement en bloc. Se produit souvent dans des sols ou roches stratifiés.
Glissement complexe	Combinaison de glissements rotationnels et translation glissements affectant plusieurs couches	Mécanisme mixte, souvent dans des terrains hétérogènes ou structurés.
Chutes	Chute soudaine de blocs rocheux ou de matériaux sur une pente abrupte	Mouvement rapide, sans surface de rupture définie, souvent dans des falaises rocheuses.
Basculements	Rotation vers l'avant d'un bloc autour d'un pivot, souvent à la base du bloc	Rupture en partie inférieure, bloc basculant vers l'avant.
Coulées (coulées de débris)	Mouvement fluide ou semi-fluide de matériaux meubles saturés d'eau, descendant rapidement une pente	Vitesse élevée, forte capacité destructrice, souvent sans surface de rupture nette.
Étalements	Mouvement latéral sur des pentes faibles, souvent lié à la liquéfaction de sols saturés	Déplacement horizontal important, souvent dans des sols meubles saturés.

1.2.2) Le retrait-gonflement des argiles

Le retrait-gonflement est un changement de volume du sol qui survient dans le sol argileux au gré de ses besoins en eau.

Au moment de la pluie → le sol absorbe de l'eau → augmentation du volume.

Au moment de la sécheresse → la terre se dessèche → elle se rétrécit et se fissure.

-Mécanisme

Ces argiles qui ont des minéraux qui gonflent comme (ex ; montmorillonite) ont une structure en couches qu'elles peuvent remplir d'une grande quantité d'eau.

Quand on hydrate → l'espace entre les couches augmente → la matière se dilate.

Quand on sèche → l'eau est perdue → il y a contraction.

Ces changements de situation successifs font que les mouvements diffèrent dans les terrassements.

-Facteurs aggravants

Composition minéralogique des argiles (smaltite très gonflante vs kaolinite peu sensible).

Les réglages climatiques extrêmes (sécheresse – pluie).

Mauvais drainage du sol.

La faible profondeur des ouvrages (plateformes routières, remblais superficiels).

- Manifestations dans les terrassements

Au-dessus du sol (à la suite de dessiccation) des fissures longitudinales ou polygonales.

En période humide, des soulèvements de zones compactées.

Tassements différentiels entre zones argileuses gonflantes et zones stables.

Les ouvrages associés aux dégradations : déformation des chaussées, fissures des ouvrages en terre, instabilités des remblais routiers et ferroviaires.

- Conséquences

Les remblais et talus ne sont plus stables.

Les plateformes routières perdent leur capacité portante.

Il y a création de voies d'infiltration favorisant l'érosion interne.

Les dégradations qui nécessitent un entretien coûteux. [2]

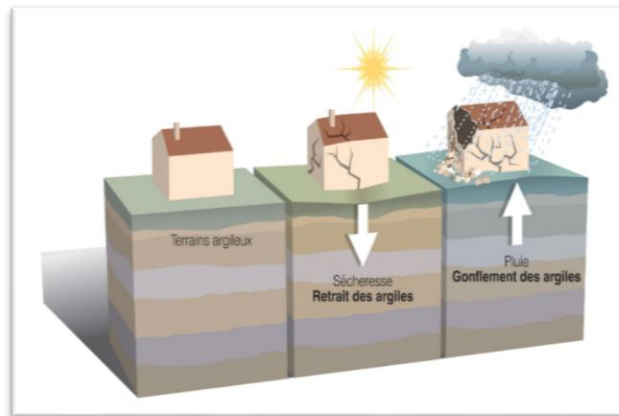


Photo 1.2.2) Le retrait-gonflement des argiles [2]

1.2.3) Les fissurations dans les terrassements

Les fissurations sont des lignes qui s'élargissent et ainsi deviennent visibles à la surface ou à l'intérieur d'un remblai ou d'un talus. Ces dernières représentent souvent un signe précurseur d'un phénomène anormal plus important (instabilité, infiltration, érosion interne).

– Types des fissurations

Fissures longitudinales (parallèles à l'axe de l'ouvrage) : la plupart du temps par des tassements différentiels ou par le retrait des matériaux argileux proviennent ces dernières.

Fissures transversales : perpendiculaires à l'ouvrage, liées à des mouvements de masse (glissement).

Fissures en couronne : on peut les voir à la cime d'un glissement de talus.

Fissures de retrait : accompagnant la déshydratation des argiles durant une période sèche.

Causes principales

Tassements différentiels entre zones de fondation hétérogènes.

Retrait-gonflement des argiles : cycle sécheresse/humidification.

Mauvais compactage : les parties mal compactées se tassent plus.

Surpentes ou instabilités de talus : fissures annonciatrices d'un glissement.

Vibrations ou séismes : possibilité de découverte de fissures de traction.

Infiltrations d'eau : les matériaux se déstructurent.

-Conséquences

L'eau peut passer dans des fissures créées, ces dernières étant préférentielles par rapport à la surface du sol → infiltration → érosion interne (Pippin).

Elargissement des fissures et appauvrissement progressif du remblai de stabilité.

Cela est possible qu'à cause des ruptures des talus ou digues non traitées.



Photo 1.2.3) Les fissurations dans les terrassements [3]

1.2.4) Affaissements des terrassements

De l'affaissement des terrassements reposent en majeure partie sur différentes causes relevant principalement du sol, du traitement du sol, de l'eau et du climat. Principales causes recensées

-Sol argileux peu sensible au changement d'hydrométrie

L'argile gonfle à l'eau et se ratatine quand elle se dessèche, entraînant donc un phénomène de variation de volume.

Ces alternances d'affaissement-gonflement provoquent des modifications de la stabilité des zones sous terrassement, pouvant engendrer des conditions de fondation pouvant générer des affaissements de terrassements.

- Sol hétérogène ou remblai de forme incomplète

Un sol composé de couches de densités différentes va réagir de façon hétérogène sur les charges et de manière différente au changement climatique.

Un remblai plus ou moins bien compacté va se tasser au moins partiellement entraînant une forme d'affaissement globale irrégulière de la dalle et du terrassement sous-sol.

- Drainage insuffisant

L'eau accumulée dans le sol à la suite d'un drainage mal conçu ou non-efficace et du ruissellement de l'eau à la source de pluie, ainsi qu'une fuite d'eau dans le sol ou une montée des niveaux d'eau

Contribue à une détérioration de la forme et du comportement de fondations et du support voire de la détérioration de la portance du sol sous l'élément fondé pouvant être génératrice en partie ou au moins favoriser les structures agréées ayant été initiées.

-Malfaçons de la construction

Fondations peu profondes, souterrains insuffisamment dimensionnés, ferrailage incohérent et non exploité, utilisation de béton non approprié, mal dimensionné et mal utilisé compromet les niveaux et la résistance du sol. [3]



Photo 1.2.4) Affaissements des terrassements [4]

1.2.5) Le problème de l'érosion

Le problème de l'érosion des terrassements constitue un phénomène prépondérant dans la commune mesure où il est dommageable, à la fois, à la durabilité même, à la fameuse stabilité, à la sécurité des ouvrages de terrassement, c'est un phénomène qui peut être appréhendé, et qui se révèle bien évident de cette manière ; l'érosion se développe par le biais du détachement, du transport et du déplacement des particules de sol qui se sont trouvées, comprises ou envisagées sous l'effet de l'eau (ruissellement, infiltration) et du vent, et est à même de provoquer de sérieux dégâts.

-Les causes principales de l'érosion des terrassements sont les suivantes :

Une gestion inadéquate de l'eau

L'eau est l'élément primordial : elle infiltre, ruisselle dans le terrain, saturant le sol et favorisant l'érosion.

Les drains hautement encrassés, saturés ou mal coordonnés aident à l'instabilité des talus et à leur érosion.

Le manque d'éléments de drainage ou leur insuffisance pendant les phases d'exécution provisoire rendent très vulnérables les terrassements.

-La nature et les caractéristiques des sols

Les sols sont fins, disons peu cohésifs, argileux ou sablo-limoneux, sont plus exposés à l'érosion et au ravinement.

Le compactage inopportun ou insuffisant ne permet pas d'atteindre la résistance mécanique du sol requise vis à vis de son lessivage.

Le manque de matière organique et la dégradation de la structure du sol favorise leur mise à l'érosion.

-Topographie et pente

Une forte pente favorise une augmentation de la vitesse de ruissellement et de la capacité d'érosion.

Les talus raides, peu protégés, sont le plus souvent les plus exposés à l'érosion qui l'emporte. [3]



Photo 1.2.5) Le problème de l'érosion [5]

1.2.6) Problèmes liés au gel/dégel des terrassements

Les problèmes liés au gel/dégel des terrassements sont principalement causés par l'infiltration d'eau dans le sol ou les matériaux de terrassement, puis par le gel de cette eau. L'eau gelée occupe un volume environ 10 % supérieur à celui de l'eau à l'état liquide, ce qui génère une pression interne très élevée susceptible de provoquer des fissures, des déformations et des dommages aux matériaux de terrassement.

-Effets mécaniques du gel/dégel sur les terrassements

L'eau qui s'est infiltrée dans le sol ou les couches de terrassement gèle ; son volume augmente alors, ce qui exerce une pression sur la structure. Cette pression peut provoquer un soulèvement

De la structure, ou compaction différentielle, et également provoquer des fissures et la rupture des matériaux.

Le dégel provoque la fonte de la glace, réduisant à nouveau son volume et provoquant des mouvements de tassement très irréguliers qui déstabilisent la structure.

Les cycles répétitifs de gel et de dégel fragilisent progressivement les matériaux, ce qui peut entraîner une forte augmentation de la dégradation, une diminution de la capacité portante du sol et même une prolongation de la durée de vie des terrassements.

-Facteurs aggravants

Un excès d'eau dans les sols ou des matériaux mal drainés aggravent les problèmes.

Les sols argileux, en revanche, sont très sensibles au gel et au dégel en raison de leur capacité de rétention d'eau et de leur sensibilité au compactage.

Un compactage improbable et une mauvaise préparation du sol peuvent augmenter le risque de dommages.

De plus, une mauvaise utilisation des matériaux ou des méthodes d'installation peut également aggraver les effets du gel/dégel.

-Conséquences possibles

La masse de sol ou les déchets peuvent se fissurer, voire exploser.

Les zones de terrassement peuvent être soulevées par la formation de glace (terre thermosensible, comme la terre saturée d'eau) en dessous.

Les désordres se produisent au niveau des infrastructures telles que les routes, les murs de soutènement et les fondations.

La capacité portante du sol diminue et la stabilité des ouvrages est compromise. [4]

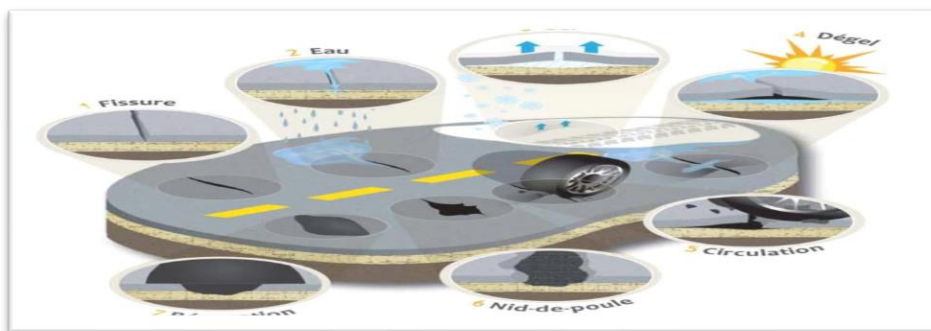


Photo 1.2.4) Problèmes liés au gel/dégel des terrassements [6]

1.3) Problèmes liés aux remblais

Le problème des remblais des terrassements présente de nombreuses conséquences résultant des interactions entre la nature du sol support, les caractéristiques des matériaux de remblai, la géométrie du remblai et la gestion de l'eau. Voici les principaux des sources :

–Stabilité des remblais

La stabilité des talus formés par les remblais est essentielle : des pentes mal dimensionnées et trop raides imposent un risque de glissements rotationnels (rupture circulaire) et de ruptures par poinçonnement du sol compressible.

Dans les sols mous ou compressibles (argiles molles, tourbes), le remblai se retrouve enfoncé en repoussant latéralement le sol, formant un bourrelet de terre, ce qui peut conduire à la rupture globale du remblai

L'eau, en raison d'infiltrations et de la nappe d'eau sous-jacente, accentue ces risques de rupture en diminuant la résistance du sol.

–Tassements et déformations

Le remblai sur un sol compressible est souvent soumis à des tassements différenciés importants : tassements non uniformes aux conséquences parfois désastreuses, pouvant entraîner fissures ou déformations des infrastructures supportées, désordres dans les constructions voisines (celles notamment non fondées sur le remblai).

La géométrie trapézoïdale du remblai et la variabilité dans l'épaisseur du sol compressible en sous-œuvre, aggravent encore les tassements. [5]

1.3.1) Rupture par poinçonnement

Le poinçonnement du sol compressible sous les effets de charges provenant du remblai est réalisé par leur affaissement général critique dans le remblai, ainsi que par son enfoncement dans le sol de fondation. La totalité du remblai se déplace vers le bas, tout en repoussant les terres en travers de part et d'autre en raison de la réaction résultant du soulèvement du sol.



Photo 1.3.1 Rupture par poinçonnement [7]

La rupture par poinçonnement du remblai sur un sol compressible constitue un cas d'instabilité liquidienne, afin de se concentrer ensuite sur la construction de remblais sur sol mou, à savoir : tourbe, vase molle, limon argileux, etc. les points essentiels, comprenant par définition le remblai, sont :

– La description du phénomène

Le remblai exerce une charge importante sur un sol de fondation de faible portance, cela ne peut suffire pour supporter efficacement la charge. Le sol compressible cède localement sous l'effet de la charge, provoquant un repliement du remblai dans le sol support, et la descente globale des éléments en terrain meuble, ce qui déplace l'opération du sol compressible dans le remblai lui-même en se poinçonnant à son tour dans la couche compressible molle en creusant largement en sa profondeur.

En réponse à cette déformation des plissements du terrain, le sol naturel adjacent au remblai s'élèverait en bourrelet loin du remblai, mais autour de celui-ci, qui est surélevé, car la hauteur du bourrelet fut pour cette instance de la moitié du mouvement de descente, s'élevant en bourrelet de part et d'autre du remblai.

–Le mécanisme de rupture

Cette rupture fut d'un schéma de même type que le mécanisme de rupture observé sous une fondation superficielle en entraînant une rupture par poinçonnement, réalisable pour laquelle elle se glisse sous et pousse latéralement les bords remblayant du sol mou, avec risque de déstabilisation globale, au sein de cette couche potentiellement très meuble, très profonde du sol mou, en raison du faible de la résistance des efforts de cisaillement [5]

1.3.2) Quelles sont les principales causes de l'instabilité des talus en terrassement ?

Les causes de l'instabilité des talus en terrassement sont variées et interviennent pour des causes géométriques, mécaniques, hydrologiques climatiques et anthropiques.

–Facteurs géométriques

Inclinaison du talus : plus la pente est raide, plus le risque d'instabilité est important. Une inclinaison supérieure à 45° est souvent critique pour de nombreux types de sol

Inclinaison supérieure à 45° est souvent critique pour de nombreux types de sol

– Tableau coefficients sécurité

F s	État de l'ouvrage
<1	Danger
1-1.25	Sécurité contestable
1.25-1.4	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants sécurité contestable 1.25-1.4 pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
>1.4	Satisfaisante pour les barrages

Hauteur et longueur du remblai : les talus élevés mais aussi longs accumulent des contraintes plus importantes et retiennent plus d'eau en cas de pluie, ce qui favorise la rupture.

– Propriétés mécaniques du sol et des matériaux

Cohésion et angle de frottement interne comme elle influence la résistance au cisaillement des sols, et notamment au dévers de la pente. Un sol à faible cohésion ou à faible angle de frottement réduira d'autant la résistance.

Hétérogénéité des sols alternance de couches dures et tendres, ou présence de matériaux argileux sensibles au phénomène de retrait-gonflement favorisant les ruptures.

Structure géologique discontinuités, faille, joints stratigraphiques constitueront des plans faibles propices à la rupture.

– Conditions hydrogéologiques

Eau de nappe présence et fluctuation de la nappe phréatique proche augmentant les pressions interstitielles, et donc la perte de cohésion entre les particules, engendrant des glissements.

Sol saturé infiltration de l'eau de pluie entraînant l'excès de contrainte portant à la rupture.

1.4) Les coulées boueuses

Une coulée de boue est un glissement rapide d'une masse de matériaux saturés d'eau. Comme pour les avalanches, le sol solide est partiellement ou complètement fluidifié par l'eau. Ce phénomène est généralement observé sur des versants d'un certain seuil de glissement, et sa vitesse

Peut atteindre jusqu'à 80 km/h. en termes de potentiel de dévastation, le ruissellement correspond en effet à un certain type d'avalanche.

1.4.1) Causes principales

-Précipitations intenses et prolongées : ça a été un certain nombre de millions de précipitations continues où l'intensité des pluies provoque cette saturation du sol, la désagrégation des éléments solides principaux et la mobilisation de l'écoulement rapide.

-Saturation des sols et nappe phréatique haute : un aquifère trop plein, ou une nappe phréatique trop surchargée entraînent une perte de la cohésion des sols, déclenchant la coulée de boue.

-Topographie : la dénivellation (incidence de pentes supérieures à 10 % à 25 % ou plus) favorise la mise au mouvement des sols saturés.

-Structure géologique et hydrogéologie : les principaux types de sols (argileux, limoneux, grecs), les géométries anciennes ou récentes de glissements ou de relâchements, ainsi que la tectonique du substratum local.

Activités humaines : urbanisation, encombrement des sols, de travaux ou de carrières, déforestation sont autant de facteurs d'un potentiel d'accident à raison de l'accumulation d'une coulée de boue. Ces deux phénomènes sont également le plus souvent méconnus [1]



Photo 1.4) Les coulées boueuses [8]

1.5) pathologie dimensionnement des travaux de terrassement

Un mauvais dimensionnement des travaux de terrassements entraîne usuellement des pathologies géotechniques graves (tassements différentiels, fissurations, glissements, éboulements) qui résultent d'évaluations trop faibles ou pas suffisamment appropriées des contraintes du sol (ou de ses caractéristiques) plus des charges à prendre en compte.

-Les causes principales :

Sous-estimation des efforts et charges en présence.

Un mauvais diagnostic de l'évaluation des sollicitations engendre des semelles ou fondations inappropriées qui sont à l'origine de tassements différents et fissurations de l'ouvrage.

Ignorance ou insuffisance d'étude géotechnique.

La nature hétérogène des sols rend compte de tassements très dissemblables d'un point à l'autre, cela est plus sensible en terrains argileux ou compressibles. L'absence d'étude conduit à mal concevoir les remblais et talus et les rend donc instables.

Dimensionnement inapproprié des semelles.

Deux semelles de même taille peuvent se comporter très différemment selon leur profondeur d'enfouissement et, mal appréhendées, elles créent au niveau des constructions mal chaînées, des désordres fréquents.

Erreur dans l'évaluation des effets de l'eau.

Le non- suivi du niveau des nappes phréatiques et infiltrations crée des sous-pressions, affouillements, mais aussi une moins bonne portance des sols exposant les ouvrages à des tassements anarchiques. [3]

1.6) Le fluage des terrassements

Le fluage des terrassements est une pathologie géotechnique qui correspond à des déformations lentes et progressives dans le temps des sols, sous l'effet d'une charge constante proche du domaine plastique. Ce phénomène est de plus en plus observé dans les sols fins cohésifs, notamment les argiles saturées.

-Mécanisme du fluage

Le fluage est lié aux propriétés visqueuses du squelette inter granulaire des sols fins, constitué de particules minérales entourées d'eau adsorbée. Sous une contrainte constante, il y a continuité de déformation du sol (consolidation secondaire) après l'affaissement ou la déformation étant encore plus lente au cours des temps de consolidation. Cette déformation est donc lente avec un certain cumul, capable de se prolonger encore très longtemps après le passage de la phase initiale de consolidation

- Causes principales

La première cause, est la présence dans certaines régions de sols argileux ou fins saturés sensibles au fluage. Ainsi, ce phénomène est renforcé sous des charges permanentes élevées appliquées sur les sols, notamment dans les remblais importants, le manque de drainage adéquat qui peut entraîner une persistance voire renforcement des pressions interstitielles, ou encore un compactage insuffisant de la terre qui doit être prise en compte dans la construction de ces ouvrages, sans oublier certains cas de variabilité de la compacité des remblais.

-Conséquences du fluage dans les terrassements

Le fluage dans les terrassements se manifeste par une déformation lente et continue des sols sous contrainte constante. Dans les sols très déformables ou mal stabilisés, il peut entraîner :

Affaissements progressifs des remblais ou des plateformes,

Déformations différentielles causant des fissures dans les ouvrages (chaussées, dallages, murs)

Perte de portance des remblais, rendant le sol moins stable,

Instabilité des talus à long terme, dommages aux structures voisines ou supportées. [6]

1.7) Quelles sont les principales pathologies liées au compactage des terrassements ?

Le compactage des terrassements est fréquemment annoncé en raison d'erreurs de conception, d'exécution et de confinements environnementaux. Parmi celles-ci :

- La non prise en compte des conditions optimales de compactage, en particulier de l'humidité du matériau (trop humide ou trop sec), sans laquelle il n'est pas possible d'atteindre la densité requise et de permettre une bonne résistance aux tassements ultérieurs

- Le choix inapproprié des matériaux de remblai, que sont les sols organiques, argileux sensibles, ou à comportement dégradables, difficiles à resserrer, et qui plus est soumis aux retrait-gonflement ou aux ruptures de cohésion

- Le compactage hétérogène ou insuffisant notamment lorsque les épaisseurs des couches à compacter sont trop importantes ou que les méthodes et matériels employés sont inappropriés, d'où des zones de faiblesse susceptible d'en être responsable d'un tassement différentiel

- L'absence ou l'insuffisance de contrôle qualité en chantier empêchant de vérifier que les objectifs de densité et d'humidité sont atteints, et d'être alerté à temps d'un éventuel défaut de compactage

- Des conditions hydriques défavorables telles que des infiltrations, une nappe de l'eau de surface élevée ou les précipitations, entraînant la saturation temporaire ou permanente du remblai et, ainsi quant à sa résistance portante, sa perte
- Une surcharge excédentaire ou du trafic lourd avant son trempage, lequel peut n'avoir le temps de se rétablir mieux, d'où un tassement sous charge potentiellement pas totalement ou pas du tout récupéré au revêtement. [3]

1.8) En quoi les actions naturelles comme le séisme provoquent-elles ces pathologies de terrassements

Les évènements naturels tels que le séisme induisent des pathologies dans les terrassements par plusieurs mécanismes issus des secousses, vibrations, modifications de comportement des sols...

On peut déduire fondamentalement que le séisme agit dans les domaines suivants :

-Vibrations et secousses des sols

Les mouvements rapides et répétés dus aux ondes sismiques sont susceptibles de désorganiser la structure interne des sols, en particulier ceux remblayés ou saturés, en réduisant leurs cohérences et portances, engendrant des tassements immédiats ou différés, des déformations, voire des effondrements localisés dans les terrassements.

-Liquéfaction des sols saturés

Les secousses peuvent provoquer, dans certains sols saturés d'eau, des dégradations brutales des résistances au cisaillement ; ici, l'eau de saturation est mal drainée, on a un sol sableux ou limoneux qui infirme la compétence portante du sol, se comportant alors comme un fluide (liquéfaction aux effets tragiques), avec les conséquences de fréquents tassements, affaissements, glissements, ruptures des remblais, fondations ou ouvrages de terre.

-Instabilités et glissements de talus

Ces phénomènes dynamiques peuvent aussi provoquer une rupture des pentes ou talus compacts mais fragiles, en particulier lorsque ces drains sont insuffisants à drainer les dispositions hydriques, Car trop sensibles. Les glissements, éboulements ou déstabilisations massives des remblais proviennent du constat.

-Modification rapide des pressions interstitielles et saturation

Les vibrations opèrent vraisemblablement trop brutalement les pressions interstitielles, absence ou insuffisance de drainage des eaux saturantes...

1.9) Conclusion

La pathologie des terrassements généraux souligne que les terrassements constituent pourtant une étape fondamentale mais compliquée, générant des risques pour la stabilité des ouvrages. Il s'agit de risques liés à la modification d'un site non stabilisé, dont le sol hétérogène, variable et imprévisible, peut être mal connu du point de vue géologique sous-jacent, mais également sous le regard des explorations géotechniques imparfaites, de sorte que les travaux en co-construction se trouvent exposés à des désordres tels que notamment tassements différenciés, à glissements de terrain ou encore à effondrements de talus et murs de soutènement

Ces pathologies sont généralement imputables à une méconnaissance du comportement des sols, du dimensionnement insuffisant, d'un choix de matériaux inadaptés ou d'une gestion de l'eau peu rigoureuse. leur occurrence se trouve également renforcée par les phénomènes naturels, notamment hydriques, séisme, qui contribuent à accroître la vulnérabilité de la construction, donc à compromettre son intégrité. il s'agit, pour le maître d'œuvre, dans le cadre des travaux, étude d'engager la maîtrise des risques ; à savoir une étude géotechnique rigoureuse, des états de contraintes contrôlés, des coefficients de sécurité considérés comme suffisants, un dimensionnement soigné, un compactage adapté, un drainage de qualité, un souci de suivi de la réalisation des travaux ; le respect de ces grands principes permettant de réduire efficacement les sinistres liés aux terrassements

Les causes des pathologies dans les terrassements généraux dépendraient donc essentiellement des conditions géotechniques, constructives, environnementales et humaines. d'après les études et les documents techniques

Chapitre 2 : Généralités sur les ouvrages de terrassement

2.1 Définition des terrassements

Les travaux de terrassement sont présentés dans un ensemble d'opérations qui déterminent le coût de réparation du terrain naturel du site en même temps que le projet de construction ou d'aménagement et ces travaux contiennent principalement du transport, de l'excavation, du remblayage ou niveler un bloc de terre ou de roches pour établir un endroit stable qui répond aux exigences du projet

En d'autres termes, les travaux de terrassement représentent un élément préparatoire aux bases de tout type de travaux de génie civil divers, tels que routes, barrages, remblais ou autre infrastructure. Cette étape vise à améliorer la stabilité de la terre et à augmenter la capacité portante de l'installation qui sera construite à l'avenir et à réduire les risques pouvant survenir avec le mouvement de la terre

Selon les normes techniques et les pratiques professionnelles, le terrassement peut être divisé en deux étapes principales

Le déblai : consiste à enlever des matériaux supplémentaires, des supports de (sol ou roches) de la zone où nous voulons travailler

Le remblai : consiste à ajouter des matériaux appropriés à la plaine ou, dans un autre sens, à remodeler le terrain en fonction des besoins du projet

Les travaux de terrassement doivent être réalisés en préservant la nature du sol, du terrain et des restrictions environnantes, en augmentant les normes de qualité et de sécurité, et en respectant ces travaux avec une planification minutieuse, l'utilisation d'équipements appropriés et une mise en œuvre hermétique pour éviter tout problème pouvant survenir

2.2) Rôle des terrassements dans les infrastructures

Les travaux des terrassements représentent la première étape la plus importante dans la mise en place d'un certain nombre de projet d'infrastructure, et leur importance va de la formation du terrain à l'achèvement de la détermination de la durabilité de l'installation, de sa stabilité et de la pleine exécution de sa fonction. Il peut analyser son rôle en fonction de divers éléments d'infrastructure tels que les routes et les barrages, hydrauliques [5]

2.2.1) Rôle dans les infrastructures routières

La couche de base détermine que les terrassements sont utilisés pour adapter le sol à la section de longueur de la route en termes d'établissement déblais/remblais.

La base de la construction : forme la première route de support, dont la capacité portante doit être parallèle [5]

2.2.2) Rôle dans les infrastructures hydrauliques

Construction de barrages en terre et de remblais les terrassements permettent la mise en place de formes géométriques précises et parfois ils sont comprimés pour résister à la pression de l'hydrostatique.

Non -fuite d'eau et sa stabilité : test et traitement des matériaux en argile pour me protéger et l'empêcher de fuir de l'eau [5]

2.2.3) Rôle économique et logistique

Améliorer l'égalisation du volume d'application entre déblai ou remblai. Afin de minimiser le processus de transfert

Conception de la phase de construction, détermination de l'emplacement et de l'heure des travaux de terrassement pour améliorer la continuité du site, réutilisation des matériaux du site. Déterminez les matériaux d'économie [5]

2.3) Objectifs des travaux de terrassement :

L'objectif principal du terrassement est de préparer le terrain pour les travaux de construction en établissant une base stable qui répond aux besoins du projet que nous voulons accomplir. Cette étape est essentielle pour maintenir la durabilité, la sécurité et la qualité des infrastructures. Le terrassement le plus important

2.3.1) Nivellement du terrain :

Les terrassements sont adaptés au terrain naturel du sol pour établir une plate-forme horizontale et inclinée, selon les exigences du projet, telle que (les routes, ouvrages hydrauliques)



Photo 2.3.1) nivellement du terrain [9]

2.3.2) Amélioration des caractéristiques mécaniques du terrain :

Rendre le sol plus dur change ce que le sol peut faire, pour porter plus (par exemple, pour des maisons, des routes, ou des barrages). On peut faire ça par des voies mécaniques, physiques, chimiques, ou avec la vie du sol, en fonction de ce que le sol

2.3.2.1) Principaux objectifs

- Améliorer la capacité portante (CBR (California Baring Ratio), module EV2)
- Minimiser la compressibilité et les tassements.
- Empêcher le retrait-gonflement (argiles).
- Rendre sécuritaire la stabilité des talus.
- Faire baisser la perméabilité en vue de protéger contre l'érosion interne.

2.3.2.2) Méthodes d'amélioration

A) Méthodes mécaniques

Compactage : Par rouleaux lisses, pieds dameurs, compacteurs vibrants, compacteurs mixtes.

But : densifier les sols pour diminuer leur compressibilité et augmenter leur portance.

Préchargement & consolidation

Exercice d'une surcharge temporaire → dissipation de l'eau interstitielle → tassements anticipés.

Technique au service des sols mous (argiles saturées).

Vibroflotation / vibrocompactage

L'introduction d'un vibreur profond dans des sols sableux saturés → densification.

B) Méthodes physico-chimiques

Traitement à la chaux

Diminue la plasticité des argiles, donne la portance et rend le retrait-gonflement limité.

Traitement au ciment

Sol → matériau transformé par le ciment (sol-ciment), très résistant, convenable aux plateformes routières.

Stabilisation aux moyens de liaisons hydrauliques (cendres volantes, laitier de haut fourneau, etc.).

C) Méthodes par inclusions et renforcement

Colonnes ballastées (stone columns)

Implantation de colonnes de matériaux granulaires pour le rétablissement de la portance et le drainage. Injections

Grutage ou injection de coulis de ciment/silicate → élévation de la résistance et étanchéité.

Clouage des sols / ancrages

Pour la stabilisation des talus et des remblais.

Géo synthétiques (géotextiles, géogrilles, géomembranes)

Renforcement des remblais, contrôle de l'érosion, séparation et drainage. [3]



Photo 2.3.2) Amélioration des caractéristiques mécaniques du terrain [10]

2.3.3) Gestion des eaux

Une bonne conception des travaux de terrassement aide au drainage des eaux de surface et ou souterraines et ne dépouille pas, ne corrode pas et ne statique pas l'eau. Ce qui peut affecter la stabilité de l'origine

2.3.4) Optimisation des volumes de déblais/remblais

On veut équilibrer ce que l'on prend de terre (déblais) et ce que l'on remet (remblais) quand on creuse. Le but ? utiliser moins de camions et dépenser moins, tout en faisant un bon travail sur le terrain.

On doit suivre ces étapes pour y arriver :

Mesurer bien les tas de terre : on se sert des formes géométriques pour voir combien on doit bouger. Si on mesure bien, on ne prend ni trop, ni trop peu.

Avoir un bon équilibre : on essaie de faire en sorte que ce qu'on enlève est proche de ce qu'on rajoute. Ça veut dire moins de terre à aller chercher ou à jeter. On peut devoir ajuster comment le terrain penche où donner ou prendre un peu de terre.

Penser au changement de taille de la terre : la terre peut gonfler quand on la creuse et se réduire quand on la tasse. Cela change combien on en a besoin. Par exemple, si on creuse, la terre peut prendre 30% plus de place.

Se servir de logiciels en 3D : on peut simuler et changer des plans avec l'ordinateur pour éviter des coûts supplémentaires de camion ou de la terre en trop.

Choisir bien ses matériaux : on pense à d'où vient et où va la terre pour mieux gérer les allées et venues, et garder les frais de camion bas tout en s'assurant que la terre est de bonne qualité.

Surveiller le travail : on suit tout de près sur le chantier. On compacte, on vérifie les pentes, et on regarde les quantités de terre tout le temps pour pouvoir changer de plan au besoin.

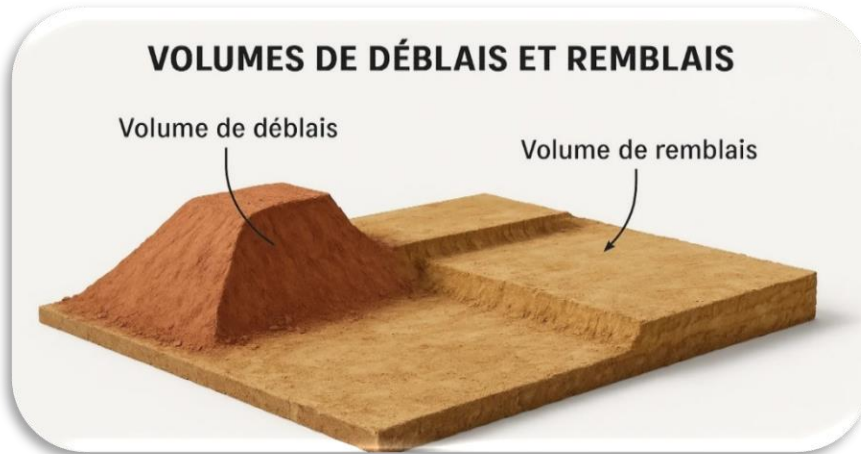


Photo 2.3.4) Optimisation des volumes de déblais/remblais [11]

2.3.5) Sécurisation du site de construction

Avant d'appliquer les bases, les travaux de terrassement éliminent les obstacles naturels et installent des pentes pour assurer la sûreté et la sécurité des travailleurs et de l'équipement sur le site où vous construisez

2.4) Classification selon le type de sol et les techniques utilisées :

La classification des terrassements est basée principalement sur les critères liés à la nature du sol à utiliser et les techniques utilisées dans son traitement, et ces deux méthodes différentes sont attribuées à l'équipement est la méthode de construction et en évitant la nécessité d'assurer la stabilité de l'installation [3]

2.4.1) Classification selon le type de sol

Le sol utilisé en terrassement est caractérisé en fonction de sa composition, de la consistance de ses grains et de son comportement mécanique, ce type représente la base des méthodes d'excavation, de la sélection des équipements nécessaires et de l'utilisation du compactage

2.4.1.1) Sols meubles ou pulvérulents

Il y a deux types de sols : les sols meubles et les sols pulvérulents. Ils sont différents dans la façon dont ils tiennent ensemble, la taille de leurs grains, et comment ils agissent quand on leur met du poids dessus.

Sols pulvérulents : ils ne tiennent pas ensemble car ils sont faits de gros grains comme du sable ou des cailloux. Ces grains ne se collent pas en blocs, mais touchent directement les uns les autres, créant une base dure. Ils ne se pressent pas beaucoup, s'aplatissent vite sous poids mais cela ne change pas trop après. L'eau ne les affecte pas beaucoup, et ils laissent passer l'eau facilement. Ils résistent aussi bien au froid et aux changements de l'humidité.

Sols meubles : ce terme regroupe tous les sols moins durs, y compris les pulvérulents, mais aussi ceux avec des petites particules comme du limon ou de l'argile. Ils peuvent être un peu collants et ne pas aimer l'eau. Les sols meubles sont moins stables, peuvent s'écraiser plus et de façon inégale, et sont à risque de glisser ou de se creuser. Leur comportement est compliqué à prévoir et change beaucoup avec l'eau. [3]

2.4.1.2) Sols cohérents

Ce sol varie avec une forte cohésion, mais il est sensible par l'eau (gonflement, retrait) de l'eau, et c'est l'un des sols sur lesquels il est difficile de réaliser des travaux de terrassement, surtout pendant la période des pluies [3]

2.4.1.3) Les sols graveleux et sablo-graveleux

C'est un sol facile à creuser, et il a une capacité portante, surtout après compactage

2.4.1.4) Roches tendres et roches dures

Nous pouvons forer la roche tendre mécaniquement par opposition à la roche dure nécessite de l'équipement. Des moyens lourds (brise-roche hydraulique, explosifs). [6]

2.4.2) Classification selon les techniques utilisées

La classification des techniques d'amélioration des propriétés mécaniques des sols peut être affinée selon la nature de l'intervention appliquée. Voici une classification claire selon les méthodes utilisées :

2.4.2.1). Techniques mécaniques

Compaction : augmentation de la densité du sol par réduction des vides d'air (statique, dynamique, vibrocompaction).

Renforcement mécanique : mise en place de matériaux (géogrilles, géotextiles, colonnes de ballast) pour améliorer la résistance au cisaillement du sol.

Substitution ou ajout de matériaux : remplacement ou mélange de sols fragiles par des matériaux granulaires ou des drains pour améliorer la capacité portante.

2.4.2.2) Techniques chimiques

Stabilisation aux liants hydrauliques : introduction de chaux, de ciment et de liant pouzzolanique pour augmenter la cohésion et la résistance.

Solidification-stabilisation : traitement combiné visant à augmenter la résistance mécanique et à réduire la perméabilité, généralement appliqué aux sols pollués.

2.4.2.3). Techniques hydrodynamiques

Drainage : élimination de l'eau des pores du sol (drainage vertical ou horizontal) pour accroître la sécurité et accélérer la consolidation des sols compressibles.

Pré chargement : application d'une surcharge temporaire pour provoquer le tassement et la consolidation du sol avant la construction.

2.4.2.4) Techniques thermiques

Stabilisation thermique : utilisation du gel ou du chauffage pour modifier temporairement les propriétés mécaniques du sol.

2.4.2.5). Techniques biologiques et environnementales

Bio cimentation : application de micro-organismes pour solidifier naturellement la structure du sol.

Stabilisation écologique : utilisation de matières résiduelles industrielles (par exemple, chaux usagée) ou de méthodes durables pour améliorer la durabilité et la résistance.

Cette classification facilite l'identification de la technologie la plus adaptée au type de sol, aux contraintes environnementales et aux objectifs d'un projet de terrassement ou de fondation. [4]

2.5) Types d'ouvrages nécessitant des travaux de terrassement

Les travaux de terrassement sont la base de tout ouvrage dont la stabilité et la durabilité sont directement liées aux conditions géotechniques et topographiques. Voici la classification des types d'ouvrages nécessitant des terrassements, avec leurs descriptions

-Ouvrages hydrauliques

Barrages en terre ou en enrochements → ex. barrage de Ghrib, barrage de beni haroun.

Canaux et aqueducs → terrassements en tranchées et remblais pour mise en place.

Stations de pompage et bassins de retenue → nécessitent décapage, remblais et nivellement.

-Ouvrages routiers

Routes et autoroutes → tranchées, déblais, remblais, talus et plateformes routières.

-Ouvrages de protection et de stabilisation

Terrassements pour soutènements (murs de soutènement, rideaux de palplanches, clouage de sols).

Stabilisation de talus et pentes → terrassements en gradins, purges, reprofilages

-Schéma de synthèse

Types d'ouvrages → travaux de terrassement associés :

Hydrauliques → barrages, digues, canaux.

Transport → routes, chemins de fer, tunnels. [4]

2.5.1) Ouvrages routiers et autoroutiers

Les routes et autoroutes sont représentées dans de vastes terrassements à une échelle adaptée à la forme, à la longueur et à la largeur, et ces travaux comprennent déblai ou remblai et la stabilisation des pentes et la formation de couches de fondation [4]



Photo 2.5.1) Ouvrages routiers et autoroutiers [12]

Les travaux en terre où s'effectuent les terrassements de la chaussée et des équipements des ouvrages routiers et autoroutiers sont un préalable indispensable pour la pérennité des plateformes qui servent de base de l'infrastructure.

Les terrassements dans les routes et autoroutes

Mise à niveau du terrain : la terre est excavée, évacuée, déplacée et remblayée pour faire voir un profil conforme au projet, qui va permettre de créer une assise solide et homogène.

Gestion des déblais et remblais, dans les travaux de terrassements routiers et autoroutiers, il est indispensable de bien équilibrer les volumes de déblais et remblais pour restreindre le coût des transports (méthode désignée par « LALANNE »).

Stabilisation des sols, le terrassement comprend le traitement de terres (compactage de la terre, stabilisation chimique ou physique) en adéquation avec les consignes de portance et de résistance, face aux sollicitations répétées du trafic routier.

Formation des couches et plateformes d'appui, les couches de forme, les couches de fondation sont la charpente de l'ouvrage ; leur qualité est complètement dépendante d'un terrassement de qualité (étude des sols, choix des matériaux, compactage de la terre).

Gestion d'ouvrages annexes, tranchées pour les réseaux, emplacements d'ouvrages d'art, talus et pentes sont aussi à gérer lors des terrassements routiers et autoroutiers.

2.5.2) Des pathologies ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, digues)

Les digues hydrauliques ont des maladies souvent à cause de problèmes qui sont :

- Érosion à l'intérieur (érosion hydraulique) cela arrive quand l'eau passe à l'intérieur ou en dessous de la digue, et elle emporte des petites pièces de terre. Ce phénomène est connu sous le nom de « renard » ou de fontis.

- C'est une grande raison pour laquelle les digues cassent (46% des cassures de digues en terre selon des études).

- Elle est plus commune s'il y a des fentes, des fissures, des tuyaux cassés ou des erreurs dans le corps de la digue.

- Glissement de terre (instabilité mécanique) quand la pente en haut ou en bas est instable due à un mauvais plan, trop de poids, trop d'eau, ou le type de sol.

Cela crée des fissures et des trous, et peut même casser la digue partiellement.

- Débordement et érosion au pied débordement : quand l'eau passe par-dessus lors de grands niveaux d'eau et cause l'érosion en haut.

- Érosion au pied : quand le sol est emporté à la base par des courants, ce qui affaiblit la structure et cause une éventuelle cassure.

– Fuites et infiltrations quand l'eau passe par des fuites, des vieux tuyaux, des joints usés ou des trous faits par des animaux.

Cela souvent aggrave l'érosion à l'intérieur et affaiblit la digue.

– Problèmes avec les évocatoires de crue et tuyaux Problèmes quand il manque, ils sont trop petits ou bloqués, ou vieux.

Cela peut mal gérer l'eau et causer trop de pression et des cassures.

– Vieillessement, manque de soin, et plantes non gérées Les matériaux vieillissent (béton, acier, terre).

Les plantes grandes (arbres, racines) rendent la surveillance difficile, offrent des abris pour animaux qui creusent et permettent plus de fuites. [7]

2.5.3) Pathologies des réseaux d'assainissement liées aux terrassements

–Tassements différentiels du remblai

Causes : compactage insuffisant, hétérogénéité du sol de tranchée, remblai mal contrôlé.

Conséquences : affaissement de la conduite → fissuration, rupture des joints, désalignement,

Affaissement en surface (chaussées, trottoirs).

–Mauvais lit de pose de la canalisation

Causes : présence de blocs, absence de lit de sable, sol de fond non purgé.

Conséquences : ovalisation ou écrasement de la conduite, concentration des charges ponctuelles,

Diminution de la durée de vie du réseau.

–Infiltrations et exfiltrations

Causes : tassements du sol autour de la conduite → fissures ou désajustement des joints.

Conséquences : infiltration d'eaux parasites (pluie, nappe) → surcharge du réseau, exfiltration d'eaux usées → pollution des sols et nappes.

–Défauts géométriques dus aux terrassements

Pentes mal réalisées lors du terrassement de la tranchée.

Conséquences : écoulement gravitaire perturbé, stagnation → dépôts, colmatage, engorgements. [7]

2.6) Types de terrassements

Classification selon la nature de l'excavation et du remblayage, la méthode utilisée le dernier conseil pour chaque élément de terrassement est destinée

2.6.1) Terrassement en déblai

Les travaux de terrassement consistent à creuser ou à affaiblir le niveau du terrain naturel, qui est utilisé dans ce processus pour accéder aux bases des infrastructures routières ou éliminer les sols instables

Application : fouilles de fondations ; tranchées

Méthodes ; étude géotechnique, décapage, excavation [8]

2.6.3) Terrassement de la grande masse

Ces travaux des terrassements sont représentés par des travaux de terrassement à grande échelle, et parfois ils se font sur les autoroutes du chantier de construction ou des gestions des matériaux de forage ou de remblayage le long de la voie

Méthode : le poids des volumes de sol transportés ; réparation des frais de transport

Le cas particulier : ils représentent à la fois l'excavation et le remblayage [8]

2.6.4) Terrassement en tranchée

Ce type de forage consiste à creuser une tranchée étroite et profonde pour l'installation des réseaux d'eau et d'électricité

Technologies utilisées : pompage, blindage, talutage

Risque : la chute du mur, fournit des eaux souterraines, glissant [8]

2.6.5) Terrassement en fouille

Le terme fouille désigne les travaux de terrassement en termes de localisations et de précision et est parfois utilisé dans les fondations des barrages ou des ouvrages de génie civil

Types de fouilles :

Fouilles en pleine masse : fondations générales (radier).

Fouilles en rigole : semelles isolées ou filantes. [8]

2.6.6) Terrassement mécanique (selon les engins utilisés)

Certaines techniques de terrassement sont classées en fonction des éléments ou équipements utilisés

La pelle mécanique / pelle hydraulique : excavation courante.

Au bulldozer / boueur : décapage ou poussée de matériaux.

Au scraper : pour les grands volumes sur longues distances.

La trancheuse / micro tunneling : réseaux linéaires. [8]

2.6.7) Terrassements spéciaux (renforcement ou amélioration du sol)

Dans la plupart des cas, les travaux de terrassement représentent une technique de traitement ou de renforcement des sols

Traitement à la chaux ou au ciment (sols argileux humides).

Mécanique des sols renforcés (géotextiles, gabions, murs renforcés).

Injection ou compactage dynamique (en sols instables). [5]

2.7) Étapes d'exécution des travaux des terrassements

Les étapes de la mise en œuvre des travaux de terrassement dans les projets comprenant les routes, les barrages, en tenant compte des exigences de qualité dans tous les éléments selon les références commerciales pour les travaux de terrassement pour les routes

2.7.1) Terrassements routiers

Les premiers travaux des terrassements préparent le terrain pour la construction des routes et assurent l'installation d'une base de construction solide

L'étape de mise en œuvre :

- Les études préliminaires commencent par l'étude du site où nous voulons travailler et découvrir tout ce qui y existe
- Analyse des données que nous réalisons en géotechnique, topographique et hydrologique
- Connaître les matériaux que nous utilisons et évaluer leur aptitude à l'emploi
- Niveler le sol de surface
- Enlèvement de la couche arable incapable de supporter des charges
- Conservez la couche de surface ou éliminez-la
- Travaux d'excavation et de remblayage
- Percez les effondrements en fonction des sections sélectionnées
- Transfert et installation de barrages sur des couches successives
- Compactage de chaque couche pour assurer sa stabilité
- Traitement du sol de tous ses problèmes
- Amélioration des propriétés mécaniques du sol par ajout de liants (chaux, ciment)
- Mélanger et compacter le sol traité de manière homogène
- Infrastructure de configuration finale
- Nivellement de surface
- Inspection des pentes
- Installation de systèmes de drainage
- Installation de fossés, de drains et de canaux de drainage des eaux de surface et souterraines
- Contrôle de la qualité et acceptation commerciale
- Essais de compactage (Proctor, Ev2)
- Inspection visuelle et technique des installations
- Préparation des rapports d'acceptation [5]
- Construction d'un noyau étanche
- Placement d'argile ou de matériaux géo synthétiques pour éviter l'épuisement de m'eau
- Compactage précis absence de fuite
- Elever des barrages
- Construction des barrages sur des couches successives avec une surveillance et une précision continue
- L'utilisation des matériaux nécessaires à sa stabilité est prohibitive
- Inspection des dispositifs de drainage et de surveillance
- Installation d'éviers et de façade de mesure et de contrôle
- Essais de perméabilité, de compacité et de résistance mécanique.

2.7.3. 2) Préparation du terrain

Débroussaillage et décapage : enlever le couvert végétal et la couche superficielle qui ne supporte pas de charges excessives et installer des drains pour éviter l'accumulation d'eau sous les barrages

Référence : planification pour effectuer des travaux d'excavation principalement et fournir une inspection

2.7.3. 3) Choix et traitement des matériaux

Sélection des matériaux : l'utilisation des matériaux égaux aux spécifications de qualité au sol classés selon les normes NF P 11-300.

Traitement en cas de besoin : amélioration des propriétés des matériaux pour des procédés tels que la stabilisation de la chaux ou du ciment. [4]

2.7.3. 4) Mise en œuvre du remblai

Couches : l'utilisation des matériaux remblais allant 20 et 30 cm d'épaisseur, en compactant chacun d'eux pour réduire les vides et augmenter leur densité

Compactage : il représente une étape essentielle dans les travaux des terrassements pour assurer la stabilité et éviter l'affaissement et le glissement du sol et maintient son adhérence et la capacité du sol à supporter les charges les tests des équipements de compactage dépendent de la nature des matériaux que nous utilisons et je dois traiter la région

Contrôle qualité : nous avons besoin de tests (pour les niveaux, la densité et la teneur en eau).

Enjeux et bonnes pratiques

Planification : les travaux des terrassements doivent être soigneusement conçus pour équilibrer les volumes d'excavation et de remblayage, réduire le transport et optimiser les coûts

Des sols sensibles : c'est la formation des certains dangers du sol tels que : le gonflement et le retrait, qui nécessite un traitement et l'utilisation de matériaux adaptés à ce phénomène

Respect des normes : la mise en œuvre doit respecter les normes en vigueur (NF EN 16907-2)

2.8) Engins de terrassement : caractéristiques

2.8.1) Bulldozer (ou Bouteur)

Le bulldozer, également appelé bouteur, c'est une machine utilisée dans la construction, elle est lourde et est utilisée pour déplacer et niveler le sol et est utilisée pour transporter des

Matériaux tels que la saleté, le gravier et les roches

Leur description et leur caractéristique

Équipement principal : une large lame en acier, réglable en hauteur et en inclinaison, permettant de pousser, de niveler ou de plier les matériaux.

Ses fonctions : pousser des déblais ou remblais sur de courtes distances. [9]



- Nivellement du terrain
- Décapage de la terre végétale
- Déboisement
- Transport de matériaux
- Démolition légère

Photo 2.8.1) Bulldozer (ou Bouteur) [13]

2.8.2) Pelle hydraulique (ou Pelle mécanique)

La pelle hydraulique, également appelée pelle mécanique hydraulique ou pelleteuse, c'est une machine utilisée dans la construction de fonction et est utilisée dans les projets de forage et de génie civil et est avancée et se compose d'une structure (à chenilles, pneus ou jambes articulées), d'une tourelle pivotante à 360° qui porte le poste de conduite, le moteur, les organes hydrauliques et le bras articulé équipé d'un godet ou d'autres outils.

Caractéristiques

-Châssis porteur : la chenille offre une grande stabilité, ou est remplacée par un pneu en caoutchouc pour une meilleure mobilité.

-Tourelle pivotante : rotation permanente à 360 degrés, facilitant les manœuvres sans qu'il soit nécessaire de déplacer la machine.

-Bras articulé : composé de plusieurs sections (flèche, balancier) actionnées par un système hydraulique de vérins, permettant des mouvements précis et puissants.

-Godet ou outil : fixé à l'extrémité du bras, utilisé pour creuser, soulever, déplacer ou démolir des matériaux.

-Poste de conduite : cabine ergonomique équipée de commandes hydrauliques (joysticks, pédales) pour piloter la machine avec précision, permettant la création de tranchées et le déplacement de terres. [9]



Photo 2.8.2) Pelle hydraulique (ou Pelle mécanique) [14]

2.8.3) Niveleuse (ou Grader)

La niveleuse, également appelée grader en anglais, c'est une machine à déplacer le sol avec un mouvement planifié pour niveler la surface de la terre avec précision, généralement utilisée dans les travaux publics, l'entretien des routes, les infrastructures terrestres et utilisée par les ingénieurs civils

Description et caractéristiques principales

Châssis articulé : permet une grande maniabilité et un déport latéral de la lame sans déplacer la machine.

Lame ventrale : grande lame en acier, réglable en hauteur, inclinaison, orientation (rotation jusqu'à 180° horizontalement et 90° verticalement), et déport latéral, permettant différents types de travaux (nivellement, talutage, déversement latéral).

Roues : six roues parfois, l'arrière est entraîné par un essieu avant orientable. Ce qui fonctionne sur la stabilité et la traction

Fonctions :

- Nivellement et finition soignée des surfaces
- Inclinaison et mise en forme de la pente sous forme de marches
- Creuser des tranchées et des canaux à fond plat
- Entretien des routes

Travaux publics : correction des couches de terre ou de différentes surfaces routières, pentes, creusement de fossés ou de canaux, remblayage rapide [9]



Photo 2.8.3) Niveleuse (ou Grader) [15]

2.8.4) Chargeuse (ou Chargeuse frontale)

La chargeuse, aussi appelée chargeuse frontale ou chargeur sur pneus, c'est une machine utilisée dans la construction principalement pour la manutention et le transport de matériaux tels que le sable, le gravier, les débris, ou les matériaux de construction et elle est également équipée d'un godet avant avec des bras hydrauliques pour la soulever facilement.

Description et caractéristiques principales

Structure : engin automoteur généralement monté sur pneus, avec un châssis articulé pour une meilleure maniabilité.

Équipement principal : une large benne ou godet fixé à l'avant, qui peut être levé, abaissé et incliné grâce à un système hydraulique.

Fonctions du godet : chargement, transport sur courte distance, déchargement de matériaux.

Variantes : chargeuses compactes (mini-chargeuses), chargeuses sur chenilles, chargeuses pelleuses (avec pelle à l'arrière).

Utilisations

- Chargement de camions-bennes ou tombereaux.
- Déblaiement et déplacement de matériaux sur le chantier.
- Nivellement grossier des terrains.
- Manutention de palettes ou autres charges grâce à des accessoires spécifiques.
- Travaux de terrassement, démolition légère, exploitation en carrières et mines. [9]



Photo 2.8.4) Chargeuse (ou Chargeuse frontale) [16]

2.8.5) Dumper (ou Tombereau)

Définition et caractéristiques principales le dumper, terme anglais couramment utilisé en France

Le dumper, également appelé tombereau, est un engin de chantier spécialisé dans le transport de matériaux en vrac (terre, gravats, sable, etc.) sur de courtes ou moyennes distances

Nous en avons besoin dans le processus de forage et c'est une finition pour travailler sur un terrain difficile grâce à sa durabilité et sa capacité à marcher sur la route difficile et il se compose de deux types : dumper articulé, dumper rigide

Dumper articulé : il se compose de deux essieux, d'une propulsion arrière et d'un essieu directeur

Dumper rigide : il se compose d'une structure articulée en deux parties, souvent à trois axes, largement utilisée pour sa polyvalence et sa maniabilité sur les terrains difficiles

Terrassement : transport de déblais et remblais sur les chantiers.

Travaux publics : entretien et aménagement des infrastructures routières.

Transport de matériaux sur de courtes ou moyennes distances sur chantier. [9]



Photo 2.8.5) Dumper (ou Tombereau) [17]

2.9) Conclusion

Les terrassements sont considérés comme une étape essentielle au début du processus de toute construction ou développement, car ils permettent de modifier la nature du terrain en fonction des exigences du projet en cours, que ce soit pour des fondations, des routes, des barrages en terre, ou d'autres infrastructures intégrant des opérations de terrassement telles que déblai, remblai, fouilles, nivellement, décapage et viabilisation. Ces opérations sont réalisées selon une organisation rigoureuse et des contrôles qualité stricts.

Ces travaux garantissent la stabilité des structures à construire, leur capacité à supporter des charges, ainsi que leur durabilité, tout en créant un sol homogène et stable répondant aux exigences techniques.

Enfin, la réussite de tout projet repose sur des bases solides de terrassement, une conception soignée, une coordination efficace entre les différentes parties impliquées, et le respect des normes techniques. Le terrassement est donc essentiel pour assurer la sécurité et la durabilité des installations, tout en optimisant les coûts et les délais des chantiers.



Chapitre 3 : Reconnaissance et caractérisées géotechnique des sols



3.1 Introduction

La reconnaissance et la caractérisation géotechnique des sols sont des étapes fondamentales dans tout projet de construction, en particulier pour les infrastructures telles que les routes, les barrages, et les plateformes. Elles permettent d'identifier les différentes couches de sol, leur composition, et leurs propriétés physiques et mécaniques, afin de garantir la stabilité et la durabilité des ouvrages à réaliser

3.1) Objectifs de la reconnaissance géotechnique

La reconnaissance géotechnique a pour objectif de déterminer les caractéristiques du sol afin d'assurer une conception adaptée des fondations et des ouvrages. Cela passe par :

- L'identification des différentes couches de sol
- La caractérisation des matériaux présents
- L'évaluation de leur aptitude à être utilisés pour le terrassement

3.1.1) Identification des couches du sol

Le sol est généralement constitué de plusieurs horizons :

- Horizon O : couche organique riche en matières végétale en décomposition
- Horizon A : couche de surface composée d'un mélange des matières organiques et minérales
- Horizon B : zone d'accumulation de minéraux lessivés
- Horizon C : roche-mère érodée servant de base à la formation du sol [10]

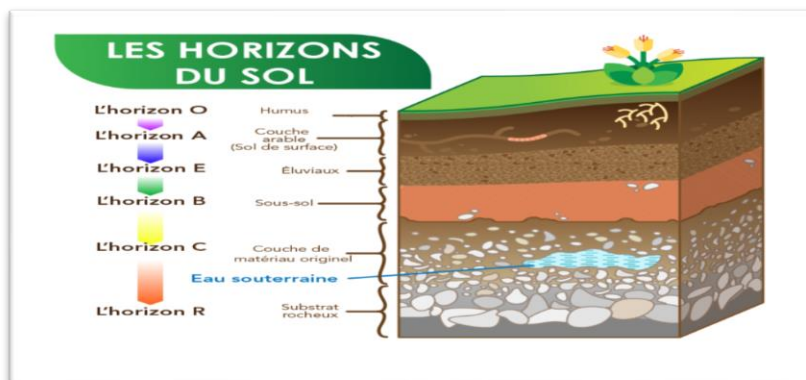


Photo 3.1.1) Identification des couches du sol [18]

3.1.2) Nature des matériaux – classification GTR (NF P 11-300)

La norme française NF P 11-300, également connue sous le nom de Guide des Terrassements Routiers (GTR), la variété des matériaux est divisée en plusieurs types en fonction de leur nature et de leur propriété [45]

- Classe A : sols fins (argiles, limons) – forte plasticité, faible perméabilité ;
- Classe B : sols sableux ou graveleux avec fines – perméabilité moyenne, bonne cohésion ;
- Classe C : sols hétérogènes composés d'éléments fins et grossiers ;
- Classe D : sols insensibles à l'eau comme les sables et graviers bien drainés ;
- Classe R : matériaux rocheux ;
- Classe F : sols organiques ou sous-produits industriels – inadaptés sans traitement préalable.

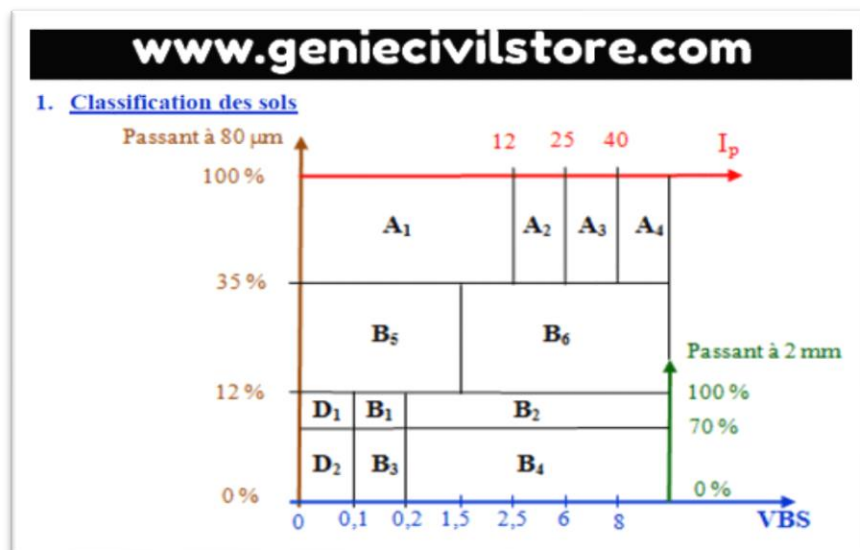


Photo 3.1.2) Nature des matériaux – classification GTR (NF P 11-300) [19]

3.1.2) Tableau nature des matériaux – classification GTR (guide de terrassement routier (NF P 11-300)

Classe	Description	Caractéristique	Sous –classe
A	Sols fins	$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ passant à $80\mu > 35\%$	A ₁ à A ₄ Selon VBS ou IP
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\max} \leq 50\text{mm}$ passant à $80\mu > 35\%$	B ₁ à B ₂ Selon VBS ou IP et tamisât
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\max} > 50\text{mm}$ passant à 80μ ou passant à $80\mu \leq 12\%$ + VBS > 0.1	30 sous-classes selon VBS ou IP tamisassent à 50mm
D	Sols insensibles à l'eau	$VBS \leq 0.1$ passant à $80\mu \leq 12\%$	D ₁ à D ₃
R	Matériaux rocheux	Nature pétrographique (Norme NP 11-300)	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Teneur en éléments chimique (Norme NP 11-)	

3.2) Cadre normatif et missions géotechniques

En France, la géotechnique suit un cadre strict de règles qui aide à garder les bâtiments sûrs, de bonne qualité et durables. La norme clé est la NF P 94-500, faite par l'AFNOR (association française de normalisation). Elle fixe la façon de ranger et de décrire les divers travaux en géotechnique. Cette norme sert à aligner les méthodes utilisées pour examiner le sol, faire des tests, des analyses et des plans pour les constructions

Principales normes utilisées NF (norme française) P 94-500 : Définit les types de missions en géotechnique (de G1 à G5).

G1 – Études géotechniques préalables

G2 – Etude géotechnique de conception

G3 – Etude et suivi géotechnique d'exécution

G4 – Supervision géotechnique d'exécution

G5 – Diagnostic géotechnique

NF (norme française) P 94-262 : fondations peu profondes — règles de conception, de mise en œuvre et de surveillance.

NF (norme française) en 1997 – Euro code 7 : calculs en géotechnique (à l'échelle de l'Europe).

Normes liées pour tests et recherches : tests avec pression, tests de pénétration, tests triaxiaux, et plus.

Missions en géotechnique : classification selon la NF (norme française) P 94-500 La norme divise en cinq grandes missions successives, allant de l'étude du projet jusqu'à sa réalisation.

3.3) Programme d'investigation préliminaire

Ramasser les infos qui sont déjà là est un grand pas au début d'une étude de la terre. Cela aide à mieux connaître le lieu avant de le voir et à planifier mieux.

Il y a trois grands parts : Carte :

- Cartes de roches pour voir ce sous la terre.
- Cartes de hauteurs pour voir les pentes, les formes, et où l'eau va.
- Cartes d'eau sous terre pour savoir où l'eau est et comment elle se bouge.
- Cartes de dangers (chutes de terre, grandes eaux, mouvements de terre).

Archive :

- Écrits sur des études ou des travaux faits là ou près.
- Infos des trous ou tests faits.
- Infos sur ce qui était là avant (terrains mis, travaux de fabrique, saleté).

Visite du lieu : garder directement ce qui est sur le terrain (les plantes, si c'est solide, si c'est mouillé). –

- Voir si on peut y aller avec de grosses machines.
- Regarder s'il y a des signes de problèmes ou de mouvements.
- Analyse des dangers avant de travailler

L'analyse des dangers pour travailler la terre veut dire voir avant les dangers techniques et environnementaux qui peuvent arriver pendant qu'on travaille le terrain. Cette évaluation est très importante pour la sécurité, la solidité des choses construites et pour que le travail avance bien.

Les points principaux à voir sont : dangers des déblais :

- Instabilité des pentes temporaires ou pour toujours.
- Chutes de pierres ou glissements pendant qu'on creuse.
- Trouver des eaux sous terre ou des sols doux qu'on n'attendait pas.
- Création de matériels qu'on ne peut pas utiliser ou qui polluent.
- Dangers des remblais :
 - Mauvaise qualité ou mix de matériels.
 - Affaissements différents ou trop grands.

Mauvais compactage ou drainage insuffisant.

- Glissements si le remblai est bâti sur un sol pas solide ou en pente.

Autres dangers : effets sur les constructions à côté (maisons, réseaux sous terre).

- Problèmes pour entrer ou pour que les machines circulent.
- Temps qui n'aide pas. [9]

3.4) Techniques de reconnaissance in situ

3.4.1) Le sondage carotté

Le sondage carotté est un outil pour prendre, avec des tubes troués nommés carottiers, des parts longs et entiers du sol ou de la roche tel qu'ils sont dans la nature. Ces parts, nommés carottes, donnent une chance d'étudier bien la stratigraphie, la structure, la porosité et les traits mécaniques du sol.

Clés du sondage carotté : but : avoir des échantillons non touchés pour faire des tests précis en laboratoire (résistance, cohésion, perméabilité, composition) et voir de près les couches géologiques sur le site. [9]

Méthodes selon le type de sol :

Carottage par poussée (marteau, vibration) bon pour les sols mous ou peu liés comme limons, sables, argiles. Cette façon garde les carottes suivies tout en gardant le sol tranquille.

Carottage rotatif, qui tourne le tube avec un fluide de forage (eau, boue), va loin sous le sol (souvent >100 m) et va bien avec les matières dures ou serrées.

3.4.1.1) Description des coupes de sondages

Description lithologique du sondage SC1 :

- 0.0_1.2 : Terre végétale brune
- 1.2_2.5m : Argile brune peu consistante
- 2.5_4.0m : Argile marneuse panaché très consistante
- 4.0_6.0m : Marne gris altérée
- 6.0_15m : Marne grise bleuâtre dure



Photo 3.4.1.1) Réalisation du sondage SC2

Description lithologique du sondage SC2 :

- 0.0_1.0 : corps de chaussée,
- 1.0_3.0m : Argile marneuse brune consistante,
- 3.0_5.7m : Argile marneuse brune très consistante,
- 5.7_7.0m : Marne gris bleuâtre altérée,
- 7.0_20.m : Marne gris bleuâtre dure



Photo 3.4.1.1) Caisses à carottes du sondage SC2[20]

Description lithologique du sondage SC3 :

- 0.0_0.5m : terre végétale jaunâtre
- 0.5_7.0m : Argile limoneuse jaunâtre peu consistante
- 7.0_10m : Limon argileux peu consistant
- 10_12.0m : Marne grisâtre altérée
- 12_20m : Marne grisâtre indurée [6]

3.4.2) Essais au pénétromètre dynamique

Le test de pénétration dynamique est un moyen de test qui vous dit quelle est la force du sol. Il fait entrer un groupe de tiges avec une pointe conique dans le sol en utilisant un marteau qui tombe de haut, qu'on nomme "mouton". Avec une force de frappe qui ne change pas, on note le nombre de fois où le mouton frappe pour faire entrer la pointe de 20 centimètres dans le sol. La formule des hollandais, montrée ici, change ce nombre de frappes en une mesure de la force avec laquelle la pointe entre dans le sol.

$$\text{Avec } R_d = \frac{M^2 \times H}{Ae(M+P)}$$

- M = masse du mouton
- H = hauteur de chute du mouton
- e = refus (pénétration moyenne par coup)
- A = section de la pointe du pénétromètre dynamique
- P = poids des tiges



Photo 3.4.2) pénétromètre dynamique [21]

- Plusieurs types
- Pénétromètre statique (CPT, Cpt)
- Pénétromètre dynamique léger (DPL)
- Pénétromètre dynamique moyen (DPM)
- Pénétromètre dynamique lourd (DPH, DPSH-A et DPSH-B) [6]

3.4.3) Pressiomètre Ménard (Essai pressiométrique)

Le pressiomètre Ménard (PMT) est un essai in situ qui est capable de mesurer la déformation et la résistance du sol en insérant une sonde cylindrique dans un forage. Invention française par Louis Ménard dans les années 1950

Norme de référence : NF (norme française) P 94-110 : "Essai pressiométrique Ménard".

Présent aussi dans l'Eurocode 7 (EN 1997-2) comme méthode de reconnaissance.

-Principe de l'essai

Un trou d'un diamètre proche de celui de la sonde (60–80 mm) est foré.

On place la sonde pressiométrique (cellule cylindrique à membrane souple) dans le forage.

De l'eau sous pression est injectée dans la sonde → la membrane se gonfle et applique une pression radiale sur les parois du sol.

On mesure la pression appliquée comme la déformation radiale (volume injecté).

-Paramètres obtenus

À partir de la courbe pression–déformation : module pressiométrique m_e ($\approx$ module de déformation du sol).

Pression limite PL (pression à laquelle le sol se déforme → résistance ultime).

Pression de fluage PF (déformation continue sans augmentation de pression).

Coefficient de Poisson (ν) (approximé dans certains cas).

-Utilisation en géotechnique

Dimensionnement des fondations superficielles (semelles).

Dimensionnement des fondations profondes (pieux, parois moulées).

Mesure des tassements.

Évaluation de la capacité portante.

Identification des sols compressibles (argiles molles, limons, sables lâches). [6]

3.5) Prélèvement et conservation des échantillons

–Types d'échantillons : échantillons remaniés : prélevés à la pelle, tarière manuelle ou mécanique ; structure et teneur en eau souvent modifiées ;

Utilisés pour essais d'identification (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau).

-Échantillons intacts (non remaniés) :

Prélevés avec des tubes ou carottiers spéciaux ;

Permettent de conserver la structure et l'état de contrainte du sol ;

Utilisés pour essais mécaniques (cisaillement, consolidation, pressiomètre calibré).

-Méthodes de prélèvement

Tarière hélicoïdale → sols meubles et superficiels.

Carottier à battage (ou piston statique) → argiles molles, limons.

Carottier rotatif → sols cohérents et roches tendres.

Boîtes ou cylindres (Shelby tubes) → sols argileux saturés.

Bloc prélevé (découpe manuelle au couteau, scie) → argiles ou limons très sensibles.

- Références normatives

NF P 94-041 : reconnaissance et essais – prélèvements d'échantillons.

ASTM (American Society for setting and Materials) D1587: "thin-walled Tube sampling of soils" (pour tubes shelby).

Eurocode 7 (EN 1997-2) : prescriptions pour échantillonnage et essais.

-Précautions lors du prélèvement

Éviter les vibrations excessives.

Minimiser les pertes d'eau (teneur en eau $\approx$ paramètre critique).

Noter la profondeur, la stratigraphie et l'orientation de l'échantillon.

Utiliser un matériel propre pour éviter la contamination. [6]



Photo 3.5) types d'échantillons (remaniés, intacts) [22]

3.6) Essais en laboratoire

Les Essais de labo en géotechnique sont clé pour bien voir les traits physiques et mécaniques des sols, qui sont très importants pour créer et assurer la sûreté des structures. Voici les principaux types de tests souvent faits

3.6.1) La teneur en eau selon la norme (NF (norme française) P 94 050)

La norme NF (norme française) P 94-050 dit comment tester la quantité d'eau dans un sol ou matériau en le séchant. Elle est là depuis 1995 et donne les détails sur les mots, le matériel, comment faire et comment dire les résultats.

Comment on fait le test on pèse un bout de sol mouillé que l'on connaît.

Ce bout est séché à 105 ± 5 °C jusqu'à ce qu'il ait le même poids tout le temps (souvent 16 à 24 heures). On pèse le bout sec.

La quantité d'eau W_w est trouvé par cette règle : $W_w = 100 \times \frac{W_w}{W_s}$



Photo 3.6.1) La Teneur en eau [23]

-Le test marche pour les sols naturels, les matériaux changés et les cailloux.

-Le résultat montre la quantité d'eau dans le sol, vital pour comprendre comment le sol agit (comme sa forme, comment il presse, comment il est lourd).

-Pourquoi c'est important La quantité d'eau change comment le sol tient, sa densité, si l'eau passe et s'il reste en place.

-C'est vital pour presque tous les autres tests sur le sol. [6]

3.6.2) Limite d'Atterberg (NF (norme française) P 94-051)

La règle NF (norme française) P 94-051 montre comme on trouve les bords d'Atterberg. Ce sont des clés pour voir l'état et à quel point les sols fins sont plastiques, surtout la part sous le tamis de $400\ \mu\text{m}$.

But trouver la limite où l'eau rend le sol liquide (W_L).

Trouver la limite en eau où le sol n'est plus plastique mais se mi-dur (W_P).

Compter l'indice de plasticité ($IP = W_L - W_P$), qui montre la plasticité et combien d'argile il y a dans le sol.

Limite de liquidité notée W_L : la limite de liquidité est fixée à l'aide du casa grande, il correspond à la teneur en eau, qui caractérise le passage de l'état liquide à l'état plastique



Photo 3.6.2) casa grande [24]

Limite de plasticité : W_P Il fonctionne pour transférer

Le sol d'un état solide à la plasticité de 0% à 100%

Mais elle demeure généralement inférieure à 40%.

Regarder l'indice de dureté (IC), qui dit comment

Le sol est dur à une eau donnée

-3.6.2) Le diagramme de casa grande

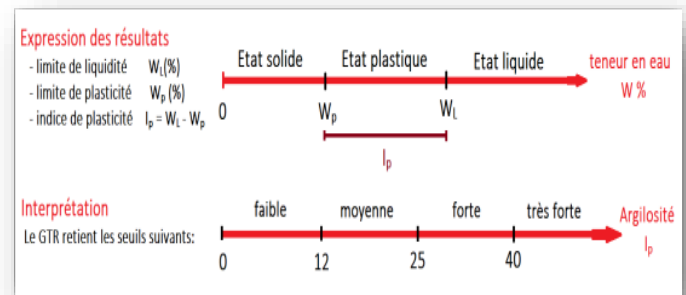


Photo 3.6.2) Le diagramme de casa grande

Indice de consistance IC : les limites d'Atterberg sont utilisées pour calcul l'indicateur qui attribue la teneur en eau du sol (80 à 90 % d'éléments $< 400\mu\text{m}$) et se calcul par $IC = \frac{W_L - W_N}{I_p}$

W_N : teneur en eau naturelle.

Si $IC < 0$, $W > W_L$: le sol est dans un état liquide

Si $0 < IC < 1$: $W_P < W < W_L$ le sol est dans un état plastique

Si > 1 : $W < W_P$ le sol dans un état solide [10]

3.6.3) L'analyse granulométrique par sédiment métrie

L'analyse de la taille des grains par sédimentation, définie par la norme NF (norme française) P 94-057, ajoute aux analyses faites par tamis pour voir les plus petits grains de moins de 80 microns (0,08 mm)

Cœur de la méthode on commence en tamisant l'échantillon avec un tamis de 80 μm sous l'eau pour isoler les petits grains.

-Ces grains fins tombent à des vitesses différentes dans un liquide calme, selon la loi de Stokes.

-Avec un densimètre, on vérifie par moments combien le liquide est dense, et cela aide à voir la répartition des fines par taille.

-On prépare l'échantillon avec un produit (hexa métaphosphate de sodium) qui casse les groupes pour mieux analyser.

-Bases et façons de faire granulométrie : pourcentage des grains par taille.

Moyens de mesurer :

-Tamisage (NF (norme française) P 94-056) pour les grains plus grands que 80 μm , bien pour les gros sols (graviers, sables).

-Sédimentation (NF (norme française P 94-057) pour les petits grains (moins de 80 μm), mesurée en les laissant tomber dans un liquide selon la loi de Stokes.

-On classe les grains suivant le Guide du Terrassement routier (GTR) pour l'étude des sols :

Graviers : grains de 50 mm à 2 mm

-Sables : grains de 2 mm à 50-80 μm

-Fines : grains de moins de 80 μm , incluant les limons et argiles [8]



$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}}$$

Photo 3.6.3) L'analyse granulométrique par sédiment métrie

[25]

3.6.4) Caractéristiques physiques

3.6.4.1) Masse volumique

Poids volumique du sol humide (ou apparente) (γ_h) : c'est la masse d'un corps par unité de volume apparente en état naturel. $\gamma_h = \frac{W_t}{V_t}$

Poids volumique du sol sec (γ_d) : c'est le rapport du poids de matériau sec (après expulsion de l'eau libre) contenue dans une certaine quantité de sol au volume de ce même matériau.

3.6.4.2) Densité

La densité est la masse par place que prend un sol. Elle change avec ce qui est dedans, sa forme, et son eau.

Sortes de densité en géotechnique densité de grain (ou des grains solides) : masse de petites roches seules par endroit qu'elles prennent, sans trous ni matières organiques. Elle est souvent la même vers 2,65 g/cm³ (ou 2650 kg/m³) pour les roches silicates usuelles.

Densité vue (ou masse vue) : masse totale du sol (solide + eau + air) par la place qu'il prend vraiment, avec les trous. Elle change avec combien il est tassé, eau dedans, et trou, entre 1,3 et 2,0 g/cm³. Une haute densité vue peut montrer un sol tassé ou plein de gros grains comme le sable.

Densité sèche : masse des roches solides par place complète, mais voyant le sol sans eau, en enlevant donc la masse de l'eau. Bon pour voir comment il est tassé. $\rho = \frac{M_{sol} + M_{eau}}{V_{total}}$

3.6.4.3) Porosité

La porosité d'un sol est une qualité clé pour savoir combien de vide il a en comparaison à son volume entier. Ces vides peuvent tenir de l'eau ou de l'air.

Ce qui change la porosité plusieurs choses affectent la porosité :

- Type de minéral : divers minéraux dans le sol changent sa capacité à garder l'eau.
- Texture du sol : la taille des grains (sable, boue, argile) fixe combien de vide il y a.
- Compaction du sol : sols durs ont moins de vides à cause de la pression. [8]
- Structure du sol : comment les grains sont mis en place touche aussi la porosité.
- Vie dans le sol : les créatures qui vivent dans le sol peuvent changer sa porosité.

3.6.5) Propriétés mécaniques (œdomètre, cisaillement, triaxial)

3.6.5.1) Propriétés mécaniques (œdomètre)

L'essai œdométrique est une preuve de laboratoire clé en géotechnique. Il étudie la compression et la consolidation simple d'un sol, copiant les tassements sous des charges verticales quand les côtés sont confinés. Principes de l'essai œdométrique un bout cylindrique de sol (si possible intact) est mis dans une boîte dure (l'œdomètre) qui tient tous les côtés bien serrés. Le bout de sol est mouillé et l'eau peut fuir par le haut et le bas. Ceci aide à faire sortir l'eau des trous dans le sol pendant la consolidation. Des charges verticales de plus en plus lourdes sont mises une par une.

À chaque étape, on mesure comment le sol s'affaisse avec le temps. Cela montre la vitesse et l'ampleur de la consolidation.

Paramètres et courbes principaux courbes de consolidation : elle montre la compression verticale (tassement H) avec le temps sous un poids constant. Cela aide à trouver la vitesse de consolidation et combien vite ça se passe.

Courbe de compression (e - $\log \sigma'$) : elle trace la densité des trous dans le sol par le log de la pression fixe ($\log \sigma'$). Cette ligne aide à voir la force du sol et pression avant la compression durable.

Paramètres tirés : module de compression (indice de pression)

Vitesse de consolidation (vitesse du départ de l'eau)

Gère la pression avant la compression

Paramètres de gonflement dans le déchargement [3]

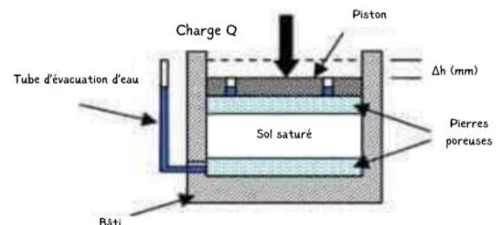


Photo 3.6.5.1) Propriétés mécaniques (œdomètre) [26]

3.6.5.2) Propriétés mécaniques (cisaillement)

Le cisaillement correspond à la capacité d'un sol à résister à des efforts tendant à faire glisser une masse de sol sur une autre.

C'est le mécanisme principal dans les ruptures de talus, glissements de terrain, portance des fondations.

Critère de rupture (Mohr–coulomb) : la résistance au cisaillement est généralement décrite par le

critère de Mohr–Coulomb : $\tau = c' + \sigma' \cdot \tan(\varphi')$

τ = contrainte de cisaillement à la rupture,

c' = cohésion effective,

φ' = angle de frottement interne,

σ' = contrainte normale effective.

Paramètres de cisaillement

Cohésion (c')

Force d'adhésion entre particules, importante pour les argiles ;

Disparaît souvent à long terme sous charge (drainage).

Angle de frottement interne (φ')

Traduit la résistance au glissement par frottement ;

Dépend de la granulométrie, de la densité et de la compacité ;

Élevé pour les sols sableux, faible pour les argiles molles.

Résistance non drainée (S_u)

Pour les argiles saturées à court terme (chargements rapides).

Modes d'essais pour déterminer la résistance au cisaillement

–Essai de cisaillement direct (boîte de cisaillement)

Simple, donne τ en fonction de σ ;

Adapté aux sables et limons.

–Essai triaxial

CU (Consolidated Undrained) : contrainte totale, mesure de S_u .

CD (Consolidated Drained) : paramètres effectifs (c' , φ').

UU (Unconsolidated Undrained) : essai rapide, donne S_u .

Essai de pénétration (SPT, CPT)

Paramètres corrélés empiriquement à φ' et S_u .

–Importance en terrassement et ouvrages

Stabilité des talus → dépend du couple (c' , φ').

Fondations superficielles → portance calculée avec la résistance au cisaillement.

Pieux et ancrages → frottement latéral et pointe.

Ouvrages hydrauliques (digues, barrages en terre) → vérification des glissements [3]

3.6.5.3) Propriétés mécaniques (triaxial)

Un échantillon cylindrique de sol ($\approx 38 \times 76$ mm) est placé dans une cellule triaxiale.

Confinement par une pression latérale uniforme σ_3 (fluide de cellule).

Application progressive d'une contrainte axiale σ_1 jusqu'à la rupture.

Mesures : pression interstitielle u , déformations axiales et volumétriques.

–Modes d'essai

Selon les conditions de drainage et de consolidation :

UU (Unconsolidated Undrained) : Pas de drainage, pas de consolidation $\rightarrow$ court terme.

Paramètre obtenu : résistance non drainée S_u .

CU (Consolidated Undrained) : Consolidation préalable, puis cisaillement sans drainage.

Mesure de la pression interstitielle u .

Permet de déduire les paramètres effectifs (c' , φ').

CD (Consolidated Drained) :

Consolidation et cisaillement avec drainage (lent).

Mesure directe de c' et φ' effectifs.

Normes

ASTM (American society for setting and Materials) D2850 (UU), ASTM D4767 (CU/CD).

NF (norme française) P 94-074 (essais triaxiaux en France). [3]

3.6.5.4) Essais de compactage (Proctor)

L'essai de compactage a pour but de déterminer : la teneur en eau optimale (opté) $\rightarrow$ taux d'humidité qui permet d'obtenir la meilleure compacité du sol.

La densité sèche maximale ($\gamma_{d \text{ Max}}$) $\rightarrow$ masse volumique sèche maximale atteinte pour ce sol sous une énergie de compactage donnée.

–Types d'essais Proctor

–Proctor normal (standard Proctor, NF (norme française) P 94-093 / ASTM (American society for setting and Materials) D698)

Masse du pilon : 2,5 kg ;

Hauteur de chute : 30 cm

3 couches $\times$ 25 coups chacune

Utilisé pour les sols de terrassements courants (digues, remblais routiers légers).

–Proctor modifié (modifié Proctor, ASTM (American society for setting and Materials) D1557)

Masse du pilon : 4,5 – 4,54 kg

Hauteur de chute : 45 cm

5 couches $\times$ 25 coups chacune

Énergie de compactage 4,5 fois plus élevée que le Proctor normal. [8]

Utilisé pour les ouvrages nécessitant une compaction plus forte (pistes aéronautiques, remblais de barrages, chaussées).



Photo 3.6.5.4) Essais de compactage (Proctor) [27]

3.6.5.5) Essais de compactage (CBR) (California Baring Ratio)

L'essai CBR (California Baring ratio) mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté et sert principalement à :

Évaluer la portance des sols utilisés en fondations de chaussées, plateformes et remblais.

Déterminer les épaisseurs nécessaires des couches de chaussées (normes routières).

Classer les sols en fonction de leur aptitude à servir de couche de forme ou de fondation routière.

-Principe

Un échantillon de sol est compacté selon l'essai Proctor (normal ou modifié) dans un moule standard.

Après un éventuel trempage (smoking 4 jours) pour simuler l'état saturé du sol en période humide, on procède à l'essai.

Un piston cylindrique (surface = 19,35 cm²) enfonce le sol à une vitesse constante (1,27 mm/min).

On mesure la force nécessaire pour enfoncer le piston aux profondeurs de 2,5 mm et 5 MM.

Résultats à interprétation

CBR élevé (≥ 30 %) → sol très porteur (graves, sols granulaires bien compactés).

CBR moyen (10–30 %) → sols convenables pour couches de fondation.

CBR faible (< 10 %) → sols médiocres (argiles plastiques, limons) nécessitant amélioration (stabilisation, substitution).

En pratique routière : $\text{CBR} \geq 80 \%$ → grave traitée ou matériaux de chaussées supérieures.

$\text{CBR} 20\text{--}50 \%$ → couche de base ou fondation.

$\text{CBR} < 10 \%$ → sol de faible portance, souvent impropre sans traitement. [8]

3.7) Classification des sols (GTR, AASHTO (American association of state highway and transportation official), USCS (unified soil classification system))

Mettre les sols dans des groupes est un pas clé en ingénierie de terre pour voir de quel type est un sol, comment il agit mécaniquement et s'il est bon pour faire des remblais ou couches de base. On se sert de trois grands groupes souvent : GTR, AASHTO et USCS. Voici un regard adapté pour les terrassements :

– Groupe GTR (guide des terrassements routiers) D'où il vient et cadre : un groupe français, souvent utilisé pour routes et terrassements. Il suit la norme NF (norme française) P 11-300 et le guide du terrassement (GTR 2023).

Structure : sols en 4 groupes (A, B, C, D), plus les roches (R) et des trucs organiques (F).

Chaque groupe montre le sol par : Taille (petit ou grand)

Plasticité (limites d'Atterberg, meilleur au plastique)

Eau (état sec ou mouillé, comment il change si mouiller)

Force (combien il peut tenir). Groupe AASHTO (groupe des routes et transport de l'Amérique)

Origine : souvent en Amérique du nord pour routes et structures.

Basé sur : taille, limite liquide (L_w) et plastique (IP).

Groupes : 8 groupes, d'A-1 (graviers, sables bons) jusqu'à A-8 (argiles très plastiques).

But : Voir la force et type de sol pour planifier les couches.

Groupe : A-1, A-2 : sols avec gros grains (bons pour base et couches).

A-7, A-8 : Sols d'argile plastique (moins bons, demandent plus de travail)

–La façon de classer les sols avec le système AASHTO est très utilisée dans les travaux de routes et de bases, surtout en Amérique du nord, pour juger la bonne tenue et le support des sols selon leurs traits physiques et leurs forces.

Idées majeures de la classification AASHTO pour les travaux de terre elle divise les sols en groupes d'A-1 à A-8 (et A-9 pour les sols avec des plantes), avec un système de petits groupes.

Le plan se base surtout sur : la taille des grains (pourcents de cailloux, sable, petites parts)

Les seuils d'Atterberg (seuil de fluide, LL, et seuil de plastique, IP)

Le taux de petites parts (parts qui passent le tamis de 0,075 mm)

Groupe USCS (groupe de Sol unifié) origine : un groupe pour le génie civil, utilisé partout dans le monde pour les projets de terre.

Basé sur : taille (ce qui passe un tamis de 0,075 mm) et plastique (limites d'Atterberg).

Groupes : gros (graviers G et sables S), bien ou mal faits (ex. GW, GP).

Fins (argiles C, limons M) avec plastique. Organique (O) et tourbe (Pt).

Buts : donner une image claire pour les analyse mécaniques, l'eau et pour modéliser [4]

3.8) Recommandations géotechniques

-Préparation et reconnaissance du site

Effectuer un décapage des matériaux organiques et sols instables (limons, tourbes, remblais non contrôlés).

Prévoir une épaisseur minimale de substitution si la couche superficielle est trop compressible.

Mettre en place un plan de reconnaissance complémentaire si des hétérogénéités subsistent (zones argileuses, nappes phréatiques, fissurations).

-Terrassements et compactage

Employer des matériaux conformes aux classes du GTR 92 (classes B et C privilégiées pour couches de forme et remblais).

Définir l'optimum Proctor normal (OPN) ou Modifié (OPM) pour le compactage.

Exiger un taux de compactage ≥ 95 % de la densité sèche maximale pour remblais structurels (≥ 98 % pour couches de chaussées).

Contrôler l'humidité des matériaux (± 2 % autour de l'optimum).

Mettre en place un plan qualité (contrôles in situ : pénétromètre, plaque de chargement, CBR in situ).

–Gestion de l’eau et drainage

Protéger les terrassements contre le ruissellement et l’érosion (talus enherbés, enrochements, gabions).

–Stabilité des talus

Adopter des pentes adaptées à la nature du sol (exemple : 1V/2H pour sols fins cohérents, 1V/1,5H pour sols sableux).

Vérifier les coefficients de sécurité (méthode de bishop ou jan bu) en phase de conception.

–Techniques d’amélioration des sols

Stabilisation mécanique : mélange granulométrique de sols.

Stabilisation physico-chimique : traitement à la chaux, au ciment, aux liants hydrauliques routiers.

Renforcement : géotextiles, colonnes ballastées, inclusions rigides.

Amélioration hydrique : drainage vertical (puits, mèches drainantes).

–Recommandations constructives

Planifier les terrassements en périodes sèches pour limiter la sensibilité à l’eau.

Éviter les interruptions prolongées des chantiers → risque de dégradation des plates-formes.

Mettre en place une surveillance géotechnique pendant l’exécution (auscultations, mesures de tassements, inclinomètres).

Prévoir un entretien périodique (drainage, talus, fissurations) surtout dans les zones sismiques ou sujettes au retrait-gonflement. .[4]

3.9) Conclusion

La reconnaissance et caractérisation géotechnique des sols constituent une étape incontournable dans tout projet de construction ou de génie civil. Elles permettent d'obtenir une connaissance précise et fiable du sous-sol grâce à la combinaison des essais in situ et des analyses en laboratoire. Cette démarche fournit une évaluation détaillée des propriétés mécaniques, physiques et hydriques des sols, essentielle pour la conception adaptée des fondations et la prévention des risques géotechniques.

Les essais in situ, tels que les sondages, pénétromètres, ou essais pressiométriques, donnent une mesure directe des conditions du sol dans son état naturel, facilitant un dimensionnement réaliste des fondations. Parallèlement, les essais en laboratoire sur prélèvements permettent d'affiner la compréhension des caractéristiques du sol sous contrôle rigoureux, notamment la cohésion, l'angle de frottement, la compressibilité, la plasticité et la perméabilité.

La reconnaissance et la caractérisation géotechnique des sols, tant selon le Guide Technique des Terrassements Routiers (GTR) que la norme NF (norme française) P 11-300, sont une condition nécessaire au succès des travaux de terrassement et à la pérennité des ouvrages. Cette démarche de reconnaissance caractérisation géotechnique suppose en effet d'effectuer une classification géotechnique des sols, fondée sur leur granulométrie, leur plasticité, leur état hydrique et leurs propriétés mécaniques, en particulier la résistance au cisaillement, la compressibilité et la sensibilité à l'eau.

La classification GTR fait partie de plusieurs éléments du sol (A, B, C, D), matériaux rocheux (R) et sols organiques (F) ou chacun s'inscrit dans un comportement mécanique et des aptitudes différentes pour la construction. Cette typologie permet d'orienter le choix des matériaux et des techniques de terrassement adaptées, comme le compactage, le traitement ou l'exclusion des sols non conformes

Les exigences minimales du GTR imposent des contrôles rigoureux sur la qualité des matériaux (granulométrie, teneur en eau, portance immédiate) et sur la préparation des sols en place (décapage, traitement des zones faibles), afin d'assurer la stabilité et la pérennité des remblais et couches de forme.

La reconnaissance géotechnique selon le GTR et un processus méthodologique associant essais in situ, analyses de laboratoire



Chapitre 4 : Techniques de terrassement et leur mise en œuvre



4.1 Introduction

Le terrassement désigne l'ensemble des procédés permettant de manipuler de grandes quantités de matériaux (sols, roches ou sous-produits), dans le but de modifier le relief naturel d'un terrain. Ces opérations incluent l'extraction, le transport, la mise en œuvre et le compactage des matériaux, soit pour les utiliser en remblai, soit pour les éliminer.

Les terrassements sont une étape essentielle à la préparation d'un terrain stable en vue de la construction, quelle qu'en soit la nature. Ils jouent un rôle fondamental dans la réussite des projets d'infrastructure pour plusieurs raisons :

- Préparation du terrain : les travaux de terrassement permettent de niveler et stabiliser le terrain, en éliminant les irrégularités du relief naturel.
- Mise en place des fondations : une exécution soignée des terrassements permet d'assurer la stabilité des fondations, d'éviter les risques d'affaissement ou de glissement, et d'offrir une assise durable aux structures.
- Gestion des eaux : ils contribuent à canaliser les eaux de surface et souterraines, limitant ainsi les risques liés à l'humidité (déformation des sols, corrosion, affaissements).
- Durabilité des ouvrages : en assurant la stabilité du sol, les terrassements garantissent la pérennité des constructions et la sécurité des usagers.

4.2 Types de terrassement

4.2.1 Terrassement de la grande masse

Ce type de terrassement consiste à déplacer de grandes quantités de matériaux sur l'ensemble d'une surface. Il est généralement utilisé pour :

Niveler un terrain accidenté, modifier la topographie naturelle

Créer des plateformes de travail pour des ouvrages de grande envergure (routes, barrages, zones industrielles...).

Ce type d'intervention est indispensable lorsque le projet nécessite un reprofilage important du terrain. [10]



Photo 4.2.1) Terrassement de la grande masse [28]

4.2.2 Terrassement en déblai

Le terrassement en déblai consiste à enlever les matériaux excédentaires du sol dans le but de réduire le niveau du terrain. Ce type de terrassement est indispensable lorsqu'il s'agit :

De créer des tranchées, de mettre en place des fondations, ou de réaliser des structures en sous-sol (caves, parkings souterrains, galeries techniques, etc.).

Il permet d'atteindre des couches de sol plus stables et portantes, favorisant ainsi la sécurité et la durabilité des ouvrages. Le terrassement en déblai est souvent réalisé en amont du terrassement en remblai, afin de rééquilibrer les volumes et d'optimiser l'utilisation des matériaux extraits. [10]



Photo 4.2.2) Terrassement en déblai [28]

4.2.3) Terrassement en remblai

Le terrassement en remblai est l'opération inverse du terrassement en déblai. Il consiste à ajouter des matériaux (sols, granulats, roches traitées...) dans le but d'élever le niveau du terrain ou de remplir des vides.

Ce procédé est utilisé dans plusieurs cas, notamment pour :

Remplir un sous-sol ou une excavation, construire des barrages en terre, stabiliser des zones montagneuses ou en pente, préparer le terrain pour des travaux de construction, lorsque la nature du sol existant ne permet pas une fondation directe.

Le choix et la qualité des matériaux de remblai sont déterminants pour assurer la stabilité de l'ouvrage. Ces matériaux doivent généralement être compactés en couches successives, selon des spécifications strictes, souvent définies par des guides comme le GTR (guide des terrassements routiers). [10]



Photo 4.2.3) Terrassement en remblai [28]

4.2.4) Terrassement mixte

Le terrassement mixte est une combinaison des opérations de déblai et de remblai, visant à adapter le terrain aux exigences spécifiques d'un projet.

Cette approche est souvent nécessaire lorsque le relief naturel du site est irrégulier, avec des variations de hauteur importantes. Dans ce cas :

Certaines zones doivent être excavées (déblai), tandis que d'autres nécessitent un apport de matériaux (remblai) pour atteindre le niveau souhaité.

Le terrassement mixte permet ainsi de profiler le terrain de manière équilibrée, tout en optimisant les volumes de terre déplacés. Il favorise également une meilleure gestion des matériaux sur site, en réutilisant les déblais comme remblai lorsque cela est possible, ce qui réduit les coûts et l'impact environnemental [10]

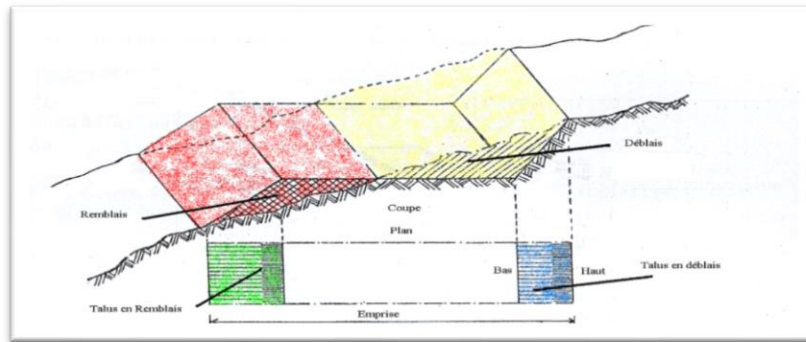


Photo 4.1.4) Terrassement mixte [28]

4.2.5) Terrassement de surface

Le terrassement de surface comprend des opérations légères et peu profondes, telles que :

Le décapage du sol végétal, l'enlèvement de la couche superficielle du sol ou de matériaux rocheux, des remblayages simples, ou encore la création de pistes d'accès temporaires.

Ce type de terrassement est généralement réalisé en phase préliminaire d'un chantier, notamment pour les petits projets ou les installations provisoires. Il permet une préparation rapide et efficace du terrain, sans modification importante de la topographie [10]

4.2.6) Fouilles

Les fouilles désignent des excavations localisées réalisées dans le sol afin d'accueillir des éléments spécifiques tels que :

Des fondations, des canalisations, ou d'autres ouvrages enterrés.

Elles se déclinent en plusieurs types, selon leur forme et leur profondeur :

- Fouilles en rigole : peu profondes et étroites, elles sont principalement utilisées pour les semelles filantes de fondation.
- Fouilles en tranchée : plus profondes et généralement linéaires, elles sont destinées à l'enfouissement de réseaux (eau, électricité, assainissement) ou à des fondations continues.
- Fouilles en excavation : larges et peu profondes, elles sont pratiquées pour la réalisation de sous-sols, caves, ou de bâtiments de grande emprise au sol.

4.3) Classification des matériaux selon le GTR

La classification des matériaux selon le guide des terrassements routiers (GTR), basé sur la norme NF (norme française) P 11-300, permet d'évaluer l'aptitude des sols à être utilisés comme remblai ou couche de forme.

Elle repose sur des critères granulométriques, hydriques et mécaniques et classe les matériaux en six grandes familles, notées d A à F.

- Classe B – sols sableux

Utilisation : peuvent être utilisés pour les remblais et les couches de forme, sous réserve d'un bon compactage.

- Classe C – sols graveleux

Nature : sols composés d'une proportion significative d'éléments grossiers (> 50 mm), mélangés à des fines. Caractéristiques :

Diamètre des éléments > 50 mm,

Passant à $80\ \mu\text{m}$ $> 12\ \%$, ou valeur au bleu $> 25\ \%$, ou fréquence (17,5) inférieure à la limite de fond de courbe.

Comportement : bonne tenue sous l'eau, résistance mécanique élevée.

Utilisation : peuvent être utilisés en remblais et en couches de forme, avec de bonnes performances.

-Classe D – sols mixtes

Nature : mélanges homogènes (peu de variance) de matériaux de types différents : sables, argiles, limons, résidus gras, concassés, etc.

Caractéristiques :

Diamètre des plus gros éléments ≤ 50 mm,

Passant à $80\ \mu\text{m}$ compris entre $0\ \%$ et $10\ \%$.

Comportement : certains composants (argiles) peuvent être sensibles à l'eau, avec une plasticité importante et une portance variable.

Utilisation : généralement non utilisables en l'état pour les remblais ; nécessitent un traitement préalable (amendement, stabilisation).

Classe E – sols organiques

Nature : sols contenant des matières organiques, comme la tourbe, des débris végétaux ou animaux, ou du phytoplancton.

Caractéristiques :

Diamètre < 50 mm,

Passant à 80 μm > 35 %.

Comportement : présence de matière organique provoque une instabilité dans le temps, pouvant engendrer des phénomènes de pompage, tassements différés, ou pertes de portance.

Utilisation : à proscrire pour les remblais ou les couches de forme, sauf cas très spécifiques avec traitement lourd.

Classe F – sols instables

Nature : tous les sols dont les éléments ont un diamètre inférieur à 50 mm qui entraînent une instabilité de masse, parfois accompagnée de mouvements du sol (glissements, tassements importants).

L'aptitude d'un sol instable à être utilisé dépend fortement de la composition exacte du mélange.

Cette nature détermine si et comment le sol peut être amélioré ou traité pour correspondre aux exigences du projet.

Ces classes sont indispensables pour juger de la capacité d'amélioration des sols d'apport en vue d'assurer un bon comportement de la structure.

4.4) Matériels et engins de terrassement

4.4.1) Types et fonctions (chargeurs, niveleuses, compacteurs...)

–Chargeurs : les chargeurs sont des outils pour charger et bouger des choses comme la terre, le sable, ou le gravier. Ils ont un grand panier à l'avant sur des bras qui bougent, qui aide à charger vite et à être agile sur les lieux de travail. Ils sont aussi bons pour remplir, égaliser un peu le sol, et bouger plein de choses avec des outils en plus.

-Niveleuses : les niveleuses aident à faire des sols bien plats et finis pour les routes et les pistes. Le plus fort chez elle est une longue lame au milieu qui peut bouger et monter pour créer des formes dures. Elles creusent des trous, raclent des pentes et, ça dépend des types, elles tassent un peu ou ont un outil GPS pour bouger toutes seules. Types de niveleuses : – grosses pour les grands chemins et les ports – Petites pour les petits chemins et la terre de ferme – celles qui bougent bien ou avec quatre grosses roues pour tenir bien droit ce qu'elles font : – mettre le sol grosso modo puis bien droit – finir des couches de terre, gravier ou asphalte – creuser et racler des pentes

-Compacteurs : les compacteurs font les sols durs pour qu'ils tiennent bien et ne se tassent pas tard. Ils poussent fort sur le sol avec un ou plus rouleaux, parfois avec des gros pieds pour pousser loin dedans. Choisir un compacteur dépend du type de truc au sol (dur, peu dur, avec asphalte) et de combien épais

-Tableau engin

Engin	Fonction	Types	Applications
Chargeur	Chargement, manutention	Sur pneus, sur chenilles, mini	Déblaiement, remblaiement, déplacement matériaux
Niveleuse	Nivellement de précision	Classique, automatique	Finition, talus, finition route et plateforme
Compacteur	Tassement et stabilité	Pneus, billes lisses, pieds dameurs, vibrant	Compactage sol, assises de chaussées, remblais



Photo 4.4.1) Types et fonctions (chargeurs, niveleuses, compacteurs...) [29]

4.4.2) Choix en fonction du terrain et du rendement attendu

Le choix du bon outil pour creuser et bouger la terre dépend du type de sol, de ce qu'on peut atteindre, du beaucoup à bouger, et de ce qu'on veut faire vite. Voici une idée claire pour vous aider (sur la gestion des sols, leur type, comment creuser, presser, et les outils) :

-Choix par type de sol Sols mous (comme l'argile, la terre fine, le sable) :

Les chargeurs sur roues sont tops sur sols durs ou secs car ils bougent vite.

Les chargeurs à chenilles tiennent mieux et sont stables sur sols mous, mouillés ou pas stables.

Les pelles sur chenilles sont bonnes pour creuser et bouger des trucs lourds ou un peu durs.

Les compacteurs à pied ou vibrants pressent bien les sols durs, tandis que les rouleaux à roues vont bien sur les sols à grains.

Sols durs ou un peu durs : on prend des pelles avec des casse-pierres ou marteaux pour casser les roches.

Les bulldozers poussent ou bougent les gros trucs.

Les camions prennent les gros et lourds.

Zones étroites ou pentes :

Des petits engins comme mini pelles, petits chargeurs pour bouger dans les petits endroits.

Chargeurs à chenilles pour plus de tenue.

On pense à la pente pour être sûr et efficace.

- Choix par ce qu'on veut faire Grands places et gros tas :

Machines grandes (grandes pelles, grands bulldozers, grands camions).

Outils pour faire vite (ex. pelle de 1,5 m³, bulldozer de 3 m).

On fait tourner vite entre les outils (ex. pelle + camions) pour ne pas perdre de temps.

Chantiers pressés : on prend des outils très efficaces avec des outils extra (compacteurs rapides pour presser vite et bien).

On planifie bien et on coordonne tout.

Petits chantiers ou trucs délicats : mini pelles, petits chargeurs, petites plaques pour bouger avec soin et passer partout.

Moins vite mais plus précis et on garde le sol en bon état.

– Autres points type de pressage :

Sols durs → compacteurs à pied ou vibrants.

Sols à grains → rouleaux tandem ou à roues pour presser de façon égale et rapide.

Zones étroites → plaques vibrantes réversibles pour bien contrôler.

Où et combien de place : sur sols faciles et grands, grands engins font mieux.

En ville ou endroits étroits, on prend des petits engins, simples mais moins gros.

Météo et autour : sols mouillés veulent des chenilles pour ne pas s'enfermer.

Moins de bruit et secousses en choisissant bien les engins.

4.4.3) Productivité et critères de sélection : a productivité et le choix des engins de terrassement sont très liés au type de sol, aux états sur le site, à la taille du projet, et aussi aux buts Tech et d'argent. Voici les points clés pour bien saisir et mieux choisir les machines pour une productivité top :

– Productivité des engins de terrassement La productivité vient en gros du chiffre de m³ déplacés par heure pour chaque machine.

Ce chiffre est changé par : la taille du seau ou de la cuve (pelle, chargeur).

Le type de sol (dur, mou, plein de roches) qui change comme on prend et combien on met.

Le temps du cycle de boulot (temps pour charger, bouger, déchargé).

Les états du lieu et d'accès (place, pente, blocs).

Le temps vrai de boulot sur le temps total.

– Choisir les engins type et type du sol : Sols durs (argile, terre fine) doivent avoir des compacteurs ou plaques qui vibrent pour bien tasser.

Sols avec grains vont mieux avec des rouleaux lisses ou à air pour tasser en surface.

Sols avec roches ont besoin de pelles avec casse-roches ou gros véhicules pour nettoyer.

Taille et complexité du site : grands lieux veulent de gros engins (grande pelle, grand chargeur, gros rouleaux) pour plus de m³/h.

Petits espaces veulent des petites machines (mini pelles, chargeurs petits).

Type de boulot : creuser, porter, tasser, mettre à niveau, etc., chaque tâche a souvent son type d'engin.

Accès et sûreté : pente, blocs, aller et venir sur site choisi pour l'efficacité et le sûr.

Poids et volume à porter : choix selon ce que les machines peuvent porter et le total de volume à finir dans le temps donné.

Coût d'emploi et entretien : impact direct sur l'argent du projet, à penser dans le choix.

Tech dedans : guidage GPS, auto, systèmes de contrôle pour mieux viser et moins d'erreurs. [11]

4.4.4) Engins de compactage

4.4.4.1) Compacteurs à pneus lisses : sols granulaires

Les compacteurs à pneus lisses sont des machines spéciales pour rendre des sols et des matériaux en petits morceaux plus durs. Ils ont des rôles et des traits précis pour les couches tout près de la surface et les travaux de fin dans le nivelage et les routes.

Traits des compacteurs à pneus lisses Pneus d'air : plusieurs grands pneus en caoutchouc lisse qui touchent bien le sol. Les pneus se pressent pour suivre la forme du sol, aidant à rendre le compactage uniforme et doux.

Manière de compacter : surtout par pression calme, avec un peu de pétrissage grâce à l'air dans les pneus. Certains types mettent aussi la vibration pour aider à rendre le sol plus dur.

Capacité de bouger : ils peuvent se déplacer bien sur divers terrains, plus doucement que les compacteurs à rouleaux en métal, ce qui évite de casser ou de blesser les couches rendues dures.

Usage et rôles bon pour les sols avec petits morceaux comme du sable, des cailloux, des mélanges, et des choses avec du goudron.

Usés pour rendre dures les couches tout près de la surface (couches de base, fines couches, couches de goudron).

Ils aident à bien finir la surface, en la lissant et en fermant le matériau durci, ce qui est important pour que la route ou la plateforme dure longtemps.

Ils sont souvent usés avec d'autres compacteurs à rouleaux lisses ou à pied pour rendre tout le sol uniformément dur.

Leur douceur est top sur des surfaces sensibles ou de fortes vibrations peuvent faire du mal (comme des goudrons fins, des couches de base fragiles)



Photo 4.4.4.1) Compacteurs à pneus lisses [30]

4.4.4.2) Rouleaux à pied dameurs : argiles plastiques

Les rouleaux à pied sont bons pour tasser les sols durs comme l'argile.

Comment ils marchent et leurs traits Ils tassent le sol fort par leurs pieds en métal qui rentrent dans le sol et cassent les morceaux pour bien compacter.

Ce type de rouleau crée une force fixe, mais aussi des secousses qui aident à tasser plus en bas.

Les pieds des rouleaux ont des formes ou des patins avec des plans (SP1, SP2, SP3) qui changent le poids par unité de tambour, fait pour le type et l'épaisseur du sol à tasser.

Usage pour l'argile, qui est très plastique et peut gonfler, a besoin de beaucoup d'énergie pour être tassée, ce que ces rouleaux font bien.

Ils tassent bien l'argile, des couches minces aux épaisses, en réduisant sa capacité de se presser et de laisser passer de l'eau, tout en rendant le sol plus solide.

La bonne vitesse pour marcher est autour de 10 km/h ; aller plus vite réduit la qualité du tassage.

Ils peuvent tasser de grands espaces bien et de façon régulière.

Il faut s'assurer que le sol ne bloque pas les espaces entre les pieds, sinon le rouleau perd son effet de tassage fort



Photo 4.4.4.2) Rouleaux à pied dameurs [31]

4.4.4.3) Compacteurs vibrants : couches granulaires

Les compacteurs qui vibrent sont bons pour tasser des tas de grains, tels que sable et graviers dans des travaux de sol et des routes.

Mode de marche Ils joignent la force du poids et des secousses par un ou deux gros cylindres avec des pièces spéciales.

Ces secousses remuent bien les grains, coupent les vides d'air, et rendent plus dense la matière tassée.

On peut ajuster à la fois l'amplitude et la vitesse de secousses pour s'adapter aux différents types de sol.

Traits et emplois couches de grains : sable, gravier, matériaux broyés, asphalte.

Le gros compacteur vibrant est surtout mis pour rendre solide les couches en dessous et donner une bonne tenue.

Le compacteur à cylindre lisse arrange la fin du travail sur le dessus pour que la couche soit uniforme et lisse.

On les voit souvent avec des compacteurs à pneus pour bien finir la surface. [11]



Photo 4.4.4.3) Compacteurs vibrants : couches granulaires [31]

4.4.4.4) Compacteurs mixtes des terrassements

Les engins mixtes qu'on utilise pour arranger le sol ont un cylindre lisse qui vibre à l'avant et des pneus derrière. Cela permet à l'engin de bien presser divers types de sols, surtout ceux qu'on trouve dans les travaux de mise à niveau du sol. Cette paire est bonne car elle combine le pressage par vibration du cylindre et le malaxage par les pneus. C'est parfait pour préparer les sols avant de construire des routes ou autres gros travaux.

Pour arranger le sol, le but est de chasser l'air et l'eau dans le sol pour le rendre plus fort et stable pour les voitures et le mauvais temps. Les engins mixtes font bien ce travail car ils sont bons avec les sols gluants (comme l'argile) et les sols lâches (comme le gravier et le sable) qu'on voit souvent dans ces travaux. Avec ces engins, on peut bien préparer le sol avant de poser les bases de routes.

Par exemple, le modèle VX0/PL0 combine force et vibrations qu'on peut régler pour bien travailler sur divers sols. Il pèse environ 4 tonnes, a des vibrations qu'on peut changer et il travaille sur une largeur de presque 1,38 mètre. À cause de cela, il est très utilisé sur les gros chantiers de routes ou d'usines où il faut bien arranger et stabiliser le sol. [11]

4.5) Compactage : taux et humidité optimale

Le but du compactage des sols est de les rendre très denses, pour qu'ils soient fermes et solides quand on construit dessus. Il y a deux idées clés dans ce travail : le taux de compactage et l'humidité qui est la meilleure.

Taux de compactage

Le taux de compactage montre combien le sol est dense sur place par rapport à la densité la plus haute qu'on a trouvée au laboratoire (test Proctor). On le dit en pour cent. Si on dit un taux de compactage de 95%, cela veut dire que le sol sur place doit être au moins 95% aussi dense que ce maximum au laboratoire.

Ce taux aide à faire en sorte que les remblais et routes restent bons longtemps.

Humidité optimale

L'humidité optimale est quand il y a juste assez d'eau dans le sol pour que lors du compactage, il soit le plus dense possible. Chaque type de sol a sa propre humidité idéale, trouvée avec le test Proctor.

À cette humidité, l'eau aide à coller les grains de sol sans les séparer. Si le sol est trop sec, c'est dur de le tasser bien. S'il y a trop d'eau, il ne devient pas vraiment dense, car il est trop mou.

Le test Proctor fait tasser des bouts de sol avec différentes quantités d'eau, puis on mesure combien ils sont denses. On relie ces points pour voir quelle est la densité la plus haute et la meilleure humidité.

4.5.1) Type de terre avec grains (sables, cailloux) : les terres avec grains, comme les sables et les cailloux, sont spéciales pour tasser : ce sont des sols avec gros bouts, soit ronds ou avec coins (sables, graviers, cailloux).

Leur courbe de tassement (type Proctor) est souvent plate, ce qui veut dire que la densité qu'on peut avoir change moins avec l'eau que pour les sols fins (argiles). Donc, tasser est moins touché par l'eau idéale, et ces sols vont bien avec les changements d'eau quand on tasse.

On tasse surtout par secousse, cela aide à faire se toucher les grains en enlevant les trous dans le matériau. Pour ça, on se sert de rouleaux qui vibrent, de plaques qui vibrent ou de rouleaux à pneus.

Ces sols sont bons pour densifier et ont souvent une forte densité sèche.

La façon de presser dépend de la forme et du type des grains : les grains avec coins se cassent plus vite sous grand poids que les grains ronds. Casser les grains peut aider à presser les sols avec grains et à les mettre en ordre sous poids.

On peut utiliser le tassement par gros choc (lâcher un poids lourd) pour tasser ces sols en profondeur, ce qui les rend plus porteurs et stables.

En travaux, ces sols sont pris surtout pour remplir et créer des couches de base.

4.5.2) Type de machine ce qu'on prend dépend des deux points là-haut :

Le type de machine à presser le sol change selon ce que le sol est (genre de terre, taille des grains, humide) et ce que l'on veut (profondeur pressée, densité voulue). Pour les terres avec des grains comme sables et cailloux, voici les grands types de machines :

Plaques vibrantes

Bon pour les sols mous comme sables, graviers, et terres légères.

Pressent par vibrations rapides et de petite taille, bien en surface.

Servent pour les petits boulots, mettre à neuf, petits espaces.

Facile à bouger, moteur à gaz ou électrique.

Compacteurs vibrants (rouleaux)

Plus lourd, vibrations grandes.

Bon pour gros boulots, profondeur pressée grande.

Bien pour presser les sols avec grains en remplissant les espaces vides.

Compacteurs pneumatiques (rouleaux à pneus)

Avec des pneus gonflés pour presser le sol.

Moins seuls sur sables et cailloux, mieux avec un cylindre vibrant (compacteur mixte).

-Compacteurs hybrides

Mixent plusieurs méthodes (vibration + pneumatique par exemple).

Offre plus de choix selon le sol.

Il faut aussi penser à : le poids de la machine, le plus lourd est souvent mieux pour la densité voulue.

La fréquence et la taille des vibrations, bon pour la taille des grains du sol.

La zone à faire et les limites d'accès (petits espaces ou grandes étendues).

4.5.3) Compactage (GTR) : c'est quand on suit des règles spéciales du (guide technique routier), un livre très important en franc par tout ce qui concerne faire des routes.

Voici les grands points sur le compactage d'après le GTR :

C'est quoi le compactage : c'est quand on diminue l'espace vide dans un matériau pour le rendre plus fort et stable longtemps.

Types de machines pour compacter :

Machines statiques (juste lourd, sur pneus ou avec pieds)

Machines avec vibration (lourd + vibrations)

On les utilise tous les deux en fonction du type de matériau et à quelle profondeur travailler.

Buts du compactage : le GTR (guide des terrassements routiers) dit pourquoi utiliser les matériaux (pour remplir, faire une base, couvrir des tuyaux) avec un taux de compaction en pourcentage de la densité Proctor maximale.

Tests sur place : avec des mesures de densité moyenne et densité au fond.

Comment compacter : avec des règles comme épaisseur de la zone à compacter, à quelle vitesse passer, combien de fois passer, etc. ces règles dépendent du matériau et de la machine.

Pourquoi suivre le GTR (guide des terrassements routiers) : cela aide à éviter des problèmes (comme craquelures, affaissements...) et ça rend les travaux plus durables.

Ainsi, le GTR (guide des terrassements routiers) met en ordre comment on doit organiser le compactage en classifiant les matériaux, en choisissant le bon équipement, et en contrôlant bien les travaux pour assurer la qualité des remplis et bases pour les routes.

4.6) Contrôle qualité et déroulement du chantier

La qualité et le suivi d'un site de terrassement se basent sur une planification stricte et de nombreuses règles pour être sûr que tout est fait comme prévu.

Voici les points importants : plan et organisation de qualité

Construction d'un plan d'assurance qualité (PAQ) fait par le chef avant de commencer les travaux.

On définit comment contrôler (type 1 : plus de contrôle externe, type 2 : contrôle interne par la compagnie avec un Laboratoire).

On met en place un guide de qualité (SDQ (service départemental de la qualité) et un plan qui montre les points à bien vérifier selon le site et les matériaux.

Contrôle des matériaux et des étapes

Tests de sol et tests de matériaux (taille, eau, densité max sèche).

Mesures régulières sur le site (densité, humidité, solidité) pour confirmer que les matériaux sont bien mis.

Tests spéciaux selon l'endroit : tests de pénétration, densité, compactage Proctor sur site, tests de granulométrie, etc.

Suivi et vérification pendant les travaux

Surveillance de l'épaisseur des couches, compactage et humidité.

Suivi des actions (notes sur les problèmes, rapports de tests).

On arrête de travailler à certains moments pour vérifier avant de continuer.

Gérer les problèmes

On trouve vite les problèmes (terrain instable, mauvais compactage, humidité mauvaise).

Corrections immédiates (correction, redémarrage).

Documentation précise.

Fin et clôture

Rapport final avec tous les résultats de contrôles.

Validation par le chef ou un organisme de contrôle externe.

Dossier complet avec les tests, contrôles et observations de qualité

4.6.1) Étapes du chantier de terrassement

Voici les pas pour faire un chantier de terrassement :

Regarder et préparer le sol

On étudie le sol et les défis qu'il pose.

Un expert pose des marques pour bien voir où travailler.

Enlever la terre du haut

On retire la couche riche du haut (vers 30 cm) pour la garder et peut-être la réutiliser plus tard.

Creuser

On creuse jusqu'à la profondeur voulue (pour bases, trous, fossés).

On enlève ou garde la terre tirée de là.

Gérer l'eau

Installer des systèmes pour gérer l'eau de pluie ou du sous-sol.

Faire en sorte que l'eau s'écoule bien du sol.

Fouiller et faire des fossés

On fait les fondations (simples ou séparées).

On met en place des réseaux pour l'assainissement et autres.

Mettre peut-être un géotextile

Cela sépare et protège la terre d'origine des remblais.

Remblayer et compacter

On remplit les zones creusées avec les bons matériaux et on presse par couches.

Mettre le sol au niveau et préparer pour construire.

Derniers ajustements

Niveler pour la dernière fois, stabiliser, et préparer pour la grande construction ou décoration dehors.

Ces étapes aident à bien préparer le sol, assurant que tout ce qui est construit dessus est stable, solide, et durable. [12]



Photo 4.6.1) Étapes du chantier de terrassement [32]

4.6.2) Étapes déblai et remblai par engins

Voici les pas du déblai et du remblai, liés aux outils utilisés pour chacun sur un site de terrassement : Mise en place et bordure du site

Gestes à la main ou avec de petits outils légers (mesures, coupes).

Déblai (sortie de matières)

Pelle mécanique (à fluide) pour creuser et prendre des terres ou pierres.

Petite pelle pour travaux de lieux serrés ou entrées étroites.

Chargeuse pour rassembler et charger les matières sorties.

Bulldozer pour pousser, mettre à niveau, et bouger les matières sur de petits chemins.

Mouvement des matières

Camions (bennes) avec ou sans joint pour longs trajets.

Décapeuses pour creuser et bouger en même temps sur moyennes distances.

Petits camions pour mouvement en lieu étroit.

Préparation de l'endroit de remblai

Bulldozer pour nettoyer, mettre à niveau la base du remblai.

Peut-être mettre un tissu géo ou couche de protection.

Remblai (placement des matières)

Bulldozer pour étaler et pousser le matériau de remblai.

Chargeuse pour mettre le matériau en place.

Compactage

Rouleaux vibrants (en tandem) pour compactage primordial des granulés.

Compacteurs à air pour terres argileuses ou mixtes.

Plaques vibrantes pour lieux serrés ou compactage ciblé.

Nivelage et finition

Niveleuse pour garder la planéité, inclinaison et forme finale de la plateforme.

Rouleaux pour la finition de surface.

Ces étapes et équipements sont décidés selon le type de sol, les volumes à traiter et les exigences du site, pour une réalisation qui marche bien, conforme et qui dure.



Photo 4.6.2) étapes déblai et remblai par engins [33]

4.6.3) Contrôle de compactage avec terrassements

Le contrôle du compactage sur un site de terre est un pas clé pour tenir sûr et bon le travail fini.

Voici les grands moyens et les usages courants :

Contrôle tout le temps du compactage

Suivi de près des détails du compactage avec des outils « contrôlographes » qui comptent le ratio Q/S (force amenée par le compacteur pour chaque zone de vibration).

Aide à vite ajuster les réglages et le nombre de tours pour toucher la masse souhaitée.

On l'utilise surtout sur les talus de route avec le guide technique routier (GTR).

Tests de masse et d'eau sur place

Méthode nucléaire (densimètre) : teste vite la masse sèche et l'eau dedans.

Tests à plaque dynamique ou par pénétration : évalue par côté la fermeté et même look du sol tassé.

Test avec pénétromètre dynamique (ex. PDG 1000) pour fossé et talus, selon les normes XP P 94-063 et XP P 94-105.

Tests en laboratoire pour référence

Test Proctor (normal ou changé) pour trouver la masse sèche max et l'eau idéale du matériel.

Base pour mettre les buts de tassement sur le site.

Vérifier visuels et de forme

Check de la même forme des couches, épaisseurs, et pas de tassements de coin.

Check des mesures et pentes par relevés de terre.

Docs et final

Note et rapport des tests et mesures, avec analyse des chiffres.

Bon travail par le chef de projet [12]

4.7) Achèvement des terrassements

L'achèvement des travaux de sol est la dernière étape de la préparation d'un terrain pour bâtir ou arranger. Cela veut dire que tout le travail de sol prévu est fini comme il faut, selon les plans et les détails techniques, et que le terrain est prêt pour les prochaines étapes du projet.

Vérifier et valider les niveaux et pentes on regarde si le terrain suit bien les niveaux et formes fixés, avec des ajustements si on doit pour un bon écoulement de l'eau.

Bien tasser le sol on fait un tassage dur pour s'assurer que le sol est stable, peut porter des poids et pour éviter qu'il ne s'affaisse plus tard, et on fait des tests de qualité (densité, humidité).

Gérer les matières en trop on enlève ou on recycle les débris et d'autres choses qu'on ne veut pas, et on nettoie où on a gardé ces suffis pour un temps.

Mettre des protections on peut poser des textiles spéciaux, des membranes ou d'autres couches si le chantier en a besoin.

Nettoyer et sécuriser le lieu on enlève les machines, des outils temporaires, et on ferme bien les accès pour que les travaux puissent se poursuivre.

Cette étape fait que le terrain est stable, suit les règles techniques et est prêt pour les prochains travaux, en assurant donc la longue vie et la sécurité de ce qu'on va construire après

4.8) Conclusion

Les techniques de terrassement utilisées et mises en œuvre constituent une phase clé pour garantir la réussite et la pérennité de la construction de tout projet. Elles portent essentiellement sur le déblai, le remblai, le nivellement des surfaces, le compactage des sols avec les équipements adaptés que sont les pelleteuses, les bulldozers, les compacteurs et éventuellement, les nouvelles technologies assistées par le laser de nivellement.

Synthèse des techniques de terrassement du GTR (guide des terrassements routiers)

Classification des matériaux : depuis le GTR (guide des terrassements routiers)

, les matériaux sont classés par catégorie (A, B, C, D, R et F) au regard de leur nature et de leurs caractéristiques géotechniques, particulières ou non, leur destin (remblai ou couches de forme) pourra, d'ores et déjà, être déterminé et appréhendé dans les conditions d'utilisation qui leur sont spécifiques.

Conditions d'utilisation des matériaux : par ailleurs, le guide spécifie les conditions d'utilisation qui doivent les présider portant sur la teneur en eau, les conditions de compactage, l'épaisseur des couches à respecter, elles sont des notions essentielles à respecter pour assurer la stabilité et la performance des ouvrages.

Compactage des remblais, des couches de forme : le GTR (guide des terrassements routiers)

Ne laisse rien dans l'arbitraire en matière de méthode de compactage, genre d'engins à utiliser (compacteurs à pied de mouton ou rouleaux vibrants) évaluant à partir d'expérimentations les mécanismes de spécification de la norme exigée pour chacun des matériaux, engins, méthodes... correspondants



Chapitre 5 : Organisation de l'assurance qualité dans les travaux des terrassements



5.1 Introduction

Les travaux de terrassement sont principaux qui ouvre leurs chemins aux œuvres d'infrastructures de génie civil (routes, barrages, plateformes industrielles, ouvrages hydrauliques, etc.). L'exécution de la qualité de ces travaux va directement conditionner la stabilité, la durée et la sécurité de l'ouvrage. N'importe quelle insuffisance dans la préparation, dans le choix des matériaux, dans le compactage ou le drainage peut rendre des désagréments importants comme les tassements différentiels, les instabilités de talus, les fissurations ou même les dégradations des structures à un âge trop jeune.

Que la chose soit ainsi, le recours à l'assurance qualité en tant qu'outil de gestion ne peut être évité. C'est une fonction qui prévoit l'organisation, la planification, le contrôle ainsi que la promotion de tous les processus liés aux travaux de terrassement, en assurant que, pour chaque procédé, on soit aux normes techniques, spécifications du contrat et le respect des bonnes pratiques du génie civil en matière des travaux de terrassements.

L'organisation de l'assurance qualité dans les terrassements s'appuie essentiellement sur trois points forts indissociables : la planification (études géotechniques, choix des matériaux, définition des méthodes de mise en œuvre),

Le contrôle de l'exécution (suivi du compactage, vérification de l'humidité, contrôle des plateformes et des remblais),

Et l'évaluation continue (contrôles in situ, essais de laboratoire, mise à jour du dossier des ouvrages exécutés).

Elle est l'acte qui reconnaît que toute la chaîne d'intervention du projet : maître d'ouvrage, bureau d'études, entreprise de terrassement et laboratoire de contrôle est engagée. Le but ultime est la réalisation d'un ouvrage conforme, fiable et durable, tout en réduisant au minimum les risques de pathologies ainsi que les surcoûts liés aux reprises ou réparations

5.1.1) Référentiel de qualité : GTR (guide des terrassements routiers), normes NF (norme française) P 11-300

Le GTR (guide des terrassements routiers) est inestimable ment la porte d'entrée du système de référence en France pour la conception et la réalisation des terrassements routiers.

Définit : les classes de matériaux en relation avec leur usage en objets de terrassements (argiles, sables, graves, limons, sols rocheux, sols traités, etc.).

Les règles de mise en œuvre (préparation, couches de forme, compaction, tolérances).

Les contrôles qualité devant être réalisés (essais en laboratoire et sur site).

Les matériaux sont caractérisés d'après leur fonction et leurs propriétés géotechniques.

But : garantir l'efficacité et la stabilité mécanique des remblais et couches de forme routières.

Le GTR (guide des terrassements routiers) est donc d'une part, un outil de normalisation et de contrôle qualité qui permet de dresser la liste des différentes pathologies liées aux sols (tassements, gonflements, déformations) et par ailleurs, de prévenir ces dernières.

-La norme NF (norme française) P 11-300

Une norme française de référence : « classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières ».

Les indications de la norme comprennent :

Différentes catégories de sols et roches suivant leur granulométrie, plasticité, sensibilité à l'eau et résistance.

Commentaires sur l'utilisation.

Propositions pour l'identification des matériaux (Proctor, CBR, limite d'Atterberg, granulométrie, etc.).

-Les documents relatifs à la qualité jouent un rôle clé

Ce sont là des documents conformant la construction selon les standards internationaux à travers des cadres normatifs.

Ces derniers permettent : la standardisation des pratiques entre commanditaires, concepteurs et entreprises, la garantie de la qualité et de la durabilité des terrassements,

La réduction des différends portant sur les malfaçons et les pathologies. [12]

5.1.2) Intégration de la qualité dans toutes les phases du projet

L'assurance qualité ne doit pas être envisagée comme une opération ponctuelle ou isolée, mais comme un processus global intégré au cycle de vie du projet. Pour les terrassements, chaque étape, des études préliminaires à la réception des travaux, doit être planifiée, suivie et vérifiée afin de garantir la conformité aux exigences techniques et normatives.

Phase de conception et d'études

Des études géotechniques profondes (forages, essais in situ et en laboratoire) sont réalisées. Des spécifications techniques conformes aux documents de référence (GTR (guide des terrassements routiers), NF (norme française) P 11-300) sont définies. Des méthodes de mise en œuvre adaptées aux sols rencontrés sont sélectionnées. Les risques géotechniques (affaissements, gonflements, instabilités) sont analysés.

–Phase de préparation du chantier

Des procédures de contrôle qualité sont planifiées. Les carrières et les zones d'emprunt de matériaux sont validées. Un plan d'assurance qualité (PAQ) (plan d'assurance qualité) précisant les responsabilités, les essais à réaliser et la traçabilité des contrôles est mis en place.

– Phase d'exécution des terrassements

Un suivi continu du compactage (essai Proctor, CBR (California Baring Ratio), densité in situ) est effectué. L'humidité des sols avant mise en œuvre est vérifiée. La conformité des matériaux est contrôlée (granulométrie, portance, plasticité). Les résultats sont consignés dans le dossier d'exécution des travaux (DOE) (dossier des ouvrages exécutés).

–Phase de contrôle et de réception

Les derniers essais de conformité sont effectués (contrôles géotechniques, nivellement et inspection des talus). La conformité des travaux aux spécifications contractuelles est vérifiée. Le rapport de conformité est rédigé et validé par le maître d'ouvrage.

Phase d'exploitation et de suivi après travaux

Un suivi périodique (inspection visuelle, auscultations et observation d'éventuels tassements ou glissements) est mis en place. Le retour d'expérience (REX) permet d'améliorer les pratiques de terrassement futures. [13]

5.2) Rôle du Plan Assurance Qualité (PAQ)

Un plan d'assurance qualité (PAQ) est un document contractuel et opérationnel qui décrit l'ensemble des actions mises en œuvre par une entreprise pour garantir la conformité des travaux aux exigences techniques, normatives et contractuelles. Dans ce type de projets, il constitue le principal outil de contrôle qualité.

–Objectifs du Plan d'Assurance Qualité

Le plan d'assurance qualité identifie les activités à mettre en œuvre pour prévenir et maîtriser les erreurs lors des travaux de terrassement.

Son objectif est de garantir la conformité des travaux réalisés aux exigences spécifiées dans les spécifications (telles que les normes GTR (guide des terrassements routiers) et NF (norme française) P 11-300)

Ce plan fournit une définition commune entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'entreprise.

–Contenu du plan d'assurance qualité

Un plan d'assurance qualité bien conçu doit préciser les éléments suivants :

Les responsabilités et les rôles des différentes parties prenantes (chef de projet, laboratoire, contrôle qualité) ;

Les procédures de mise en œuvre et de supervision (telles que les procédures de compactage, les inspections, etc.) ;

Activités d'essais et d'inspection (exigences, fréquence et critères d'acceptation).

Procédures de suivi (fiches de contrôle, journaux et DOE (dossier des ouvrages exécutés).

Procédures en cas de non-conformité (actions correctives et préventives).

– Rôle opérationnel du plan d'assurance qualité

Assurer la gestion des risques géotechniques (affaissement, instabilité des talus, retrait et gonflement).

Établir une structure organisationnelle claire pour gérer les relations entre les différentes parties prenantes (chef de projet, entrepreneur et laboratoire d'inspection).

Rôle important dans l'amélioration de la démarche qualité en valorisant les résultats et l'expérience acquise.

Fournir un support documentaire en cas de litige ou d'audit externe.

Avantages du projet d'excavation

Réduction de l'incidence des défauts et des symptômes pathologiques (fissuration, glissement et affaissement).

Une partie des coûts sera consacrée à l'amélioration de la prévention des infractions, plutôt

Grâce à la clarté du projet, le calendrier sera respecté...

Ainsi, la durabilité et la stabilité des travaux d'excavation seront assurées.

5.2.1) Etapes du plan assurance qualité (PAQ)

Le plan assurance qualité (PAQ) est un processus graduel couvrant l'ensemble des phases d'un projet de terrassement. Sa conception et sa mise en œuvre passent par plusieurs phases essentielles :

Élaboration du PAQ (plan assurance qualité)

L'entreprise rédige le plan conformément aux exigences du marché (normes CCTP ((cahier des clauses techniques Particulières), GTR (guide des terrassements routiers), NF (norme française) P 11-300) spécifiées par le client. Elle définit également l'objectif qualité, les responsabilités et les ressources à mettre en œuvre. La validation par le client ou l'architecte est effectuée avant le début des travaux.

– Mise en place organisationnelle

Nomination d'un responsable qualité sur site.

Formation et sensibilisation du personnel aux procédures qualité.

Mise en place des documents de suivi (fiches de contrôle, comptes rendus, etc.).

–Phase d'exécution et de contrôle

La réalisation des procédures de prévision (contrôle de l'eau, compactage, essais en laboratoire et sur le terrain) est également requise.

Réalisation d'essais et de contrôles périodiques selon le plan défini (Proctor, CBR, pressiomètre, etc.).

Mise en œuvre d'actions correctives et préventives basées sur le suivi de la conformité (non-conformités de traitement).

–Suivi et traçabilité

Production de la documentation de contrôle (rapports d'essais, journaux de chantier ou registres de compactage).

Archivage des résultats d'essais dans le dossier qualité du site.

Envoi régulier de rapports au client.

Vérification et audit qualité

Contrôles internes par le responsable qualité.

Éventuels audits externes par le maître d'ouvrage, le client ou les organismes de contrôle.

Ces audits vérifient le respect des exigences du contrat et des normes. [14]



Photo 5.2.1) Etapes du plan assurance qualité (PAQ) [34]

5.3) Organisation du contrôle qualité sur chantier

Le contrôle qualité sur chantier constitue un élément central de la réussite des travaux de terrassement. Il vise à garantir que les matériaux, les méthodes et les ouvrages réalisés respectent les exigences du cahier des charges, des normes en vigueur (GTR (guide des terrassements routiers), NF norme française P 11-300, AASHTO American association of state highway and transportation official) et du plan assurance qualité (PAQ).

-Objectifs du contrôle qualité

Vérifier la conformité des matériaux et des procédés de mise en œuvre.

Assurer la stabilité, la portance et la durabilité des terrassements.

Détecter rapidement toute non-conformité pour éviter des désordres ultérieurs.

Fournir une traçabilité technique et documentaire.

-Acteurs impliqués

Maître d'ouvrage : fixe les exigences et valide les résultats.

Maître d'œuvre / bureau de contrôle : supervise et coordonne le processus qualité.

Entreprise exécutante : met en œuvre les travaux et effectue le contrôle interne.

Laboratoire de contrôle : réalise les essais en laboratoire et in situ.

Responsable qualité chantier : centralise, valide et transmet les résultats.

–Étapes du contrôle qualité, contrôles préalables

Reconnaissance géotechnique du site.

Vérification de la nature et de la qualité des matériaux (granulométrie, limites d'Atterberg, teneur en eau).

Validation des plateformes et couches de fondation.

Contrôles en cours d'exécution

Suivi de l'humidité et du compactage (essais Proctor, densité in situ).

Contrôle de l'épaisseur et de la régularité des couches.

Vérification des engins utilisés et du mode de mise en œuvre.

Contrôles de réception

Essais de portance (CBR, essai à la plaque, pressiomètre).

Vérification de la stabilité, de la géométrie et de la conformité aux plans.

Établissement du procès-verbal de réception.

–Moyens et outils utilisés

Essais in situ : pénétromètre, densitomètre, essai à la plaque, pressiomètre.

Essais en laboratoire : Proctor normal ou modifié, CBR, granulométrie, limites d'Atterberg. [14]

Documents de suivi : carnet de compactage, fiches de contrôle, rapports d'essais, DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés).

5.3.1) Mise en place du plan d'assurance qualité (PAQ)

La mise en œuvre d'un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) est une étape fondamentale de l'organisation et du suivi de la qualité des travaux d'excavation. Il s'agit d'un document contractuel, élaboré par le maître d'ouvrage, qui précise les moyens humains, matériels et méthodologiques à mettre en œuvre pour garantir la conformité des travaux aux exigences normatives et contractuelles (notamment les normes GTR, la norme NF (norme française) P 11-300 et le cahier des charges du maître d'ouvrage).

– Objectifs principaux

S'assurer de la conformité des matériaux et des procédés aux spécifications techniques.

Prévoir les processus de suivi, d'essais et de vérification nécessaires.

Assurer la traçabilité et la transparence des processus mis en œuvre.

Éviter les risques de malfaçons, d'interruptions et de surcoûts.

– Contenu type d'un plan d'assurance qualité

Un plan d'assurance qualité pour les travaux d'excavation comprend :

Description du projet et parties prenantes : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises, laboratoires.

Organisation qualité : nommer un responsable qualité et définir les responsabilités de chaque partie prenante.

Procédures et méthodes d'inspection : essais de compression (Procter, CBR), essais de densité sur site, analyse granulaire et surveillance des couches.

Planification des inspections : fréquence et lieu des essais et inspections.

Matériels et ressources : machines, laboratoires et instruments de mesure.

Gestion documentaire : rapports, fiches de suivi et registres de non-conformité

Plan d'actions correctives : mesures visant à corriger les anomalies observées.

– Étapes de mise en œuvre

Un plan d'assurance qualité est élaboré par l'entreprise et conforme au cahier des charges.

Approuvé par le chef de projet et par le maître d'ouvrage.

Information des différentes parties prenantes sur site.

Mise en œuvre sur site avec un suivi rigoureux.

Mises à jour régulières en cas de modifications du projet ou d'observations sur site.

– Avantages attendus

Meilleur contrôle qualité et sécurité des travaux d'excavation.

Réduction des délais et des coûts de reprise.

Pérennité des travaux grâce à une mise en œuvre conforme au cahier des charges.

Amélioration de la coordination de l'équipe de projet. [14]

5.4) Rôles des différents partenaires

L'assurance qualité dans les travaux de terrassement est organisée par une répartition des responsabilités claires entre les différents acteurs du projet. Chaque partenaire détient un rôle clairement défini et complémentaire qui, à la fois, couvre les exigences contractuelles, normes ainsi que les règlements en vigueur.

–Maître d'ouvrage (MOA)

Définit ce dont le projet a besoin ainsi que ses objectifs.

Donne un premier aperçu des exigences de qualité, de coûts et de délais.

Confirme le plan d'assurance qualité (PAQ) et contrôle sa mise en œuvre.

Par la même occasion supervise le déroulement à travers les audits ou les missions effectuées par les contrôleurs extérieurs.

–Maître d'œuvre (MOE)

Crée le projet, et avec des prescriptions techniques (CCTP (cahier des clauses techniques particulières), plans, normes de référence) met en place la construction.

Par son propre contrôle vérifie si toute l'application du PAQ (plan d'assurance qualité) se fait comme prévu par l'entreprise.

Contrôle la qualité des matériaux, des procédés et des essais réalisés sur le lieu du travail.

Fait la liaison au niveau du côté technique et aussi au niveau administratif entre le MOA (Maîtrise d'Ouvrage), la société, et les laboratoires.

–Entreprise exécutante

Effectue les travaux de terrassement conformément aux spécifications techniques et au PAQ (plan d'assurance qualité) validé.

Il exécute les contrôles internes (essais Proctor, CBR, densité in situ, granulométrie).

Élabore les rapports, les communique au maître d'œuvre et laisse un exemplaire à la mission de suivi.

Donne la proposition et met en œuvre les mesures correctrices lors des cas de non-conformité.

–Laboratoires de contrôle / bureau de contrôle effectuent les prélèvements pour la reconnaissance géotechnique et pour le suivi (SPT (standard pénétration test), pressiomètre, essais Proctor, CBR).

Contrôlent la conformité des matériaux utilisés et la couche de remblai.

Remettent des rapports neutres qui permettent la validation objective des travaux réalisés. [14]

5.5) Élaboration du plan d'assurance qualité (PAQ)

Le développement du plan d'assurance qualité (PAQ) représente un tournant majeur dans la gestion du chantier des travaux de terrassement. Dans ce document, qui est contractuel, l'entreprise le prépare, le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage le valide, organise, décrit les procédures et les moyens qui sont mis en œuvre pour que le résultat du travail respecte les critères techniques, réglementaires et les termes du contrat.

-Objectifs du PAQ plan d'assurance qualité

Contribuer à ce que les terrassements soient faits conformément aux prescriptions techniques (GTR, CCTP (cahier des clauses techniques particulières), normes).

Donner la description des procédures de contrôle (matériaux, compactage, densité, essais géotechniques).

Assurer la gestion claire des opérations (rapports, enregistrements, fiches de suivi).

Expliquer clairement le partage des responsabilités entre les différents intervenants (MOA (Maîtrise d'Ouvrage), MOE (Maîtrise d'Œuvre), entreprise, laboratoire).

-Contenu type d'un PAQ plan d'assurance qualité

La structure d'un PAQ (plan d'assurance qualité) est parfois bien équilibrée avec :

Présentation du projet : objet, nature des travaux, références contractuelles.

Organisation qualité : acteurs, responsabilités, organigramme qualité du chantier.

-Procédures de contrôle : essais de reconnaissance (Proctor, CBR, granulométrie, portance, pressiomètre), suivi des couches de remblais et compactage, modalités de réception des matériaux.

Plan de surveillance et d'essais (PSE) (plan de surveillance et d'essais) : fréquence et localisation des essais, seuils d'acceptabilité.

Gestion des non-conformités : détection, analyse, actions correctives et préventives.

Documentation et enregistrements : fiches de suivi, rapports d'essais, procès-verbaux.

Mesures de sécurité et environnementales (le cas échéant).

-Étapes d'élaboration du PAQ plan d'assurance qualité

Étude du contrat et des exigences (CCTP (cahier des clauses techniques particulières), normes, réglementation).

Découverte des points qui sont les plus critiques du chantier (zones sensibles, sols compressibles, remblais techniques).

Choix des contrôles et des essais à réaliser en fonction des matériaux et des ouvrages.

L'entreprise écrivait le document, en collaboration avec le directeur technique.

Avant la prise de décision, le maître d'ouvrage vérifie et valide le tout.

Processus de reprise ou de transformation de la PAQ (plan d'assurance qualité) durant le travail (dans le cas des imprévus, des changements de méthodes ou de matériaux). .[14]

5.6) Schéma Directeur de Qualité (SDQ)

Le schéma directeur de qualité (SDQ) est un document stratégique mis en place par le maître d'ouvrage.

Il établit les grandes lignes en matière de qualité à respecter tout au long du projet de terrassement (études, exécution, contrôle, réception).

-Objectifs du SDQ (schéma directeur de qualité)

Assurer la conformité technique et réglementaire des terrassements.

De même, faire en sorte que l'ouvrage soit durable et sécuritaire.

Rien que cela, les trois premiers points suffisent à définir les responsabilités qualité de chaque acteur.

Faire accompagner l'organisation des contrôles, essais et validations à chaque étape du chantier.

Confirmer la présence d'un dossier qualité complet (DOE (dossier des ouvrages exécutés)).

Eviter la survenance des pathologies des terrassements (tassements, fissures, instabilités).

-Contenu d'un SDQ (schéma directeur de qualité)

Un schéma directeur de qualité est souvent composé de : présentation du projet (contexte, enjeux, objectifs)

Aspects normatifs et réglementaires

GTR (guide des terrassements routiers)

NF P 11-300 (classification des sols et matériaux)

Eurocodes / ISO 9001

Organisation et responsabilités qualité

Maître d'ouvrage : conçu le SDQ (schéma directeur de qualité)

Maître d'œuvre : exécution et coordination

Entreprises : réalisent le SDQ (schéma directeur de qualité) grâce à leurs PAQ (plan d'assurance qualité)

Laboratoires : prélèvements et contrôles (Proctor, CBR, pressiomètre...)

Bureaux de contrôle : vérification indépendante

Méthodes et procédures qualité

Essais géotechniques (SPT (pénétrométrique dynamique), CPT (pénétromètre statique, pressiomètre, essais triaxiaux)

Essais de compactage (Proctor, CBR)

Mesure topographique

Gestion des documents (rapports de contrôle, fiches de suivi, DOE dossier des ouvrages exécutés)

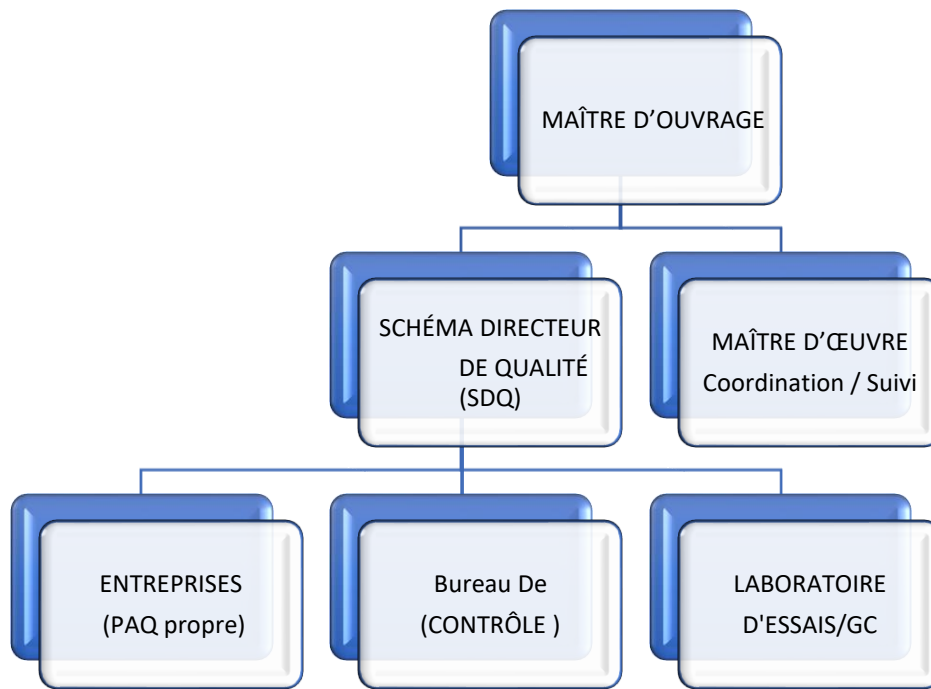
Gestion des non-conformités (actions correctives et préventives)

Amélioration continue (audits, retours d'expérience, mise à jour des procédures).

-. Différence avec le PAQ (plan d'assurance qualité)

SDQ (schéma directeur de qualité) représente un document global et stratégique (maître d'ouvrage).

PAQ (plan assurance qualité) est un document plus opérationnel (entreprises), qui indique comment elles appliquent le SDQ (schéma directeur de qualité) sur le chantier.



5.7) Déroulement d'un chantier de terrassement

Pendant le déroulement du chantier, la mise en application de plans d'assurance qualité nécessite notamment : La vérification de la bonne application de la démarche qualité

–Le traitement des anomalies et non-conformités

L'adaptation éventuelle du ou des PAQ (plan d'assurance qualité)

5 .7.1) Vérification de la bonne application de la démarche qualité

Le but de vérifier la bonne marche de la qualité dans les travaux de terrassement est de voir si les règles du Plan d'Assurance Qualité (PAQ) et du Schéma Directeur de Qualité (SDQ) sont suivies, du début à la fin du projet.

Étapes pour vérifier la qualité. Contrôle des papiers

Il faut vérifier que le PAQ, les méthodes et les fiches de contrôle soient là et approuvés.

Voir les rapports de tests de sol, de compaction, de matériaux (Proctor, CBR, taille).

Suivre les fiches : fiches de site, plans, comptes-rendus

– Contrôles techniques sur site

Vérifier les matériaux : ils doivent suivre les règles (GTR, NF P 11–300, AASHTO, USCS).

Vérifier le travail fait : épaisseurs, humidité, densité, compaction.

Vérifier l'environnement : il faut que le temps soit bon (pas de pluie, pas de gel/dégel).

– Audits qualité : audits faits par l'entreprise pour voir si les méthodes sont bien suivies.

Audits faits par ceux qui dirigent ou un groupe à part.

Comparer ce qui est fait et ce qui doit être fait selon le PAQ (plan d'assurance qualité).

– Suivi des points qualité

Combien de problèmes trouvés et fixés.

Pourcentage de tests qui sont bons (Proctor, CBR, pressiomètre, etc.).

Respect des temps et moins de reprises.

– Actions pour corriger et suivre

Tout problème doit être noté (livre de qualité).

On doit analyser pourquoi ça arrive et faire un plan pour corriger.

Vérifier que les solutions marchent bien et pour longtemps.

5.7.2) Le traitement des anomalies et non-conformités

Niveau 1 : anomalie mineure traitable immédiatement dans le cadre du procédé utilisé et dans le respect des procédures. Le traitement de cette anomalie peut éventuellement ne donner lieu qu'à de simples observations sur la fiche de contrôle correspondante

Niveau 2 : anomalie traitable avec une procédure de réparation déjà définie. L'identification et le traitement de cette anomalie doivent être précisés, soit sur les documents de suivi s'ils le permettent, soit sur une fiche d'anomalie ouverte à cet effet

Niveau 3 : anomalie pour laquelle aucune procédure de réparation n'a été définie par avance, mais dont le traitement permettra de reconstituer une qualité équivalente et si possible identique à celle de la conception prévue. Une fiche d'anomalie est ouverte ; la procédure de réparation est établie et soumise à l'acceptation du maître d'œuvre, dans le délai fixé au marché

Niveau 4 : anomalie mettant en cause le niveau de qualité contractuel, voire son aptitude à satisfaire la qualité d'usage (défaut). Une fiche d'anomalie est ouverte dans les délais fixés au marché, et l'entreprise adresse ses propositions au maître d'œuvre qui décide des suites à donner. Cette anomalie peut conduire à une expertise et à d'éventuelles investigations en place [14]

5.7.3) L'adaptation éventuelle du ou des PAQ (plan d'assurance qualité)

Le maître d'œuvre et l'entrepreneur devront prévoir la possibilité de modifier ou compléter le PAQ (plan d'assurance qualité) d'origine pour tenir compte de problèmes particuliers de chantier ou d'éventuels aléas. Selon les cas, les modifications ou compléments sont intégrés au PAQ initial ou font l'objet de PAQ particuliers relatifs à certains ouvrages.

5.9) Conclusion

En définitive, la qualité des travaux de terrassement est organisée par le maître d'œuvre dans un protocole exigeant qui intègre les contraintes spécifiques du chantier dès sa conception en termes de difficultés techniques prévisibles et les moyens de contrôle qualité afférant. Elle repose sur l'exécution correcte et ordonnée de tâches élémentaires, avec des points d'arrêt techniques et une planification serrée des étapes. En plus clair, elle repose sur la constitution d'un PAQ (plan d'assurance qualité) adéquat à la complexité du maître avec, selon les cas, des modes de contrôle intérieur et extérieur totalement indépendants. Enfin, la qualité des travaux est organisée sur un suivi tout au long du chantier, avant, pendant et après la réception, pendant lequel le chantier est piloté quant à la qualité de réalisations et des sous-traitances par le maître d'œuvre qui décide ou non l'admissibilité à l'accomplissement des travaux. L'appui technique d'experts géotechniques lorsqu'il est nécessaire, en particulier pour les chantiers complexes, pour valider ou non les points d'arrêt et s'assurer de la conformité des ouvrages. Cette démarche qualité intégrée au processus de réalisation permet ainsi de maîtriser la chaîne de production, de cantonner les anomalies majeures et de s'assurer de la conformité des travaux à la réception. S'appuyant sur une méthodologie éprouvée et améliorée au fil des retours d'expérience, elle responsabilise donc l'ensemble des acteurs et optimise ainsi la conduite des travaux en termes de technicité, d'environnement et d'économie, du chantier de terrassement

Chapitre 5 : Étude de cas pratique d'un projet de terrassement (des informations
recueillies pour barrages de Ghrib)

6.1) Présentation du projet Le barrage de Ghrib

6.1.1) Historique et mise en service

Construit par les autorités coloniales françaises.

Mise en service : 1939 (premier grand barrage en terre homogène en Algérie).

L'un des plus anciens barrages de grande capacité du pays.

6.1.2) Localisation

Wilaya : Ain defla (nord de l'Algérie).

Situé à environ 120 km à l'ouest d'Alger, sur l'oued Chélif (le plus grand fleuve d'Algérie).

Coordonnées géographiques approximatives : 36°10' N – 2°14' E. [15]



Photo 5.1.2) Situation géographique

6.2) Topographie

–Caractéristiques techniques

Type d'ouvrage : barrage en terre homogène.

Hauteur : ~35 m.

Longueur en crête : ~3 km.

Capacité de stockage initiale : environ 220 millions m³ (aujourd'hui réduite par l'envasement).

Surface du réservoir : près de 40 km².

Une altitude moyenne d'environ 490 mètres.

Une altitude minimale d'environ 386 mètres.

Une altitude maximale pouvant atteindre 733 mètres. [15]

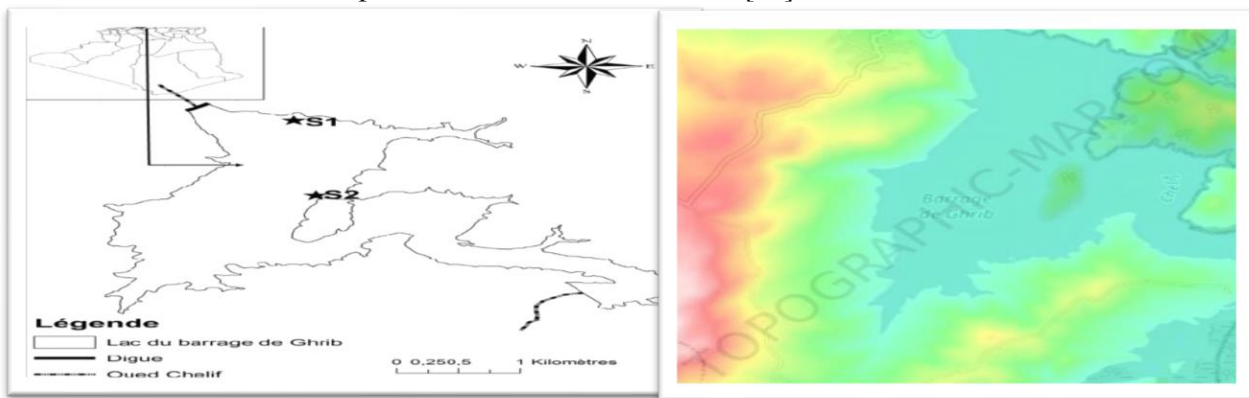


Photo6.2) topographie [35]

6.2.1) Géologie du site

Le barrage de Ghrib est implanté dans la vallée du Chélif (Ain defla), sur un substrat constitué principalement de : alluvions récentes (sables, graviers, limons) : perméables et peu cohésifs → nécessitent un décapage, utilisées localement pour drains et filtres.

Marnes et argiles miocènes : plastiques, peu perméables mais sensibles à l'eau (gonflement/retrait) → matériau privilégié pour le noyau étanche, mais demandant un contrôle strict du compactage et du taux d'humidité.

Calcaires et grès périphériques : résistants mais parfois fracturés → nécessitent étanchéité complémentaire (injections).

–Incidences principales sur les terrassements :

Sélection des matériaux d'emprunt : marnes pour le corps du barrage, alluvions pour drains et protections.

Contrôle hydrique : éviter la mise en œuvre des marnes en conditions pluvieuses, ajuster l'humidité au compactage.

Traitement des fondations : décapage des alluvions instables, étanchéité par injections dans les zones fracturées.

Stabilité des talus : nécessité de pentes douces, drainage et suivi géotechnique. [15]

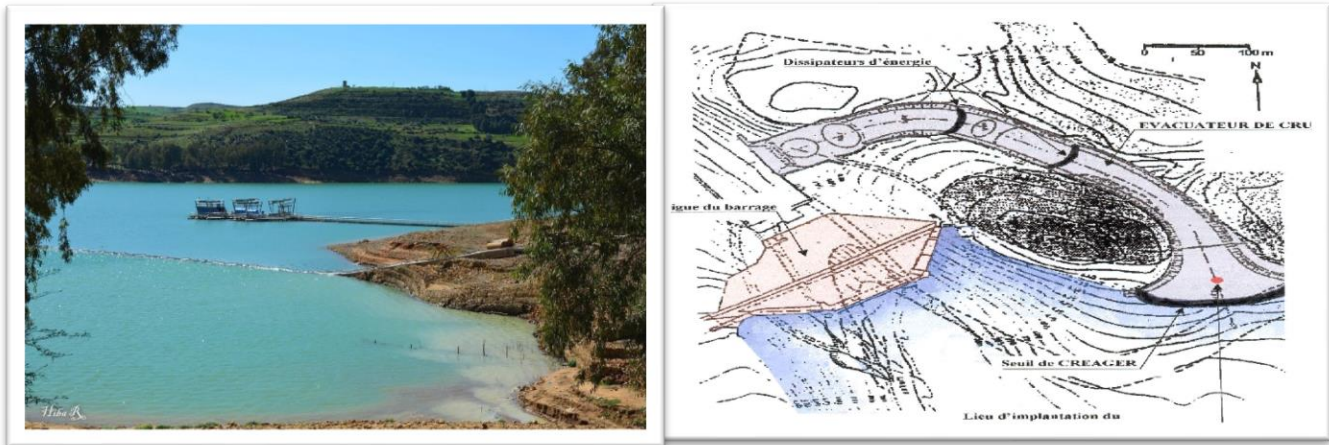


Photo 6.2.1) Vue géologique du site [35]

6.2.2) Sismicité de la région de barrage de Ghrib

Cinq (05) zones de sismicité croissante que sont :

- Zone 0 : sismicité négligeable.
- Zone I : sismicité faible.
- Zone II a et II b : sismicité moyenne.
- Zone III : sismicité élevée.

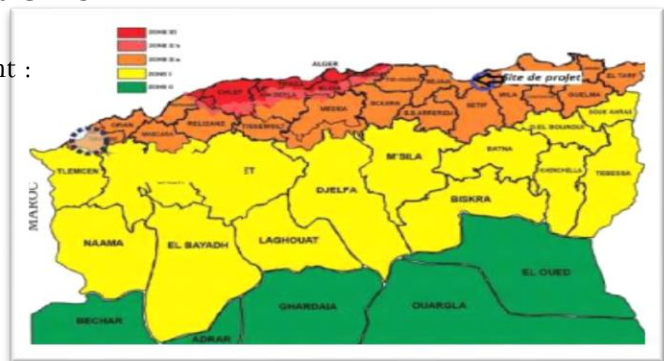


Photo 6.2.2) Cinq (05) zones de sismicité [36]

La région du barrage de Ghrib, dans la wilaya d'Ain defla, a une grande activité de tremblements de terre : ce lieu est dans une zone à moyen risque de tremblements. Les plans du moment disent que ce risque doit être vu lors de la création et de la construction des barrages, ce qui veut dire qu'il faut suivre des règles spéciales pour les tremblements.

De tout temps, la wilaya d'Ain defla a vu au moins deux gros tremblements de plus de 7 sur l'échelle de Richter depuis 1900, montrant qu'il y a une forte activité des tremblements là.

En termes simples, les sols boueux et les sables sous le barrage ne tiennent pas bien lors des tremblements, ce qui peut causer des mouvements ou des changements mauvais pour la stabilité du barrage.

Les études et les avis disent qu'il est crucial de prendre des mesures spéciales en pensant et en entretenant ces gros travaux dans la région pour réduire les dégâts des possibles tremblements. [15]

6.3) Reconnaissances in situ

Les reconnaissances in situ sont des recherches au maximum réalisées sur place pour savoir :

La composition des sols et des roches, des choses mécaniques et hydrauliques pour lesquelles elles sont faites, leur possibilité pour le terrassement et la fondation.

Un tel travail constitue une étape importante avant tout projet de terrassement ou de génie civil.

6.3.1) Objectifs principaux

Localiser la stratigraphie du site.

Détecter les sols meubles, compressibles ou instables.

Caractériser les endroits d'emprunt et leur qualité.

Donner une estimation de la charge et de la densité des sols.

Mesurer la perméabilité et la sensibilité à l'eau.

6.3.2) Principales méthodes de reconnaissance in situ

6.3.2.1) Sondages carottés de barrage de Ghrib

Les sondages et forages effectués au barrage de Ghrib ont été la base des travaux de préparation des ouvrages de terrassement.

Points essentiels : objectif principal : la recherche de la stratigraphie, des caractéristiques du sol et des conditions hydrogéologiques locales.

Méthodes utilisées : sondages carottés, sondages destructifs, forages pressiométriques (Ménard), essais de perméabilité (Lefranc, lugeons).

Résultats obtenus : les travaux ont permis de trouver des couches superficielles denses (limons, alluvions) qui devront être enlevées.

Des marnes argileuses gonflantes ont été identifiées, ce qui nécessite un compactage strict.

Des zones d'emprunt ont été localisées, qui sont favorables pour les remblais.

Un point d'eau souterrain a été découvert, ce qui impose un drainage ainsi qu'une surveillance.

Incidences sur les terrassements : les travaux ont permis d'utiliser les techniques de creusement, de compactage et de drainage adaptés pour garantir la stabilité et la sécurité du barrage. [16]

Tableau 6.3.2.1) sondages carottés de barrage de Ghrib

Forage(m)	Profondeur (m)	Profils lithologiques commentaires	
S1	20m	Remblais	Remblais
S2	30m	Silt argile	Altération
S3	36m	Grès gris Sandi	Remblais
S4	16m	Grès retourne	Altération
S5	10m	Friable Sand	Remblais
S6	23m	Soprane varron	Altération
S7	18m	Marne	Remblais
S8	38m	Grès friable bru	Altération
S9	20m	Galdós	Remblais
S10	32m	Marnes	Remblais
S11	38m	Mari	Remblais

Tableau 6.3.2.2) synthétique d'exemple (à insérer dans rapport)

ID Sonda ge	Corr (l'Along)	Méthode	Prof. Forée (M)	Observati ons Litho	Test in situ	Incidence terrassement
S1	36.10N,2.14 E	Carotté+ pressiomètre	0-12	0-2m alluvions 2-12m marnes	Pressiomètr e carotte	Décapage alluvions ; marnes pour noyau (contrôle humidité)
S2	36.101N,2.141 E	SPT (battage)	0-8	Sable, limoneux	SPT N=6-9	Remplacement / compactage renforcé fond tranchée
S3	36.102N,2.142E	CPT+piéz	0-15	Alluvions profondes nappes à 5m	CPT friction a pore	Drainage avant fouille profonde
PZ01	36.099N,2.139E	Forage hydrogel	0-10	Niveau nappe3.2 m	PZ, Lefranc	Pompage temporaire si fouilles > 3 m
E01	36.105N,2.146E	Tranchée d'essai	----	Marne plastique	Proctor labo	Emprunt utilisable après séchage/contrôle

6.3.2.2) Essais de pénétration (Barrage de Ghrib)

Tests de pénétration (SPT, (pénétrométrique dynamique), CPT (pénétromètre statique, DPL (Pénétromètre Dynamique Léger)) effectués sur le site du barrage de Ghrib ont permis de mesurer la résistance et la compacité des sols : les couches superficielles alluvionnaires présentent des valeurs faibles ($N = 6-8$), ce qui correspond à une faible portance et à la nécessité d'un décapage.

Au niveau du sous-sol ($N > 30$ et $QC > 3$ MPa), les marnes compactes forment un bon horizon porteur pour les ouvrages de fondation et les remblais.

Les essais dynamiques ($N_{20} = 12-18$) indiquent que les matériaux des zones d'emprunt sont correctement compactables, à condition qu'un contrôle hydrique soit réalisé.

Interprétation

Ces résultats révèlent que : la zone est dans l'ensemble favorable aux terrassements.

Les couches meubles doivent être traitées ou éliminées à la fois pour prévenir les tassements différenciés et les instabilités.

Les marnes compactes en profondeur sont à la fois une base solide et une assise fiable pour le barrage.

Un contrôle qualité permanent (pénétration dynamique + essais de compactage) est la seule façon d'assurer la densité des remblais [16]

De tableau 6.3.2.2) de résultats

Essai	Profondeur (m)	Paramétré mesuré	Valeur obtenue	Interprétation
SPT S01	0-2	N-6-8	Sol meuble (limon sableux)	Décapage /remplacement
SPTS02	2-8	N=12-20	Sol moyennement compact	Acceptable, compactage Renforcé
CPT01	4-10	QC=3-6 Ma	Marne compacte	Bonne base pour noyau étanche
DPLZ.E	0-1.5	N20-12-	Sol	Contrôle humidité

Les essais Ménard PMT au site du barrage de Ghrib ont rendu possible la découpe des caractéristiques mécaniques des sols in situ ainsi que des roches meubles.

Principaux résultats : module pressiométrique (M_e) :

Faible (2–4 MPa) pour les couches alluvionnaires superficielles → sols compressibles à faible capacité portante.

Récupération d'un comportement mécanique bon au niveau des dépôts marneux et argilo-calcaires, avec un module pressiométrique médian à élever (10–30 MPa), selon les horizons étudiés.

Pression limite (P_l) : valeurs basses (0,3–0,6 MPa) caractérisant ainsi les surfaces → nécessité de décapage ou de remise en état.

Couches profondes avec une pression limite plus forte ($> 1,5$ MPa) → matériaux adéquats pour supporter les remblais et fondations.

Coefficient de poussée au repos (K_0) : valeurs correspondant à un sol moyennement consolidé, ainsi que des tests de pénétration aux résultats similaires.

Interprétation : les matériaux de surface ne disposant pas d'une résistance élevée doivent être traités ou éliminés.

Les marnes compactes situées en profondeur formeront les assises idéales pour le corps du barrage et ses fondations.

Le module pressiométrique (M_e) est utile pour l'estimation correcte des remblais et ouvrages associés.

Les résultats confirment une bonne corrélation avec les essais de pénétration, ce qui est un atout pour la fiabilité des recommandations géotechniques



Photo 6.3.2.2 Essai au pressiomètre Ménard barrage [37]

6.3.2.3) Essais de perméabilité (barrage de Ghrib)

Les études concernent le site du barrage de Ghrib où elles ont été réalisées afin d'évaluer la capacité des sols et des roches à laisser passer l'eau. Cette capacité à laisser passer l'eau est un paramètre important pour la sécurité et pour l'étanchéité des rabattements ainsi que de la fondation.

Principaux résultats :

Alluvions superficielles : un haut niveau de perméabilité ($K = 10^{-4}$ à 10^{-5} m/s) en relation avec des sols hétérogènes, la coexistence de sable et de graviers, ce qui cause un risque d'infiltration.

Marnes et argiles compactes en profondeur :

Une perméabilité très basse ($K \leq 10^{-7}$ m/s) → bon horizon étanche, encourageant la fondation et le noyau du barrage.

Fissures et zones altérées : perméabilités plus élevées localement ont été signalées, donc des mesures (injections, colmatage) sont nécessaires.

Interprétation : les couches superficielles perméables doivent être enlevées ou recouvertes par un dispositif d'étanchéité (noyau argileux, écran de coupure).

Les marnes compactes en profondeur sont un bon socle étanche qui assure une bonne imperméabilité naturelle.

La présence de zones fissurées impose la mise en place de traitements complémentaires (rideau d'injections, écran étanche) afin de limiter les pertes par percolation.

6.3.2.4) Observations géotechniques – barrage de Ghrib

Stratigraphie du site

Couches superficielles : alluvions meubles (sables, graviers, limons) → couches hétérogènes et perméables.

Couches intermédiaires : marnes et argiles compactes → faible perméabilité et bon rôle d'étanchéité.

Substratum : calcaires et marnes localement fissurés → secteurs à risques d'infiltrations.

Propriétés mécaniques

Les marnes et argiles compactes ont une bonne portance.

Il est possible que des tassements différentiels se produisent dans les zones alluvionnaires non homogènes.

Perméabilité et circulation d'eau

Les sols de surface ont une perméabilité moyenne à forte.

Les fondations sont, en général, étanches grâce aux marnes.

Les fissures et discontinuités sont des voies d'infiltration potentielles.

Risques géotechniques identifiés : écoulements qui pénètrent les horizons perméables et fissurés.

Les sols alluvionnaires peuvent varier horizontalement.

Besoin de traiter les discontinuités pour prévenir les fuites d'eau.

Interprétation et importance : au niveau du site, on observe des fondations qui ont un impact globalement positif sur le bâtiment grâce aux marnes étanches.

Il est possible de procéder au traitement des zones superficielles perméables et hétérogènes (décapage, compactage, étanchéité).

Les fissurations du substratum impliquent un colmatage par injection.

En général, la géologie et la géotechnique du site garantissent la stabilité, sous réserve de la mise en œuvre des bonnes corrections.

6.4) Essai de laboratoire – barrage de Ghrib

6.4.1) Analyse granulométrique

Argiles : 20 – 30 %

Limons : 25 – 35 %

Sables : 30 – 40 %

Graviers : 5 – 10 %

Interprétation : sols fins argilo-limoneux avec fraction sableuse, favorables aux remblais mais nécessitant un bon contrôle de l'humidité.

6.4.2) Limites d'Atterberg

Limite de liquidité (LL) : 35 – 45 %

Limite de plasticité (LP) : 18 – 25 %

Indice de plasticité (IP) : 15 – 20 %

Sols de plasticité moyenne, classés A-6 ou A-7-6 (AASHTO) et CL-ML (USCS).

6.4.3) Essais Proctor normal (NF (norme française) P 94-093)

Densité sèche maximale (d_{ma}) : 1,75 – 1,85 t/m³

Teneur en eau optimale (WP) : 12 – 14 %

Compactage correct sous contrôle, bonne stabilité pour remblais.

6.4.4) CBR (California bearing ratio)

CBR immediate: 5 – 8 %

CBR après immersion : 3 – 5 %

Sols médiocres à moyens en portance naturelle, amélioration nécessaire (compactage, traitement à la chaux/ciment pour couches critiques).

6.4.5) Essais triaxiaux (CU, CD)

Cohésion apparente (c') : 25 – 35 kPa

Angle de frottement interne (φ') : 18 – 25°

Module de déformation (E50) : 30 – 50 MPa

Paramètres mécaniques confirmant une résistance correcte mais sensible à l'eau.

6.4.6) Perméabilité (essai Lefranc/constante de charge)

$K \approx 10^{-7}$ à 10^{-8} m/s

Sols imperméables, adaptés aux remblais de barrage.

-Variabilité des sols d'emprunt

Les matériaux présentaient des différences de granulométrie ainsi qu'en plasticité.

Solution : Un choix et un zonage des sols adaptés, un mélange pour homogénéisation, un rejet des sols non conformes.

-Humidité non maîtrisée

Les argiles étaient très souvent trop humides ce qui rendait le compactage difficile.

Solution : séchage naturel, un traitement à la chaux, un contrôle rigoureux de l'humidité avant mise en œuvre.

-Compactage insuffisant

Les densités dans certaines couches n'étaient pas assez élevées.

Solution : mise en œuvre par l'utilisation d'engins adaptés, couches fines (20–30 cm), contrôle continu (Proctor, pénétromètre).

-Perméabilité excessive

Il y avait des couches sableuses ainsi que des alluvions très perméables.

Solution : installation d'un noyau argileux, rideaux d'injection, drainage périphérique.

-Instabilités des talus

On a trouvé des glissements superficiels et des fissures.

Solution : réduction des pentes, amélioration du compactage, installation de drains de pied et de tranchées de décompression.

Attiques

Des pluies ont provoqué la saturation des remblais tandis que la chaleur a causé la fissuration par retrait.

Solution : une planification saisonnière, une protection par bâches, des arrosages en période sèche.

-Suivi qualité initialement insuffisante

Le manque de coordination et les insuffisances dans les contrôles au début du chantier.

Solution : mise en place d'un plan assurance qualité (PAQ), contrôles quotidiens et validation après chaque étape.

6.5) Analyse technico-économique

–Aspects techniques : type d'ouvrage : barrage en terre zoné avec noyau argileux imperméable.

Volume de remblais : énorme (plusieurs millions de m³), ce qui a exigé une gestion très efficace des carrières d'emprunt.

Géologie : diversité des matériaux du sol (argiles, limons, sables, alluvions) → traitements appropriés (rideau d'injection, drains).

Qualité des travaux : réalisées par un plan assurance qualité (PAQ) et des tests géotechniques (SPT, Proctor, perméabilité, etc.).

Problèmes techniques résolus : variabilité des matériaux, compactage, perméabilité excessive, stabilité des talus.

Aspects économiques coût initial très élevé dû à : des travaux de creusement très importants, au transport des matériaux d'emprunt, à l'étanchéité (noyau + injections) uniquement.

Mesures d'optimisation : utilisation locale des matériaux dans raisonnable conception → moindre coût d'importation, Orchestration des travaux en fonction des saisons → gain de temps et durée réduite des arrêts, Activité d'engins adaptés pour optimiser le compactage et économiser la consommation.

Rapport coût/bénéfice : positif grâce à la forte valeur stratégique de l'ouvrage.

Impacts socio-économiques

Sécurité hydrique : eau conservée pour l'agriculture irriguée (Mitidja, zones agricoles avoisinantes).

Approvisionnement en eau potable : contrib ré local et villes urbaines.

Développement économique : irrigation, agriculture intensive, pêche, emplois pendant et après la période de travaux.

Protection : contrôle des crues Del oued Cheliff, baisse des dangers d'inondations.

6.5.1) Problèmes techniques rencontrés

Hétérogénéité géologique : sols argileux gonflants, perméabilité élevée dans certaines zones → besoin de traitements (injections, drains) pour garantir la sécurité.

Des difficultés à compacter : les conditions climatiques (pluie, sécheresse) ont perturbé le rendement des machines.

Pour les matériaux d'emprunt, on remarque une forte variabilité : la qualité est inégale, donc pour séparer, traiter ou remplacer les matériaux non conformes, il faut dépenser plus.

La stabilité des talus : il y a eu des glissements localisés qui ont été assurés par drainage et reprofilage.

Infiltrations et pertes d'eau potentielles : il fallait imperméabiliser le noyau argileux et effectuer un contrôle plus rigoureux.

Effets économiques directs les dépassements budgétaires : sont la cause des travaux supplémentaires (injections, reprise de compactage, reprofilage) effectués.

Prolongation des délais : il y a eu arrêt des travaux qui ont pu entraîner des frais indirects qui se sont accrus avec la durée.

6.6) Conclusion :

L'étude du projet de terrassement du barrage de Ghrib a permis de mettre en évidence l'importance d'une démarche rigoureuse de qualité dans la réalisation des grands ouvrages hydrauliques. Les informations recueillies montrent que la réussite du chantier a reposé sur une bonne connaissance du contexte géotechnique, une adaptation des techniques de mise en œuvre et un suivi constant de la conformité des travaux. La reconnaissance des sols a révélé une forte hétérogénéité géologique, avec la présence de matériaux d'emprunt de qualités variables. Cette variabilité a nécessité des contrôles réguliers et un tri sélectif des matériaux utilisés dans les remblais afin d'assurer une compacité et une stabilité homogènes. Sur le plan technique, la mise en œuvre des terrassements a rencontré certaines difficultés, notamment liées aux conditions climatiques (pluies, variations d'humidité) et à la compaction des matériaux fins. Des ajustements ont été réalisés, tels que le séchage des sols, le renforcement local des talus et l'optimisation des couches de remblai pour respecter les exigences. Le contrôle de la qualité a joué un rôle essentiel tout au long du chantier. Des essais de compactage, de portance et de densité ont permis de vérifier la conformité des travaux aux spécifications du Plan d'Assurance Qualité (PAQ). La coordination entre le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre, l'entreprise et le laboratoire a été déterminante pour garantir la bonne exécution du projet.

En fin de compte, cette étude montre que les terrassements ne sont pas justes des façons de modeler le sol, mais un outil clé pour la longue vie et l'usage des grands barrages



Conclusion générale



Conclusion générale

La qualité dans les ouvrages de terrassement est un facteur essentiel qui conditionne la stabilité, la sécurité et la durabilité des infrastructures. Ce mémoire a permis d'analyser de manière approfondie les différents aspects qui influencent la qualité, depuis la reconnaissance du sol jusqu'à l'exécution et le contrôle des travaux sur le chantier.

Sur la pathologie des terrassements généraux a montré que les désordres rencontrés — tels que les tassements différentiels, les glissements de terrain, les fissurations ou les affaissements — sont souvent la conséquence d'une mauvaise connaissance du sol, d'un compactage insuffisant ou d'un non-respect des normes d'exécution. Ces pathologies démontrent qu'une gestion rigoureuse de la qualité dès la conception permet d'éviter des réparations coûteuses et des dégradations prématurées des ouvrages.

Consacré aux généralités sur les ouvrages de terrassement a précisé les principes fondamentaux de ces travaux. Les terrassements constituent la base de toute infrastructure (route, barrage, bâtiment, etc.), et leur qualité dépend du respect des règles de conception, des conditions géotechniques du site et des contraintes environnementales. Ce chapitre a mis en évidence que la réussite d'un projet de terrassement repose sur une bonne planification et une organisation adaptée des différentes phases du chantier.

La reconnaissance et la caractérisation géotechnique des sols, abordées, représentent une étape clé. Grâce aux essais de laboratoire et aux essais in situ, on identifie les propriétés physiques et mécaniques des sols (granulométrie, portance, plasticité, sensibilité à l'eau). Ces données permettent de choisir les matériaux d'emprunt, de définir les méthodes de compactage et d'assurer la stabilité de l'ouvrage. Ce travail de reconnaissance est donc la base de toute démarche de qualité dans les terrassements.

Suivant, consacré aux techniques de terrassement et à leur mise en œuvre, a détaillé les différentes opérations de déblai, de remblai, de nivellement, de compactage et de drainage. Il a montré que la réussite des travaux dépend du respect des prescriptions du Guide des Terrassements Routiers (GTR), du choix des engins adaptés, et d'un contrôle permanent des matériaux utilisés. L'application rigoureuse de ces techniques garantit un sol homogène, stable et apte à supporter les charges futures.

L'organisation de l'assurance qualité, a souligné l'importance d'un système de gestion structuré. La mise en place d'un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) permet de définir clairement les responsabilités de chaque intervenant (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise et laboratoire) et d'assurer le suivi régulier des travaux. Les contrôles, les essais et la documentation

Technique permettent de vérifier la conformité des ouvrages aux exigences contractuelles et normatives.

Enfin, l'étude de cas pratique a permis d'appliquer l'ensemble des informations recueillies sur un projet réel de terrassement. Elle a illustré les difficultés rencontrées sur le terrain — telles que la variabilité géologique des sols, les contraintes climatiques ou les problèmes de stabilité des talus et les mesures correctives mises en œuvre pour respecter les exigences de qualité. Cette application concrète a montré que la réussite d'un projet dépend à la fois de la compétence technique, du suivi rigoureux et de la coordination entre les acteurs



Références bibliographiques



[1]	Etude du glissement au km 186 de l'A.R. EST OUEST- tronçon Lakhdar-Bouira : Analyse des causes et étude du confortement. HAMOUDI ABDELHAKIM ; Université Mohamed Boudiaf - M'sila, . Promotion : 2015/2016
[2]	Stabilisation du mélange optimal sable de dune et des argiles marne par ciment et géotextiles sur les paramètres de gonflement de gonflement de la région de Ghardaïa Université de Ghardaïa, Année universitaire : 2021/2022 Labrèche Fatima Zahra
[3]	Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de : Génie Civil & Hydraulique Spécialité : Génie Civil Option : Géotechnique Présenté par : Douai lia Saousene Bahloul marwa, Année 2019
[4]	Effet des cycles gel-dégel et humidification- séchage sur la durabilité des traitements d'une marne argileuse de la région de Guelma., Sous la direction de : Dr. BOUTELDJA FATHE, Juin 2018Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma. Faculté des Sciences et de la Technologie
[5]	UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY, TASSEMENT DES REMBLAIS SUR UN SOL COMPRESSIBLE, Présenté par : SOUEDNIA Yacine BOUKHEM, Année Universitaire : 2022/2023
[6]	UNIVERSITE SAAD DAHLEB - BLIDAFACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL, ETUDE DE LA STABILITE AU GLISSEMENT DU SITE : « PARC DOUNIA, DELLY-BRAHIM, ALGER » Présenté par : KHIDA LAMIA, Promotion 2012
[7]	Mémoire de Master Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, Dégradation des ouvrages d'un réseau d'assainissement Urbain, Sous la direction de : Mme Lekouaghet Nassima, Juin 2023
[8]	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté du génie de la construction Département de génie civil, Etude d'un tronçon de la liaison Freha – Azzeffoun sur un linéaire de 6,4 km, avec conception d'échangeur, Étudié par : MOUSSAOUI Hamid ADDAD Ouissam, Promotion 2021 -2022
[9]	Université Larbi Tebessi – Tébéssa Institut des Mines Département des mines et géotechnologie, Terrassements, Réalisé par : Dr. Adel DJELLALI ; Destiné au Master 2 géotechnique,Année universitaire : 2021-2022
[10]	Université de Ghardaïa Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie civil et Hydraulique Influence de trois types de géotextiles sur l'indice CBR d'un mélange optimal de sable de dune et l'argile de Bouhraoua de la wilaya de Ghardaïa dans le domaine routier GHAZALI ABDESSALAM Année universitaire 2022/2023
[11]	https://fr.scribd.com/document/Classification-des-materiaux-GUIDEGTR PDF] Terrassements généraux - Univ Batna, TP Demain, Les familles de Compacteurs, Info ciments - Compactage couches d'assise, Étude compactage par vibration sur matériaux granulaires (Scribd)
[12]	fr/images/outils/gestion_domaine_public/Guide_terrassements/gtr_2023_fascicule_1_compressed.pdf, Documents techniques universitaires et guides GTR, Guide technique, conception et réalisation des terrassements, Fascicule3 : méthodes D'essais, mars 2007
[13]	Guide des Terrassements Routiers (GTR) : Éditions Cerema, dernier guide

	Disponible sur cerema.fr ; Norme NF P 11-300 : Norme AFNOR, téléchargeable via afnor.org ; Documents associés : Plans Assurance Qualité, Cahiers des Clauses Techniques, Rapports d'essais laboratoire et in situ.
[14]	Analyse d'un plan d'assurance qualité (PAQ) de marché de terrassements, sétra service D'études sur les transports, les routes et leurs aménagements mai2010 « Autoroutes du Maroc Autoroutes du Maroc » Les grands chantiers d'infrastructures Au service du développement économique & social- l'expérience marocaine. Séminaire - Rabat, 4 avril 11
[15]	https://fr.wikipedia.org/wiki/Barrage_de_Ghrib , Etude minéralogique et géochimique de la salinité des roches et des sols du bassin Versant d'Oued Cerf : Influence sur la pollution du barrage et des terrains agricoles. BADJI MOKHTAR UNIVERSITY UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA, Année 2020, Cherif GHERBI
[16]	https://www.thinkhazard.org/fr/report/-algeria-ain-defla/EQ , Envasement des Barrages : Bou kerdane, Keddara, Ghrib et Foug Elgharza, UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA Faculté de Technologie Département des Sciences de l'Eau et de L'Environnement, Etudiant : CHERFAOUI Hamza Promotion 2013

[1]	https://www.google.com/search?q=Affaissments+des+terrassements&sca_esv https://www.google.com/search?q=schema-glissementterrain&udm=
[2]	https://www.google.com/search?q=Le+retrait-gonflement+des+argiles&sca_esv&udm=&biw=
[3]	https://www.ibef.net/emulsions-de-bitume/les-usages/entretien-et-rehabilitation-des-chaussees/fissuration/
[4]	https://www.google.com/search?q=Affaissments+des+terrassements&sca_esv
[5]	https://www.google.com/search?q=Le+problAme+de+rosion+&sca_esvcefa0&udm=&biw=&bih
[6]	https://www.google.com/search?q=Probl%C%Ames+li%C%As+au+gel%Fd%C%Agel+des+terrassements++&sca_esv=cefla0&udm=&biw=
[7]	Calcule et modélisation numérique de la stabilité du Remblai sur zone inondable, OPTION Géotechnique Par Noms, Prénoms des Etudiants (es) /Abderrahim Salaheddine /Rehailia safwane /Bouhadjar med salah, Année 2019, Mémoire université Annaba,
[8]	https://www.google.com/search?q=Les+coul%C%es+boueuses+&sca_esv=&udm=&biw=&bih=&ei=_rvaI_
[9]	https://www.maisonentravaux.fr/types-travaux-terrassement/
[10]	https://www.google.com/search?sca_esv=acd6bce&udm=&fbs=AlljpHx4nJjfGojPVHhEACUHPiMQ_
[11]	https://www.google.com/search?q=Optimisation+des+volumes+de+d%CABlaisFremblais+&sca_esv=acd6bce&udm=
[12]	https://www.google.com/search?q=Ouvrages+routiers+et+autoroutiers+&sca_esv=
[13]	https://www.google.com/search?q=Bulldozer+%ou+Bouteur%+&sca_esv=cdbce&udm=&biw=
[14]	https://www.google.com/search?q=pelle+hydraulique&sca_esv=acdbceudm=&biw=&bih=&ei=
[15]	https://www.google.com/search?q=Niveleuse+%ou+Grader%+&sca_esv=acd6bce&udm=&biw=&bih=
[16]	https://www.google.com/search?q=Chargeuse+%ou+Chargeuse+frontale%+&sca_esv=acdbce&udm=&biw=
[17]	https://www.google.com/search?q=Dumper+%ou+Tombereau%+&sca_esv=acd6bce&udm=&biw=
[18]	https://www.google.com/search?q=Identification+des+couches+du+sol+&sca_esv=acdbc&udm=&biw=&bih=
[19]	https://www.google.com/search?q=Nature+des+mat%C%Ariaux+%E+Classification+GTR+%NF+P+%+%B%5D&sca_esv=
[20]	<a "="" href="https://www.google.com/search?q=Caisses+%C%A+carottes+du+sondage+SC&sca_esv=acdbce&udm=&biw=">https://www.google.com/search?q=Caisses+%C%A+carottes+du+sondage+SC&sca_esv=acdbce&udm=&biw= ; https://www.google.com/search?q=Caisses+%C%A+carottes+du+sondage+SC%B%D&sca_esv=acdbce&udm=&biw=

[21]	https://www.google.com/search?sca_esv=dacef&udm=&fbs=
[22]	https://www.google.com/search?sca_esv=dacef&udm=&fbs=
[23]	https://www.google.com/search?q=Figure+%E%%A%+La+Teneur+en+eau&sca_esv=
[24]	https://www.google.com/search?q=Le+diagramme+de+casagrande&sca_esv=dacef&udm=&ei=
[25]	https://www.google.com/search?q=L%E%%analyse+granulom%C%Atrique+&sca_esv=d
[26]	https://www.google.com/search?q=Propri%C%At%C%As+m%C%Acaniques+%%C%d
[27]	https://www.google.com/search?q=Essais+de+compactage+&sca_esv=dcef&udm
[28]	https://www.google.com/search?q=Terrassement+de+la+grande+masse&sca_esv=da
[29]	https://www.google.com/search?q=Types+et+fonctions+%chargeurs%C+niveleuses%C+com
[30]	https://www.google.com/search?q=Compacteurs+%C%A+pneus+lisses&sca_esv=dacef&udm=&ei=
[31]	https://www.google.com/search?q=Rouleaux+%C%A+pied+dameurs&sca_esv=dacef&udm=&ei=
[32]	https://www.google.com/search?q=%C%tapes+du+chantier+de+terrassement&sca_esv=dacef&udm=
[33]	https://www.google.com/search?q=%C%tapes+d%C%Alai+et+remblai+par+engins&sca_esv=dacef&udm=&ei=
[34]	https://www.google.com/search?q=le+plan+d%assurance+qualit%C%A+norme+iso+
[35]	https://www.google.com/search?q=Topographie+Le+barrage+de+Ghrib&sca_esv=dacef&udm=&biw=
[36]	https://www.google.com/search?q=%+zones+de+sismicit%C%A&sca_esv=dacf&udm=&biw=&bih=&ei=
[37]	https://www.google.com/search?q=Essai+au+pressiom%C%Atre+M%C%Anard+barrage&sca_esv=dacef&udm=&biw=