



MANUEL TERRASSEMENT

CONCEPTION ET RÉALISATION D'OUVRAGES EN TERRE

PARTIE 2 - DÉVELOPPEMENTS TECHNIQUES SPÉCIFIQUES

2D / RÉALISATION DES

TERRASSEMENTS - ANNEXES

COMITÉ TECHNIQUE 4.4 « *TERRASSEMENTS ET ROUTES NON REVÊTUES* »
COMITÉ MIROIR 8 DE PIARC FRANCE « *TERRASSEMENTS* »

2D – RÉALISATION DES TERRASSEMENTS - ANNEXES

À PROPOS DE PIARC

L'Association mondiale de la Route (PIARC) est une organisation sans but lucratif, fondée en 1909 pour améliorer la coopération internationale et pour encourager les avancées en matière de routes et de transport routier.

L'étude, objet du présent rapport, a été définie dans le Plan stratégique de PIARC 2016-2019 approuvé par le Conseil de l'Association mondiale de la Route dont les membres représentent les gouvernements des pays qui en font partie. Les membres du Comité technique chargés de ce rapport ont été choisis par les gouvernements de ces pays pour leurs compétences particulières.

Les opinions, constatations, conclusions et recommandations exprimées dans cette publication sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues des organisations ou organismes auxquels ils appartiennent.

Ce rapport est disponible sur le site de l'Association mondiale de la Route (PIARC) : <http://www.piarc.org>

Copyright Association mondiale de la Route. Tous droits réservés.

Association mondiale de la Route (PIARC)

Arche Sud 5^e niveau

92055 La Défense Cedex, France

ISBN : 978-2-84060-669-7

Page de couverture :

Photos grand format (en haut) : Crédit VINCI CONSTRUCTION.TERRASSEMENT (VCT) – Autoroute A 89

Photos petit format (au milieu) : Crédit VCT – Autoroute A 89 / Crédit Séminaire TUNIS 2018 – Entreprise GUINTOLI

MANUEL TERRASSEMENT

CONCEPTION ET RÉALISATION D'OUVRAGES EN TERRE

PARTIE 2 - DÉVELOPPEMENTS TECHNIQUES SPÉCIFIQUES - ANNEXES

2D / RÉALISATION DES TERRASSEMENTS

**COMITÉ TECHNIQUE 4.4 « *TERRASSEMENTS ET ROUTES NON
REVÊTUES* »**

COMITÉ MIROIR 8 DE PIARC FRANCE « *TERRASSEMENTS* »

Photo grand format (en bas) : Crédit Bouygues-Construction – Autoroute A 41[France]

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – RÉFÉRENCES TECHNIQUES

ANNEXE 2 – RAPPORT TECHNIQUE PIARC 1998 – RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET L'EXÉCUTION DES REMBLAIS ROUTIERS

ANNEXE 3 – PHASES DE RÉALISATION DES TERRASSEMENTS - FICHES TECHNOLOGIES

ANNEXE 4 - RECOMMANDATIONS TECHNIQUES - RÉALISATION DES TERRASSEMENTS

ANNEXE 5 - UTILISATION OPTIMALE DES MATÉRIAUX EXCAVÉS - PROCÉDÉS DE COMPACTAGE

ANNEXE 6 - CONDITIONS D'EMPLOI OPTIMAL DES MATÉRIAUX - TERRASSEMENTS ROCHEUX

ANNEXE 7 - EMPLOI OPTIMAL DES ENGINS DE TERRASSEMENTS

+ANNEXE 1



RÉFÉRENCES TECHNIQUES

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 1

1. RAPPORT TECHNIQUE PIARC 1998
2. NORME EUROPÉENNE « TERRASSEMENTS »
3. RÉFÉRENCE NORMES USA
4. GUIDE SÉTRA – FRANCE
5. GUIDES GTR ET GTS – FRANCE
6. ESTP PARIS – TERRASSEMENTS ET PROJETS LINÉAIRES

ANNEXE 1

1- Rapport Technique PIARC 1998

Recommandations pour la conception et l'exécution des remblais routiers - Comité technique PIARC du Financement et de l'Évaluation économique

1. INTRODUCTION

2. RECOMMANDATIONS RELATIVES A LA CONCEPTION DES REMBLAIS ROUTIERS

- 2.1. Caractéristiques des matériaux
 - 2.1.1. Matériaux utilisables dans le corps des remblais courants
 - 2.1.2. Matériaux utilisables dans les remblais de grande hauteur, les remblais “techniques” ou dans certaines parties sensibles des remblais
- 2.2. Aspects à considérer dans l'établissement du mouvement prévisionnel des terres
- 2.3. Pentes de talus
- 2.4. Préparation du sol support du remblai
 - 2.4.1. Déboisage
 - 2.4.2. Dessouchage
 - 2.4.3. Décapage de la terre végétale
 - 2.4.4. Nivellement et compactage des sols support de remblai
 - 2.4.5. Dispositions particulières de drainage et purges
 - 2.4.6. Exécution de redans

3. RECOMMANDATIONS RELATIVES A L'EXECUTION DES REMBLAIS

- 3.1. Technique de construction
 - 3.1.1. Compactage méthodique
 - 3.1.2. Profilage et compactage des talus
 - 3.1.3. Prise en compte de la situation météorologique au moment des travaux
 - 3.1.4. Traitement à la chaux vive pour réutilisation en remblai de sols sensibles à l'eau trop humides
- 3.2. Niveau de compacité à atteindre
- 3.3. Niveau de résistance mécanique à atteindre
- 3.4. Finitions

2- Norme européenne « Terrassements »

Référence : Norme européenne EN 16907-1 — Terrassements —
Décembre 2018

2-1. Partie 1 : Principes et règles générales

Avant-propos européen**1 Domaine d'application****2 Références normatives****3 Termes et définitions**

3.1 Définitions

3.2 Abréviations et symboles

4 Principes de conception et d'exécution des travaux de terrassement

4.1 Généralités

4.2 Étapes des projets de terrassement

4.3 Instructions pour l'exécution des travaux

4.4 Relations entre les terrassements et la conception des ouvrages en terre

4.5 Développement durable et conditions environnementales applicables aux terrassements

4.6 Gestion des risques

4.7 Types de procédés de terrassement

5 Reconnaissances spécifiques du site et des matériaux

5.1 Informations nécessaires pour la conception des terrassements

5.2 Coordination des reconnaissances de terrain

5.2.1 Généralités

5.2.2 Reconnaissances de site pour la conception géotechnique

5.2.3 Reconnaissances de terrain spécifiques aux travaux de terrassement

5.2.4 Rapports géotechniques

5.3 Utilisation des systèmes de classification

6 Conception des terrassements pour les remblais

6.1 Introduction

6.2 Procédure de conception

6.2.1 Généralités

6.2.2 Zones de remblai

6.3 Sélection des propriétés du matériau de remblai et du procédé de compactage

6.3.1 Généralités

6.3.2 Caractérisation des matériaux

6.3.3 Critères d'évaluation du matériau de remblai compacté

6.3.4 Comportement au compactage des matériaux de remblai

6.3.5 Essais de correspondance pour évaluer le comportement du remblai

6.3.6 Lien entre la méthode de construction et le choix des matériaux pour les terrassements

6.3.7 Utilisation d'essais en vraie grandeur pour évaluer un procédé de compactage pour un matériau de remblai donné

6.3.8 Conception des coupes transversales des remblais

6.4 Détails des parties, matériaux et ouvrages en terre spécifiques

6.4.1 Introduction

- 6.4.2 Couches de forme
- 6.4.3 Zones de transition
- 6.4.4 Remblais sur talus
- 6.4.5 Matériaux spécifiques
- 6.4.6 Remblais de grande hauteur
- 6.4.7 Remblais sur sols mous ou en zones inondables
- 6.4.8 Remblais construits sur des cavités
- 6.4.9 Matériaux excédentaires

7 Conception des terrassements pour les déblais

- 7.1 Généralités
- 7.2 Matériaux concernés
- 7.3 Géométrie
- 7.4 Drainage
- 7.5 Stabilité globale
- 7.6 Propriétés pertinentes du fond de déblai (plateforme)

8 Conception des terrassements réalisés par dragage et mise en place hydraulique des matériaux de remblai

9 Conception des terrassements pour la mise en place hydraulique de déchets

10 Drainage des terrassements

- 10.1 Drainage pour collecter l'eau
- 10.2 Protection des talus contre l'érosion

11 Optimisation de la conception des projets de terrassements

12 Spécifications techniques pour les terrassements

- 12.1 Généralités
- 12.2 Spécification du produit fini
- 12.3 Spécification de méthode
- 12.4 Spécification de comportement

13 Suivi des terrassements et vérification du comportement des ouvrages en terre

- 13.1 Introduction
- 13.2 Besoins et techniques pour le suivi et le contrôle des terrassements
- 13.3 Vérification du comportement de l'ouvrage en terre

14 Utilisation de l'expérience nationale et de règles non conflictuelles

- 14.1 Généralités
- 14.2 Exemples informatifs de pratiques nationales fondées sur l'expérience

Annexe A (informative) Définitions de géométrie pour les travaux de terrassement et les ouvrages en terre

Annexe B (informative) Résumé des pratiques nationales – Autriche

- B.1 Introduction
- B.2 Classification des sols et des roches

- B.3 Exécution des travaux de terrassement
- B.4 Construction des remblais et remplissages
- B.5 Contrôle qualité (essais)
- B.6 Références bibliographiques

Annexe C (informative) Résumé des pratiques nationales — France

- C.1 Introduction
- C.2 Classification des matériaux
- C.3 Conception des terrassements
- C.4 Contrôle du terrassement
- C.5 Bibliographie

Annexe D (informative) Résumé des pratiques nationales – Allemagne

- D.1 Introduction
- D.2 Classification des matériaux
- D.3 Exécution des travaux de terrassement
- D.4 Contrôle des terrassements
- D.5 Bibliographie

Annexe E (informative) Résumé des pratiques nationales – Norvège

- E.1 Introduction
- E.2 Classification des matériaux
- E.3 Conception des terrassements
- E.4 Contrôle qualité du terrassement
- E.5 Bibliographie

Annexe F (informative) Résumé des pratiques nationales – Espagne

- F.1 Introduction
- F.2 Classification des matériaux
- F.3 Utilisation possible des matériaux marginaux
- F.4 Conception préliminaire de la section transversale de l'ouvrage en terre
- F.5 Types d'ouvrages en terre à construire
- F.6 Règles de base de la construction
- F.7 Contrôle du terrassement
- F.8 Référence

Annexe G (informative) Résumé des pratiques nationales – Suède

- G.1 Introduction
- G.2 Classification des matériaux
- G.3 Conception des terrassements
- G.4 Contrôle du terrassement

Annexe H (informative) Résumé des pratiques nationales – Royaume-Uni

- H.1 Introduction
- H.2 Classification des matériaux
- H.3 Conception des terrassements

H.4 Contrôle des terrassements en phase travaux

H.5 Bibliographie

2-2. Partie 3 : Procédés de construction

Avant-propos européen

1 Domaine d'application

2 Références normatives

3 Termes et définitions

4 Considérations générales

4.1 Prérequis relatifs à l'exécution du terrassement

4.2 Conditions climatiques

4.3 Facteurs environnementaux

4.4 Utilisation de sous-produits industriels et de matériaux recyclés

5 Excavation

5.1 Généralités

5.2 Type de matériau et techniques d'excavation

5.3 Considérations spéciales lors d'une excavation de massif rocheux

5.4 Influence de l'utilisation finale des matériaux excavés

5.5 Protection des déblais au cours de la construction

5.6 Excavation sous l'eau

6 Transport

6.1 Généralités

6.2 Terrassements grande masse

6.3 Type de matériau et transport grande masse

6.4 Camions de transport routier

6.5 Variantes de méthodes de transport

6.6 Transport de matériaux issus du percement d'un tunnel

7 Remblai et compactage

7.1 Groupes de matériaux

7.2 Spécifications de compactage

7.3 Préparation de l'assise de remblai

7.4 Régilage

7.5 Compactage

7.6 Remblayage sous l'eau

Annexe A. (informative) Organisation et exécution de planches d'essai

A.1 Généralités Méthodologie

Annexe B. (informative) Conditions d'utilisation des principaux groupes de matériaux

B.1 Préambule

B.2 Matériaux fins et intermédiaires

- B.3 Matériaux granulaires
- B.4 Roches de faible résistance, intermédiaires et évolutives
- B.5 Roches de résistance élevée
- B.6 Craie
- B.7 Utilisation de sols arides
- B.8 Sols résiduels tropicaux
- B.9 Sels solubles
- B.10 Argiles actives

Annexe C. (informative) Types de machines d'excavation

- C.1 Pelle à godet rétro à 360°
- C.2 Pelle en butte 360°
- C.3 Chargeuse sur chenilles/roues
- C.4 Décapeuse

Annexe D. (informative) Types de matériels de transport

Annexe E. (informative) Exemples de pratiques nationales

- E.1 Limites de traficabilité pour la France et le Royaume-Uni
- E.2 Pratique espagnole pour les sols fins dans un état normal et sec
- E.3 Approche française sur roches de faible résistance
- E.4 Pratique suédoise pour les sols fins humides (avec temps de consolidation)

Bibliographie

3- Référence Normes USA

ASTM Désignation : D 420 – 98

Standard Guide to Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes

3-1. Introduction

Investigation and identification of subsurface materials involves both simple and complex techniques that may be accomplished by many different procedures and may be variously interpreted.

These studies are frequently site specific and are influenced by geological and geographical settings, by the purpose of the investigation, by design requirements for the project proposed, and by the background, training, and experience of the investigator.

This guide has been extensively rewritten and enlarged since the version approved in 1987. Material has been added for clarification and for expansion of concepts. Many new ASTM standards are referenced, and a bibliography of non-ASTM references is appended.

This document is a guide to the selection of the various ASTM standards that are available for the investigation of soil, rock, and ground water for projects that involve surface or subsurface

construction, or both. It is intended to improve consistency of practice and to encourage rational planning of a site characterization program.

Since the subsurface conditions at a particular site are usually the result of a combination of natural, geologic, topographic, and climatic factors, and of historical modifications both natural and manmade, an adequate and internally consistent exploration program will allow evaluation of the results of these influences.

3-2. Scope

This guide refers to ASTM methods by which soil, rock, and ground water conditions may be determined. The objective of the investigation should be to identify and locate, both horizontally and vertically, significant soil and rock types and ground water conditions present within a given site area and to establish the characteristics of the subsurface materials by sampling or in situ testing, or both.

Laboratory testing of soil, rock, and ground water samples is specified by other ASTM standards not listed herein. Subsurface exploration for environmental purposes will be the subject of a separate ASTM document.

Prior to commencement of any intrusive exploration the site should be checked for underground utilities. Should evidence of potentially hazardous or otherwise contaminated materials or conditions be encountered in the course of the investigation, work should be interrupted until the circumstances have been evaluated and revised instructions issued before resumption.

The values stated in (SI) inch-pound units are to be regarded as the standard.

This guide offers an organized collection of information or a series of options and does not recommend a specific course of action. This document cannot replace education or experience and should be used in conjunction with professional judgment. Not all aspects of this guide may be applicable in all circumstances. This ASTM standard is not intended to represent or replace the standard of care by which the adequacy of a given professional service must be judged, nor should this document be applied without consideration of a project's many unique aspects. The word "Standard" in the title of this document means only that the document has been approved through the ASTM consensus process.

This guide does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

4- Guide Sétra – France

Guide technique - Service d'Etudes Techniques des Routes - Sétra - Mars 2007 /Conception et réalisation des terrassements / Fascicule 1 : études et exécution des travaux

Introduction

Le guide « Conception et réalisation des terrassements » a pour but d'aider et de conseiller le maître d'œuvre pendant l'élaboration du projet jusqu'à la réalisation des travaux de terrassements.

Il se compose de 3 fascicules indépendants :

- le présent fascicule 1 : études et exécution des travaux ;
- fascicule 2 : organisation des contrôles ;
- fascicule 3 : méthodes d'essais.

Les terrassements généraux dans une opération routière constituent une phase importante d'études et de travaux qui nécessitent beaucoup de compétences dans les domaines les plus divers, notamment ceux qui touchent à la géotechnique, mais aussi à l'environnement et au développement durable.

Les études géotechniques, indispensables à la réalisation des terrassements, doivent être précises et complètes pour éviter les aléas techniques et financiers dont la dérive des coûts peut atteindre plus de 20 %.

Un grand nombre d'ouvrages généraux et spécialisés, réalisés et publiés par le CFTR et le Sétra, développent avec précision la reconnaissance, le classement et le traitement des sols ainsi que quelques ouvrages spécifiques à savoir les terrassements à l'explosif, les remblais sur sols compressibles, la démarche qualité et l'utilisation des sols pour les dépendances vertes.

L'objectif du présent guide de conception et de réalisation des terrassements est d'appréhender la problématique des terrassements dans le respect de l'environnement dès les premières études de tracé, de compléter sur le plan technique l'ensemble de la documentation existante et de rappeler sous forme de fiches pratiques l'essentiel des informations existantes

Il est destiné essentiellement à une maîtrise d'œuvre confirmée en étude et/ou travaux pour :

- vérifier que tous les points à examiner dans chaque phase d'études préliminaires, d'APS ou de projet, ont été réalisés et que la faisabilité de la partie d'ouvrage étudiée ne soit pas remise en cause (chapitre A) ;
- appréhender une technologie à travers une fiche synthétique listant la problématique, les paramètres influents, les points à examiner et les recommandations en phase travaux (chapitre B) ;
- approfondir et développer une compétence plus fine des difficultés de conception et de réalisation d'ouvrages spéciaux (chapitre C, D et F) ;
- parfaire la rédaction des DCE terrassements et la préparation des travaux (tous les chapitres) ;
- contrôler la qualité d'un projet ou les dispositions constructives en phase travaux, sur des opérations autoroutières ou beaucoup plus petites, comme sur une route départementale située dans un milieu environnemental très sensible, ou dans un contexte géotechnique délicat (chapitres A, B et C).

Le document comprend six chapitres.

Chapitre A - Études de terrassements et l'environnement

Ce chapitre décrit par type d'études les techniques de profil en long recommandées pour satisfaire certains domaines environnementaux. Il attire l'attention du lecteur sur les réflexions et les études à engager.

Il liste pour les ouvrages en déblai ou en remblai, les points à examiner dans tous les domaines techniques susceptibles de remettre en cause le type de terrassement.

Il développe également les différentes techniques de cubature.

Chapitre B - Technologie des terrassements

Ce chapitre comprend des fiches techniques sur la technologie des terrassements. Elles récapitulent le domaine concerné, le référentiel technique, la problématique, les paramètres influents, le phasage de réalisation à travers la conception du DCE, la préparation de chantier et l'exécution, ainsi que le type de suivi à réaliser.

Chapitre C - Ouvrages spéciaux et points particuliers

Ce chapitre décrit des techniques de terrassement qui ne sont pas développées actuellement par des guides techniques. Il précise de plus certains points particuliers d'exécution tels que la problématique des purges ou encore le compactage des bords de remblais.

Chapitre D - Dispositions constructives

Ce chapitre donne quelques exemples concrets de traitement, sous forme de fiche de cas, d'un problème technique de terrassement ou d'environnement.

Chapitre E - Préparation des travaux

Chapitre F - Pathologies

Ce chapitre fait la synthèse des pathologies observées sur des ouvrages en déblai ou en remblai.

5- Guide GTR et GTS – France

GTR - Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme

Sétra – LCPC - Juillet 2000 (*)

(*) Guide en cours de révision à paraître en 2023

FASCICULE I : PRINCIPES GENERAUX

- 1 CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES POUR LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME
- 2 CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI
- 3 CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME
- 4 COMPACTAGE DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

FASCICULE II - ANNEXES TECHNIQUES

- 1 TABLEAUX DE CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES POUR LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME
- 2 TABLEAUX DES CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

- 3 TABLEAUX DES CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME
- 4 COMPACTAGE DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

GTS - Guide technique : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Sétra : Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

Introduction

Partie A. Notions générales

Partie B. Traitement des sols en remblais

Partie C. Traitement des sols en couches de forme

- Introduction
- Partie C1. Études
- Partie C2. Techniques et matériels d'exécution
- Partie C3. Assurance de la qualité

Annexes

Abréviations, symboles, définitions

Bibliographie

6- ESTP Paris – Terrassements et projets linéaires

**Cours enseignement - Ecole Spéciale des Travaux Publics : ESTP Paris
« L'école des grands projets » - Terrassements et projets linéaires**

Organisation autour de 5 Fascicules :

- Fascicule 1 : Le Marché des Terrassements dans l'activité TP – Genèse d'un Projet
- Fascicule 2 : Intégration des paramètres Techniques d'un projet (géométrie et Géotechnique)
- Fascicule 3 : Le Mouvement de Terre – Les Matériels de terrassement – La Planification d'un projet linéaire
- Fascicule 4 : Etude de Prix d'un Projet linéaire
- Fascicule 5 : Les Travaux Spéciaux

ANNEXE 2



RAPPORT TECHNIQUE PIARC 1998 – RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET L'EXÉCUTION DES REMBLAIS ROUTIERS

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 2

1. INTRODUCTION

2. RECOMMANDATIONS RELATIVES À LA CONCEPTION DES REMBLAIS ROUTIERS

3. RECOMMANDATIONS RELATIVES À L'EXÉCUTION DES REMBLAIS

ANNEXE 2

1-Introduction

Cette phase doit conduire à une conclusion relative à la faisabilité du projet. C'est pour cela que dans l'introduction nous avons insisté sur le lien entre le projet de terrassement et l'étude du tracé ou du plan de masse.

Le géologue ou le géotechnicien qui mène cette phase de la reconnaissance doit être en contact particulièrement suivi avec le projeteur de l'ouvrage.

Les recommandations présentées ci-dessous ont été établies à partir d'une enquête destinée à recenser l'état de l'art dans le domaine de la conception et de la construction des remblais. Cette enquête comportait un questionnaire, adressé en mars 1993 destiné à recueillir des informations sur les méthodes de conception et d'exécution des remblais utilisées dans chacun des 24 pays représentés par un membre ou un correspondant au sein du Comité technique AIPCR des Terrassements, Drainage, Couche de Forme (C12). Seize réponses ont été retournées. Elles émanent des pays suivants : Canada, Belgique, Portugal, Australie, Pologne, Japon, Norvège, Thaïlande, Turquie, Autriche, Royaume-Uni, Espagne, Italie, République tchèque, République slovaque, États-Unis.

Il convient également d'ajouter la France (F) dont la contribution intervient au travers du travail du rapporteur du thème. Outre leur nombre relativement réduit, les réponses reçues se sont révélées assez incomplètes dans l'ensemble.

Seuls 3 à 4 pays ont apporté des éléments précis à toutes les questions posées et fourni des documents complémentaires pour les expliciter ou les justifier. Mais la majorité des réponses reçues s'est limitée à des éléments sommaires et très généraux.

La première raison de disparités tient certainement au fait que la nécessité de rechercher un niveau de qualité spécifique pour des remblais routiers s'est imposée avant tout dans les pays qui, depuis au moins une décennie, se sont engagés dans des programmes assez importants d'autoroutes et de voies ferroviaires à grande vitesse.

C'est en effet principalement pour ces infrastructures que les ingénieurs ont pris conscience de l'importance des remblais dans la satisfaction du haut niveau de service recherché, dans l'économie des projets et pour le respect des contraintes d'environnement et ont donc cherché à en préciser et à en codifier les règles de conception et de construction.

Une seconde raison est aussi que les règles de conception et de construction des remblais routiers sont avant tout fonction des interactions entre conditions géotechniques et climatiques.

Ces interactions étant par nature hautement aléatoires, leur maîtrise obéit davantage à l'intuition et au bon sens plutôt qu'à des méthodes rationnelles reconnues pouvant s'appliquer de manière sinon universelle, du moins suffisamment large (à l'intérieur d'un même pays par exemple), pour être codifiées dans des documents méthodologiques comme cela est le cas pour la plupart des autres ouvrages de génie civil.

Cette explication a été apportée en particulier par le représentant des États-Unis qui a fait valoir l'énorme travail que constituerait l'établissement d'une synthèse prenant en compte

l'ensemble des règles en usage dans ce vaste pays, étant donnée leur extrême diversité liée elle-même à celle des conditions géotechniques et climatiques caractérisant chacun des 50 États. Les représentants d'autres pays très étendus (Canada, Australie) ont quant à eux pris la précaution de préciser que leur réponse au questionnaire ne valait que pour l'État dont ils étaient originaires.

A partir de ces deux raisons, on comprend que ce soient les pays industrialisés relativement peu étendus qui aient majoritairement et le plus complètement répondu au questionnaire.

Ces considérations préliminaires, bien que partiellement hors du sujet, se devaient d'être présentées pour relativiser les éléments issus du dépouillement des réponses au questionnaire et encore davantage pour les propositions de recommandations qui en découlent.

2-Recommandations relatives à la conception des remblais routiers

2-1. Caractéristiques des matériaux

2-1.1 Matériaux utilisables dans le corps des remblais courants

La première réflexion à entreprendre dans le domaine de la conception des remblais routiers est celle de la définition des matériaux pouvant être acceptés pour la réalisation de ces ouvrages. Pour ce faire, on peut considérer comme acquis les éléments suivants :

A.

Les matériaux dont l'utilisation en remblai est la plus critique sont ceux qui présentent un caractère soluble, putrescible ou polluant. Vis-à-vis de ces caractères, le tableau 1 ci-après propose quelques valeurs seuils pouvant être considérées comme admissibles.

B.

En deuxième lieu, la nécessité pour un remblai d'avoir acquis sa stabilité définitive quasi immédiatement après la fin de sa construction, impose que les matériaux utilisables aient des caractéristiques géotechniques elles-mêmes parfaitement stables. Cela exclut l'emploi, d'une part, des matériaux très argileux qui sont sujets aux phénomènes de retrait-gonflement en fonction des conditions climatiques et des modifications de leur environnement hydrique et, d'autre part, des matériaux issus de roches évolutives, notamment argileuses, dont la structure peut se dégrader brutalement après quelques cycles d'imbibition-séchage entraînant des déformations et même des ruptures.

Pour les sols très argileux, on peut considérer que le seuil d'acceptabilité généralement admis correspond à un indice de plasticité ≤ 50 . Pour les matériaux rocheux évolutifs, l'expérience n'est pas suffisante pour fixer des seuils précis. On retiendra toutefois que les matériaux les plus critiques sont issus de roches argileuses (schistes, marnes, argilites, etc.) difficilement fragmentables à l'extraction et durant les différentes triturations subies à la mise en œuvre, mais par contre très dégradables lorsqu'ils sont soumis à des cycles saisonniers d'imbibition-séchage.

Caractère considéré	Types de matériaux concernés	Seuil limite d'acceptabilité	Commentaires
Soluble	Sols et matériaux rocheux solubles contenant du sel gemme (NaCl) et/ou du gypse (SO ₄ Ca)	Teneur en matières solubles : sel gemme $\leq 5 \%$ gypse $\leq 10 \%$	L'utilisation de matériaux contenant des constituants solubles doit toujours être proscrite dans les parties de remblais potentiellement inondables. Pour les autres parties, des exemples ont montré, qu'en l'absence de solutions alternatives économiquement acceptables, il était possible de dépasser largement les seuils indiqués, moyennant la mise en œuvre de dispositions constructives localement éprouvées (protection vis-à-vis des écoulements, réduction de la perméabilité par correction granulométrique et/ou surcompactage, etc.). Enfin, l'attention doit être attirée sur le fait que la présence, même à très faible teneur, de gypse dans les sols pose des problèmes délicats lorsqu'un traitement de ces matériaux avec un liant hydraulique ou de la chaux est envisagé ou lorsque ces sols se trouvent en contact avec des ouvrages en béton de ciment (risques de gonflements ettringitiques).
	Sous-produits industriels divers	Pas de règle générale : nécessité d'une étude spécifique pour chaque sous-produit	
Putrescible	Humus forestier, terre végétale à haute teneur en matières organiques, sols tourbeux	Teneur en matières organiques $\leq 10 \%$	Les terres végétales dont la teneur en matières organiques est inférieure à 10 % peuvent être utilisées dans les remblais lorsqu'elles ne servent pas à la couverture des talus
	Sous-produits industriels divers	Pas de règle générale : nécessité d'une étude spécifique pour chaque sous-produit	
Polluant	Sous-produits industriels quasi exclusivement	Pas de seuils limites admis universellement. Ils sont normalement fixés par la législation en vigueur dans la région considérée	Les possibilités d'utilisation d'un sous-produit présentant un caractère polluant doivent toujours résulter d'une étude spécifique.

Tableau 1 - Conditions définissant les possibilités d'emploi dans les remblais courants de matériaux présentant un caractère soluble, putrescible ou polluant

C.

En troisième lieu enfin, et toujours pour satisfaire l'exigence de stabilité quasi immédiate du remblai, les matériaux utilisables doivent avoir des caractéristiques géotechniques permettant d'atteindre après mise en œuvre les performances, en particulier mécaniques, garantissant cette exigence.

Cela suppose qu'ils puissent être correctement compactés, c'est-à-dire : - pour l'ensemble des matériaux, il faut que la dimension maximale (D_{max}) de ses éléments permette le régallage en couches élémentaires dont l'épaisseur soit compatible avec la puissance du

compacteur utilisé, - et en plus, pour les matériaux sensibles à l'eau (c'est-à-dire ceux qui possèdent une fraction fine, en particulier argileuse, significative), il faut que leur état hydrique ne soit ni trop sec (risque de sous-compactage important conduisant à des tassements si une imbibition postérieure à leur mise en œuvre se produit), ni trop humides (risques de sur-compactage conduisant à des pressions interstitielles pouvant occasionner des ruptures par cisaillement).

On peut admettre que cette double condition se traduit concrètement par les valeurs données dans le tableau 2 ci-après.

	Sols insensibles à l'eau (purement granulaires)	Sols sensibles à l'eau (sols possédant une fraction fine argileuse)	Commentaires
Dmax	800 mm(*)	500 mm(*)	Les valeurs de 800 et de 500 mm constituent des maxima qui sont envisageables seulement avec certains matériaux et si l'on utilise les compacteurs actuels les plus puissants
Etat hydrique	Sans objet	Etat hydrique trop sec lorsque $w_{nat}^{(**)} \leq 0,7 w_{opn}^{(**)}$	D'autres paramètres tels que : IPI (***) ou Ic (***) ou encore la teneur en eau peuvent également être considérés pour caractériser l'état hydrique
		Etat hydrique trop humide lorsque $w_{nat}^{(**)} \geq 1,4 w_{opn}^{(**)}$	idem ci-dessus

(*) suivant la puissance du compacteur utilisé

(**) w_{nat} = teneur en eau naturelle du sol ; w_{opn} = teneur en eau optimum proctor normal du sol

(***) IPI = Indice Portant Immédiate ; Ic = Indice de Consistance.

Tableau 2 - Caractéristiques géotechniques des sols permettant leur compactage correct

Il faut remarquer que si un sol ne remplit pas les conditions d'acceptabilité définies en A. ou B. ci-dessus, son utilisation en remblai ne doit en principe pas être envisagée, mais il est clair que si ce sont les conditions définies en C. qui ne sont pas satisfaites, le matériau peut être corrigé par une technique appropriée décrite plus loin (élimination des plus gros éléments, aération, traitement, arrosage, etc.).

2-1.2 Matériaux utilisables dans les remblais de grande hauteur, dans les remblais "techniques" ou dans certaines parties sensibles des remblais A

Pour les remblais de grande hauteur (> 15 m), la règle habituelle est d'utiliser en totalité des matériaux insensibles à l'eau (moins de 5 % d'éléments < 63 μ m) issus de roches saines (non évolutives) ou d'origine alluvionnaire et, dans ce cas, les règles de conception et de construction des remblais courants sont pour l'essentiel transposables à ces ouvrages.

Bien entendu, les remblais de grande hauteur peuvent également être construits avec des matériaux de caractéristiques moins sécuritaires (sols fins argileux notamment).

Dans ce cas, leur conception et leur réalisation ne s'appuient plus seulement sur les règles empiriques évoquées précédemment, mais font aussi un large appel à des études spécifiques de mécanique des sols et des roches au même titre qu'un ouvrage d'art. B.

Dans les parties de remblai risquant de se trouver inondées, même exceptionnellement et durant une période très courte, il est classique d'utiliser des matériaux insensibles à l'eau (tels que définis ci-dessus) dont les propriétés mécaniques sont conservées pendant et après imbibition. Des sols traités avec de la chaux ou des liants hydrauliques peuvent également être utilisés dans la mesure où leur stabilité à l'eau à l'âge de l'apparition probable de l'inondation a été vérifiée.

Lorsqu'aucune des deux options précédentes ne peut être retenue, d'autres types de sols peuvent être utilisés si, au préalable, la stabilité mécanique du remblai a été démontrée en conditions immergées et durant la baisse du niveau de l'eau (vidange rapide).

Si des courants hydrauliques longitudinaux ou du battillage sont possibles, des dispositions particulières pour la protection des talus sont à étudier spécifiquement. C.

Pour réaliser le mètre supérieur des remblais, il faut organiser le mouvement des terres de manière à réserver, à cette partie, les matériaux les plus frottants et les moins sensibles à l'eau afin d'optimiser la portance de la plate-forme support de la chaussée.

Des gains très substantiels sur le dimensionnement de la structure de chaussée peuvent être obtenus par une application rigoureuse de cette règle. D.

Pour les remblais de raccordement aux ouvrages d'art, les remblais de tranchées, et d'une manière générale tous les petits remblais de géométrie complexe, il est recommandé d'utiliser dans la mesure du possible des matériaux granulaires insensibles à l'eau relativement fins et homométriques du type sables de dune, car leur mise en place n'exige pas une énergie de compactage élevée et permet donc l'utilisation de petits compacteurs très maniables.

Lorsque de tels matériaux ne sont pas disponibles, on peut utiliser les matériaux de corps de remblais ordinaires, mais en accordant une attention particulière à l'exécution et à la vérification du compactage (épaisseur des couches compatibles avec la puissance des compacteurs utilisés en particulier). E.

Pour la réalisation d'ouvrages en terre renforcés par différentes inclusions (métalliques, plastiques, etc.) tels que des murs de soutènement, il est également recommandé d'utiliser dans la mesure du possible des matériaux insensibles à l'eau dont le D_{max} est compatible avec le procédé de renforcement retenu.

Cette règle générale est toutefois précisée par des spécifications particulières applicables à chaque type de procédé de renforcement.

2-2. Aspects à considérer dans l'établissement du mouvement prévisionnel des terres

Le responsable de tout projet relativement important de réalisation de remblais routiers doit étudier un plan de mouvement des terres, même s'il est très probable que le mouvement des terres appliqué réellement soit assez différent de celui envisagé au stade de la conception, compte tenu des différents aléas qui seront rencontrés en cours d'exécution.

Outre l'analyse des aspects liés aux quantités de matériaux nécessaires et à leurs distances de transport qui est le principal objet du plan de mouvement des terres, il faut également tenir compte de certaines exigences qualitatives comme l'interdiction :

- d'utiliser les matériaux considérés comme inaptes au sens défini ci-dessus,
- de consommer, dans les corps de remblai, des matériaux possédants d'excellentes caractéristiques pouvant être réservés à des applications plus valorisantes (partie supérieure du remblai, couche de forme, etc.),
- de mettre en œuvre dans des couches élémentaires adjacentes des matériaux ayant des caractéristiques géotechniques peu compatibles, comme principalement des matériaux fins argileux humides avec des matériaux rocheux grossiers et homométriques (risques d'interpénétration lente du sol fin dans les vides du matériau rocheux et possibilité de création d'une nappe dans le matériau rocheux lorsque le talus est recouvert de terre végétale peu perméable, cette nappe pouvant par la suite engendrer des pressions interstitielles dans le sol argileux ou provoquer le glissement de la couverture du talus).

2-3. Pentes de talus

D'une manière générale, les pentes de talus des remblais routiers peuvent être fixées a priori en fonction de la hauteur du remblai et de la nature des matériaux conformément aux indications données dans le tableau 3 ci-après.

Nature du matériau	Hauteur du remblai		
	$h \leq 5 \text{ m}$	$5 \leq h \leq 10 \text{ m}$	$h \geq 10$
Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	Pente $\leq 2/3$	Pente $\leq 1/2$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux granulaires insensibles à l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$	pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
matériaux issus de roche dure non altérée	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 1/1$	Pente $\leq 2/3$ avec risberme

(*) Les pentes de talus considérées dans le présent document sont exprimées par la tangente de l'angle formé par le plan du talus avec le plan horizontal.

Tableau 3 - Règles courantes fixant la pente des talus de remblai

2-4. Préparation du sol support du remblai

2-4.1 Déboisage

Tous les arbres implantés sur l'emprise des remblais doivent être abattus (ou éventuellement arrachés si leur diamètre, mesuré à 1 m du sol, ne dépasse pas 0,1 m).

2-4.2 Dessouchage

L'extraction des souches restant après l'abattage des arbres n'est pas systématique mais résulte d'une réflexion prise dès la conception du projet (ou à la rigueur, avant le démarrage des travaux de préparation du sol support de remblai).

La décision de dessouchage doit tenir compte du fait qu'au-delà d'une hauteur de remblai de 5 m, la probabilité de reprise de croissance ou de putréfaction de la souche est quasi nulle.

De plus, ce risque est bien moins dommageable que les effets, sur le déroulement futur du chantier, qui résultent de la déstructuration et la désorganisation générale du terrain, inévitable à la fin de ce type de travaux (notamment dans les terrains argileux en climat humide).

Lorsque le sol support du remblai est caractérisé comme compressible, l'opération de dessouchage ne doit pratiquement jamais être exécutée.

2-4.3 Décapage de la terre végétale

Cette opération ne doit être systématiquement réalisée que pour les remblais de faible hauteur ($h < 1$ à 2 m) et lorsque le sol support n'est pas compressible.

Dans ce cas, le projet doit fixer les épaisseurs de décapage à réaliser. Pour les remblais de hauteur plus élevée, elle n'est justifiée que si la terre végétale est nécessaire pour recouvrir les talus et que le projet a prévu ce type de couverture.

Dans ce cas, la terre végétale doit être épurée des pierres ($D_{\max} > 150$ mm), débris de racines et arbustes, puis stockée provisoirement en merlons de 2 m de hauteur maximum situés en dehors des zones inondables.

Ces merlons doivent être profilés avec des pentes de talus $\leq 2/3$, nivelés et légèrement compactés en surface de manière à éviter toute stagnation d'eau pluviale.

La couverture des talus par de la terre végétale ne doit pas être considérée comme une règle de l'art d'application systématique, mais les talus sur lesquels elle doit porter doivent être définis si possible dès la conception (ou à la rigueur lors des travaux de finition).

En effet, dans de nombreux cas, la couverture de terre végétale est non seulement inutile mais peut également être néfaste.

2-4.4 Nivellement et compactage des sols support de remblai

Ces opérations s'imposent systématiquement lorsque la topographie naturelle du sol ne permet pas l'écoulement rapide des eaux pluviales et pour faciliter les conditions de traficabilité des engins d'approvisionnement des matériaux de la première couche de remblai.

En particulier, ces opérations doivent être exécutées impérativement et immédiatement après toute opération éventuelle de dessouchage ou de décapage. Dans les zones compressibles, ces opérations (et plus particulièrement le compactage) sont le plus souvent inefficaces donc inutiles.

2-4.5 Dispositions particulières de drainage et purges

Les seules dispositions générales pouvant être recommandées sont celles visant à protéger le sol support de remblai vis-à-vis de la stagnation des eaux pluviales.

Ces dispositions se résument d'ailleurs pour l'essentiel aux opérations de nivellement et de compactage indiquées plus haut. Dans certains cas, il faut cependant les compléter par d'autres mesures comme la réalisation d'ouvrages provisoires de collecte et d'exutoire (fossés, puits, etc.).

D'autres dispositions peuvent s'avérer nécessaire, pour assainir un sol support de remblai, notamment dans les zones de raccordement déblai-remblai, comme par exemple un système drainant à la base du remblai (couche drainante, tranchées drainantes en épis, etc.).

La recherche ou la création des exutoires (bassins ou puits d'infiltration définitifs, etc.) doivent être envisagées et définies au stade de la conception du projet.

La purge des matériaux impropres (tourbes, vases, déchets divers, etc.) situés sur l'emprise des remblais est entreprise systématiquement seulement lorsqu'elle concerne des masses relativement faibles de matériaux.

Dès que l'importance de ces masses devient significative vis à vis de l'économie du projet, elles doivent être étudiées au stade des études de conception et les dispositions particulières à leur appliquer doivent être précisées dans le projet.

2-4.6 Exécution de redans

Lorsqu'un remblai doit être construit sur un sol qui présente une pente naturelle $> 1/5$, la pratique générale est d'exécuter, préalablement à la mise en place de la première couche de remblai, des redans pour assurer un ancrage correct du remblai sur la pente.

Ces redans ont une largeur de 2 à 3 m au minimum et un profil en travers sensiblement horizontal (avec toutefois une légère pente pour permettre aux écoulements éventuels de s'évacuer vers l'aval de la pente naturelle).

Si des dispositions complémentaires s'avèrent nécessaires, comme par exemple la pose d'un matelas drainant assurant la continuité des écoulements entre les différents redans, celles-ci doivent être conçues et définies au stade de la conception du projet.

3-Recommandations relatives à l'exécution des remblais

3-1. Technique de construction

3-1.1 Compactage méthodique

Tout remblai routier doit être méthodiquement compacté, c'est-à-dire construit par couches élémentaires successives sensiblement horizontales et dont l'épaisseur est compatible avec l'efficacité des compacteurs utilisés.

Si les matériaux utilisés comportent des éléments trop grossiers pour satisfaire cette condition, il faut les remplacer ou les corriger par écrêtage ou changer de compacteur, mais il n'est pas tolérable de vouloir compenser une puissance insuffisante du compacteur par un accroissement du nombre de passes.

Le compactage produit par les engins d'approvisionnement des matériaux ne peut pas être considéré comme suffisant pour garantir une compacité homogène acceptable.

3-1.2 Profilage et compactage des talus

Cette opération est délicate en raison du danger qu'il y a à faire évoluer des compacteurs à la crête des talus de remblai ; elle est par ailleurs très importante car elle conditionne la tenue des talus et donc la géométrie, la stabilité et l'esthétique des ouvrages.

Pour réaliser correctement cette opération, l'une ou l'autre des deux pratiques suivantes peut être suivie : - la première dite "du talus excédentaire" consiste à construire le remblai en ménageant une surlargeur d'environ 1 m sur chaque talus et de compacter chaque couche élémentaire en restant suffisamment en retrait de la crête pour conserver une bonne sécurité de travail au conducteur.

Lorsque le remblai est terminé, il est alors indispensable de reprofiler le talus à sa cote finale avec des engins appropriés (pelles hydrauliques), en réutilisant éventuellement les matériaux en excès dans d'autres remblais.

Cette pratique est applicable pour des pentes de talus $> 1/2$ et pour des hauteurs n'excédant pas 5 à 7 m ; au-delà de cette hauteur, il faut prévoir des risbermes dans le projet (ce qui est par ailleurs souhaitable pour l'entretien et la stabilité de l'ouvrage) et exécuter le profilage définitif du talus chaque fois que le niveau d'une risberme est atteint. - la seconde est une pratique plus simple mais limitée aux pentes de talus $\leq 1/2$.

Elle consiste à construire directement le remblai à sa géométrie définitive et à réaliser simultanément profilage et compactage des talus en utilisant de gros buteurs ou mieux certains gros compacteurs automoteurs à pieds dameurs équipés d'une lame de régilage qui évoluent parallèlement à la pente du talus.

D'autres pratiques, plus sophistiquées, telles que l'utilisation de compacteurs treuillés depuis la crête du talus, ne doivent pas être considérées comme constituant une pratique normale de compactage des talus de remblais routiers courants.

3-1.3 Prise en compte de la situation météorologique au moment des travaux

La nécessité de conduire les travaux de terrassement en fonction de la situation météorologique du moment constitue une recommandation générale très importante.

Elle exige en particulier que les matériels et les méthodes de travail utilisés soient adaptés aux sols et aux conditions météorologiques les plus probables sur le lieu du chantier et à l'époque des travaux.

En effet, il va de soi que l'extraction en couches (à l'aide de décapeuses notamment) produit une exposition maximum du matériau aux effets des conditions météorologiques (ce qui peut être bénéfique ou néfaste suivant les cas) et, qu'inversement, une extraction frontale (à l'aide de pelles hydrauliques notamment) permet de minimiser l'influence de la météorologie.

Ces possibilités doivent être intelligemment gérées pour réaliser les travaux dans les meilleures conditions.

En plus de son incidence sur les matériels et la technique d'extraction, la nécessité de conduire les travaux en fonction des conditions météorologiques conduit :

- à prévoir certains matériels spécifiques tels que des scarificateurs, charrues à disques, etc., pour produire aération et assèchement, des niveleuses et des

compacteurs à pneus pour profiler et fermer les plateformes dès qu'une prévision de pluie est annoncée ;

- à réaliser tous les dispositifs de collecte provisoire des eaux de ruissellement et, le cas échéant, les travaux nécessités par leur évacuation ;
- à maintenir une "veille météo" d'autant plus fine que le chantier se trouve en zone à forte variabilité météorologique ; pour ce faire, le responsable du chantier peut soit être relié à la station météo la plus proche du chantier, soit se constituer une station météo sommaire implantée directement sur le chantier.

3-1.4 Traitement à la chaux vive de sols sensibles à l'eau trop humides pour réutilisation en remblai

Le recours au traitement à la chaux vive est considéré comme une pratique générale dans certains pays (Europe du Nord notamment), car elle y a été largement développée depuis plus de deux décennies en raison du fait que la plus grande partie des sols disponibles étaient sensibles à l'eau et trop humides pour être réutilisés dans leur état naturel et que les délais de réalisation des ouvrages étaient le plus souvent trop courts pour espérer pouvoir réutiliser ces sols en mettant à profit la météorologie.

La recommandation de cette pratique se limite toutefois à exiger de l'entrepreneur qu'il sache la mettre en œuvre le cas échéant, c'est-à-dire qu'il dispose des matériels et des connaissances indispensables.

En revanche, les aléas portant sur les quantités de matériaux à traiter, qui sont fonction des sols et de la météo, ayant le plus souvent des incidences financières importantes, il n'est pas acceptable d'exiger de l'entrepreneur qu'il procède de lui-même au traitement, dès que l'état du sol l'impose.

Il convient alors que le contrat permette de lui attribuer la rémunération correspondant aux quantités réelles de chaux et de masses de sol traité qui se sont avérées nécessaires pour réaliser le chantier.

Dans les autres pays cette pratique n'est pas encore généralisée, cela doit être explicitement défini dans le projet.

3-2. Niveau de compacité à atteindre

La garantie de stabilité des remblais routiers exige que la mise en place des matériaux soit réalisée de manière à obtenir le niveau de compacité optimum.

En dessous de ce niveau, le remblai peut subir des tassements inacceptables pour la chaussée ou les ouvrages d'art contigus. Pour des valeurs très inférieures à ce niveau optimum, il peut même se produire des ruptures du fait d'une insuffisance de la résistance au cisaillement pour la hauteur et la pente de talus adoptées.

Au-dessus du seuil optimum, il y a des risques de gonflements à long terme pour les sols argileux sur-compactés dans un état sec si une imbibition postérieure à la construction se produit.

Dans le cas des sols argileux humides, un sur-compactage engendre des surpressions interstitielles pouvant causer des ruptures par insuffisance de résistance au cisaillement.

L'obtention du niveau de compacité optimum constitue donc une exigence générale très importante, mais les modalités permettant de la satisfaire sont complexes car la compacité est un paramètre portant sur l'état du sol en place, difficile à formuler et à vérifier.

De nombreuses propositions ont été faites depuis cinquante ans pour caractériser ce niveau de compacité optimum.

Actuellement on peut recommander l'une ou l'autre des 3 approches décrites dans le tableau 4 ci-après.

Type d'approche	Principe	Valeurs à satisfaire	Domaine d'application	Commentaires
Par référence à l'une ou l'autre des caractéristiques suivantes d'état du sol en place :		Les valeurs généralement adoptées sont :		
taux de compactage T(%)	Le taux de compactage à atteindre T exprime la proportion de la masse volumique apparente sèche (densité sèche) de référence qu'il faut obtenir sur le sol en place.	$T = \frac{\rho_d \text{ sol en place}}{\rho_d \text{ OPN}} \geq 95 \%$	remblais de sols fins (moins de 25 % d'éléments ≥ 20 mm) et relativement homogènes (pour éviter de trop fréquentes déterminations de la ρ_d de référence).	Cette approche est très satisfaisante au plan théorique car le niveau de compacité recherché est quantifié à partir d'un paramètre qui l'exprime directement mais le contrôle de son respect est souvent difficile et coûteux en pratique
+ degré de saturation S_r (%)	La densité sèche de référence généralement considérée est la densité sèche Optimum Proctor Normal	Les valeurs généralement adoptées pour S_r sont : $60 \% \leq S_r \leq 95 \%$		
+ pourcentage de vides d'air n_a (%)	Les caractéristiques S_r , n_a sont calculées à partir des paramètres du sol ρ_d , w , ρ_s	Les valeurs généralement adoptées pour n_a sont : $n_a \leq 10 \%$		

Par référence à une (ou plusieurs) caractéristique(s) mécanique(s) du sol compacté	La caractéristique la plus souvent considérée est un module de déformation (type Boussinesq) déterminé par un essai de chargement statique sous une plaque rigide	Les valeurs à obtenir dépendent du sol (granulaire ou cohérent) et des paramètres de chargement ($\emptyset$ de la plaque, contrainte appliquée). Il n'est pas possible de proposer de valeurs ayant un caractère universel	Remblais en matériaux granulaires grossiers ne permettant pas l'évaluation du niveau de compacité par référence aux caractéristiques d'état définies plus haut. Note : Dans le cas de matériaux grossiers mais cohérents se trouvant dans un état hydrique sec, cette approche est à éviter.	L'évaluation du niveau de compacité à partir de la mesure d'un module de déformation est très satisfaisante sur le plan pratique (vis à vis de la facilité de réaliser les mesures en particulier) mais son interprétation est souvent mise en défaut (dans le cas des matériaux cohérents secs en particulier)
Par référence à des modalités pratiques de réalisation du compactage ayant été éprouvées	On cherche à reproduire sur le chantier des conditions de compactage dont il a été démontré par ailleurs (sur planches d'essais) qu'elles garantissent le niveau de compacité recherché.	Ces conditions sont généralement définies par une épaisseur de couche et une énergie de compactage à appliquer pour un sol et un compacteur donnés. L'énergie de compactage peut être caractérisée par un nombre de passes ou autre paramètre directement lié à cette grandeur	Le niveau de compacité de tous les sols et matériaux rocheux peut être évalué par cette approche avec une fiabilité très satisfaisante lorsque l'on connaît les paramètres définissant les conditions de compactage qu'il convient de reproduire sur le chantier	Cette approche permet une définition objective des conditions qui conduisent au niveau de compacité recherché. La vérification sur le chantier du respect de ces conditions est par ailleurs légère et peu coûteuse (pas d'essais sur le sol en place). Toutefois, les conditions de compactage à reproduire étant spécifiques à un matériau (défini par sa nature et son état hydrique) et à la puissance du compacteur utilisé, l'application de la démarche suppose de connaître ces données tout au long du déroulement du chantier.

Tableau 4 - Caractéristiques des différentes approches pouvant être utilisées pour définir et vérifier le niveau de compacité des sols devant être obtenu dans un remblai routier

3-3. Niveau de résistance mécanique à atteindre

Contrairement à ce qu'on pourrait intuitivement penser, la recherche d'une valeur de résistance mécanique dans le corps des remblais n'est pas pertinente dans le cas général. En effet, dans le cas des matériaux purement granulaires (insensibles à l'eau) utilisés pour la réalisation de remblai (même de grande hauteur) respectant les pentes de talus précisées

dans le tableau 3, les caractéristiques mécaniques obtenues (même avec un compactage relativement faible) seront toujours suffisantes pour garantir la stabilité de l'ouvrage vis-à-vis des ruptures par cisaillement.

Dans le cas des matériaux cohérents mis en œuvre dans un état sec, le niveau de résistance pouvant être atteint après compactage est souvent très élevé, mais sans relation avec la résistance qui pourra être constatée à moyen ou long terme si les matériaux subissent une humidification postérieure à la construction du remblai.

Seul le cas des matériaux cohérents mis en œuvre dans un état humide (avec risque de générer des pressions interstitielles durant le compactage), peut justifier de rechercher un niveau de résistance minimum pour assurer la stabilité durant la construction (car, après construction, les risques de ruptures s'annulent rapidement du fait de la dissipation progressive des pressions interstitielles).

La valeur à rechercher est alors celle résultant d'un calcul classique de stabilité vis-à-vis d'une rupture par cisaillement pour la géométrie de l'ouvrage (caractérisée par une cohésion non drainée C_u à obtenir sur le matériau en place).

3-4. Finitions

Les travaux de finition comprennent le modelage des formes de raccordement des talus avec le terrain naturel, le revêtement des talus avec de la terre végétale, l'engazonnement et/ou les plantations d'arbres, l'implantation des descentes d'eaux de ruissellement, le réaménagement de tous les sites (emprunt, dépôts, etc.) et surfaces (pistes de chantier, aires de stockage, etc.) et le rétablissement définitif des écoulements naturels qui ont été perturbés par les travaux.

Pour toutes ces tâches, spécifiques à chaque ouvrage et à son environnement, la seule recommandation à caractère général pouvant être proposée concerne le bon rétablissement des écoulements naturels dans le respect des contraintes de stabilité de l'ouvrage et de l'environnement. Les autres exigences particulières relatives aux finitions doivent être explicitement stipulées dans le contrat.

ANNEXE 3



PHASES DE RÉALISATION DES TERRASSEMENTS - FICHES TECHNOLOGIES

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 3

1. SOMMAIRE

2. EXTRAITS FICHES TECHNOLOGIES DES TERRASSEMENTS

ANNEXE 3

Référence : Guide technique - Service d'Etudes Techniques des Routes - Sétra - Mars 2007
- Conception et réalisation des terrassements / Fascicule 1 : études et exécution des travaux

1- Sommaire

- B.1 - Les emprises, leur libération
- B.2 - Les pistes
- B.3 - Météorologie et terrassements
- B.4 - La terre végétale
- B.5 - Les déblais
- B.6 - Les remblais
- B..7 - Emprunts ou apports extérieurs
- B.8 - Dépôts définitifs et merlons
- B.9 - Les remblais sur sol compressible
- B.10 - Les terrassements à l'explosif
- B.11 - Déchets et sous- produits
- B.12 - L'assainissement et le drainage
- B.13 - Couche de forme

2- Extraits Fiches technologies des terrassements

2-1. Les emprises, leur libération

2-1.1 Domaine concerné

Les emprises concernent la surface de terrain affectée à la construction de l'ouvrage et de ses dépendances.

Le domaine concerné comporte l'acquisition définitive ou temporaire des terrains, leur libération, le dessouchage, le déboisement, le déplacement des réseaux, la démolition d'ouvrages, la sauvegarde des sites archéologiques et le décapage.

2-1.2 - Référentiel technique

2-1.3 - Problématique

- bien définir et acquérir les emprises nécessaires ;
- faire l'inventaire des différentes contraintes liées aux réseaux et ouvrages et estimation des délais nécessaires pour définir les travaux correspondants (archéologie, gaz, eau...) ;
- le croisement avec des infrastructures existantes ;
- l'allotissement des travaux de libération des emprises.

2-1.4 - Paramètres influents

- le type d'occupation des sols (cultures, prairies, bois...) ;

- les résultats de la concertation (gestionnaires de réseaux, riverains, collectivités...);
- les délais et aléas de procédure ;
- le patrimoine archéologique et environnemental ;
- l'influence de la météorologie sur le décapage.

2-1.5 - Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE	État des lieux de tous les réseaux aériens et souterrains, des puits, marnières, karsts, des anciens dépôts d'explosifs et galeries pour faits de guerre, des clôtures, des sites archéologiques, géologiques (paléontologiques et minéralogiques), des sites biologiques à protéger (faune, flore...).	Etablissement d'un plan très précis de tous les réseaux, définir leurs positions aériennes ou souterraines Faire un document de synthèse le plus clair possible à transmettre aux entreprises au niveau du DCE, et préciser à l'entreprise l'ordonnancement de la libération des emprises. Assurer la cohérence avec le PPSPS
	Définition des repères et des polygones. Calcul des implantations.	
	Définition de la destination des produits de démolition de décapage et de déboisement	Faire attention aux édifices à « risques » (ex : transformateurs, bâtiments industriels, amiante).
	Recensement des besoins en pistes et déviations provisoires.	
Préparation du chantier	Définir avec les gestionnaires des réseaux les travaux à réaliser et les programmer pour qu'ils soient terminés avant lancement des terrassements	
Préparation de l'exécution	Planification des travaux de libération des emprises.	
	Etablissement et examen des procédures d'exécution Conception et implantation précise des pistes d'accès. Délimiter les zones de déboisement, de fouilles archéologiques, des zones à débroussailler, les zones de flore et de faune à préserver, les zones de décapage et baliser les réseaux existants	Organiser les opérations de fouille, notamment en cas d'interférence avec d'autres chantiers
Exécution	Implantation des emprises et de la polygonale.	
	Préparation des accès, réalisation des clôtures et exécution des travaux de libération	
	Déviations des lignes aériennes électriques.	
	Déboisement. Récolement	

2-1.6 - Suivi à réaliser

Conservation du piquetage et de la polygonale.

2-2 Les pistes

2-2.1 Domaine concerné

Il s'agit des pistes prévues au marché, réservées à l'activité du chantier et qui permettent :

- l'accès ou la liaison entre certains ouvrages ou points particuliers ;
- ou le renforcement de voies existantes

2-2.2 - Référentiel technique

2-2.3 - Problématique

- caractère provisoire, intégré ou définitif ;

- dimensionnement ;
- caractéristiques géométriques ;
- nature des matériaux ;
- entretien de la piste.

2-2.4 - Paramètres influents

- relief ;
- nature et intensité du trafic ;
- période et durée de service ;
- environnement hydrique ;
- mouvement des terres ;
- piste dans l'emprise et hors emprise ;
- dimensionnement de l'emprise ;
- concertation et environnement

2-2.5 - Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations	Recommandations
Conception du DCE	- calage et dimensionnement de la piste	tenir compte des moyens	
	- maîtrise foncière		
	- dimensionnement en fonction de la finalité		
	- allotissement	les pistes peuvent faire l'objet d'un marché séparé.	
Préparation du chantier	- environnement		
	- franchissement d'obstacles		
Préparation de l'exécution	- disponibilité des emprises		
	- prise en compte des contraintes	notamment les réseaux	
	- état des lieux		
Exécution	- définition et examen des méthodes et moyens d'exécution		
	- piquetage		
	- réalisation selon les méthodes et		
	- entretien		
	- remise en état éventuel		

2-2.6 Suivi à réaliser

Néant

2-3 Météorologie et terrassements

2-3.1 Domaine concerné

Les conditions météorologiques ont, en général, sur le bon déroulement des chantiers de terrassement des conséquences importantes sur les techniques à mettre en œuvre (réemploi des sols ou traitement), sur les délais d'exécution et l'économie du chantier

Le domaine concerné comporte l'étude géologique et géotechnique, l'identification des sols sensibles à l'eau, le recueil des données météorologiques, leur exploitation et leur suivi.

2-3.2 Référentiel technique

- Météorologie et terrassements - Recommandation
- Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Guide technique

2-3.3 Problématique

L'objectif poursuivi est destiné à :

- optimiser le mouvement des terres et le réemploi des sols ;
- évaluer l'importance et la répartition des intempéries dans le délai imparti au chantier ;
- préciser les seuils des précipitations pouvant entraîner l'arrêt du chantier ;
- prendre en compte, dans l'étude des projets, les aléas climatiques et leurs conséquences sur le coût des travaux

Les caractéristiques du projet ont une incidence directe sur la sensibilité variable des sols aux phénomènes météorologiques (proportion des sols sensibles, topographie, géométrie et phasage du projet, période de réalisation).

Les sols sensibles à l'eau peuvent avoir une répercussion sur l'organisation du chantier, la portance, la traficabilité, la glissance et les possibilités de réutilisation pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

2-3.4 Paramètres influents

- les zones climatiques ;
- les sols sensibles à l'eau : nature, état, proportion des différents sols ;
- la période de réalisation des travaux ;
- les délais : durée du chantier, nombre prévisionnel de jours d'arrêt de travail ;
- l'eau : action de l'eau sur les sols sensibles ;
- les caractéristiques du projet : topographie et géométrie du projet (profils en long et en travers) ;
- conditions hydrogéologiques (nappes phréatiques) ;
- proportion de sols sensibles et réutilisation de ceux-ci (sensible = aptitude des sols à changer d'état) ;
- nature de la couche de forme ;
- contraintes de phasage ;
- l'érosion pluviale (influence sur le déroulement des travaux et sur la qualité des ouvrages) ;
- les orages qui provoquent l'érosion et la destruction d'ouvrages réalisés ;
- le brouillard qui provoque l'insécurité et l'arrêt du chantier ;

- la pluie, le soleil, le vent et la neige qui ont une action sur la teneur en eau (le vent peut empêcher le traitement aux liants hydrauliques) ;
- le gel (fréquence et intensité) qui accélère l'altération des matériaux évolutifs et peut provoquer des concentrations d'eau dans les sols gélifs.

2-3.5 Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE	sensibles à l'eau	Sur la base des études géologiques et géotechniques.
	Recueil des données météorologiques.	Si possible sur 30 ans.
	Etudier au moins 2 solutions de mouvement des terres correspondant à des conditions climatiques plutôt favorables et défavorables	Au niveau des prix, cette démarche permet de mieux cerner les variations possibles des dépenses et d'adapter les marges de tolérance du détail estimatif.
	En déduire des choix stratégiques à imposer dans le mouvement des terres et à faire figurer dans les pièces du marché.	
	Rédaction des pièces administratives (clauses sur les variations de prix et prolongation éventuelle du délai).	Joindre le document informatif regroupant tous les renseignements météorologiques.
Préparation du chantier	Organisation du recueil et de l'exploitation des données météorologiques (personnel, matériel, contacts, PAQ).	
Préparation de l'exécution	Etablissement et examen des procédures d'exécution	En déduire les modalités de décapage et le mode d'extraction des matériaux
	Délimiter les zones de sols sensibles à l'eau	
Exécution	Suivi des procédures, recueil des données météorologiques, dispositions protectrices à prendre : - réglage de plate-forme ; - drainage provisoire ; - aménagement d'exutoire ; - entretien des pistes de chantier (pour éviter les sols sensibles à l'eau).	Pentes, fermetures.

B.3.6 - Suivi à réaliser

Fonctionnement de l'assainissement et du drainage.

2-4 La terre végétale

2-4.1 Domaine concerné

La qualité et la gestion de la terre végétale doivent être examinées dès la phase projet lors de la campagne de sondage géotechnique et à la charge du maître d'ouvrage.

A défaut, une étude préliminaire sur la terre végétale devra être réalisée avant la conception des DCE terrassements et paysagers

Sur la base de ces études, le plan de mouvement des terres végétales et les conclusions du rapport d'études permettront de déterminer la qualité de l'aménagement paysager tant sur le plan géométrique que sur le plan des plantations.

2-4.2 Référentiel technique

- Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)
- ...

2-4.3 Problématique

- estimation de l'épaisseur de décapage et détermination des besoins ;
- stockage de la terre végétale ;
- identification par des études spécifiques des trois qualités de terre végétale ;
- quantification et affectation des catégories de terre végétale par type d'aménagement rustiques ou complexes et par partie d'ouvrage ;
- conditions de manipulation de la terre végétale ;
- corrections physiques et physico-chimiques de la terre végétale ;
- nappage et épaisseur de terre végétale sur quelle pente de talus ;
- gestion des espaces et des plantations.

2-4.4 Paramètres influents

Les besoins en terre végétale par typologie des espaces (section courante, échangeur, aire de repos ou de service, rétablissement de communication) ;

- les surfaces et la nature du sol brut à plat et sur pente en section courante ;
- l'analyse agronomique ;
- la stabilité structurale des terres ;
- la sensibilité au tassement ;
- l'état hydrique des terres et les conditions de manipulation ;
- l'analyse physico-chimique avec la teneur en matière organique, le pH, le rapport carbone/azote, etc. ;
- l'analyse chimique (azote, phosphore, potassium...) ;
- le test de phytotoxicité notamment pour les sols agricoles ;
- la géométrie des talus, des échangeurs et des rétablissements de communication ;
- le plan de mouvement des terres végétales ;
- les conditions particulières d'exécution des travaux, notamment les types d'engins, en fonction des évolutions climatiques ;
- la qualité des extractions de terres et de mise en dépôt ;
- les apports fertilisants au cours des travaux ;
- le mode de gestion des espaces paysagers (moyens humains et matériels, crédits disponibles, accessibilité des espaces, sécurité...).

2-4.5 Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE Terrassement	• bilan des besoins en terre végétale (TV) par typologie d'espace ; • étude qualitative et quantitative des terres végétales en place selon les 3 catégories de terre ; • quantité de TV ordinaire pour les aménagements rustiques ; • quantité de TV moyenne pour aire de repos, échangeurs, fosse de plantations ; • quantité de TV supérieure pour les giratoires ou les milieux urbains ; • le plan de mouvement des TV établi lors de la phase projet ou lors des études préliminaires spécifiques avant le DCE terrassement • les conditions de manipulation et de stockage des terres ; • avec le gestionnaire définir l'implantation des accès nécessaires à l'entretien des dépendances mais aussi à la phase plantations.	• excepté pour les talus de faible hauteur, le nappage de TV est à proscrire pour les pentes 1/1. Toutefois avec des dispositifs tri-dimensionnel la mise en œuvre de la TV peut être réalisée ; • pour les talus à 3/2 de faible hauteur et pour certaines natures de sols, ils peuvent recevoir un nappage en TV. Toutefois une végétalisation par semis hydraulique sur un sol brut est suffisante sur les talus à 3/2 ; • pour un talus de pente plus douce le nappage de terre végétale varie de 5 cm à 15 cm suivant de type de végétation ; • joindre à titre indicatif le plan de mouvement des TV au DCE Terrassement ; • introduire dans le CCTP Terrassement les spécifications relatives aux conditions de manipulation ; • prévoir un accès tous les km ou 2 km. La largeur sera de 3 m minimum et 4 m en courbe. La pente maximale sera de 50 %
Préparation du chantier	• disponibilité des emprises et des lieux de dépôts provisoires et « définitifs » (en attente du DCE paysager) ; • rappel sur les conditions de manipulation des terres et sur la pérennisation de leur qualité (proposition de l'entreprise) ; • dans le cadre des études géotechniques complémentaires à la charge de l'entrepreneur prévoir quelques analyses complémentaires de TV.	• bien définir au bordereau des prix les conditions de maintien de la qualité des terres et de la non pollution de ces dernières ; • dispositions à prévoir impérativement sur les terres inaccessibles avant la prise de possession par le maître d'ouvrage routier
Exécution	• le respect et le suivi des procédures arrêtées par le plan des mouvements des terres végétales et par les conditions de manipulation ; • la mise en dépôt provisoire ou définitif en zone humide ou de ruissellement de surface ; • le plan de récolement des stocks et des dépôts de TV par catégorie.	• mettre en œuvre les différentes catégories de terres qu'il convient à chaque typologie d'espace ; • veiller à la non contamination des terres • soigner les pentes et créer si besoin des fossés ; • recouvrir et enherber au plus tôt les sols et talus érodables ; • bien définir les prestations dans le bordereau des prix.

B.4.6 - Suivi à réaliser

Afin de choisir, pour la phase conception du DCE paysager, les bonnes semences et les bons végétaux pour chaque sol brut et terre végétale mise en œuvre, une étude spécifique après la phase terrassement ou en cours et à l'avancement devra être engagée pour caractériser les sols en place après travaux et estimer la perméabilité et l'aptitude à l'enracinement de ces sols.

2-5 Les déblais

2-5.1 Domaine concerné

Extraction et évacuation de sols et/ou de matériaux rocheux selon une géométrie préalablement définie au projet avec un objectif de réemploi optimal.

2-5.2 Référentiel technique

- Réalisation des remblais et des couches de forme - guide technique - (GTR)
- Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - guide technique - (GTS)
- Drainage routier - Guide technique
- Météorologie et terrassements - Recommandation

2-5.3 Problématique

- conception de la stabilité des pentes ;
- respect de la géométrie (talus), essentiellement pour les matériaux rocheux ;
- assainissement, drainage provisoire et définitif ;
- conditions de phasage et de méthode d'exploitation ;
- phasage de drainage ;
- blocométrie ;
- tri du mélange et homogénéisation ;
- conception de la PST (nature, drainage, etc.) ;
- respect des engagements environnementaux ;
- appréciation et étude éventuelle du risque de gonflement des fonds de déblai (décompression et effets de l'eau).

2-5.4 Paramètres influents

- nature et état des matériaux ;
- emprises ;
- nappes et venues d'eau ;
- météorologie ;
- problèmes d'environnement ;
- profil en long (conséquences sur le drainage) ;
- mouvement des terres.

2-5.5 Phasage de réalisation des déblais

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE	- mouvement des terres ; - vérification de la cohérence entre le mouvement des terres et les contraintes de phasage ; - définition de l'assainissement et du drainage définitif et éventuellement du dispositif de drainage préalable ou provisoire.	l'entreprise doit fournir dans son schéma organisationnel du plan d'assurance qualité (SOPAQ) sa proposition de mouvement des terres en respectant les contraintes et les méthodologies d'exploitation des déblais
	contraintes d'homogénéisation et de préparation de matériaux que l'on impose.	
	- stratégie de conception et de rémunération des pistes ; - caractéristiques géométriques et nature des dispositifs particuliers permettant d'assurer la stabilité des talus ; - classement PST-AR et disposition d'amélioration éventuelle de l'arase (cf. points singuliers) ; - contraintes environnementales (seuils de vibration, bruit, poussières) ; - objectif de blocométrie maximale ; - planches de convenance (minage, venues d'eau) ; - stratégie de rémunération notamment pour le transport, les matériaux de 1^{ère} et 2^{ème} catégorie.	
Préparation du chantier	- reconnaissance complémentaire ; - validation et actualisation des études ; - libération ou dégagement de l'emprise par le maître d'ouvrage.	
Préparation de l'exécution	vérification des matériels et validation des procédures d'exécution proposées au PAQ	étalonnage et vérification.
	pour les déblais rocheux, définition du contenu de l'épreuve de convenance.	épreuve de convenance à réaliser ou à adapter en fonction de la taille du chantier. Cette épreuve est destinée à donner des indications au maître d'ouvrage sur la faculté de l'entreprise à atteindre la qualité requise.

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Exécution	- nature et état des matériaux avant et après les phases d'élaboration ou de traitement ; - adaptation du mouvement des terres en fonction des matériaux réellement rencontrés et de la météo ; - assainissement provisoire ; - conformité géométrique des travaux réalisés ; - vérification de la conformité et du fonctionnement de l'assainissement et du drainage définitif ; - vérification de la conformité du classement PST-AR de la PST - adaptation éventuelle des dispositifs confortatifs à la stabilité des talus	

2-5.6 Suivi à réaliser

Suivi de la stabilité et de la tenue des talus (piézométrie, mesures inclinométriques éventuelles).



2-6 Les remblais

2-6.1 Domaine concerné

Réalisation de remblais généraux sur terrain relativement plat avec des matériaux naturels, de hauteur faible à moyenne 15m et sur support non compressible, y compris la PST.

Si le sol est compressible se référer à la fiche « Remblai sur sol compressible » du présent chapitre et au guide technique « Étude et réalisation des remblais sur du sol compressible ».

2-6.2 Référentiel technique

- Réalisation des remblais et des couches de forme - guide technique - (GTR)
- Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - guide technique - (GTS)
- Drainage routier - Guide technique
- Météorologie et terrassements - Recommandation

2-6.3 Problématique

- concevoir un ouvrage avec des matériaux et une mise en œuvre avec une densification suffisante, pour que l'état après exécution ne risque pas de produire à long terme des déformations significatives (gonflement, tassements, ruptures de pente...);
- concevoir une PST présentant des caractéristiques de déformabilité compatibles avec les objectifs visés à court et long terme ;
- concevoir une pente de talus (dans le cas de problèmes d'emprise) ;
- respecter des engagements environnementaux.

2-6.4 Paramètres influents

- emprise (pente de talus, largeur de l'assiette, mur...);
- météo (réutilisation des matériaux, mouvement des terres, traficabilité...);
- nature et état du sol support (hauteur du remblai...);
- nature et état des matériaux (mouvement des terres);
- hauteur de remblai (>10 m, 5 à 10 m, <5 m, rasant sur support humide);
- hydrologie et hydrogéologie du site ;
- environnement (terre végétale, engazonnement).

2-6.5 Phasage de réalisation du remblai

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Préparation du support	Décapage	Nécessaire si $h < 3$ m de remblai.
	Dessouchage	Respect des règles de l'art, sinon risque de tassement pour h faible à moyen (pourrissement...).
	Compactage du support (si support pas déformable)	Nécessaire si le support est désorganisé (décapage, dessouchage).
Amélioration du support	Problème de qualité du support (au sens déformabilité) si $h < 1$ à $1,5$ m	Traitement en place, drainage et/ou substitution
	$h > 1,5$ m	Couche épaisse au moment de l'exécution
	La base de remblai risque d'être alimentée par des venues d'eau	Matériaux drainants à la base du remblai, drainage de pied éventuellement associé à un traitement de la base du remblai
Exécution du corps de remblai	Mouvement des terres et météo	(hors remblai hétérogène cf. points singuliers).
	Nature et état des matériaux	Application du GTR et du GTS
	Nature des matériaux	Vérifier l'adéquation avec la pente de talus
	Compactage des bords de remblai, matériaux excédentaires	Définir la méthode et les quantités correspondantes.
Talus de remblai	Assainissement provisoire et définitif	Bourrelets + descentes d'eau Gestion des eaux en phase chantier.
	Protection	Terre végétale et/ou engazonnement.
	Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	• si $h \leq 5$ m $p \geq 2/3$ • si $5 < h \leq 10$ m $p \geq 1/2$ • si $h > 10$ m pas de règle générale, la pente doit résulter d'une étude de stabilité
	Matériaux granulaires insensibles à l'eau, d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	• si $h \leq 5$ m $p \geq 1/$ • si $5 < h \leq 10$ m $p \geq 2/3$ • si $h > 10$ m pas de règle générale, la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Exécution de la PST	Matériaux issus de roche dure non altérée	• si $h \leq 5$ m $p \geq 1/$ • si $5 < h \leq 10$ m $p \geq 1/$ • si $h > 10$ m $p \geq 2/3$ avec risberme
	Adéquation des matériaux à l'objectif de portance assigné à la PST	Vérifier si les matériaux du site réservés dans le mouvement des terres sont susceptibles de convenir à l'état naturel ou après traitement et sur quelle épaisseur, sinon prévoir un objectif moins ambitieux ou rechercher un matériau d'apport.
Autres	• Merlons	Lorsqu'ils sont accolés au remblai, prévoir un drainage à l'interface et la collecte des eaux de surface
	• Dépôts accolés au remblai	

2-7 Emprunts ou apports extérieurs

2-7.1 Domaine concerné

Déblais ou apports situés hors de l'emprise de l'ouvrage principal destinés à pallier un déficit quantitatif ou qualitatif de matériaux naturels ou industriels (classe F du GTR).

2-7.2 Référentiel technique

- Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)
- Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS)

2-7.3 Problématique

- Définition des besoins qualitatifs et quantitatifs
- Itinéraires et moyens de transport
- Les gisements vont-ils fournir les quantités nécessaires de matériaux ?
- Obtention des autorisations nécessaires (problèmes de délais et d'autorisations)

2-7.4 Paramètres influents

- nature, qualité et quantité des matériaux ;
- les accès ;
- homogénéité du gisement ;
- complexité du gisement ;
- distance de l'emprunt aux zones à combler(conditionne le type d'engin de transport);
- possibilité d'utiliser des installations classées (extraction, lavage, criblage, stockage) ;
- schéma départemental des carrières ;
- coordination des mouvements de terre ;
- contraintes d'environnement (poussières...) ;
- minage ;
- vibrations, eau ;
- contraintes de réaménagement de l'emprunt ;
- délais (dans le sens où il faut lancer les études très en amont, délais technico-administratifs) ;
- morphologie du gisement (parties inondables, pluie...) ;
- maîtrise foncière (occupations temporaires, autorisation du propriétaire des lieux, négociation des droits de forage) ;
- complexité du gisement ;
- distance de l'emprunt aux zones de mise en œuvre (conditionne le type d'engin de transport).

2-7.5 Phasage de réalisation de l'emprunt

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE	- objectifs de qualité ; - principes d'exploitation de l'emprunt ; - inventaire des études à engager dans la phase «préparation du chantier» ; - prescriptions intégrées au dossier d'autorisation d'ouverture de carrière ; - prescriptions et conception s'il y a lieu des accès ; - avis des services ; - préciser les contraintes d'exploitation ; - stratégies de rémunération (bascules...) ; - prescriptions de réaménagement avec le délai	Demander à l'entreprise de fournir une méthode d'exploitation de l'emprunt dans le schéma organisationnel du plan d'assurance qualité (SOPAQ).
Préparation du chantier (délai 2 à 3 mois en début de chantier ou 2 à 3 mois avant exécution)	- reconnaissance complémentaire ; - validation et actualisation des études ; - constat de l'état des itinéraires de transport	L'attention doit être attirée sur l'adéquation entre les objectifs et les moyens de reconnaissance (ex : profondeur d'investigation) ; Fixer les délais de reconnaissance en fonction de la taille du chantier
Préparation de l'exécution	- préparation ou amélioration des accès s'il y a lieu ; - validation du processus d'élaboration du matériau pour le rendre apte à satisfaire les objectifs.	
Exécution de l'extraction et de l'élaboration	- nature et état des matériaux avant et après les phases d'élaboration ou de traitement ; - s'assurer en permanence du respect des obligations de l'arrêté préfectoral ; - constat final de l'état des itinéraires de transport	

B.7.6 - Suivi à réaliser

S'assurer que tous les engagements en termes d'environnement et vis à vis du propriétaire du site, ont été respectés.

2-8 Dépôts définitifs et merlons

2-8.1 Domaine concerné

- utilisation de matériaux naturels de déblai, excédentaire et/ou de mauvaise qualité avec des caractéristiques géométriques imposées en :
- aménagements paysagers,
- aménagements de protection phonique,
- aménagements de terrains agricoles.
- déchets de chantier (cf. le thème concerné) ;
- dans certains cas on peut faire appel à des matériaux d'apport pour la réalisation de certains merlons.

2-8.2 Référentiel technique

- ...

2-8.3 Problématique

- en fonction du mouvement des terres, rechercher les zones susceptibles de recevoir des matériaux excédentaires et/ou de mauvaise qualité en définissant une géométrie et des volumes garantissant la stabilité, s'intégrant au site sans perturber les écoulements ;

- dans le cas des merlons ou des buttes paysagères imposées, réalisés en général avec des matériaux de moindre qualité que ceux utilisés dans l'ouvrage principal, s'assurer que le remblai réalisé présentera une stabilité compatible avec les caractéristiques géométriques imposées.

2-8.4 Paramètres influents

- la disponibilité des terrains et leur accès ;
- la géométrie ;
- la topographie ;
- les contraintes environnementales (loi sur l'eau, protections phoniques) ;
- les écoulements ;
- les aménagements paysagers et la nature des plantations ;
- le mouvement des terres ;
- l'hydrogéologie des sites de dépôts ;
- la nature, la qualité, la quantité des matériaux ;
- la destination finale du dépôt (contraintes de réaménagement) ;
- la réglementation des décharges.

2-8.5 Phasage de réalisation d'un dépôt et d'un merlon

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE	Estimer les volumes et la nature des excédents et des matériaux non réutilisables, définir et localiser leur destination	Définir précisément les dépôts et merlon à géométrie imposée, notamment dans le cas où la nature des matériaux impose des contraintes particulières (ex : cas des sols mous à évacuer) : • plan avec localisation des dépôts pour que l'entreprise puisse faire son prix ; • préciser les volumes de dépôt à la charge de l'entreprise ; • demander à l'entreprise dans le SOPAQ, la méthode qu'il va utiliser pour la mise en œuvre des dépôts ; • rappeler dans le SOPAQ les prescriptions de réaménagement des dépôts.
Préparation du chantier	Disponibilité réelle des terrains ; constat de l'état des itinéraires de transport	
Préparation de l'exécution	Préparation ou amélioration des accès s'il y a lieu. Préparation éventuelle de la zone qui comprend éventuellement du décapage et de l'assainissement Valider la méthode d'exécution proposée dans le PAQ	
Exécution	Vérifier la bonne application des destinations prévues au DCE Vérifier la nature et la bonne destination des matériaux Respect des engagements initiaux pour le réaménagement, constat final de l'état des itinéraires de transport.	

2-9 Les remblais sur sol compressible

2-9.1 Domaine concerné

La construction de remblais sur des sols présentant une forte déformabilité, une faible perméabilité et une résistance faible

Parmi ces sols saturés ou quasi saturés dénommés « sols compressibles » ou « sols mous », on trouve :

- les tourbes ;
- les vases ;
- les argiles molles ;
- les limons argileux ou lâches ;
- les sables lâches ;
- les loëss et certains remblais récents mal compactés.

2-9.2 Référentiel technique

Études et la réalisation des remblais sur sols compressibles - Guide technique.

2-9.3 Problématique

- la faisabilité du remblai au regard des caractéristiques du sol et de la hauteur du remblai ;
- la stabilité d'ensemble du remblai et des ouvrages environnants ;

- les déformations générées par les tassements du sol compressible ;
- les efforts parasites générés sur les ouvrages voisins (bâtiments, ponts, lignes SNCF, pylônes) ;
- la limitation des tassements différentiels à long terme
- les perturbations dans l'écoulement des eaux de surface (remblai en fond de vallée inondable) mais aussi dans l'écoulement des eaux internes ;
- la rupture du sol support en phase travaux ou à long terme
- le temps d'exécution du remblai ;
- le remblai est-il la seule solution ? (pont, viaduc).

2-9.4 Paramètres influents

- la reconnaissance géotechnique lors du choix du ou des fuseaux de passage dans les études préliminaires du projet ;
- une reconnaissance progressive du site et des sols depuis les études préliminaires jusqu'au projet ;
- la profondeur et l'épaisseur du sol compressible ;
- la hauteur du remblai ;
- la largeur de la plateforme par rapport à la largeur finale de mise en service (emprise plus large) ;
- la technique de construction du remblai ;
- l'amplitude des déformations tolérées après la mise en service ;
- les contraintes environnementales du projet ;
- les contraintes géométriques du projet (capacité à modifier le profil en long après la mise en service) ;
- l'indépendance de l'assainissement routier par rapport aux déformations et aux tassements ;
- l'ordonnancement des travaux ;
- le temps entre le début des études de reconnaissances géotechniques, les travaux (construction par étapes) et la stabilisation du remblai (absence de déformation du sol ?) ;
- la disponibilité des matériaux pour des surcharges temporaires ou pour des banquettes stabilisatrices ;
- l'étude technico-économique des solutions (coût études + coût de construction + coût d'entretien).

2-9.5 Solutions préconisées

Les solutions préconisées par le guide « Étude et Réalisation des remblais sur sols compressibles » [8] figurent dans les annexes 1 à 15 (page 38 du guide) à savoir :

- la construction par étapes ;
- les banquettes latérales ;
- la surcharge temporaire ;
- les remblais allégés ;
- le renforcement par géosynthétiques ;
- la substitution du mauvais sol ;

- les drains verticaux ;
- la consolidation atmosphérique ;
- les colonnes ballastées ;
- les plots ballastés pilonnés ;
- l'injection solide ;
- les colonnes de mortier sol-ciment réalisées par jet ;
- les colonnes de sol traité à la chaux ou au ciment ;
- les remblais sur inclusions rigides ;
- l'électro-osmose

2-9.6 Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Conception du DCE Terrassement	• le programme d'études d'exécution du maître d'œuvre et les études complémentaires à la charge de l'entreprise ; • le détail des méthodes d'exécution ; • la récapitulation des effets des assements • la description précise de la solution technique ; • la définition des modalités d'exécution (équipement de suivi, pilotage des travaux...) ; • le dispositif d'assainissement ad hoc ; • la qualité et la compétence du technicien de l'entreprise chargé du suivi des travaux (élément du SOPAQ) ; • la compatibilité des délais avec le planning général de l'opération ; • la durée prévisionnelle des différentes phases de terrassement et de préchargement éventuel ; • la qualité du bureau d'études géotechniques retenu par l'entreprise ; • les points d'arrêt et éventuellement les points critiques nécessaires au contrôle extérieur (cf. article 5.5 page 73 du guide technique de nov 2000).	• les trois premiers points énumérés ci-contre sont issus de l'évaluation des études de dimensionnement et doivent être intégrés dans l'esquisse du schéma directeur de la qualité (ESDQ) élaboré à la fin du DCE et avant l'appel d'offre ; • joindre les dossiers d'études géotechniques complets avec tous les résultats et préciser la justification des ouvrages • bien préciser toutes les exigences techniques dans le CCTP et vérifier que le bordereau des prix renvoi bien aux articles du CCTP contenant ces exigences et la qualité requise ; • le dispositif d'assainissement devra pouvoir fonctionner malgré les déformations et être accessible pour le modifier et l'adapter ; • au-delà des renseignements classiques sollicités à travers le SOPAQ, ce dernier devra comprendre principalement les éléments ci-contre (Ces éléments sont à rappeler dans le règlement de consultation/SOPAQ et surtout dans les critères de jugement si le maître d'œuvre le demande).
Préparation du chantier	• état des lieux, notamment les ouvrages existants (bâtiments, réseaux, etc.) ; • le système de référence topographique ; • l'état du sol avant chargement ; • l'instrumentation du site / suivi ; • la restitution directe par le maître d'œuvre auprès de l'entreprise du contenu des études ; • la précision des procédures d'exécution et des points d'arrêts à travers le PAQ • les moyens mis en œuvre et délais ; • la qualité et la compétence du responsable chantier de l'entreprise.	• cet état « zéro » permettra de juger l'importance des éventuels dégâts ultérieurs générés par le chantier ; • cette référence topographique devra se situer hors zone sensible aux déformations ou faire l'objet d'un ouvrage spécial stable (pieu ancré dans le substratum, pose de tassomètres) ; • rappeler les phases d'interruption pour mesures et appareillage ; • le SDQ, rédigé par le maître d'œuvre à la fin de la période de préparation, constitue une pièce essentielle à l'obtention de la qualité des travaux.

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations Recommandations
Exécution	qualité en référence au SDQ et PAQ	
	• une montée de remblai uniforme et par couche ;	• le décalage maximum autorisé est d'une seule couche ;
	• la validation des études et des calculs de dimensionnement par rapport aux constats de mesures ;	• ces volumes sont calculés à partir des contrôles de mesures des tassements ;
	• les volumes de matériaux mis en place ; • l'adaptation technique face à des évolutions mesurables tendant à rendre l'ouvrage instable ; • la dissipation des pressions interstitielles ;	
	• le respect des délais d'attente pour la consolidation ;	• bien attirer l'attention de l'entrepreneur sur ces problèmes de délai d'attente ; les chiffrer si possible et les prix doivent en tenir compte autant que faire se peut pour des délais raisonnables ;
	• la continuité de la base drainante ;	• s'assurer de l'efficacité de cette couche et garantir l'écoulement des eaux en aval en évitant de réaliser des masques étanches ;
	• le bon fonctionnement des dispositifs provisoires d'assainissement ; • l'implantation des fossés latéraux et leur pente	• une implantation trop près du pied de remblai ou d'une banquette peut nuire à la stabilité de l'ouvrage ; De la même manière, une pente trop faible peut être modifiée par les tassements et constituer un piège à eau.

B.9.7 - Suivi à réaliser

Le suivi concerne essentiellement les tassements et la mesure des pressions interstitielles. C'est pourquoi il convient de maintenir en bon état de fonctionnement sur le site, les tassomètres et autres instrumentations.

De la même manière, les repères de nivellement et les bornes de référence seront maintenues en bon état.

Compte tenu des tassements résiduels, un suivi du bon fonctionnement du système de drainage et d'assainissement de la plateforme routière sera mis

L'attention du gestionnaire du réseau routier sera attirée sur des interventions probables pour recharger la chaussée souple (pas de structure rigide et de couche de forme traitée aux liants hydrauliques) suite à des déformations inhérentes à des tassements résiduels ou pour engager des travaux plus importants.

Les matériaux constituant les remblais et les PST peuvent toutefois être améliorés par un traitement à la chaux en cas de besoin

2-10 Les terrassements à l'explosif

2-10.1 Domaine concerné

Les terrassements à l'explosif concernent tous les terrassements effectués à l'air libre, dans des matériaux rocheux, lorsque l'extraction des matériaux par ripage n'est plus possible.

Cette technique est utilisée pour :

- extraire des matériaux de déblai qui seront ultérieurement réutilisés en remblai en enrochement ou encore après concassage et criblage, en couche de forme, voire en chaussée ;
- assurer une géométrie et un paysagement des talus de déblais rocheux

2-10.2 Référentiel technique

Terrassements à l'explosif dans les chantiers routiers

2-10.3 Problématique

Les terrassements dans le rocher à l'explosif nécessitent en phase amont du DCE des études spécifiques complémentaires aux reconnaissances classiques,

- la configuration des formations rocheuses rencontrées sur le tracé du projet ;
- la tectonique affectant le massif rocheux (failles, discontinuités, plissements, fracturations) ;
- les caractéristiques physiques et mécaniques des roches à abattre (identification pétrographique, résistance, abrasivité, altération) ;
- l'hydrogéologie (charge hydraulique, perméabilité avant travaux).

Tous ces facteurs nécessitent, après les reconnaissances préliminaires de l'APS et du projet, des études approfondies et indispensables sans lesquelles on ne peut entreprendre une étude réaliste de la méthode d'extraction ou d'abattage, évaluer correctement les coûts de terrassement, concevoir un bon DCE, respecter l'environnement et la pérennité des ouvrages situés, en fonction du type de structure, à des distances critiques.

2-10.4 Paramètres influents

- une étude géotechnique de base qui précise l'existence d'un horizon rocheux ;
- une étude spécifique complémentaire sur la structure et la nature du massif rocheux à extraire ;
- la présence d'eau dans le milieu ;
- le mode d'extraction (abattage de grandes ou petites masses, le pétardage pour purge, l'exécution de tranchées ou de fouilles d'ouvrage d'art) ;
- la réutilisation en remblai, en couche de forme, en chaussée ou en enrochement (blocométrie) ;
- la géométrie des talus rocheux (rendre naturels des profils trop techniques – emprise) ;
- la stabilité du massif restant (ne produire aucun « effet arrière ») ;
- la sensibilité des structures situées en zone critique ;
- l'état des lieux initial des structures bâties ;
- les seuils relatifs aux vitesses particulières et aux fréquences ;
- les plans de tir prévisionnels et réels ;
- les tirs d'essais ;
- le problème des projections (travaux en milieu urbain en particulier) ;
- la qualité et la compétence de l'entreprise et du mineur

2-10.5 Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations recommandations
Conception du DCE	• le dossier géotechnique complet	• joindre impérativement à titre indicatif ce dossier de manière à permettre à l'entrepreneur de choisir librement en fonction de la nature des matériaux sa méthode d'extraction à l'explosif
	• le classement des matériaux à déblayer en une ou plusieurs zones en fonction de la difficulté d'extraction	
	• la granularité des matériaux à extraire en fonction de leur réutilisation	• afin d'éviter la mise en dépôt de blocs de grande dimension (déchets), la blocométrie devra être adaptée. En conséquence, ne pas rémunérer la réduction des blocs (elle doit être comprise dans le prix de déblais à l'explosif)
	• les contraintes environnementales (vibrations, bruit, projections) • l'inventaire des structures et fixations des seuils	• faire une information des riverains et des maires • fixer dans le CCTP et le BP et dans tous les cas courants une vitesse particulaire maximale de l'ordre de 5 mm/s sur une plage de fréquence comprise entre 2 à 6 Hz • prévoir des contrôles de vibration sur les structures à chaque tir et vérifier après les tirs que les seuils ne sont pas dépassés • prévoir dans le CCTP et le BP la pose de dispositifs contre les projections (grillage, bottes de paille, géotextile ou bouclier métallique (milieu urbain))
	• l'insertion paysagère des talus rocheux	• prendre en compte la sécurité en phase d'exécution mais aussi en phase d'exploitation. Adapter les emprises à la surveillance, à l'entretien et au besoin d'insertion. Incidence de « l'effet arrière » jusqu'à 10 m à partir du tir
	• la compétence de l'entreprise ou du sous-traitant	• demander dans le RC que l'entrepreneur ou le sous-traitant (déclaré d'office), précise son expérience dans le SOPAQ. Solliciter le contrat de sous-traitance, les références du personnel de minage pressenti, les méthodes de minage et de protection des riverains.

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations recommandations
Préparation du chantier	- le PAQ - le plan de tir prévisionnel	Il doit comprendre : - les caractéristiques géométriques de foration ; - la nature, les quantités et la répartition des explosifs dans chaque trou ; - la nature des artifices ; - la séquence d'amorçage ; - le recensement exhaustif des contraintes
	l'état initial des structures	l'entrepreneur devra faire un constat contradictoire avec témoin ou par huissier ou expert, un état des lieux de toutes les structures situées dans les zones critiques (inventaire des fissures existantes, revêtements désolidarisés, tassements...)
	le PPSPS	bien préciser les conditions relatives aux opérations de minage
	le respect de la réglementation en matière d'autorisation d'utiliser les explosifs et d'habilitation à l'emploi d'explosifs	le maître d'œuvre doit obtenir une copie des documents officiels et agréer le personnel visé par ces autorisations préfectorales
Exécution	le tir d'essais (convenance) pour définir correctement les caractéristiques de vibration	- il permet de vérifier l'exactitude des dispositions du plan de tir prévisionnel et que les seuils sont ou ne sont pas atteints ; - attention aux ondes de surface car elles peuvent s'avérer nocives même à très grande distance d'un tir (vibrations atypiques).
	le plan de tir réel	le maître d'œuvre n'autorisera les tirs que si ce plan de tir détaillé a intégré toutes les modifications et a été fourni
	les désordres sur bâtiments ou ouvrages d'art	- bien identifier l'origine des phénomènes, justifiant les plaintes (vibrations transmises par le sol ou dans l'atmosphère) ; - reprendre avec soin tous les contrôles de vibration et le cas échéant redéfinir un plan de tir.
	la qualité du talus rocheux paysager	- vérifier l'absence de fissure parasite - s'assurer de sa stabilité après le tir
	la granularité des matériaux extraits	vérifier que le Dmax est compatible avec le domaine de réutilisation
	le DIUO et l'entretien des talus rocheux	

B.10.6- Suivi à réaliser

Le suivi de la stabilité des talus.

2-11 Déchets et sous-produits

2-11.1 Domaine concerné

Il concerne la planification de la gestion des déchets de chantier.

Les déchets provenant des travaux de terrassements sont en général soit des déchets inertes et homogènes sauf s'il s'agit de terres polluées, soit de produits spécifiques tels que canalisations, poteaux, ferrailles, produits bitumineux, goudrons, végétaux, etc.

Il concerne aussi l'utilisation de sous-produits et déchets industriels tels que l'utilisation des laitiers de hauts fourneaux, les schistes houillers ainsi que les déchets de carrières et miniers, les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM), les matériaux de démolition, les plastiques, les pneus usagés, les scories, les sables de fonderie, les chaux de carbure, les boues de stations d'épuration, etc.

2-11.2 Référentiel technique

- Principales références législatives et réglementaires
- Références méthodologiques (guides et recommandations, monographies, rapports d'étude)
- Recherche et Développement Environnement
- Guides régionaux de réemploi de déchets et de matériaux non conventionnels (Ile-de-France, Normandie, Nord, Pas-de-Calais...).
- ...

2-12 L'assainissement et le drainage

2-12.1 Domaine concerné

- 1) Réseau d'assainissement à ciel ouvert
 - de plate-forme ;
 - de pied de talus ou de crête de déblai.
- 2) Réseaux d'assainissement enterrés
 - tranchée drainante ou écran drainant ;
 - couche drainante
- 3) Drainage interne
 - conception du réseau de drainage, terrassement pour les talus, la PST et la couche de forme ;
 - en phase travaux.

2-12.2 Référentiel technique

- Assainissement routier (GTAR) - Guide Technique
- Drainage routier - Guide Technique

2-12.3 Problématique

L'eau et les terrassements ne font jamais bon ménage et sont souvent synonyme de désordre à plus ou moins long terme.

La problématique principale consiste à concevoir et dimensionner des ouvrages permettant

- de pérenniser dans le temps les caractéristiques intrinsèques de parties d'ouvrages : plate-forme, talus ;
- maintenir ou faciliter l'écoulement des eaux à travers l'ouvrage ;
- pour maintenir une qualité d'usage à long terme.

L'eau a deux origines :

- météorique : l'eau tombe sur les ouvrages de terrassements, ruisselle sur les plates-formes et les talus pour se concentrer en pied de talus ou en crête de déblai.

Les ouvrages d'assainissement dit « longitudinal » permettent de recueillir ces eaux et de les évacuer vers un exutoire.

Cependant ces systèmes n'éliminent pas complètement les risques d'infiltration sources de désordres à court et long terme. On peut donc être amené à disposer d'un écran vertical continu dans certaines zones (drainage de rive).

- nappe phréatique, eau libre ou captive : l'objectif assigné aux ouvrages consiste à intercepter et rabattre tout risque de remontée de la nappe.

Ces dispositions sont d'autant plus nécessaires pour les ouvrages près du TN : déblai, remblai rasant, limites déblais – remblais. La mise en place, dans ces cas de figure, d'un écran vertical continu (drainage) sous la PST, notamment, permet de répondre à cet objectif.

Au niveau des talus, la présence d'eau peut-être à l'origine de modifications des caractéristiques intrinsèques des sols et être la cause de désordres par instabilité.

Dans ce cas, l'objectif des ouvrages sera double : insensibiliser les matériaux à l'influence de l'eau, puis capter et faciliter l'évacuation des eaux (épis drainants, éperons drainants, masque poids, etc.).



L'exécution des travaux de terrassements impose le respect de règles dans le domaine de la maîtrise de l'eau pour permettre :

- d'assurer la traficabilité de chantier ;
- d'améliorer l'état hydrique des matériaux à réutiliser ;
- de traiter les venues d'eau ponctuelles (gradation de perméabilité entre couches) ;
- de maintenir l'écoulement des eaux à travers le chantier

Pour cela, des ouvrages provisoires seront nécessaires pendant la phase réalisation.

Tous ces aménagements peuvent se situer en interfaces avec divers équipements :

- le réseau de drainage avec les glissières, les piles d'ouvrages, les pieds de portiques, le génie civil du réseau de RAU
- les traversées avec le RAU

De plus, le génie civil de RAU ou l'implantation d'ouvrages d'assainissement de plate-forme (caniveau...) ne devront en aucun cas faire obstacle à l'écoulement des eaux, ni être un « réseau de drainage parallèle ».

Certains aménagements spécifiques peuvent être nécessaires comme des épis drainants vers le talus, des drains transversaux.

Dans tous les cas, il faut veiller à ne pas faire écran à l'écoulement des eaux en interposant transversalement un matériau de moindre perméabilité.

B.12.4- Paramètres influents

- relief ;
- géotechnique, nature, état et épaisseur des couches géotechniques ;
- hydrogéologie / piezométrie ;
- conditions météorologiques ;
- méthode et procédé d'exécution ;
- dimensionnement et capacité hydraulique des ouvrages
- contraintes d'entretien et d'exploitation ;
- performance des plates-formes ;
- érodabilité des sols ;
- caractéristiques des matériaux de drainage ;
- épaisseur de la couche drainante ;
- débit à évacuer ;
- collecteurs et exutoires ;
- caractéristiques des exutoires en terme quantitatif (débit capable d'évacuation) et qualitatif (sensibilité / vulnérabilité).



Assainissement en phase de construction

2-12.5 Phasage de réalisation

Phasage de réalisation	Points à examiner	Observations recommandations
Conception du DCE	Identifier, localiser et quantifier : - les nappes ; - les problèmes d'instabilité de talus.	Sur la base des études géotechniques et hydrogéologiques.
	Pour chaque type d'ouvrages de terrassement (déblai, remblai, PST...).	Voir chapitre correspondant
	Spécifications techniques sur les fournitures (matériau drainant, géotextile, drain).	
	Météorologie	Voir chapitre correspondant
	Arrêté préfectoral d'autorisation au titre de la police de l'eau.	Le contractualiser
Préparation du chantier	• organisation du recueil de l'exploitation des données météorologiques ; • nature et origine des matériaux (matériaux drainants, géotextile, drain).	
Préparation de l'exécution	• validation des matériels et validation des procédures d'exécutions ; • vérification des interfaces techniques.	
Exécution	Dispositions protectrices à prévoir : - réglage de plate-forme ; - drainage provisoire ; - aménagements provisoires (bourrelets...) ; - aménagement d'exutoire. Définition d'assainissement provisoire. Vérification de la conformité et du fonctionnement de l'assainissement définitif. Adaptation éventuelle des dispositifs confortatifs à la stabilité des talus. S'assurer en permanence des obligations de l'arrêté préfectoral au titre de l'autorisation de la police de l'eau.	Maîtrise et gestion des rejets à l'extérieur (quantitatif et qualitatif).

2-12.6 Suivi à réaliser

- s'assurer que tous les engagements en terme d'environnement du site sont respectés
- s'assurer de la maîtrise des rejets en aval vers des tiers pour éviter des contentieux
- s'assurer du bon fonctionnement et du nettoyage du réseau y compris en phase exploitation.

2-13 Couche de forme

2-13.1 Domaine concerné

Réalisation de couche de forme, présentant les caractéristiques requises pour le niveau de plate-forme support de chaussée retenu, avec des matériaux du site, d'emprunt ou d'apports extérieurs utilisés en l'état ou rendus aptes à cet emploi.

2-13.2 Référentiel technique

- Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR)
- Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS)
- Conception et dimensionnement des structures de chaussée
- Catalogue des structures types de chaussées neuves

2-13.3 Problématique

Concevoir et dimensionner une structure de transition, entre les terrassements et la chaussée, qui permettent sur une PST AR donnée d'obtenir les caractéristiques mécaniques,

géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée

Cette structure doit répondre à la fois à des objectifs de court terme, vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée (par exemple circulation de chantier) et de long terme vis-à-vis de l'ouvrage en service.

2-13.4 Paramètres influents

- classement de la PST AR et sensibilité au gel des matériaux qui la constituent ;
- hydrologie et hydrogéologie du site (drainage...) ;
- nature et état des matériaux envisageables sur le plan technico économique pour réaliser la couche de forme en tenant compte des possibilités du site, des emprunts possibles et des ressources locales ;
- conditions météorologiques prévisibles en fonction de l'époque de réalisation
- phasage de réalisation de la PST, de la couche de forme et de la chaussée ;
- trafic chantier (approvisionnement des matériaux de chaussée). Le couple PST-CDF devra être dimensionné pour satisfaire au trafic de chantier ;
- indice de gel de référence IR (adéquation chaussée couche de forme) ;
- contraintes d'environnement (poussières, eaux souterraines...).

ANNEXE 4



RECOMMANDATIONS TECHNIQUES - RÉALISATION DES TERRASSEMENTS

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 4

1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES
 2. OPÉRATION / EXCAVATION ET CHARGEMENT
 3. OPÉRATION PARTICULIÈRE / EXCAVATION SOUS L'EAU
 4. OPÉRATIONS DE TRANSPORT
 5. OPÉRATIONS PARTICULIÈRES DE TRANSPORT
 6. OPÉRATION REMBLAI ET COMPACTAGE
- OPÉRATION PARTICULIÈRE DE REMBLAI SOUS L'EAU

ANNEXE 4

Référence Norme Européenne « Terrassements » - Partie 3

Extraits

1- Considérations générales

1-1 Prérequis relatifs à l'exécution du terrassement

Avant de commencer la construction, il convient d'avoir résolu tous les problèmes géotechniques de conception, y compris la stabilité provisoire et permanente, l'érosion et les tassements. Tous les problèmes non résolus au cours de la conception doivent être identifiés par toutes les parties intervenantes et mis en évidence avant le début de la construction.

Dans ce cas, la responsabilité de la résolution des problèmes en suspens devra être clairement établie.

Avant de commencer chaque partie de travaux, la conception de la partie correspondante des travaux de terrassement doit être achevée avec notamment l'évaluation des matériaux disponibles et leur réemploi

1-2 Conditions climatiques

Avant de commencer les travaux de terrassement, les conditions climatiques prédominantes sur le site de construction doivent être étudiées. Les variations climatiques saisonnières peuvent imposer des facteurs de limitation pour le terrassement.

Pendant les périodes de pluie, les travaux de terrassement dans les matériaux sensibles à l'eau pourront être suspendus. Le cas échéant, il convient de fermer les surfaces exposées afin d'éviter l'infiltration d'eau.

En cas de conditions climatiques de sécheresse, il convient de prêter une attention particulière afin d'éviter les pertes liées à l'évaporation en couvrant les surfaces exposées avec des matériaux non sensibles.

NOTE

L'étude des conditions climatiques saisonnières variera en fonction des différentes régions. Par exemple, une surface du terrain gelée peut donner une plateforme de travail temporaire qui peut faciliter l'excavation d'un sol mou.

1-3 Facteurs environnementaux

Tous les travaux de terrassement doivent être compatibles avec la législation environnementale en vigueur.

Les terrassements peuvent avoir un impact pour l'environnement naturel et les constructions avoisinantes. Par conséquent, il convient de les planifier de façon à réduire le plus possible leur potentiel de nuisance.

Les facteurs environnementaux à prendre en compte durant la construction d'ouvrages de terrassement comprennent généralement ce qui suit :

Bruit – Les réglementations européennes et nationales doivent être considérées. Ceci s'applique aux récepteurs tels que les logements de particuliers qui sont affectés par l'augmentation du bruit au-delà des limites légales. Il convient de réaliser des mesures de niveaux sonores émis par les divers types d'engins de terrassement, et de relever aussi le niveau de bruit de fond avant de commencer les opérations de terrassement.

Il convient de porter une attention particulière à la restriction des heures de travail et à la construction d'écrans acoustiques temporaires utilisant des merlons de terre ou des écrans.

Contamination – S'il existe des sols pollués au sein d'une excavation, il convient de contrôler les activités afin de ne pas contaminer également les sols environnants. Il convient de manipuler les matériaux pollués séparément. Si ces matériaux doivent être stockés dans un dépôt, il convient d'étanchéifier et de modeler la surface sur laquelle ils doivent être mis en dépôt afin d'éviter l'écoulement potentiel d'eau contaminée. Il convient également d'étudier l'impact potentiel sur le personnel et de lui fournir des équipements de protection appropriés.

Il convient de choisir des équipements appropriés pour manipuler le matériau contaminé.

Poussière – Les travaux de terrassement peuvent générer de la poussière, provenant plus particulièrement des sols fins dans des conditions climatiques de sécheresse.

Il convient de réduire l'émission de poussière en arrosant les surfaces exposées. Le risque de génération de poussière est limité si les surfaces exposées sont couvertes de terre végétale et engazonnée au fur et à mesure de la progression des travaux.

Protection des cours d'eau – La pollution la plus fréquente provoquée par les terrassements est l'augmentation des matières en suspension dans les eaux de surface par relargage incontrôlé de matériau fin. Une attention particulière doit donc être accordée au système de contrôle de ruissellement proposé lors de la planification des opérations de terrassement. Les mesures de protection peuvent inclure la réalisation de bassins de décantation et l'utilisation de barrières à sédiments.

Vibrations – Les études doivent porter notamment sur les ouvrages sensibles aux vibrations et aux ondes de choc acoustiques, comme les constructions ou les structures d'alimentation en électricité.

Normalement, les opérations de terrassement ne sont pas susceptibles d'entraîner des niveaux de vibration préjudiciables. Toutefois, des tirs de mines peuvent engendrer des vibrations considérables et par conséquent risquer d'endommager les ouvrages ou les bâtiments avoisinants. Si les vibrations provoquées par le minage sont susceptibles de provoquer des dommages, il convient d'interdire le minage et de le remplacer par un défonçage et/ou l'utilisation d'un brise-roche hydraulique.

1-4 Utilisation de sous-produits industriels et de matériaux recyclés

Pour des motifs d'économie et de développement durable, l'utilisation dans les terrassements de matériaux recyclés et de sous-produits industriels peut être envisagée.

Il s'agit principalement de produits de démolition (béton concassé, etc.) et de coproduits industriels tels que les cendres de combustibles pulvérisés, les schistes brûlés issus de mines

de charbon, les cendres de biomasse, le laitier de haut-fourneau et la poussière de four à ciment, ainsi que de sous-produits de l'exploitation de carrières.

L'utilisation par le terrassier de coproduits industriels et de matériaux recyclés nécessite des précautions particulières. Celles-ci relèvent de deux catégories : l'une législative et l'autre géotechnique.

Les considérations législatives découlent de la législation environnementale et de la réglementation qui régit l'utilisation des matériaux recyclés et coproduits industriels.

Dans le but d'éviter des dommages environnementaux, des contrôles rigoureux sont généralement prévus par la législation nationale en cas d'utilisation de tels produits.

Il convient de noter que de tels matériaux sont fréquemment considérés comme des « déchets », la législation les concernant étant souvent complexe.

Il convient d'évaluer attentivement l'utilisation de tels matériaux.

En effet, ils peuvent provoquer des dommages environnementaux tant pendant la phase de construction que pendant la phase d'exploitation de l'ouvrage de terrassement.

Ces dommages sont souvent associés à la génération de pollution par des poussières en suspension dans l'air et à la pollution des eaux de surface ou des nappes phréatiques par lixiviation.

Les considérations géotechniques sont liées aux caractéristiques uniques des matériaux recyclés et des coproduits industriels.

Le comportement de ces matériaux sera souvent différent de celui des matériaux naturels. Ainsi, une attention particulière doit être prêtée à la rédaction des spécifications et de leur utilisation.

Il convient en particulier de considérer la durabilité des matériaux d'un point de vue physique et chimique dans la mesure où, notamment dans le cas des coproduits industriels, ils peuvent être sujets à une dégradation chimique progressive pouvant mener à des désordres.

Il convient d'établir le plan de contrôle visant à identifier la nature du matériau et à valider sa conformité pendant sa réutilisation.

L'élaboration par criblage ou/et par mélange avec d'autres coproduits ou des matériaux naturels représente souvent un moyen d'obtenir un matériau adapté, tant du point de vue environnemental que géotechnique.

Ces activités doivent alors être soumises aux mêmes contrôles et études que susmentionné

2- Opération / Excavation et chargement

2-1 Généralités

L'excavation pour les terrassements est le processus de réalisation de déblais ou d'autres excavations.

Elle est normalement réalisée à l'aide de moyens mécaniques et englobe le chargement des matériaux excavés dans l'engin de transport.

L'excavation et le chargement constituent un processus intégré. Le présent paragraphe identifie les considérations essentielles relatives à l'excavation (et au chargement).

L'objectif du processus d'excavation est de respecter le profil de conception des ouvrages de terrassement en déblai.

Ce faisant, il convient de planifier l'excavation afin de garantir d'une part que les matériaux excavés soient maintenus/protégés au cours de leur excavation de manière à permettre leur utilisation prévue, et afin de garantir d'autre part que l'excavation soit réalisée de façon sécurisée et efficace tout en s'assurant que la Partie Supérieure des Terrassements (PST)/le sol support de l'excavation et le terrain environnant ne soient pas endommagés par le processus d'excavation.

Il convient de ne pas démarrer l'excavation tant que la surface devant être remblayée n'est pas apte à la réception du matériau ou qu'à défaut un stockage temporaire approprié n'est pas disponible.

NOTE

Pour les climats plus froids, si le matériau présent dans la fouille est sensible au gonflement dû au gel et si le gel pénètre dans le matériau destiné à la construction finale à une profondeur supérieure à 0,5 m, il convient de retirer les blocs.

2-2 Type de matériau et techniques d'excavation

Le type et la nature du matériau devant être excavé constituent les données les plus importantes pour le processus d'excavation.

Le groupe de matériaux (voir Annexe B informative) déterminera la façon et la vitesse de réalisation de l'excavation. Par conséquent, l'identification des types de matériaux devant être excavés avant de commencer l'excavation est d'une importance fondamentale.

Si une excavation contient un mélange de plusieurs matériaux, il convient de porter une attention particulière à la nécessité de séparer ou de mélanger les différentes classes granulaires au cours de l'excavation (exemple : excavation frontale).

Le Tableau 1 identifie les principaux types de matériaux (décrits à l'Annexe B) ainsi que les méthodes appropriées pour procéder à leur excavation mécanique.

Tableau 1

Type de matériau	Méthode d'excavation possible	Possibilité de pré-traitement
Granulométrie fine (tous les états)	Pelle rétro Pelle butte Chargeuse sur pneus Chargeuse à chaînes (chenilles) Décapeuse	Les sols humides peuvent exiger un traitement avec liant afin de permettre une excavation avec une décapeuse.
Grenu (toutes les classes granulaires)	Pelle rétro Pelle butte Chargeuse sur pneus Chargeuse à chaînes (chenilles) Décapeuse	Aucun Un assèchement peut être nécessaire pour permettre l'excavation ou pour faciliter le séchage des matériaux.
Roche – Friable	Pelle rétro Pelle butte Chargeuse sur pneus Chargeuse à chaînes (chenilles) Décapeuse	Une excavation avec une décapeuse exigera généralement un défonçage ou un minage. Le défonçage ou l'ébranlement par minage sera également utile pour d'autres méthodes d'excavation.
Roche – Dure	Pelle rétro Pelle butte Chargeuse sur pneus	Minage à l'aide d'explosifs et/ou utilisation d'un brise-roche hydraulique. Un défonçage conséquent peut être envisagé pour certaines roches dures.
Craie	Pelle rétro Pelle butte Chargeuse sur pneus Chargeuse à chaînes (chenilles) Décapeuse	L'utilisation de décapeuses sur certains types de craies peut mener à une désagrégation et à une instabilité du matériau, pouvant nécessiter l'utilisation d'un traitement avec liant. Si l'éventuelle utilisation de liant doit être évitée, il convient d'envisager d'autres moyens d'excavation. Pour la craie dure, un défonçage peut être nécessaire.

Les méthodes d'excavation (types de machines) énumérées dans le tableau ci-dessus sont décrites à l'Annexe C.

Les grosses pelles ont une force d'arrachage élevée et peuvent éviter de recourir au minage.

Un matériel d'excavation spécialisé (ex: pelles longue portée/à basse pression au sol ou pelles à bennes traînantes/draglines) est souvent exigé pour les excavations des sols de très faible portance ou des sols contenant des matières organiques.

Ce matériel présente également l'avantage de pouvoir réaliser des excavations dans des surfaces difficiles d'accès et des terrains imposant des limitations en termes de stabilité.

Il est possible de traiter les matériaux excavés (par exemple avec de la chaux) pendant l'opération d'excavation.

2-3 Considérations spéciales lors d'une excavation de massif rocheux

L'excavation de roches et de massif rocheux nécessite une méthodologie spécifique.

La prévision de la difficulté d'excavation de la roche et de massifs rocheux est très importante pour les travaux de terrassements.

Pour décrire l'excavation dans la roche, il a été fait appel à différents termes relatifs au principe d'excavation et au mécanisme de fragmentation.

Dans le présent document, le terme « excavabilité » est utilisé à titre de terme général qui fait référence au degré de difficulté d'excavation dans la roche et dans les massifs rocheux.

Il englobe les méthodes suivantes :

- a) excavation à la pelle, en présence de conditions d'excavation faciles/très faciles (sols ou roches meubles) ;
- b) défonçage, en présence de conditions d'excavation modérées à difficiles (roches friables et parties altérées de roches dures) ;
- c) minage, en présence de conditions d'excavation très difficiles (roches dures).

Les analyses permettant de déterminer le degré de difficulté qui peut se présenter en cas d'excavation d'un massif rocheux s'appuient sur l'étude des éléments suivants :

- 1) la nature de la roche proprement dite formant le massif rocheux in situ (car l'excavation conduit à la fragmentation et à la rupture des matériaux rocheux lorsque le bloc est volumineux) ;
- 2) la nature, l'extension et l'orientation des fractures ;
- 3) la structure géologique relative à la formation de plis et de failles, ainsi qu'à la schistosité.

L'évaluation indirecte de ces paramètres peut être fondée sur les éléments suivants :

- description de la roche ;
- vitesse des ondes sismiques P et nature de la roche ;
- indice de l'espacement des discontinuités et essais de dureté ;
- Geological Strength Index (indice géologique de résistance).

NOTE

Des exemples de telles méthodes indirectes peuvent être trouvées dans le document Caterpillar tables (ref), Pettifer and Fookes, Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 145–164; Bull eng Geol Environ (2010) 69:13–27 – Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (disponible en anglais seulement).

De plus, les informations suivantes peuvent être pertinentes :

- paramètres relatifs à la dureté de la roche, aux fractures, à la formation de plis et de failles (de manière directe ou indirecte) ;
- informations sur l'altérabilité, la karstification et l'hydrogéologie.

Afin de choisir la méthode d'excavation la mieux adaptée, il convient de considérer les points suivants :

- géologie attestée du massif rocheux ;
- forages réalisés avec enregistrement de paramètres, essais de laboratoire et photos ;

- ensemble des contraintes relatives aux ouvrages, constructions et réseaux existants, entre autres, qui pourraient influencer le choix de la méthode d'excavation.

Si un minage est programmé, il convient alors de recueillir des informations supplémentaires :

- présence éventuelle d'eau ;
- sensibilité aux vibrations et aux ondes de choc acoustiques des ouvrages, constructions ou réseaux existants ;
- pour les sols sensibles avoisinants : restrictions relatives aux vibrations et impact direct du minage.

De plus, les informations suivantes peuvent être pertinentes :

- vitesse spécifique maximale pour chaque plage de fréquences ;
- résultats de tirs d'essai, le cas échéant ;
- variation prévisible de la partie supérieure du massif rocheux devant être miné ;
- taille maximale admissible des blocs dans le remblai ou autres spécifications sur la granulométrie des matériaux ;
- sensibilité environnementale et du voisinage.

2-4 Influence de l'utilisation finale des matériaux excavés

L'utilisation prévue du matériau excavé influencera la méthode d'excavation. Les matériaux qui doivent être utilisés dans une zone de remblai porteur (ex: remblai routier ou plateforme industrielle) devront subir une excavation de manière à optimiser leur réutilisation.

Il conviendra de veiller à leur qualité et qu'ils restent compatibles avec le compactage prévu dans les zones de remblai.

Il convient que les matériaux dont le comportement risque d'évoluer pendant le processus de terrassement (excavation, chargement, transport, dépôt et compactage) soient excavés de manière à garantir le maintien de leurs propriétés au cours de leur manutention.

Il est important de choisir une méthode qui permettra d'obtenir un mélange efficace et homogène des types de matériau tout en évitant la ségrégation.

NOTE Ceci ne s'applique pas aux matériaux utilisés dans des remblais non structurants (ex: aménagements paysagers ou matériaux évacués à l'extérieur du site).

En règle générale, il convient d'excaver séparément les types de matériaux qui doivent être mis en œuvre séparément les uns des autres.

Cependant, il est parfois avantageux de volontairement mélanger différentes classes granulaires de matériaux, dans le cadre du processus d'excavation, afin d'améliorer la qualité des matériaux et, par conséquent, de rendre ces derniers acceptables alors qu'ils ne le seraient pas autrement, ou afin d'optimiser les caractéristiques de matériaux déjà acceptables.

2-5 Protection des déblais au cours de la construction

2-5.1 Stabilité au cours de la construction

Pour chaque excavation, il est important de déterminer la hauteur et l'inclinaison du front en tenant compte des conditions de terrain réelles.

Il convient que les talus temporaires créés lors de l'excavation ne soient pas plus inclinés que le talus final, sauf si les implications sur la stabilité font l'objet d'une évaluation.

En règle générale, les parois de l'excavation créées par la pelle rétro ou par la pelle équipée butte et la chargeuse sont verticales. Il convient donc de ne pas les laisser telles quelles pendant de trop longues périodes.

Si l'excavation ne doit pas être réalisée de manière continue, il convient d'adoucir les parois verticales de façon à former un talus stable jusqu'à la reprise de l'excavation afin d'éviter tout risque de rupture.

Quoi qu'il en soit, il convient généralement que les parois verticales de l'excavation ne dépassent pas 5 m de hauteur pour les sols et soient protégées en permanence le long du bord supérieur par des barrières ou des cavaliers en terre temporaires.

Il convient d'évaluer la hauteur maximum de redan pour chaque excavation, qui peut dépasser 5 m dans certains cas de matériaux rocheux.

NOTE Les parois verticales ou très inclinées doivent être strictement limitées dans les argiles, des limitations de hauteur de 2 m ou 3 m étant assez courantes pour ce type de matériau.

L'excavation ne doit pas s'étendre au-delà du profil prévu à la conception.

Si, par inadvertance, l'excavation dépasse le profil prévu à la conception, celle-ci doit être revue.

Si les vides qui en résultent exigent un remblayage, ce dernier doit être réalisé comme s'il s'agissait d'un remblai de terrassement, avec un matériau présentant des propriétés techniques adéquates.

Lorsque des tranchées (pour drainage et activités similaires) doivent être réalisées à la base des talus, il convient de les creuser de manière à ne pas fragiliser le talus adjacent. Il convient de les remblayer le plus rapidement possible.

Il convient de prêter attention à la nécessité de surveiller la stabilité des excavations ou des ouvrages adjacents.

2-5.2 Maîtrise de l'eau/drainage

Il convient de planifier l'excavation de manière que l'eau n'endommage pas la plateforme support de chaussée. L'eau peut provenir de deux origines : l'eau provenant du sol, lorsque l'excavation s'étend en dessous de la nappe phréatique, et l'eau pluviale (« eau de surface »).

Des arrivées d'eau sont parfois observées au-dessus du niveau de la nappe phréatique, à des endroits comportant des lentilles de sol aquifère dans des sols par ailleurs non aquifères. C'est le phénomène appelé couramment « nappe perchée ».

Il convient de faire attention aux puits artésiens, qui sont des aquifères captifs contenant de l'eau de la nappe phréatique sous pression positive.

Si l'eau n'est pas contrôlée pendant l'excavation, elle peut endommager ou éroder les sols.

Quoi qu'il en soit, l'effet de telles interventions sur les activités avoisinantes doit être évalué (par exemple : puits existant, tassement d'une construction dû à la baisse du niveau de la nappe phréatique).

Dans tous les cas, une attention particulière doit être prêtée afin de garantir que des dispositions d'évacuation adaptées sont en place afin d'éviter les effets préjudiciables à l'environnement.

NOTE

La Maîtrise de l'eau est normalement conduite en s'assurant que l'excavation est réalisée de manière à éviter la stagnation de l'eau par l'installation de fossés, d'exutoires, de drains ou de systèmes similaires.

Dans certains cas, ces systèmes gravitaires seront complétés par un drainage positif, c'est-à-dire par des pompes.

Pour les excavations qui s'étendent en dessous du niveau de la nappe phréatique, une diminution artificielle du niveau de la nappe phréatique devra souvent être réalisée avant de procéder à l'excavation. Pour cela, il existe des systèmes tels que les pointes filtrantes sur le périmètre de la fouille.

La mise en place anticipée de drains permanents peut également être effectuée. Cet assèchement préalable permet non seulement de réaliser une excavation efficace, mais aussi d'améliorer les caractéristiques d'état des matériaux à excaver.

2-5.3 Érosion

Des talus ayant subi une excavation, notamment les sols sableux mal gradués, sont sujets à l'érosion générée par la pluie ou le vent.

Il convient de protéger les talus exposés le plus rapidement possible par exemple par l'apport de terre végétale ou de matériau granulaire et par engazonnement/végétalisation.

Sinon, il convient de laisser une couche de protection temporaire sur le talus afin d'empêcher l'érosion d'atteindre le talus final. Il convient alors de ne supprimer cette couche de protection temporaire qu'immédiatement avant la mise en place de la protection finale.

L'érosion peut également être due à des arrivées d'eau dans le talus avec un sol comportant des couches de perméabilités différentes. Il convient alors de mettre en place un drainage et une protection contre l'érosion adaptés.

2-5.4 Protection de la Partie Supérieure des Terrassements (PST)

Il convient de ne pas exposer la plateforme de la fouille ou de l'excavation à un temps humide ou au gel sans avoir appliqué une quelconque forme de protection ou de mesure corrective.

Après la saison du gel, la Partie Supérieure des Terrassements (PST) doit être inspectée et toute mesure corrective nécessaire doit être prise (reprise de compactage, traitement du sol, excavation et remplacement, etc.).

Pendant la construction, il est usuel de laisser une couche sacrificielle de sol de protection au-dessus de la Partie Supérieure des Terrassements (PST) afin lui éviter tout dommage.

Il convient que l'excavation s'arrête au toit de la couche jusqu'à ce que la Partie Supérieure des Terrassements (PST) soit prête à être réglée. Il convient de restreindre le trafic sur la couche de protection.

3- Opération particulière / Excavation sous l'eau

3-1 Généralités

Les travaux décrits dans le présent paragraphe s'appliquent à l'excavation de sol mou avant la construction de remblais sous l'eau ainsi que d'autres types d'excavations sous l'eau de taille limitée.

Ces travaux comprennent la suppression d'obstacles dans les voies d'accès et les canaux de navigation par minage et/ou excavation.

La liste ci-dessous donne, en plus de l'état des sols, des informations spécifiques, utiles pour la planification de l'excavation sous l'eau :

- géométrie du site, notamment ses conditions limites ;
- topographie, accès ;
- restrictions applicables aux pentes des talus et à leur hauteur ;
- profondeur de l'eau, talus de remblai sous l'eau et topographie avec les tolérances associées ;
- ouvrages, canalisations et câbles souterrains existants, services, contaminants connus et contraintes archéologiques ;
- restrictions environnementales.

3-2 Matériel

L'excavation sous l'eau peut être réalisée à partir d'un terrain sec, d'une barge ou d'une plateforme autoélevatrice.

Lorsqu'elle est réalisée à partir du terrain, il est particulièrement important de s'assurer que la portée du matériel est suffisante, en tenant compte de la hauteur d'eau, de la profondeur d'excavation et de la pente d'excavation et/ ou de remblai afin de pouvoir procéder aux travaux en toute sécurité.

C'est la raison pour laquelle il est très important de s'assurer de la stabilité de la pente d'excavation et/ ou de remblai pendant l'exécution des travaux d'excavation. La stabilité temporaire est aussi importante que la stabilité à long terme.

Lorsque de gros blocs rocheux sont découverts, il est important que le matériel soit adapté pour les manipuler, même pour les plus gros d'entre eux. Les très gros blocs rocheux peuvent être minés.

NOTE

En règle générale, l'excavation est réalisée à l'aide d'une pelle rétro ou d'une drague à benne preneuse à câble.

3-3 Exigence de tolérance

Le talus d'excavation ainsi que les tolérances de niveau doivent être conformes au plan de conception.

Les exigences spécifiques au trafic maritime doivent être spécifiées.

3-4 Minage sous l'eau

Lorsque le terrain (sol ou roche) est trop dur pour être ameubli et subir une excavation exercée par des moyens mécaniques, un minage peut être effectué.

Avant de procéder au minage, la roche doit être décapée de tout matériau meuble.

Les considérations relatives à la conception pour le minage doivent être fondées sur la cartographie de l'assise rocheuse.

En outre, le plan de minage, le forage et l'agent de minage doivent être adaptés aux conditions du site.

NOTE

Les restrictions éventuelles suivantes peuvent s'appliquer :

- exigences environnementales (restrictions relatives au choc dû au minage, distance par rapport aux piscicultures, restrictions relatives au bruit, etc.) ;
- type de minage, exigences relatives au découpage des parois et tolérances associées ;
- procédés pour le minage grande masse, chargement ;
- création de redans par minage pour les talus de remblai sous l'eau.

3-5 Supervision et surveillance

L'excavation et le minage sous l'eau doivent être contrôlés afin de fournir les informations relatives au suivi des travaux et, si nécessaire, d'ajuster le processus.

À titre d'exemple d'excavation, la surveillance peut concerner les éléments suivants :

- la quantité ;
- le type et la classe granulaire du matériau excavé ;
- la bathymétrie.

3-6 Protection environnementale

Des effets préjudiciables à l'environnement peuvent être causés par le bruit, la poussière, les éléments de sol sous l'eau et les ondes de choc.

Lorsque cela est exigé, des mesures doivent être prises afin de limiter voire d'éviter ces effets préjudiciables.

NOTE

La liste ci-dessous énumère des méthodes appropriées de contrôle des éléments de sol sous l'eau :

- filtre à limon ;
- évaluation de l'environnement biologique ;
- mesures de la turbidité.

4- Opérations de transport

4-1 Généralités

L'objectif premier du transport (mouvement des matériaux excavés des déblais jusqu'aux zones de mise en dépôt) pendant la phase de construction d'un projet de terrassement est de réduire au minimum les distances sur lesquelles les matériaux sont transportés tout en s'assurant que les exigences du projet sont satisfaites.

L'opération de transport est directement liée au type de sol et à ses caractéristiques de traficabilité.

Il convient que toutes les parties soient informées des différents paramètres impliqués afin de prévoir les options techniques spécifiques entraînant un surcoût (ex: construction d'une piste de transport, mise en évidence d'une faible productivité, protection des ouvrages existants, atténuation de la poussière, etc.).

Le transport peut être assuré dans la zone de réalisation du terrassement, sur une piste de transport, sur le remblai ou le déblai en cours de construction, sur la couche de forme ou sur la Partie Supérieure des Terrassements (PST).

Le transport peut également être assuré sur des pistes de transport le long des emprises des travaux de terrassement, ainsi que sur des routes publiques.

Pour le transport sur les routes publiques, il ne doit être utilisé que du matériel autorisé.

Chacune de ces situations exigera une préparation et une organisation adaptées.

Il convient de considérer quatre facteurs principaux pour choisir le matériel afin d'optimiser l'efficacité du transport :

- distance de transport entre le lieu d'excavation et la zone de mise en œuvre ;
- nature, granulométrie et état du matériau excavé ;
- volume à transporter ;
- configuration de la piste de transport (pente, résistance au roulement, portance, etc.).

Les paramètres supplémentaires qui peuvent parfois se révéler importants sont les suivants :

- le climat local et les prévisions météorologiques pendant la construction ;
- la productivité horaire ou quotidienne exigée pour satisfaire le programme ;
- les ouvrages ou les contraintes existantes (ouvrages, canalisations, route existante, réseaux aériens) qui peuvent entraîner une réduction de charge ou de taille ;
- la protection de l'environnement ;
- la sélection du type de matériel de chargement.

Les engins de transport doivent être choisis en tenant compte des paramètres décrits ci-dessus, à savoir le type de matériel de chargement, les volumes transportés, la portance et la distance de transport.

Les différents types d'engins de transport sont présentés à l'Annexe D.

NOTE

La relation entre les éléments fixes du cycle de terrassement (charge et déchargement) et les éléments variables (transport et retour à vide) déterminent l'efficacité relative des types d'engins sur différentes distances de transport.

Pour les longs transports, on privilégiera un matériel avec des vitesses de transport élevées et des temps fixes relativement plus longs.

En revanche, un matériel avec des vitesses de transport moins élevées et des durées fixes relativement plus courtes correspondra mieux aux transports plus courts.

Par exemple, dans des cas très précis, des bulldozers (qui ont des vitesses de transport très faibles) sont utilisés pour le transport sur une très courte distance, tout particulièrement lorsque le sol a une très faible portance.

L'utilisation efficace des engins est aussi liée à des critères tels que la chaleur et le froid, l'altitude, la poussière, la pluie et l'humidité, qui affecteront l'efficacité mécanique du matériel de transport.

Si le projet exige une productivité élevée et s'il est fermé à tous les autres trafics, il est préférable d'utiliser des engins à forte capacité.

4-2 Terrassements grande masse

4-2.1 Généralités

Une gestion efficace de l'eau est exigée afin de maîtriser son écoulement et d'éviter l'augmentation de la teneur en eau dans les sols sensibles à l'eau.

NOTE

Dans un remblai, une pente transversale minimale est nécessaire pour permettre à l'eau de s'écouler (ex: 2,5 % à 4 % pour une infrastructure linéaire).

Lorsqu'un sol présente une très faible portance ou lorsqu'un rendement élevé est exigé, des pistes de chantier temporaires peuvent être nécessaires.

L'emplacement de ces pistes temporaires évolue au rythme de l'avancement des travaux de terrassement.

Elles réutilisent au maximum les mêmes matériaux.

Par conséquent, pour les terrassements grande masse, l'évaluation de la traficabilité des sols existants est un paramètre très important pour choisir les engins de terrassement les mieux adaptés du point de vue production et traficabilité, et anticiper ainsi la productivité et la nécessité d'aménager des pistes de chantier temporaires.

Les zones de chargement et de déchargement peuvent présenter une faible portance si le matériau est humide, et ainsi conduire à une faible productivité.

Pour les sols meubles ou sensibles à l'eau, il convient d'effectuer une évaluation préliminaire de la traficabilité.

Cette évaluation peut s'appuyer par exemple sur des résultats d'essai, comme l'indice CBR, l'indice IPI, l'état hydrique, la cohésion non drainée, ou la relation entre la teneur en eau et la plasticité.

4-2.2 Transport sur la Partie Supérieure des Terrassements (PST) ou la couche de forme

Si un transport grande masse est planifié sur la Partie Supérieure des Terrassements (PST) ou la couche de forme (ex: des déblais vers les remblais), le volume qui doit être transporté ainsi que le type de matériel prévu doivent être attentivement étudiés lors de la conception de la Partie Supérieure des Terrassements (PST) ou de la couche de forme.

En effet, la sollicitation liée au transport peut être beaucoup plus élevée que celle considérée pour le dimensionnement de la structure de chaussée à long terme.

Lorsque la couche de forme est constituée de matériau traité qui exige une période de cure, la Partie Supérieure des Terrassements (PST) doit être maintenue libre de tout trafic pendant la période de cure afin d'éviter qu'elle soit endommagée à moins qu'elle ne soit renforcée.

Il convient que la couche de forme soit conçue pour supporter le transport des matériaux de la sous-couche de chaussée.

En outre, pendant ou après les périodes de pluie, certains matériaux peuvent présenter une dégradation sous l'effet du trafic. Il s'agit d'une situation courante pour le calcaire et certaines roches friables. Elle peut être évaluée, par exemple, au moyen d'un essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE).

Un trafic intensif sur la plateforme peut générer une réduction de plusieurs centimètres.

Dans ce cas, une attention particulière doit être prêtée à la protection de la partie supérieure de la plateforme, en procédant par exemple de la manière suivante :

- Transport sur la plateforme puis réparation avant le réglage final ;
- Conservation d'une couche de protection du matériau au-dessus de l'arase terrassement du déblai et construction du remblai en surépaisseur.

4-2.3 Piste de transport

Dans certains cas, la construction d'une piste de transport dédiée pourra être nécessaire. En règle générale, cette piste est située au sein de la plateforme de terrassement mais, si la configuration le permet, il convient d'envisager la construction de cette piste parallèlement à la plateforme.

Dans la mesure où une rupture de piste pourrait perturber les travaux de terrassement de manière significative, il convient que la conception et la construction soient adaptées au trafic.

Il est aussi nécessaire d'entretenir la piste de transport (ex: réparations et réglage) avant que la dégradation n'entraîne une défaillance structurelle.

La dégradation débute normalement par de l'orniérage. Si aucune mesure corrective n'est entreprise, cette situation se traduira par des pertes de traficabilité, puis en fin de compte à la ruine complète de la piste.

La géométrie de la piste de transport doit permettre aux engins de circuler dans des conditions d'exploitation et de sécurité optimales. Si la géographie du site le permet, il convient de

préférer les pistes de transport à sens unique (une seule direction) afin de séparer le trafic des véhicules chargés et des véhicules à vide.

Les bonnes pratiques en la matière sont les suivantes :

- Pente inférieure à 10 % ;
- Berme de sécurité en descente dans les zones montagneuses ;
- Largeur de 4 m à 16 m en fonction de la taille des engins et de la direction du mouvement des terres ;
- Rayons de courbure adaptés aux engins envisagés ;

La piste de transport doit être équipée de panneaux de signalisation routière indiquant notamment :

- Les limitations de vitesse ;
- Les virages serrés, les interdictions de trafic ;
- Les intersections avec les routes et les cheminements piétonniers ;
- Les points singuliers et obstacles dangereux (ponts, câbles aériens, etc.). Il convient que ces panneaux soient complétés par des barrières de sécurité ;
- Séparation des engins de terrassement des autres véhicules circulant sur le site et des piétons ;
- Arrosage pour éviter la poussière (aspects hygiène, sécurité et environnement).

La défaillance de la piste de transport est davantage susceptible de survenir lors des pics de trafic. C'est pourquoi il convient que les pistes de transport soient aussi larges que possible, mais il convient également de répartir le trafic uniformément sur la totalité de la largeur.

Lorsque les contraintes du site imposent d'utiliser des voies étroites, il convient d'envisager la stabilisation des pistes de transport avec des sols traités ou leur renforcement avec du matériau granulaire.

Quoi qu'il en soit, il convient de ne pas construire les pistes de transport à un niveau ou un emplacement qui pourraient endommager les terrains en place (déblais) ou le matériau déjà mis en œuvre (remblais).

4-3 Type de matériau et transport grande masse

4-3.1 Généralités

Comme cela a été décrit ci-dessus, le transport sur le terrain naturel dépend de la nature et de l'état du matériau en question. Toutes les informations pertinentes relatives au matériau doivent être communiquées afin de choisir l'engin de terrassement le mieux adapté.

Les paramètres suivants doivent être considérés :

- Faible traficabilité des matériaux sensibles à l'eau lorsqu'ils sont humides ;
- Réduction rapide de la traficabilité des sols fins de plasticité faible en cas de pluie ;
- En cas de pluie, glissance des pistes construites en sols fins ;
- Présence de blocs tranchants (par exemple : silex) susceptibles d'endommager les pneus des engins de transport ;

- Matériaux plastiques pouvant coller sur la carrosserie des engins de transport et réduire ainsi la productivité.

Comme la traficabilité est généralement le facteur-clé pour le transport grande masse, des informations suffisantes doivent être disponibles pour évaluer la traficabilité des matériaux.

Ces informations pourront comprendre les résultats d'essai suivants : indice CBR, indice IPI, état hydrique ou autre paramètre pertinent. La craie constitue une exception car elle est caractérisée par sa teneur en eau naturelle et par sa masse volumique sèche in situ.

Comme préalablement mentionné, plus la perméabilité est élevée pour les matériaux sensibles à l'eau, plus la traficabilité diminue rapidement avec la teneur en eau.

Pour certains matériaux limoneux, la traficabilité peut être faible, même avec une teneur en eau naturelle proche de l'optimum Proctor.

Les valeurs types admises par les pratiques nationales sont données à l'Annexe D.

4-3.2 Poussière

La poussière générée par le transport peut parfois représenter un problème environnemental mais elle pose toujours un problème de sécurité car elle réduit considérablement la visibilité sur le site.

Dans des climats secs ou pendant les saisons de sécheresse, le transport génère de la poussière.

La poussière peut être atténuée si les fines sont éliminées, à l'aide d'une niveleuse par exemple.

La meilleure solution pour maîtriser la poussière est d'utiliser une arroseuse. En cas de transport intensif et avec certains matériaux, l'arrosage doit être fréquent, ce qui requiert de grands volumes d'eau et peut avoir un impact environnemental dans les régions où l'alimentation en eau est faible.

La quantité d'eau utilisée pour supprimer la poussière peut être réduite en utilisant des additifs appropriés mélangés à l'eau.

D'autres solutions peuvent être étudiées dans le but de réduire la production de poussière, notamment :

- traitement du sol de la plateforme utilisée pour le transport ;
- protection de la surface avec de l'enduit gravillonné ;
- mise en œuvre d'une couche de matériau granulaire ;
- bâchage des bennes de tombereaux et des camions routiers.

4-3.3 Protection des ouvrages existants et des réseaux enterrés

Les ouvrages existants et les ouvrages construits dans le cadre des travaux, qui peuvent être recoupés au cours du transport, comprennent généralement :

- les réseaux ou canalisations enterrés. Si ceux-ci ne sont pas déviés avant la construction, ils peuvent être protégés par une dalle en béton ou par un cavalier en remblai ;

- il convient de protéger les réseaux aériens par des gabarits de pré-signalisation ;
- routes existantes : il convient de les protéger au niveau des intersections avec la piste de transport par l'installation de socles en béton au niveau des carrefours contrôlés par des feux de signalisation ;
- ouvrages : lorsque l'ouvrage fait partie intégrante de la construction, il convient qu'il soit conçu pour supporter la charge de transport. Dans ce cas, une couche de matériau granulaire est communément mise en œuvre au-dessus d'un géotextile pour servir de couche de protection temporaire ;
- plateformes de l'ouvrage en terre partiellement ou intégralement terminées, qui ne doivent pas être dégradées par le trafic de chantier.

4-4 Camions de transport routier

Les camions routiers sont couramment utilisés pour le transport sur de longues distances, sur des pistes de chantier adaptées ou des routes publiques.

Ils peuvent être utilisés pour le transport sur site, en règle générale uniquement sur des matériaux présentant une bonne portance, tels les matériaux granulaires ou les sols traités.

Si des camions sont utilisés pour le transport sur des routes publiques depuis ou vers un site de travaux de terrassement, les éléments suivants doivent être définis :

- Itinéraire(s) et horaires autorisés dans la zone (après consultation des autorités locales). Les conditions d'utilisation des routes publiques doivent être clairement définies avant le commencement de la construction ;
- Travaux préliminaires sur la route publique afin d'assurer la sécurité et d'éviter la rupture de la route ;
- Panneaux de signalisation routière permettant d'assurer la sécurité aux intersections avec le chantier de terrassement ;
- Solutions techniques pour empêcher la présence de boue ou de poussière sur la route publique (Enduit prévu sur la piste de transport à l'approche de la route publique, lavage des pneus, etc.) ;
- Exigences pour le nettoyage des routes publiques.

5- Opérations particulières de transport

5-1 Variantes de méthodes de transport

5-1.1 Généralités

En cas de transport de grands volumes de matériaux sur de longues distances, ou lorsque les considérations environnementales l'imposent, il peut être étudié l'utilisation d'un transport par voie ferrée ou navigable.

Dans ces situations, il est souvent nécessaire de prévoir une plateforme de transfert avec une aire de stockage et un matériel spécifique pour le chargement et le déchargement.

Ces installations nécessitent une surface importante qui doit être prévue avant le démarrage des travaux.

Dans certains cas, un convoyeur à bande peut être une option de moyen de transport.

5-1.2 Transport par voie navigable

Il est possible d'avoir recours à des barges pour le transport des matériaux sur voie navigable. Il peut s'agir de chalands à clapets ou de barges à fond plat, automoteurs ou tractés par des remorqueurs. Le matériel doit être adapté au tirant d'eau et aux marées.

Une attention particulière doit être prêtée aux restrictions ou obstacles relatifs au transport (ex: écluses ou ponts).

5-1.3 Transport par voie ferrée

Le transport par voie ferrée est souvent envisagé pour le transport sur de longues distances impliquant de grandes quantités de matériaux ou lorsqu'il existe des installations locales et/ou lorsque les considérations environnementales l'imposent.

Il peut être exigé d'utiliser des trains d'une capacité allant jusqu'à 1500 t composés de wagons ouverts spéciaux (capacité type de 50 t) tirés par des locomotives. Il est généralement exigé de réaliser de longues têtes de ligne temporaires au niveau des points de chargement et de déchargement.

Les têtes de ligne doivent comporter des voies d'évitement afin de permettre le chargement et le déchargement sans blocage des lignes principales, ainsi que des voies de raccordement entre les voies d'évitement et les lignes principales et des aires de stockage suffisantes destinées aux matériaux transportés.

L'utilisation du transport par voie ferrée exige une planification détaillée afin que les autorités ferroviaires délivrent les accords et permis nécessaires, souvent un certain temps avant le commencement des travaux de construction proprement dits.

NOTE

En raison de l'ampleur et de la complexité de ces installations temporaires, le transport par voie ferrée n'est en règle générale pas rentable, excepté lorsqu'il est question de très grandes quantités ou de longues distances.

La plupart du temps, le chargement et le déchargement, à partir des/vers les zones de stockage, sont effectués par des pelles à benne preneuse. Ensuite, les matériaux sont transportés aux alentours du chantier (mais également du chantier vers l'aire de stockage de chargement) par des camions bennes ou des décapeuses.

Dans certains cas, l'utilisation d'un pont portique ou de wagons à déchargement automatique peut être intéressante.

5-2 Transport de matériaux issus du percement d'un tunnel

Les matériaux excavés à la suite du percement d'un tunnel apportent leur lot de contraintes au terrassier une fois qu'ils ont été amenés à la surface par l'entreprise réalisant le tunnel. Le présent paragraphe aborde ces contraintes.

L'état des matériaux issus du percement d'un tunnel dépendra du type de sol ou de roche, mais également des méthodes de percement du tunnel et de transport souterrain utilisées. En substance, il existe trois méthodes d'excavation de tunnel :

- L'excavation traditionnelle (machines à attaque ponctuelle, pelles équipées en godet butte, pelles 360°, etc.) ;
- Le minage ;
- Le recours à un tunnelier (TBM, de l'anglais Tunnel Boring Machine).

Le matériau le plus problématique est probablement celui qui est excavé à la suite d'un percement au tunnelier.

Il s'agit d'ailleurs du seul type de marin traité ici, les matériaux issus des deux autres méthodes présentant généralement des caractéristiques semblables à celles des matériaux de déblai.

Les tunneliers broient le sol ou la roche au cours du processus d'excavation, ce qui a pour effet de modifier considérablement la granulométrie et les caractéristiques intrinsèques par rapport à leur état naturel. Il est courant que ces méthodes de percement de tunnels soient associées à un transport souterrain effectué par un convoyeur longue distance.

Cette méthode de transport peut également entraîner la modification des caractéristiques du matériau.

Afin de faciliter l'excavation et le transport souterrains dans le cadre du percement de tunnels, de l'eau et/ou des additifs propriétaires (ex: plastifiants ou autres agents de conditionnement) sont souvent utilisés.

Ces ajouts, associés aux modifications de l'état du matériau excavé provoquées par les moyens d'excavation et de transport décrits ci-dessus, donnent souvent un marin qui, lorsqu'il arrive à la surface, est majoritairement amorphe et présente une teneur en eau élevée en raison de l'ajout de plastifiants.

Dans certains cas extrêmes, le marin peut être un peu plus consistant qu'un coulis ou qu'une mousse. Des essais de laboratoire préalables peuvent permettre de définir le conditionnement du marin afin d'obtenir un matériau de meilleure qualité.

Cependant, les aléas survenant fréquemment au cours du percement de tunnels imposeront les exigences de conditionnement et le terrassier devra gérer au mieux le produit résultant.

Le terrassement de surface commence avec le chargement du marin dans le matériel de transport à partir du dépôt de stockage provisoire.

Ce chargement est généralement réalisé par l'entreprise creusant le tunnel à l'aide de sauterelles mobiles situées en fin de convoyeur au niveau des têtes du tunnel ou à des emplacements de puits intermédiaires.

Le chargement du matériau excavé à partir du stockage provisoire, dont la taille sera normalement limitée en raison de la portée du transporteur, doit être réalisé à une cadence garantissant le maintien systématique de la capacité de stockage afin de pouvoir assurer la vitesse planifiée d'excavation du tunnel.

Le matériau excavé stocké sur le site de réception peut, selon son état, exiger un traitement spécifique avant d'être transporté. Ce traitement aura pour objet de diminuer sa teneur en eau afin de faciliter son transport et sa réutilisation ultérieure.

Dans la mesure où les volumes du matériau excavé sont souvent conséquents et que les sites de réception sont des emplacements fixes, le traitement peut être réalisé par un équipement

semi-permanent, statique et propriétaire ainsi que des installations incluant des filtres presse, des centrifugeuses et d'autres installations similaires.

En variante, le traitement pourra englober un traitement des sols conventionnel utilisant des malaxeurs qui ajoutent au sol de la chaux, du ciment ou un liant de même type.

Le transport des matériaux issus du percement de tunnels, lorsque leur teneur en eau est très élevée, peut également être assuré par des moyens hydrauliques, c'est-à-dire par pompage dans des tuyaux allant jusqu'au site de mise en dépôt.

Dans ce cas, il est possible d'utiliser des barrages filtrants ou des barrages de résidus au lieu d'un traitement mécanique ou chimique sur le site de dépôt.

Certains agents de conditionnement ont une durée de vie limitée. Une amélioration de ce matériau de creusement de tunnel peut être obtenue en stockant provisoirement le matériau dans un dépôt et en le laissant s'améliorer. Des essais de laboratoire ou sur site permettront d'évaluer cette option.

Les sites de creusement de tunnels se trouvent communément dans des zones urbaines et sont généralement situés loin du site de dépôt définitif des matériaux excavés.

En règle générale, le transport sera donc effectué par route, par voie ferrée ou navigable (camion, train ou barge/bateau) et la vitesse de transport devra être assez rapide pour être compatible avec la vitesse de creusement du tunnel.

Le mode de transport doit être en mesure de gérer les matériaux excavés, mais un prétraitement au niveau du site en surface facilitera ce choix.

Il est préférable d'identifier un usage spécifique pour le matériau excavé. En voici quelques exemples : création d'un habitat écologique, mesures correctives pour un terrain contaminé/dégradé, construction de plateformes de développement ou destinées à une future infrastructure.

6- Opération remblai et compactage

6-1 Groupes de matériaux

Les matériaux utilisés dans les remblais sont généralement des matériaux locaux obtenus à partir d'excavations réalisées sur site et dans des emprunts.

La classification des matériaux est présentée en FprEN 16907-2.

En fonction du comportement des matériaux dans les remblais, ces classes peuvent être regroupées au sein de groupes plus étendus.

C'est le matériau qui détermine le choix de la méthode de mise en œuvre et de compactage.

Trois catégories principales sont prises en compte, elles peuvent être subdivisées en groupes englobant les classes issues de la « classification » présentée en EN 16907-2 :

Matériaux fins et intermédiaires :

Ces matériaux sont sensibles à l'eau et leur comportement varie en fonction de la teneur en eau. Leurs différents états sont : « moyen », « sec » et « humide ». Il convient de se reporter à l'Annexe B.2 (informative) pour une définition plus exhaustive de ces états.

Matériaux granulaires, qui peuvent être classés dans les catégories suivantes :

- sols très grossiers (symboles de groupes de sols VC1 et VC2) ;
- matériaux bien gradués, y compris les sols grossiers graveleux à granulométrie étalée (gravillons et sables, symbolisés par les groupes de sols G1 et S1) et les sols composites ayant un coefficient d'uniformité supérieur à 6 selon la classification donnée en EN 16907-2 (groupes de sols G3 et S3) ;
- matériaux uniformes, y compris les sols grossiers graveleux à granulométrie resserrée (groupes de sols G2 et S2) et les sols composites ayant un coefficient d'uniformité inférieur à 6 (groupes de sols G4 et S4) selon la classification donnée en EN 16907-2 (il convient de noter qu'un coefficient d'uniformité compris entre 10 et 15 est souvent utilisé dans les spécifications d'ouvrages de terrassement tels que décrits dans l'Annexe B.3.3) ;

Matériaux à granulométrie discontinue ;

NOTE L'Annexe B informative présente et développe la définition de ces groupes de matériaux et propose une méthodologie et des conseils afin d'utiliser chaque groupe de matériaux dans les remblais.

Les roches peuvent être divisées, en fonction de leur comportement après excavation et conformément à EN 16907-2, en :

- roches de résistance élevée et extrêmement élevée - Symboles R1, R2 et R3 ;
- roches évolutives ou dégradables – Symboles R4Cld (roches argileuses) et R4 Xxd ;
- autres roches de résistance intermédiaire ; Autre symbole R4 ;
- roches de faible résistance : Symbole R5 ;
- Craie : Symbole CH

Le présent chapitre ne traite pas des matériaux dragués et les déchets miniers, ainsi que les sols contenant plus de 6 % de matières organiques.

6-2 Spécifications de compactage

Il convient de définir la méthode de compactage avant de commencer la mise en œuvre. Il convient aussi de se référer à des spécifications de méthode, de produit fini ou de performance.

Quoi qu'il en soit, les matériaux et le procédé utilisés doivent permettre de satisfaire les conditions fondamentales suivantes :

- Construction dans des conditions acceptables ;
- Stabilité satisfaisante des ouvrages en terre ;
- Déformation acceptable à court et à long terme pour les conditions définies à la conception.

Il existe trois méthodes différentes pour définir les spécifications de compactage :

- Spécification de méthode : la méthode de compactage est fondée sur l'expérience concernant les matériaux locaux, les conditions météorologiques et les guides techniques ;
- Spécification du produit fini : énumère une série de critères qui doivent être satisfaits après la réalisation des couches pendant la construction ;
- Spécification de performance : représentent l'état limite de service exigé.

6-3 Préparation de l'assise de remblai

D'une manière générale, les arbres et buissons doivent être abattus et retirés de la zone de remblai ainsi que les souches avant le début des travaux de construction. La terre végétale doit être enlevée et stockée de manière à pouvoir être réutilisée facilement.

En règle générale, le décapage sera réalisé au début des travaux de terrassement. Cependant, dans des zones très peu portantes ou marécageuses, l'enlèvement de la couche arable peut être néfaste car cette couche peut former une croûte plus solide et moins déformable que le sous-sol.

En pareil cas, comme dans tous les cas où la conservation de cette couche présente un avantage, celle-ci ne devra pas être retirée.

Par ailleurs, lors de la conception on peut décider de ne pas enlever la terre végétale si les tassements, et plus particulièrement les tassements différés, sont négligeables par rapport au tassement total du remblai et sous réserve que la présence de cette couche ne présente aucun risque d'instabilité.

NOTE

Pour un remblai sur un sol compressible et à faible résistance, notamment un sol organique ou marécageux, la végétation peut aider à l'opérabilité des engins de terrassement et faciliter les opérations de compactage des couches initiales.

Une fois l'assise dégagée, le terrain naturel sera décaissé et enlevé sur la surface et à la profondeur spécifiées lors de la phase de conception.

Une fois que le sol support du remblai est à la cote requise, et si cela est prescrit, il convient de scarifier le terrain à la profondeur spécifiée et de le compacter, sous réserve que ces opérations ne dégradent pas la qualité du sol support naturel.

La scarification à l'aide de matériels munis de dents, de herse ou de scarificateurs permet de déstructurer la couche d'assise, de la séparer de la couche sous-jacente, puis de la compacter afin d'homogénéiser la surface du sol support et de lui conférer les caractéristiques spécifiées en fonction de son emplacement dans l'ouvrage.

Sur les terrains en pente, le pied de la pente du remblai et la surface du terrain naturel doivent être terrassés de manière à renforcer la stabilité du remblai.

Sur un terrain en pente ou incliné, la réalisation des redans (excavation de « marches d'escalier ») à la surface du sol support peut être exigée préalablement au remblayage, conformément aux principes donnés à la Figure 1 ci-dessous.

La pente limite peut varier en fonction des pratiques locales (ex: de 15 % à 33 % ou 1V/3H). Les bermes ainsi créées doivent être suffisamment portantes pour supporter le remblai. Leur

largeur et leur pente doivent être conçues de façon que les engins puissent opérer dessus facilement.

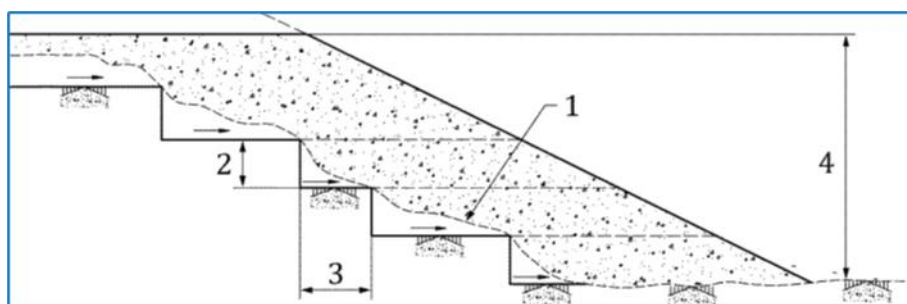


Figure 1 — Réalisation de redans pour un remblai sur un terrain en pente

Légende

- 1 Terrain existant
- 2 Hauteur de redan variable
- 3 Largeur de redan variable
- 4 Hauteur de remblai

NOTE

La hauteur des redans peut être comprise entre 0,3 m et 1 m.

Lorsque le remblai est construit sur un terrain présentant de l'eau en surface, cette eau doit être évacuée préalablement au début des travaux à l'aide de dispositifs d'assainissement qui peuvent être considérés comme des ouvrages et doivent être réalisés conformément aux spécifications définies lors de la conception.

Lorsque la conception le préconise, une couche de matériau granulaire grossier ou un géotextile doivent être mis en place, pour permettre ou faciliter la mise en œuvre des premières couches de remblai.

En règle générale, et plus particulièrement sur les terrains en pente où la présence d'eau est prévisible à court et à long terme au contact du terrain en place et du remblai, des dispositions constructives doivent être réalisées, selon les prescriptions définies lors de la conception, afin que cette zone reste drainée.

6-4 Régalage

6-4.1 Généralités

Après la préparation de l'assise du remblai, chaque couche doit être réalisée avec le matériau spécifié et être mise en œuvre en couches successives d'égale épaisseur sur toute la largeur du remblai et, si possible, parallèlement à l'arase finale.

L'objet principal de la mise en place est d'obtenir une couche régulière présentant l'épaisseur prévue à la conception.

L'épaisseur de la couche peut dépendre du procédé de compactage en fonction du type de matériau et de matériel de compactage. Il convient également de veiller à ce que la méthode d'épandage réduise le plus possible la ségrégation des matériaux, voire qu'elle en favorise l'homogénéisation.

Les bonnes pratiques visant à réduire le plus possible la ségrégation des matériaux rocheux et des matériaux granulaires consistent à décharger le matériau à quelques mètres du front de mise en œuvre et à le régaler, comme indiqué à la Figure 2 (il n'est pas toujours nécessaire d'avoir recours à un géotextile).

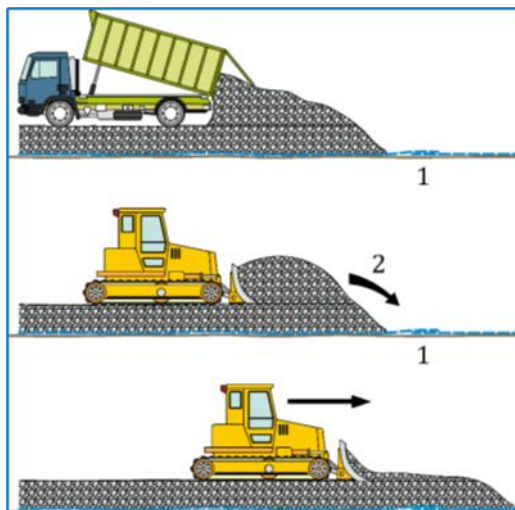


Figure 2 — Bonnes pratiques de régaler de matériaux rocheux et de matériaux granulaires

Légende

1 Géotextile (facultatif)

2 Régaler

Lorsque le matériau n'est pas sujet à la ségrégation, il est possible de le décharger directement à l'avant de la couche de remblai précédemment mise en œuvre puis de le régaler à l'aide d'un bulldozer.

Pour obtenir un remblai uniforme lorsque la nature des matériaux du remblai varie, il faut régaler les matériaux en couches parallèles à la surface de la construction.

Le régaler doit être planifié et réalisé de manière à éviter la ségrégation des matériaux dans chacune des couches. Sinon l'homogénéité doit être obtenue par un mélange convenable de ces matériaux réalisé à l'aide des engins prévus à cet effet.

En général, si le produit fini fait l'objet d'une spécification, il convient de ne mettre en œuvre aucune couche avant de vérifier que la couche sous-jacente satisfait aux exigences spécifiées.

Au cours de l'exécution des travaux, la surface des couches doit présenter une pente transversale, à savoir, généralement égale, si possible, à environ 4 % de façon à assurer l'évacuation de l'eau sans risque d'érosion et à en empêcher sa stagnation.

Dans tous les cas où il est prévu une forte érosion des surfaces exposées, des bourrelets doivent être construits aux bords des couches. Grâce à la pente longitudinale de l'ouvrage, ils doivent diriger l'eau vers des fossés créés pour évacuer l'eau.

Une procédure devra être établie pour garantir que les exigences de compactage sont satisfaites sur la totalité du profil en travers de l'ouvrage.

6-4.2 Compactage des bords de remblai

Les méthodes suivantes peuvent être utilisées pour compacter les bords du remblai :

1. Méthode du remblai excédentaire

Grâce à la mise en œuvre d'une largeur excédentaire, le compacteur ne s'approche pas du bord du remblai (voir Figure 3).

La largeur excédentaire de matériaux ajoutée au remblai est d'environ 1 m au-delà du profil théorique. Ainsi, dans le cas d'une pente de 3/2, environ 0,60 m du matériau excédentaire doit être retiré du talus.

2. Méthode du dévers inversé (profil transversal en W)

Cette méthode implique la création, sur le bord du remblai, d'une contrepente de la largeur d'une lame de réglage. Cette contrepente est d'environ 4 %.

La contrepente n'est pas suffisamment inclinée pour permettre au compacteur de compacter jusqu'au bord du remblai, c'est pourquoi une petite surlargeur est exigée dans la plupart des cas afin de garantir un compactage sécurisé. L'épaisseur de matériau devant ensuite être retirée du talus est généralement de 0,30 m.

L'avantage de cette méthode est de réduire l'érosion due à l'écoulement le long du talus.

Son principal inconvénient est de devoir mettre en place un drainage pour les pentes longitudinales les plus faibles afin d'éviter tout risque d'infiltration d'eau dans le remblai.

En fin de journée, le remblai sera modelé pour conduire l'eau vers les fossés d'assainissement provisoires créés pendant l'avancement des travaux de terrassement.

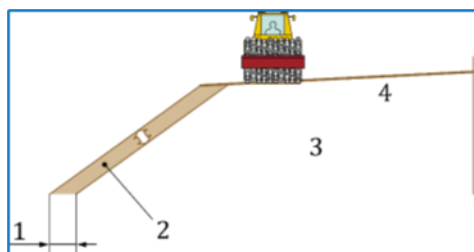


Figure 3a. Méthode du remblai excédentaire

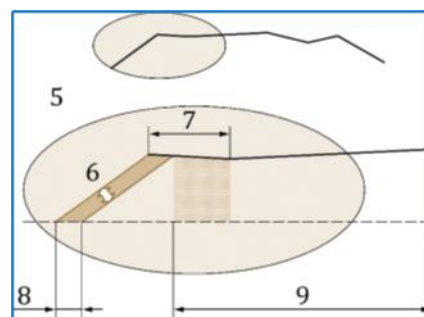


Figure 3b. Profil en W

Légende

- 1 Environ 1 m
- 2 Matériau à enlever du talus
- 3 Remblai
- 4 Dévers jusqu'à 4 %
- 5 Demi-profil en travers

- 6 Environ 0,3 m
- 7 Largeur de lame
- 8 Environ 0,5 m
- 9 Demi-largeur de plateforme

Le matériau excédentaire peut être laissé en place à condition qu'il ne compromette pas la stabilité ou les contraintes géométriques.

Les matériaux excédentaires doivent être retirés de manière à ne pas déstabiliser le talus, en particulier dans le cas de remblais rocheux.

Ces matériaux seront excavés de l'ouvrage soit pendant la montée du remblai soit après son achèvement.

Des sols sensibles à l'eau peuvent être réutilisés dans le remblai si leur teneur en eau le permet.

Une pelle hydraulique est traditionnellement utilisée pour régler la surface des talus du remblai sur des hauteurs comprises entre 3 m et 5 m, en fonction des caractéristiques de la pelle.

Cette opération exigera l'intervention d'opérateurs expérimentés capables de réaliser le profil final (sans nécessiter d'autres actions).

S'il est nécessaire d'ajouter de l'eau pour obtenir la compacité spécifiée, cet ajout doit être réalisé de manière uniforme soit dans les zones d'excavation (carrières, emprunts), soit dans les dépôts de stockage provisoires ou au sein de la couche, à l'aide de systèmes adaptés garantissant l'homogénéité.

Le régalaage et le compactage doivent être effectués avec un matériau non gelé.

Dans certains cas où les matériaux présentent une teneur en eau naturelle excessive, des mesures appropriées doivent être prises pour obtenir le compactage spécifié. Le séchage peut être obtenu, soit par aération, soit par ajout et mélange avec des matériaux secs ou avec des produits appropriés.

NOTE

Lorsque l'épandage doit être réalisé dans la nappe phréatique, ou qu'il peut exister une circulation de ruisseaux ou d'eau souterraine, il est recommandé d'étudier la possibilité de mettre en place un pompage ou un détournement de ces eaux pendant la réalisation des travaux.

Lorsque que la saturation du matériau est envisagée, par exemple dans les zones situées sous le niveau de l'eau ou dans des zones inondables, il faudra utiliser des matériaux insensibles à l'eau, de préférence des matériaux rocheux, granulaires ou stabilisés après étude préalable et essais appropriés en laboratoire.

Il convient de mettre en place ces matériaux jusqu'à une hauteur de 50 cm au-dessus du niveau maximal de la nappe phréatique. Cette opération fait partie intégrante de la conception.

6-4.3 Épaisseur des couches

L'épaisseur des couches doit être telle que, avec les moyens utilisés, les exigences requises soient obtenues sur l'ensemble de l'épaisseur de la couche.

Il convient de déterminer des limites adaptées à chaque cas particulier. Dans tous les cas, l'épaisseur des couches doit être supérieure à trois demis ($3/2$) de la taille du plus gros élément du matériau utilisé.

6-5 Compactage

6-5.1 Généralités

Le compactage a pour but de densifier le matériau de remplissage en réduisant les vides d'air. Ceci permettra de réduire le tassement du remblai après construction et d'améliorer les propriétés de masse du matériau.

Les principaux facteurs qui influencent le résultat du compactage pour un matériau donné sont les suivants :

- la teneur en eau (il faut noter que, pour un remblai en matériau granulaire très grossier, la teneur en l'intensité de compactage ;
- l'assise apportée par la couche sous-jacente.

Le choix de la méthode de compactage se fait en fonction :

- des caractéristiques du matériau de remblai ;
- de la teneur en eau des matériaux sensibles à l'eau ;
- des propriétés requises ;
- des caractéristiques des engins devant être utilisés ;
- des cadences d'excavation, de chargement et de transport des matériaux ;
- de la méthode de régalage ;
- de l'expérience de la méthode de construction proposée avec des matériaux similaires.

6-5.2 Types de matériels de compactage

Le type de matériel de compactage doit être étudié lors de la définition de la procédure de compactage. Les principaux types sont le compactage statique et le compactage vibrant : pour un matériel de compactage statique, l'énergie de compactage est liée à la masse du compacteur, à la vitesse d'avancement et au nombre de passes alors que pour un compactage vibrant, l'énergie de compactage augmente avec les vibrations des « billes » /roues de compactage.

Les compacteurs à cylindres lisses sont composés de billes lisses en acier massif ou lestées, tractées ou autoporteuses. Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais peuvent être équipés de deux billes, voire occasionnellement de trois. Leur poids varie habituellement de 2 t à 27 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à pieds dameurs sont composés de billes en acier massif ou lestées caractérisés par des pieds ou patins saillants fixés à la surface de la bille selon une forme régulière. La forme des pieds/patins facilite le compactage en émiettant le sol.

Les billes sont tractées ou autoporteuses. Pour plus d'efficacité, il est nécessaire que la vitesse de roulage soit élevée. Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais ils peuvent être équipés de quatre billes à la place des roues pourvues de pneus en caoutchouc. Leur poids varie habituellement de 2 t à 40 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à cylindres à grille sont composés de billes en acier massif ou lestées caractérisés par des grilles ouvertes fixées à la surface de la bille selon une matrice régulière. La forme des grilles facilite le compactage en émiettant le sol. Les billes sont tractées ou autoporteuses.

Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais certains d'entre eux peuvent être équipés de quatre billes à la place des roues pourvues de pneus en caoutchouc. Leur poids varie habituellement de 2 t à 40 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à pneus sont composés d'une série de pneus pleins en caoutchouc disposés en paires d'essieux autour d'unités de traction autoporteurs.

Ils sont fréquemment utilisés pour le compactage de couches de chaussée mais sont parfois utilisés pour le compactage de sols car les espacements entre les pneus facilitent le compactage. Les poids d'exploitation types sont de l'ordre de 8 t à 30 t et la largeur de compactage de 1,5 m à 2,4 m.

Les compacteurs à plaque vibrante comprennent une plaque métallique vibrante avec une source d'alimentation montée dessus. Leur poids varie de 100 kg à 2 t et les tailles de plaque de 0,16 à 1,6 m². Ils peuvent manœuvrer dans des zones étroites et difficiles d'accès.

Ils sont normalement manœuvrés manuellement mais certaines versions peuvent être télécommandées.

Les dames vibrantes comprennent un plateau situé au-dessous d'un mécanisme d'oscillation entraîné par moteur, qui génère des vibrations dans le plateau. Elles pèsent de 50 à 100 kg et sont utilisées dans les petits espaces confinés. Elles sont généralement manœuvrées manuellement.

Les compacteurs par impact à énergie élevée (HEIC) comprennent des billes non circulaires, de section triangulaire ou pentagonale tronquée.

Le compactage est assuré par une combinaison de vibrations et d'impact à mesure que la bille tourne, d'une manière analogue à une came. Ils peuvent être tractés ou autoporteurs mais il faut une vitesse relativement élevée pour pouvoir profiter de l'effet d'impact.

C'est la raison pour laquelle ils ne conviennent qu'aux sites relativement importants mais ils peuvent compacter jusqu'à des profondeurs de 4 m.

Le compacteur à impact dynamique (RIC) est constitué d'une masse tombante d'environ 500 kg qui est lâchée cycliquement d'une hauteur contrôlée variant entre 1 m et 3 m. Le procédé est souvent dénommé compactage à impact rapide (RIC).

6-5.3 Choix du matériel de compactage

L'adéquation des divers types d'atelier de compactage par rapport aux différents types de matériaux est résumée dans le Tableau 2.

Type de matériel de compactage	Désignation du matériau				
	Sols fins état humide), craie	Sols fins (état sec et état normal), sol grenu (bien gradué)	Sols grenus	Roches de faible résistance (R5)	Roches de résistance élevée (R1, R2, R3)
Compacteur à cylindre lisse (ou compacteur vibrant fonctionnant sans vibration)	Adapté	Possible	Possible	Possible	Non adapté
Compacteur à grilles	Adapté	Possible	Non adapté	Adapté	Non adapté
Compacteur statique à pieds d'âne	Adapté	Adapté	Non adapté	Possible	Non adapté
Compacteur à pneus	Adapté	Possible	Possible	Non adapté	Non adapté
Compacteur vibrant à pieds d'âne	Adapté	Adapté	Possible	Possible	Non adapté
Compacteur vibrant à cylindre lisse	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté
Compacteur à plaque vibrante	Non adapté	Possible	Adapté	Possible	Possible
Dame vibrante	Adapté	Adapté	Possible	Non adapté	Non adapté

Compacteur par impact à énergie élevée (HEIC)	Non adapté	Adapté	Adapté	Possible	Possible
Compacteur à impact dynamique (compacteur à impact rapide)	Non adapté	Adapté	Possible	Possible	Possible

Tableau 2 — Récapitulatif des matériels de compactage adapté à divers types de matériaux

Légende



Adapté

Peut être adapté, selon la taille du matériel spécifique et l'épaisseur de la couche

Généralement non adapté

Notes :

1. Les désignations de matériaux du Tableau 2 sont génériques et ne sont pas censées correspondre à la classification de FprEN 16907-2.
2. Les matériaux intermédiaires entre les désignations du Tableau 2 devront être évalués avant de décider du meilleur type de matériel de compactage.
3. Les matériaux issus de roches dures constituant les remblais devront être traités pour obtenir des tailles d'éléments compatibles avec les opérations de remblayage et de compactage.

7-Opération particulière de remblai sous l'eau

7-1 Généralités

La présente section ne s'applique qu'aux remblais mis en œuvre par déversement, par poussage et par barge. Pour les remblais hydrauliques, voir EN 16907-6 et EN 16907-7.

La possibilité de rabattement pour pouvoir réaliser hors d'eau les opérations de terrassement et de remblayage doit être examinée pendant la phase de conception.

Une attention particulière doit être portée pour sécuriser des sites contenant des dépôts de sols mous, soit par l'enlèvement, le remplacement, l'évacuation ou l'amélioration du sol mou ou par d'autres mesures de stabilisation.

Les précisions relatives au contexte du site, en complément des conditions de terrain, utiles pour entreprendre un remblayage sous l'eau, sont les suivantes :

- la géométrie du site, notamment ses conditions aux abords ;
- la topographie ;
- l'accès ;
- les restrictions applicables aux pentes des talus et à leur hauteur ;
- la profondeur de l'eau, la pente du rivage et la topographie du fond ;
- les ouvrages enterrés, canalisations et câbles existants, services, contaminants connus et contraintes archéologiques ;
- les restrictions environnementales dont le bruit, les vibrations, les déplacements, la pollution et les effets des variations saisonnières des conditions météorologiques, y compris les couches de surface gelées ;
- les données météorologiques et environnementales telles que les vagues, les courants et les marées.

7-2 Exécution

Il existe des considérations particulières relatives au remblayage sous l'eau.

Le remblayage sous l'eau peut être réalisé selon les manières suivantes :

- Déversement au-dessus du niveau de l'eau ; à des fins de sécurité, il convient de déverser le matériau de remblai à distance du bord du remblai puis de le pousser au moyen d'un bulldozer ou de le mettre en œuvre avec une pelle. Il convient de déterminer une distance de déversement suffisante pour que le projet offre des conditions de réalisation sûres.
- Déversement à partir d'une barge ; Le remblayage depuis une barge pourra se révéler nécessaire d'un point de vue sécuritaire (stabilité, construction du remblai en commençant par l'emplacement où l'eau est la plus profonde puis en se dirigeant vers la terre ferme) ou du point de vue de la qualité du remblai (meilleure homogénéité du remblai). Des mesures appropriées doivent être envisagées pour assurer la stabilité en fonction de l'état des terrains (assise rocheuse en pente ou sol mou). Voir Figures 4 et 5.

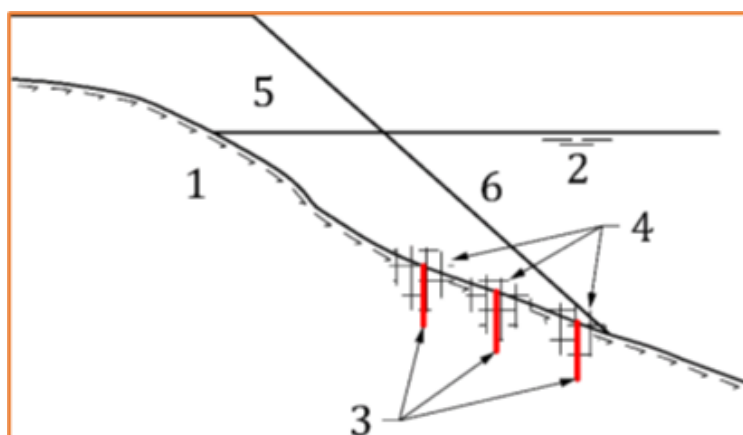


Figure 4 — Esquisse de réalisation d'un redan rocheux sous l'eau

Légende

1 Assise rocheuse

2 Eau

3 Forages pour le minage du rocher, distance usuelle de 2 m à 3 m.

4 Foisonnement des roches après minage, créant une surface rugueuse agissant comme un redan

5 Remblai rocheux

6 Talus de remblai

Si un contre-remblai (butée) est nécessaire pour assurer la stabilité comme le montre la Figure 5, ce contre-remblai doit être construit avant de réaliser le reste du remblai. Il est possible de le réaliser le remblai principal simultanément à condition que la différence de niveau avec le contre-remblai ne dépasse jamais l'écart définitif entre les deux niveaux.

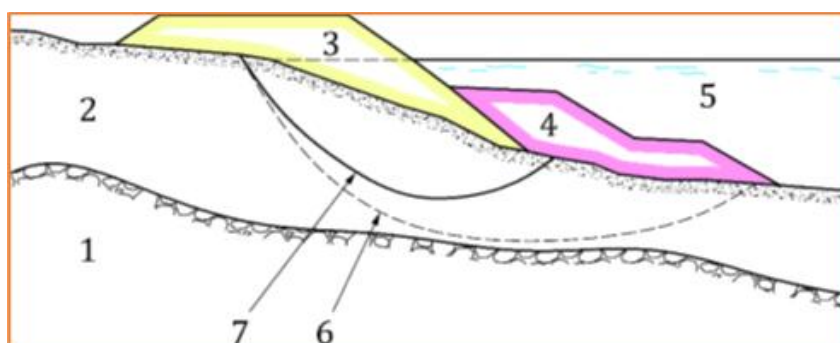


Figure 5 — Remblayage sous l'eau

Légende

1 Assise rocheuse

2 Sol

3 Remblai

4 Contre-remblai

5 Eau

6 Surface de glissement critique, stabilité acceptable avec contre-remblai

7 Surface de glissement critique, sans contre-remblai, stabilité non acceptable

Le remblai est mis en œuvre à un niveau arrivant juste au-dessus du niveau de l'eau. Le compactage doit alors être effectué normalement.

NOTE

Par exemple en utilisant un compacteur vibrant avec une charge de 30-45 kN/m et en effectuant 6 à 10 passages.

Pour la suite des opérations hors de l'eau, les procédés normaux des remblais compactés sont appliqués.

Si des spécifications relatives à la déformation sont exigées, le remblai peut être compacté par compactage dynamique en profondeur ou par surcharge temporaire.

La protection contre l'érosion et les vagues doit être mise en œuvre conformément à la conception.

7-3 Matériau de remblai

Pour les remblais sous l'eau, un matériau granulaire grossier et des matériaux rocheux sont communément utilisés.

S'ils sont mis en œuvre derrière une jetée ou un batardeau en enrochements, d'autres matériaux tels les limons, les sables et les graviers peuvent également être utilisés pour le remblayage sous l'eau.

En règle générale, les matériaux rocheux de remblai seront issus de déblais provenant de travaux routiers/ferroviaires ou de percements de tunnels, ou encore d'emprunts.

La roche exploitée à ciel ouvert présentera généralement une bonne distribution de la granulométrie des éléments rocheux et est privilégiée. Le type de roche et les méthodes de minage sont des facteurs essentiels.

Normalement, la qualité de la roche sera satisfaisante, mais certains types de roches ne sont pas adaptés (roches altérées et matériaux sensibles à l'eau).

Des exemples de ces derniers matériaux sont la phyllithe, le micaschiste ainsi que d'autres types de roches considérablement altérées et feuilletées.

En règle générale, il convient de limiter la taille des blocs maximale à environ 1 m. Si des pieux en acier doivent être implantés dans le remblai, la taille maximale des blocs rocheux ne doit pas dépasser 0,5 m.

Lorsque les opérations de minage sont adaptées, la roche issue des opérations de percement de tunnels peut fournir des matériaux de remblai qui conviennent également aux remblais sous l'eau.

Les matériaux issus de l'exploitation de tunneliers (TBM) sont fortement broyés et peuvent présenter une distribution granulométrique similaire à celle du sable ou du gravier.

Ce matériau peut être utilisé pour les remblais courants mais il n'est pas adapté aux remblais sous l'eau, à moins qu'il ne soit mis en œuvre derrière une jetée en enrochements ou un batardeau.

Le foisonnement d'un matériau rocheux de remblai qui passe de l'état solide à l'état miné peut, d'après l'expérience, être pris égal à :

- remblai hors de l'eau : 1,35 – 1,45 ;
- remblai sous l'eau : 1,50 – 1,55.

Pour les remblais sous l'eau, il est important de savoir qu'un volume plus conséquent que le volume théorique calculé à partir des profils de la section transversale sera exigé, ce volume pouvant être jusqu'à 20 % supérieur.

La raison en est qu'une quantité non négligeable de matériaux est mise en œuvre hors du profil du remblai en raison de procédés de remblayage imprécis, de forts courants ou de déformations au sein du remblai et du déplacement de matériaux du sol d'assise.

7-4 Talus de remblai

Les talus de remblai doivent être étudiés au cours de la conception et de la construction.

Les pentes naturelles des talus en remblais rocheux sous l'eau sont listées ci-dessous. Des pentes plus inclinées ne sont pas prises en compte car elles n'assurent pas une stabilité satisfaisante.

Des marges de sécurité calculées vis-à-vis de la stabilité de surface conformément aux normes de conception géotechnique peuvent exiger que le talus soit adouci.

Les talus soumis à des forces externes, des forces naturelles (courants, vagues, icebergs, etc.) peuvent également exiger un adoucissement ou d'autres mesures. Les remblais construits avec de la roche minée de mauvaise qualité (roche tendre) peuvent nécessiter une inclinaison nettement moins importante des talus.

Origine de la roche	Pente maximale recommandée pour les talus sous l'eau (V:H)	
	Roches de résistance élevée (R1, R2, R3)	Roches de faible résistance (R5)
Minage à ciel ouvert	1:1,3	1:1,5 - 1:2
Minage dans un tunnel	1:1,3 - 1:1,5	1:1,5 - 1:1,6
Tunnelier	non applicable	non applicable

Tableau 3 — Indication de la pente maximale recommandée pour les talus de remblai sous l'eau en fonction de la qualité de la roche et de la méthode de production

Afin d'éviter un glissement du remblai et d'assurer la sécurité des travailleurs sur le remblai, la pente des talus du remblai doit être surveillée. Les pentes raides doivent être détectées et l'inclinaison réduite.

La détermination des pentes des talus peut être réalisée à l'aide de méthodes de suivi de profils habituelles (mesure) ou en utilisant un échosondeur acoustique.

Lorsqu'il est observé un surplomb ou une pente trop élevée du talus, des ajustements des talus de remblais peuvent être effectués à l'aide d'une pelle ou par minage.

Il convient d'étudier la nécessité de procéder à un minage et d'élaborer des plans d'exécution.

7-5 Remplacement/déplacement de sol mou

Lorsque la conception le spécifie, le remplacement ou le déplacement de sol mou doit être évalué.

Le remplacement d'un sous-sol mou peut être réalisé pendant le processus de remblayage par excavation sous l'assiette du remblai afin de s'assurer que le matériau de remblai pénètre jusqu'au sol stable (ferme).

Le déplacement d'un sous-sol mou peut être effectué par minage et exige des procédés de conception et d'exécution spécifiques. Pour les deux méthodes, des procédés de travaux spécifiques doivent garantir des conditions de remblayage sécurisées.

ANNEXE 5



UTILISATION OPTIMALE DES MATÉRIAUX EXCAVÉS PROCÉDÉS DE COMPACTAGE

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 5

1. PRESCRIPTIONS DE COMPACTAGE
2. COMPACTAGE À SEC
3. COMPACTAGE À SEC – RETOURS D'EXPÉRIENCES
4. MATÉRIAUX PARTICULIERS OU SENSIBLES
5. RETOURS D'EXPÉRIENCES – RAIDISSEMENT DE TALUS

ANNEXE 5

Référence : XXXXXXXXXXXXX

1- Prescriptions de compactage

1-1 Compactage des remblais et des couches de forme

Référence GTR (Publication 2023) (*)

(*) La nouvelle version accompagne notamment l'application de la série de normes européennes « Terrassements », NF EN 169071, tant sur les aspects méthodologiques qu'opérationnels.

Les indications mentionnées ci-après donnent les conditions qui assurent la cohérence entre les facteurs définissant le cas de compactage, à savoir :

- le matériau tel que défini par la classification ;
- le matériel de compactage utilisé (type d'engin, paramètres de construction et de fonctionnement, mode d'emploi) ;
- l'épaisseur compactée ;
- l'objectif de compactage.

Cette approche est en accord avec la procédure de contrôle « en continu » des conditions de réalisation du compactage, dont l'intérêt par rapport au contrôle par mesure in situ de la masse volumique n'est plus à démontrer.

1-1.1 Prescriptions pour le compactage

Les prescriptions pour le compactage sont fixées selon la nature des ouvrages, afin de :

- limiter les tassements des corps de remblai et assurer leur stabilité,
- obtenir des caractéristiques suffisantes de raideur et de résistance pour les couches de forme.

Deux objectifs de densification, désignés symboliquement par q3 et q4 (1) sont définis :

- q3 objectif ordinairement requis pour les couches de forme,
- q4 objectif ordinairement requis pour les remblais.

Les prescriptions données dans les tableaux de compactage correspondent à la définition des modalités d'utilisation des compacteurs pour chaque couple : matériau - matériel.

(1) Les objectifs de densification q1 et q2, non considérés ici, s'appliquent aux assises de chaussées ; q2 correspond généralement à une couche de fondation et q1 à une couche de base.

Ces prescriptions ont été fixées à partir de nombreuses planches expérimentales accompagnées de mesures précises et répétées de la masse volumique en place, de l'observation du comportement d'ouvrages et d'un modèle mathématique calé sur ces données. Ce travail de rationalisation entrepris depuis la recommandation de 1976 a amené à réviser certaines exigences suite en particulier à des constatations répétées d'insuffisances marquées de compactage en fond de couche.

Avec la mise en œuvre par couche et les matériels actuels, on observe en effet une variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée, comme l'illustre la figure 13.

Pour s'assurer d'un compactage correct, ceci conduit à considérer deux indicateurs :

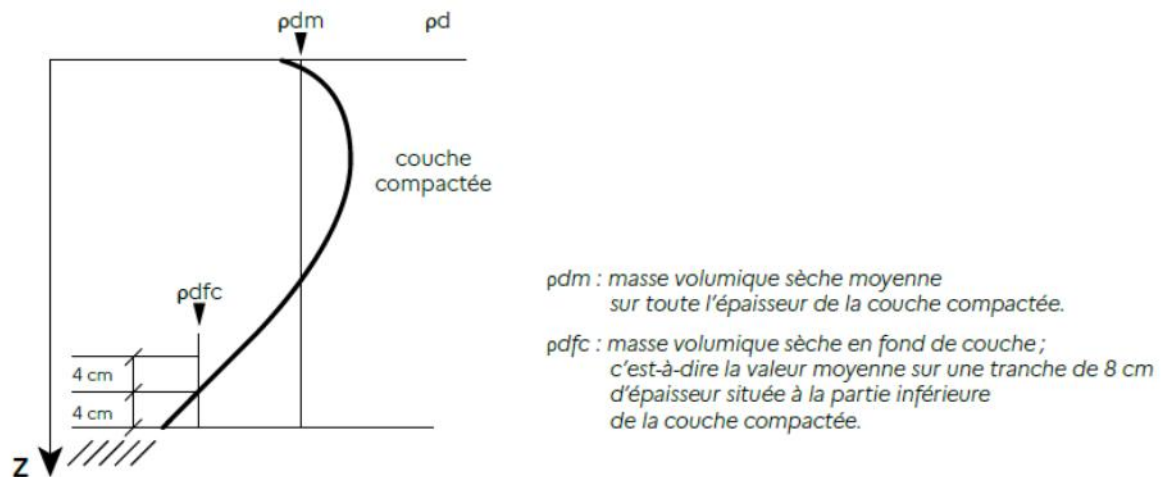


Illustration - Figure 13 référence GTR - Courbe de référence d'une couche compactée

p_{dm} : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée.

p_{dfc} : masse volumique sèche en fond de couche ; c'est-à-dire la valeur moyenne sur une tranche de 8 cm d'épaisseur située à la partie inférieure de la couche compactée.

Les prescriptions moyennes des tableaux ont été établies pour atteindre les valeurs moyennes Minimales suivantes de p_{dm} et p_{dfc} par nature d'ouvrage :

q3 / Objectif de densification pour le compactage des couches de forme :

$$p_{dm} \geq 98,5 \% p_{d,OPN} \text{ et}$$

$$p_{dfc} \geq 96 \% p_{d,OPN}$$

q4 / Objectif de densification pour le compactage des remblais :

$$p_{dm} \geq 95 \% p_{d,OPN} \text{ et}$$

$$p_{dfc} \geq 92 \% p_{d,OPN}$$

Ces valeurs sont à considérer comme des repères mais ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage (non-pertinence de la référence Proctor pour de nombreux matériaux, impossibilité factuelle d'assurer un contrôle véritable et précis de l'ensemble des travaux par mesure de masse volumique, notamment pour ce qui concerne le fond de couche).

On notera que la masse volumique de la partie supérieure de la couche n'est pas directement prise en compte ici pour caractériser la qualité du compactage. Certaines dispositions particulières sont cependant préconisées en fonction du couple matériau-engin pour cette zone.

Lorsque des raisons précises amènent à reconsidérer les prescriptions données dans ce document, il conviendra de procéder à des planches expérimentales pour traduire les

prescriptions en modalités d'utilisation des engins de compactage, à l'instar de ce qui est fait dans le présent document.

1-1.2 Données relatives aux matériaux

Les matériaux sont identifiés en familles, classes et sous-classes d'états selon la classification définie par le chapitre 2 du Guide GTR.

1-1.3 Données relatives aux compacteurs

1-1.3.1 Classement et utilisation

Les compacteurs pris en compte dans ce document ont une largeur de compactage supérieure ou égale à 1,30 m. Les petits compacteurs (rouleaux vibrants, plaques vibrantes, pilonneuses) ont un classement et des conditions d'utilisations qui sont précisées dans un autre document : guide Remblayage des tranchées et réfection de chaussées (SETRA, LCP, 1994).

Les classes des plaques vibrantes les plus efficaces sont cependant intégrées dans le présent document pour le rendre le plus complet possible.

Les différentes familles d'engins considérées ici sont :

- les compacteurs à pneus : Pi ;
- les compacteurs vibrants à cylindres lisses : Vi ;
- les compacteurs vibrants à pieds dameurs : VPi ;
- les compacteurs statiques à pieds dameurs : SPi ;
- les plaques vibrantes: Pqi.

« i » est le n° de la classe; il croît avec l'efficacité du compacteur à l'intérieur de chaque famille.

1-1.3.2 Les compacteurs à pneus (pi)

Le classement est fait selon la charge par roue CR :

- P1 : CR entre 25 et 40 kN ;
- P2 : CR entre 40 et 60 kN ;
- P3 : CR supérieure à 60 kN ;

Les compacteurs à pneus sont lestables pour atteindre la charge par roue maximale prévue par le constructeur. Il y a généralement un rapport de l'ordre de 1 à 2 entre le poids à vide et le poids lesté. La recherche de la meilleure efficacité conduit à utiliser la charge par roue maximale compatible avec la « traficabilité ».

Un compacteur donné peut être rangé dans différentes classes ; le classement retenu doit se rapporter à la charge par roue effective sur chantier.

La pression de gonflage maximale compatible avec la « traficabilité » est également recommandée, afin d'obtenir la meilleure efficacité. La vitesse d'utilisation n'a pour limite supérieure que celle résultant de la sécurité de la conduite.

1-1.3.3 Les compacteurs vibrants à cylindres lisses (vi)



Illustration - Photographies 21 et 22 du Guide GTR

Compacteurs vibrants à cylindres lisses (Source : BOMAG)

Classement et utilisation

Le classement est effectué à partir du paramètre $(M1/L) \sqrt{A_0}$ et d'une valeur minimale pour A_0 .

V1: $(M1/L) \times \sqrt{A_0}$	{ entre 15 et 25	et $A_0 \geq 0,6$
	{ supérieur à 25	et A_0 entre 0,6 et 0,8
V2: $(M1/L) \times \sqrt{A_0}$	{ entre 25 et 40	et $A_0 \geq 0,8$
	{ supérieur à 40	et A_0 entre 0,8 et 1,0
V3: $(M1/L) \times \sqrt{A_0}$	{ entre 40 et 55	et $A_0 \geq 1,0$
	{ supérieur à 55	et A_0 entre 1,0 et 1,3
V4: $(M1/L) \times \sqrt{A_0}$	{ entre 55 et 70	et $A_0 \geq 1,3$
	{ supérieur à 70	et A_0 entre 1,3 et 1,6
V5: $(M1/L) \times \sqrt{A_0}$	{ supérieur à 70	et $A_0 \geq 1,6$

*M1: masse totale s'appliquant sur la génératrice d'un cylindre (vibrant ou statique) en kg.
 L: longueur de la génératrice du cylindre (vibrant ou statique) en cm.
 A0: amplitude théorique à vide calculable par:
 $A_0 = 1000 \times (m_e/M_0)$, avec m_e : moment des excentriques de l'arbre à balourd (mkg) et M_0 : masse de la partie vibrante sollicitée par l'arbre à balourd (kg).*

Tableau 24 du Guide GTR : Tableau de classement des cylindres

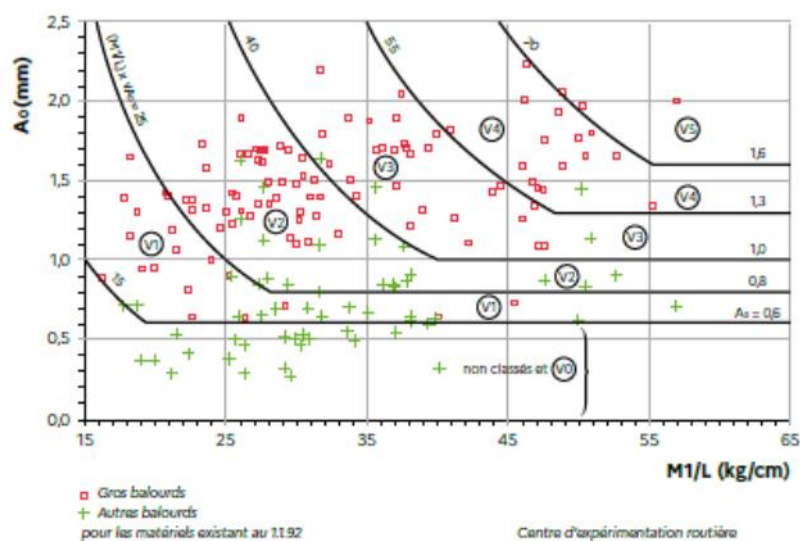


Figure 14 : Diagramme de classement des compacteurs vibrants monocylindres

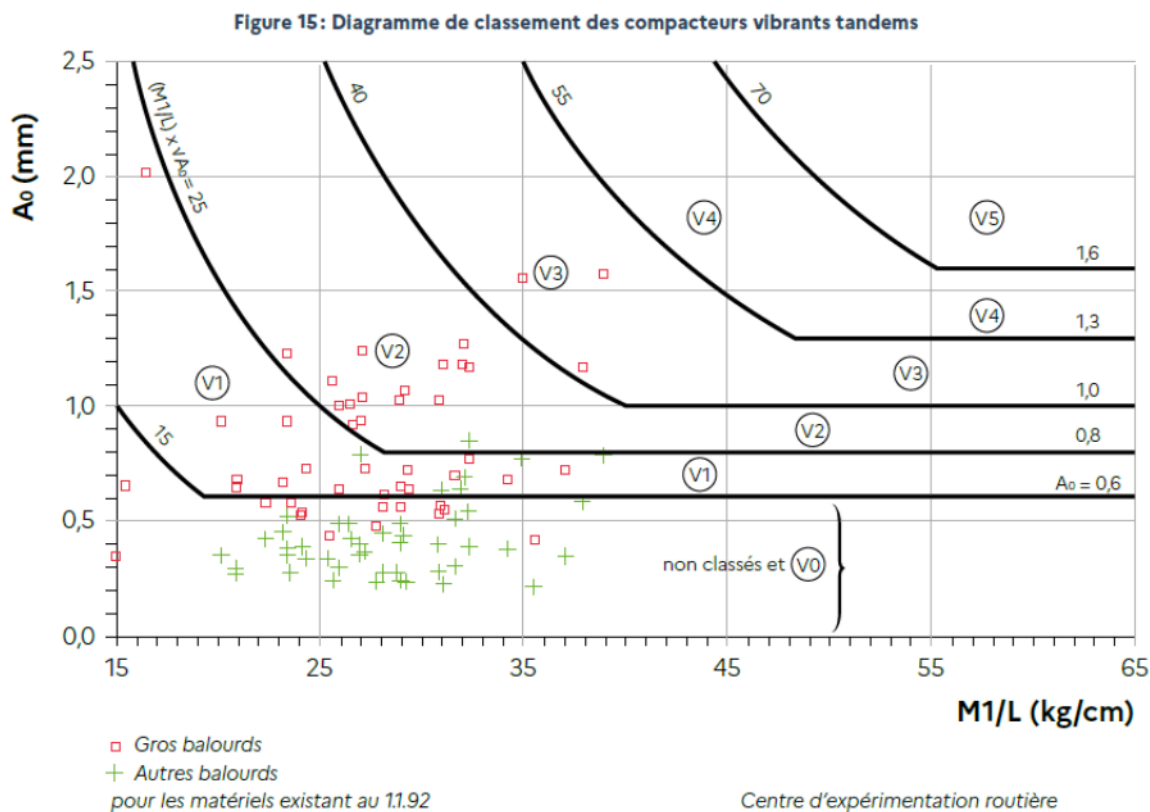


Figure 15 référence GTR : Diagramme de classement des compacteurs vibrants tandems

A_0 peut être contrôlée par la méthode des coussins selon la norme NF P98-761 « Essai de vérification du moment des excentriques des compacteurs vibrants ».

La mesure de l'amplitude à vide A_0 peut être réalisée à l'aide d'un vibrographe en faisant vibrer le compacteur sur des coussins pneumatiques (Source : Cerema).



Illustration – Photographies 23 et 24 du Guide GTR

Les compacteurs vibrants possèdent souvent plusieurs valeurs d'amplitude théorique à vide (variation du moment des excentriques) et/ou plus rarement peuvent être lestés. Un matériel donné peut donc, éventuellement, être placé dans différentes classes selon la valeur de A0 et/ou de M1/L.

Les compacteurs vibrants sont considérés comme fonctionnant à la fréquence maximale prescrite par le constructeur pour le balourd considéré.

À l'exception des classes V1 et V2, une fourchette de vitesses de translation est admise, qui influe sur les modalités de compactage (annexe 4 du fascicule 2). Cependant, la faculté d'employer une vitesse élevée, intéressante pour les débits, n'est autorisée que si le compacteur possède un compteur de vitesse au tableau de bord et un dispositif enregistreur pour la contrôler.

Monocylindres et tandems

Les deux morphologies les plus répandues sont les monocylindres désignés par VMi et les tandems par VTi (Vi = classe d'efficacité définie précédemment).

Sont regroupés sous le type VMi tous les monocylindres vibrants, les tandems transversaux (cylindres disposés selon un seul essieu) ainsi que les tandems longitudinaux à un seul cylindre vibrant. Les tableaux (e, Q/S) leur sont directement applicables.

Sont répertoriés VTi les tandems longitudinaux avec vibration sur chaque cylindre. Dans la plupart des cas, la classe d'efficacité est la même entre cylindre avant et cylindre arrière. Par rapport aux monocylindres, la valeur de Q/S et le nombre d'applications de charge à prendre en compte sont les mêmes. Le nombre de passes, lui, en est divisé par 2 (cf. annexe 4 du fascicule 2).

Dans les cas exceptionnels où les paramètres de masse et de vibration sont différents entre les cylindres AV et AR, deux cas sont possibles :

- a) Les valeurs de $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ diffèrent de moins de 10 % : la classe d'efficacité unique est déterminée à partir de la valeur moyenne des $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ et on revient au cas précédent.
- b) Les valeurs de $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ diffèrent de plus de 10 % : un tel compacteur tandem différencié est considéré comme la somme de deux monocylindres placés dans leur classe respective ; les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4 du fascicule 2.

1-1.3.4 Les compacteurs mixtes

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus dont le nombre peut être considéré comme suffisant pour contribuer au compactage en recouvrant l'ensemble de la largeur de génératrice du cylindre (intervalle entre surfaces de contact $\leq$ largeur d'un pneu).

On les considère comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre VMi et d'un compacteur à pneus Pj. Les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4 du fascicule 2. Ces compacteurs sont désignés VXi - Pj par la norme NF P98-736.

1-1.3.5 Les compacteurs vibrants à pieds dameurs (VPI)



Photographie 25 : Compacteur vibrant à pieds dameurs en premier plan, compacteur vibrant à cylindre lisse au second plan (Source : BOMAG)



Photographie 26 : Compacteur vibrant à pieds dameurs (Source : Cerema)

Ce sont généralement des versions dérivées des compacteurs vibrants à cylindres lisses évoqués au § 5.3.2. Leur classement reprend les mêmes critères :

V1 : (M1/L) x vA ₀	{ entre 15 et 25	et A ₀ $\geq$ 0,6
	{ supérieur à 25	et A ₀ entre 0,6 et 0,8
V2 : (M1/L) x vA ₀	{ entre 25 et 40	et A ₀ $\geq$ 0,8
	{ supérieur à 40	et A ₀ entre 0,8 et 1,0
V3 : (M1/L) x vA ₀	{ entre 40 et 55	et A ₀ $\geq$ 1,0
	{ supérieur à 55	et A ₀ entre 1,0 et 1,3
V4 : (M1/L) x vA ₀	{ entre 55 et 70	et A ₀ $\geq$ 1,3
	{ supérieur à 70	et A ₀ entre 1,3 et 1,6
V5 : (M1/L) x vA ₀	{ supérieur à 70	et A ₀ $\geq$ 1,6

Tableau 25 : Tableau de classement des cylindres

Dans le cas où la version à pieds dameurs est proposée en option, son classement peut différer de celui du compacteur vibrant à cylindre lisse auquel il s'apparente, du fait de différences de masse et d'amplitude.

Les modalités de compactage ne diffèrent de celles des vibrants lisses qu'à partir de la classe VP3. Elles sont établies en recherchant le bénéfice tiré à la fois de la vibration et des pieds dameurs. Par rapport aux vibrants lisses de même classe, ce bénéfice s'obtient à la vitesse la plus élevée et par conséquent pour une épaisseur plus faible ; la valeur de Q/S est augmentée.

Les compacteurs vibrants à pieds considérés dans les tableaux de compactage sont des monocylindres désignés VPMi dans la norme NF P98-736.

1-1.3.6 Les compacteurs statiques à pieds dameurs (SPI)

Le classement est fait selon la charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds (M1/L).

- SP1 : M1/L entre 30 et 60 kg/cm ;
- SP2 : M1/L supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm.

Pour les compacteurs avec lestage possible, le classement est celui correspondant à la situation rencontrée sur chantier. Il convient d'utiliser la vitesse maximale possible : en particulier, la fin du compactage doit pouvoir être effectuée à une vitesse de 10 à 12 km/h. Les premières passes ont généralement une vitesse nettement plus réduite, sans devenir inférieure à 2 à 3 km/h.

Pour les compacteurs équipés d'une lame, la part de temps consacrée au poussage et au régalaie des sols n'est pas prise en compte dans le compactage.

Au cas où la vitesse moyenne observée sur chantier (qui ne devrait pas être en dessous de 6 km/h) est inférieure à la vitesse moyenne lue dans les tableaux de compactage, il convient d'en tenir compte pour réévaluer le débit.

Les compacteurs tandems (cas fréquents) ont le même Q/S et le même nombre d'applications de charge que les monocylindres (valeurs des tableaux). Le nombre de passes est à diviser par deux.

1-1.3.7 Les plaques vibrantes (PQI)

Lorsque des raisons précises amènent à reconsidérer les prescriptions données dans ce document, il conviendra de procéder à des planches expérimentales pour traduire les prescriptions en modalités d'utilisation des engins de compactage, à l'instar de ce qui est fait dans le présent document.



Photographies 27 et 28 : Plaques vibrantes (À gauche, Source: Cerema, à droite, Source: BOMAG)

L'ensemble des plaques est classé PQ1 à PQ4 dans la Note technique « Compactage des remblais de tranchées » (SETRA-LCPC).

Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque).

Les plus petites plaques (PQ1 - PQ2) ne sont pas prises en compte. Celles considérées ici sont :

- PQ3 : Mg/S entre 10 et 15 kPa ;
- PQ4 : Mg/S supérieur à 15 kPa.

S est la surface de contact plaque/sol et non la surface hors tout.

Pour les modèles équipés d'élargisseurs, S varie et il convient d'en tenir compte pour la classification qui peut alors changer.

1-1.4 Règles de compactage

Les règles de compactage qui figurent dans les tableaux du fascicule 2 ont été complètement revues pour prendre en compte la classification des matériaux proposée par le guide des terrassements des remblais et des couches de forme, édition 2023 couramment appelé GTR 2023. Cela conduit à certaines modifications par rapport au GTR92.

1-1.4.1 Les tableaux de compactage

Les tableaux de compactage (cf. annexe 4 du fascicule 2) sont établis pour un matériau « moyen » à l'intérieur de la classe et la sous-classe correspondantes. Par contre, ils correspondent à l'emploi d'un compacteur situé à la frontière basse de la classe d'efficacité considérée.

Une case non renseignée dans les tableaux signifie que le compacteur considéré ne permet pas d'atteindre les objectifs définis au § 5.1 pour une couche de plus de 0,20 m.

Une valeur « plancher » de 0,30 m, plus réaliste, est adoptée pour l'optimisation des débits dans le cas des vibrants (annexe 4 du fascicule 2).

Dans le cas particulier des compacteurs à pieds dameurs, l'absence totale d'indications, quelle que soit la classe d'efficacité, correspond à l'inaptitude de ce type de matériel pour le sol considéré (faible cohésion).

Les réserves concernant la traficabilité n'ont qu'un caractère indicatif. En effet, les limites de traficabilité sont dépendantes, à l'intérieur d'une même classe d'efficacité, de la conception des matériels (ex.: cylindre vibrant, moteur ou non).

La fermeture de la partie supérieure des couches (pieds dameurs, vibrants lourds) peut faire appel à un complément de compactage ou à une opération spécifique indiquée en note. Dans les tableaux, les valeurs Q/S et e (associées à l'utilisation d'une vitesse de translation donnée) se prêtent à la définition des clauses contractuelles. Les tableaux comportent, à titre indicatif, les valeurs d'autres paramètres utiles à la définition de l'atelier de compactage, au calcul des rendements...

La définition de ces paramètres auxiliaires est la suivante :

- N : nombre d'applications de charge¹⁷ ;
- Q/L: débit horaire par unité de largeur du compacteur (donné en annexe 4 du fascicule 2, avec des exemples d'application).

1-1.4.2 Les paramètres définissant les modalités de compactage

Le paramètre Q/S

Le nombre indiqué dans la partie supérieure de chaque case des tableaux représente une valeur du rapport Q/S, exprimé en m^3/m^2 , dans lequel Q est le volume de sol compacté pendant un temps donné (par exemple un jour, ou une heure), et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps.

Q représente le rythme de production de l'atelier de terrassement. Sur le chantier, il peut être soit déterminé par des métrés après compactage, soit évalué à partir du nombre, de la charge moyenne, des coefficients de foisonnement et contre foisonnement, et de la durée du cycle constatée pour les engins de transport. Au stade de l'étude, Q est estimé en tenant compte des données du projet et des contraintes d'exécution.

S représente le rythme d'utilisation d'un compacteur. S est le produit, pendant le temps choisi pour l'évaluation de Q, de la distance D parcourue « en compactage », par la largeur de compactage L. Il est pondéré par le facteur morphologique du compacteur (cf. annexe 4 du fascicule 2) et l'efficacité du travail réalisé (coefficient d'efficacité).

La distance D peut être déterminée sur chantier au moyen d'un compteur kilométrique monté sur le compacteur. Les longueurs élémentaires parcourues par le compacteur avec des paramètres de fonctionnement non conformes (par ex.: vibration arrêtée pour un Vi, vitesse de translation trop élevée, etc.) ne sont pas à prendre en compte dans l'évaluation de D.

Interprétation

D'un point de vue pratique, la valeur du paramètre Q/S représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée ; à ce titre, elle pourrait être dénommée : « épaisseur unitaire de compactage ».

En d'autres termes, il est immédiatement possible, en examinant dans les tableaux de l'annexe 4 les valeurs de Q/S correspondant à une classe de matériau et à une intensité de

compactage données, de comparer l'efficacité des différentes classes de compacteurs et donc de comparer plusieurs engins dès lors que leur classement est connu.

Le nombre d'applications de charge correspond au nombre de passes dans le cas des rouleaux à pneus et des rouleaux monobilles, et au double du nombre de passes dans le cas des rouleaux tandems.

Enfin, il découle de cette présentation de la valeur du paramètre Q/S que le nombre de passes théorique moyen qui doit être appliqué sur une couche de matériau d'épaisseur donnée, s'obtient directement par le rapport entre l'épaisseur de la couche et la valeur du Q/S correspondant à la classe du compacteur et à celle du matériau considéré.

Dans les tableaux de compactage de l'annexe 4 du fascicule 2, on observe que les valeurs de Q/S diminuent lorsque l'intensité de compactage exigée est plus grande. Cela est cohérent avec l'interprétation précédemment donnée du paramètre Q/S.

Lorsque les valeurs de Q/S sont utilisées en tant que spécifications, elles doivent être interprétées de la manière suivante :

- dans le cas d'énergies de compactage intense (code 1) et moyenne (code 2), la valeur de Q/S indiquée est une valeur maximale : le Q/S réel doit être inférieur ou égal au Q/S indiqué dans le tableau.

Surtout dans le cas de compactage intense, il n'y a pas d'inconvénient à ce qu'il soit très inférieur. Les cas d'insuffisances de compactage se rencontrent en effet plus fréquemment là où la difficulté de compactage requiert une énergie intense (sols secs en particulier) ;

- dans le cas d'énergie de compactage faible (code 3), le Q/S réel doit être proche du Q/S indiqué dans les tableaux ; la valeur moyenne doit évidemment être centrée sur la valeur indiquée.

Elle ne doit être ni beaucoup plus élevée, ni beaucoup plus faible ; l'intervalle normalement acceptable à l'échelle de l'heure de travail est d'environ ± 20 % par rapport à la valeur indiquée. Sur les sols humides pour lesquels le compactage s'accompagne d'un phénomène de matelassage, il n'est pas bénéfique d'employer une énergie de compactage plus forte que celle prévue ; elle conduirait à diminuer encore davantage la portance ;

- la même valeur de Q/S du cas considéré est à prendre en compte, quelle que soit la valeur réelle de l'épaisseur qui doit rester dans la limite de la valeur maximale indiquée.

L'épaisseur compactée

Les épaisseurs indiquées dans les tableaux sont des épaisseurs après compactage.

La valeur d'épaisseur compactée indiquée est une valeur maximale : l'épaisseur réelle doit lui être inférieure ou égale. Les valeurs d'épaisseurs maximales de couches ne sont fixées que par rapport à la seule opération de compactage ; elles ne tiennent pas compte en particulier des contraintes pouvant être imposées le cas échéant sur le réglage (couches minces pour parfaire la fragmentation ou l'aération du matériau...).

Il convient d'être vigilant dans le choix du matériel de compactage susceptible de compacter les épaisseurs (notamment de couche de forme) pour obtenir la performance attendue, principalement pour les matériaux traités qui doivent systématiquement être réalisés avec une surépaisseur à éliminer.

La vitesse de translation

Les prescriptions relatives à la vitesse de translation sont à examiner différemment selon la famille de compacteur :

- pour les compacteurs vibrants V3 à V5, les tableaux donnent deux cas de vitesse de translation permettant d'optimiser le débit de l'atelier de compactage, en fonction des conditions réelles du chantier. La prise en compte de l'influence de la vitesse des compacteurs vibrants sur leur efficacité en profondeur a conduit à cette présentation ; la ou les valeurs de vitesse indiquées sont des valeurs maximales (à $\pm 10\%$) ;
- pour les compacteurs à pneus et les compacteurs statiques à pieds dameurs, la valeur indiquée correspond à la vitesse moyenne estimée durant l'ensemble des passes effectuées sur la zone de compactage. En effet, pour ces matériels et compte tenu de l'aspect « traficabilité », les vitesses en début de compactage sont généralement plus faibles qu'en fin de compactage ;
- pour les plaques vibrantes, il s'agit d'une vitesse moyenne généralement constatée.

Cas particuliers sur le choix du compacteur

Dans certaines situations, il convient d'imposer des choix de compacteurs permettant de respecter les ouvrages avoisinants ou pour des contraintes de vibrations environnementales. Dans ces situations, le choix du compacteur peut être défini dans le cahier des charges (cf. note du Sétra de 2009).

Contrôle qualité

On se référera pour ce point aux méthodes décrites dans le Guide technique Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 2 : organisation des contrôles (Sétra, 2007) et à la norme européenne CEN 16907-5.

1-1.4.3 Exemple de tableau des modalités de compactage

Le tableau 26 ci-après, extrait de l'annexe 4 du fascicule 2, reproduit les modalités de compactage à appliquer pour l'utilisation des sols F1 - VC2F1 en remblai. On remarque en particulier que pour les compacteurs V3, V4, V5, il existe deux vitesses de translation possibles auxquelles correspondent des modalités de compactage différentes.

Compacteur Modalités		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Énergie de compactage faible	Q/S	0.080	0.120	0.180	0.055	0.085	0.125		0.165		0.205		0.055	0.085	0.165	0.205	0.265	0.070	0.100	0	0.065
	e	0.30	0.45 (1)	0.60 (1)	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35 (1)	0.65 (1)	0.40 (1)	0.80 (1)	0.25 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.35 (2)	0.40 (2)	0.25 (2)	0.40 (2)		0.20 (1)
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0	1.0	
	Code 3	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	4	4	3
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800	65	
Énergie de compactage moyenne	Q/S	0.045	0.065	0.095	0	0.040	0.065		0.085		0.100		0	0.040	0.085	0.100	0.130	0.040	0.070	0	0
	e	0.25	0.35	0.45		0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60		0.25 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.20 (2)	0.30 (2)		0
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	2.0	3.5	2.0	4.0	2.0	2.0	2.5	3.5	4.0	8.0	8.0	0			
	Code 2	N	6	6	5	7	5	7	4	6	3	6	7	4	3	3	5	5	0		
	Q/L	225	325	475	80	165	130	300	170	400	200	80	215	350	520	320	560	0			
Énergie de compactage intense	Q/S	0	0.035	0.050	0	0.025	0.040		0.050		0.065		0	0.025	0.050	0.065	0.085	0	0.035	0	0
	e		0.20	0.30		0.20	0.30	0.30	0.40	0.30	0.45	0.20		0.30	0.30	0.25	0				
	V	5.0	5.0	2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	8.0	0						
	Code 1	N	6	6	8	8	6	8	5	7	8	6	5	4	8	0					
	Q/L	175	250	50	80	125	100	195	130	50	100	165	255	280	0						

Tableau 26 : Exemple de tableau de compactage - Cas des matériaux F1, VC2F1

1-1.4.4 Condition à satisfaire pour un bon compactage

Outre le respect des valeurs de Q/S et des épaisseurs maximales des couches, il importe de s'assurer :

- d'une bonne organisation du chantier notamment pour garantir l'homogénéité du matériau approvisionné, la répartition de l'effort de compactage (plan de balayage et cadence d'approvisionnement) et le délai de compactage dans le cas de sol traité au ciment, par exemple.

L'attention est attirée sur la nécessité de donner aux conducteurs d'engins des consignes précises et adaptées aux objectifs de qualité. Dans certains cas (zones exiguës, par exemple), ces consignes peuvent conduire à diminuer le Q/S donné par les tableaux ;

- du fonctionnement correct des compacteurs. Les paramètres essentiels sont :
 - pour les compacteurs vibrants Vitesse (V), moment des excentriques (me), fréquence de vibration (f),
 - pour les compacteurs à pneus : Vitesse, lest (ou charge effective par roue), pression de gonflage des pneumatiques.

Il appartient au contrôle qualité de bien vérifier la concordance entre les conditions de fonctionnement et la détermination de la classe du compacteur. Les fiches techniques peuvent être très utiles à cet égard.

En général, il n'y a pas lieu de faire varier trop souvent les valeurs de ces paramètres pour un cas de chantier donné (pour les compacteurs à pneus et à pieds dameurs, la vitesse qui peut être faible aux premières passes, doit augmenter ensuite). On évitera également l'emploi

d'ateliers hétérogènes qui pénalisent les matériels les plus performants ou compliquent l'organisation du chantier.

Pour le compactage dans les sites d'accès difficile, les conditions de compactage peuvent être choisies à partir du guide LCPC-SETRA de 1994 sur la réalisation des remblais de tranchées et réfection de chaussées, en complément du présent document.

1-1.4.5 L'évolution des matériels de compactage : nouvelles caractéristiques et nouveaux moyens d'auscultation

Présentation des nouvelles technologies de vibration

Les compacteurs vibrants utilisés aujourd'hui font appel à trois technologies de vibration différentes (cf. figure 16 ci-après) :

La vibration circulaire est utilisée sur les compacteurs depuis les années soixante. Elle est obtenue grâce à la rotation d'un arbre comportant un balourd placé au centre du cylindre du compacteur. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par une rotation excentrée du cylindre dans toutes les directions. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre dont la résultante principale est inclinée d'environ 60° par rapport au sol.

La technique la plus souvent utilisée permet, par inversion du sens de rotation de l'arbre à balourd, d'appliquer une amplitude d'une valeur différente dans l'autre direction (grande amplitude = flèches rouges / petites amplitude = flèches bleues).

La vibration oscillante est apparue sur les compacteurs dans les années quatre-vingt-dix. Elle est obtenue grâce à la présence de deux arbres tournant dans le même sens avec un décalage angulaire de 180°. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par un mouvement de rotation alternatif autour de l'axe du cylindre. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre, distribuées selon des angles proches de l'horizontale. Cette technologie offre une amplitude qui s'applique d'avant en arrière de façon alternée (flèches rouges).

La vibration dirigée est apparue sur les compacteurs dans les années quatre-vingt-dix. Elle est obtenue grâce à la présence de deux arbres tournant en sens opposé avec un calage angulaire à 0°. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par un mouvement linéaire alternatif dont la direction peut varier. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre distribuées soit verticalement (flèche rouge), soit avec un angle plus ou moins prononcé dont le sens d'application est automatiquement adapté au sens de déplacement du compacteur (flèches roses ou flèches bleues). Cette technologie offre une amplitude de vibration appliquée selon des angles allant de la verticale jusqu'à l'horizontale.

Classement et utilisation

- a) Tous les textes rédigés jusqu'à aujourd'hui se réfèrent aux compacteurs à vibration circulaire (cf. § 5.3.2).
- b) La vibration oscillante représente un cas particulier dans le domaine du compactage des remblais et des couches de forme concernés par ce guide. De par son principe, son efficacité se limite aux matériaux faciles à compacter et aux couches de faible épaisseur.

L'amplitude d'oscillation ne peut en aucun cas être utilisée dans le calcul de la classe de performance selon la norme NF P98-736. Cette technologie conduit à un mode de compactage qui transmet peu de vibrations à l'environnement.

c) La vibration dirigée, en raison de son interaction avec le sol qui diffère en fonction de la valeur de l'angle appliqué, offre une multitude de possibilités en fonction des matériaux et des épaisseurs de couche à compacter.

Lorsque l'on souhaite définir les classes de performance des différents réglages disponibles, il convient de considérer la résultante verticale de l'amplitude selon son angle d'application en mode bloqué.

Selon différentes études et expériences réalisées depuis son introduction, une approche simplement basée sur sa classification selon la norme NF P98-736 serait réductrice.

En effet, en changeant l'angle d'application des forces de contact avec le sol, on modifie le mode de mise en mouvement des grains du matériau ainsi que l'importance du rôle de la couche sous-jacente en tant que support.

Enfin, lorsque la vibration est dirigée à l'horizontale, l'effet produit par le cylindre sur le matériau peut être considéré comme semblable à la vibration oscillante.

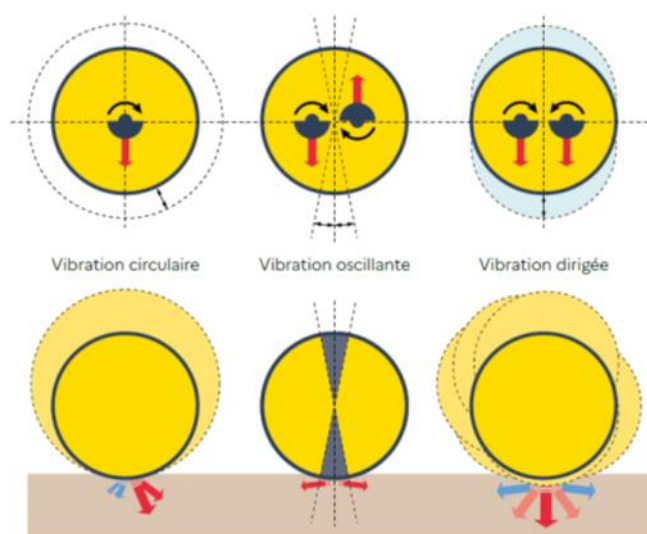


Figure 16 : Distribution des forces de contact entre le sol et le cylindre des différentes technologies de vibration (de gauche à droite : Vibration circulaire / Vibration oscillante / Vibration dirigée)

Compacteurs à énergie variable

Un compacteur offrant plus d'un réglage de vibration peut être considéré comme permettant une variation de l'énergie de compactage.

Parmi les trois technologies décrites précédemment, seules deux d'entre elles, la vibration circulaire et la vibration dirigée, sont déclinées sur les compacteurs proposant une gestion automatique de l'énergie de compactage. Cette gestion est rendue possible par la présence de capteurs et de boîtiers programmables qui prennent en compte différents critères tels que la rigidité du matériau et, de fait, l'entrée en résonance du cylindre.

Toutefois, il convient de noter qu'une telle optimisation du compactage nécessite soit un retour d'expérience, soit le recours à une planche d'essai. Le mode de compactage, générant une orientation automatique de la bille ou une variation de l'amplitude de la vibration circulaire doit être utilisé avec prudence, surtout avec des sols fins, car l'état hydrique influence fortement la portance, qui elle-même ne reflète pas le niveau de compactage réel.

Systèmes embarqués additionnels et autres méthodes de contrôle

Certains compacteurs disposent de systèmes embarqués permettant d'obtenir des informations complémentaires à celles fournies par la méthode Q/S décrite dans le présent document.

La géolocalisation du compacteur, par GPS, permet notamment :

- le pilotage du balayage du compacteur. Elle permet au chauffeur d'engin de s'assurer qu'il a réalisé le bon nombre de passes en tous points ;
- le contrôle de la vitesse de compactage ;
- la mesure de la surface balayée par le compacteur ;
- la mesure relative de la rigidité du matériau réalisée en continu.

Cette mesure se fait lorsque le système vibratoire est en fonctionnement, grâce à des accéléromètres positionnés sur la bille du compacteur.

Ces mesures sont à prendre avec prudence car elles varient en fonction de la nature et de l'état hydrique du matériau compacté. Le module de rigidité est impacté par le niveau de l'amplitude de vibration, par sa vitesse, par la nature du matériau, par son état hydrique, par son niveau de compactage, par son épaisseur et bien entendu par le comportement du sol sous-jacent.

Il existe d'autres méthodes de contrôle du compactage que le Q/S comme, par exemple, le contrôle continu du compactage (« CCC ») décrit par la CEN/TS17006. C'est une méthode de contrôle de la qualité des travaux de terrassement au moyen de systèmes de mesure dynamique et de documentation intégrés au compacteur.

Les valeurs de mesure de CCC peuvent être exploitées pour évaluer la rigidité, le processus de compactage du sol et la qualité du compactage.

Les paramètres les plus importants sont le poids, l'amplitude, la fréquence et la vitesse de fonctionnement du compacteur, la direction de progression, la profondeur de mesure et l'épaisseur de la couche, le type de matériau, sa teneur en eau et la régularité de la surface du sol.

Quatre approches différentes de l'utilisation du CCC sont possibles pour le contrôle et l'assurance qualité :

contrôle de masse volumique et de rigidité de la couche de matériau. Ceci exige préalablement un essai d'étalonnage lors d'une planche d'essai pour chaque type de matériau. Cette méthode convient seulement pour les sols granulaires et les sols composites dont la proportion de fines ($\leq 0,063$ mm) est < 15 % ;

analyse des zones de relativement faible valeur de compactage et documentation pour le contrôle qualité : cette méthode est utilisée pour identifier les zones dont les valeurs mesurées par CCC sont les plus faibles. Sur ces zones, d'autres mesures

d'acceptation doivent être réalisées. Une attention particulière doit être portée à la teneur en eau. Aucun étalonnage n'est exigé ;

documentation relative au compactage maximal pouvant être obtenu vis-à-vis de la rigidité de la couche mise en œuvre, avec le compacteur utilisé, pour un type de sol, une teneur en eau et une épaisseur de couche donnés. Cette méthode est appropriée aux sols granulaires et composites, et aux matériaux de remblai rocheux. L'adéquation de l'équipement de compactage doit avoir été prouvée au préalable ;

documentation de la méthode de compactage : cette approche peut être employée pour documenter les spécifications de compactage à des fins d'assurance qualité. Pour cette application, le compacteur doit être équipé d'un système de positionnement global.

Les consignes de compactage sont celles du GTR ou celles qui découlent d'une planche d'essai.

Il faut préciser que la liste des innovations présentée dans ce guide n'est pas exhaustive. Leur validation doit se faire par la réalisation d'une planche d'essais.

Planches d'essais de compactage

Objectifs

Le GTR (versions 1992 et 2000) a permis de généraliser l'emploi des compacteurs normalisés en terrassement en établissant des recommandations de compactage par classe de sol. Ces tableaux permettent de s'affranchir de planches d'essais longues et fastidieuses, contrôlées souvent avec des moyens d'essais en nombre insuffisant sur chantier.

Les règles de compactage et les objectifs Q/S sont établis dans ce guide pour les compacteurs à vibration circulaire : la planche d'essais n'est alors pas nécessaire et ne sera réalisée que pour répondre à une demande particulière. On applique ainsi les recommandations décrites dans ce guide.

Le choix des types de compacteurs étant généralement laissé à l'initiative des entreprises, celles-ci peuvent proposer des compacteurs autres que ceux à vibration circulaire.

Dans ce cas, il est nécessaire de réaliser des planches d'essais afin de définir des modalités de compactage spécifiques dans le cas d'utilisation de compacteurs équipés de systèmes différents de la vibration circulaire.

Ces planches d'essais permettront d'évaluer leurs capacités à compacter un matériau sur une épaisseur donnée.

Cas 1 - Les résultats obtenus sont identiques à ceux indiqués dans le GTR sur les critères suivants : nombre de passes, vitesse et épaisseur. Le nouveau compacteur est considéré comme équivalent à une des classes V1 à V5 et peut, de fait, être utilisé selon les modalités définies dans le tableau de compactage du GTR.

Cas 2 - Les résultats obtenus permettent d'optimiser les modalités de compactage du GTR, par exemple en réduisant le nombre de passes, ou en augmentant l'épaisseur de couche compactée. Le maître d'œuvre, sur la base des résultats d'essais obtenus, peut autoriser ces nouvelles prescriptions pour le matériau testé.

La planche d'essais permet ainsi de définir les performances réelles du compacteur sur des matériaux identifiés. Elle sera réalisée sur des matériaux dont les références Proctor sont connues et représentatives afin de pouvoir réaliser des contrôles du taux de compactage obtenu.

Rappelons que tout compacteur sur chantier doit être doté d'une fiche technique permettant d'identifier l'appareil et ses performances. L'application du GTR suppose que les compacteurs ont fait l'objet d'une vérification portant sur les amplitudes, les fréquences de vibration, leur masse et le bon fonctionnement de leur chronotachygraphe (guide Conception et réalisation des terrassements : méthodes d'essais, fascicule 3, 2007).

Le contrôle de compactage doit s'envisager dans le cadre d'une démarche qualité globale incluant également le contrôle des matériaux.

Exemple de méthodologie

Il est présenté ci-dessous un exemple de la marche à suivre pour évaluer un compacteur :

Recherche d'une analogie avec un compacteur existant dans ce guide

Le compacteur est testé sur un matériau F2 m avec la vitesse la plus lente, soit moins de 2 km/h, afin d'appliquer un maximum de contrainte sur le matériau. Le matériau est mis en œuvre, foisonné sur une épaisseur permettant de vérifier que le nouveau compacteur est proche d'un V4, soit entre 40 et 50 cm.

Après 7 passes, l'épaisseur maximale de matériaux compactée conforme à la qualité q4 est en moyenne de 0,41 m, pour un objectif de 0,40 m : la classe du compacteur testé peut être considérée comme équivalente à un V4 et toutes les consignes de compactage du GTR pour un V4 pourront être appliquées à ce nouveau compacteur.

D'autres cas auraient pu être testés sur d'autres planches d'essais, pour une qualité q4 soit :

- 6 passes pour un V3 ($e = 0,30$ m) ;
- 7 passes pour un V4 ($e = 0,40$ m) ;
- 6 passes pour un V5 ($e = 0,45$ m).

D'autres cas de figure peuvent être testés : optimisation de l'énergie de compactage, réduction du nombre de passes ou augmentation de l'épaisseur. La planche d'essais doit être réalisée sur un matériau homogène (nature et d'état hydrique).

Les conclusions de la planche d'essais ne vaudront que pour le type de compacteur utilisé et le matériau compacté.

La planche d'essai est validée sous réserve d'obtenir une population significative de mesures sur les deux paramètres à contrôler :

- la densité moyenne - La mesure est en général simple à réaliser sous réserve que l'appareil utilisé puisse mesurer la masse volumique sur toute l'épaisseur de la couche compactée ;
- la densité en fond de couche - Cette mesure est plus complexe à obtenir. On pourra procéder par :
 - décaissement avec mesures au gamma-densimètre ou au densitomètre à membrane, à différentes profondeurs,

- carottage avec prélèvements d'échantillons intacts lorsque cela sera possible et mesure par pesée hydrostatique ou au banc gamma,
- pénétromètres après étalonnage,
- double sonde gamma.

Les valeurs obtenues sont comparées à la masse volumique Proctor normal de référence. La note d'information n° 114, « Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais de compactage dans les chantiers de terrassements » (Sétra) est citée ici en référence comme apportant des compléments techniques et de bonnes pratiques.

1-2 Procédé de compactage

Référence : Norme européenne EN 16907-1 — Terrassements — Décembre 2018 (Extraits)

Sélection des propriétés du matériau de remblai et du procédé de compactage

La sélection des matériaux de remblai pour les terrassements implique l'identification des matériaux de remblai adaptés à la construction d'un ouvrage en terre, et la détermination des propriétés appropriées du matériau de remblai et du procédé de compactage pour s'assurer que les exigences de l'ouvrage en terre terminé peuvent être satisfaites.

La clause 6.3 décrit les questions qui doivent être abordées lorsque l'on entreprend la définition des matériaux de terrassement de remblai.

Pour des raisons économiques, environnementales et pratiques, les matériaux de remblai utilisés pour construire un ouvrage en terre sont habituellement des matériaux excavés dans les déblais du projet ou dans des emprunts sur le site du projet ou à proximité.

Il peut être nécessaire de traiter ou de modifier le matériau excavé pour qu'il puisse être utilisé. Lorsque le projet requiert des matériaux de remblai ayant des propriétés spécifiques qui ne sont pas disponibles sur le site, il doit utiliser des matériaux de remblai d'emprunt.

Dans chacun de ces cas, le concepteur des terrassements doit évaluer les matériaux de remblai, pour déterminer si les propriétés requises du remblai achevé peuvent être obtenues au moyen d'une mise en place et d'un procédé de compactage appropriés.

Critères d'évaluation du matériau de remblai compacté

Les exigences à satisfaire par l'ouvrage en terre sont identifiées soit par le client, soit comme une conséquence de la conception géotechnique ou structurelle.

Par exemple, il pourrait s'agir d'une exigence de comportement final en termes de déformabilité au niveau de la plateforme terminée et de limitations sur le tassement autorisé sous une zone de chargement définie.

Il convient que la conception des terrassements identifie les critères de terrassement qui doivent être satisfaits pour répondre aux exigences de l'ouvrage en terre (comme la déformabilité) et éviter les problèmes à la fois pendant et après la construction.

Ces critères varient suivant les conditions particulières du site, les matériaux de remblai disponibles et l'usage final du remblai, et peuvent inclure tout ou partie de ce qui suit :

- critères relatifs au remblai achevé :
 - valeur minimale du module de déformation verticale ;

- valeur minimale de la capacité portante (sur la base d'une méthode d'essai spécifiée) ;
 - valeur maximale ou minimale de la perméabilité, si nécessaire ;
- critères relatifs aux phases de construction :
 - traficabilité (pour faciliter l'exécution) ;
 - exigences relatives à la qualité du compactage/aux méthodes de travail, par exemple : le matériau de remblai ne doit pas devenir instable suite à la génération de pression d'eau interstitielle excessive lors du compactage à cause d'un surcompactage entraînant un matelassage, ou l'évolution après compactage due à une dessiccation, entraînant une séparation des couches ou une fissuration ;
 - maniabilité (par ex. la teneur en eau du matériau d'emprunt comparée à la teneur optimale pour le compactage) ;
- critères relatifs à la durabilité :
 - stabilité à long terme du remblai compacté, en particulier la résistance aux variations de teneur en eau (affaissement, gonflement et tassement limités) ;
 - résistance au gel ;
 - dégradabilité.

Les critères énoncés ci-dessus doivent être transformés en exigences de spécification technique imposées aux matériaux de remblai potentiels et aux processus de construction (procédure de compactage et traitement éventuel des matériaux).

Dans la plupart des cas, la compactibilité des matériaux de remblai potentiels est évaluée d'abord, en utilisant les essais de compactage normalisés en laboratoire, lorsqu'ils peuvent être réalisés (des exceptions typiques sont les remblais faits de blocs ou de matériaux très grossiers).

Le concepteur doit faire des évaluations en sachant que les résultats des essais de compactage en laboratoire sont seulement un indicateur de la réponse du remblai à un effort de compactage normalisé.

Il peut être avantageux de réaliser des essais Proctor normal et modifié pour clarifier la réponse des matériaux à des variations de l'effort de compactage.

Il convient de vérifier les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau de remblai compacté à l'intérieur du remblai, pour un procédé de compactage donné, par des essais de compactage en vraie grandeur ou par des essais in situ sur les premières couches du remblai (pour des mesures de la masse volumique, la rigidité, la déformabilité, la résistance ou la perméabilité).

Ceci peut être fait pour un projet de terrassement donné ou organisé à l'échelle nationale ou internationale, pour préparer des règles fondées sur l'expérience, que l'on peut utiliser au stade de la conception d'un projet ou pour les travaux courants.

Ces essais ou ces règles fondées sur l'expérience sont la condition qui permet de recommander l'usage de la masse volumique sèche ou du niveau de compactage, lorsqu'ils sont applicables, pour spécifier l'état désiré du matériau de remblai après compactage (voir la clause 6.3.4 pour de plus amples renseignements).

Comportement au compactage des matériaux de remblai

L'évaluation de la compactibilité de chaque matériau de remblai disponible constitue l'Étape 2 de la procédure de conception de remblai décrite dans la clause 6.3.1.

Autant que possible, le comportement du matériau de remblai doit être testé en laboratoire. Lorsque le matériau est trop grossier pour les essais en laboratoire l'évaluation est réalisée sur la base de l'expérience et des résultats des essais de compactage en vraie grandeur (EN 16907-3).

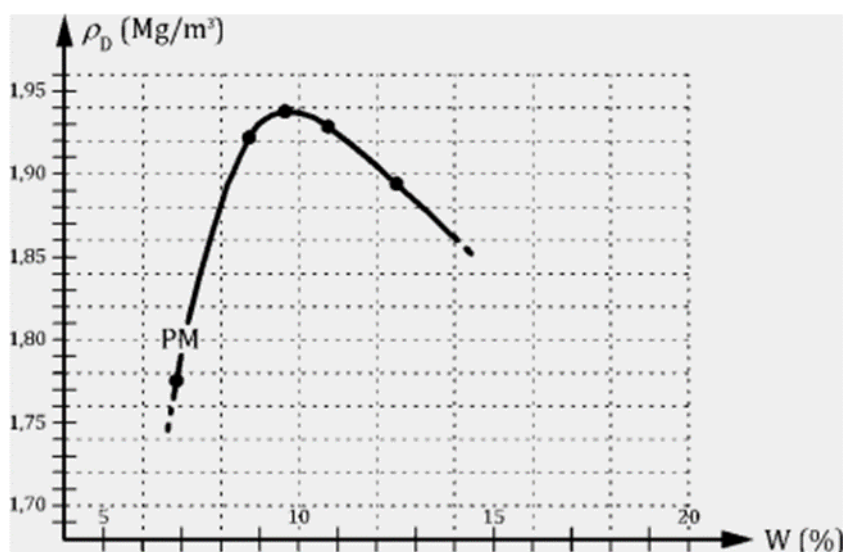
Il convient que les essais de compactage en laboratoire soient entrepris sur les sols proposés pour être utilisés en remblai afin d'identifier la masse volumique sèche qu'il est possible d'obtenir lorsqu'un sol de teneur en eau donnée est compacté avec un effort de compactage standard.

Des échantillons de sol sont testés sur une gamme de teneurs en eau afin de déterminer la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale pour l'effort de compactage appliqué. Pour les matériaux de remblai de type sol, deux procédures d'essai sont le plus communément utilisées, l'essai Proctor et l'essai Proctor modifié, qui diffèrent par l'énergie spécifique de compactage appliquée.

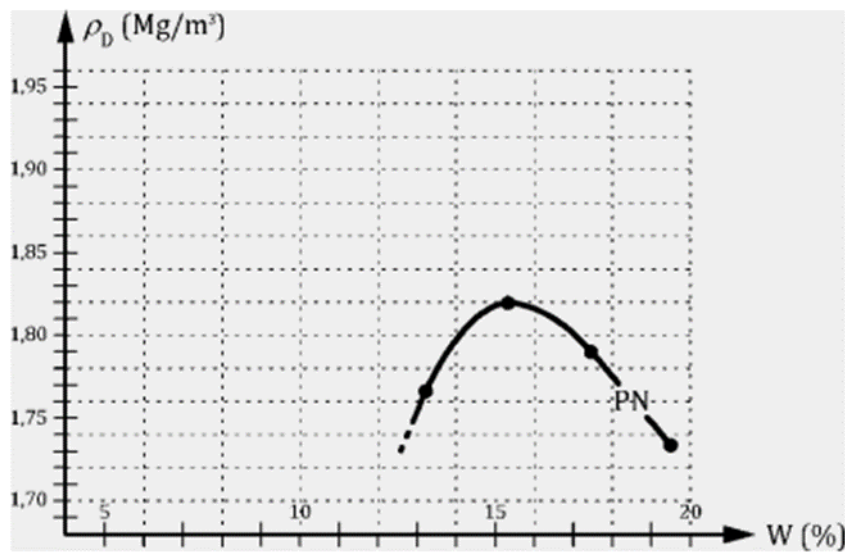
La sélection de la procédure d'essai dépend de la nature et de l'état du sol, et de l'anticipation du niveau de l'effort de compactage qui sera appliqué sur le site. Elle peut être définie au niveau national, au niveau régional ou au niveau du projet.

Des exemples de résultats des essais en laboratoire de type Proctor et Proctor modifié pour un seul type de sol (même échantillon de sol dans ce cas) sont présentés sur la figure 5.

L'effort de compactage plus élevé de l'essai Proctor modifié se traduit par une teneur en eau optimale plus faible et une masse volumique sèche maximale plus forte ; une exception notable concerne les sables ou graviers fins uniformes, pour lesquels l'augmentation de l'effort de compactage a un effet limité.



Exemple de courbe de résultat d'un essai Proctor modifié (PM)



Exemple de courbe de résultat d'un essai Proctor (PN)

Lorsque les deux essais sont réalisés sur un type de sol particulier, il convient que le concepteur des terrassements trace les résultats des essais en laboratoire sur un graphique unique pour aider à évaluer l'intervalle approprié des teneurs en eau pour le compactage du remblai et l'objectif de la masse volumique sèche qu'il convient d'obtenir par compactage sur le site.

Il convient que l'état hydrique du matériau de remblai soit clarifié en traçant les lignes de teneur en air volumique ou de degré de saturation pour le remblai. Ceci nécessite d'identifier la masse volumique des particules du matériau, soit par des essais en laboratoire soit sur la base d'une estimation fiable pour un type de matériau connu.

La teneur en eau du sol au moment de l'excavation, ou du remblaiement au moment de sa mise en place, diffère souvent de la teneur en eau optimale.

De plus, les teneurs en eau peuvent varier à l'intérieur d'une couche de sol et changer entre les études et les travaux de construction, à cause des changements climatiques saisonniers.

Par conséquent, la caractérisation de la compactabilité du sol doit inclure une évaluation de l'intervalle des teneurs en eau admissibles et des masses volumiques sèches correspondantes et du comportement mécanique et de la durabilité.

L'intervalle acceptable des teneurs en eau peut être défini sur la base des limites basse et haute d'acceptabilité, comme indiqué sur la Figure 6.

De nombreux matériaux de remblai compactés dans un état hydrique nettement plus sec que la teneur en eau optimale avec une teneur en air volumique élevée sont susceptibles de variations de volume après compactage, en réponse à des modifications de la teneur en eau.

Le comportement probable après compactage dépend de différents facteurs, incluant : la courbe granulométrique du remblai, la teneur en eau au moment de la mise en place comparée à la teneur en eau optimale, la plasticité, la minéralogie, les pressions verticales dans l'ouvrage en terre terminé, etc.

Il convient que le concepteur identifie les facteurs pertinents concernant un type de sol précis et évalue le potentiel de changement après compactage.

Il convient de définir une gamme (ou un intervalle) de teneurs en eau acceptables qui produise une densification satisfaisante pour chaque matériau de remblai (Figure 6).

Les critères sont couramment définis par rapport à la masse volumique minimale finale acceptable, souvent en combinaison avec la teneur en air volumique finale (ou le degré de saturation final) acceptable, plus des valeurs inférieures et supérieures des teneurs en eau admissibles afin d'obtenir des propriétés mécaniques acceptables et de minimiser les variations après compactage.

Les critères identifiés permettent de préparer les spécifications pour les terrassements.

Les matériaux de remblai grossiers (granulaires) sont relativement simples à évaluer, en ce qui concerne la teneur en eau, voir la Figure 6a :

- limite supérieure acceptable – normalement définie sur la base d'un pourcentage requis de la masse volumique sèche maximale.
- limite inférieure acceptable – il faut contrôler si le critère de masse volumique doit être davantage restreint sur la base de la teneur en air volumique pour éviter un risque d'affaissement à long terme.

Pour les matériaux de remblai fins (cohérents) (Figure 6b), il convient que le concepteur accorde une attention particulière aux points suivants lorsqu'il évalue les limites d'acceptabilité relatives à la teneur en eau :

- limite supérieure acceptable – le concepteur doit prendre en compte la résistance / la déformabilité requise pour le remblai compacté, et également la résistance minimale du matériau qui permettra la construction du remblai et évitera la création de surpressions d'eau interstitielle excessives dues au compactage (par exemple, un matériau au point A de la Figure 6b ne sera pas amélioré par un compactage supplémentaire) ;
- limite inférieure acceptable – elle doit être choisie en tenant compte de la teneur en air volumique (ou du degré de saturation) pour minimiser le potentiel de mouvements excessifs après la construction (par exemple, un matériau au point B de la Figure 6b aura une teneur en air volumique élevée et un effort de compactage supplémentaire est nécessaire pour augmenter la masse volumique du matériau afin d'obtenir un remblai stable).

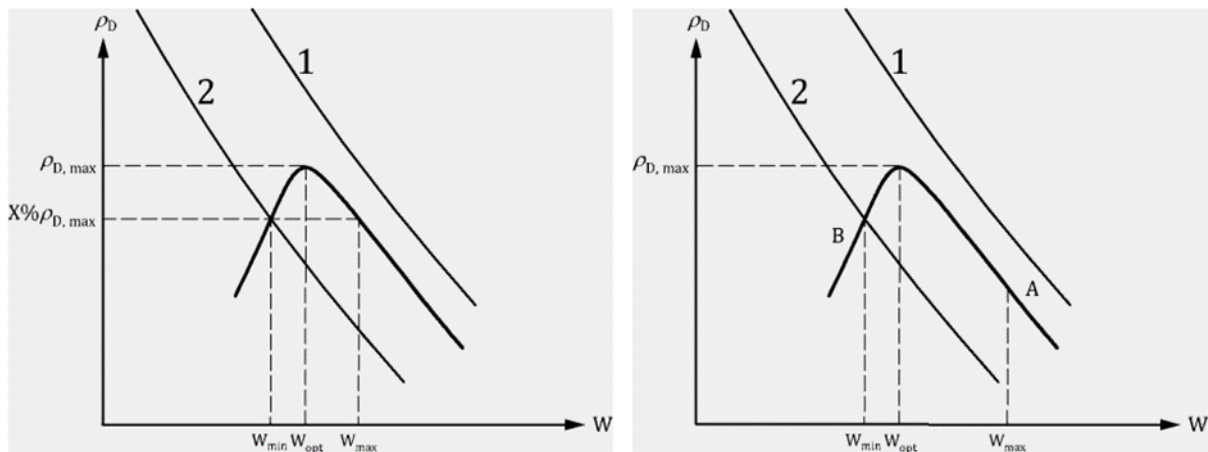


Figure 6 — Exemples illustrant la définition d'un intervalle de teneurs en eau sur la base des courbes de compactage pour des sols grossiers (a : à gauche) et des sols fins (b : à droite)

Légende

- 1 ligne de saturation (0 % de vides d'air)
- 2 ligne de teneur en air volumique égale à a%
- w teneur en eau (en %)
- ρ_D masse volumique sèche (Mg/m³)
- w_{opt} teneur en eau optimale
- w_{min} limite inférieure d'acceptabilité
- w_{max} limite supérieure d'acceptabilité

Lorsqu'un matériau de remblai bien connu grâce à des expériences antérieures doit être utilisé dans un contexte de terrassement qui a des précédents bien connus, la conception peut être fondée sur des essais en laboratoire liés à des résultats d'essais de caractérisation et de compactage.

Dans cette situation, la conception peut être développée en s'appuyant sur des pratiques et expériences nationales établies, en utilisant lorsque c'est possible des corrélations empiriques entre les propriétés des d'identification des sols et les propriétés mécaniques telles que la résistance ou la déformabilité probable du matériau compacté.

Toutefois, lorsque le matériau est utilisé en dehors de son domaine d'expérience connu, il convient de clarifier le comportement du matériau par des essais de correspondance en laboratoire.

Le tassement en cas d'inondation est un risque majeur pour les bâtiments et les autres structures fondées sur des épaisseurs de remblai significatives. Ce risque est très élevé lorsque le remblai est placé sous le niveau potentiel à long terme de la nappe (par exemple, lors du remplissage d'une carrière), mais peut se présenter dans diverses autres situations (par exemple, autour d'une canalisation d'eau brisée).

Lorsque les structures peuvent être affectées, il convient que les critères de conception des terrassements pour la mise en place et le compactage du remblai soient définis de sorte à éviter tout tassement au sein du remblai après construction.

Il convient d'intégrer une exigence pour que le remblai sous les fondations soit compacté de sorte à obtenir une faible teneur en air volumique (par ex. moins de 5 % de teneur en air volumique pour un remblai en matériau granulaire bien gradué).

La stabilisation du sol en utilisant des liants est une option possible. Des informations spécifiques sur la façon dont ces questions sont traitées pour des types courants de matériaux de remblai, et des exemples semblables fondés sur les lignes de saturation, sont données dans la norme EN 16907-3 et les Annexes B à H qui décrivent les pratiques nationales.

Essais de correspondance pour évaluer le comportement du remblai

Les informations fournies par l'essai de compactage pour un matériau de remblai spécifique peuvent être reliées aux propriétés mécaniques du remblai compacté en réalisant des essais en laboratoire supplémentaires sur chacun des échantillons compactés, un processus appelé « essais de correspondance ».

Par cette approche, la relation entre la teneur en eau du matériau mis en place en remblai et la résistance/la déformabilité ou la perméabilité du matériau compacté peut être déterminée.

Ces essais de correspondance peuvent être étendus pour évaluer les changements potentiels de la résistance/déformabilité et du volume des échantillons de remblai compactés par suite de l'augmentation de la teneur en eau après compactage : l'évaluation peut être réalisée au moyen d'essais CBR après immersion.

Il convient de représenter les résultats des différents essais en laboratoire réalisés par le concepteur des travaux de terrassement sur un même graphique ou sur un ensemble de graphiques comportant un axe commun (normalement en utilisant la teneur en eau en axe des x) pour examiner les effets de l'évolution des propriétés du remblai et d'être capable de déterminer l'éventail approprié des teneurs en eau et des masses volumiques sèches du remblai qui vont permettre au remblai compacté de présenter les propriétés requises par la conception géotechnique de l'ouvrage en terre terminé.

Cette démarche permet également au concepteur des travaux de terrassement de déterminer si le matériau de remblai spécifique est adapté à l'utilisation finale requise. Ce processus complète l'évaluation en laboratoire du matériau de remblai potentiel et permet le développement des spécifications techniques des terrassements.

Le processus des essais de correspondance nécessite le prélèvement de nombreux échantillons en vrac du matériau pendant les reconnaissances de sols pour s'assurer qu'un volume suffisant de matériaux est disponible pour les essais.

Lien entre la méthode de construction et le choix des matériaux pour les terrassements

Il convient de sélectionner le matériel d'exécution des terrassements à utiliser pour le projet pour l'excavation, le traitement, la mise en place et le compactage du matériau de remblai en tenant compte du type de remblai à mettre en place et des conditions du site pour s'assurer que les exigences de compactage peuvent être satisfaites.

Il convient que la capacité d'un matériel donné à compacter de façon adéquate un matériau de remblai donné reflète l'expérience antérieure et elle peut être confirmée au moyen d'essais

de compactage en vraie grandeur utilisant le matériau de remblai de type sol ou roche sélectionné et le matériel de compactage sélectionné (voir la clause 6.3.7).

Il convient de réaliser ces essais à l'avance ou au début des travaux principaux et ces essais peuvent être incorporés dans les travaux si on peut montrer que c'est acceptable.

Il est de bonne pratique pendant la construction de confirmer que le choix des spécifications du matériau de remblai et la procédure proposée pour l'exécution des travaux sont appropriés.

Il convient de le faire en examinant les résultats des essais in situ réalisés sur le matériau mis en place et compacté au début de chacune des phases principales des terrassements (par exemple, première utilisation d'un matériau de remblai donné ou d'une procédure de construction).

S'il y a une différence nette entre les résultats des essais in situ réalisés et l'objectif fixé dans le projet, il convient d'évaluer si le problème est lié à la méthode de construction ou à l'objectif fixé à la conception. Dans la plupart des cas, la méthode de construction doit être modifiée pour utiliser les matériaux disponibles.

Dans de rares cas, la conception de l'ouvrage en terre doit être modifiée pour tenir compte des matériaux disponibles.

Utilisation d'essais en vraie grandeur pour évaluer un procédé de compactage pour un matériau de remblai donné

Il convient que la procédure de compactage appropriée à utiliser pour chaque matériau de remblai soit sélectionnée lors de la phase de conception du projet.

Des essais en vraie grandeur sont utiles dans de nombreux cas, et il convient normalement de les utiliser pour tester les matériaux de remblai dont le comportement est inconnu ou de nouveaux équipements, ou des procédures de compactage supposées meilleures.

Ces essais doivent consigner les éléments suivants :

- les propriétés du matériau de remblai et son état initial ;
- toute modification apportée à ce matériau avant le compactage ;
- l'épaisseur des couches ;
- le matériel de compactage utilisé (principe, poids, vitesse, vibrations) ;
- le nombre de passes de compactage appliquées au matériau ;
- les résultats (propriétés mécaniques de la couche de remblai compactée).

Chacun de ces éléments doit être consigné afin d'associer l'évaluation du matériau compacté résultant (en utilisant les critères de la clause 6.3.3) à un procédé de compactage défini.

NOTE : La norme EN 16907-3 détaille un exemple de procédure utilisée pour valider un procédé de compactage, contenant les informations nécessaires sur le matériau et les modifications auxquelles il a été soumis, la procédure permettant de créer une couche, la taille de la zone d'essai, l'épaisseur de la couche, le matériel utilisé pour le compactage, la façon dont le compactage a été exécuté, ce qui a été vérifié, les critères utilisés pour évaluer les résultats et le contenu du rapport.

Il convient de choisir le procédé permettant de compacter correctement le matériau de remblai sur la base des résultats des essais en vraie grandeur décrits ci-dessus. Il convient de déterminer les variations autorisées du matériau testé, afin de guider les travaux en cas de variation du terrain ou de modification des autres matériaux utilisés pour construire le remblai.

L'expérience locale peut être utilisée pour extrapoler les résultats d'essais, ou même pour remplacer les essais, dans le cas où les mêmes sols ou roches ou autres matériaux ont été utilisés précédemment pour le même type de travaux dans des conditions de terrassement comparables.

1-3 Compactage – Type de matériels de compactage

Référence : Norme européenne EN 16907-3 — Terrassements — Décembre 2018 (Extraits : Compactage)

Généralités

Le compactage a pour but de densifier le matériau de remplissage en réduisant les vides d'air. Ceci permettra de réduire le tassement du remblai après construction et d'améliorer les propriétés de masse du matériau.

Les principaux facteurs qui influencent le résultat du compactage pour un matériau donné sont les suivants :

- la teneur en eau (il faut noter que, pour un remblai en matériau granulaire très grossier, la teneur en l'intensité de compactage ;
- L'intensité de compactage ;
- L'effet d'enclume lié à la couche sous-jacente.

Le choix de la méthode de compactage se fait en fonction :

- des caractéristiques du matériau de remblai ;
- de la teneur en eau des matériaux sensibles à l'eau ;
- des propriétés requises ;
- des caractéristiques des engins devant être utilisés ;
- des cadences d'excavation, de chargement et de transport des matériaux ;
- de la méthode de régalage ;
- de l'expérience de la méthode de construction proposée avec des matériaux similaires.

Types de matériels de compactage

Le type de matériel de compactage doit être étudié lors de la définition de la procédure de compactage. Les principaux types sont le compactage statique et le compactage vibrant : pour un matériel de compactage statique, l'énergie de compactage est liée à la masse du compacteur, à la vitesse d'avancement et au nombre de passes alors que pour un compactage vibrant, l'énergie de compactage augmente avec les vibrations des « billes » /roues de compactage.

Les compacteurs à cylindres lisses sont composés de billes lisses en acier massif ou lestées, tractées ou autoporteuses. Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais peuvent être

équipés de deux billes, voire occasionnellement de trois. Leur poids varie habituellement de 2 t à 27 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à pieds dameurs sont composés de billes en acier massif ou lestées caractérisés par des pieds ou patins saillants fixés à la surface de la bille selon une forme régulière. La forme des pieds/patins facilite le compactage en émiettant le sol.

Les billes sont tractées ou autoporteuses. Pour plus d'efficacité, il est nécessaire que la vitesse de roulage soit élevée. Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais ils peuvent être équipés de quatre billes à la place des roues pourvues de pneus en caoutchouc. Leur poids varie habituellement de 2 t à 40 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à cylindres à grille sont composés de billes en acier massif ou lestées caractérisés par des grilles ouvertes fixées à la surface de la bille selon une matrice régulière. La forme des grilles facilite le compactage en émiettant le sol. Les billes sont tractées ou autoporteuses.

Ils sont généralement équipés d'une seule bille mais certains d'entre eux peuvent être équipés de quatre billes à la place des roues pourvues de pneus en caoutchouc. Leur poids varie habituellement de 2 t à 40 t et la largeur de leur bille est comprise entre 0,5 m et 2,2 m.

Les compacteurs à pneus sont composés d'une série de pneus pleins en caoutchouc disposés en paires d'essieux autour d'unités de traction autoporteuses.

Ils sont fréquemment utilisés pour le compactage de couches de chaussée mais sont parfois utilisés pour le compactage de sols car les espacements entre les pneus facilitent le compactage. Les poids d'exploitation types sont de l'ordre de 8 t à 30 t et la largeur de compactage de 1,5 m à 2,4 m.

Les compacteurs à plaque vibrante comprennent une plaque métallique vibrante avec une source d'alimentation montée dessus. Leur poids varie de 100 kg à 2 t et les tailles de plaque de 0,16 à 1,6 m². Ils peuvent manœuvrer dans des zones étroites et difficiles d'accès.

Ils sont normalement manœuvrés manuellement mais certaines versions peuvent être télécommandées.

Les dames vibrantes comprennent un plateau situé au-dessous d'un mécanisme d'oscillation entraîné par moteur, qui génère des vibrations dans le plateau. Elles pèsent de 50 à 100 kg et sont utilisées dans les petits espaces confinés. Elles sont généralement manœuvrées manuellement.

Les compacteurs par impact à énergie élevée (HEIC) comprennent des billes non circulaires, de section triangulaire ou pentagonale tronquée.

Le compactage est assuré par une combinaison de vibrations et d'impact à mesure que la bille tourne, d'une manière analogue à une came. Ils peuvent être tractés ou autoporteurs mais il faut une vitesse relativement élevée pour pouvoir profiter de l'effet d'impact.

C'est la raison pour laquelle ils ne conviennent qu'aux sites relativement importants mais ils peuvent compacter jusqu'à des profondeurs de 4 m.

Le compacteur à impact dynamique (RIC) est constitué d'une masse tombante d'environ 500 kg qui est lâchée cycliquement d'une hauteur contrôlée variant entre 1 m et 3 m. Le procédé est souvent dénommé compactage à impact rapide (RIC).

Choix du matériel de compactage

L'adéquation des divers types d'atelier de compactage par rapport aux différents types de matériaux est résumée dans le Tableau 2.

Type de matériel de compactage	Désignation du matériau				
	Sols fins état humide), craie	Sols fins (état sec et état normal), sol grenu (bien gradué)	Sols grenus	Roches de faible résistance (R5)	Roches de résistance élevée (R1, R2, R3)
Compacteur à cylindre lisse (ou compacteur vibrant fonctionnant sans vibration)	Adapté	Possible	Possible	Possible	Non adapté
Compacteur à grilles	Adapté	Possible	Non adapté	Adapté	Non adapté
Compacteur statique à pieds dameurs	Adapté	Adapté	Non adapté	Possible	Non adapté
Compacteur à pneus	Adapté	Possible	Possible	Non adapté	Non adapté
Compacteur vibrant à pieds dameurs	Adapté	Adapté	Possible	Possible	Non adapté
Compacteur vibrant à cylindre lisse	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté	Adapté
Compacteur à plaque vibrante	Non adapté	Possible	Adapté	Possible	Possible
Dame vibrante	Adapté	Adapté	Possible	Non adapté	Non adapté

Légende

	Adapté
	Peut être adapté, selon la taille du matériel spécifique et l'épaisseur de la couche
	Généralement non adapté

Tableau 2 — Récapitulatif des matériels de compactage adapté à divers types de matériaux

Notes :

1. Les désignations de matériaux du Tableau 2 sont génériques et ne sont pas censées correspondre à la classification de FprEN 16907-2.
2. Les matériaux intermédiaires entre les désignations du Tableau 2 devront être évalués avant de décider du meilleur type de matériel de compactage.
3. Les matériaux issus de roches dures constituant les remblais devront être traités pour obtenir des tailles d'éléments compatibles avec les opérations de remblayage et de compactage.

Le compactage est assuré par une combinaison de vibrations et d'impact à mesure que la bille tourne, d'une manière analogue à une came. Ils peuvent être tractés ou autoporteurs mais il faut une vitesse relativement élevée pour pouvoir profiter de l'effet d'impact.

2- Compactage à sec

2-1 Principes du compactage à sec

Référence : Norme européenne EN 16907-3 — Terrassements (Extraits)

2-1.1 Avantages et principes du compactage à sec

Dans certains climats secs et arides, l'ajout d'eau pour obtenir la teneur en eau permettant de qualifier le matériau comme « sec » pour le compactage peut être relativement coûteux (forage, pompage, transport, étalement, voire mélange, organisation du site) et consommer parfois de grandes quantités d'une ressource rare.

Des recherches expérimentales effectuées au début des années quatre-vingts lors d'essais contrôlés au CER de Rouen et sur des sites de construction en Algérie et au Niger ont donné lieu à des recommandations pour le compactage de sols dont la teneur en eau est quasiment nulle.

2-1.2 Définition des sols arides - domaine d'application de la méthode

Nature des sols concernés

Les sols pour lesquels les expériences ont été concluantes sont les suivants :

Classification	Qualification
Sols fins	Passant à $63\ \mu\text{m}$ > 35 % et $I_p < 25$ a
Sols sableux et graveleux riches en fines	12 % > Passant à $63\ \mu\text{m}$ > 35 %
Sols sableux pauvres en fines	Passant à $63\ \mu\text{m}$ < 12 % et passant à 2 mm > 70 %
Sols graveleux pauvres en fines	Passant à $63\ \mu\text{m}$ < 12 % et $D_{\text{max}} \leq 50$ mm
Sols grossiers	Passant à $63\ \mu\text{m}$ < 12 % et $D_{\text{max}} > 50$ mm
a En règle générale, et plus particulièrement avec les sols contenant des fines compactées à sec, il convient de tenir compte des risques associés à l'infiltration d'eau par la suite (ex. : distribution d'eau).	

Tableau B.1

Définition de l'état hydrique « aride »

Lorsqu'un essai Proctor est effectué sur des échantillons dont la teneur initiale en eau est proche de zéro, une masse volumique minimale apparaît à une teneur en eau de w_c appelée teneur en eau critique, comme le montre la Figure B.5.

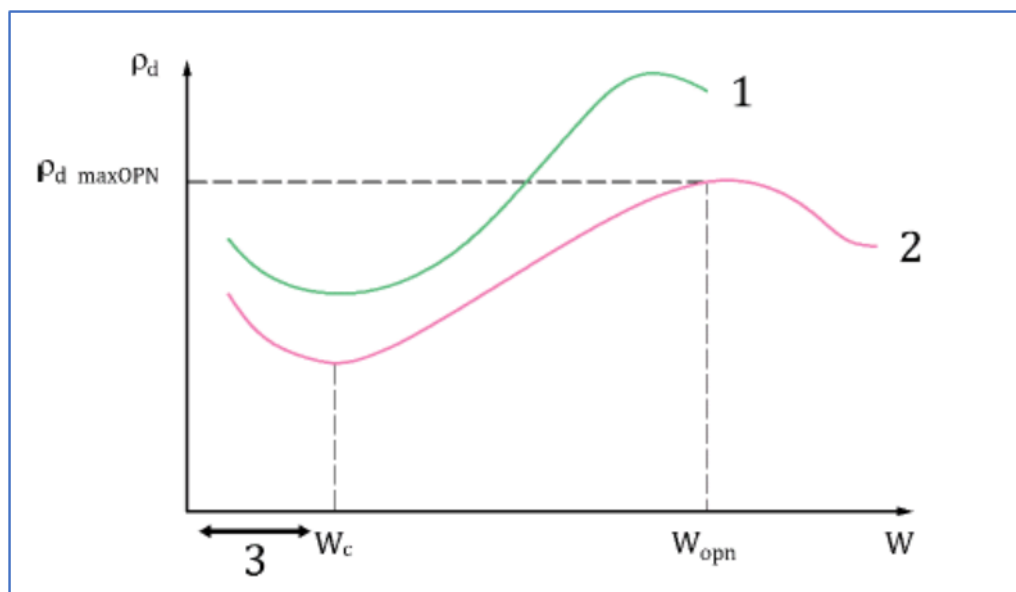


Figure B.5 — L'état aride correspond à une teneur en eau comprise entre zéro et w_c .

Légende

1 Proctor modifié

2 Proctor

3 État aride

À partir de ce graphique, nous pouvons conclure que plus la teneur en eau est faible, plus le compactage est efficace. C'est souvent vrai, mais il arrive que le sol devienne trop poussiéreux et que sa faible traficabilité réduise l'efficacité du compactage. Les différentes gammes d'états arides définies ci-dessous tiennent compte de ces faits.

Groupe de sols	Plage indicative de teneurs en eau correspondant à l'état aride
Sol fin et $I_P < 12$ ou $V_{BS} < 2,5$	3 à 7
Sol fin et $12 < I_P < 25$	4 à 8
Sol intermédiaire et $V_{BS} < 1,5$	< 3 à 4
Sol intermédiaire et $V_{BS} \geq 1,5$	< 3 à 5
Sol grossier	< 3 à 4

Tableau B.2

Classes d'état aride des sols - Hauteur de chaussée en remblai acceptable

En règle générale, les sols arides compactés à sec peuvent être utilisés dans les remblais d'une hauteur ne devant pas dépasser 3 m. Des précautions doivent alors être prises pour les protéger contre l'érosion, en particulier pendant les épisodes de pluie qui, si elles sont rares, n'en sont pas moins très intenses.

2-1.3 Particularités du compactage à sec

Le compactage type est effectué au moyen de rouleaux vibrants à surface lisse. Pour plus de précisions, se reporter aux tableaux de compactage présentés dans le guide français G.T.R.

Une stricte conformité à la méthode de compactage indiquée dans les tableaux est donc la meilleure garantie de qualité de la construction. Une surveillance permanente est essentielle.

L'attention est attirée sur le fait que les planches d'essai « conventionnelles » (compactage en une seule couche) ne sont pas suffisantes habituellement pour tirer des conclusions. Il est vivement recommandé de compacter en au moins deux couches l'une au-dessus de l'autre, pour évaluer la qualité de compactage sur 15 à 20 cm de chaque côté de l'interface ; si on utilise un pénétromètre, il convient que l'épaisseur totale soit d'environ un mètre.

Les risques de compactage insuffisant ou nul sont très difficiles à détecter visuellement pendant les travaux (la traficabilité du matériel n'est pas étroitement dépendante du compactage, l'état de la surface de la couche en cours de compactage subissant peu de changement avec le nombre de passages).

La conformité avec le schéma de compactage nécessite la vigilance de l'opérateur du compacteur.

Le matériel « standard » de mesure de masse volumique à partir de la surface (densimètre gamma, densimètre à membrane ou méthode du sable) ne fournit aucune information sur le compactage, car le dessus de la couche n'est pas (ou très légèrement) compacté. Il est compacté seulement lorsque la couche suivante est placée.

L'essai de chargement à la plaque (EV2/EV1) ou tout autre moyen de déterminer le module de déformation par l'application d'une charge sur le dessus de la couche ne donnera aucun résultat probant, sauf si l'essai est effectué au-dessus d'un matériau classique (par exemple, un matériau granulaire compacté).

La vérification post facto de la qualité du compactage peut être effectuée au moyen d'un pénétromètre dynamique qui a été étalonné sur une surface contrôlée.

La pluie étant très rare dans ces régions, la durée d'immersion pour les essais CBR en vue de la Conception peut être abaissée de 4 jours (durée normale) à 2 jours.

2-2 Remblais avec des matériaux très secs

Référence : « Guide technique Sétra »

Domaine concerné

L'emploi de sols à l'état très « sec » (ts) envisagé par le GTR, implique des dispositions particulières. En ce sens, tous les remblais routiers sont susceptibles d'être concernés par ce problème.

Documents de référence

- Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) [10] ;
- Compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de chaussées [57].

Problématique

La réalisation de remblais avec des matériaux très secs engendre :

- pour les matériaux sensibles à l'eau, une difficulté du compactage de ces matériaux. Ce qui entraîne un indice des vides important donc une grande perméabilité. Les écoulements d'eau provoquent des pertes de cohésion brutales aux ponts de contacts

inter- granulaires, donc des tassements à long terme avec des fissures et des désordres dans le remblai ;

- des problèmes de traficabilité pour certains matériaux sableux « propres » (notamment s'ils sont homométriques).

Le GTR limite l'utilisation de matériaux dans un état très sec, uniquement aux remblais n'excédant pas 10 mètres.

Les matériaux concernés

Au sens du GTR les matériaux sensibles à l'eau à l'état hydrique « très sec » (ts) : A, B2, B4, B5, B6 + Ci(A et B).

Les matériaux sableux « propres » à faible teneur en eau : D1, D2, B1, B3.

Solution à envisager

Concernant les matériaux sensibles à l'eau, il est prévu par le GTR la possibilité d'utiliser certains matériaux à l'état « très sec »

- dans certains cas après une humidification dans la masse pour les matériaux B2, B4, C1(B2, B4), C2(B2, B4).
- après une étude spécifique d'humidification (planche expérimentale...), s'il s'agit des matériaux : A1, B5, B6, C1A1, C1B5 et C2(A1, B5).

A l'exclusion des matériaux très argileux qui nécessiteront des études très poussées en laboratoire et des planches d'essai, les conditions de mise en œuvre seront à étudier en regardant les solutions suivantes.

Changement d'état hydrique

Cette opération est très délicate à réaliser car on est en présence de matériaux argileux avec de faibles perméabilités.

Une meilleure fragmentation du matériau (par un pulvimixeur ou un compacteur à pieds dameurs, par exemple) et plusieurs humidifications peuvent permettre de changer d'état hydrique.

Augmenter l'énergie de compactage

Une planche d'essai devra définir les modalités de compactage (épaisseur des couches, matériel mis en œuvre, nombre de passes...) afin d'atteindre la qualité q4 du GTR

Une fragmentation du matériau par différents types d'engins pourra être aussi envisagée pour les matériaux les plus argileux (fig. 24).

Pour ces matériaux très secs, il convient de faire attention au fait que la partie supérieure peut être (surtout pour les moins argileux) mal compactée, alors que la densité fond de couche est correcte.

La densité faible de cette partie supérieure pourra être reprise par le compactage de la couche supérieure. De même un arrosage superficiel au moment du compactage pourra améliorer le compactage de cette couche superficielle (fig. 25) ; L'appréciation de la qualité du compactage de ces matériaux pourra être réalisée par double sonde sur la planche d'essai ou en utilisant d'autres moyens permettant la mesure de la densité fond de couche ; La technicité

et les coûts des différentes solutions peuvent devenir très importants. Le calcul économique sera prépondérant pour le choix des solutions de réemploi ou la mise en dépôt de ces matériaux.

Pour résoudre les problèmes de traficabilité des matériaux sableux « propres » à faible teneur en eau, on peut :

- arroser les matériaux, voire réaliser un compactage hydraulique (si les quantités d'eau disponibles sont suffisamment importantes) ;
- incorporer des correcteurs granulométriques dans la masse ou seulement en surface

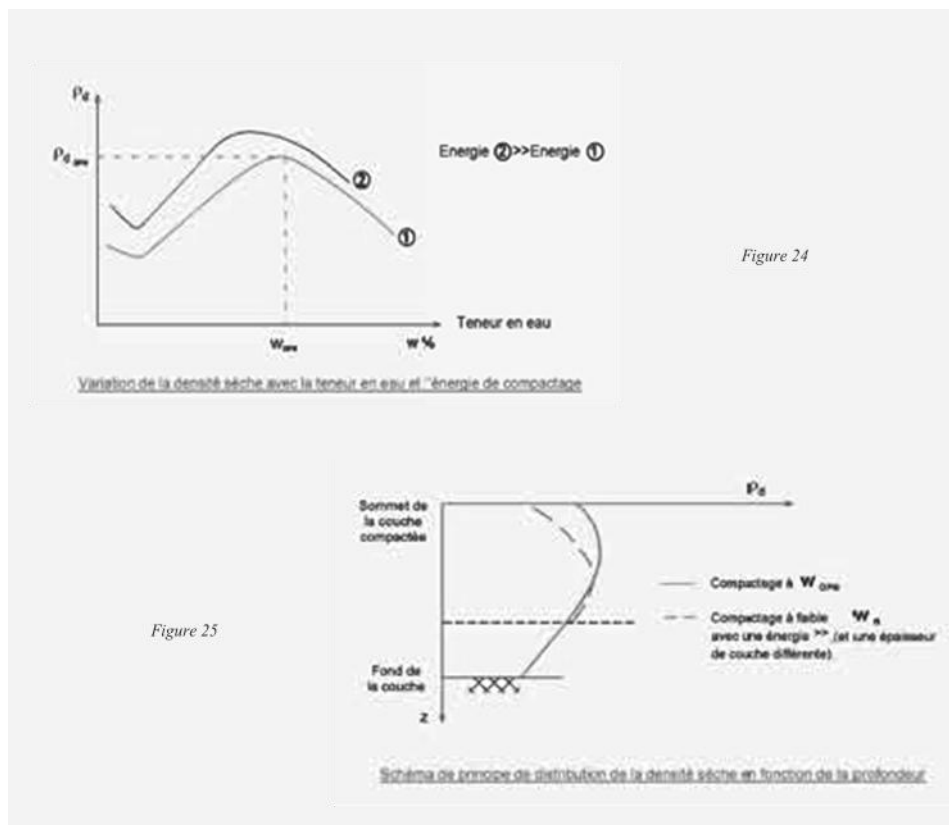


Illustration - Figures 24 et 25

3- Compactage à sec – Retours d'expériences

3-1 Compactage à sec - Expérience Marocaine

Référence : COMPACTAGE A SEC / EXPERIENCE MAROCAINE, Dr. EJJAAOUANI Houssine, Expert Géotechnicien, DERRADJI Abdelkrim, Chef de Division Prescription

Résumé

L'objectif du compactage est de densifier les matériaux et éviter des déformations ultérieures de celui-ci en cas de charge ou de venue d'eau. Pour arriver à cet objectif on est obligé d'humidifier le matériau pour faciliter le compactage en réduisant sa résistance à la succion.

Malheureusement la disponibilité de l'eau est rare dans certaines régions du Maroc et en particulier au Sud. Le matériau se présente déjà à l'état très sec et il serait difficile de le malaxer pour le ramener à l'état « S » ou « m ». De ce fait et dans le cadre de l'autoroute Skhour

Rhamna/Marrkach, des expérimentations en vraie grandeur ont été réalisés avec différents matériaux pour étudier la possibilité de les réutiliser à l'état « tS ».

Cette expérience a été concluante et a permis l'édification des remblais jusqu'à 12m pour des remblais d'accès aux passages supérieurs. On présente ci-dessous cette expérience et les perspectives de développement.

Introduction

L'objectif du compactage d'un remblai est d'éviter la déformation de celui-ci en cas de changement hydrique et sous son propre poids. Le compactage sous une énergie donnée est équivalent à une consolidation du sol sous une contrainte donnée.

Dans le graphique ci-dessous, on donne les courbes Proctor non pas dans les repères (γ_g , w) mais dans le repère (γ_d , succion). Les courbes C1 et C2 montrent le maximum pour une succion nulle ce qui est logique.

En effet, lorsque le matériau est porté à une teneur c'est qu'il admet une succion ; qui correspond à une résistance du sol. Celle-ci est d'autant plus forte que la teneur en eau est faible. L'énergie de compactage sert en partie à convaincre cette succion et l'autre à compacter le sol. Plus la succion est faible plus une grande partie de l'énergie sert à compacter et donc à augmenter la densité.

Pour les courbes C1 et C2, les maxima M1 et M2 sont placés sur l'axe de succion nulle, ce qui est logique par rapport aux phénomènes physiques liés au compactage : la teneur en eau qui correspond à l'annulation de la succion au moment du compactage conduit à une compacité maximale. Nous verrons plus loin, que cette hypothèse permet d'expliquer plus logiquement le chemin (h, i, j).

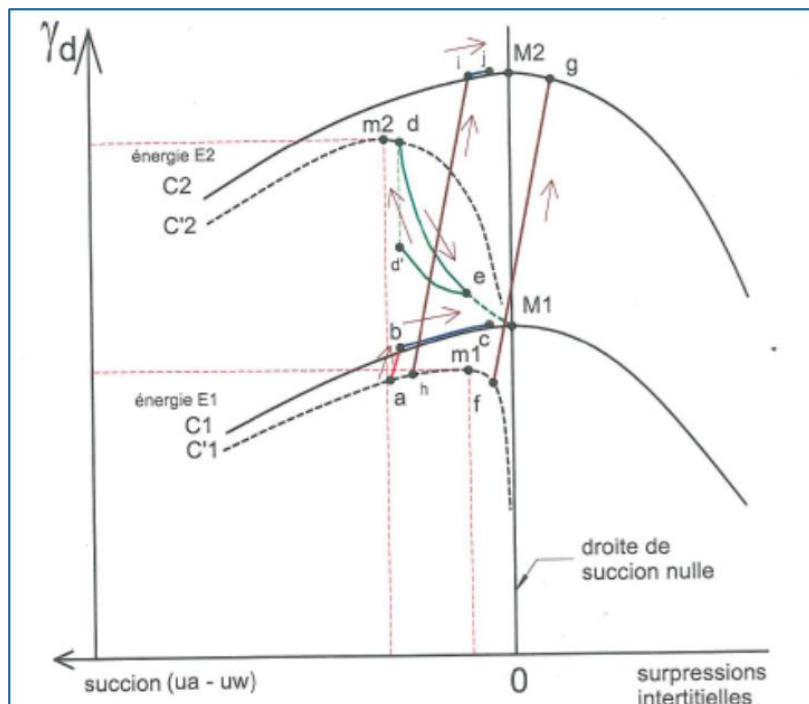


Illustration - Effet de compactage et des variations de succion sur un sol compacté-
modélisation

Ce graphique montre les différentes déformations possibles en cas de changement de teneur en eau ou en cas de charge plus au moins importantes à celle de consolidation.

De là, il ressort deux questions importantes :

- Quelle énergie de compactage doit-t-on adopter ?
- Quel type de matériau et que la teneur en eau correspondante doit-t-on choisir ?

Compactage à sec

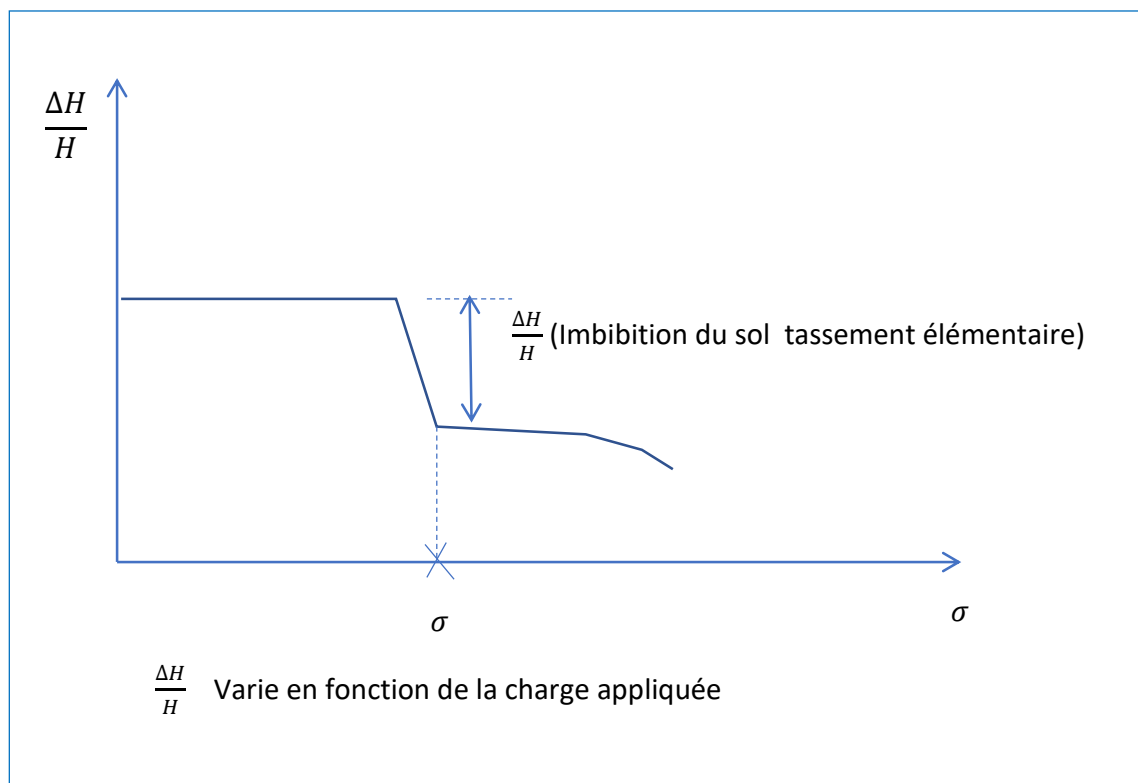
Pour répondre aux questions posées ci-dessus, il faut passer des essais expérimentaux soit au laboratoire soit in-situ.

Dans ce qui suit on se base sur nos expériences de compactage à sec pour l'autoroute Skhour Rhamna/Marrakech et quelques chantiers réalisés au sud du Maroc pour apporter des réponses.

Pour l'autoroute, on s'est basé surtout sur des essais de chargements à la plaque avec mise en eau retardée.

Les épaisseurs de couches étaient variables selon le matériau qu'on obtient après compactage, mais on a limité cette épaisseur à 40cm. En fonction des essais de mise en eau retardée, on a déterminé le tassement probable suite à une inondation du remblai et pour des hauteurs différentes.

En fonction du tassement admissible on a limité les hauteurs à ne pas dépasser pour chaque type de matériau.



Ainsi, le premier matériau à éviter du compactage à sec est le tuf (R2). Ce matériau se présente l'état naturel sous forme de mottes de faible densité de 1,3 à 1,5 mais très cimenté (CaCO_3).

Mais après plusieurs passages d'engins de compactage cette cimentation est tellement importante qu'on n'arrive pas à détruire les parts des cimentations.

Mais cette cimentation se détruit rapidement en présence d'eau et sous de faibles charges. Une humidification à l'état « m » est nécessaire pour les tufs. Ils admettent de très bonnes caractéristiques et sont non érodables puisqu'il y a une cimentation avec le temps qui passe.

Pour les schistes R6 (R61-R62), on obtient, en général, après mise en œuvre un C1-B5 avec moins de 30% d'inférieurs à 2mm. Ces matériaux charpentés ont donc le comportement d'un sol squeleteux. En cas d'imbibition, il n'y a pas de déformation sensible car les matériaux fins ($\leq 2\text{mm}$) sont éparpillés dans la masse et ne contrôlent pas le comportement du matériau. Celui-ci est contrôlé par les supérieurs à 2mm (graves).

Pour les micaschistes (R63), matériaux très faibles, il se transforme en matériau fin (A1 ou B1), les planches d'essais ont donné quelques déformations sensibles et de ce fait, le compactage à sec de ce matériau a été limité à 5m.

Pour les colluvions (grave limoneuse), on a obtenu dans les planches d'essais de bons résultats sur les déformations, mais par précaution on a limité le compactage à sec à 7m pour l'autoroute, par contre pour les remblais des passages supérieurs, on est allé à 12m.

Actuellement, après plusieurs années de services, on n'a remarqué aucune dégradation. C'est dans ce sens qu'on est certain de travailler au sein d'une recherche pour autoriser le compactage à sec pour réutilisation de ces matériaux jusqu'à 12m (remblai courant).

Il faut tout de même noter que la PST a été réalisée à l'état « m » pour tout matériau.

Il faut ainsi noter que des dispositions constructives ont été prises, en particulier suppression du TPC (Terre-Plein Central) qui est source d'infiltration des eaux et imperméabilisation des BAU (Bande d'Arrêt d'Urgence).

Conclusions et perspectives de développement

Il faut noter qu'actuellement et avec les connaissances mieux maîtrisées du comportement des sols non saturés, on peut très bien modéliser le compactage et le traduire en pression de consolidation équivalente.

Ceci-permettra de multiplier les essais au laboratoire sur échantillons reconstitués. Par ailleurs et selon la hauteur du remblai, on n'a pas besoin d'atteindre un compactage à 95% au Proctor. On pourrait se contenter de moins sans qu'il y ait de déformations.

Les résultats des planches d'essais obtenus sur l'autoroute Skhour Rhamne/Marrakech sont encourageants et permettent d'aller, avec des matériaux courants non évolutifs, jusqu'à 12m avec le compactage à sec.

Actuellement, dans le cadre de perspectives de développement, on essaye de diminuer l'énergie de compactage et on analyse son influence sur les déformations en fonction de la charge appliquée.

Pour cela, on travaille sur trois types de matériaux : un matériau argileux qui contient plus de 35% de fins et dont le comportement est régi par les inférieurs à 80μ , un matériau squeleteux qui contient plus de 70% de supérieurs à 2mm et dont le comportement est régi par la fraction graveleuse et un matériau intermédiaire qui contient moins de 35% de fins et qui contient plus

de 30% d'inférieurs à 2mm. L'objectif est d'arriver à une nouvelle classification des matériaux avec de nouvelles grilles de compactage à sec sans atteindre les 95% du Proctor comme c'est le cas du GTR.

Toutes les recommandations qui seront données dans ce guide seront appuyées par des justifications théoriques et expérimentales in-situ et au laboratoire.

3-2 Compactage à sec – Etat de l'art international

Référence : Compactage à sec : Etat de l'art international et nouvelle expérience marocaine, DERRADJI Abdelkarim, KCHIKACH Azzouz, TOUBANE Btissam

Résumé

Les objectifs du compactage sont atteints que lorsqu'on obtient une densité optimale du sol. Ce qui nécessite un apport des quantités très importantes d'eau.

Le compactage à sec est une réponse à cette attente, favorisant la réutilisation des matériaux présents dans leur état hydrique sec ou très sec.

Pendant la réalisation de l'autoroute Settât Marrakech, au Maroc, l'expérience du compactage à sec été réalisée à grande échelle, testée sur des plates formes avant de passer à l'exécution, ce travail représente en une première partie un aperçu sur l'état d'art du compactage à sec et dans une seconde partie l'expérience de compactage à sec des remblais autoroutier de grandes hauteurs entre Settât et Marrakech, avec les matériaux schisteux sera exposé.

Abstract

The objectives of compaction are achieved when you get optimum soil density. This requires a supply of very large amounts of water.

Dry compaction is a response to this expectation, promoting the reuse of materials in their dry state water or very dry.

During the completion of the highway Settât Marrakech, Morocco, experience dry compaction was carried out on a large scale tested on flat forms before proceeding to execution, this work represents in a first part an overview of the art state for dry compaction and in a second part the experience of dry compaction of highway embankments between Settât and Marrakech, with schistose materials.

3-2.1 Le compactage dans les zones arides

En 1929, Proctor a défini une teneur en eau optimale et une densité maximale déterminées à partir des essais de laboratoire, les spécifications basées sur les résultats de Proctor, ont été largement utilisées surtout dans la construction routière.

Seulement, la nature n'offre pas toujours à l'ingénieur des matériaux à la bonne teneur en eau particulièrement en région désertiques et arides où l'obtention de la teneur en eau optimale nécessite un apport de quantités considérables en eau.

Cet apport est doublement injustifié : d'abord économiquement, puisqu'il nécessite des dépenses supplémentaires. Ensuite écologiquement puisque, le contexte environnemental actuel ne permet pas un usage irrationnel de l'eau.

Le compactage à sec peut représenter une réponse sérieuse dans la mesure où il favorise la réutilisation des matériaux résultant des déblais, présents dans leur état hydrique sec ou très sec.

Grâce au progrès spectaculaire dans le domaine des compacteurs, notamment les compacteurs vibrants, qui ont permis une augmentation étendue de l'énergie de compactage, il est possible pour certains matériaux d'obtenir une qualité satisfaisante en compactant à des teneurs en eau faibles ou au moins inférieures à l'optimum déterminé par l'essai Proctor. En effet, l'électronique moderne a rendu possible de faire des mesures pendant le compactage lui-même et de traiter, analyser et présenter une grande quantité de données.

3-2.2 Particularité du compactage à sec

Les courbes du compactage montrent l'existence d'une w_c [CIS 82], appelée teneur en eau critique, qui représente la teneur en eau à partir de laquelle la densité sèche croît rapidement avec la teneur en eau, jusqu'à la valeur maximale d_{opt} pour une teneur en eau w_{opt} . En effet, ce qui est illustré par la figure 1, entre une teneur en eau nulle et w_c , γ_d décroît.

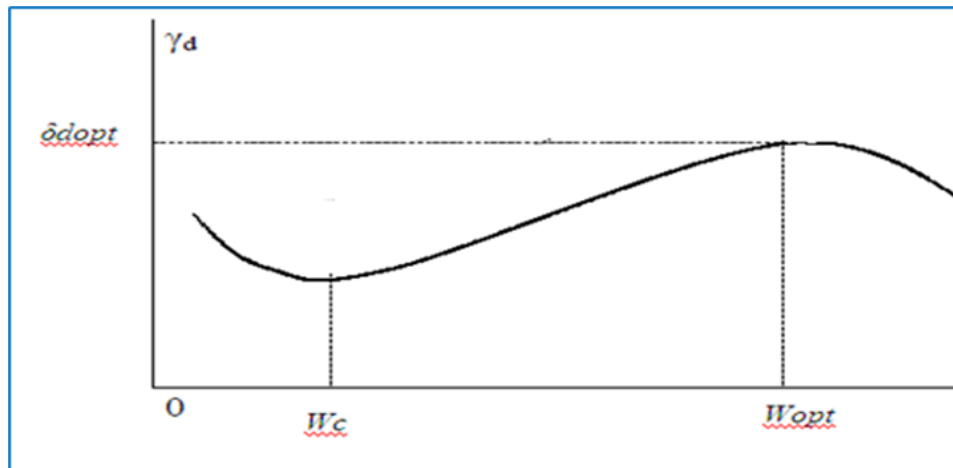


Illustration - Figure 1. Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau

Influence de l'énergie de compactage

Les résultats des dernières années montrent que w_c , et w_{opt} diminuent avec l'énergie de compactage alors que la densité sèche augmente.

Selon [MOR 87], la diminution de l'énergie critique est plus importante par augmentation de l'énergie induite par le compacteur, que par augmentation de nombre de passes.

Densité en fonction de la profondeur

A faible teneur en eau, la courbe $\gamma_d=f(z)$ fait apparaître une surface mal compactée et un gradient $\Delta\gamma_d/\Delta z$ très élevé en valeur absolue [MOR 87].

L'importance du fait varie selon les caractéristiques du matériau et sa teneur en fines.

Ségrégation verticale et traitement de la surface

Le faible compactage de la partie supérieure, au cas du compactage à teneur en eau faible peut provoquer une dégradation des conditions de traficabilité, l'ampleur de ce problème s'aperçoit surtout avec un angle de frottement et une cohésion faibles [MOR 87], alors il est

important de préférer un matériel adéquat, avec des caractéristiques de traficabilité élevées, surtout dans le cas d'un sol très sensible.

Potentiel d'effondrement des sols

L'expérimentation de [ABB 2011] consiste à comparer les valeurs de vitesses ultrasoniques en fonction des différents teneurs en eau et énergies de compactage tout en sachant que les sols en question peuvent s'effondrer quand ils sont dans un état lâche. Les résultats des essais de compressibilités et les essais ultrasonores sont comparés. Une proportionnalité souvent inverse est montrée entre la vitesse ultrasonique et le potentiel d'affaissement.

Pour une même énergie de compactage, quel que soit le sol, la vitesse ultrasonique augmente avec la teneur en eau. En plus, l'accroissement de l'énergie de compactage pour une même teneur en eau contribue à l'augmentation des vitesses et le coefficient de collapse C_p augmente avec l'indice des vides.

Gonflement – retrait, contrôle de la succion

Plusieurs études ont été réalisées sur l'influence du séchage - humidification sur le potentiel de gonflement en utilisant des appareils à succion contrôlée.

Les résultats obtenus montrent un phénomène de fatigue qui résulte des cycles de séchage - humidification, et par conséquent une baisse du potentiel de gonflement.

D'après [FER 2005], les déformations sont d'autant plus importantes que le sol avait été compacté dans un état sec, les déformations réversibles observées dans les cycles de gonflement-retrait correspondent probablement aux cycles de gonflement-retrait des agrégats, alors que la stabilisation des déformations irréversibles correspond à la disparition progressive du volume des vides inter-agrégats au fur et à mesure des cycles

3-2.3 Les expériences du compactage à sec

Argile très plastique

Pour l'étude de l'effet de l'état hydrique d'une argile très plastique [FER 2005] des essais dits d'inondation sous contrainte, consistant à compacter les échantillons directement dans une cellule œdométrique, à les soumettre à une contrainte verticale, à attendre la stabilisation sous cette contrainte puis à inonder la cellule pour saturer l'échantillon.

Pour un état hydrique initial sec, les faibles contraintes verticales, de 3 à 30 kPa, l'inondation engendre une augmentation de l'indice des vides, alors que pour les plus fortes contraintes, au-delà de 400 kPa l'inondation génère systématiquement un tassement.

Entre 30 et 400 kPa, Ferber a montré que le comportement des échantillons dépend de leur indice des vides inter-agrégats initial : les échantillons les plus compactés (faible indice des vides, inter-agrégats initial faible) gonflent alors que les échantillons les moins compactés tassent.

Argile peu plastique

Aux Etats Unis d'Amérique, à l'université de Californie [CEC 84], un sol argileux avec une limite de liquidité de 45% et une limite de plasticité de 28% est compacté par un compacteur vibrant, à différentes teneurs en eau.

Deux pics ont été relevés de la courbe, à teneur en eau proche de 7% avec γ_d égale à 16.38 kN/m³ et le deuxième pic représente le maximum Proctor ($w=19\%$ et $\gamma_d = 16.62$ kN/m³). De même en Australie, les argiles limoneuses gonflantes ont été compactées avec une hauteur de remblai de 1.2m sur 600m de long ; l'IP des matériaux variait entre 26 et 36% et le compactage a été effectué à teneur en eau naturelle qui représente moins 20% de la teneur en eau optimale Proctor, les densités obtenues allant de 94 à 105 %.

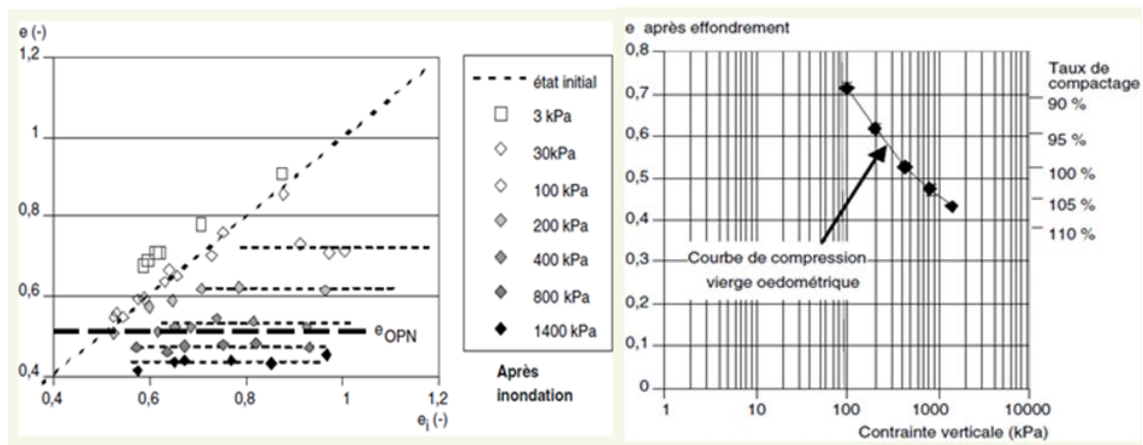
Ceci montre qu'il est possible d'avoir des densités sèches élevées même à faible teneur en eau, mais un point d'interrogation est toujours mis, concernant la capacité portante de ce sol et son comportement à l'inondation au cas d'un compactage à faible teneur en eau.

Limon

Des essais de compactage effectués [CEC 84] sur un sol dont le pourcentage de limon est approximativement 55%, la courbe de compactage fait apparaître deux pics, le premier à w proche de 0 avec une densité sèche de 16.38 kN/m³, le second pic représente le maximum Proctor ($w=13.5\%$ et $\gamma_d = 17.97$ kN/m³).

Ferber [FER 2005] a effectué des essais d'inondation sous contrainte en cellules œdométriques sur un limon moyennement plastique A4. D'après la figure, plus les sols sont compactés et plus la contrainte doit être élevée pour que l'inondation conduise à un tassement.

Ainsi, le limon présente un comportement finalement assez simple en cas d'inondation où, en résumé, les échantillons « bien » compactés ne subissent qu'une déformation négligeable alors que les échantillons « mal » compactés tassent jusqu'à une valeur qui ne dépend que de la contrainte verticale.



Illustrations : Figure 2 (à gauche). Indice des vides après inondation sur l'indice après tassement par inondation d'un limon compacté à l'état sec / Figure 3 (à droite). Influence de la contrainte verticale sous différentes contraintes verticales d'échantillons peu compactés

Graves

Au MAROC [MIN 85], des graves limoneuses ou sablo limoneuses type B4 dont l'IP est inférieur à 10% ont été compactées à une teneur en eau voisine de zéro, soit un état très sec selon le GTR (ministère de l'équipement marocain), il en résulte que le taux de compactage varie de 90 à 95 %.

Au Niger Cissé Amadou [CIS 82] a mené un projet de compactage à sec des graves de classe B5 et B6, D'après les courbes de compactage il existe une tendance d'augmentation des densités sèches pour les faibles teneurs en eau entre 0 et 1 %.

En doublant l'énergie de compactage pour $w=1$ %, un taux de compactage de 99 % est atteint

Matériaux sableux

Au Kenya [O'CO 87] des essais sont effectués sur des sable silteux de classe B5, la teneur en eau varie de l'état sec (1 à 2%) à l'état saturé (11%).

Les résultats montrent que les plus fortes densités ont été réalisées pour la section compactée à teneur en eau proche de 2% avec des valeurs moyennes de 100 pour cent.

La portance augmente avec le nombre de passe, mais d'une façon moins importante à de faibles teneurs en eau.

Pour un sable B1 [CIS 82], la courbe de compactage obtenue est très plate, ce qui est la caractéristique habituelle des sables, l'optimum classique se situe aux environs de 9,5 % d'eau avec l'existence d'une zone de faible variation de densité pour les teneurs en eau comprises entre 3 et 11%.

Et en même temps, au voisinage de la teneur eau nulle, il y a une remontée spectaculaire des densités qui tendent vers γ_{dopm} .

Les essais de laboratoire et les planches d'essais ont montré que, même dans les cas de teneurs en eau les plus défavorables, il était possible de mettre en œuvre les sables sans humidification, et que le niveau de densité était toujours supérieur au minimum exigé pour le corps de remblai.

Les études effectuées en Australie et aux Etats Unis [CEC 84] ont montré que les sables argileux de classe B2 faisant apparaître deux pics dans la courbe de compactage Proctor et peuvent être compactés à faible teneur en eau en utilisant des compacteurs vibrants lourds ; mais la surface doit être humidifiée pour faciliter la traficabilité et compactée par des engins pneumatiques ou des compacteurs à roue lisse.

3-2.4 Compactage à sec des remblais de grande hauteur : expérience du Maroc

L'opportunité de tester le compactage à sec s'est présentée lors des projets autoroutiers Settati- Marrakech et Marrakech Agadir.

Pendant la réalisation de ces deux chantiers, la Société Marocaine des Autoroutes du Maroc (ADM) a été confrontée à des matériaux présents sur le site à l'état sec voir très sec, notamment au-delà de Skhour Rhamna.

Conventionnellement, le réemploi de ces matériaux en l'état est exclu. Par ailleurs, le changement de l'état hydrique par humidification n'était pas envisageable, eu égard à l'aridité du site et aux ressources en eau qu'ADM a souhaité préserver au maximum.

Le souci majeur été de préserver l'environnement, donc ADM a opté pour la réutilisation maximale de ces matériaux afin de maintenir un équilibre du mouvement des terres (déblais-remblais), évitant ainsi la multiplication des dépôts et des emprunts. Et surtout préserver les ressources en eau.

Pour ce faire, ADM a entrepris une réflexion en amont, et a engagé des études préliminaires qui ont abouti à l'optimisation de la réutilisation et à l'emploi de ces matériaux dans leur état sec voir très sec.

Le tracé de l'autoroute Skhour Rhamna – Marrakech, impose 4 millions de m³ d'emprunt locaux dans un état hydrique sec et une fraction de fines très importante. Dans ces conditions le GTR exige l'humidification ou l'apport de matériaux squelettiques.

Un apport de matériaux détériorera l'aspect naturel de la région, alors que le transport de 1.5 million de m³ pour l'humidification est économiquement injustifié. Afin de déterminer les besoins en terrassement et aussi identifier les matériaux rencontrés une campagne géotechnique par carottage a été menée ; les matériaux rencontrés sont représentés sur ce profil géotechnique :

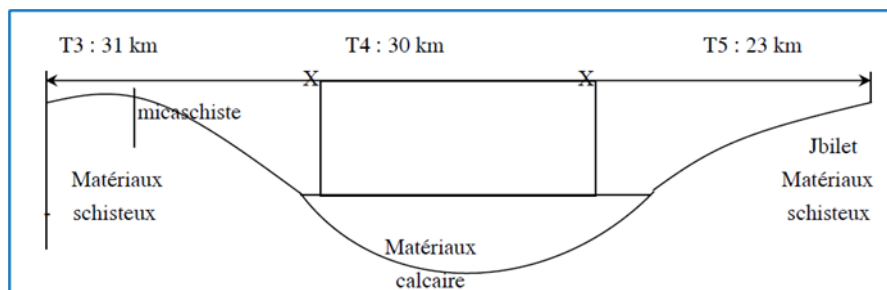


Illustration - Figure 4. Profils géotechniques de l'autoroute Skhour Rhamna-Marrakech

Planches d'essais

Comme prestations préparatives à la réalisation des planches d'essais, un échantillon doit être prélevé au niveau du stock préparé et soumis aux essais d'identification suivants :

- teneur en eau ,
- analyse granulométrique,
- détermination de la VBS,
- essai Proctor normal,
- Limites d'Atterberg : limite de liquidité et limite de plasticité

Les planches consistent à la réalisation de trois couches successives, d'épaisseur voisine de 40 cm, et ce pour atteindre une hauteur globale de l'ordre de 1,20 m. la largeur est en moyenne de 10m et la longueur est en moyenne de 60m. Chaque planche est compactée par 6, 8 e 10 passes du compacteur.

Les prestations réalisées pendant et après la réalisation de la planche peuvent être énumérées :

- Essais de densité in situ ave densitomètre à la membrane au niveau de l'assise
- Essai de portance au niveau de l'assise de la planche
- Prélèvement d'un échantillon pour identification (AG, VBS, IP) avant l'étalage de chaque couche
- Prélèvement d'un échantillon pour identification (AG, VBS, IP) après étalage et réglage de chaque couche
- Prélèvement d'un échantillon pour identification (AG, VBS, IP) après compactage de chaque couche (pour chaque énergie de compactage)

- Exécution des essais de portance pour chaque énergie de compactage et pour chaque couche
- Après réalisation des trois couches, trois sondages pour identifier le matériau, examiner les parois de ces sondages et apprécier l'état du matériau mis en œuvre.

Les portances obtenues pour les assises des planches d'essai sont considérées satisfaisantes (la plateforme est relativement plane, homogène avec une portance, mesurée avant la mise en œuvre, supérieure à 110 MPa) pour mobiliser un effet d'enclume qui favoriserait le compactage des couches supérieures.

Planche d'essai numéro 1 :

Matériaux concernés : tufs calcaires

Les essais d'identification :

- teneur en eau naturel : 10.2%
- granularité : 0/50mm
- % des fines sur la fraction 0/50mm : 39%
- VBS moyenne=0.5
- Valeur Proctor :

Densité sèche maximale=1.71t/m³, Teneur en eau optimal Proctor w_{opn}=17.6%

Ce sol est classé A1 au sens du GTR avec un état hydrique très sec

Après réalisation des trois couches le laboratoire a procédé aux essais d'identification dont les résultats sont les suivants :

- granularité : 0/31.5mm
- % des fines moyennes des trois échantillons sur la fraction 0/50 mm : 47%
- IP moyenne=17

La classe GTR des matériaux avant et après mise en œuvre est A1, les mesures de portances sont résumées sur ce tableau :

	Nombre de passes	EV2
1ère couche	8	650
	10	599
2ème couche	8	552
	10	540
3ème couche	6	558
	8	594

	10	572
--	----	-----

Tableau. 1 résultat de mesures de portances de la planche d'essais numéro 1

Il a été enregistré une perte de portance pour les trois couches en passant de 8 à 10 passes les 3 mesures de portance réalisées au niveau de la 3^{ème} couche pour l'énergie de compactage correspondante à 6 passes ont enregistré une évolution de portance entre 6 et 8 passes d'environ +6%.

L'inspection des sondages réalisés au niveau de la planche révèle que le corps de la planche ne présente pas de vide ni de non-conformités de compactage. L'état des talus révèle un caractère érodable du matériau qu'il faut corriger à la mise en œuvre.

Planche d'essai numéro 3 et 4 :

Matériaux : tufs calcaires

Caractéristique des matériaux

Identification des matériaux de la Planche 3 :

- Classe GTR : B5
- Dmax : 20 à 50
- IP : 14 à 20
- VBS(g) : 0.5 à 0.9
- γ_{dopn} : 12.4 à 17.2
- Etat hydrique : Sec à très sec

Identifications des matériaux de la Planche 4 :

- Classe GTR : C1B5
- Dmax : ≥ 50
- IP : 19 à 38
- VBS(g) : 0.4 à 1.3
- γ_{dopn} : 12.4 à 17.2
- Etat hydrique : Sec à très sec

Résultats de l'ouverture tranchée Planche 3 :

Les résultats de l'ouverture des tranchées au niveau de 4 sondages sont résumés au tableau suivant :

- Granularité : 0/100mm,
- le %des fines moyenne des trois échantillons sur la fraction 0/50mm : 21.8%,
- le VBS varie entre 0.5 et 0.8 avec une moyenne de 0.63,
- IP moyenne =31,
- la classe GTR est C1B5

Les résultats des essais de portances sont résumés sur le tableau suivant :

		Nombre de passes	EV2
1ère couche	Après compactage	6	436
		8	477
2ème couche	Après compactage	6	571
		8	531
3ème couches	Après compactage	6	446
		8	446
		10	435

Tableau 2. Résultats des essais de portance des matériaux de la planche 3

Il a été enregistré en général une faible évolution de portance de l'ordre +9.4% en première couche, de -7% en 2ème couche et de +4.2 en 3ème couche en passant de 6 à 8 passes.

Au niveau de la 3ème couche nous avons enregistré une chute de -2.47% en passant de 8 à 10 passes.

Résultats de l'ouverture des tranchées de la Planche 4 :

Les résultats de l'ouverture des tranchées au niveau de 4 sondages sont résumés au tableau suivant :

- Granularité : 0/100mm et le % des fines moyenne des trois échantillons sur la fraction 0/50mm : 21.1%
- VBS varie entre 0.4 et 0.8 avec une moyenne de 0.65 e le IP moyenne =28
- la classe GTR est C1B5

Il n'y a pas de production de fine notable après réglage et compactage. Aucune évolution sur la fraction 0/50, Le VBS reste toujours en moyenne aux environ 0.7 avant et après compactage, La classe GTR avant été près compactage est C1B5

		Nombre de passes	EV1	EV2	K
1ère couche	Après compactage	6	413	614	1.71
		8	320	664	2.10
2ème couche	Après compactage	6	240	769	3.26
		8	219	750	3.47
3ème couche		6	211	535	2.63

	Après compactage	8	194	500	2.65
		10	194	494	2.68

Tableau3. Résultats de mesure de portances de la planche 4

Il a été enregistré en général une faible évolution de portance de l'ordre de +8.14%(en 1ère couche), de -2.49% (en 2ème couche) et de -6.54% en 3ème couche en passant de 6 à 8 passes.

Au niveau de la 3ème couche il a été enregistré une chute de -1.20% en augmentant l'énergie de compactage de 8 à 10 passes.

L'inspection des tranchées réalisés au niveau des deux planches révèle que le corps des planches ne présente pas de vides ni de non-conformité de compactage

Planche d'essais 07 : calcaire marneux

Identification des matériaux

Dmax(mm) ≥ 100mm

- IP -
- VBS(g) de 0.3 à 0.5
- γdOPN 1.40 à 1.49 t/m³
- WOPN% de 26.4% à 30.8%
- Etat hydrique Très sec

Le matériau est classé C1B5. Concernant le contrôle de portance à différentes énergies de compactage, les résultats récapitulés :

		Nombre de passes	Portance (valeur moyenne)		
			EV1	EV2	K
1ère couche	Après compactage	6	208	529	2.56
		8	224	511	2.33
		10	224	563	2.51
2ème couche	Après compactage	6	209	568	2.73
		8	205	554	2.71
		10	240	588	2.46
3ème couche	Après compactage	6	211	529	2.53
		8	207	545	2.65
		10	233	522	2.30

Tableau 4. Résultats de mesures de portance de la planche d'essai numéro 7

1ère couche et 2ème couche : il a été enregistré une chute de portance variant de -3.43 à -2.32% en passant de 6 à 8 passes et une augmentation qui a atteint 10.18% en passant de 8 à 10 passes.

3ème couche : il a été enregistré une évolution de portance de l'ordre de 2.87 % en passant de 6 à 8 passes, et une chute de l'ordre de -4.2% en passant de 8 à 10 passes.

L'inspection des tranchées réalisées au niveau de la planche d'essai, relève que le corps de la tranchée ne présente pas de vides ni de non-conformité de compactage. Il n'y a pas de production de fines notables après réglage et compactage,

Aucune évolution notable n'a été enregistré sur le pourcentage de la fraction 0/50 après étalage, par contre elle a évolué en moyenne après compactage de 25%.

La VBS varie entre 0.20 et 0.50, en générale l'argilosité du matériau est irrégulière et ne dépend pas des modalités de mise en œuvre, cette irrégularité est due à l'hétérogénéité de la formation calcaire elle-même. Une dispersion qui est tout à fait normale. La classe GTR après compactage est de C1B5 avec un état de mise en œuvre très sec (0/200 à 0/250).

Planche d'essai 8 : matériaux schiste altéré

Caractéristiques des matériaux

Classe GTR du matériau : C1B5

- Dmax(mm) : De 100 à 200
- IP : -
- VBS(g) : De 0.2 à 0.63
- γ_{dOPN} : 1.84 à 1.98 t/m³
- $W_{OPN}\%$: de 12 à 14
- Etat hydrique : Très sec

Concernant le contrôle de portance à différentes énergies de compactage, les résultats récapitulés :

		Nombre de passes	EV2
1ère couche	Après compactage	6	527
		8	537
2ème couche	Après compactage	6	651
		8	627
3ème couche	Après compactage	6	612
		8	619

		10	674
--	--	----	-----

Tableau 5. Résultats des essais de portance de la planche 8

1ère couche : il a été enregistré une évolution de portance de l'ordre de 1.90% en passant de 6 à 8 passes

2ème couche : il a été enregistré une chute de portance de l'ordre de -3.61% en passant de 6 à 8 passes

3ème couche : il a été enregistré une évolution de portance de l'ordre de 1.06% en passant de 6 à 8 passes, et de 8.98% en passant de 8 à 10 passes.

L'inspection des tranchées réalisées au niveau de la planche d'essai, relève que le corps de la tranchée ne présente pas de vides ni de non-conformité de compactage. Il n'y a pas de production de fines notables après réglage et compactage, en moyenne la fraction 0/80µm reste comprise entre 11 et 13% sur 0/D et entre 16 et 19% sur 0/50mm.

Le matériau fragmentable de nature, subit une évolution proportionnelle de telle sorte qu'il reste toujours charpenté avec une réduction du dmax. L'évolution intéresse effectivement la fraction 5/D avec une variation de la fraction 0/50mm de 62 à 74% en moyenne. la fraction 0/2 mm reste comprise entre 24 et 27% en moyenne.

L'argilosité du matériau reste relativement régulière, (VBS entre 0.4 et 0.6 en moyenne) e peut diminuer avec le degré d'altération en profondeur.

La classe GTR après compactage est de C1B5 avec un état de mise en œuvre très sec.

Planche d'essai 12 : des matériaux schisteux

Caractéristiques des matériaux objet de la planche

Granulométrie sur 0/D	8 à 14% pour la fraction 0/80 µm
	19 à 30% pour la fraction 0/2 mm
	57 à 81% pour la fraction 0/50 mm
Classe GTR	C1B5(SCHISTE)
Dmax	250mm
VBS(g)	0.2 à 1.4
γdopn(moyenne)	1.82 à 1.98
W _{opn} %(moyenne)	9.2 à 14%
Etat hydrique	Sec à très ses

Caractéristiques avant mise en œuvre des matériaux en question (des schistes grisâtres avec parfois des traces d'oxydation rougeâtre) de classe C1B5.

Le comportement de la matrice est gouverné par la fraction 0/50 mm, le comportement de ces matériaux est régi par celui de la fraction 0/50mm qui dépasse en général 60%.

Les caractéristiques après mise en œuvre de ces matériaux, toutes énergies de compactage confondu, ces matériaux sont caractérisés par une VBS variant de 0.18 à 0.21, un IP de 10 à 10%, un Dmax de 120 à 200mm. et enfin une granulométrie (sur 0/D) caractérisée par une fraction 0/80µm variant de 9 à 13%, une fraction 0/2mm variant de 24 à 33% et une fraction 0/50 mm variant de 80 à 83mm.

Ces résultats peuvent montrer que ce matériau est très faiblement évolutif et non érodable d'ailleurs le risque d'érodabilité est éliminé par les matériaux d'engagement prévu charpenté.

La vérification de l'obtention de la densification q4 a été faite pour les trois énergies de compactage expérimentées, 6,8 et 10 passes.

Les résultats de mesure de densité in situ, effectuées en surface et en profondeur sont rappelés par le tableau suivant. Les indices de compacité relevés par ce tableau laissent constater que la densification q4 a été atteinte pour les trois énergies de compactage.

Situation	Lecture			Densité de référence corrigée(t/m ³)	IC
	Densité humide(t/m ³)	Teneur en eau (%)	Densité sèche (t/m ³)		
En surface 6 passes	2.187	2.7	2.13	2.11	100.92
	2.165	4.0	2.082	2.11	98.66
	2.198	4.4	2.105	2.11	99.78
	2.162	4.2	2.075	2.11	98.33
	2.191	3.1	2.125	2.11	100.72
En profondeur 6 passes	2.279	2.4	2.226	2.11	105.48
	2.259	3.9	2.176	2.11	103.04
	2.265	3.5	2.188	2.11	103.72
En surface 8 passes	2.263	4.1	2.174	2.10	103.52
	2.222	3.1	2.156	2.10	102.63
	2.259	3.4	2.185	2.10	104.03
	2.257	4.2	2.166	2.10	103.14
	2.216	3.8	2.135	2.10	101.66
En profondeur 8 passes	2.110	4.7	2.014	2.10	95.97
	2.146	4.9	2.045	2.10	97.42
	2.213	4.8	2.112	2.10	100.55
	2.215	4.2	2.127	2.08	102.2

En surface 10 passes	2.233	3.6	2.155	2.08	103.63
	2.220	4.8	2.118	2.08	101.84
	2.204	3.7	2.125	2.08	102.18
	2.220	3.5	2.145	2.08	103.12
En profondeur 10 passes	2.159	3.3	2.089	2.08	100.48
	2.195	1.7	2.160	2.08	103.76
	2.100	3.3	2.030	2.08	97.74

Tableau 5. Récapitulatif de la mesure de la densité in situ –PE12

3-2.5 Résultats des investigations supplémentaires

Des investigations supplémentaires ont été réalisées sur les matériaux fins des déblais, les plus sensibles à l'eau : ce sont des essais de chargement in-situ qui consistaient à appliquer une contrainte connue sur le remblai à l'aide d'une plaque (Ø75 cm), puis à saturer et déduire les désordres résultants. Les résultats sont résumés ci-dessous :

Les remblais en schistes indurés dont le pourcentage des passants à 2mm est inférieur à 30% et $D_{max} < 250\text{mm}$, réalisé jusqu'à 7m de hauteur, les déformations résultantes sont très faibles et les remblais réalisés ne présentent aucun problème

Les remblais en micaschistes dont le pourcentage des passants à 2mm est environ 50% et les Matériaux fins et colluvions limoneux dont le pourcentage des passants à 2mm est plus de 30%, les gonflements apparaissent à partir de 3m au niveau de la partie supérieure des remblais et des talus, vu la faible plasticité donc risque d'érosion des talus

Les matériaux tufeux dénoncent des tassements à faibles hauteurs.

Recommandation des experts

Pour les matériaux schisteux, aucune mesure disposition particulière ne doit être prise. Par contre pour les parties contenant des pourcentages des fines importantes, il faut avoir recours aux matériaux présentant un squelette suffisant formant une ossature au corps du remblai afin de limiter l'influence des fines.

Le corps du remblai dits charpentés doivent comporter des matériaux de comportement granulaire et disposés de la façon suivante : Granulométrie étalée et continue sur le 0/D, $D_{max} \leq 250\text{mm}$ pour les remblais et $D_{max} \leq 150\text{mm}$ pour la PST et la limitation de la fraction des fines à un maximum de 30%

Sur les parties composées de micaschistes, de limons calcaires et colluvions, les arases des déblais micaschisteux seront systématiquement purgées par des matériaux charpentés, des matériaux charpentés sur toute la hauteur ou des matériaux non charpentés issus des déblais de l'emprise, sur les 3m supérieurs, encagés de part et d'autre du remblai par des matériaux charpentés sur une largeur de 3m, le reste du remblai étant réalisé avec des matériaux

charpentés. Il faut aussi s'assurer du caractère non érodable des matériaux de rives, ce qui veut dire un IP >10% et le pourcentage des passants à 2mm inférieur à 40%

En plus de ces recommandations, un complément de dispositions constructives a été retenu, et qui consiste à la modification des pentes des talus à 1V/2H au lieu de 2V/3H et à réutiliser les matériaux fins mais non érodables en remblai sur des hauteurs limitées à 3m, sans encagement par des matériaux charpentés

Résultats des essais spécifiques après mise en remblais :

Des essais spéciaux ont été réalisés sur les matériaux compactés à sec, après montée des remblais, afin de cerner au mieux leur comportement en cas de venue d'eau. Ces essais sont de deux types : et des essais de chargement à la plaque avec saturation.

Essais de charge à la plaque sous saturation :

Ces essais ont consisté à creuser des puits en différents endroits d'un remblai monté et à réaliser des essais de chargement à la plaque avec mise en eau retardée, laquelle n'intervient qu'après stabilisation des déformations sous la charge appliquée. Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau 1 :

Matériaux/charge (kPa)	$\Delta H/H$ en %		
	106	212	318
Micaschiste	0.4	1.13	0.5
Grave calcaire	0.55	0.77	1.2

Tableau 1 : Résultats des essais de charge sur les remblais du projet autoroute Marrakech-Skhour Rhamna

Des déformations apparaissent sous les charges appliquées variant de 50 kPa à 350 kPa (soit l'équivalent d'un remblai de 17m de hauteur), mais restent globalement largement admissibles. Le LPEE conclut qu'avec les remblais édifiés compactés à sec, et même avec des hauteurs allant jusqu'à 15m, le risque d'imbibition ou de saturation partielle du remblai ne donnerait pas de déformations notables.

3-2.6 Conclusions

D'après les expériences du compactage à sec, il s'avère qu'il représente une solution qui s'adapte un contexte écologique actuel. Il ne permet pas uniquement de faire une économie d'eau mais aussi d'optimiser toute la gestion qui accompagne son approvisionnement, forage, le pompage, le transport, l'épandage, le malaxage, en plus d'une difficile organisation de chantier surtout quand il faut éviter l'évaporation de l'eau entre l'incorporation et la fin du pompage.

Le cas de l'argile très plastique est beaucoup plus complexe que celui d'un matériau non plastique, dans la mesure où l'état final dépend très fortement de l'état initial. Vu l'hétérogénéité naturelle de ce paramètre, la définition des taux de compactage nécessiterait une détermination fine et en continu de l'état hydrique des matériaux lors de la construction et une adaptation de l'énergie de compactage à appliquer.

L'expérience montre aussi que les fractions sableuse et graveleuse favorisent le compactage à faible teneur en eau, à l'état sec et même très sec, à noter aussi que la présence des gros éléments conduit à une difficulté de réglage.

Ceci a été expérimenté avec succès au chantier Benguerir-Marrakech, les densités obtenues sont très satisfaisantes et encouragent de développer des recherches dans ce sens.

L'utilisation des matériaux charpentés compactés à sec a permis de mettre en œuvre des remblais de 7m de hauteur sans recourir à une humidification.

Une expertise effectuée en juillet 2006 après la montée des remblais du projet afin d'évaluer l'influence d'éventuelles intempéries sur ces remblais avait conclu que les risques de déformation des remblais par imbibitions différées sont faibles et que les dispositions prises pour l'édification des remblais permettent de s'en affranchir.

3-2.6 Bibliographie

[CEC 84] Cecil, R.1984.A laboratory investigation of vibratory. Thesis of Texas A&M university.pp.83-92.Virginia.

[CIS 82] Cissé, A.1982.Compactage à sec des remblais et assises de chaussées. Rapport de recherche LCPC, numéro112, Paris, pp.8-17

[ELL 80] Ellis,C. 1980.Soil compaction at low moisture content field trials in Sudan. Seventh regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering. PA1101/80. Ghana

[GRA78] Grace H., Cocksedge J.E. 1978. Recent investigations into the dry compaction of sand. IRF Regional Conference for Middle East and North Africa, 9-15 April, Cairo, Egypt.

[MAN 2006] Manier E .2006. Compactage à sec de sols fins à l'état très sec sur les chantiers autoroutiers de la région Marrakech. Rapport du LCPC., Nantes, pp.4-22.

[MIN 85] Ministry of Equipment and Transport MOROCCO, 1985.Routes en milieu désertique l'expérience marocaine. Journal du Ministère des Travaux Publics, pp.100-109

[MOR 2002] Morel G., Havard H. & Quibel A. 2002. Emploi de sols arides pour la constitution de remblais routiers. Séminaire AIPCR de Oulan-Baatar Mongolie, Sujet 3-18-21

[MOR 87] Morel G., Quibel A., Froumentin M. 1987. Le savoir-faire français en matière de compactage à faible teneur en eau des sols et matériaux de terrassement et de chaussées. Fascicule du LCPC numéro 502898, Nantes, pp.5-8

[MTA 79] Mtango H. 1979. An investigation into the dry compaction of lateritic sandy gravel. Norwegian Road Research Laboratory (Vegdirektoratet Veglaboratoriet) Internal Report No. 859 Oslo.

[LCPC 92] Laboratoire centrale des ponts et chaussées (LCPC), Service d'études techniques des routes et autoroutes (SETRA). 1992. Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme. LCPC, SETRA. FRANCE.

[LPEE 2007] Laboratoire public d'essais et d'études (LPEE) .2007. Résultats des essais spécifiques sur les matériaux compactés à sec. Rapport d'essais du LPEE Casablanca

[LEE 76] Lee P.Y. 1976. Study of irregular compaction curves. Soil specimen preparation for laboratory testing, ASTM STP 599 : 278-288 American Society for Testing and Materials.

[O'CO 87] O'CONNEL M and all. 1987. Soil compaction at low moisture contents in dry areas in Kenya. Ninth regional conference for Africa on soil mechanics and foundation engineering. Volume : pp 333-340. AA Balkema. Rotterdam.

3-3 Expérience des remblais compactés à sec

Référence : ROYAUME DU MAROC, Ministère de l'Équipement, du transport et de la logistique, Direction provinciale de TAROU DANNT

« Séminaire international sur les terrassements et chaussées dans les milieux arides et semi-arides »

Présentation du projet routier RP1308

Construction de la liaison routière AOUINT LAHNA-AOUINT IGHOUMANE sur 39Km (RP1308), afin d'assurer le désenclavement de ces deux communes rurales en permettant plus d'échange économique et commercial entre l'est et l'ouest de la Province +PNRRII

Planche d'essai

Déroulement de la planche :

- Préparation de l'assise compactage à une compacité de 95% OPM
- Identification des matériaux de remblais avant mise en œuvre
- Détermination de l'état hydrique du matériau
- Compactage avec différentes énergies
- Essai de densité sur place moyennant le densimètre à membrane(10l)
- Identification après compactage

Objectifs :

- La vérification de la faisabilité du compactage à sec ;
- La définition des modalités du compactage à sec du matériau rencontré ;
- L'évaluation du problème de l'évolution granulométrique ;
- L'évaluation de l'effet de l'épaisseur de la couche ;
- Rentabilité du compactage à sec.

Conclusions et recommandations, faisabilité du compactage à sec :

Cette expérience révèle la faisabilité du compactage à sec des remblais routiers en mettant en évidence son application aux matériaux à un état hydrique très sec (teneur en eau naturelle de 1% pour le matériau B6).

Pas de grandes difficultés techniques qui peuvent entraver l'exécution du compactage à sec des remblais routiers. Le choix du matériau de remblai est très déterminant pour la réussite et le rendement de la technique du compactage à sec. Une étude du matériau est nécessaire pour cerner le comportement et l'évolution du matériau et assurer la pérennité de l'ouvrage (engagement dans un matériau charpenté).

L'investissement dans le compactage à sec des remblais routiers est de plus en plus rentable que les quantités de ces remblais est grande.

Le densitomètre à membrane reste donc la méthode la plus disponible sur les chantiers routiers courants pour contrôler le compactage avec les dispositions constructives nécessaires (décaper la surface).

4- Matériaux particuliers ou sensibles

4-1 Cas des craies

Référence NE 3 : B.6 Craie

4-1.1 Généralités

NOTE Ce groupe comprend les classes CH1 à CH4 telles que présentées dans le tableau « classification des roches pour utilisation en remblai », EN16907-2.

La craie est une roche friable particulière formée par l'accumulation de particules de calcite et que l'on trouve principalement dans le Nord de la France, dans le Sud et l'Est de l'Angleterre et en Belgique.

En tant que matériau réutilisé, la craie a des caractéristiques spéciales. C'est un calcaire ultrafin, composé de carbonate faiblement magnésien très pur, conservant une porosité élevée.

Sa double porosité, constituée à la fois par des pores fins dans le matériau rocheux et de pores plus grossiers le long des fractures, influence de différentes façons sur son comportement.

4-1.2 Considérations sur le comportement

Le comportement de la craie dans les travaux de terrassement est influencé principalement par la masse volumique sèche in situ.

D'autres paramètres, tels que le litage/l'espacement et la fréquence des discontinuités ainsi que finalement l'ouverture de la discontinuité, doivent être pris en considération pour la stabilité de la pente, pour le clouage, mais présentent peu d'intérêt pour le terrassement.

En Europe, trois principaux types de craies peuvent être considérés :

- La craie de masse volumique élevée (masse volumique sèche $\gamma_d > 17 \text{ kN/m}^3$), au comportement proche de celui d'un calcaire friable (La masse volumique est considérée comme très élevée lorsque la masse volumique sèche in situ $\gamma_d > 19,5 \text{ kN/m}^3$ selon la classification anglaise) ;
- La craie de masse volumique moyenne dont la masse volumique sèche minimale se situe entre 15 et 15,5 kN/m^3 , selon les pays, et d'une masse volumique maximale de 17 kN/m^3 ;
- La craie de masse volumique faible, inférieure aux valeurs ci-dessus.

Les craies de masse volumique faible et moyenne sont sensibles à l'eau et les limites pour les méthodes de compactage sont données pour chaque type de craie selon les classifications nationales (par ex. : GTR en France, CIRIA/SHW au Royaume-Uni).

Plus la masse volumique est faible, plus la quantité d'eau libérée pendant le compactage sera élevée.

4-1.3 Considérations relatives à la conception

Remblayage

La craie est un matériau avec un indice de vide élevé qui doit être pris en considération pendant la phase de conception, en particulier pour les remblais de grande hauteur.

La sensibilité au gel est également élevée et doit être prise en considération dans la conception des plateformes.

La craie humide peut être problématique pendant la construction, mais la craie sèche doit être considérée avec attention, car l'indice des vides est important et peut entraîner des tassements à long terme. Pour les craies de masse volumique moyenne et faible, la classification française GTR donne l'état de la craie (de très sèche à très humide) basée uniquement sur la teneur en eau et sur la masse volumique sèche.

L'utilisation de la craie exige une fragmentation des blocs afin de produire une quantité suffisante de fines pour enrober les blocs. L'évolution du matériau pendant les opérations de terrassement, de transport et de compactage, produit habituellement une granulométrie avec un D_{max} inférieur à 200 mm et un pourcentage suffisant de fines. Cependant il peut être nécessaire de réduire la granulométrie pendant l'excavation

La production de matériau fin pendant les terrassements peut amener des problèmes de portance et de matelassage en cas de compactage intense. Le matelassage doit être atteint car c'est un signe de réduction de l'indice des vides mais la porosité reste élevée.

Un équilibre doit être trouvé entre l'effort de compactage et la traficabilité.

Il convient de garder à l'esprit que les hauts remblais en craie naturelle peuvent tasser après construction.

Le tassement de la craie naturelle après construction pendant 2-6 mois, selon la taille et la nature de la craie, semble être une constante. Ce tassement est accompagné d'une recristallisation du matériau, qui acquiert une cohésion d'autant plus importante que la masse volumique est faible.

Une bonne portance après compactage n'est pas une garantie de sécurité. Nombre de pathologies rencontrées dans la craie sont dues à un compactage avec une teneur en eau trop faible, un manque de pâte pour remplir les vides et une taille de blocs excessive. C'est souvent lié à des terrassements effectués en été, avec une évaporation importante entraînant la perte de 2 à 3 % de la teneur en eau alors que la craie est déjà sèche. Parfois c'est lié à l'absence de matrice entre les blocs.

À imbibition, quelques craies tendent à s'effondrer, ce qui a conduit les normes britanniques à imposer un indice de vides inférieur à 10 % après compactage.

Si la teneur en eau de la craie est trop élevée, il est possible de la réduire par trois méthodes :

- Séchage par évaporation naturelle ou mécanique ;
- Méthode « chimique », où l'eau est mobilisée par une réaction d'hydratation de liants hydrauliques tels que la chaux, le ciment ou le laitier. Dans ces cas, les réactions sont accompagnées d'un durcissement qui améliore les caractéristiques mécaniques du mélange ;

- Méthode « physique », où l'eau est mobilisée par des effets de surfaces résultant de l'incorporation de matériaux secs ayant des surfaces spécifiques élevées. Ces effets sont obtenus avec les liants hydrauliques mentionnés ci-dessus, mais également avec des matériaux inertes tels que des sables secs ou des cendres volantes.

Spécification de compactage

L'objectif des remblais conçus en craie est de produire un remblai satisfaisant. Un remblai satisfaisant ne se tasse pas au-delà des limites de conception ni ne devrait être susceptible de s'effondrer par compression à court ou à long terme. Il existe deux approches concernant le contrôle de la mise en œuvre de la craie dans les terrassements : la spécification de la méthode de compactage et la spécification du produit fini.

La spécification de la méthode de compactage repose sur l'expérience avec des craies de types et de conditions divers (par ex. : directives nationales). Cela s'appuie sur des contrôles stricts du poids maximum et du type d'équipement de compactage, de l'épaisseur des couches de compactage et des méthodes d'excavation et de mise en œuvre de la craie.

La spécification du produit fini repose sur la caractérisation de la craie en termes de masse volumique sèche intacte et de teneur en eau naturelle en vue d'obtenir le produit fini spécifié, par exemple une limite maximale pour l'indice des vides après compactage ou une courbe granulométrique.

Le choix du matériel de compactage et des épaisseurs de couche, et en conséquence la méthode, reposent sur la réalisation de planches d'essai.

Couche de forme

A l'exception de certaines craies très denses, la craie naturelle n'est normalement pas utilisée en couche de forme granulaire.

La stabilisation au moyen d'un liant peut permettre l'utilisation de craie en couche de forme. Dans ce cas, la susceptibilité au gel doit être vérifiée soigneusement si nécessaire.

Ce sujet est abordé en détail dans EN 16907-4.

4-1.4 Excavation et transport

Généralités

Les méthodes/procédures de terrassement dans la craie doivent viser à empêcher tout début d'instabilité dans le remblai de craie qui rendrait impossible la poursuite des terrassements jusqu'à ce que la craie ait recimenté.

Il est important de noter que l'instabilité dans un remblai peut être due non seulement au remblaiement proprement dit, mais aussi à des méthodes d'excavation et de transport inadéquates bien avant que la craie ne soit mise en remblai.

Un autre critère important est l'obtention d'une granulométrie satisfaisante pour faciliter le compactage.

Dans tous les cas, les travaux de terrassement dans la craie sont sensibles aux conditions météorologiques comme c'est le cas pour d'autres matériaux sensibles à l'eau.

Par exemple en période de pluie ou de précipitations (y compris de brume/brouillard) ou à la suite d'épisodes pluvieux et avant une période d'évaporation ou de réduction de teneur en eau par d'autres moyens, la craie peut devenir instable à cause de l'augmentation de la teneur en eau et la poursuite des terrassements peut s'avérer très difficile.

Il convient donc d'envisager de suspendre les travaux de terrassement pendant les périodes de pluie et de ne les reprendre uniquement qu'après aération de la craie.

Une autre possibilité consiste à utiliser de la chaux ou un liant hydraulique pour assécher rapidement la craie humide.

Excavation

Différentes méthodes d'excavation sont appropriées selon les différentes classifications de la craie et elles sont également influencées par la période de l'année et, par conséquent, par les conditions météorologiques pendant lesquelles les travaux de terrassement doivent avoir lieu.

La classe de la craie n'est pas seulement liée au matériel d'excavation, mais aussi aux méthodes de compactage, à l'éventualité d'une instabilité temporaire, à la possibilité d'un traitement avec un liant et si une pluie légère peut affecter les travaux.

L'instabilité du remblai en craie peut n'être qu'un phénomène temporaire car les particules de craie se recimentent avec le temps.

Le choix de la méthode d'excavation dépend également d'une estimation de la taille des blocs, du type de fracturation, de la dureté de la masse rocheuse dans le déblai, ainsi que de la granulométrie recherchée.

En règle générale, toutes les craies peuvent être excavées au moyen de pelles rétro ou frontale mais du matériel plus lourd avec une capacité de fracturation maximale est exigé pour une craie intacte et non altérée de masse volumique élevée.

Lorsque des craies de masse volumique moyenne à élevée sont présentes dans des blocs de plus de 500 mm d'une masse rocheuse compacte, en particulier avec des joints conjugués fortement inclinés et largement espacés, l'excavation pourra nécessiter selon toute probabilité l'usage d'une défonceuse avant l'excavation.

Les blocs de craie à masse volumique très élevée (masse volumique en poids sec in situ > 19,5 kN/m³) peuvent exiger l'utilisation de brises roches hydrauliques pour une excavation efficace et pour obtenir la taille de blocs maximale requise

Quelle que soit la méthode choisie, l'excavation doit être planifiée de manière que le déblai ne reste pas dans un état pouvant entraîner la formation de flaques d'eau (bien que la craie soit poreuse, des flaques peuvent se former dans les dépressions), car cela finirait par altérer la qualité de la craie intacte.

Pour les remblais, le principal objectif est de s'assurer que le remblai ne tassera pas sur lui-même. Pour satisfaire cet objectif, la fragmentation de la craie, selon une courbe granulométrique continue est nécessaire. C'est aussi le critère essentiel pour favoriser la traficabilité sur site.

Cette courbe granulométrique peut être obtenue par une sélection de moyens mécaniques adaptés. Mais au-dessus d'une limite, propre à chaque type de craie et aux engins de transport présents sur le site, il sera nécessaire d'avoir recours à d'autres techniques telles que :

- La fourniture de matériaux permettant de diminuer la teneur en eau de la pâte résultant de la fragmentation ;
- L'utilisation de liants qui, avec le temps, améliorent les matériaux.

En partie supérieur de remblai, les matériaux doivent par conséquent présenter de bonnes capacités portantes pour un bon compactage des couches supérieures.

Pour des raisons économiques et pour un bon rendement du chantier, il est évident que l'on essaie tout d'abord d'utiliser la craie naturelle avant d'envisager son traitement.

La plupart du temps, il est possible, en limitant la fragmentation du matériau (excavé à l'aide d'une décapeuse avec un tablier entièrement ouvert, poussée par plusieurs bulldozers ou de pelles rétro), de réutiliser la craie naturelle, même avec une teneur en eau moyenne de 26 à 28 %.

Avec une teneur en eau supérieure, l'excès d'eau dans le matériau doit être réduit en utilisant deux types de méthodes :

- La méthode « chimique », où l'eau est mobilisée par la réaction d'hydratation de liants hydrauliques tels que la chaux, le ciment ou le laitier. Dans certains cas, les réactions sont accompagnées d'un durcissement qui améliore les caractéristiques mécaniques du mélange ;
- La méthode « physique », où l'eau est mobilisée par des effets de surfaces résultant de l'incorporation de matériaux secs ayant des surfaces spécifiques élevées. Ces effets sont obtenus avec les liants hydrauliques mentionnés ci-dessus, mais également avec des matériaux inertes tels que les sables secs et les cendres volantes.

Pour obtenir une bonne dispersion du liant dans le matériau, tout en prenant soin de limiter la production de pâte, les procédés suivants sont utilisés :

- Excavation avec une pelle rétro. Le ciment est incorporé grossièrement : des lits de ciment correspondant à une proportion de 2 à 3 % sont superposés à la craie, puis l'excavation est effectuée avec une pelle rétro jusqu'à une profondeur de 2 mètres afin d'incorporer le ciment dans le matériau fragmenté par le godet de la pelle.

Ce matériau est déchargé sur le remblai à quelques mètres du site où le matériau doit être employé, celui-ci étant alors poussé par un bulldozer. De cette manière, le mélange brut obtenu à l'excavation est amélioré ;

- Le déplacement avec des passes décalées qui sont ensuite croisées sur le remblai est nécessaire pour limiter le nombre de zones non traitées. L'ajout d'« oreilles » sur les dents de la défonceuse améliore la qualité du malaxage en introduisant un mouvement des matériaux vers le haut.

Il est également effectué un simple décalage (mouvement du matériel) à l'excavation pour incorporer le liant, suivi par une seconde reprise avec une décapeuse.

Transport

Là encore, il convient principalement d'éviter l'amorce d'instabilité dans les zones de travail, ainsi que sur les voies de transport entre les zones de travaux, et de s'assurer que la craie excavée arrive sur le lieu de remblai dans un état adéquat et exploitable.

Certaines craies renferment des silex, qui sont très abrasifs pour les pneus et doivent être pris en considération dans la construction.

L'instabilité des pistes de transport dans et entre les zones de travaux est possible avec tous les types de craies et peut être attendue avec les plus faibles et les plus humides.

Des restrictions saisonnières et liées aux conditions météorologiques peuvent être appliquées au terrassement dans la craie comme pour les sols sensibles à l'eau.

Il convient d'excaver, de transporter, de régaler et de compacter la craie selon un processus unique continu et ininterrompu.

Les manipulations multiples de la craie entraînent souvent une instabilité et il convient donc de les éviter si elles ne sont pas nécessaires. Si un stockage est inévitable, les précautions suivantes doivent être prises :

- Une fois régagée, il convient que chaque couche de craie fasse l'objet d'un léger compactage, suffisant pour réduire les vides d'air ;
- À la fin de chaque journée, ou en cas d'interruptions à cause de la pluie, il convient de fermer la surface de la craie ;
- Il convient que la surface de la craie soit toujours construite avec des pentes généreuses (>1 sur 40) pour faciliter l'évacuation de l'eau de pluie.

4-1.5 Régalage et compactage

Le principe fondamental du compactage des craies en remblai est de fragmenter celles-ci de manière à obtenir un matériau bien calibré, sans produire de forte pression d'eau interstitielle et en limitant la production de craie en pâte en sélectionnant un compacteur à bille avec un poids adéquat vis à vis de la masse volumique sèche et la teneur en eau de la craie.

La craie transportée par camions-bennes est déversée sur la couche déjà étalée et à l'avant de la couche en cours de mise en œuvre, de manière à éviter son transport par la niveleuse, celle-ci n'étant exigée que pour étaler le matériau selon l'épaisseur requise de la couche.

Lorsque des décapeuses sont utilisées, elles déchargent sur une plus grande surface de remblai, en formant une couche inégale qui doit être étalée par la niveleuse de manière à obtenir l'épaisseur requise.

Cette opération est parfois utilisée avec les craies humides et sèches provenant de déblais séparés pour être mélangées dans le remblai. On y arrive en déversant les deux types de craies au même endroit et en étalant le mélange comme s'il s'agissait d'un même matériau.

Certaines craies de masse volumique élevée et très élevée (masse volumique sèche in situ supérieure à 1,80 Mg/m³) sont si dures et les blocs sont si gros qu'ils doivent être brisés au moyen de concasseurs, de défonceuses, de rouleaux à billes très lourds ou de pieds dameurs après l'étalement du matériau.

Un autre moyen consiste à utiliser une décapeuse. Le tablier de la décapeuse doit être complètement ouvert et la décapeuse doit être poussée par un ou plusieurs bulldozers chargés.

Pour les craies plus friables, l'utilisation d'un pulvimixeur est également possible pour améliorer la granulométrie.

Il convient de prendre les mesures suivantes lors de la construction de remblais en craie :

- Ne pas intercaler de la craie avec d'autres matériaux dans le remblai ;
- À la fin de chaque période de travail, la surface exposée du remblai à l'air libre doit être fermée en la compactant pour faciliter l'écoulement de l'eau et par lissage au compacteur ;
- Arrêter le travail en cas d'instabilité temporaire, afin de laisser la craie se recimenter avant de reprendre le travail ;
- Limiter la circulation sur les remblais en craie non traitée aux seuls véhicules de transport requis pour le terrassement. Il convient que les autres véhicules circulant sur une piste de contournent le remblai ;
- Traiter la craie avec un liant hydraulique adapté, de la chaux ou du ciment.

Même si l'instabilité de la craie dans le remblai peut perturber la construction, elle n'est que temporaire, et cette précaution pourra permettre un bon comportement à long terme.

4-1.6 Assurance et contrôle qualité

La teneur en eau naturelle et la masse volumique sèche sont les principales méthodes recommandées pour le contrôle des terrassements dans la craie, qu'il s'agisse de la spécification de la méthode ou du produit fini.

L'emplacement où il convient de mesurer la teneur en eau est habituellement le déblai. Le remblai en craie peut toutefois sécher rapidement lors de chaudes journées d'été (en particulier lorsque des températures élevées sont associées à des vents forts) et s'humidifier les jours de pluie.

La craie est un matériau poreux et perméable, dont la teneur en eau change rapidement avec les conditions météorologiques. Il est impératif d'en tenir compte dans le programme de contrôle de la qualité.

4-1.7 Autres recommandations concernant le terrassement en craie

Il est important de noter que les arrêts pour intempéries peuvent être limités par des pratiques prudentes de gestion du site.

Par exemple, si de la pluie est annoncée, il convient de niveler et lisser les surfaces de terrassement exposées (compactage léger au rouleau) afin de limiter la pénétration de l'eau de pluie dans les couches de la surface exposée.

Lorsque de la craie doit être excavée d'une zone auparavant très boisée, il a été constaté qu'elle était très sèche et poudreuse jusqu'à une profondeur de 4 m en raison de la déshydratation due aux racines des arbres, même si ceux-ci ont été abattus quelque temps auparavant. Des teneurs en eau très faibles, de 13 à 15 %, ont été mesurées. Dans des sites

où la forêt subsiste de part et d'autre de la zone d'excavation, l'effet de l'aération de la craie est atténué considérablement par l'effet de l'ombre des arbres.

La pratique anglaise dans les craies de faible masse volumique limite l'excavation uniquement au moyen de pelles frontales ou de pelles rétro et l'utilisation de décapeuses est interdite afin de préserver, autant que possible, la structure de la craie et de prévenir l'instabilité une fois placée dans la zone de remblai.

Lorsque la profondeur d'excavation le permet, il convient d'excaver la craie d'un front de taille minimal de 3 mètres de hauteur car cela facilite la fracturation des craies denses et diminue le risque de désagrégation des craies de faible masse volumique. Cette mesure aide également quand il faut fractionner des craies qui deviennent progressivement plus denses et moins fracturées à mesure que l'on s'approche du cœur d'un interfluve.

L'excavation par décapeuse est une pratique très courante en France, parfois associée à un traitement des sols à la chaux ou au ciment, afin d'accélérer le séchage des craies humides.

Dans cette application, l'instabilité à court terme est courante et, pour éviter les périodes d'attente, le traitement des sols est utilisé. L'excavation par décapeuse dans les craies à masse volumique plus élevée et sèches est moins problématique. L'excavation par décapeuse dans les craies renfermant une grande quantité de silex risque d'endommager les pneus.

Si la craie excavée contient des fissures de dissolution remplies d'argile (discontinuités verticales), des mesures spéciales doivent être prises pour que la craie excavée ne soit pas mélangée à l'argile pendant l'opération. En effet, des pourcentages relativement faibles d'argile (<15 %) mélangés à la craie risquent de rendre la zone de remblai instable. L'excavation au moyen d'une décapeuse est efficace mais non discriminante et il convient de l'exclure dans les déblais de craie contenant fissures de dissolution.

Si l'on utilise des pelles rétro, elles sont habituellement placées au sommet du front de taille vertical de 3 m et, en conséquence, l'opérateur ne peut pas voir le matériau excavé tant qu'il n'est pas chargé dans le camion-benne, habituellement amené au pied du front de taille.

Dans ce cas, il convient que la pelle rétro soit pilotée par un opérateur au pied du front de taille, à une distance sûre de la surface de travail et ayant une vue complète du front. Les pelles en butte opérant au même niveau que le camion-benne, c'est-à-dire au pied du front de taille, n'ont pas ce handicap.

La craie produite par percement d'un tunnel est soit dans un état contenant une très forte proportion de fines (lorsque le tunnel a été percé au tunnelier ou à la machine à attaque ponctuelle) ou une très forte teneur en eau (lorsque le tunnel a été percé au tunnelier et que la craie a été liquéfiée pour faciliter son transport par convoyeur).

Dans le premier cas, la craie excavée devrait être adaptée à l'utilisation en remblais à condition d'être protégée contre la pluie (de par sa proportion élevée en fines, la craie est saturée rapidement et devient instable si elle est exposée à la pluie).

Dans le second cas, la craie doit être séchée mécaniquement ou naturellement avant de pouvoir être utilisée (après recimentation) dans les remblais.

Il convient de limiter la taille des camions-bennes pour les craies saturées à masse volumique faible et moyenne, afin de ne pas endommager les pistes et les remblaiements.

Il convient également de tenir compte de la taille des roues/pneus, le facteur le plus important n'étant pas le poids du camion-benne seul, mais la pression appliquée qui dépend en effet de son poids mais également de la taille et du nombre de roues.

Le premier signe d'instabilité est l'orniérage de la piste. S'il n'y est pas remédié, l'orniérage évolue rapidement vers une instabilité complète nécessitant la fermeture de la piste.

Aussi est-il important que les pistes restent bien nivelées et sans ornières en utilisant une niveleuse ou un bulldozer. Il convient que les pistes soient construites de manière que l'eau de pluie n'y forme pas de flaques.

L'orniérage et l'instabilité sont également davantage susceptibles de survenir dans les virages serrés ou à angle droit plutôt que sur les tracés droits, du fait de l'augmentation de la pression appliquées par les roues extérieures du véhicule de transport.

En conséquence, il convient d'éviter le plus possible les virages serrés ou à angle droit dans le tracé des pistes.

Des méthodes de transport fixes ont également été mises en place sur des sites pour acheminer la craie, notamment des convoyeurs. Ces expériences ont été un échec complet, car les convoyeurs liquéfiaient la craie, qui arrivait ainsi sur le remblai dans un état déstructuré et instable.

Un cas particulier de matériau ayant subi des manipulations multiples, a été le réemploi de la craie provenant du mètre excédentaire, lorsque des remblais sont surdimensionnés pour permettre un compactage sur toute la largeur puis repris pour correspondre au profil final quelque temps après la construction.

Cette craie a généralement séché complètement et sa réutilisation a par la suite entraîné un tassement par effondrement lorsqu'elle a été réimbibée.

Il convient donc de prendre certaines précautions pour la réutilisation d'un tel matériau.

Si le délai entre l'excavation et la mise en œuvre dans le remblai ou dans la zone de remblaiement dépasse une heure, ou si le matériel a altéré sa caractérisation, ou si le matériau est devenu inacceptable pour une raison quelconque, il convient de prélever d'autres échantillons pour réaliser des essais de teneurs en eau au point de déchargement dans le remblai ou toute autre zone.

Il convient d'utiliser ces teneurs en eau pour déterminer la classification et, en conséquence, les exigences de compactage du matériau.

En plein été, la craie a tendance à perdre jusqu'à 2 % de sa teneur en eau entre le moment où elle est excavée et celui où elle est mise en œuvre dans le remblai. Il est nécessaire d'en tenir compte lors de la caractérisation de la craie en vue d'obtenir l'indice des vides spécifié après compactage.

Le matériau qui est retravaillé à partir de la limite du remblai ou d'autres sources aura séché et, une fois compacté, contiendra souvent des vides interstitiels importants. S'il est mouillé par de la pluie, par exemple, il peut se tasser à mesure que le vide d'air diminue.

4-2 Cas des sols arides

Référence NE 3 : B.7 Utilisation de sols arides

4-2.1 Avantages et principes du compactage à sec

Dans certains climats secs et arides, l'ajout d'eau pour obtenir la teneur en eau permettant de qualifier le matériau comme « sec » pour le compactage peut être relativement coûteux (forage, pompage, transport, étalement, voire mélange, organisation du site) et consommer parfois de grandes quantités d'une ressource rare. Des recherches expérimentales effectuées au début des années quatre-vingt lors d'essais contrôlés au CER de Rouen et sur des sites de construction en Algérie et au Niger ont donné lieu à des recommandations pour le compactage de sols dont la teneur en eau est quasiment nulle.

4-2.2 Définition des sols arides - domaine d'application de la méthode

Nature des sols concernés

Les sols pour lesquels les expériences ont été concluantes sont les suivants :

Classification	Qualification
Sols fins	Passant à $63 \mu\text{m} > 35 \%$ et $I_p < 25$ (a)
Sols sableux et graveleux riches en fines	$12 \% > \text{Passant à } 63 \mu\text{m} > 35 \%$
Sols sableux pauvres en fines	Passant à $63 \mu\text{m} < 12 \%$ et passant à $2 \text{ mm} > 70 \%$
Sols graveleux pauvres en fines	Passant à $63 \mu\text{m} < 12 \%$ et $D_{\text{max}} \leq 50 \text{ mm}$
Sols grossiers	Passant à $63 \mu\text{m} < 12 \%$ et $D_{\text{max}} > 50 \text{ mm}$
(a) En règle générale, et plus particulièrement avec les sols contenant des fines compactées à sec, il convient de tenir compte des risques associés à l'infiltration d'eau par la suite (ex. : distribution d'eau).	

Tableau B.1

Définition de l'état hydrique « aride »

Lorsqu'un essai Proctor est effectué sur des échantillons dont la teneur initiale en eau est proche de zéro, une masse volumique minimale apparaît à une teneur en eau de w_c appelée teneur en eau critique, comme le montre la Figure B.5.

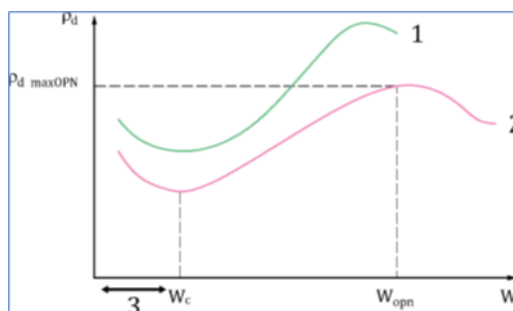


Figure B.5 — L'état aride correspond à une teneur en eau comprise entre zéro et W_c

Légende

1 Proctor modifié

2 Proctor

3 État aride

À partir de ce graphique, nous pouvons conclure que plus la teneur en eau est faible, plus le compactage est efficace. C'est souvent vrai, mais il arrive que le sol devienne trop poussiéreux et que sa faible traficabilité réduise l'efficacité du compactage. Les différentes gammes d'états arides définies ci-dessous tiennent compte de ces faits.

Groupe de sols	Plage indicative de teneurs en eau correspondant à l'état aride
Sol fin et $I_p < 12$ ou $V_{BS} < 2,5$	3 à 7
Sol fin et $12 < I_p < 25$	4 à 8
Sol intermédiaire et $V_{BS} < 1,5$	< 3 à 4
Sol intermédiaire et $V_{BS} \geq 1,5$	< 3 à 5
Sol grossier	< 3 à 4

Tableau B.2

Classes d'état aride des sols - Hauteur de chaussée en remblai acceptable

En règle générale, les sols arides compactés à sec peuvent être utilisés dans les remblais d'une hauteur ne devant pas dépasser 3 m. Des précautions doivent alors être prises pour les protéger contre l'érosion, en particulier pendant les épisodes de pluie qui, si elles sont rares, n'en sont pas moins très intenses.

4-2.3 Particularités du compactage à sec

Le compactage type est effectué au moyen de rouleaux vibrants à surface lisse. Pour plus de précisions, se reporter aux tableaux de compactage présentés dans le guide français G.T.R.

Une stricte conformité à la méthode de compactage indiquée dans les tableaux est donc la meilleure garantie de qualité de la construction. Une surveillance permanente est essentielle.

L'attention est attirée sur le fait que les planches d'essai « conventionnelles » (compactage en une seule couche) ne sont pas suffisantes habituellement pour tirer des conclusions.

Il est vivement recommandé de compacter en au moins deux couches l'une au-dessus de l'autre, pour évaluer la qualité de compactage sur 15 à 20 cm de chaque côté de l'interface ; si on utilise un pénétromètre, il convient que l'épaisseur totale soit d'environ un mètre.

Les risques de compactage insuffisant ou nul sont très difficiles à détecter visuellement pendant les travaux (la traficabilité du matériel n'est pas étroitement dépendante du

compactage, l'état de la surface de la couche en cours de compactage subissant peu de changement avec le nombre de passages).

La conformité avec le schéma de compactage nécessite la vigilance de l'opérateur du compacteur.

Le matériel « standard » de mesure de masse volumique à partir de la surface (densimètre gamma, densimètre à membrane ou méthode du sable) ne fournit aucune information sur le compactage, car le dessus de la couche n'est pas (ou très légèrement) compacté.

Il est compacté seulement lorsque la couche suivante est placée.

L'essai de chargement à la plaque (EV2/EV1) ou tout autre moyen de déterminer le module de déformation par l'application d'une charge sur le dessus de la couche ne donnera aucun résultat probant, sauf si l'essai est effectué au-dessus d'un matériau classique (par exemple, un matériau granulaire compacté).

La vérification post facto de la qualité du compactage peut être effectuée au moyen d'un pénétromètre dynamique qui a été étalonné sur une surface contrôlée.

La pluie étant très rare dans ces régions, la durée d'immersion pour les essais CBR en vue de la conception peut être abaissée de 4 jours (durée normale) à 2 jours.

5- Retour d'expérience – Raidissement de talus

Référence : LE DEBLAI DE TROIS PUIITS - Raidissement de talus

5-1 Brève description du projet lot 22

Le lot 22 du tronçon B de la LGV européenne représente une longueur d'infrastructure ferroviaire d'environ 13,5 km. Il comprend également la réalisation de 2 voies de raccordement vers Reims, de longueurs approximatives : 3,5 km pour le Rac V1 et 2,9 km pour le Rac V2. Il est limité à l'Ouest par le lot 29 du tronçon B et à l'Est par le lot 23 A du tronçon C.

Au sud de l'agglomération de Reims, le tracé LGV est jumelé sur environ 5 km avec le futur contournement autoroutier A4 bis. Ceci entraîne la réalisation des travaux complémentaires liés à la construction future de cette autoroute.

Les travaux comprennent les terrassements (env. 4 Millions de m³), l'assainissement, la construction de 20 ouvrages de génie civil (58 000m³ de béton) et les rétablissements de communication.

5-2 Le marché

Le maître d'ouvrage : Réseau Ferré de France (RFF)

Le maître d'œuvre : Groupement ISL (Ingérop, mandataire – Thalès – Luxconsult)

Le coordinateur sécurité et de protection de la santé : Bureau Véritas

Le groupement d'Entreprises : Le chantier de type TOARC (Terrassement / Ouvrages d'Art / Rétablissements de Communication) est un ouvrage complexe faisant appel à des entreprises réunies en un groupement composée de deux sous-groupements, à savoir :

Sous-groupement Terrassements, Hydraulique et Ouvrages d'art : RAZEL (mandataire), BOUYGUES TP, DTP Terrassement, en charge des :

- Opérations préliminaires
- Traitement et consolidation des sols
- Terrassements généraux
- Hydraulique et drainage
- Ouvrages d'art
- Rétablissement des réseaux AEP, EU, EP...

Sous-groupement Chaussées : COLAS Est et SCREG Est, en charge de :

- Chaussées des voies rétablies
- Chaussées des voies de desserte

Délai des travaux

Préparation des travaux :

3 mois à compter de 15 février 2003

Travaux : à compter du 15 mai 03

Délai global : 26 mois (y compris 3 mois de préparation hors repli 1 mois et épreuves PRA réalisées après pose de la voie).

5-3 Solution technique variante proposée par l'Entreprise

Sur la base d'expériences réalisées précédemment à faible échelle (masque de talus Autoroute A29 – Normandie), l'Entreprise a proposé pour un budget inférieur à la solution béton redimensionnée,

La tranchée de TROIS-PUITS

5-3.1 Présentation de l'ouvrage

Le déblai 22 513, dénommé communément « tranchée de Trois-Puits » est situé à l'extrémité est du LOT22, sur la commune de Trois-Puits. Il permet de passer une butte crayeuse importante, tout en plaçant le tracé de la LGV, à son entrée ouest sous la RN51 (Reims Epernay) et à son entrée est sous la ligne ferroviaire Reims Epernay.

Ce déblai est entièrement constitué de terrain crayeux. Il se caractérise par des dimensions impressionnantes : 820 ml de long et 30 mètres de hauteur, pour un volume de 800 000m3 environ.

Afin de limiter l'impact de l'emprise de ce grand déblai sur les terres agricoles, et notamment sur les vignobles situés au nord-est de la tranchée, RFF, lors de la concertation finale avec les élus locaux, a conçu ce déblai en tranchée ouverte avec réduction de largeur « en gueule » par réalisation de talus raidis.

5-3.2 Solution initiale marché

Le projet RFF prévoyait la réalisation de talus bétonnés avec des pentes de 2H pour 3V . L'habillage béton faisait 0.25m d'épaisseur.

L'entreprise prévoyait l'utilisation d'un coffrage glissant, réalisés par plots pairs, puis impairs, au fur et à mesure du terrassement de chaque palier.

Le groupement était conscient de la difficulté de cette réalisation, du fait de la pente importante du parement, posant de gros problème de tenue du béton frais notamment.

Les études de la solution marché ont fait apparaître des problèmes de faisabilité compte tenu de la composition du terrain.

Les études géotechniques complémentaires ont mis en évidence l'hétérogénéité du matériau et une qualité intrinsèque différente de celle présentée dans les documents marché.

Ces nouveaux paramètres appliqués à la solution d'origine auraient conduit à doubler les épaisseurs de béton ainsi que la densité du ferrailage, ce qui aurait rendu le coût et le délai de réalisation de cette solution, tout à fait prohibitifs.

Voir profil type initial ci-dessous

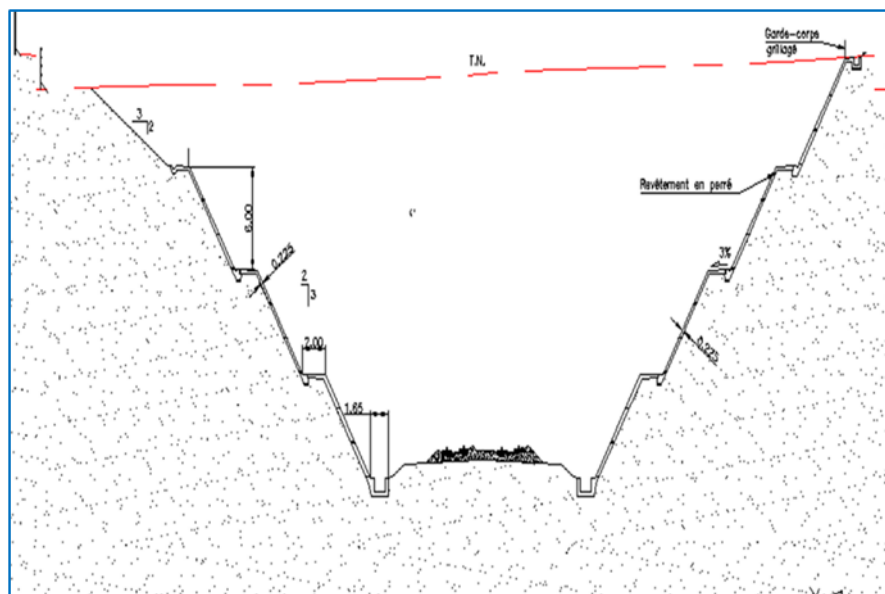


Illustration - Hauteur des différentes couches de matériau selon les profils de calcul



Illustration - Photo du matériel préconisé pour béton sur talus

5-3.3 Solution variante proposée par l'Entreprise

Sur la base d'expérience réalisées précédemment à faible échelle (masque de talus Autoroute A29 – Normandie), l'Entreprise a proposé, pour un budget inférieur à la solution béton redimensionnée, une solution variante originale « Terrassement » visant à stabiliser les talus raidis en craie naturelle par des masques en craie traitée au liant hydraulique.

Afin d'assurer la stabilité provisoire et la sécurité des ouvriers, les masques sont mis en œuvre par paliers au fur et à mesure de l'enfoncement du terrassement entre TN et profil définitif.

a / le matériau

PROFIL N°	LIMONS	GRAVELUCHE	CRAIE C2	CRAIE C3
492	0.71	0.00	11.43	5.00
498	1.20	0.70	13.30	4.50
503	3.21	1.79	8.92	3.57
509	2.90	2.30	13.20	6.80
512	3.21	4.29	6.43	8.21

Hauteur des différentes couches de matériau selon les profils de calcul

Le groupement s'est attaché à proposer une solution variante réalisable et présentant les coefficients de sécurité et de pérennité imposés par le marché.

Cette solution devait, bien entendu, respecter les emprises allouées au milieu des terres agricoles et notamment des vignobles de Champagne.

Compte tenu de la nature du matériau en place, il a été proposé de réaliser des talus raidis en craie traitée au liant routier.

Après différents essais en laboratoire, il a été décidé de traiter la craie en place à hauteur de 7% de liant routier de type ROC AS de chez HOLCIM.

Ce dosage est issu des différentes études réalisées par le groupement ou des laboratoires externes. De plus, des études de gélivité ont été effectuées par le CETE de Nancy.

Le dosage à 7% est considéré nécessaire afin de rendre les massifs non gélifs. La profondeur de gel pouvant atteindre 0.70m en Champagne, la hauteur et épaisseur du matériau traité ne doit être inférieure à 1.50m afin de garantir que la craie à l'arrière du massif ne soit pas exposée au gel.

b) les caractéristiques géométriques

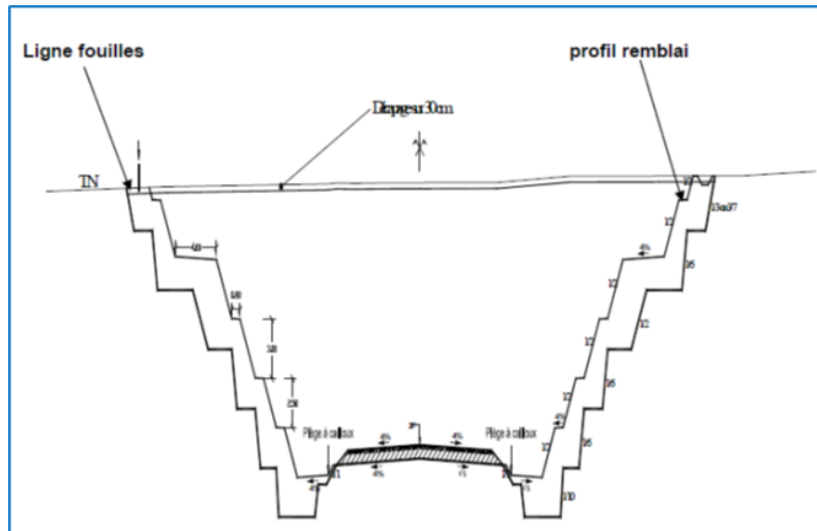


Illustration - les caractéristiques géométriques

Les fouilles

- talus de 1/6 pour les risbermes de 0.80m par 3.00m de hauteur
- talus de 1/2 pour les risbermes de 4.00 m par 3.00m de hauteur

Les talus traités

- talus de 1/2 pour les risbermes de 0.80m par 3.00m de hauteur
- talus de 1/2 pour les risbermes de 4.00 m par 3.00m de hauteur
- 1 risberme de 4.00m à ZP +10m et une risberme à ZP+ 19m séparées par 2 risbermes de 0.80m.
- 1 piège à cailloux de 3.00m en rive de plate-forme taillé dans le dernier bloc de remblai traité (n°10).

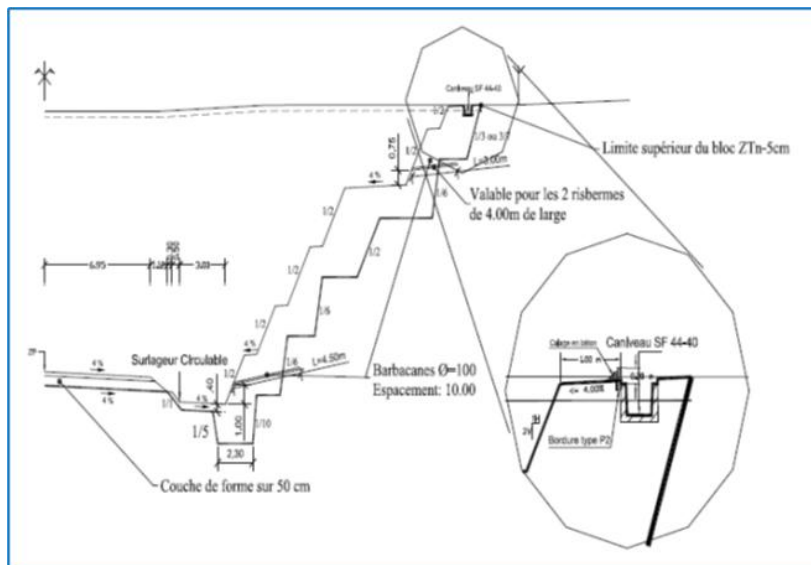


Illustration - les talus traités

Les méthodes

Les massifs sont réalisés en 3 étapes, par paliers du haut vers le bas :

- Terrassement en grande masse par passe de 3,00m, selon le profil des fouilles,
- Traitement « au déblai » de craie dans une zone du grand déblai, à raison de 7% de liant,
- Remblai excédentaire des masques de talus en matériau traité :
 - largeur minimale pour trafic des tombereaux = 5.00m
 - hauteur = 4.50m (sachant que blocs recouvre le précédent sur 1.50m).
 - pente du talus de construction de 1/1.
- Recoupe des talus définitif avec réemploi du matériau traité dans le délai de maniabilité, ou mise en remblai des excédents après fin du délai de maniabilité

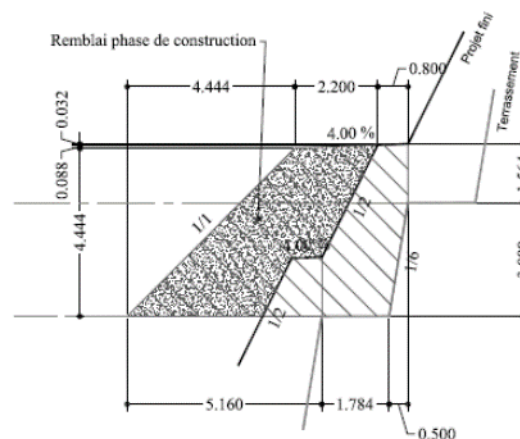


Illustration – remblai phase de construction

Les méthodes de réalisation ont porté sur :

- Un calepinage en 3D des différentes phases de travaux,
- Un planning précis,
- Les méthodes de réalisation ont porté sur :

- Un enchaînement des différents ateliers selon un ordonnancement serré,
- Une compétence de haut niveau des collaborateurs dédiés à ce travail,
- Une gestion optimale de la sécurité, du fait de la présence de nombreux engins et personnels dans un espace réduit.

5-3.4 La réalisation

a / terrassement en grande masse

- quantités : 800 500 m³
- échelon : pelle CAT 385 + dumpers CAT 769
- cadences : rendement pondéré = 560 m³/h

Les cadences de déblai en grande masse par paliers de 3.00m devaient être calées sur l'avancement de mise en œuvre des blocs traités soit :

- 7 m³ de grande masse pour 1 m³ de matériau traité en place
- 14 000 m³/jour pour 1500 m³/jour de matériau traité en place.

Ce rapport n'est pas constant selon entre le sommet du déblai et le fond -> une adaptation permanente est nécessaire. De ce fait l'échelon Grande Masse est passé du travail en poste au travail en poste réduit à 2x35h, puis à la journée.

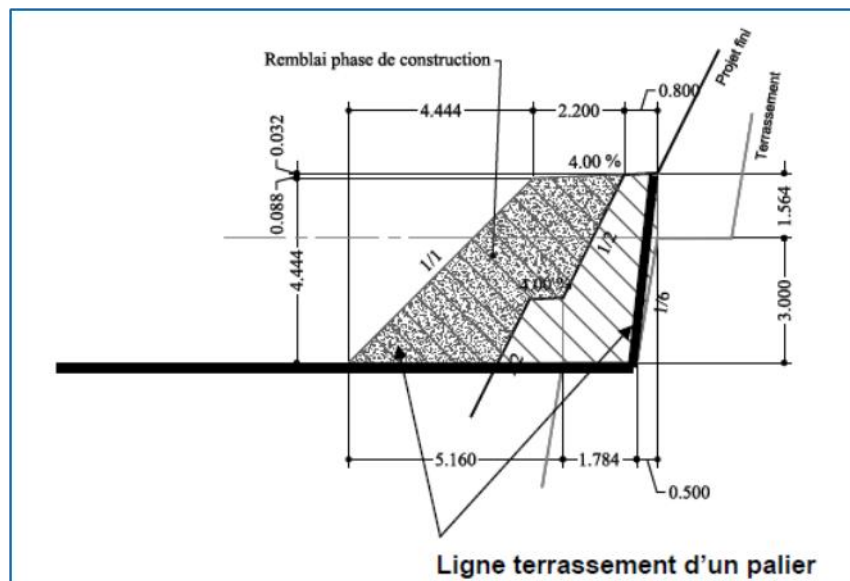


Illustration - Ligne terrassement d'un palier



Illustrations - Echelon Grande Masse*Déblai grande masse par passes de 3m***b) le traitement au liant**

- Quantités : 380 000 m³
- Echelon :
 - 3 Malaxeurs Wirtgen WR 2500/ RACO 450 / Challenger
 - 3 épandeurs 18 m³
 - arroseuses
- Rendement pondéré malaxeurs = 182m³/h
- Rendement pondéré épandeurs = 224 m³/h ou 17t de liant /heure



Illustrations (de gauche à droite) : Malaxage du matériau traité / Matériau après malaxage (mouture de 0/70 après 3 passes) / Arroseuse TERRA-GATOR (avec enfouisseurs)

c) La reprise du matériau traité et la mise en œuvre des masques traités

- Echelon :
 - pelle Liebherr 954 + tombereaux A30
 - bull CAT D6 LGP
 - 2 compacteurs vibrants V5.

L'atelier de chargement du matériau traité est composé d'une pelle moyenne de type LIEBHERR 954 équipée d'un godet curage à lame lisse, ceci afin de récupérer le maximum de matériau traité foisonné. Elle est associée à des tombereaux de type VOLVO A 30.

- Rendement pondéré : 194 m³/h

La mise en œuvre des masques de talus est réalisée en largeur de 5m, soit une surlargeur de sécurité suffisante vis-à-vis du compactage et des tombereaux (surtout dans le cas où les risbermes finies ne font que 0.80m.



Illustrations : Reprise de la passe de matériau traité / Traitement dans le déblai

d) coupe des excédents ou dégrossissage des talus

- Échelon : pelle Liebherr 320 + tombereaux A30
- Volume excédents : 267 532 m³
- Total heures : 2184 heures
- Rendement : 123 m³/h

Le remblai recouvre le plot précédent de 1.50m, il est donc réalisé sur une hauteur de 4.50m.

Par ailleurs, la largeur de sécurité étant de 5.00m, le volume de matériau à mettre en œuvre afin de réaliser un massif est très supérieur au volume géométrique final après recoupe.

Une fois le massif taillé, une grande partie du matériau utilisé pour la mise en remblai est donc excédentaire. Il a donc été décidé d'utiliser ce gras de talus afin de confectionner à nouveau des massifs, en jouant sur le délai de maniabilité de la craie traitée.

L'objectif était d'en recycler 60%. En réalité nous n'avons en final récupéré que 25% ceci pour des raisons qui seront évoquées ci-dessous.



Illustration - Finition talus

e) Réglage fin des talus

- Echelon : pelle Volvo 240
- Quantités :
 - surface talus = 36000m²
 - surface des bermes = 15000 m²

- Total heures : 2346 heures
- Rendement : 22 m²/h

Observations : le dégrossissage intervenant en moyenne après 3 jours de prise, le réglage fin était donc réalisé 4 à 6 jours après la mise en œuvre. De ce fait le matériau présentait déjà une certaine dureté ce qui explique le rendement de 22m³/h.



Illustration - Réglage fin des talus



Illustration – Vue générale talus réglés

5-3.5 Les difficultés

Les difficultés du site : surface disponible réduite

Le déblai présente une ouverture maximale en gueule de 70 m et une largeur de 24 m en pied.

La longueur est de 800 ml au total mais seuls 400 ml sont disponibles en 1^{ère} phase pendant la construction du PRO 22 240, ouvrage qui coupe le déblai sensiblement au 2/3-1/3.

La surface disponible est donc de 1,8ha en moyenne, ce qui est peu pour mener simultanément 5 échelons depuis le traitement jusqu'aux finitions de talus (besoin de 0,8ha pour le traitement à lui seul).

En 2ème phase, après réalisation du PRO 22.240 fondé sur des barrettes, les terrassements ont été réalisés sous le tablier en « taupe ». A cette complication se sont ajoutées les difficultés de clavage avec les talus exécutés précédemment.



Illustration – Difficultés site

La qualité du matériau

Les couches superficielles du déblai étaient constituées de craie limoneuse aux performances mécaniques médiocres. Ce constat, fait après avoir réalisés quelques blocs traités, nous a contraints à réutiliser du matériau plus sain, déjà mis en dépôt.

Cependant, les essais en laboratoire ont mis en évidence la présence de chaux dans la craie mis en dépôt. Or contrairement au limon, le liant SC réagit mal en présence de chaux. En définitive, nous avons sélectionné de la craie exempte de « pollution » par la chaux pour sur le dépôt provisoire de la plate- forme de la future A4 bis.

La teneur en eau de la craie

- La craie présentait une teneur en eau naturelle de 25%, nécessitant un apport d'eau de 3% avant traitement.

Or, à 28% d'eau la craie présente une consistance pâteuse qui ne permet plus le fractionnement par le pulvimixeur pour obtenir une mouture inférieure à 80mm.

De ce fait, après de multiples essais avec des malaxeurs différents et des outils différents, nous avons opté pour un premier passage à « sec » qui favorise le fractionnement et permet d'obtenir une mouture de 0/40.

- Une autre conséquence de la consistance pâteuse, était le colmatage des bennes qui nécessitait des nettoyages fréquents.

De ce fait, les cubes « caisse » devaient être corrigés à la baisse ainsi que les rendements qui en dépendent.



Illustration - Colmatage de bennes

La mise en œuvre

- Le liant

Selon le type de liant utilisé (ROC SC ou ROC AS) il faut attendre une prise partielle à l'issue de 48 h à 72 h (selon température ambiante) pour pouvoir « recouper » le matériau. Un dégrossissage prématuré des talus engendre une fissuration du matériau et un risque de décollement du parement

- Les rampes

Les tombereaux approvisionnent le matériau en marche arrière par l'intermédiaire de rampes évolutives de 0 à 4.50m de haut.

Les compacteurs restent en arrière, de ce fait les rampes sont peu ou pas compactées.

5-4 Désordres sur les parements

Rappelons que les travaux de terrassement et de traitement dans le déblai 22513, très contraints par l'achèvement d'autres phases de chantier situées sur le chemin critique, se sont déroulés de fin avril 2004 au 13 décembre 2004.

L'achèvement des travaux de traitement au début de l'hiver 2004/2005 laissait prévoir des problèmes de qualité liés à l'insuffisance de « prise » pour les derniers blocs traités.

Rappel des objectifs qualitatifs

Les caractéristiques des coefficients de cohésion et de frottement considérées dans les notes de calcul de stabilité de talus sont les suivantes :

- $R_c > 1.5 \text{ Mpa}$
- $R_t > 0.20 \text{ Mpa}$

Ces valeurs intègrent un coefficient de marge de sécurité de 1.5.

Les mesures de résistance réalisées sur les carottes prélevées dans les talus font apparaître des valeurs moyennes conformes aux objectifs précités.

Description des dégradations

L'intensité des jours de gel fin décembre 2004 et janvier 2005 a occasionné des dégradations sur les surfaces lisses que nous pouvons décrire comme suit :

- Sur les risbermes : présence d'une crème de 1 à 5 cm et présence de faïençage et de gonflement,
- Sur les talus : desquamation et décollements en pelure d'oignon d'épaisseur variable allant de quelques millimètres à quelques centimètres.
- Blocs de craie fissurés.

La microfissuration et la microporosité piègent l'eau dont l'augmentation de volume en période de gel détériore les masques traités.

Le processus de dégradation risquait donc de se renouveler à chaque cycle gel/dégel.



Vues de désordres de surface

5-5 Réparations des désordres (1ère phase) - Traitement physico-chimique

5-5.1 Traitement physico-chimique

Dans un premier temps, nous avons recherché des procédés physico-chimiques – simples à mettre en œuvre - visant à renforcer l'étanchéité et la structure chimique des parements en craie traitée, afin de les rendre ainsi résistants à l'action des cycles gel/dégel.

Après expertise, il a donc été décidé de prendre contact avec plusieurs sociétés fabricant des produits de traitement superficiels (en général destinés au renforcement de surface des pierres de bâtiments en calcaires tendres).

De nombreux essais en laboratoire sur plaques traitées prélevées sur le site ont été mis en œuvre avec les différents produits proposés :

- Test d'hydratation,
- Essai d'écaillage

- Test de résistance au gel dégel.

Au final, un seul produit a passé avec succès les différents tests imposés. : le procédé SILITRANS développé par GAMMA CHIMIE, comprenant une aspersion en deux passes du support par une émulsion de silicate en voie liquide.

5-5.2 Bilan du traitement physico-chimique

A l'automne 2005, les parements de la tranchée de Trois-Puits avaient été traités de façon satisfaisante selon la procédure définie.

Malheureusement, à la fin d'un hiver 2005/2006, particulièrement froid, nous n'avons pu que constater l'inefficacité de ce traitement, l'écaillage des parements étant de nouveau constaté de façon générale, notamment sur le versant sud, le plus exposé aux intempéries et le moins ensoleillé.

Par ailleurs, la période d'essais de la ligne LGV se rapprochait (octobre 2006), ainsi que sa mise en service (prévue en juin 2007). Toute intervention dans le domaine ferroviaire nous était interdite à partir du printemps 2006.

Il fallait donc trouver le plus rapidement une autre méthode de protection donnant à RFF toute garantie, réalisable dans les nouvelles contraintes du site, permettant la réception de notre Marché.



Illustration - Mise en œuvre des produits GAMMA CHIMIE



Illustration - Traitement des parements par émulsion de silicate

5-6 Réparations des désordres (2ème phase) - « Béton projeté »

5-6.1 Cahier des charges

L'échec de la première tentative de traitement a imposé à l'Entreprise de s'orienter vers des solutions qui pourraient répondre au cahier des charges suivant :

- Protection physique des parements, par interposition d'un matériau rapporté les protégeant des intempéries (pluie, cycles gel/dégel),
- Stabilité de ce parement rapporté et du massif de craie traitée,
- Longévité (>80ans),
- Possibilité de réaliser la mise en œuvre de ces solutions dans un délai court (avant mise en électricité des caténaires) et dans les contraintes de site (accès extrêmement limités depuis la pose de la voie),
- Pas d'empiètement dans les pièges à cailloux / accès latéraux servant également de fossés.

5-6.2 Recherche de nouvelles solutions

Dans un premier temps, nous avons envisagé :

- La construction de murs de soutènement en partie basse associés à des masques drainants,
- La réalisation de parements rapportés de type préfabriqués :
- Gabions,
- Bacs béton préfabriqués et remplis de grave (différents modèles).

Le dossier présenté à RFF en mai 2006 a conduit à nous orienter vers une solution « 100% béton projeté ».

5-6.3 Solution retenue : « Béton projeté »

Ce procédé avait pour lui les avantages suivants :

- Faible épaisseur (20 cm) ne faisant pas obstacle au fonctionnement des pièges à cailloux en accès VL,

- Possibilité de multiplier les ateliers de mise en œuvre, sans obligation de commencer à un bout et continuer en suivant ; facilité de « pianotage »,
- Souplesse dans le transport pneumatique du béton, permettant un approvisionnement simple depuis des pistes situées sur le terrain naturel,
- Pas de levage lourd,
- Rapidité de mise en œuvre,
- Stabilité dans le temps et possibilité de réparer des zones défailtantes dans le temps,
- Coût restant raisonnable,
- Matériel léger (compresseurs, foreuses manuelles, nacelles),
- Possibilité de travailler – moyennant certaines dispositions – au-delà du début des essais ferroviaires.

Le printemps 2006 a été consacré à la recherche de solutions et à la mise au point et la validation de la procédure « béton projeté » avec RFF, le Moe et notre sous- traitant STIPS.

En juillet 2006, nous avons finalisé un contrat de sous-traitance avec STIPS, portant sur la réalisation des protections en béton projeté des 12 premiers mètres de parement et de la risberme supérieure.

Le principe retenu consistait à réaliser un parement de 20cm en béton projeté ancré, mis en œuvre par voie sèche, jusqu'au premier niveau de risberme de 4m (soit 12m de hauteur), et à revêtir cette risberme de 25 cm de béton armé à plat.

Les travaux ont débuté en septembre 2006 et se sont terminés avant l'hiver 2006/2007.

Début 2007, aucun nouveau désordre n'était constaté sur les parements protégés de la tranchée de Trois-Puits, permettant ainsi d'obtenir la levée des réserves à la réception du lot 22.

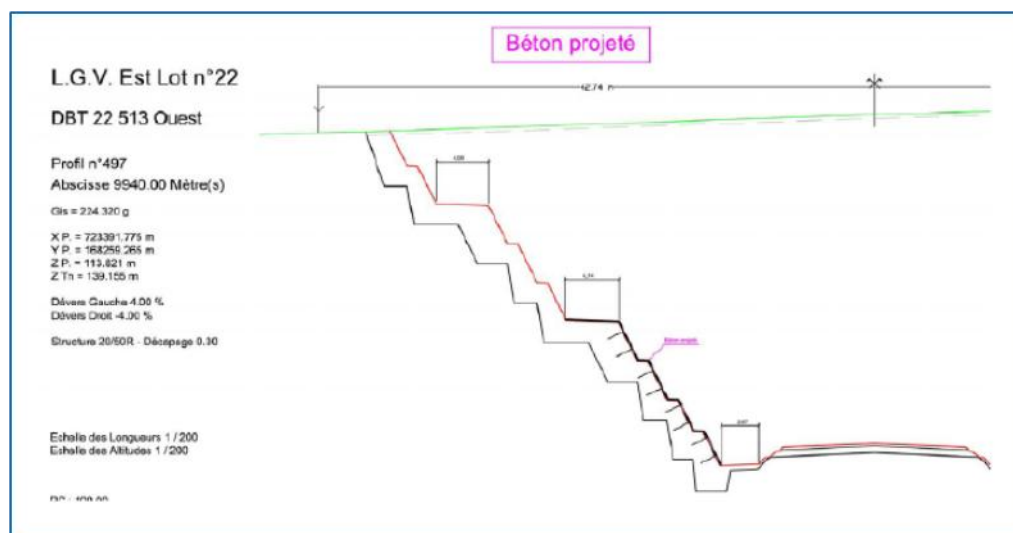
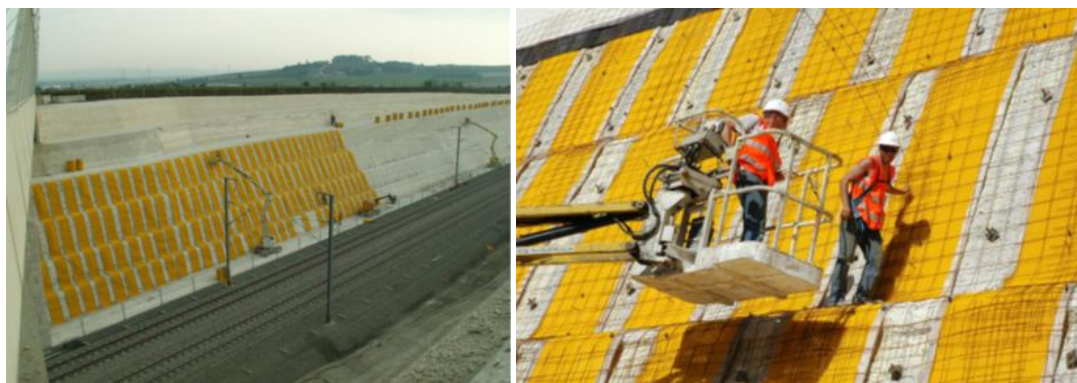


Illustration - Coupe-Type « béton projeté »

La solution « Béton projeté » en photos



Illustrations – « Béton projeté » : Forage des ancrages (détail) / Injection des ancrages



Illustrations – « Béton projeté » : Pose du géocomposite drainant sur talus / Pose de treillis soudé



Première couche de béton projeté (vue de 3 ateliers)



Illustration - Vue générale

5-7 Conclusion

Le parti choisi par le Maître d’Ouvrage RFF de réduire considérablement la largeur séparant les deux entrées en terre a nécessité la réalisation d’un ouvrage de terrassement prototypique et totalement hors normes (première en France).

Toutefois, le défi imposé par le client a été relevé, et même si certains événements ont perturbé sa réalisation et son achèvement, l’Entreprise a livré à RFF un ouvrage de qualité.

ANNEXE 6



CONDITIONS D'EMPLOI OPTIMAL DES MATÉRIAUX - TERRASSEMENTS ROCHEUX

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 6

1. PROPRIÉTÉS RELEVANT DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES
2. RECOMMANDATIONS TECHNIQUES POUR LES TERRASSEMENTS ROCHEUX
3. CLASSEMENT DES GROUPES DE ROCHES POUR LES TERRASSEMENTS
4. TECHNIQUES DE TERRASSEMENTS DES MATÉRIAUX ROCHEUX

ANNEXE 6

Référence 1 : Norme européenne EN 16907-1 - Terrassements - Décembre 2018 / Partie 1 : Principes et règles générales

Extraits : Conception des terrassements pour les remblais / Détails des parties, matériaux et ouvrages en terre spécifiques

1- Propriétés relevant de la mécanique des roches

La description et l'identification des roches qui découlent de ces propriétés seront très utiles à la méthodologie d'extraction des roches : choix des matériels, choix des opérations de rippage ou de minage notamment.

Dans le domaine des roches il est désormais classique de considérer deux échelles différentes :

- Celle de la roche, c'est l'échelle d'un échantillon et de l'éprouvette soumise aux essais (correspondant à quelques décimètres cubes)
- Celle du massif rocheux, c'est l'échelle des travaux de terrassement et des fondations d'ouvrages (correspondant à quelques dizaines de mètres cubes au moins)

Se référer à l'Annexe Documentation I.1 « Propriétés des matériaux naturels ». Les valeurs qui sont proposées sont des valeurs usuelles, susceptibles de quelques variations le cas échéant.

1-1 Propriétés des roches

Identification des roches

La pétrographie classe les roches en trois grands groupes en se fondant essentiellement sur des critères génétiques.

- les **roches éruptives** proviennent de la solidification du magma ;
- les **roches sédimentaires** sont formées à partir de dépôts d'éléments détritiques chimiques ou biochimiques ;
- les **roches métamorphiques** résultent des modifications subies par les roches éruptives ou sédimentaires lorsqu'elles sont soumises au métamorphisme.

Les roches cohérentes sont des solides particulièrement complexes du fait de l'hétérogénéité des constituants et des défauts de structure.

ROCHES MAGMATIQUES (plutoniques ou volcaniques)	Famille des roches acides	Granite, granodiorite, syénite, microgranite, rhyolite, trachyte
	Famille des roches intermédiaires	Diorite, microdiorite, andésite, trachy-andésite
	Famille des roches basiques	Gabbro, dolérite, ophite, basalte, périclote
ROCHES MÉTAMORPHIQUES	Roches massives	Quartzite, cornéenne, migmatite, marbre
	Roches foliées	Gneiss, amphibolite, leptynite, micaschiste, schiste, ardoise
ROCHES SÉDIMENTAIRES	Famille des roches carbonatées	Calcaire, craie, dolomie, travertin, cargneule
	Famille des roches à dominante siliceuse	Grès, arkose, argilite, meulière, silex, radiolarite
	Famille des roches silico-carbonatées	Marne, molasse
	Famille des roches évaporitiques	Gypse, anhydrite, sel gemme
	Famille des roches carbonées	Charbon, lignite
(1) Extrait du guide TETR édité par le CFTR (cf. [Doc. C 5 360]).		

Tableau 1 : Famille des roches (Référence TETR)

Porosité

La fissuration, qui joue un rôle considérable dans le comportement mécanique des roches, est la conséquence de l'hétérogénéité de comportement des différents constituants d'une roche.

Le volume des vides contenu dans une roche est exprimé par la porosité n :

$$n (\%) = \frac{V_v}{V}$$

V_v volume des vides,

V volume total.

Indice de continuité

La porosité exprime mal l'état de fissuration d'une roche, car le volume de vides lié aux fissures est très faible. Aussi, il est apparu nécessaire de quantifier, autrement que par la porosité, la densité de discontinuités présentes dans un échantillon de roche.

La théorie, comme les mesures expérimentales, montre que la vitesse de propagation des ondes dans un solide est très influencée par la présence de discontinuités.

C'est la raison pour laquelle on utilise l'indice de continuité I_c :

$$I_c = \frac{V_L}{V_L^*} \times 100$$

V_L vitesse de propagation des ondes longitudinales dans une roche,

V_L^* vitesse théorique correspondante pour un milieu parfait, de même composition minéralogique que la roche, mais ne présentant pas de discontinuité.

Résistance mécanique des roches

Le plus souvent, la résistance d'une roche est donnée par la résistance maximale obtenue dans un essai de traction ou dans un essai de compression simple.

- La résistance en traction des roches est peu utilisée. Elle est beaucoup plus faible que la résistance en compression ; L'essai de traction le plus courant est un essai indirect, l'essai brésilien.
- La caractéristique mécanique la plus universellement utilisée pour les roches est la résistance en compression simple σ . Elle se mesure sur une éprouvette cylindrique d'éclatement. La résistance en compression simple est le paramètre de base de la plupart des classifications proposées en mécanique des roches.

1-1.2 Propriétés des massifs rocheux

Les caractéristiques mécaniques des roches mesurées sur échantillons sont généralement élevées, et très supérieures à celles des massifs rocheux. Cette différence s'explique par la présence de surfaces de discontinuités.

L'étude structurale d'un massif rocheux consiste à hiérarchiser entre elles ces différentes familles, en distinguant les accidents majeurs isolés (failles) d'éléments répétitifs (plan de stratification, diaclases).

On peut classer les massifs rocheux suivant le nombre de familles de discontinuités.

État de fracturation d'un massif rocheux

L'état de fracturation d'un massif rocheux est particulièrement utile au choix des méthodes de réalisation. On utilise fréquemment des indices.

L'étude complète de la structure d'un massif rocheux est souvent très longue et très difficile ; aussi utilise-t-on fréquemment des indices que l'on peut déterminer à partir de forages ou sur affleurements, et qui permettent de caractériser l'état de fracturation d'un massif.

On utilise fréquemment des indices.

L'indice le plus répandu actuellement est le RQD (Rock Quality Designation).

Il se détermine par la longueur cumulée $\sum \ell_i$ des éléments de carottes supérieurs à 10 cm de long par rapport à la longueur L de sondage considérée. Il est exprimé en pour cent :

$$RQD = 100 \frac{\sum \ell_i (> 10 \text{ cm})}{L}$$

La densité de discontinuités dans le massif est souvent quantifiée par l'intervalle de discontinuités ID mesuré suivant une ligne et défini comme l'intervalle moyen entre deux discontinuités successives.

État d'altération d'un massif rocheux

Les processus d'altération des roches sont extrêmement divers. Suivant leur intensité, la roche peut présenter tous les états intermédiaires entre une roche saine et un sol résiduel, par exemple les arènes granitiques. Le plus souvent, l'altération progresse par les surfaces de discontinuités.

Abrasivité

L'abrasivité est à considérer dans la réalisation des terrassements rocheux.

Référence France

Un essai qui se pratique sur un granulat de 4 à 6,3 mm (Référence norme XP P 18-579), permet de quantifier la capacité d'une roche à user les pièces métalliques : cette caractéristique est donc importante pour les phases de foration et de reprise des matériaux abattus après le tir.

Selon cet essai, les calcaires purs ont une abrasivité voisine de 0 (la calcite n'est pas un minéral abrasif) ; à l'opposé, les roches siliceuses compactes telles que les quartzites ont une abrasivité qui peut dépasser 2 000 (tableau 5).

Tableau 5 – Classes d'abrasivité suivant le guide TETR		
Classe	Coefficient d'abrasivité <i>ABR</i> (g/t)	Description de l'abrasivité
<i>ABR</i> ₁	< 500	Très faible
<i>ABR</i> ₂	500 à 1 000	Faible
<i>ABR</i> ₃	1 000 à 1 500	Moyenne
<i>ABR</i> ₄	1 500 à 2 000	Forte
<i>ABR</i> ₅	> 2 000	Très forte

Prévision des conditions d'extraction des massifs rocheux

Il est important, pour les travaux de terrassement, de prévoir les conditions d'excavation des déblais. Nous y revenons de façon détaillée dans le Livret « 2D / La réalisation des terrassements » du Manuel Terrassement.

Rappelons à ce stade que les principales méthodes d'extraction sont :

- l'utilisation d'explosifs avec la foration de trous de mines ;
- le défoncement avec des tracteurs puissants ; les plus puissants dépassent 500 ch (370 kW) ;
- l'utilisation de pelles.

Ces deux dernières méthodes ne peuvent être utilisées que si les roches ne sont pas trop dures et le massif trop compact.

La prévision des conditions d'extraction des massifs rocheux est généralement faite par l'une ou la combinaison des méthodes suivantes :

- mesure de la vitesse de propagation des ondes longitudinales dans le massif ;
- indications sur les caractéristiques de la roche (indice de continuité) et sur l'état de fracturation du massif ;
- sondages carottés (onéreux) ;
- sondages destructifs dans lesquels on fait des diagraphies des vitesses sismiques ;
- carottages soniques.

En conclusion, nous donnons simplement dans le tableau 6 les indications sur les prévisions d'extraction fournies par les vitesses de propagation des ondes longitudinales obtenues par des essais de diagraphies sismiques.

La figure 2 représente une allure de l'accroissement de difficulté e la vitesse du son, suivant la puissance du tracteur qui porte la dent de rippage.

Tableau 6 – Conditions d'extraction déterminées par sondage sismique (1)	
Nature du banc rocheux vis-à-vis de son extraction	Vitesse du son mesurée par sondage sismique (m/s)
Rippable	$V < 1\,500$
Difficilement rippable	$1\,500 < V < 2\,500$
À extraire avec emploi d'explosif	$V > 2\,500$
(1) Les frontières de ce tableau sont approximatives.	

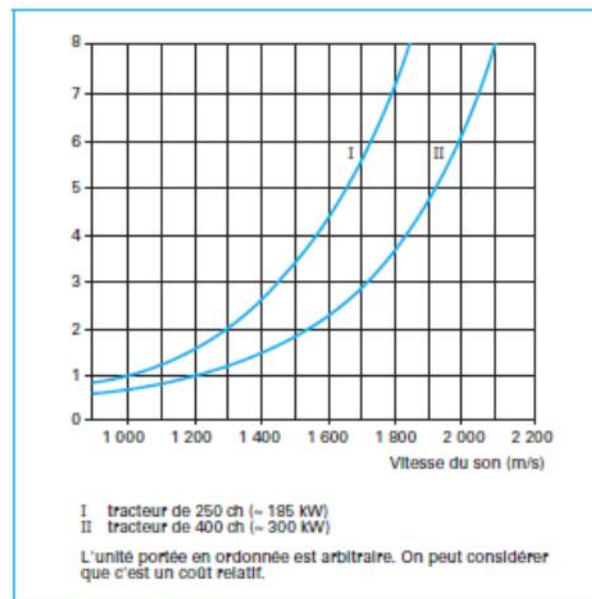


Figure 2 – Ordre de grandeur de la difficulté à ripper un banc en fonction de la vitesse du son

2- Recommandations techniques pour les terrassements rocheux

Référence Norme Européenne « Terrassements » - Partie 3

2-1. Considérations spéciales lors d'une excavation de massif rocheux

Extrait 1

L'excavation de roches et de massif rocheux nécessite une méthodologie spécifique.

La prévision de la difficulté d'excavation de la roche et de massifs rocheux est très importante pour les travaux de terrassements.

Pour décrire l'excavation dans la roche, il a été fait appel à différents termes relatifs au principe d'excavation et au mécanisme de fragmentation.

Dans le présent document, le terme « excavabilité » est utilisé à titre de terme général qui fait référence au degré de difficulté d'excavation dans la roche et dans les massifs rocheux.

Il englobe les méthodes suivantes :

- a) excavation à la pelle, en présence de conditions d'excavation faciles/très faciles (sols ou roches meubles) ;
- b) défonçage, en présence de conditions d'excavation modérées à difficiles (roches friables et parties altérées de roches dures) ;
- c) minage, en présence de conditions d'excavation très difficiles (roches dures).

Les analyses permettant de déterminer le degré de difficulté qui peut se présenter en cas d'excavation d'un massif rocheux s'appuient sur l'étude des éléments suivants :

- 1) la nature de la roche proprement dite formant le massif rocheux in situ (car l'excavation conduit à la fragmentation et à la rupture des matériaux rocheux lorsque le bloc est volumineux) ;

- 2) la nature, l'extension et l'orientation des fractures ;
- 3) la structure géologique relative à la formation de plis et de failles, ainsi qu'à la schistosité.

L'évaluation indirecte de ces paramètres peut être fondée sur les éléments suivants :

- description de la roche ;
- vitesse des ondes sismiques P et nature de la roche ;
- indice de l'espacement des discontinuités et essais de dureté ;
- Geological Strength Index (indice géologique de résistance).

NOTE

Des exemples de telles méthodes indirectes peuvent être trouvées dans le document Caterpillar tables (ref), Pettifer and Fookes, Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, 145–164; Bull eng Geol Environ (2010) 69:13–27 – Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (disponible en anglais seulement).

De plus, les informations suivantes peuvent être pertinentes :

- paramètres relatifs à la dureté de la roche, aux fractures, à la formation de plis et de failles (de manière directe ou indirecte) ;
- informations sur l'altérabilité, la karstification et l'hydrogéologie.

Afin de choisir la méthode d'excavation la mieux adaptée, il convient de considérer les points suivants :

- géologie attestée du massif rocheux ;
- forages réalisés avec enregistrement de paramètres, essais de laboratoire et photos ;
- ensemble des contraintes relatives aux ouvrages, constructions et réseaux existants, entre autres, qui pourraient influencer le choix de la méthode d'excavation.

Si un minage est programmé, il convient alors de recueillir des informations supplémentaires :

- présence éventuelle d'eau ;
- sensibilité aux vibrations et aux ondes de choc acoustiques des ouvrages, constructions ou réseaux existants ;
- pour les sols sensibles avoisinants : restrictions relatives aux vibrations et impact direct du minage.

De plus, les informations suivantes peuvent être pertinentes :

- vitesse spécifique maximale pour chaque plage de fréquences ;
- résultats de tirs d'essai, le cas échéant ;
- variation prévisible de la partie supérieure du massif rocheux devant être miné ;
- taille maximale admissible des blocs dans le remblai ou autres spécifications sur la granulométrie des matériaux ;
- sensibilité environnementale et du voisinage.

2-2. Roches de faible résistance, intermédiaires et évolutives

Extrait 2

NOTE

Ce groupe comprend les roches de faible résistance (classe R5), les roches de résistance intermédiaire et les roches évolutives (classe R4) telles que présentées dans le tableau « classification des roches pour utilisation dans le remblai », EN 16907-2.

2-2.1 Considérations sur le comportement

La caractérisation de ces matériaux (roches et matériaux présentant un comportement spécial) commence par la dénomination de ces matériaux à l'aide de termes géologiques.

Trois principaux types de roches de faible résistance peuvent être pris en considération :

a) Roches argileuses et évolutives : Ces roches se caractérisent par une structure plus ou moins résistante (fréquemment carbonatée), renfermant une proportion très variable (de 5 à 95 % selon les données généralement constatées) de minéraux susceptibles de gonfler. Les comportements de ces matériaux sont très variables et nécessiteront une étude détaillée afin d'éviter les problèmes à long terme dans les remblais ;

b) Partie altérée de roches dures ou de roches présentant une structure fragile (calcaire, grès, granulats, etc.). Dans ce cas, la roche évoluera plus ou moins pendant les travaux de terrassement, produisant des éléments fins sous les sollicitations mécaniques.

Pour ce matériau, la principale difficulté réside dans l'évaluation correcte du comportement pendant les travaux de terrassement, afin d'éviter une surestimation pendant la phase de conception.

De plus, un minimum de matrice doit être produite pendant les travaux de terrassement, afin d'éviter les contacts entre blocs habituellement pas très durs ;

c) Roches solubles qui ne sont pas prises en considération dans la présente norme. Pour ces roches de faible résistance, des essais couplés doivent être effectués en plus des essais classiques sur les roches, tels que les essais Los Angeles, Micro Deval, de résistance au cisaillement non drainé, de fragmentabilité et de dégradabilité.

Fragmentabilité : cet essai a pour objet de simuler le comportement de la roche pendant les travaux de terrassement. Dans l'attente de procédures d'essais européennes qu'il est prévu de publier, il est possible d'utiliser les normes nationales NF P 94-066 ou NLT-251/91.

Lorsque cet essai montre que la roche devient un sol après compactage, celle-ci peut être classée pour le compactage comme étant le sol obtenu.

Si des blocs subsistent à l'issue du compactage, la dégradabilité doit être vérifiée.

Dégradabilité : le second essai a pour finalité d'évaluer le risque d'évolution du matériau rocheux à l'intérieur du remblai pendant la durée des travaux de terrassement. Dans l'attente de procédures d'essais européennes qu'il est prévu de publier, il est possible d'utiliser les normes nationales NF P 94-067 ou NLT-260/99. Lorsqu'une roche de faible résistance présente une fragmentabilité faible et une dégradabilité moyenne à élevée, le risque d'évolution doit être pris en considération.

Les comportements prévisibles des roches de faible résistance, en tenant compte de l'approche en vigueur en France, sont indiqués en E.3.

2-2.2 Considérations relatives à la conception

Lorsqu'une roche friable se transforme en sol pendant des travaux de terrassement, la conception doit tenir compte du comportement de ce sol pour une utilisation en remblai.

Les roches de dureté intermédiaires conduiront à un remblai constitué de blocs et d'éléments plus petits.

Dans ce cas, le contact direct entre les blocs doit être évité (les éléments plus petits comblant les vides entre les blocs). La conception doit ainsi fournir des spécifications afin d'obtenir un matériau plein.

A minima, il convient que les spécifications s'appliquent à la granulométrie (« distribution granulométrique ») à atteindre dans le remblai après construction (ex. : Dmax inférieur à 63 mm).

D'autres spécifications sont envisageables pour la matrice des matériaux dégradables, qui est la partie fine produite pendant la construction ou après la dégradation à long terme.

Dans ce cas, la conception doit définir la nature et le pourcentage de matrice à produire pendant la construction afin de combler les vides entre les blocs et d'assurer les performances à long terme acceptables pour l'ouvrage en terre.

Concernant les roches argileuses présentant un risque de dégradabilité, la conception du remblai tentera de limiter l'infiltration de l'eau par un drainage efficace de la plateforme, ainsi que par des couches supérieures et inférieures peu perméables.

2-2.3 Excavation et transport

La classification des roches vis-à-vis de l'excavation est présentée dans EN 16907-2 de la présente norme.

Les roches friables et intermédiaires doivent être excavées en tenant compte de la granulométrie finale à obtenir dans le remblai.

Habituellement, les roches friables peuvent être excavées au moyen d'une pelle hydraulique puissante ou avec un défonçage. Un marteau hydraulique peut être nécessaire si l'on s'attend à trouver de la roche peu altérée et dure en faible quantité dans le massif à extraire.

Pour éviter les gros blocs difficiles à réduire après excavation, il peut être judicieux d'utiliser des explosifs (tirs d'ébranlement).

Concernant les roches intermédiaires ayant tendance à produire des blocs pendant les travaux d'excavation et présentant une dégradabilité élevée, un minage adapté est conseillé pour produire le plus possible de matériau bien gradué avant sa mise en œuvre en remblai.

Les roches friables ne présentent généralement pas de difficulté/contre-indications vis à vis de la traficabilité, mais les roches argileuses peuvent être glissantes par temps de pluie.

Pour les roches argileuses, il est également possible de traiter le matériau avec un liant après fragmentation (voir EN 16907-4 pour plus d'informations sur le traitement).

2-2.4 Autres opérations

Les opérations supplémentaires suivantes peuvent être effectuées avant le compactage :

- Réduction de la granulométrie au moyen d'un matériel de concassage, permettant de réduire la taille maximale des éléments. Pour les roches argileuses, un concasseur à mâchoires est recommandé ;
- Réduction de la granulométrie au moyen d'un broyeur de pierres mobile juste avant le compactage.

Cette technique n'est applicable qu'aux roches calcaires.

2-2.5 Édification des remblais

Le matériau doit être déchargé sur la couche déjà étalée et près du front d'avancement. Puis il doit être poussé vers l'avant de la couche et régalié au moyen d'un bulldozer ou d'un matériel équivalent. Cette opération doit être effectuée de manière à éviter toute ségrégation du matériau. Pour éviter la ségrégation, il convient de déverser le remblai rocheux transporté par tombereau à une distance d'environ 5 m (à confirmer par le concepteur) à l'arrière du front du remblai en cours de réalisation puis le repousser vers l'avant au bulldozer.

Dans le cas des roches friables, et en particulier des roches évolutives argileuses, une période de validation doit être envisagée avant de commencer la construction.

Si une validation est effectuée sur le terrain, des planches d'essai doivent être effectuées, conjointement à des essais de laboratoire pertinents, afin de contrôler et, si nécessaire, adapter le procédé de construction.

Pour ces roches, le compactage vise notamment à réduire la granulométrie du matériau.

Ainsi, l'épaisseur de chaque couche doit être adaptée non seulement pour atteindre la masse volumique recherchée, mais aussi pour réduire la granulométrie et fournir la proportion de matrice requise par la conception.

L'objectif est de produire un matériau homogène du haut en bas de chaque couche.

Les rouleaux vibrants lourds peuvent être efficaces pour réduire la taille des éléments ou produire de la matrice, mais à condition que l'épaisseur de la couche le permette.

Si elle est trop importante, la partie supérieure de la couche peut être complètement déstructurée, tandis que les gros blocs qui se trouvent en dessous restent au contact les uns des autres. Ce scénario doit être évité. L'utilisation d'un pied dameur est pertinente au début du compactage uniquement si la roche est suffisamment friable.

La portance moyenne à bonne (module de déformation) habituellement constatée au-dessus des roches de faible résistance et évolutives doit être considéré avec soin. Il convient de noter que les essais de chargement à la plaque sont inefficaces pour détecter un vide interstitiel important dans le remblai.

Le traitement au moyen d'un liant est également possible techniquement dans certains cas (par exemple : traitement à la chaux de roches argileuses).

La règle liée à l'épaisseur de couche, présentée au paragraphe 7.4, doit tenir compte de la réduction du diamètre maximal après compactage.

2-2.6 Assurance et contrôle qualité

À titre de rappel, l'essai Proctor est effectué sur les matériaux d'un diamètre maximum de 20 mm. En outre, les gros éléments peuvent être réduits pendant le compactage. En conséquence, cet essai ou un gamma densimètre n'est pas toujours pertinent pour contrôler les remblais en roche de faible résistance.

Le contrôle de la répartition de la granulométrie et de la masse volumique après la mise en œuvre en remblai est très important pour certaines roches de faible résistance, évolutives et intermédiaires.

Concernant les matériaux dont les éléments ont une taille maximum supérieure à 125 mm, une grande quantité de matériau est nécessaire pour réaliser une analyse granulométrique représentative avec la mesure de la masse volumique in situ associée.

Concernant les roches présentant un risque de dégradabilité, les spécifications doivent être contrôlées par une planche d'essai.

Dans ce cas, la masse volumique, les courbes granulométriques ou d'autres paramètres doivent être contrôlés en tenant compte de la présence de blocs et de petits éléments.

Le volume du matériau à manipuler pour l'analyse granulométrique ou la masse volumique in situ sera élevé (plusieurs centaines de kilos à plusieurs tonnes).

L'essai de terrassement permettra de définir précisément les procédures d'excavation, les procédures de compactage et les autres procédés éventuellement nécessaires pour atteindre le résultat recherché.

Pendant la construction, les analyses de la masse volumique et de la granulométrie seront à effectuer, mais elles ne peuvent être effectuées à chaque couche si la taille maximale des éléments dépasse 63 mm.

Dans ce cas, des essais de chargement à la plaque constituent un moyen indirect de recueillir des indications, mais ils doivent être considérés avec précaution.

2-3 Roches de résistance élevée

Extrait 3

NOTE Les classes des roches de résistance élevée correspondent aux classes R1, R2, R3 définies dans la norme EN 16907-2. Les roches évolutives sont exclues de cette classe.

2-3.1 Considérations relatives à la conception

La conception doit tenir compte du comportement du matériau rocheux selon ses caractéristiques intrinsèques et de sa granulométrie, qui ont par exemple une incidence sur les pentes de talus et les prescriptions de compactage. Il doit être accordé une attention particulière à la granulométrie des matériaux rocheux stratifiés.

Sur les terrains en pente, le pied du talus de remblai et la surface du terrain naturel doivent être terrassés de manière à renforcer la stabilité du remblai.

En règle générale, les roches dures constituent de bons remblais, mais il convient de tenir compte des effets du fluage qui se produisent à long terme sur les remblais de grande hauteur du fait des contraintes élevées au niveau des points de contact entre les blocs.

2-3.2 Excavation et transport

Les roches dures sont généralement minées avant d'être excavées. Il convient que cette opération soit préparée pour obtenir une granulométrie adéquate. Si, après minage, une proportion importante de blocs dépasse la taille maximale, on doit les trier, les fragmenter ou les concasser.

Le minage doit être conçu afin de limiter les effets arrières sur le talus définitif (par ex. : pré ou post abattage).

2-3.3 Construction des remblais

Cette opération doit être effectuée de manière à éviter toute ségrégation accidentelle du matériau. Le remblai rocheux doit être régalé par un bulldozer. Pour éviter la ségrégation, il convient de décharger le matériau rocheux, transporté par tombereaux, à environ 5 m (à confirmer par le prescripteur) à l'arrière du bord de la couche en cours de réalisation puis de le repousser au bulldozer. Ceci est particulièrement important pour la réalisation de la couche finale (supérieure) du remblai.

L'épaisseur de couche doit être adaptée à la finalité du remblai et au matériel de compactage. L'épaisseur de couche ne doit pas, en principe, dépasser 2 000 mm après compactage. Dans certains pays, elle peut être plus réduite.

La taille maximale des blocs ne doit pas dépasser les 2/3 de l'épaisseur des couches.

Si les spécifications le permettent, le matériau rocheux peut être mis en œuvre directement à l'avant de la couche en cours de construction.

Dans ce cas des précautions doivent être prises conformément aux spécifications afin d'éviter la ségrégation. Il convient de noter que cette méthode est habituellement réservée aux remblais paysagers, aux remblais sous l'eau ou aux remblais avec des prescriptions réduites.

Le compacteur vibrant lourd est le matériel le plus efficace pour le compactage des matériaux rocheux, mais il est également possible d'utiliser des plaques vibrantes si l'épaisseur de couche et la taille maximale des blocs le permettent.

Les pratiques varient d'un pays à l'autre. Des exemples sont donnés dans l'Annexe E. Il peut être réalisé des planches d'essai accompagnées d'un suivi topographique au début de la réalisation du remblai, afin de valider ou de définir la méthode de compactage optimale (voir Annexe A).

2-3.4 Remarques complémentaires

Les paramètres suivants doivent également être pris en considération :

- Taille des blocs (inspection visuelle ou autre) ;
- Granulométrie ;
- Éviter la ségrégation pendant la mise en œuvre ;
- Compactage (essais de chargement à la plaque) ;
- Contrôle du matériau pendant la mise en œuvre (par exemple pour chaque couche ou par tranches de 5 000 m³).

3- Classement des groupes de roches pour les terrassements

Référence Norme Européenne « Terrassements » - Partie 3

Extrait : Définitions des groupes de roches

Les matériaux rocheux doivent être classés pour l'utilisation dans des ouvrages en terre au moyen des groupes désignés par les symboles décrits aux Tableaux 6 à 11, qui sont basés sur les propriétés intrinsèques, ou au moyen d'un système national bien établi.

NOTE 1 : Pour l'excavation, les propriétés des massifs rocheux sont définies par les propriétés d'état.

Groupe de roches		Indice de charge ponctuelle I_{s50} En partant de l'hypothèse ($I_{s50} = \sigma_u/25$) MPa	Résistance en compression σ_u MPa	Exemples de roches
Symbole du groupe de roches	Classe de résistance			
RES	Roche extrêmement dure	> 10,0	> 250	roche volcanique, roche plutonique, roche métamorphique
RVS	roche très dure	4,0–10,0	100–250	roche volcanique, roche plutonique, roche métamorphique
RS	roche dure	2,0 à 4,0	50 à 100	grès, calcaire, roche volcanique, roche plutonique, roche métamorphique
RMS	roche moyennement dure	1,0 à 2,0	25 à 50	grès, marne, calcaire, schistes, roche métamorphique
RW	roche fragile	0,2 à 1,0	5 à 25	~roche argileuse, siltite, grès, marne, calcaire, schistes, gypse, houille
RVW	roche très fragile	< 0,2	1 à 5	roche argileuse, siltite, grès et gypse altérés — pierre, charbon
REW	roche extrêmement fragile		0,6 à 1	roche argileuse, siltite et grès altérés

Tableau 6 — Groupes de matériaux rocheux (résistance)

NOTE 2 : D'autres propriétés intrinsèques de la roche utilisées pour la classification peuvent inclure la minéralogie et la masse volumique.

Les matériaux REW et RVW pouvant être dégradables, il convient de réaliser des essais pour confirmer la stabilité des matériaux. Il convient d'utiliser la corrélation spécifique au matériau I_{s50} avec ou si possible.

Après que la roche ait été extraite, elle se comportera comme un sol, généralement un sol grossier ou très grossier, mais avec des quantités variables de fines. Les particules grossières et les fines peuvent être dures et abrasives, fragiles et dégradables ou dures et dégradables.

La classification des roches pour l'emploi en terrassement est donnée au Tableau 7. Les matériaux rocheux sont normalement utilisables dans un ouvrage en terre sauf lorsque les roches sont évolutives ou dégradables.

Ces roches peuvent uniquement être utilisées, en fonction de la conception, en prenant des précautions particulières.

Résistance indicative	Nature géologique	Symbole de groupe	Paramètres (propriétés intrinsèques)					Comportement
			Indice de fragmentabilité	Indice de dégradabilité	Coefficient Los Angeles	Coefficient micro-Deval	Masse volumique sèche	
			I_{FR} (voir la Note 1)	I_{DG} (voir la Note 1)	C_{LA}	C_{MDE}	ρ_d	
Extrêmement élevée	Roches volcaniques et plutoniques	R1 Vo			< 25	< 10		se comporte comme un sol granulaire
	Roches métamorphiques	R1 Me						
Très élevée	Roches volcaniques et plutoniques	R2 Vo			< 35	< 25		
	Roches métamorphiques	R2 Me						
Élevée	Roches argileuses	R3 Cld	< 7	> 5 / > 2		< 45		roche évolutive ou dégradabile
	Toutes autres roches	R3 Xxd a)	< 7	> 5 / > 2		< 45		
	Roches argileuses	R3 Cl	< 7	< 5 / < 2		< 45		roche non évolutive ou non dégradabile
	Calcaire	R3 Li	< 7	< 5 / < 2		< 45		
	Grès	R3 Sa	< 7	< 5 / < 2	< 45	< 45		se comporte comme un sol granulaire
	Conglomérat	R3 Co	< 7	< 5 / < 2	< 45	< 45		
	Roches volcaniques et plutoniques	R3 Vo			< 45	< 45		
	Roches métamorphiques	R3 Me			< 45	< 45		

Résistance indicative	Nature géologique	Symbole de groupe	Paramètres (propriétés intrinsèques)					Comportement
			Indice de fragmentabilité	Indice de dégradabilité	Coefficient Los Angeles	Coefficient micro-Deval	Masse volumique sèche	
			I_{FR} (voir la Note 1)	I_{DG} (voir la Note 1)	C_{LA}	C_{MDE}	ρ_d	
Intermédiaire	Roches argileuses	R4 Cld	< 7	> 5 / > 2		> 45		roche évolutive ou dégradabile
	Toutes autres roches	R4 Xxd a)	< 7	> 5 / > 2		> 45		
	Roches argileuses	R4 Cl	< 7	< 5 / < 2		> 45		roche non évolutive ou non dégradabile
	Calcaire	R4 Li		< 5 / < 2		> 45	> 1,8	
	Grès	R4 Sa	< 7	< 5 / < 2	> 45	> 45		dépendant de la procédure de terrassement
	Conglomérat	R4 Co	< 7	< 5 / < 2	> 45	> 45		
	Roches volcaniques et plutoniques	R4 Vo	< 7	< 5 / < 2	> 45	> 45		
Faible	Roches métamorphiques	R4 Me	< 7	< 5 / < 2	> 45	> 45		se comporte comme un sol après extraction
	Roches argileuses	R5 Cl	> 7					
	Calcaire	R5 Li				> 45	< 1,8	
	Grès	R5 Sa	> 7					
	Conglomérat	R5 Co	> 7					
	Roches volcaniques et plutoniques	R5 Vo	> 7					
	Roches métamorphiques	R5 Me	> 7					

Résistance indicative	Nature géologique	Symbole de groupe	Paramètres (propriétés intrinsèques)					Comportement
			Indice de fragmentabilité	Indice de dégradabilité	Coefficient Los Angeles	Coefficient micro-Deval	Masse volumique sèche	
			I_{FR} (voir la Note 1)	I_{DG} (voir la Note 1)	C_{LA}	C_{MDE}	ρ_d	

Tableau 7 — Groupes de roches pour l'emploi en terrassement

NOTE 1 : Les valeurs de IFR et IDG varient selon la procédure d'essai adoptée.

NOTE 2 : Les roches argileuses comprennent les roches formées de mélanges d'argile et de calcite.

Xx désigne tout autre type de roche au moyen de deux lettres, par exemple Sa pour le grès (sandstone en anglais), Li pour le calcaire (limestone en anglais).

4- Techniques de terrassements des matériaux rocheux

Référence Article « Techniques de l'Ingénieur » - Terrassements / Matériels et exécution

Extrait : TERRASSEMENTS DES TERRAINS COMPACTS ET ROCHEUX

4-1 Introduction

Pour clore cet article, il semble intéressant d'aborder le problème de terrassements des terrains compacts et rocheux, à savoir :

- le défonçage
- le terrassement à l'explosif

Toutefois, dans ces domaines, il serait présomptueux de vouloir donner des règles de calcul de production et de coût de terrassement compte tenu de la complexité des problèmes et de la multitude de cas pouvant se présenter.

Le présent paragraphe ne s'attachera donc qu'à donner un certain nombre d'éléments ou de critères permettant d'orienter le choix des matériels avec quelques indications sur leur rendement et leur limite d'utilisation.

Quant aux coûts, une étude spécifique restera indispensable dans chaque cas.

4-2. Défonçage des terrains compacts et rocheux

La ripabilité des roches peut être définie comme leur aptitude à être désorganisées par les dents d'un équipement de dislocation, avant le chargement par des engins de terrassements classiques (pelles hydrauliques, chargeuses sur pneus, décapeuses).

Le défonçage des roches est un phénomène complexe dont l'efficacité est liée d'une part, aux propriétés mécaniques des roches, d'autre part, à la géométrie de leurs discontinuités.

4-2.1 Prévisions de ripabilité

L'aptitude d'un terrain à la ripabilité est souvent très difficile à cerner, car elle dépend du rendement et de la granulométrie obtenue et escomptée.

En premier lieu, il est donc nécessaire de procéder à un examen minutieux des critères ou des facteurs de ripabilité favorables ou défavorables présentés par le terrain.

En second lieu, il est nécessaire de procéder à des mesures géophysiques.

La vitesse de la propagation des ébranlements sismiques (sismique-réfraction,) fréquemment utilisée pour définir les possibilités de ripabilité ne s'avère pas toujours un critère suffisant.

Il s'agit, en fait, d'une mesure globale qui est fonction de la vitesse du son dans le massif rocheux, de la nature, de la fréquence et de la répartition des discontinuités sans qu'il soit

toujours possible de discerner les éléments essentiels pour la définition des possibilités de ripabilité.

La méthode sismique peut être vérifiée.

On peut procéder à des diagraphies qui permettent un examen de la répartition verticale des vitesses et la mise en évidence de l'homogénéité ou de l'hétérogénéité de la roche, de reconnaissance par tranchées ou des essais en vraie grandeur.

Il faudra donc, avant de décider des quantités de roches qui devront être défoncées, avoir à sa disposition tous les éléments concernant la nature et les caractéristiques de la roche à riper.

On considère, en général que lorsque la production de défonçage d'un tracteur descend en dessous de 120 m³/h, le ripage n'est plus avantageux.

Il peut être plus rentable dans ce cas de mettre un deuxième tracteur en tandem.

On a pu constater que l'utilisation de deux tracteurs, un D 9 H de 410 ch équipé d'un ripper à parallélogramme à une dent en tandem avec un tracteur D 8 K de 300 ch, a permis de défoncer des schistes et des calcaires très durs permettant ainsi une production horaire de 190 m³/h de roche défoncée directement réutilisable en remblai.

Il faut ajouter que ce travail n'a été possible que par la haute qualification des conducteurs d'engins.

Lorsqu'on entreprend une étude de ripage, il est bon de distinguer les critères suivants.

Critères liés au caractère particulier de chaque chantier:

- Rendements : ils doivent être suffisants pour que le travail soit rentable;
- Granulométrie : le défonçage doit permettre d'obtenir la granulométrie imposée par le marché; il peut arriver que dans les roches dures à fissuration dense, la défonceuse détruise l'arrangement des blocs sans réduction appréciable de la granulométrie; si la roche se débite en dalles la défonceuse ébauche seulement leur fractionnement; par exemple les grès tendres se transforment souvent en sable après quelques passes d'engin.

Critères liés à la roche : dans les conditions actuelles d'emploi des tracteurs équipés de défonceuses, on peut estimer que pour un tracteur d'une puissance de 400 à 500 CV., les roches sont ripables dans des conditions favorables s'il existe trois familles de discontinuités espacées à plus de 50 à 80 cm.

Le défonçage des roches stratifiées en bancs continus horizontaux s'effectue normalement si l'épaisseur n'est pas supérieure à 30 cm de roches dures, 50 cm de roches tendres.

La disposition de zones dures non ripables est très importante, telles que :

- présence de blocs,
- zones saines dans la tranche d'altération,
- existence de pilons dans la roche encaissante.

L'état actuel de la mécanisation peut conduire à un recours à l'explosif si les zones non ripables sont dispersées et ne permettent pas au tracteur d'évoluer normalement sur environ 20 à 30 m.

Dans des sols tels que les marnes, la défonceuse pratique une saignée, mais ne disloque pas un volume important de matériaux. De ce fait, de nombreuses passes croisées sont nécessaires (baisse de rendement).

Dans les roches à fissuration dense, la défonceuse désorganise assez facilement le matériau en place sur 1 à 1,5 m de large et sur la hauteur de la dent.

Dans les roches stratifiées horizontalement en bancs continus, la dent de la défonceuse soulève des dalles et provoque des ruptures par traction flexion et cisaillement.

Dans les roches à stratification inclinée les ruptures ont généralement lieu à la pointe de la dent et latéralement par flexion et traction.

Critères liés au matériel :

- puissance du moteur; elle détermine si le tracteur est suffisamment puissant pour faire pénétrer et avancer la dent de la défonceuse ;
- poids du tracteur : il détermine si le tracteur a suffisamment de force de traction pour pouvoir utiliser toute sa puissance;
- pression verticale sur la dent : elle détermine s'il est possible de faire pénétrer la dent de la défonceuse et de la maintenir en position (effort disponible aux vérins de la défonceuse);
- conditions de travail de l'engin : sens du travail, écartement des passes.

4-2.2 Points caractéristiques favorisant la dislocation des roches

Ce sont :

- les fractures.
- les failles,
- les plans de faiblesse de toute sorte,
- l'altération des roches qui résulte des alternances de température et d'humidité,
- les stratifications et laminations intenses. la présence de gros grains dans la roche,
- la nature cristalline et la fragilité des roches.

4-2.3 Choix du matériel de défonçage

Actuellement, il existe trois types de défonceuses hydrauliques portées sur le marché :

- la défonceuse à barre pivotante et oscillante.
- la défonceuse à parallélogramme,
- la défonceuse à parallélogramme réglable.

Défonceuse à barre pivotante et oscillante (à balancier).

La timonerie porte la poutre et la dent pivote autour d'un point fixe situé à l'arrière du tracteur ; l'angle d'oscillation est d'environ 30°, ainsi l'inclinaison de la dent change quand celle-ci attaque le sol (fig. 27a).

La défonceuse comprend une poutre avec un ou plusieurs étriers qui portent chacun une dent (fig. 27 b).

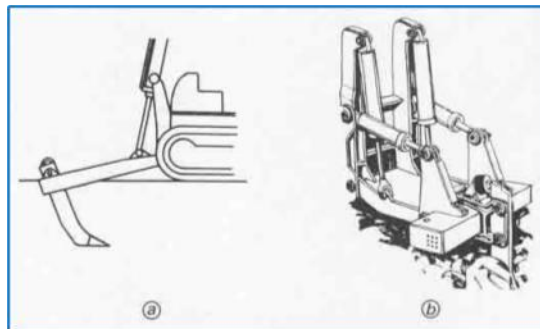


Fig. 27. - Défonceuse à barre pivotante et oscillante.

La plupart des modèles d'étriers comportent aussi un mouvement d'oscillation latérale de 20°, ce qui permet à la dent de contourner les blocs trop durs.

Défonceuse à parallélogramme.

Le système supportant le porte-dent et la dent (ou les dents) permet de conserver l'inclinaison de cette dernière quelle que soit la profondeur de travail et permet, d'obtenir l'angle de pénétration le plus favorable dans la plupart des matériaux défonçables par rippage (fig. 28a).

Lorsque la profondeur de défonçage est atteinte, il permet de rechercher le meilleur angle d'inclinaison en ramenant la dent à la verticale (fig. 28 b).

Défonceuse à parallélogramme réglable.

Ce dispositif associe les avantages de la barre pivotante et du parallélogramme. Il permet, en plus, de faire varier l'angle d'attaque de la dent pour obtenir une pénétration optimale.

Il peut être également manœuvré en marche pour faire varier l'angle d'attaque suivant la pénétration la plus favorable.

Les défonceuses à parallélogramme réglable peuvent être équipées d'une ou plusieurs dents suivant les caractéristiques des matériaux à défoncer (Figure 29).

Enfin le parallélogramme réglable permet une inclinaison de la pointe qui favorise la pénétration dans les matériaux.

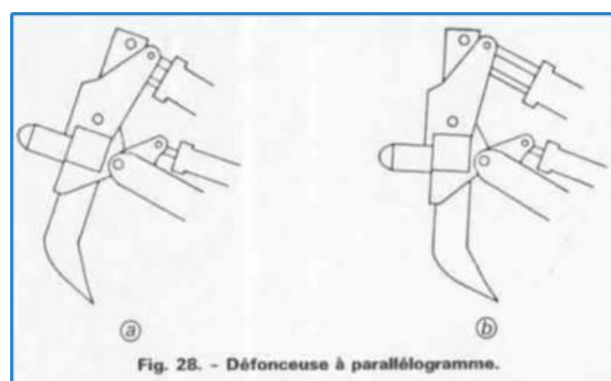


Figure 28 Défonceuse à parallélogramme

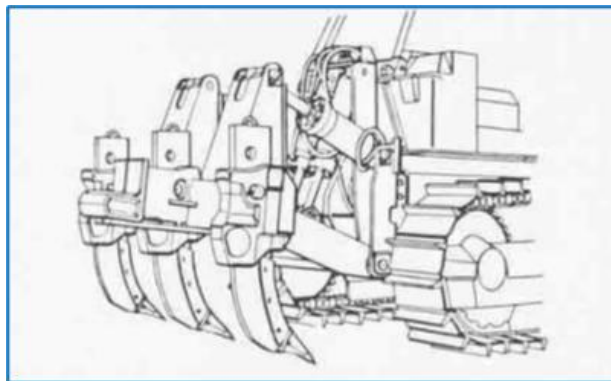


Figure 29 Défonceuse à parallélogramme réglable

Dents.

Ces défonceuses utilisent différents modèles de dents :

- les dents courbes, pour les matériaux peu compacts et bien laminés;
- les dents droites, pour les matériaux formant blocs ou dalles;
- les dents profilées, pour travail rapide, pour tous les matériaux défonçables

4-2.4 Caractéristiques d'utilisation des équipements

Le tableau XXIV donne les caractéristiques d'utilisation des équipements de défonceuses et des tracteurs pouvant être utilisés.

Tableau XXIV. – Caractéristiques d'utilisation des équipements de ripage et estimation de production.													
Puissance du tracteur		Equipements de ripage									Estimation		
		A balancier			A parallélogramme								
					Bras fixes			Bras variables					
		Nombre de dents			Nombre de dents			Nombre de dents			Vitesse de défonçage	Profondeur de défonçage	Largeur des passes
1	2	3	1	2	3	1	2	3					
ch													
200											Entre 1,2 et 1,8 km/h	Suivant type et nombre de dents : entre 0,60 et 1,35 m	Suivant nombre de dents : de 0,50 à 0,90 m dans la roche
230													
270-280													
300													
380													
410													
Tandem 300 + 300													
Tandem 380 + 380													
Tandem 410 + 410													
Tandem 380 + 300													
Tandem 410 + 380													

Nota: les zones hachurées correspondent à des utilisations défavorables de rendement, de défonçage.

Nota: les zones hachurées correspondent à des utilisations défavorables de rendement, de défonçage.

Vitesse de translation du tracteur-défonceur.

Dans la plupart des travaux nécessitant ou permettant le défonçage, le tracteur à chenilles doit être utilisé en première vitesse, ce qui permet d'obtenir une vitesse de déplacement de l'ordre de 1,2 à 1,8 km/h de l'engin.

Toute augmentation de vitesse a très souvent un effet déplorable sur la vie du train de roulement du tracteur et augmente la vitesse d'usure des pointes (ripper).

Nombre de dents sur la défonceuse

Il dépend de la nature de la roche à défoncer. Si celle-ci est peu compacte, l'utilisation d'une défonceuse à deux ou trois dents peut convenir. Si elle est plus dure il faut commencer par une dent. En général, on utilise une seule dent dans les matériaux qui viennent en dalles épaisses et de grandes dimensions.

Profondeur de défonçage

Dans certains cas il est plus intéressant de procéder à un défonçage en grande profondeur (cas dans les matériaux tels que marnes compactes, argiles sèches, certains schistes, et calcaires tendres). Dans les roches plus dures ce n'est pas toujours possible. Dans ce cas, il est préférable d'aller moins profond et de suivre l'épaisseur des couches en place. En effet, si la dent ne peut pénétrer à sa pleine profondeur, l'arrière du tracteur risque de se soulever ce qui provoquera une usure prématurée des barbotins et trains de chenilles.

Ecartement entre passes.

Celui-ci permet de déterminer le niveau de production que l'on peut escompter en calculant le temps nécessaire pour couvrir une zone déterminée. Mais il faut aussi tenir compte de la réutilisation finale du matériau défoncé. En effet, plus l'écartement entre les passes sera faible, meilleure sera, en principe, la fragmentation du matériau.

Lorsqu'il est possible d'obtenir une pénétration de la ou des dents suffisantes, un espacement entre passe de 1 à 1,5 m donne des résultats assez satisfaisants sur le plan de la granulométrie recherchée.

Direction de défonçage

En général le sens du défonçage dépend de la disposition du chantier. Lorsque cela est possible il faut toujours procéder au défonçage dans le sens de la descente pour accroître l'effort de traction du tracteur et son poids. Mais, dans certains cas, il peut s'avérer plus efficace de défoncer dans le sens ascendant pour obtenir plus de pression sur le porte-dents.

Défonçage en tandem

L'utilisation d'un second tracteur pour pousser le premier peut améliorer, dans certains cas, le rendement de défonçage. C'est le cas, par exemple, lorsqu'un passage de roche plus dure ne peut être défoncé par la seule puissance d'un tracteur.

Limites de production du ripage

En général, et l'expérience en est le fruit lorsqu'un atelier de défonçage a une production horaire qui tombe en dessous de 120 à 150 m³/h, le défonçage n'est plus rentable. Si l'on utilise un second tracteur en renfort, le prix de revient va augmenter, mais dans certains matériaux la production risque de s'en trouver fortement accrue.

4-2.5 Reprise au chargement des déblais ripés

Reprise par décapeuses automotrices.

Trois facteurs influencent négativement la reprise au chargement des déblais ripés à l'aide de décapeuses :

- a) la production de blocs après défonçage de plus de 30 à 40 cm de diamètre empêche la fermeture du tablier de la benne ;

- b) les roches disloquées qui forment des arêtes coupantes réduisent la durée de vie des pneus ;
- c) le chargement de roches de plus de 0.50 cm de diamètre nécessite des décapeuses à bennes renforcées ce qui augmente, dans des proportions souvent élevées, le prix de revient de l'opération.

Reprise par pelle ou chargeuses sur pneus.

Les facteurs b et c ci-avant sont également applicables aux autres engins de chargement sur pneumatiques (chargeuses sur pneus, par exemple).

Le chargement des matériaux défoncés s'avère souvent le plus économique lorsque la reprise au chargement s'effectue à l'aide de pelles hydrauliques sur chenilles associées à des tombereaux ou camions de chantier ; néanmoins, il sera nécessaire que la zone de chargement soit dégagée de tout matériau qui s'y serait répandu afin de faciliter l'accès aux engins de transport et d'éviter une usure prématurée des pneumatiques.

Il faut donc prévoir un buteur sur chenilles pour maintenir propre l'aire de chargement.

4-2.6 Calculs de production de défonçage

Exemple de calcul

Prenons le cas d'un tracteur de 410 ch. équipé d'une défonceuse à une dent. Les caractéristiques sont les suivantes :

- largeur entre passes : 0,90 m.
- vitesse moyenne de translation du tracteur : 1,5 km/h,
- pénétration moyenne de la dent dans la roche à défoncer : 0,70 m,
- longueur d'une passe : 100 m,
- temps de manœuvres de tracteur en fin de passe (tous les 100 m): 20 S.

Le défonçage se fait avec un seul tracteur sans pousseur ni buteur.

Estimation de la production.

- Durée pour effectuer une passe (100 m à 1.5 km/h (25 m/min)) : $100/25 = 4$ min.
- Temps de manœuvres à chaque passe (changement de direction et relèvement de la défonceuse) : 20 s soit 0,333 arrondi à 0,34 min.
- Temps total de cycle/passe : $4 + 0,34 = 4,34$ min/passe.
- Efficacité moyenne du tracteur par heure : dans ce type de travail, il faut compter que le tracteur travaille 45 min/h (soit un coefficient d'efficacité de 0,75).
- Nombre de passes que peut effectuer le tracteur en 45 min par heure : = 10,36 passes/h; nous prendrons 10,3 passes/h.

Volume de défonçage/heure

La longueur d'une passe étant de 100 m. la largeur entre deux passes de 0,90 m et la profondeur d'une passe de 0,70 m. le volume défoncé par passe sera de : $100 \times 0,90 \times 0,70 = 63$ m³/passe.

Production nette horaire : $63 \times 10,3 = 648,9$ m³/h.

Compte tenu des imprécisions qui peuvent relever de l'application de ce mode de calcul il est prudent d'appliquer à la production nette (648,9 m³/h) un coefficient minorateur de 0,80 à 0,70.

La production moyenne que l'on peut escompter serait avec un coefficient de 0,75 : $648,9 \times 0,75 = 486,68 \text{ m}^3/\text{h}$ arrondi à 486 m³/h.

Lorsque les vitesses sismiques relevées dans une roche dépassent 1 800 m/s et que le défonçage est effectué avec un tracteur équipé d'une défonceuse à une dent [puissance du tracteur avec boîte Power-Shift (boîte automatique permettant le changement de vitesse sans variation du régime du moteur) de 410 ch], la production nette doit être minorée par application d'un coefficient de 0,50 à 0,55. seront conditionnés également par les données spécifiques au projet : délai d'exécution, mouvement de terres et réemploi des matériaux, phasage des opérations, etc.

Le projeteur chargé d'une étude de prix de terrassement dispose de toutes les informations pratiques et directement utilisables pour évaluer le coût de revient de l'opération.

Compte tenu des imprécisions qui peuvent relever de l'application de ce mode de calcul il est prudent d'appliquer à la production nette (648,5 m³/h) un coefficient minorateur de 0,80 à 0,70.

La production moyenne que l'on peut escompter serait avec un coefficient de 0,75 : $648,5 \times 0,75 = 486,38 \text{ m}^3/\text{h}$ arrondi à 486 m³/h.

Lorsque les vitesses sismiques relevées dans une roche dépassent 1 800 m/s et que le défonçage es effectué avec un tracteur équipé d'une défonceuse à une dent [puissance du tracteur avec boîte Power-Shift (boîte automatique permettant le changement de vitesse sans variation du régime du moteur) de 4 10 ch], la production nette doit être minorée par application d'un coefficient de 0,50 à 0,55.

4-3. Terrassements dans le rocher à l'explosif

4-3.1 Généralités

S'il est à peu près évident qu'il n'existe pas de formule pour déterminer à coup sûr la production et le prix de revient du mètre cube de matériau défoncé à l'aide d'un tracteur équipé d'une défonceuse portée, Il est non moins évident que, dans le domaine des terrassements rocheux à l'explosif, la difficulté est encore plus grande.

En effet, par opposition à l'abattage en carrière où :

- l'apparition sur le marché des matériels de foration ayant des performances de plus en plus élevées,
- les progrès dans la connaissance des mécanismes qui procèdent à la dislocation des roches è l'explosif.
- la mise au point des méthodes de calcul permettant la détermination des charges d'explosifs.
- l'élaboration des techniques d'abattage éprouvées et précises,

sont autant de moyens mis à la disposition du carrier pour estimer de façon précise production et coûts; vouloir ignorer ces moyens pourrait avoir des retombées graves sur le plan de la sécurité, ainsi qu'une influence fâcheuse sur le prix de revient.

Les terrassements dans le rocher à l'explosif sur les chantiers routiers nécessitent la connaissance, par l'ingénieur chargé du projet, de multiples données, en particulier celles concernant :

- le cadre géologique et structural du site : configuration des formations rocheuses rencontrées sur le tracé du projet : tectonique affectant le massif rocheux (failles, discontinuités, plissements) ;
- les caractéristiques physiques et mécaniques des roches à abattre;
- l'hydrologie du site, etc.

Tous ces facteurs nécessitent des études préliminaires et approfondies des sites, sans lesquelles on ne peut entreprendre une étude réaliste de la méthode d'abattage et des coûts des terrassements qui seront conditionnés également par les données spécifiques au projet : délai d'exécution, mouvement de terres et réemploi des matériaux, phasage des opérations, etc.

Le projeteur chargé d'une étude de prix de terrassement dispose de toutes les informations pratiques et directement utilisables pour évaluer le coût de revient de l'opération :

- en effet, pour lui par exemple, la question du réemploi des matériaux dans le cas de déblais est souvent impérative pour équilibrer son mouvement des terres ;
- suivant la destination des produits d'abattage (corps de remblai, couche de forme, etc.), Il imposera alors une granularité des produits obtenus après les tirs :
- les délais d'exécution lui permettent d'estimer les cadences d'abattage.

Si le projet prévoit une traversée en tranchée en déblai rocheux, le problème de la stabilité du talus se posera également.

Il faut donc que le dossier géotechnique lui permette de disposer de toutes les informations sur les critères caractérisant le massif rocheux et les roches rencontrées.

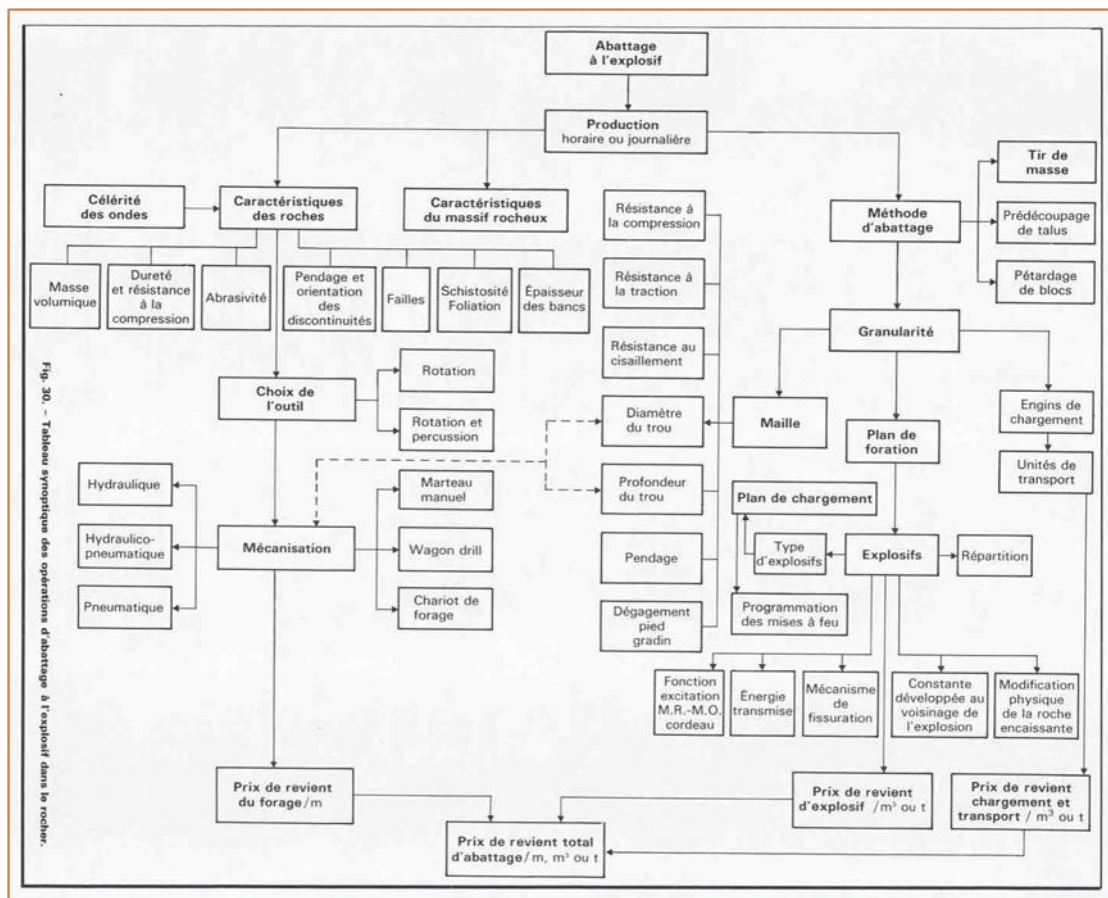
Ces études ne peuvent être réalisées que par des spécialistes géologues, géotechniciens mécaniciens des roches, etc.

Disposant ainsi d'un bon dossier géologique et géotechnique, le projeteur, assisté par les spécialistes, sera en mesure d'apprécier et d'évaluer le coût de cette nature de travaux.

L'étude du minage, basée sur les ordres de grandeur des quantités de roches abattues selon les granularités souhaitées, fournit les éléments du choix des méthodes de reprise au chargement et des engins de transport qui pourront être mis en œuvre pour aboutir aux meilleurs prix de revient.

L'objet de ce qui suit est de donner au projeteur quelques éléments indispensables pour mieux appréhender les paramètres de l'abattage à l'explosif.

La figure 30 Indique les paramètres intervenant dans les opérations d'abattage à l'explosif et la conduite d'une étude de prix.



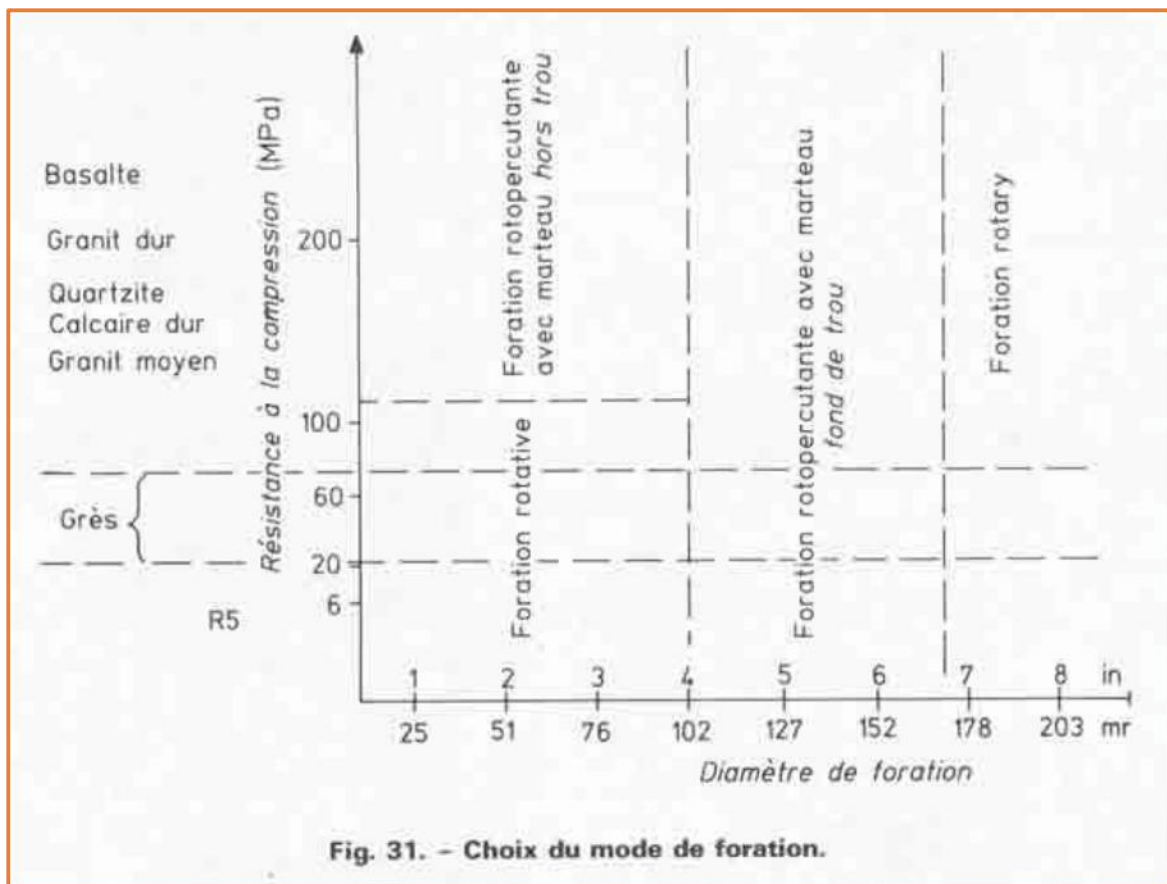
4-3.2 Foration

Choix du mode de foration

Le choix du mode de foration et du matériel dépend de plusieurs facteurs :

- nature des terrains (géologique et tectonique),
- hauteur du front d'abattage (gradin),
- diamètre des trous de forage,
- vitesse d'avancement,
- prix de revient des machines et équipements.
- environnement (niveau sonore et empoussiérage).

Les caractéristiques de résistance et d'abrasivité des roches à forer sont déterminantes pour le choix du mode de foration.



En général (figure 31 :

- dans les roches tendres et pas ou peu abrasives, le mode de foration sera la coupe rotative pour les diamètres ne dépassant pas 100 mm au maximum pour une abrasivité quasi nulle, et d'autant plus faibles qu'une faible abrasivité apparaît ;
- dans les roches résistantes, le mode de foration sera la rotopercussion ; le marteau hors du trou cédant la place au fond de trou lorsque le diamètre devient important (au-dessus de 4 à 6 in) et lorsque l'abrasivité augmente.

La résistance des roches peut être estimée par la valeur de leur résistance à la compression simple ou à la traction indirecte (essai brésilien) pour peu que les essais soient réalisés selon les modes opératoires recommandés.

Il en est de même pour l'abrasivité des roches.

En France, les diamètres des trous de forage couramment utilisés se situent entre 40 et 150 mm

En foration rotative, les machines classiques sont capables de forer des trous à partir de 65 mm jusqu'à 150 mm de diamètre suivant la nature des formations géologiques, en utilisant :

- des outils de coupe à lame au carbure de tungstène pour des diamètres de trous compris entre 60 et 102 mm, voire 152 mm ;
- des marteaux perforateurs hors du trou de 54 à 102 mm voire 127 mm.

Le choix du diamètre est également fonction de la profondeur de foration (hauteur du gradin) :

Il peut atteindre 102 mm pour des gradins de 8 à 10 m et 203 mm pour des gradins de 12 à 30 m.

- des marteaux perforateurs fond de trou pour des diamètres compris entre 102 et 203 mm, voire de 254 mm ;
- des tricônes pour des diamètres de trous supérieurs à 152 mm

Dans les travaux de terrassements à l'explosif dans le rocher, la profondeur des trous varie suivant le travail à exécuter : abattage en grande masse, prédécoupage de talus ou de fouille.

La profondeur dépasse rarement 20 m dans les travaux routiers.

Rappelons à ce sujet qu'en France la hauteur des gradins ne peut dépasser 15 m (sauf dérogation). Cette limitation n'intéresse que l'abattage en carrière.

Dans les Travaux Publics, il n'y a pas de réglementation limitant les hauteurs de gradins : Il est toutefois recommandé, pour des mesures de sécurité, de ne pas dépasser la limite imposée aux carrières.

Mais il est évident que la limitation en hauteur des gradins augmente la part prise par les manœuvres de forage (remontée des tiges, déplacement des machines, etc.).

La durée de ces temps Improductifs est pratiquement doublée si l'on réduit de moitié la profondeur d'un forage.

Choix des matériels

Si l'on doit exécuter des forages de petit diamètre < 40 mm) et si la longueur des forages n'excède pas 6 m, on pourra utiliser des fleurets monoblocs avec des machines du type wagon drill léger- ou mi-lourd.

Lorsqu'on est amené à exécuter des forages d'une longueur supérieure à 6 m et de diamètre compris entre 44 et 115 mm, on utilisera des perforatrices en tête montée sur chariot de forage à pneus automoteur ou tracté, ou encore des chariots de forage sur chenilles automoteurs.

La productivité des différents engins de tarage est un paramètre du choix du matériel qui doit être associé à celui du choix du diamètre de foration afin d'être compatible avec les impératifs de délais et de cadences d'exécution des travaux.

Énergie

On peut classer en deux catégories les sources d'énergie utilisées sur les machines de forage : pneumatique et hydraulique.

L'air comprimé est toujours nécessaire pour assurer le nettoyage du trou et la remontée des cuttings.

L'air comprimé est la forme d'énergie utilisée pour le fonctionnement des machines de forage roto-percutantes qu'elles soient entièrement pneumatiques ou hydrauliques. L'air comprimé est fourni sur les chantiers par des groupes moto- compresseurs mobiles.

Il existe toute une gamme de compresseurs fournissant l'énergie nécessaire (en pression et en débit) pour actionner les différents organes des machines (moteur de percussion, de rotation, de translation, etc.).

Ces matériels permettent d'obtenir des débits d'air réels compris entre 5 et 25 m³ / min avec des pressions de service comprises entre 7 et 25 bars.

On peut considérer que la puissance nécessaire est proportionnelle au débit du compresseur. Suivant les modèles et types, il faut compter 10 à 11 ch. de puissance moteur par mètre cube d'air comprimé à 7 bars en une minute pour les compresseurs mobiles à moteur diesel. Cette puissance peut être ramenée à 7 ou 8 ch. pour les compresseurs fixes à moteur électrique.

La consommation en gas-oil d'un groupe moto-compresseur est de 1,8 à 2 L/h par m³ / min d'air comprimé à 7 bars ou 6 kW/h par m³/min.

Par exemple, un groupe moto-compresseur de 12 m³/min équipé d'un moteur diesel de 134 ch. consommera à l'heure entre 21,6 et 24 L de gas-oil

Dans la pratique, on considère que la consommation horaire en carburant d'un moteur diesel est comprise entre 140 et 180 g/ch-h.

Sur les machines entraînées par groupe hydraulique, l'entraînement du groupe est assuré soit par moteur diesel, soit par moteur électrique.

Sur les foreuses rotatives à entraînement hydraulique, l'utilisation d'air comprimé est néanmoins nécessaire pour assurer le soufflage permettant la remontée des cuttings. Dans ce cas, le compresseur peut être directement monté sur la machine, sinon il faut un petit compresseur mobile.

La puissance du moteur d'entraînement du groupe hydraulique est fonction de la pression d'huile nécessaire pour actionner les différents organes de la machine.

Le choix des compresseurs dépend de la somme de débit absorbé par les différentes machines pouvant être simultanément alimentées par le compresseur.

Pour les machines roto-percutantes, il faut en général un compresseur par machine.

Lorsqu'il s'agit d'équipements plus légers (marteaux manuels ou équipements de forage sur glissières légères) un compresseur peut alimenter un ou plusieurs marteaux manuels et deux équipements légers suivant le débit (en L/s) du compresseur.

Les pertes de charge sont dues :

- à la résistance au frottement dans les tuyaux ; celle-ci dépend de la vitesse de l'air et donc du débit de la pression de l'air, de la longueur des tuyaux et de leur diamètre ; l'opération la plus simple pour réduire les pertes de charge est d'augmenter le diamètre de la conduite de refoulement, mais cette pratique augmente le coût des conduites ; il est donc nécessaire d'utiliser des diamètres de tuyau permettant d'atteindre un équilibre entre des frais d'installation plus élevés et l'économie que l'on peut réaliser en réduisant les pertes de charge :
- aux fuites à travers les joints, robinets, etc. ;
- à des températures élevées de l'air dans le réservoir dues au mauvais fonctionnement des réfrigérants.

4-3.3 Explosifs

Principes généraux du fonctionnement des explosifs en abattage

L'utilisation d'explosifs dans les grands travaux ne se conçoit que si l'explosif est disposé dans des trous réalisés de telle manière que les actions de l'explosion (onde de choc et pressions des gaz) puissent se développer vers une (ou des) surfaces libres.

Le rendement de l'explosif en tirs confinés dits de pré-fissuration est a priori, mauvais.

Une partie de l'énergie explosive libérée par la détonation ($2,95 \times 10^6$ à $5,90 \times 10^6$ J/kg seulement) sert à l'abattage (fissuration et déplacements de la masse abattue).

Le reste est dispersé en chaleur, en vibrations diverses (sismiques et acoustiques) constituant des nuisances qu'il convient de limiter.

Un tir de bonne qualité doit augmenter la part de l'énergie servant à la fragmentation, au détriment de celle qui produit des nuisances.

Afin d'obtenir un rendement optimal des explosifs choisis, il convient :

- d'utiliser le type d'explosif adapté au rocher à abattre,
- de travailler autant que possible en charges continues.
- de répartir au mieux l'explosif dans le massif rocheux en fonction de sa structure,
- de faire détoner les explosifs dans les meilleures conditions, afin de libérer l'énergie explosive escomptée.

Il convient de contrôler attentivement le mode d'amorçage, la programmation dans le temps des mises à feu, la disposition des surfaces libres vers lesquelles se produisent les mouvements de la masse rocheuse abattue et de la faire travailler au mieux.

Caractéristiques des explosifs usuels français

Les caractéristiques les plus utiles aux mineurs sont :

- la vitesse de détonation V_d
- la masse volumique γ_e de l'explosif
- et pour des raisons de sécurité et d'amorçage, le coefficient de self excitation

La densité de chargement correspondant à la quantité d'explosif par mètre cube de trou de mine est égale au produit de la masse volumique de l'explosif par le coefficient de remplissage du trou (pour un explosif en vrac déversé, ce coefficient est égal à 1 et la densité de chargement est égale à la masse volumique de l'explosif).

 $I_r = V_{es} \times \gamma_r$

Nous donnons ci-après les coefficients de vide dans les trous chargés d'encartouchés.

On tient compte également du bilan d'oxygène dans les tirs effectués en galerie pour des questions de ventilation.

Toutes ces quantités sont numérisables et certaines sont même des grandeurs mesurables.

Diamètre foré mm	Diamètre cartouche mm	Vide annulaire rapporté à la section du trou %
32	25	25
40	30	30
51	40	30
64	50	30
76	60	30
89	70	30
102	80	45

Il existe cependant des éléments de choix d'un explosif que l'on convient de classer en tendances bonnes, moyennes ou mauvaises sans pouvoir fixer la limite numérique : il s'agit de la qualité de l'atmosphère après le tir, résistance à l'eau et à l'humidité, tenue à la température, amorçabilité sous pression, conditions de manipulation (exemple : maux de tête provoqués par la nitroglycérine).

Nous avons classé dans le tableau XXV les principaux explosifs utilisés en France (plus de 90 % des consommations de carrières et travaux publics) suivant les critères ci-avant.

De nombreuses autres caractéristiques déterminées au laboratoire peuvent être citées, mais l'incidence de leur variation sur les qualités d'un abattage est difficile à estimer : il s'agit par exemple des notions de brisance (méthode de Hess ou de Kast), de puissance (bloc de Trauzl mortier balistique), utilisées dans le calcul du coefficient d'utilisation pratique {C.U.P.}, de sensibilité à l'impact, à l'amorce ou au frottement.

Une caractéristique, en revanche, peu ou pas fournie par les commerçants, mais connue des fabricants, est intéressante à connaître : il s'agit de la quantité d'énergie libérée par la détonation mesurée lors de tests en piscine.

Tableau XXV. – Caractéristiques des principaux explosifs encartouchés et en vrac.										
Nature des explosifs	CUP %	Vitesse de détonation m/s à $\varnothing$ 30 mm	Masse volumique g/cm ³	CSE cm	Bilan oxygène B.O.	Fumées	Résistance		Amorçabilité sous pression	Prix au 1.3.1984 F/kg
							à l'eau	à l'humidité		
• Encartouchés Dynamites : – Sofranex – Gomme BAM. – Gomme F. 15 – Minex F. 13. S.	144 145 127 110	5500 6500 4500 2800	1,56 1,47 1,54 1,10	12 6 9,5 9	+ 0,82 + 0,03	moyen moyen moyen	bonne bonne bonne	bonne bonne bonne	mauvaise mauvaise mauvaise	16,96 17,15 14,62 11,69
Gels : – Simagel 512 – Simagel 505 – Simagel 5	NS NS NS	4000 4000 4000	1,20 1,10 1,20	4 4 3		très bon très bon très bon	bonne bonne bonne	bonne bonne bonne	mauvaise, risque de préonde	15 14 12,60
Nitrates : – N - 31 R. – N - 30 R. – N - 40 R.	136 132 116	4300 4000 4700	1,15 1,15 1,12	8 6,5 6	- 2 - 0,3	bon moyen	mauvaise mauvaise	mauvaise mauvaise	bonne bonne	13,69 17,75 11,66
• Explosifs en vrac Bouillies (vrac) : – Hydrolite AP. – Sigma 89	$\varnothing$ 80mm NS NS	5650 4000	1,50 1,30		- 8,5	moyen moyen	bonne bonne	bonne bonne	mauvaise, risque de préonde	13,22 14,50
Nitrates-fuels : – N 135 – NF 4 – NF 2 – D 7 Fuel	NS NS NS NS	4050 3500 3400 3000	0,90 0,85 0,80 0,82	0 0 0 0		mauvaise mauvaise mauvaise mauvaise	nulle nulle nulle nulle	nulle nulle nulle nulle	moyenne moyenne moyenne moyenne	6,68 5,45 5,45 5,45

CUP : coefficient d'utilisation pratique. CSE : coefficient de self excitation. NS : non signalé.

Prix hors taxes du kilogramme, par unité d'emballage complète, franco, pour des quantités livrées de 500 à 1000 kg.

Rendement (ou efficience) de l'énergie explosive.

Des travaux entrepris depuis plusieurs années aux États-Unis, au Canada et dans certains pays européens ont montré que la quantité d'énergie explosive, effectivement transmise au rocher, et utilisée pour sa fragmentation par rapport à la quantité totale d'énergie libérée par la détonation, est d'autant plus grande que les caractéristiques de l'explosif sont adaptées à celles du rocher.

Cette adaptation peut être jugée de façon simple par l'expression du rapport des impédances mécaniques de l'explosif et du rocher, dans les conditions du tir.

L'impédance mécanique de l'explosif I_e est exprimée par : $I_e = V_d \times Y_c$

Avec V_d (m/s) vitesse de détonation
 Y_c (g/cm³) densité de chargement

La vitesse de détonation à prendre en compte est celle correspondant aux conditions du trou de mine, en particulier, on tiendra compte du diamètre de la charge (ou du trou pour les explosifs en vrac) ainsi que des conditions de confinement et de l'environnement (présence d'eau, conditions d'amorçage).

La densité à prendre en compte est la densité de chargement Y_c , c'est-à-dire la quantité d'explosif par cm³ de trou de mine : on tient ainsi compte du couplage explosif-rocher puisque la densité de chargement Y_c est égale au produit de la masse volumique réelle de l'explosif par le coefficient de remplissage du trou de mine.

L'impédance mécanique du rocher I_r , est égale à : $I_r = V_{es} \times y_r$

avec V_{es} (m/s) célérité des ondes de compression dans le rocher,
 y_r (g/cm³) masse volumique du rocher.

La célérité des ondes V_{es} à prendre en compte est la célérité des ondes dans le rocher autour du trou de mine à l'échelle à laquelle sera effectué le travail de l'énergie explosive.

Cette célérité est déterminée par des mesures dans la paroi sur des longueurs décimétriques à métriques du forage à l'aide d'une sonde de diagraphe microsismique que (dite aussi improprement sonde sonique ou microsismique de la même façon que la célérité ainsi mesurée est appelée abusivement vitesse du son ou vitesse ultrason).

Elle est ainsi dénommée célérité microsismique V_{es} .

Cette célérité microsismique varie donc avec la nature de la roche, son état de fissuration et la fracturation du massif rocheux.

Le tableau XXVI donne les valeurs théoriques maximales V_{es} que peut prendre la célérité des ondes de compression dans les principales familles de roches.

Il indique également les appellations à utiliser pour désigner la plupart des roches.

Cette célérité microsismique ne doit pas être confondue avec la vitesse sismique obtenue par les mesures de sismique-réfraction (petite sismique).

La masse volumique réelle Y_r de la roche est classiquement déterminée selon des essais normalisés sur des échantillons du rocher. Ces caractéristiques (appellation, masse volumique, célérité des ondes) doivent figurer dans tout dossier géotechnique d'un projet de terrassements (cf article spécialisé de cette rubrique).

Le rapport Z des impédances de l'explosif et du rocher $Z = I_e / I_r$, permet de juger l'adéquation de l'explosif au rocher à abattre. On constate en effet que le rapport de l'énergie utilisée à la fragmentation du rocher sur l'énergie explosive libérée passe par un maximum lorsque la valeur de Z est comprise entre 0,4 et 0,7.

Une fois l'impédance de l'explosif ainsi adaptée à celle des roches à abattre, le dimensionnement du tir peut être entrepris : plan de foration (profondeur, espacement des trous, disposition des rangées). On établit ensuite le plan de chargement (répartition de ou des explosif(s) dans les trous, bourrage) et la programmation des mises à feu dans le temps et dans l'espace (type d'amorçage, répartition des délais de détonation, etc.).

Tableau XXVI. – Terminologie conseillée pour les dénominations pétrographiques et célérités théoriques des ondes.			
Roches éruptives	Famille des granites	Granite, granulite, granodiorite, seynite, microgranite, rhyolite, rhyodacite, trachyte, tuf, etc.	Célérité théorique des ondes m/s
			6 000 à 6 500
	Famille des diorites	Diorite, diorite quartzique, microdiorite, andésite, dacite, trachyandésite, lamprophyre, etc.	6 000 à 6 500
	Familles de basaltes et gabbros	Gabbro, dolérite, diabase, ophite. Basalte, trapp, serpentinite, périodotite.	7 000 à 7 500
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques massives	Gneiss, amphibolites, cornéennes. Quartzite, marbre, calcaire cristallin, leptynite.	6 000 à 6 600
	Roches métamorphiques schisteuses	Schiste, micaschiste, phyllade, ardoise, calschiste, schiste tacheté, schiste cristallin.	6 000 à 7 000
Roches sédimentaires	Roches sédimentaires carbonatées	Calcaire, craie, dolomie, cargneule, travertin.	6 600 à 7 500
	Roches sédimentaires siliceuses	Grès, grès quartzite, molasse, meulière, silex, arkose.	6 000
	Roches sédimentaires carbonato-silicatées	Marne, argile, grauwaack.	de 6 000 à moins de 4 000
	Roches salines	Sel gemme, roches sumfatées (gypse, anydrite), potasse.	5 000

Exemple :

Soit à réaliser l'abattage d'une butte rocheuse dont les caractéristiques sont les suivantes :

- roche gneiss sain, masse volumique $\gamma_r = 2,7 \text{ g/cm}^3$
- massif rocheux très peu fracturé, très homogène, sec,
 - célérité microsismique $V_{es} = 4500 \text{ m/s}$ (valeur moyenne valable sur l'ensemble du déblai),
 - impédance du rocher $I_r = 4500 \times 2,7 = 12150$;
- diamètre de foration retenu : 89 mm, dans un premier temps (en fonction des disponibilités de l'entreprise, des délais et des cadences prévues)

Les explosifs dont on peut disposer ont les caractéristiques suivantes :

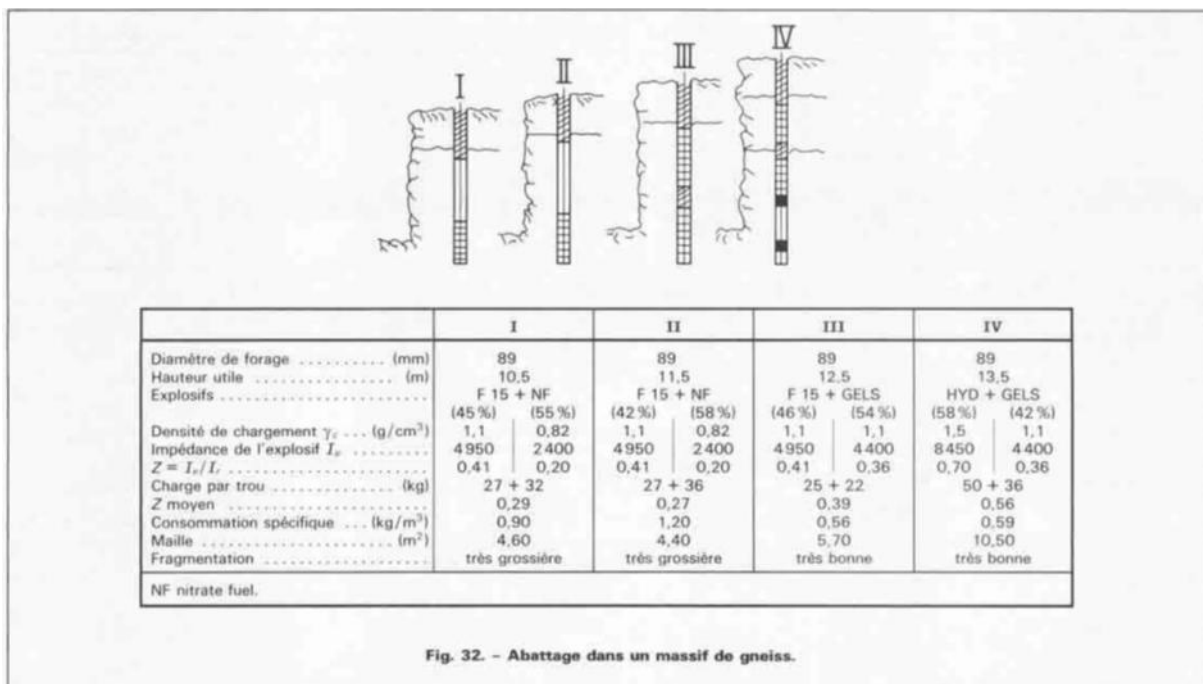
Explosif	V_d m/s	γ_e g/cm ³	Coefficient de remplissage	γ_c g/cm ³	I_e	Z
Gomme F 15	4500	1,54	0,75	1,15	4950	0,41
Nitrate-fuel D 7	3000 (1)	0,82	1	0,82	2400	0,20
Gelsurite 2000 encartouché	4000	1,20	0,9 (2)	1,08	4400	0,36
Hydrolite AP	5650	1,50	1	1,50	8450	0,70

(1) On a pris la vitesse de détonation en $\varnothing$ 89 mm. En $\varnothing$ 152 mm elle serait de 4200 à 4500 m/s environ
(2) On estime que les cartouches de gel sont plus déformables et qu'elles remplissent ainsi plus le trou.

Les tirs d'essais ont été réalisés dans les conditions indiquées sur la figure 32.

En conclusions

- la combinaison classique F 15 + nitrate-fuel est inadaptée dans les conditions testées (le nitrate-fuel est desservi par le diamètre trop faible qui lui impose une vitesse de détonation trop faible, ce handicap n'est pas compensé par le très bon couplage fourni par l'usage en vrac),
- la réduction de la maille et l'augmentation de la consommation n'amènent aucune amélioration du résultat ;
- la bouillie est bien adaptée, seule ou en association avec le gel ; cela mène à un rendement excellent et autorise une adaptation extrêmement favorable du plan de foration.



Analyse des consommations d'abattage

En fonction de la pente de foration : de façon générale, la réglementation française interdit de forer avec une inclinaison supérieure à 20° par rapport à la verticale. Il y a très souvent intérêt à profiter au maximum de cette limite (en sachant qu'à l'étranger cette limite est parfois poussée à 35°), les avantages principaux étant les suivants :

- meilleure tenue des gradins,
- meilleure fragmentation pour une consommation d'explosif donnée,
- économie de longueur forée,
- diminution de l'overbreak (cassure ou brèche dans la roche).
- meilleure sortie du pied de front.

On convient que les économies d'explosifs sont voisines de 1 % par degré d'inclinaison de la foration et que ce pourcentage. Tous autres paramètres bloqués, peut monter à 10% du coût des opérations de fragmentation (foration + tir + broyage).

L'inclinaison optimale de 45°, si elle était réalisable, serait du point de vue mécanique la solution qui assurerait le meilleur rendement.

En fonction de la maille de foration et du diamètre foré : la maille de foration est toujours liée au diamètre du trou et à la hauteur d'abattage.

En explosif encartouché, pour tenir compte du coefficient de vide annulaire réglementaire pour le passage du cordeau détonant, on peut admettre les valeurs suivantes :

Diamètre de foration mm	Surface de maille m ²
30	0,5 à 1
40	1,5 à 2,5
51	2,5 à 4
64	3,5 à 6
76	6,0 à 10
89	10,0 à 15
102	16,0 à 25
152	25,0 à 40

A partir du diamètre de 76 mm et lorsqu'on utilise de l'explosif en vrac, les surfaces des mailles peuvent être augmentées de 20 % environ.

Parallèlement, la consommation augmentera elle aussi et pour fixer les idées, on admettrait pour un gradin de 10 m. tous autres paramètres constants, les consommations suivantes :

Diamètre de foration mm	Consommation g/m ³
32	250 à 300
64	300 à 350
76	350 à 400
102	400 à 450
152	450 à 600

En fonction de la surface de la maille et de sa forme : le rapport de l'espacement entre trous E et de l'épaisseur de la tranche à abattre V est généralement de 1 (maille carrée pour les tirs d'essais).

Dans le déroulement du chantier, il est courant de constater les modifications suivantes :

E/V croît de 1 à 1,2 pour obtenir un abattage de granulométrie plus fine et une consommation d'explosif qui peut diminuer de 10 % environ. Inconvénient : l'arrière des fronts est parfois

fissuré et des têtes apparaissent après l'enlèvement des déblais entre les remplacements des trous.

E/V décroît de 1 à 0,8 pour obtenir des blocs plus importants qui proviennent de la devanture. Inconvénient : les tirs sont souvent réalisés en limite de charge (consommation insuffisante) à la limite du raté et les pieds sortent mal.

4-3.4 Techniques particulières pour améliorer la tenue des talus réalisés à l'explosif

L'objectif réalisation d'une face stable s'ajoutant à l'objectif évacuation d'un vide : Les techniques d'abattage doivent être adaptées à l'obtention de ces deux objectifs.

Tirs d'abattage

Pour minimiser les dégâts infligés aux talus restant en place. la première méthode est de réaliser des tirs d'abattage de la masse correctement dimensionnés et soigneusement contrôlés, afin que le minimum d'énergie explosive soit envoyée dans le talus en pure perte de rendement et y provoque des dégâts. En particulier, on optimisera les consommations d'explosifs et :

- on évitera les tirs bloqués ;
- on assurera un dégagement correct des produits abattus en avant des tirs, ainsi qu'un mouvement dans la direction des faces libres de la masse rocheuse par une bonne répartition des détonations ;
- on limitera la charge instantanée par numéro de retard pour assurer un régime de détonation à faible niveau.

Toutes ces précautions, garantes d'un bon fonctionnement du tir de masse, limitent en même temps les dégâts au talus en place. Pour réduire plus encore ces derniers, des techniques de tir particulières seront utilisées en association étroite avec les tirs de masse : le résultat final dépend des soins amenés à la réalisation de l'ensemble des opérations. Il s'agit :

- des tirs d'abattage amorti (cushion blasting ou buffer blasting);
- des tirs de prédécoupage (pré-splitting ou préclivage ou pré-shearing);
- des tirs de post-découpage (ou post-abattage ou abattage à paroi lisse ou smooth blasting).

Il est le plus souvent avantageux, pour assurer l'obtention du résultat, d'associer plusieurs de ces techniques.

Abattage amorti

A l'approche de la ligne finale d'excavation, les plans de foration et de chargement du tir de masse sont modifiés sur les trois à cinq dernières rangées : diamètre, banquette et espacements sont réduits de même que les charges instantanées sans que soit modifiée la consommation spécifique sauf pour la dernière rangée de trous vers le talus (dits trous de coussin ou trous amortisseurs) qui sont mis à feu les derniers.

La mise à feu a lieu avec le tir de masse ; la méthode n'introduit qu'un surcroît de foration.

Prédécoupage

Tir particulier mis à feu avant le tir de masse, il correspond à une rangée de trous faiblement espacés (la banquette étant quasi infinie) dont la mise à feu simultanée entraîne la formation d'une fissure courant d'un trou à l'autre. La réussite du tir impose une grande rigueur de mise en œuvre :

- le plan de foration très précis doit être soigneusement exécuté et contrôlé : les trous doivent être rigoureusement parallèles, coplanaires et équidistants ;
- le chargement des trous implique des charges faibles, bien réparties et très découpées : il doit lui aussi être bien contrôlé ;
- la mise à feu des trous d'une même ligne doit être simultanée.

Le dimensionnement des tirs de prédécoupage (tableau XXVIII se fait à l'aide de tirs d'essais de quelques mètres carrés, en prenant pour base les indications classiques mises au point par les Suédois (Langefors, Gustafsson) dans des massifs continus de granite sain et résistant et en utilisant un explosif de type Gurite (vitesse de détonation 4 500 m/s: masse volumique 1,3 g/cm³).

Les consommations spécifiques d'explosifs (exprimées par mètre carré de surface découpée) seront :

en  50 mm, de 330 à 500 g/m² pour une foration de 2,2 à 1.35 m/m²;

en  89 mm, de 700 à 1000 g/m² pour une foration de 1.4 à 1 m/m .

Des modifications considérables peuvent être apportées à ces recommandations à la suite des essais dans des conditions de rocher et de massif souvent très différentes.

Tableau XXVII. - Dimensionnement des tirs de prédécoupage et post-découpage dans un massif homogène et continu de granite sain et résistant pour un explosif type Gurite [d'après Langefors] (1).

Tableau XXVII. – Dimensionnement des tirs de prédécoupage et post-découpage dans un massif homogène et continu de granite sain et résistant pour un explosif type Gurite [d'après Langefors] (1).					
Diamètre des trous mm	Diamètre de la charge mm	Concentration de la charge g/m	Prédécoupage Espacement des trous m	Post-découpage	
				Espacement des trous m	Banquette m
30	11	70	0,20 à 0,30	0,50	1,60
37	17	120	0,30 à 0,50	0,60	2,00
44	17	170	0,30 à 0,50	0,60	2,00
50	22	250	0,45 à 0,75	0,80	2,60
62	22	350	0,55 à 0,80	1,00	3,30
89	25	700	0,70 à 1,00	1,40	4,60
100	29	900	0,80 à 1,20	1,60	5,20
125	40	1400	1,00 à 1,50	2,00	6,60
150	50	2000	1,20 à 1,80	2,40	9,80
200	52	3000	1,50 à 2,10	3,00	11,20

(1) Explosif type Gurite: $V_d = 4500$ m/s; $\gamma_d = 1,3$ g/cm³.

Post-découpage

La technique de post-découpage (ou abattage à paroi lisse) est très proche de celle du prédécoupage, mais la ligne de trous limitant le talus est tirée après la mise à feu du tir de masse, soit au cours de la même séquence, soit au cours d'une séquence séparée. Dans ce dernier cas, le dégagement des produits abattus est généralement réalisé, et l'on parle alors plutôt de post-abattage ou abattage différé, d'autant plus s'il reste une certaine tranche à abattre.

La rigueur de réalisation et la nécessité du contrôle est tout aussi impérative ; le dimensionnement se fait également en tirs d'essais à partir des indications de Langefors et Gustafsson (tabl. XXVII) qui sont à adapter aux conditions de rocher et de massif rencontrées.

Les consommations spécifiques au mètre carré découpé sont légèrement plus faibles qu'en prédécoupage :

en  50 mm : 320 g/m² (de Gurite) pour 1,25 m/m² de foration

en  89 mm : 500 g/m² (de Gurite) pour 0,72 m/m² de foration

L'épaisseur de la banquette correspondante pouvant atteindre respectivement 2,60 m et 4.60 m.

Conclusion

Il est souvent nécessaire d'associer ces techniques. Par exemple :

- une surface (bien) prédécoupée sera efficacement protégée par un tir d'abattage amorti à l'approche de cette surface associé au tir de masse, lui-même dimensionné correctement ;
- un post-abattage sera efficace si le massif dans lequel on le tente n'est pas déjà désorganisé par le tir de masse, d'où la nécessité d'un tir de masse bien contrôlé, associé le cas échéant à un abattage amorti à l'approche du talus provisoire qui sera lui-même post-abattu.

ANNEXE 7



EMPLOI OPTIMAL DES ENGINS DE TERRASSEMENTS

TABLE DES MATIÈRES ANNEXE 7

1. GÉNÉRALITÉS / CRITÈRES DE CHOIX DES MATÉRIELS
2. GAMMES DE MATÉRIELS DE TERRASSEMENT
3. FACTEURS DÉTERMINANT LA PRODUCTION DES ENGINS
4. CALCUL DE LA PRODUCTION DES ENGINS
5. TRANSPORT DES MATÉRIAUX
6. MATÉRIELS ANNEXES A LA PRODUCTION
7. EXEMPLES DE DOCUMENTS TECHNIQUES DES FOURNISSEURS DE MATÉRIELS

ANNEXE 7

Référence : Article Techniques de l'Ingénieur - « Terrassements – Matériels et exécution », par Pierre CHINA - Ingénieur Sétra

Extraits

1- Généralités / Critères de choix des matériels

1-1 Activité des terrassements

Les terrassements généraux représentent, en moyenne, entre 30 et 40 % du montant d'une opération routière, donc en général, la part la plus importante.

De plus, la nature des problèmes d'ordre technique liés à l'hétérogénéité des sols rencontrés ou d'ordre climatique rend leur maîtrise difficile.

Les sols suivant leur nature et leur état, sont souvent très sensibles aux conditions météorologiques lors de leur extraction et de leur mise en œuvre.

La prise en compte des différents paramètres qui les affectent nécessite de la part de l'auteur du projet une vive préoccupation à tous les degrés des études et de l'exécution des travaux.

Ces considérations impliquent que le responsable d'un projet de terrassement ait les possibilités d'appréhender :

- les conditions d'utilisation des sols en fonction des conditions climatiques dans les hypothèses extrêmes et probables d'exécution du chantier
- les domaines d'utilisation des matériels qui pourront être mis en œuvre sur le chantier pour obtenir le degré de qualité recherché

Une bonne connaissance des applications des engins, de leur capacité de production et de leur prix de revient est indispensable tant au niveau des études, du jugement des offres que de l'exécution des travaux.

1-2 Déroulement des opérations de terrassement

Sans faire une analyse exhaustive du déroulement d'une opération de terrassement, il paraît souhaitable de rappeler brièvement les points essentiels intervenant dans ce déroulement.

Projet du maître d'œuvre

On se reportera à l'article Terrassements, Projet dans cette rubrique.

Étude de l'entreprise

Le responsable d'une étude de terrassements doit pouvoir apprécier les différents volumes de production qui devront être atteints et le potentiel de matériel qu'il faudra mettre en œuvre pour s'en approcher au maximum dans les meilleures conditions d'exploitation et de rendement possibles.

La recherche des moyens à mettre en œuvre doit permettre :

- d'évaluer les volumes de production par unité de temps et les rendements des matériels qu'il faut utiliser pour respecter les délais ;

- d'étudier les prix de revient des tâches principales dans les meilleures conditions de production.

A partir des pièces du dossier de consultation, l'entreprise devra faire le choix des matériels à utiliser en fonction :

- a) des différentes masses de déblais à exécuter ;
- b) de la nature des déblais à exécuter (meubles, rippables, etc.) ;
- c) du nombre de jours possible de travail (suivant les hypothèses météorologiques retenues, et la période d'exécution) ;
- d) des mouvements de terres (correspondance entre déblai- remblai, déblai-dépôt, emprunt-remblai).

Le plan du mouvement des terres n'est pas imposé par le maître d'œuvre à l'entrepreneur, car il dépend des moyens et des méthodes que ce dernier choisira ; et des sujétions particulières du chantier :

- ordre préférentiel d'exécution,
- date limite de libération partielle,
- emplacements mis à disposition,
- itinéraires de transport imposés,
- conditions d'exploitation des voies.
- interruptions de chantier. etc.

Il lui sera alors possible de définir :

- le volume total théorique des déblais à réaliser et la production théorique journalière.
- la production réelle à envisager pour chaque type de matériel,
- le nombre des machines nécessaires pour faire face à cette production,
- les dépenses correspondantes.

Suivi de l'exécution des travaux

A l'exécution des travaux, un certain nombre de variations peuvent intervenir et amener des bouleversements très importants dans les prévisions faites par le responsable du projet.

Le mouvement des terres peut notamment varier fortement en fonction des conditions climatiques au moment des travaux.

Une actualisation des prévisions de l'étude et une adaptation des conditions de travail et de l'organisation du chantier sont alors nécessaires.

Il peut aussi évoluer pour d'autres raisons :

- correctifs d'évaluation de la puissance des emprunts utilisables ;
- correctifs dans le réemploi des déblais en remblais ;
- correctifs dans le classement de certains sols, donc dans leurs conditions d'utilisation ;
- changements intervenus dans le projet.

Il peut toutefois en résulter un bouleversement du mouvement des terres qu'il convient donc de tenir à jour au fur et à mesure.

Les changements intervenant dans le mouvement des terres peuvent remettre en cause la bonne adaptation des matériels si les distances de transport ont évolué, ou si de nouvelles natures de sols présentent des conditions d'extraction ou de réutilisation particulières.

Le problème d'adaptabilité a tout naturellement une incidence sur les rendements, c'est-à-dire à la fois sur les délais d'exécution et sur les coûts. Les adaptations peuvent de plus, conduire à des niveaux de qualité différents de ceux initialement escomptés.

Au vu de ces quelques éléments sur le déroulement d'une opération de terrassements, il importe que le responsable du projet puisse, tant au niveau de la conception que du suivi de l'exécution, avoir les informations nécessaires à une bonne approche des problèmes posés par le choix des matériels et la détermination des coûts d'utilisation.

L'objet de cet article est donc d'apporter les éléments essentiels pour faciliter cette approche.

1-3 Généralités sur les matériels de terrassements

Sur les chantiers routiers, il y a toujours une mécanisation importante mais c'est surtout au niveau de l'exécution des terrassements que l'on rencontre la plus forte concentration en matériels.

En effet, il n'est pas rare de constater que le poids économique du matériel mis en œuvre suivant la taille du chantier représente entre 30 et 50 % du montant des terrassements.

Sur certains grands chantiers, la valeur de remplacement du parc de matériel peut même atteindre le chiffre d'affaires annuel du chantier.

Dès lors, on se rend compte de l'importance du facteur matériel dans la réalisation de ce type de travaux.

De plus, le choix technique et l'exploitation qui sera faite des matériels sont capitaux, car ils conditionnent la qualité d'exécution et le prix de revient des terrassements.

Il importe donc, avant de choisir le matériel, d'adopter la méthode adéquate à mettre en œuvre de manière efficace et d'avoir étudié avec soin tous les éléments qui la composent :

- distances de transport ;
- nature, qualité et volume des matériaux à déplacer ;
- conditions climatiques ;
- qualité des pistes de circulation des engins ;
- délais d'exécution des travaux, etc.

Du soin que l'on aura apporté à l'étude de ces éléments, base de toute étude de terrassements, dépendra la qualité d'exécution des travaux et le bilan économique du chantier.

L'objet du présent paragraphe est de rappeler :

- les critères techniques qui doivent conduire à la détermination et au choix du matériel idéal adapté à la nature du marché à exécuter : en principe, le matériel qui sera réellement mis en œuvre sur le chantier dépendra surtout de la disponibilité de celui-ci dans l'entreprise, mais ce dernier devrait quand même se rapprocher le plus possible du matériel adéquat ;

- les différents types de matériels utilisés dans le domaine des terrassements avec leur spécificité.

1-4 Qualités fondamentales des engins de terrassements

Les qualités fondamentales des engins mécaniques de terrassements peuvent se résumer de la façon suivante :

- efficace : pour être efficace, le matériel doit être capable d'effectuer le travail prévu dans des conditions données; c'est le critère technique;
- fiable : il doit être en parfait état de fonctionnement pour effectuer le travail prévu ; c'est le critère mécanique ;
- économique : il doit être capable de réaliser les différentes tâches pour lesquelles il est prévu au moindre coût : c'est le critère économique et financier ;
- intégré : il doit s'intégrer dans une politique d'ensemble d'équipements ; c'est le critère lié à la politique générale de l'entreprise.

1-5 Classification des matériels

En général, les chantiers de terrassements nécessitent des mouvements de matériaux divers, que l'on peut mettre en œuvre à l'aide de nombreux engins, qui peuvent se classer en deux grandes catégories d'équipements : les équipements fixes ou semi-fixes et les équipements mobiles.

Équipements fixes ou semi-fixes

Ces systèmes s'appliquent principalement aux déplacements de volumes importants. Il s'agit :

- des grands draguelines sur chenilles ou sur béquilles,
- des grands excavateurs à godets multiples,
- des roues-pelles,
- des bandes transporteuses.

Les deux premiers types de matériels sont spécialement conçus pour des opérations d'extraction à grand rayon.

Ils conviennent bien à l'excavation des terres meubles et des matériaux alluvionnaires sous l'eau (creusement de canaux, tranchées de grande profondeur), ou pour exploitation de mines à ciel ouvert.

Les bandes transporteuses sont surtout utilisées sur longue distance (quelques kilomètres) et en continu pour le transport des matériaux excavés à partir de gros excavateurs (godets multiples et roues- pelles).

Équipements mobiles

Il s'agit principalement :

- des boteurs,
- des chargeuses,

- des décapeuses.
- des pelles hydrauliques.
- des niveleuses.

Ces équipements mobiles présentent trois qualités principales : souplesse de travail, vitesse de mise en service, flexibilité des investissements.

Souplesse de travail

La généralisation, sur les engins modernes, de l'hydraulique et de l'électronique permet :

- l'augmentation de rendement,
- l'accroissement de la sécurité,
- la diminution de la fatigue par la robotisation des servitudes de la machine (asservissements, par exemple).

Ces matériels du fait de leur mobilité, présentent une plus grande souplesse d'utilisation pour se déplacer d'un point à un autre du chantier.

Souvent leur polyvalence fait qu'ils sont aptes à effectuer de nombreuses tâches de nature différente, comme les tracteurs sur chenilles par exemple, ou les pelles hydrauliques qui peuvent recevoir plusieurs types d'équipements.

Vitesse de mise en service

Pour la plupart, les équipements mobiles n'ont pas les servitudes des gros équipements fixes (démontage et remontage) lors des déplacements.

Les équipements mobiles, une fois à pied d'œuvre, peuvent être, dans la majorité des cas, mis en service en quelques heures.

Flexibilité des investissements

Les équipements mobiles permettent souvent de conjuguer les problèmes d'ordres technique et économique, selon qu'il s'agira d'un engin spécialisé (type décapeuse par exemple) ou polyvalent (type tracteur à chenilles ou pelle hydraulique).

Ainsi, le choix de l'investissement dépendra-t-il des orientations de l'entreprise.

Si elle est spécialisée dans un domaine bien particulier, son programme d'investissement sera orienté en fonction de cette tendance.

Si elle désire rester polyvalente, elle préférera sans doute acquérir des matériels dont les possibilités d'utilisation seront plus grandes.

Différents types de matériels

Dans les équipements mobiles, on distingue deux types de matériels :

- les engins sur chenilles.
- les engins sur pneumatiques.

Les engins sur chenilles sont relativement lents, cependant, ils ont un excellent comportement sur les sols de faible portance et disposent d'une très bonne adhérence pour pousser, tirer ou soulever de lourdes charges.

Les engins sur pneumatiques ont des vitesses de déplacement bien supérieures à celles des engins sur chenilles. Du fait de leur grande vitesse de déplacement, ils peuvent passer beaucoup plus facilement d'un chantier à un autre.

Les engins mobiles sont surtout utilisés sur les chantiers de terrassements en tant que matériel de chargement, transport, refoulement et poussage.

Cependant, la pression au sol des pneumatiques est bien supérieure à celle des chenilles et l'adhérence est plus faible sur la plupart des sols, sauf en ce qui concerne les terrains qui s'opposent à la pénétration des roues des chenilles.

Le bon rendement des engins sur pneus est lié de très près à l'état des pistes de circulation qui doivent toujours être maintenues en bon état pour obtenir le maximum de production de ces engins.

Les équipements mobiles sont ceux qui correspondent le mieux aux chantiers de terrassements routiers où le morcellement des ouvrages à réaliser, la dimension des chantiers et les difficultés d'acheminement des matériels se prêtent mal à l'usage d'aussi gros engins que ceux utilisés en équipements fixes.

La suite de ce chapitre ne traitera donc que des équipements mobiles.

1-6 Définition des critères de choix

Les critères de choix du matériel doivent permettre de conduire à la détermination du matériel le mieux adapté à la nature du travail à réaliser.

1^{er} critère.

Il concerne le mode d'extraction :

- extraction sans transport,
- extraction avec transport sur courte distance,
- extraction avec transport sur longue distance.

2^{ème} critère.

Il détermine le mode d'extraction ou de chargement en fonction de la nature et de la dimension des matériaux.

3^{ème} critère.

Il concerne le mode d'extraction en fonction de la teneur en eau des matériaux au chargement (matériels sur chenilles ou sur pneumatiques),

4^{ème} critère.

Il concerne le choix du matériel en fonction de la distance de transport entre les lieux d'extraction et de mise en œuvre.

5^{ème} critère.

Il concerne la taille et le nombre d'unités de matériels à mettre en œuvre, en fonction de la production horaire ou journalière à assurer.

6^{ème} critère.

Il concerne le choix des matériels de transport en fonction du rapport poids/puissance selon le profil en long du chantier.

7^{ème} critère.

Il concerne le choix du matériel en fonction des contraintes dimensionnelles ou des charges par essieu pour le franchissement des ouvrages d'art.

Enfin, signalons les critères mécaniques qui sont liés au bon fonctionnement du matériel.

Il s'agit essentiellement :

- de la chaleur et du froid : les moteurs peuvent avoir des rendements plus ou moins bons ;
- de l'altitude : en altitude, les moteurs qui ne sont pas turbochargés perdent de leur puissance ;
- des poussières : sur certains chantiers, les machines utilisées en ambiance poussiéreuse (chantier de traitement à la chaux par exemple) nécessitent des protections spéciales ;
- de la pluie et de l'humidité : les machines nécessitent également des protections spéciales.

Ces critères mécaniques ne sont pas à négliger, car ils occasionnent souvent sur le chantier, des baisses de rendement ou des pannes de machines. Toutefois, ils ne sont généralement pas pris en compte au niveau des études de terrassement.

Dans certains cas, le choix du matériel est limité à un nombre restreint de machines (cas de petits chantiers, par exemple). De ce fait, il est souvent nécessaire de sacrifier la productivité à la polyvalence.

A l'opposé, dans le cas d'engins nombreux et variés, il faudra s'attacher à ce que chaque machine convienne exactement au travail à exécuter pour obtenir le prix de revient le plus faible possible.

Le paragraphe suivant donne les applications typiques de chaque engin.

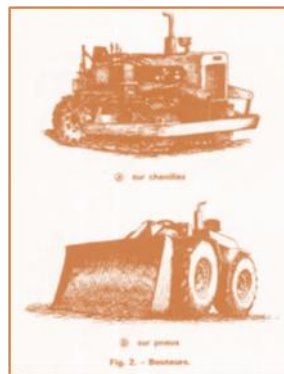
2- Gammes de matériels de terrassement

2-1 Matériel de production

Bouteurs et tracteurs sur chenilles

Les bouteurs sur chenilles sont des machines relativement lentes qui ont un excellent comportement sur sols de faible portance. Leur compacité et le fait que tout leur poids repose sur les chenilles, leur excellente mobilité et la très bonne adhérence que leur confèrent les chenilles en tous terrains en font l'engin de base de tout chantier de terrassement.

Ils sont utilisés à de multiples tâches : défrichage, dessouchage, déblaiement et remblaiement, réglage de matériaux, poussage de décapeuses, etc. ; équipés d'une défonceuse hydraulique portée à une ou plusieurs dents, ils sont parfaitement adaptés à la scarification des sols compacts aux roches mi-dures, ainsi qu'au défonçage.



Bouteurs sur pneus

Les bouteurs sur pneus (fig. 2b) sont des machines excellentes sur les terrains qui ont une bonne adhérence. Ils se déplacent plus vite que les bouteurs sur chenilles.

Utilisés comme pousseurs, ils impriment à la décapeuse une plus grande vitesse au sortir de la coupe.

Les lames à amortisseurs permettent d'accélérer le contact avec la décapeuse en évitant les chocs brutaux.

Issue soit directement du tracteur agricole, soit du chargeur à chaînes. La forme des chargeuses sur pneus a connu une certaine évolution.



Elles sont utilisées à l'extraction et au transport des matériaux meubles, lorsque les distances de transport n'excèdent pas 150 à 200 m.

Mais ces machines doivent être considérées comme engins de reprise au chargement. En terrassement, l'association chargeuse sur pneus + tombereaux de chantier ou camions est très répandue.

L'augmentation de la capacité des godets et de celle des bennes de tombereaux est un facteur d'économie et de compétitivité des chargeuses sur pneus. Les chargeuses sur chenilles sont utilisées pour le défonçage de routes, chargement de camions et de trémies.

Avec un godet tous travaux, elles peuvent être utilisées comme boueur, benne preneuse, chargeuse. D'autres équipements frontaux permettent le défrichage et le chargement de bois.

Décapeuses automotrices

Décapeuses à un avant-train moteur conventionnelles



Les décapeuses à un avant-train moteur conventionnelles sont les plus répandues sur les chantiers de terrassements routiers (fig. 4). Ces machines s'adaptent bien à des travaux et matériaux divers.

En général, on peut les considérer comme économiquement rentables quand le chantier s'y prête, c'est-à-dire :

- si la zone d'utilisation n'excède pas 2000 m environ ;
- si les déclivités des itinéraires de transport sont peu importantes, si la résistance au roulement est faible et si les conditions d'adhérence sont normales.

Pour ce qui est du chargement des matériaux, on enregistre les meilleurs rendements avec ces machines :

- dans les sols meubles non évolutifs et peu sensibles à l'eau ;
- dans certains sols compacts après ameublissement par scarification, cas par exemple des argiles raides et sèches.

Enfin, elles peuvent convenir au chargement des roches défoncées lorsque le ripage ne produit pas de blocs de plus de 30 ou 40 cm de diamètre, ce qui aurait pour conséquence d'empêcher une bonne fermeture du tablier de la benne.

Un autre facteur déterminant dans le chargement des roches défoncées est l'agressivité de certaines d'entre elles vis-à-vis des pneus, les éléments coupants pouvant mettre rapidement hors d'usage les flancs et bandes de roulement des pneus. C'est le cas, par exemple, des argiles à silex.

Pour finir sur les applications de ce type de machine, il faut rappeler qu'elles sont incapables de se charger seules. En effet, l'adhérence des roues du train-moteur sur le sol n'est pas suffisante pour assurer un chargement efficace et économique.

L'assistance est généralement assurée par un ou deux tracteurs, le plus souvent à chaînes.

Décapeuses à élévateur

Les décapeuses à élévateur (figure 5) ne se chargent pas comme les conventionnelles. Le matériau à charger est pelleté par un élévateur à chaînes muni de raclettes dans la benne de la machine.



De ce fait, l'équipement autochargeur les rend entièrement autonomes, mais, de par leur conception, elles sont limitées au chargement des sols meubles et homogènes.

Elles sont vivement à déconseiller dans les matériaux à forte proportion de graviers ; ceci :

- en raison de l'effort de traction important que doit développer la machine pendant le chargement ;
- de la faible adhérence des pneus sur ce type de matériau ;
- des frais d'entretien supplémentaires de l'élévateur qui pourraient en découler.

Du fait de leur autonomie, elles sont prédisposées tout particulièrement aux travaux de finition ou de nettoyage du chantier. Ce type de machine peut être monomoteur ou bimoteur, mais les modèles mono-moteur sont les plus répandus.

Décapeuses bimoteur

Les décapeuses bimoteurs {figure 6} ont une plage d'utilisation allant jusqu'à 1 500 m environ. Sur ces machines les quatre roues sont motrices, ce qui se traduit par une plus grande puissance et une meilleure adhérence sur terrains mous et boueux.



De plus, l'effort de traction supplémentaire dont elles disposent leur permet de graver de fortes pentes, 35 à 40 %, même en pleine charge.

Néanmoins, tout avantage se paie, et le prix de revient d'exploitation de ces machines est plus élevé que celui des décapeuses conventionnelles.

Au chargement, leurs deux moteurs ne suffisant pas à les rendre autonomes, elles ont besoin, comme les décapeuses conventionnelles, d'être poussées par des tracteurs.

Pelles hydrauliques sur chenilles et sur pneus.

Ces matériels offrent une série d'avantages intéressants. Outre leur possibilité de travail en poste fixe qui les rend compétitives avec d'autres engins de chargement, la diversité de leurs équipements en fait des machines polyvalentes encore jamais égalées.

Enfin, elles se distinguent des autres engins de chargement (chargeuses sur chenilles ou chargeuses sur pneus, par exemple) par trois caractéristiques principales :

1) Commande hydraulique de l'équipement

La commande hydraulique de l'équipement permet le remplissage du godet sans aucun déplacement de la machine.

Seuls les équipements sont mis en mouvement (flèche, balancier, tourelle, etc.). Ceci permet le cavage soit en pied de talus, soit à des hauteurs variables du front de taille qui peuvent aller jusqu'à 9 m suivant le type de pelle.

Le déchargement du godet ne se fait pas par déplacement de la machine, mais par rotation de la tourelle de la pelle, ce qui permet de diminuer le temps de déversement.

2) Chargement des matériaux

Plus ceux-ci sont compacts et cohérents, plus il est économique d'utiliser une pelle lorsque les conditions de travail de l'engin le permettent. Lorsque celle-ci est équipée en rétrocavage, le banc de déblais à excaver peut être découpé en tranches de 5 à 8 m de largeur. Ce mode de travail évite les temps morts de mise en place l'arrivée et au départ des engins de transport.

3) Régularité de la production

Avec un angle de rotation de 45°, une pelle en rétrocavage avec godet de 2 m³ peut charger un tombereau de 30 t de charge utile en 4 min environ.

En déblai rocheux par exemple, l'organisation du chantier dépend avant tout :

- de la nature de la roche à extraire.
- de la profondeur d'excavation.
- de la disposition des lieux et du choix de la machine.

Enfin, quelle que soit la méthode d'excavation qui sera retenue (équipement butte ou rétrocavage, celle-ci aura un coût proportionnel au degré de consolidation de la roche en place.

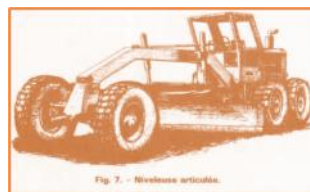
Quand les roches en place sont trop dures pour être excavées directement par des pelles hydrauliques, il faut avoir recours à l'explosif pour fragmenter la masse rocheuse, c'est le cas de certaines roches telles que : gneiss non altéré, calcaires durs, grès fortement cimentés, etc.

L'abattage à l'explosif doit alors fournir un volume tel qu'il permette la reprise de chargement de tas de hauteur suffisante pour assurer un remplissage maximal du godet de la pelle.

Niveleuses

A l'heure actuelle le parc des niveleuses comprend essentiellement des niveleuses articulées (figure 7).

Elles sont utilisées à tous les niveaux de construction des routes depuis les terrassements, jusqu'à la mise en œuvre des matériaux, des corps de chaussées.



Les niveleuses à châssis articulé sont parfaitement adaptées aux travaux délicats qui demandent une grande précision dans les tolérances d'épaisseur lors de la mise en œuvre des couches de matériaux (couche de forme par exemple), ou pour les travaux de finition.

Elles peuvent alors être dotées d'équipements spéciaux tels que le guidage par fil pour dresser une plate-forme ou assurer une épaisseur de régalaie constante.

Ces machines peuvent être également équipées de scarificateurs placés devant la lame (scarification des couches de chaussées par exemple), ou à l'arrière de la machine pour l'ameublissement des sols.

2-2 Matériel de transport

Tombereaux à deux essieux

L'apparition sur le marché de gros engins de chargement, qu'il s'agisse de chargeuses sur pneus ou de gros excavateurs sur chenilles, a provoqué le développement, il y a quelques années, de grandes unités de transport. C'est au cours de cette période que les distances de transport se sont allongées sur les chantiers de terrassement.

Parallèlement à l'élévation de la charge utile des décapeuses, celle des camions lourds de chantier d'aujourd'hui peut atteindre 100 et même 250 t de charge utile.

Néanmoins, la capacité de chargement des camions de chantier (figure 8) utilisés en terrassements routiers se situe autour de 30 à 40 t de charge utile.



Tombereaux articulés.

Les premiers modèles de tombereaux articulés (capacité d'alors 15 à 22 t) furent surtout utilisés sur des chantiers de petites et moyennes importances.

Ce n'est plus le cas depuis de longues années avec le lancement d'unités plus importantes (25 à 50 t de charge utile) qui permet d'élargir leur champ d'utilisation aux chantiers plus importants et plus variés.



Ce type de matériel ne peut pas être considéré comme un concurrent direct du tombereau classique de 35 t sur des pistes de transport en bon état.

Par contre, c'est en mauvais terrain qu'il offre les meilleures performances, car il est bien adapté avec ses trois essieux aux conditions de travail sur sols mous et boueux.

3- Facteurs déterminant la production des engins

3-1 Généralités

Dans les travaux de terrassements, les mouvements de matériaux (d'excavation, déblais, remblais) s'expriment normalement par le volume de matériau à déplacer.

On a bien souvent l'habitude de caractériser l'importance d'un chantier en parlant toujours de milliers ou de millions de mètres cubes, alors que l'essentiel est de déplacer des mètres cubes.

Dans ces conditions, le mètre cube n'est pas l'unité de terrassement à retenir, Il faut parler de mètre cube par kilomètre.

Il faut également retenir la notion de mètres cubes en place. bien que pour l'entrepreneur ce soient finalement des mètres cubes foisonnés qu'il ait à transporter et qui déterminent la capacité des engins.

En général, les entreprises font toujours leurs calculs de production en évaluant les quantités de matériaux à déplacer à partir de leur densité en place.

Ceci, pour deux raisons essentielles :

- le mode de rémunération est basé sur le prix du mètre cube de matériau en place,

- il est beaucoup plus facile de déterminer les mètres cubes en place d'un chantier que les mètres cubes foisonnés transportés par kilomètre correspondant réellement aux travaux.

Dans ce qui suit, tous les calculs de production sont donc ramenés au mètre cube de matériau en place.

3-2 Capacité de travail des engins. Excavation. Transport

Pour être en mesure de mener à bien une étude de terrassements et calculer la production des engins d'extraction, transport, mise en œuvre, il est indispensable de connaître et de pouvoir apprécier certains facteurs agissant sur les limites d'application de tel ou tel engin.

Un grand nombre de ces facteurs dépendent des caractéristiques et de la conception même d'un engin déterminé, alors que d'autres résultent du choix de l'engin.

La capacité de production des engins d'excavation et de transport est en général déterminée par trois facteurs principaux :

- aptitude au chargement des matériaux,
- durée de cycle des machines,
- durée effective du travail des machines.

3-3 Aptitude au chargement des matériaux

Sur le plan de la production et des rendements, on dit qu'un matériau a une bonne aptitude au chargement s'il est facile à terrasser par les engins.

On peut, en première estimation, considérer que la plupart des sols meubles entrent dans cette catégorie.

Les sols sableux, limoneux peu plastiques, les éboulis argilo-calcaires, les alluvions non consolidées peuvent être également considérés comme des matériaux faciles à terrasser et à charger.

On dit qu'un matériau a une mauvaise aptitude au chargement s'il est difficile à terrasser par les engins.

On peut considérer que les roches mal fragmentées, les terrains collants, les sols plus ou moins consolidés selon leur degré de cimentation, certains terrains qui doivent être scarifiés ou rippés avant chargement, sont des matériaux qui ont une mauvaise aptitude au chargement.

3-3.1 Foisonnement des matériaux

On entend par foisonnement l'augmentation de volume d'un sol après extraction. Il s'exprime en pourcentage du volume de matériau en place.

Le foisonnement peut être particulièrement faible pour les sables et les sables fins pour lesquels il est de l'ordre de 10 à 15 %.

Par contre, dans le rocher il peut atteindre 80 à 90 voire même 100 % ; dans certains terrains argileux, on observe parfois des foisonnements presque aussi importants lorsque ces

matériaux sont découpés en lamelles ou copeaux qui s'enroulent véritablement dans les bennes des décapeuses.

3-3.2 Coefficient de remplissage

Le coefficient de remplissage tient compte du foisonnement des matériaux et de l'effet de paroi du matériel utilisé en fonction de la nature et de l'état du matériau considéré.

Pour les godets de pelle l'effet de paroi peut être important alors que pour les décapeuses il est négligeable. Pour ces derniers matériels, le coefficient de remplissage n'interviendra pas (on ne tiendra compte dans les calculs de production que de la capacité à ras de la benne).

Le [tableau 1](#) donne des valeurs moyennes des coefficients de remplissage pour quelques types de sols.

Tableau I. – Coefficients de foisonnement et de remplissage de quelques types de sols.								
Classe R.T.R.	Dénomination R.T.R. (2)	Types de sols le plus fréquemment rencontrés	Densité en place t/m ³	Coefficient de foisonnement	Densité foisonnée t/m ³	Coefficient de remplissage des godets (1)		
						Pelles	Chargeuses	
A	Sols fins	Limons peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,40	1,260	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Limons très plastiques	1,7 à 1,9	1,35 à 1,55	1,240			
		Loëss	1,5 à 1,7	1,20 à 1,30	1,280			
		Arènes peu plastiques	1,7 à 1,9	1,30 à 1,45	1,310	0,75 à 0,85	0,85 à 0,95	
		Argiles et marnes peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,45	1,240			
		Argiles et marnes très plastiques	1,7 à 2,0	1,40 à 1,60	1,250			
		Marnes	1,8 à 2,4	1,30 à 1,40	1,560	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Sables fins argileux	1,8 à 2,1	1,25 à 1,35	1,500			
		Sables fins peu argileux	1,6 à 1,8	1,10 à 1,15	1,510			
B	Sols sableux ou graveleux avec fines	Silts	1,5 à 1,7	1,10 à 1,20	1,390	0,90 à 1,00	0,95 à 1,00	
		Sables silteux	1,6 à 1,8	1,05 à 1,15	1,545			
		Graves silteuses	1,7 à 2,0	1,10 à 1,20	1,610			
		Graves peu argileuses	1,8 à 2,1	1,10 à 1,20	1,695			
		Graves argileuses	1,7 à 2,0	1,15 à 1,25	1,540			
		Graves très silteuses	1,6 à 1,9	1,15 à 1,25	1,460			
C	Sols comportant des fines et de gros éléments	Argiles à silex	1,9 à 2,2	1,30 à 1,45	1,490	0,75 à 0,85	0,75 à 0,85	
		Argiles à meulière	1,8 à 2,1	1,30 à 1,45	1,420			
		Éboulis	1,8 à 1,9	1,40 à 1,50	1,275			
		Moraines	1,8 à 2,0	1,40 à 1,50	1,310			
		Roches altérées	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520			
		Alluvions grossières						
D	Sols et roches insensibles à l'eau	Sables alluvionnaires propres	1,6 à 1,9	1,05 à 1,15	1,590	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Sables de dunes	1,4 à 1,5	1,00 à 1,10	1,380			
		Graves alluvionnaires	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520			
		Roches non évolutives						
		Calcaires durs	2,2 à 2,8	1,40 à 1,60	1,660	0,40 à 0,75	0,60 à 0,75	
		Granit	2,4 à 2,9	1,40 à 1,60	1,770			
		Porphyres	2,6 à 2,9	1,40 à 1,60	1,830			
		Grès durs	1,9 à 2,7	1,40 à 1,60	1,530			
		Basalte	2,7 à 3,0	1,40 à 1,60	1,900			
E	Roches évolutives	Craies	1,5 à 2,3	1,30 à 1,50	1,360	0,60 à 0,75	0,60 à 0,75	
		Schistes	1,9 à 2,3	1,30 à 1,50	1,500			
F	Matériaux putrescibles et polluants	Terre végétale	1,2 à 1,4	1,07 à 1,15	1,170	0,60 à 1,00	0,60 à 1,00	
		Humus forestiers	0,7 à 1,1	1,20 à 1,25	0,730			
		Tourbes	0,3 à 0,9	1,00 à 1,10	0,570			

(1) Les valeurs indiquées dans le tableau sont approximatives et ne sont données qu'à titre indicatif. Elles devront être précisées dans chaque cas, notamment pour les sols sensibles à l'eau.

(2) R.T.R. Recommandations pour les terrassements routiers (cf article *Terrassements. Matériaux* dans cette rubrique).

(1) Les valeurs indiquées dans le tableau sont approximatives et ne sont données qu'à titre indicatif. Elles devront être précisées dans chaque cas, notamment pour les sols sensibles à l'eau.

(2) R.T.R. Recommandations pour les terrassements routiers (cf article *Terrassements. Matériaux* dans cette rubrique).

3.4 Durée de cycle des machines

Elle se décompose en temps fixes et en temps variables.

3-4.1 Temps fixes

Dans le cycle complet d'une machine, le temps fixe représente toutes les opérations autres que les transports aller et retour.

Il comprend les temps de chargement, de déchargement, de manœuvres, etc. qui sont sensiblement constants quelle que soit la distance à laquelle le matériau est transporté.

Ces temps fixes sont évidemment fonction de la nature du matériel, mais aussi de son mode d'utilisation, de son équipement et de la nature du matériau à extraire.

L'organisation du chantier doit être faite pour réduire le plus possible ces temps de cycle en respectant les règles suivantes :

- chaque fois que possible, les aires d'emprunts doivent être situées de façon que le chargement puisse se faire en descente (cette remarque s'applique à tous les engins de chargement forcés comme les décapeuses) ;
- éliminer les temps d'attente au chargement en proportionnant correctement, pour les conditions considérées, le nombre d'engins de chargement et celui des engins de transport.

Il faut donc choisir le matériel d'assistance à un engin de chargement (pelles, chargeuses sur pneus, chargeuses sur chenilles, pelleteuses-chargeuses, etc.) en tenant compte d'un bon équilibre entre les capacités du matériel de chargement et celui de transport.

Ce point est très important pour obtenir de bons rendements. mais aussi parce que c'est pratiquement toujours le matériel de chargement qui conditionne le nombre d'unités de transport à mettre en œuvre.

3-4.2 Temps variables

C'est le temps pendant lequel un engin transporte sa charge d'un point à un autre. Celui-ci varie évidemment avec la distance qui sépare le point de chargement et le point de déchargement.

Il faut déterminer avec soin le ou les parcours que devront emprunter les engins de transport. En fait, l'organisation des circuits est l'un des aspects les plus importants dans une étude de terrassements.

Il est parfois plus rentable d'allonger le tracé que devra emprunter un engin, plutôt que de lui faire gravir de nombreuses rampes.

Différents facteurs agissent sur les temps de cycle variables, ils peuvent être décomposés comme suit :

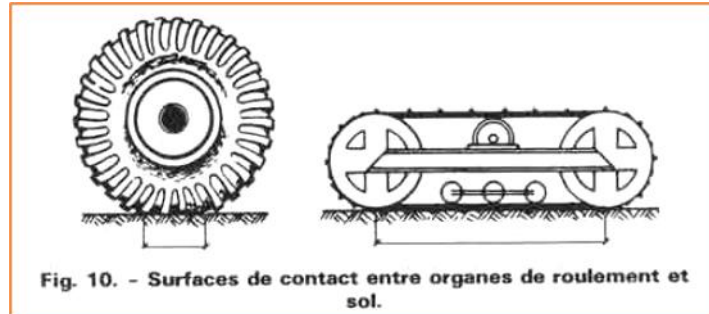
- poids total en charge des engins de transport,
- résistance au roulement et résistance à la pente,
- adhérence,
- vitesse moyenne.

Influence du poids total en charge des engins de transport.

Il faut vérifier la charge utile. On appelle charge utile le poids total qu'un engin peut transporter sans dépasser les limites prescrites par le constructeur et pour lequel la machine aura des performances satisfaisantes.

Les charges utiles sont indiquées sur les fiches de spécifications des machines par les constructeurs.

Lorsque l'on est amené à manutentionner ou à transporter des matériaux lourds qui pourraient dépasser la charge utile à pleine capacité de l'engin, le cubage en place estimé doit être réduit afin que la charge transportée ne soit pas supérieure à la charge utile nominale.



Influence des résistances au roulement et à la pente

Résistance au roulement : C'est la force opposée par le sol à la progression des roues d'un véhicule.

Cette résistance est composée de la force horizontale suffisant à entretenir le mouvement du véhicule sur une surface horizontale, plane, unie et indéformable et des efforts compensant le frottement des divers organes de transmission (coussinets, axes, roulements, transmissions), les inégalités du sol sur lequel le véhicule se déplace, la flexion des pneus, leur pénétration et le poids sur les roues.

Tous ces éléments sont fonction des caractéristiques mécaniques de la surface de roulement et du poids total du véhicule.

On exprime la résistance au roulement à l'aide d'un coefficient K (en kg/t) appelé coefficient de traction.

Dans le cas d'un engin de terrassement correctement entretenu, on peut estimer que les effets dus aux frottements internes engendrés par les frictions à l'intérieur de la transmission, depuis le volant moteur jusqu'aux roues et la flexion des pneumatiques, sont constants.

D'après une règle communément admise dans l'industrie, on considère que les effets précités correspondent à 2 % du poids brut de la machine. 2 % du poids total en charge équivalent à 20 kg/t, ce qui veut dire qu'il faut exercer un effort de traction de 20 kg/t pour faire avancer la machine sur un sol dur et uni.

Il s'agit là d'une valeur constante valable pour la plupart des machines sur pneumatiques

Notons que la résistance au roulement des engins sur pneumatiques, qui varie suivant l'enfoncement des pneus dans le sol, est une caractéristique du comportement d'un engin sur un sol donné et non une caractéristique de ce sol.

Effet de la résistance au roulement sur les engins à chaînes

Il est pratiquement nul. En effet, les machines à chaînes transportent leur propre chemin de roulement et celui-ci est donc réputé dur et lisse. Seuls sont à prendre en compte les frottements internes dus aux organes de transmission.

Dans le cas d'un tracteur à chenilles, la chenille s'agrippe sur le sol et permet de développer des efforts de traction largement supérieurs à ceux que peuvent fournir les roues.

La figure 10 montre dans les deux cas la différence de surface de contact qui existe entre les organes de roulement et le sol.

Résistance au roulement. Calculs

La formule ci-après permet de calculer la résistance au roulement d'un tombereau de chantier :

$$R_r = 9,81 (0,02 + 0,006 e) m$$

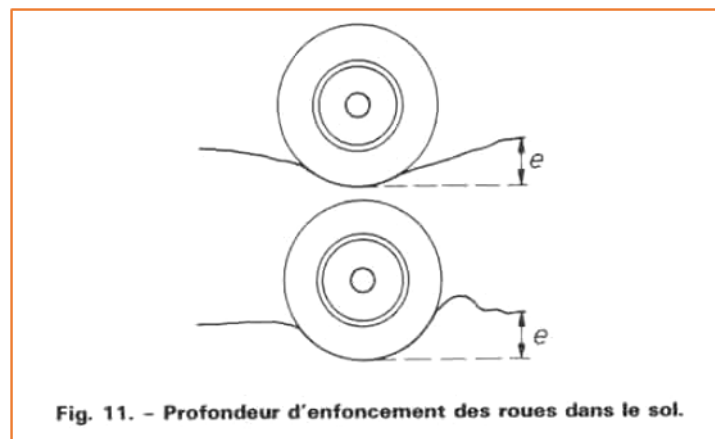
avec

R_r (kN) résistance au roulement,

m (t) masse totale de la machine,

e (cm) profondeur d'enfoncement des roues dans le sol (figure 11).

$(0,02 + 0,006 e)$ coefficient de roulement.



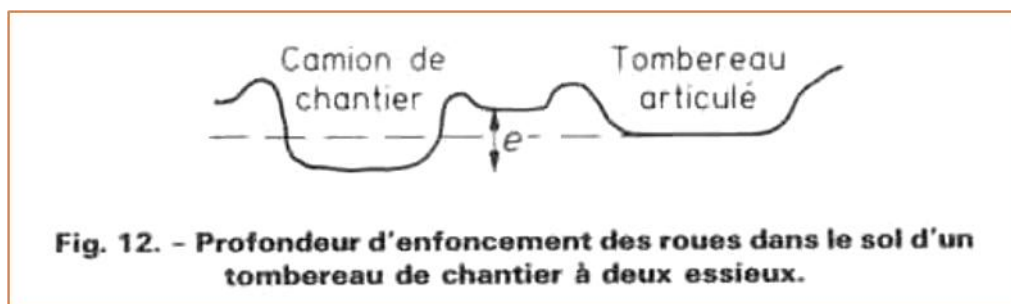
La formule montre clairement que sur mauvais terrains l'enfoncement des pneus dans le sol est la cause essentielle de la résistance au roulement des engins de transport.

Il en est de même pour les sols qui cèdent sous la charge.

Cas des tombereaux articulés : pour tenir compte du moindre enfoncement des roues dans le sol des tombereaux articulés, on utilise la valeur suivante du coefficient de roulement :

$$(0,01 + 0,004 e)$$

La valeur de e étant celle des tombereaux de chantier à deux essieux de type classique par laquelle on juge habituellement la difficulté d'un sol (figure 12).



C'est sur l'empreinte d'un camion de chantier qu'on estime la difficulté d'un sol.

La résistance des tombereaux articulés peut donc être calculée par la formule :

$$R_r = 9,81 (0,01 + 0.004 e) m$$

Le tableau II donne les valeurs de quelques coefficients de roulement, selon les conditions de sol et d'enfoncement, des pneus des tombereaux de chantier relevés habituellement.

Tableau II. – Coefficients de roulement des camions de chantier et tombereaux articulés.			
Conditions de sol	e cm	Coefficient de roulement camions de chantier	
Route arrosée, entretenue, à revêtement stabilisé, dur et lisse, ne cédant pas sous le poids du véhicule	0	0,020	0,010
Route en terre ou à revêtement léger, arrosée, assez bien entretenue, sol ferme et lisse cédant légèrement sous le poids du véhicule	2	0,032	0,018
Route en terre, à ornières, peu ou pas entretenue, non arrosée, cédant sous le poids du véhicule	3	0,038	0,022
	5	0,050	0,030
	8	0,068	0,042
Route en terre molle, non stabilisée, pas entretenue, à ornières	10	0,080	0,050
	12	0,092	0,058
	16		0,074
Route en sable ou gravier non compacté	16		0,074
Sol mou, boueux, pas entretenu, à ornières	20		0,090
	25		0,110

Résistance à la pente

Il est d'usage, dans les études de terrassements, de rapporter cet effort dû à la pente à un supplément de résistance au roulement sur parcours horizontal.

Cette résistance s'exprime normalement en pourcentage de poids total de l'engin. Elle est donnée par la formule :

$$R_p = 9,81 \alpha m$$

avec

R_p (kN) résistance à la pente,

α (m/m) pente moyenne du parcours,

m (t) masse totale de la machine.

La pente (rampe) est exprimée en pourcentage, en degré ou en mètre par mètre.

On trouvera dans le tableau III une table de conversion entre ces différents modes d'expression avec la valeur de résistance de la pente correspondante par tonne de poids brut de l'engin.

Tableau III. – Résistance à la pente R_p .							
Différentes expressions de la rampe			$R_p = 1000 \sin \alpha$ (1)	Différentes expressions de la rampe			$R_p = 1000 \sin \alpha$ (1)
$1/\alpha$ m/m	%	α degré		$1/\alpha$ m/m	%	α degré	
1/1000	0,1	0° 3'	1	1/30	3,3	1° 54'	33
1/500	0,2	0° 6'	2	1/25	4	2° 17'	40
1/400	0,25	0° 9'	2,5	1/20	5	2° 51'	50
1/333	0,3	0° 11'	3	1/16,6	6	3° 26'	60
1/250	0,4	0° 14'	4	1/14,3	7	4° 0'	70
1/200	0,5	0° 17'	5	1/12,5	8	4° 34'	80
1/167	0,6	0° 20'	6	1/10	10	5° 41'	100
1/143	0,7	0° 24'	7	1/8	12,5	7° 7'	124
1/125	0,8	0° 27'	8	1/6,7	15	8° 31'	148
1/111	0,9	0° 31'	9	1/6	16,7	9° 34'	166
1/100	1,0	0° 34'	10	1/5,5	18	10° 12'	177
1/80	1,25	0° 43'	12,5	1/5	20	11° 19'	196
1/67	1,50	0° 50'	15	1/4	25	14° 2'	243
1/60	1,67	0° 57'	16,7	1/3,3	30	16° 42'	287
1/50	2,0	1° 10'	20	1/3	33,3	18° 26'	316
1/40	2,5	1° 28'	25	1/2,5	40	21° 48'	371
1/33	3,0	1° 47'	30	1/2	50	26° 34'	447
				1/1,73	58	30°	500

(1) Cette résistance est donnée par tonne de poids brut de l'engin.

Résistance totale au roulement (résistance au trajet) en rampe ascendante

La résistance totale R_t est la somme des résistances :

- R_r due au roulement (état du sol).
- R_p due au changement de niveau (pente moyenne).

Elle peut être déterminée directement par l'une des formules :

$$R_t = R_r + R_p = 9,81 (0,02 + 0,006e+a) \text{ m pour les camions,}$$

$$R_t = R_r + R_p = 9,81 (0,01 + 0,004e+a) \text{ m pour les tombereaux,}$$

La valeur e étant, dans les deux cas, l'enfoncement des roues d'un camion de chantier.

Résistance totale au roulement en rampe descendante

Sur un parcours descendant, la résistance due à la pente doit être déduite en valeur absolue de la résistance au roulement : $R_t = R_r - R_p$

Limites de résistance totale au roulement des engins sur pneus

La résistance au roulement des zones où se déplacent les engins de chargement et de transport sur pneumatiques réduit les rendements avec :

- des vitesses de déplacement plus faibles, donc une puissance disponible développée par le moteur de l'engin nécessairement plus élevée;
- une consommation en carburant plus élevée;
- des frais d'entretien mécanique des engins accrus.

Suivant les types de matériels utilisés dans les différents mouvements de matériaux sur un chantier de terrassements, il apparaît qu'au-delà d'une certaine résistance au roulement leur utilisation en tant qu'engin de production n'est plus économique.

En général, on peut considérer que :

- pour les décapeuses, les limites de résistances au roulement maximales à ne pas dépasser se situent entre 100 et 110 kg/t (zone de chargement et déchargement) ;

- les décapeuses bimoteurs (quatre roues motrices) peuvent admettre des résistances au roulement plus élevées jusqu'à 160 kg/t au maximum ;
- les camions de chantier (tombereaux classiques et camions routiers) sont limités à 60-80 kg/t ;
- les tombereaux articulés à trois essieux peuvent admettre des résistances au roulement plus élevées dans des conditions de travail difficiles : 100 à 110 kg/t.

Toutefois, lorsque ces matériels doivent effectuer des déplacements sur moyenne et longue distance, supérieure à 500 m, les pistes de circulation doivent être aménagées pour offrir le moins de résistance au roulement possible.

Influence de l'adhérence

L'adhérence des pneumatiques au sol dépend bien sûr de leur sculpture. Elle varie également avec les différents types de revêtements.

Cette adhérence s'exprime le plus souvent sous la forme d'un coefficient de force de traction, lequel indique la partie du poids des roues motrices qui peut être employée pour l'entraînement de l'engin, avant que les roues ne perdent contact et ne commencent à tourner fou.

L'effort maximal disponible d'un engin est limité par le glissement et le patinage des roues ou des chenilles en contact avec le sol.

Cet effort dépend donc à la fois de la masse répartie sur les roues motrices ou sur les chenilles et du coefficient d'adhérence spécifique aux différents types de sols.

Dans le cas d'une pente, un transfert de masse se produit entre essieux, à l'avantage de l'essieu aval. Pratiquement, ce transfert est négligeable et n'a d'influence qu'aux fortes pentes à très faible coefficient d'adhérence (8 % : 0,1 - 16 % : 0,2 - 20% : 0,3).

Les coefficients d'adhérence spécifiques à différents types de terrains sont donnés dans le tableau IV.

Tableau IV. – Coefficient d'adhérence des pneumatiques et chaînes.			
Types de terrains	Coefficient d'adhérence approximatif		
	Pneumatiques	Chaînes Pneumatiques tubeless	Chaînes
Béton	0,90	0,45	0,45
Argile limoneuse, sèche	0,55	0,70	0,90
Argile limoneuse, mouillée	0,45	0,55	0,70
Argile limoneuse, piste à ornières	0,40	0,55	0,70
Sable sec	0,20	0,25	0,30
Sable mouillé	0,40	0,45	0,50
Carrières (sol de)	0,65	0,70	0,55
Route en graviers (non tassés)	0,36	0,40	0,50
Neige compactée	0,20	0,25	0,25
Glace	0,12	0,10	0,12 (1)
Terre ferme	0,55	0,75	0,90
Terre meuble	0,45	0,50	0,60
Charbon, en tas	0,45	0,50	0,60

(1) Avec patins type glace = 0,27.

Une augmentation des poids sur les roues motrices entraîne une augmentation d'adhérence sur le sol.

En cours de conduite sur sol peu résistant, avec forte pénétration des roues dans celui-ci, une augmentation de la charge utile peut accroître la résistance au roulement, de telle manière que celle-ci arrive à dépasser la force de traction de l'engin.

Dans ce cas, on peut monter des roues de plus grand diamètre et des pneus plus larges qui augmenteront la capacité de portance et réduiront leur enfoncement dans le sol.

Influence de la vitesse moyenne

Suivant l'organisation du chantier, Il est nécessaire de pouvoir déterminer la durée d'un transport, que celui-ci s'effectue :

- sur l'emprise même du chantier (cas des opérations de déblai- remblai) ;
- sur un trajet mixte, route et chantier (cas de transport entre un lieu d'emprunt extérieur au chantier et la mise en œuvre des matériaux) ;
- sur route (cas de transport de matériaux acheminés depuis une carrière, par exemple).

La durée des temps de transport dépend de nombreux facteurs ; ceux-ci seront étudiés dans le détail au paragraphe D.7.5.

3-5 Durée effective du travail des machines

3-5.1 Efficience

On est amené à introduire dans les calculs de production, un coefficient de rendement horaire que l'on appelle coefficient d'efficience.

Le [tableau V](#) donne les efficience en minutes de travail suivant les types d'engins et les conditions d'utilisation.

Suivant l'état mécanique des machines, l'expérience et la qualification professionnelle des conducteurs, on peut estimer en général :

- 5 % de temps mort provenant du conducteur,
- 7 % de la machine elle-même.

Tableau V. – Efficience suivant les types d'engins et les conditions d'utilisation.			
Types d'engins	Efficience (en min/h)		
	Conditions de travail excellentes	Conditions de travail moyennes	Travail de nuit ou conditions défavorables
Engins sur chenilles (bouteurs, chargeuses, pelles)	55	50	45
Décapeuses automotrices et dumpers	55	50	40
Chargeuses, pousseurs sur pneumatiques	50	45	40

Dans les études de rendement. il conviendra donc de fixer la durée effective de travail par heure: entre 40 et 50 min.

Le coefficient d'efficience C correspond à : $C_e = \text{efficience (en min/h) de la machine} / 60$

Par exemple, une décapeuse a dans des conditions de travail moyennes de production, un coefficient $C_e = 50/60 = 0,83$

3-5.2 Organisation et rendement général des chantiers.

Le coefficient de rendement général d'un chantier dépend :

- de l'organisation du chantier.

- de l'adaptation du matériel à un travail déterminé,
- de l'état du matériel.
- des conditions météorologiques prises en compte, etc.

Ce coefficient de rendement n'intervient pas au niveau de l'étude de prix proprement dit, car les coûts des matériels sont calculés en fonction d'une durée effective d'utilisation des engins sur une année.

Par contre, ce coefficient de rendement doit être pris en compte pour la détermination des délais d'exécution qui doivent tenir compte de la durée réelle d'exécution (utilisation + immobilisation des engins) pour un chantier donné.

On peut considérer que le coefficient de rendement général d'un chantier se situe :

- entre 0,75 et 0,80 pour les grands travaux ;
- entre 0,50 et 0,70 pour les petits chantiers suivant leur localisation, les moyens mis en œuvre et leur nature ;
- entre 0,50 et 0,60 pour les chantiers situés en zone urbaine.

Pour toute entreprise de Travaux Publics la recherche du meilleur coefficient de rendement général du chantier est une préoccupation et une nécessité de tous les instants, car son bénéfice en dépend. Ce coefficient traduit la bonne ou mauvaise marche du chantier.

Sur le chantier, le contrôle du planning d'avancement des travaux ainsi que sa remise à jour en permanence à partir des rapports journaliers de chantier et des rapports de marche des engins doit permettre à tous moments la comparaison entre exécution et prévisions.

Il faudra donc comparer les valeurs retenues et prises en compte lors de l'établissement du programme des travaux à celles obtenues sur le chantier.

Si le chantier prend du retard, il faut en rechercher les causes et y remédier dans la mesure du possible.

L'analyse portera notamment sur :

- l'efficacité de marche réelle des machines et notamment les temps de panne qui traduisent l'état du matériel (nécessité de réparations importantes, remplacement de matériel, qualité du service de réparation, maintenance du matériel, etc.) ;
- les attentes du matériel qui peuvent être occasionnées par une mauvaise adaptation de celui-ci, une mauvaise organisation du chantier, des temps de parcours allongés. etc. ;
- les intempéries : une mauvaise interprétation des données météorologiques du dossier ou une mauvaise correspondance avec les statistiques peuvent se traduire par un dépassement du nombre de jours d'intempéries escomptés lors des prévisions.

3-6 Travail total. Consommation

Les vitesses moyennes sur les parcours aller et retour permettront de calculer les durées de transport qui constituent, en général, la partie la plus importante de la durée totale d'un cycle de mouvements de matériaux.

La consommation d'énergie sur chaque parcours est, pour un engin donné, directement proportionnelle au travail total.

Exemple d'application : un tombereau articulé transporte du tout-venant de gravier argileux du point A au point D à l'aller et au retour. Il emprunte la même piste ABCD dont les caractéristiques sont données sur la [figure 13](#).

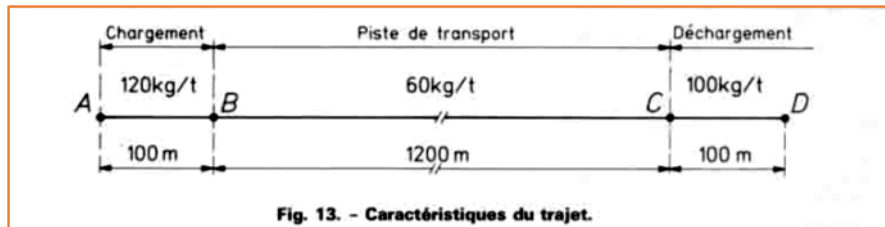


Fig. 13. - Caractéristiques du trajet.

Le calcul de la résistance totale est effectué, pour chaque tronçon, dans les deux sens.

A partir de ces résistances totales au trajet, le tableau ci-après donne les vitesses utiles des tombereaux articulés.

L'enfoncement e des pneus du camion de chantier est

- section AB $e_1 = 17$ cm.
- section BC $e_2 = 7$ cm,
- section CD $e_3 = 13$ cm.

Le travail du tombereau articulé à trois essieux est donné par le tableau ci-contre :

	Masse de l'engin t	Pente ou rampe %	Résistances			Vitesse utile km/h	Distance de transport m	Temps min
			Au roulement R_r kg/t	A la pente $\pm R_p$ kg/t	Au trajet total $R_t = R_r \pm R_p$ kg/t			
Aller en charge	50							
Section AB			120		120	12	100	0,50
Section BC			60		60	18	1 200	4,00
Section CD			100		100	14	100	0,43
Retour à vide	20							
Section DC			100		100	24	100	0,25
Section CB			60		60	38	1 200	1,89
Section BA			120		120	22	100	0,27
Travail :	$W = 9,81 \times \text{masse (en t)} \times \text{résistance au trajet (en kg/t)} \times \text{distance (en m)} \times 10^{-3}$							
- aller	$W_a = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} = 5886 + 35316 + 4905 = 46107$ kJ.							
- retour	$W_r = W_{DC} + W_{CB} + W_{BA} = 1962 + 14126 + 2354 \approx 18443$ kJ.							

4- Calcul de la production des engins

4-1 Généralités

Dans les terrassements généraux, les grands mouvements de terre sont principalement réalisés suivant deux méthodes qui mettent en œuvre des matériels différents.

La première méthode, chargement par le haut, utilise les matériels ci-après :

- pelles hydrauliques,
- chargeuses sur chenilles ou sur pneus,
- chargeuses pelleteuses,
- tombereaux de chantier,
- camions - semi-remorques.

La seconde méthode, chargement autoforcé par poussage, utilise :

- les décapeuses conventionnelles et bimoteurs,
- les décapeuses à autochargeur,
- les tracteurs pousseurs (sur chenilles ou sur pneus).

Après chargement, chaque machine assure le transport jusqu'à la zone de décharge.

Les facteurs qui déterminent le choix entre ces deux méthodes sont :

- les caractéristiques du matériau (nature, état)
- les conditions d'accès à la zone de chargement et à celle de mise en remblai ou en dépôt
- les conditions climatiques
- les distances de transport et le profil en long entre les zones de chargement et de mise en remblai

La première méthode de travail exige une grande fiabilité des engins de chargement. Leur arrêt, pour une raison quelconque, provoque celui de tout un atelier (ou échelon).

Dans la seconde méthode, l'arrêt momentané d'une décapeuse, par exemple, n'affecte que partiellement la production de l'ensemble de l'atelier de production.

Dans ce qui suit nous allons examiner successivement la production des types de matériels le plus généralement utilisés dans les terrassements généraux, à savoir :

- les pelles hydrauliques et les chargeuses pour la méthode de chargement par le haut;
- les décapeuses pour la méthode de chargement autoforcé par poussage.

Les engins de transport seront traités dans le paragraphe D.7.5.

4-2 Production des pelles hydrauliques

4-2.1 Généralités

Les pelles hydrauliques sont des machines polyvalentes qui peuvent généralement être utilisées à tous les degrés des travaux de terrassements sur un chantier routier.

Toutefois, avant de choisir une pelle hydraulique comme mode d'extraction et de chargement, il convient de s'assurer que la machine sera bien adaptée au travail à effectuer et ce dans les meilleures conditions de rendement.

Les pelles hydrauliques conviennent bien à l'extraction des sols meubles jusqu'aux roches tendres (vitesse sismique ≈ 1600 m/s). Au-delà, elles peuvent être utilisées en reprise indirecte.

Les pelles hydrauliques sur chenilles, avec équipement rétro, sont bien adaptées au chargement des roches défoncées moyennement rippables (jusqu'à 1600 à 1700 m/s au maximum), avec un équipement butte-chargeur dans les roches difficilement rippables (jusqu'à 2000 m/s de vitesse sismique) après tir d'ébranlement ou scarification profonde.

Déplacement en translation

Si la pelle doit faire face à de nombreux déplacements et si le chantier peut admettre des pressions au sol de 3 à 4 kg/cm², une machine sur pneus pourra, dans certains cas, être préférée à une pelle sur chenilles.

Qualité du terrain

La nature du terrain à excaver conditionne le choix du godet ainsi que le genre d'équipement (en butte ou rétro).

Il faut avoir en mémoire que pour une pelle hydraulique de puissance déterminée, la capacité du godet n'est pas toujours facteur de rendement.

Volume total du terrassement

Le choix de la pelle et de la capacité du godet devra être pris après avoir préalablement déterminé de façon suffisamment précise le volume total du terrassement.

Il sera bien sûr inopportun d'utiliser de trop gros matériels pour de petits volumes.

Profondeur du terrassement

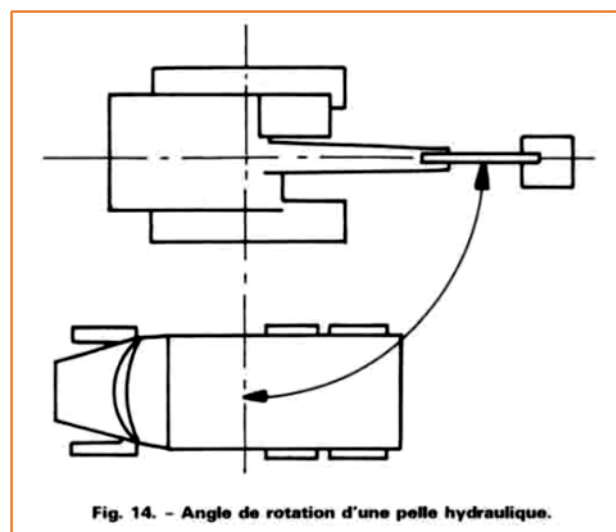
Une pelle utilisée en rétro au maximum de sa profondeur perd de 10 à 15 % de son rendement moyen.

Pour une pelle équipée en butte, il est nécessaire d'avoir un front de taille de hauteur suffisante pour obtenir le maximum de remplissage du godet.

Il est toujours préférable d'avoir une machine de profondeur de fouille supérieure mais utilisée à profondeur moyenne.

Angle de rotation

Une pelle bien positionnée sur l'aire de travail par rapport à son point de déchargement donnera son rendement maximal sous une rotation de 90°, ce qui correspond au mouvement de la flèche, du bras et du godet sans aucune perte de temps dans le cycle du travail ([figure 14](#)).



Évacuation des déblais

Ce point est certainement un des plus délicats dans le choix du matériel. Il faudra toujours choisir des capacités de godets des pelles en rapport avec la capacité des bennes des engins de transport. Parfois, le choix de deux petites est préférable à une grosse de rendement égal.

Les rapports entre les capacités des godets des pelles sur chenilles équipées, soit en rétro, soit en butte-chargeur, et les capacités des bennes des engins de transport sont les suivants :

Capacité des godets des pelles sur chenilles	Capacité des engins de transport
1 m ³	10 à 15 t
2 m ³	15 à 30 t
3 m ³	25 à 35 t
4 m ³	30 à 45 t
5 m ³	35 à 70 t
≥ 6 m ³	40 à 100 t

Espace disponible

Il faudra s'assurer que les divers mouvements de rotation de l'engin ne seront pas gênés si l'on doit travailler en espace restreint (en zone urbaine notamment, où l'équipement choisi peut réduire les manœuvres de travail).

4-2.2 Facteurs de production

Cavage

Les performances de production peuvent varier dans de fortes proportions selon la nature et la configuration des terrains. Suivant leur difficulté croissante de cavage, on peut classer les matériaux en quatre grandes catégories ([tableau VI](#)).

Tableau VI. – Classe de matériaux. État. Nature.		
Classe de matériaux suivant la fluidité	État des matériaux en place	Nature des matériaux ou observations
Classe A Bonne fluidité	Sols et matériaux pulvérulents ou bouillants	Sables propres, graviers, graves sableuses ou limoneuses peu plastiques, silts, sables silteux, sables et graves alluvionnaires.
Classe B Fluidité moyenne	Sols cohérents saturés d'eau Consistance moyenne Roches altérées ou friables Roches très bien explosées	Terres végétales légères, limons, argiles limoneuses, argiles à silex, craies, schistes, calcaires tendres, marnes sèches peu compactes, roches dures après abattage à l'explosif si pas de blocs supérieurs à 0,50 m de diamètre.
Classe C Mauvaise fluidité	Matériaux cohérents faiblement humides Consistance mi-dure Roches mal débitées. Conglomérats	Craies et schistes saturés, marnes très humides, argiles moyennement consolidées, roches mal explosées, blocs après abattage de 0,60 m et plus de diamètre.
Classe D Très mauvaise fluidité	Matériaux ou sols très collants, extraction directe des roches stratifiées en couches horizontales (épaisseur de 0,20 à 0,40 m) Matériaux putrescibles ou polluants	Schistes altérés et argiles raides, argiles grasses, tourbe saturée, vases, humus. Découvertes de carrière ou d'emprunt, roches très mal ébranlées, toutes terres collantes en général.

Extraction des roches tendres à mi-dures

Il s'agit de roches extraites sans préparation préalable par rippage ou tir d'ébranlement.

L'extraction directe des roches par pelle hydraulique dépend de la résistance du massif rocheux, lui-même caractérisé par :

- la matrice rocheuse.

- la fracturation du massif rocheux

$$\boxed{\sigma_c} (1) \quad \boxed{\sigma_t} (2) \quad \boxed{\varphi} (3) \quad \boxed{\Sigma} (4) \quad \boxed{M_f} (5)$$

Les caractéristiques de laboratoire de la matrice de la roche sont les suivantes :

- résistance à la compression simple (1).
- résistance à la traction indirecte (2).
- angle de frottement interne (3).
- cohésion C.
- vitesse du son dans la roche VLC,
- masse volumique γ .

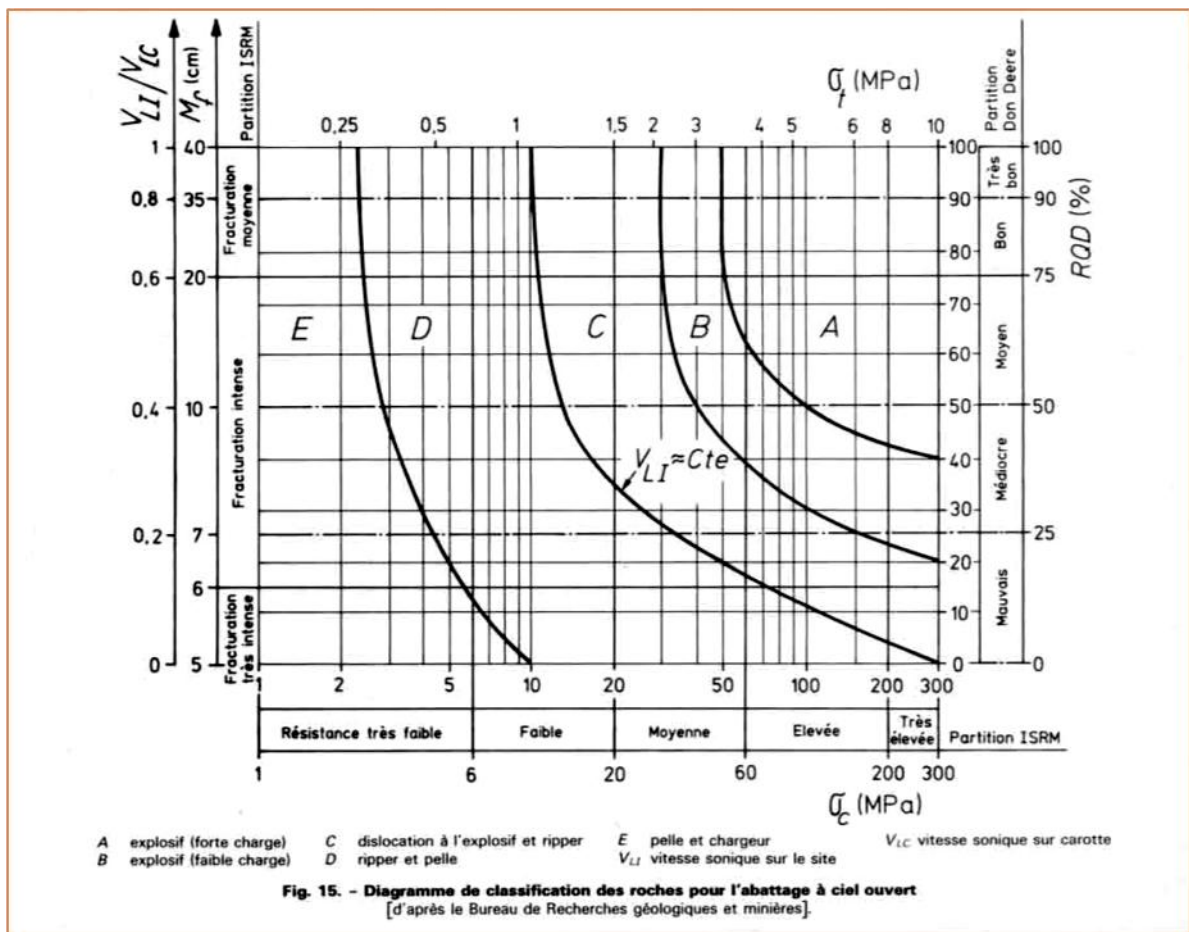
Les caractéristiques de fracturation (in situ) sont les suivantes ;

- Rock Quality Design : R.Q.D. (%) ((4) longueur des carottes > 10 cm/longueur de la passe de sondage) ;
- module de fracturation M_f défini comme la médiane de la courbe cumulative de la carotte ;
- inclinaison ;
- direction de l'inclinaison des discontinuités ;
- vitesse sismique ;
- densité foisonnée et en place.

La fracturation peut également être caractérisée par le rapport des vitesses sismiques mesurées sur le site et en laboratoire.

Le diagramme de classification des roches pour l'abattage à ciel ouvert (figure 15) donne des indications sur les limites d'utilisation des pelles hydrauliques avec équipement chargeur d'une puissance de 300 ch. et d'une masse totale de l'ordre de 50 t.

Pour le défonçage, il s'agit d'un tracteur sur chenilles d'une puissance de 400 ch. équipé d'une défonceuse à parallélogramme à une dent.



Équipement

Lorsque le niveau de chargement n'est pas accessible et qu'il faut travailler au niveau supérieur, la pelle doit être équipée en rétro.

L'équipement butte-chargeur doit être retenu lorsque le matériau ne peut être chargé depuis un niveau supérieur (gradin instable, front de taille trop haut).

Les avantages respectifs des équipements rétro et butte-chargeur sont les suivants :

Équipement rétro	Équipement butte-chargeur
Pénétration rapide et efficace dans les matériaux homogènes de consistance moyenne à faible. Cycle de production optimal de chargement au niveau inférieur. Débattement supérieur. Meilleure visibilité.	Bonne pénétration en roches stratifiées. Meilleure adaptation aux différentes hauteurs de fronts de taille. Efforts de pénétration plus importants. Bonnes possibilités d'extraction en couches minces. Capacité plus élevée de manutention des blocs.

Chaque type d'équipement présente des avantages et des inconvénients.

Toutefois, il est à remarquer que sur les chantiers de terrassements routiers l'équipement rétro est souvent préféré à l'équipement butte-chargeur.

Positionnement des pelles au travail

Les pelles hydrauliques sont des machines stationnaires.

En effet, la commande hydraulique de l'équipement permet le remplissage du godet de la machine sans aucun déplacement de celle-ci.

Seuls les équipements sont mis en mouvement par l'action conjuguée de vérins hydrauliques (flèche, balanciers, tourelle, godet, etc.).

Ceci permet le cavage soit en pied de talus, soit à des hauteurs variables au front de taille qui peuvent aller jusqu'à 9 m suivant le type de pelle utilisé.

Le déchargement du godet ne se fait pas par déplacement de la machine, mais par rotation de la tourelle de la pelle, d'où diminution du temps de déversement ([figure 16](#)).

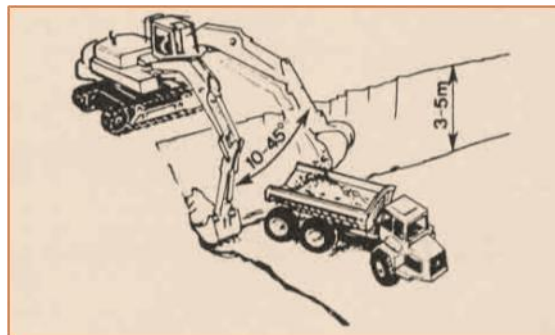


Figure 16 – Déchargement du godet d'une pelle hydraulique

Lorsque la pelle est équipée en rétro-cavage, le banc de déblais peut être découpé en tranches de 5 à 8 m de largeur, comme le montrent les [figures 17 et 18](#). Ce mode de travail évite les temps morts de mise en place à l'arrivée et au départ des engins de transport.

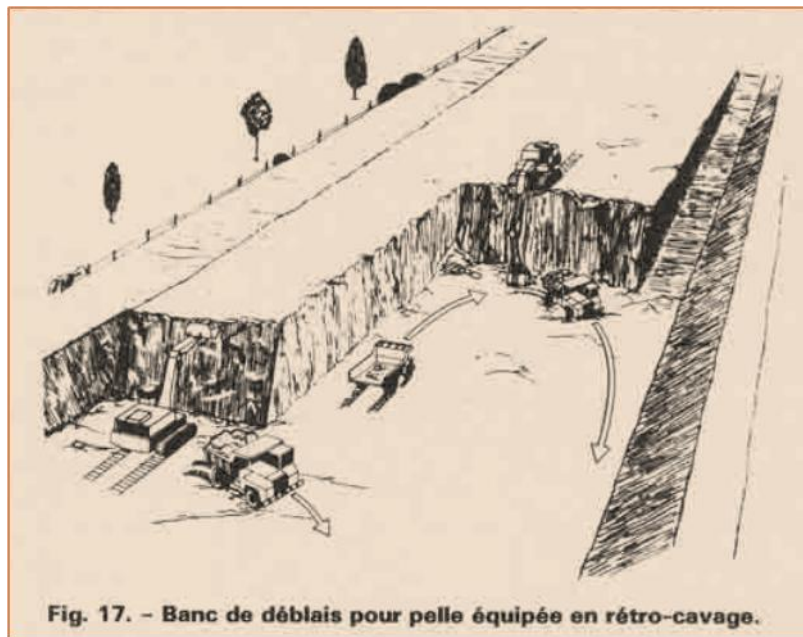


Fig. 17. - Banc de déblais pour pelle équipée en rétro-cavage.



Fig. 18. - Banc de déblai pour pelle équipée en rétro-cavage.

Positionnement des engins de transport

Le positionnement des engins de transport est un facteur de production.

En effet, c'est lorsque la pelle effectue un angle de giration entre 45 et 90° entre l'attaque du front de taille et le déversement du godet que le temps de cycle extraction-chargeement-déversement est le plus court.

Pour des raisons de sécurité, les engins de transport doivent toujours être positionnés de telle sorte que le godet de la pelle ne passe jamais au-dessus de la cabine du camion, comme le montre la [figure 19](#).

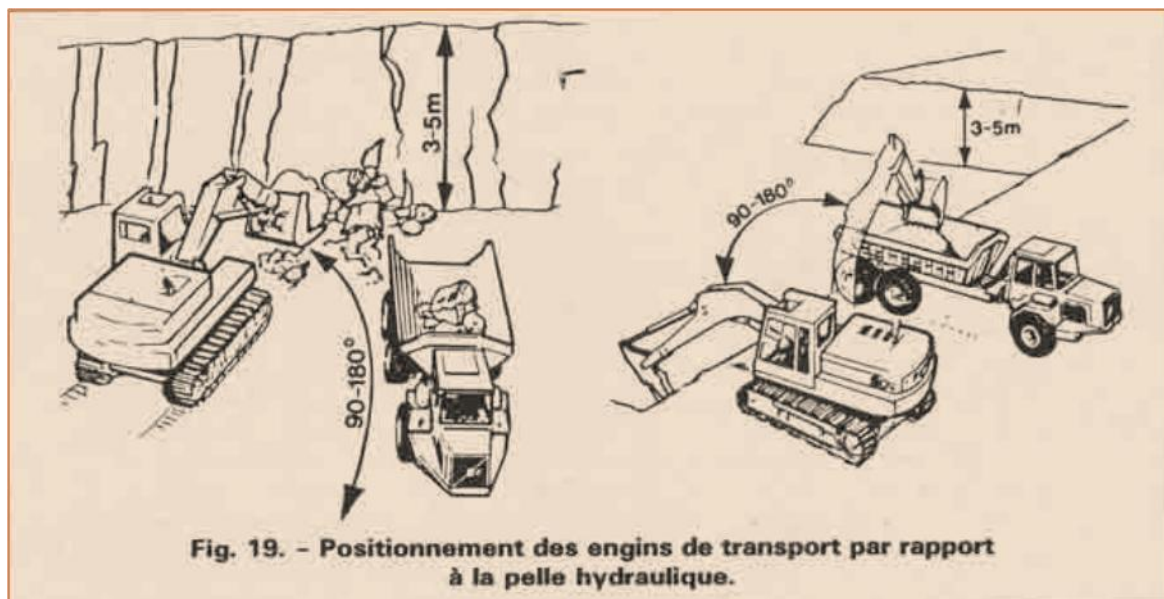


Fig. 18. - Banc de déblai pour pelle équipée en rétro-cavage.

Nombre d'unités de transport

La taille et le nombre d'unités de transport vont influencer la prestation de la pelle hydraulique et sa production.

L'expérience montre que la circulation des tombereaux de chantier s'accommode bien d'un temps de cycle total de chargement de l'ordre de 2 min.

Nous verrons au paragraphe D.7.5, les modalités de détermination du nombre d'unités de transport.

4-2.3 Calcul de la production nette d'une pelle

Le volume de production nette horaire V (en m^3/h) se calcule avec la formule suivante :

$$V = Q \times Cr \times 60 \times Ce / T$$

avec :

- Q capacité du godet en m^3 SAE à ras,
- Cr coefficient de remplissage du godet,
- Ce coefficient d'efficacité horaire,
- T temps de cycle, en minutes décimales.

4-2.4 Temps de cycle et production horaire

Les tableaux suivants récapitulent les calculs :

- des temps de cycle ([tableau VII](#));
- des productions nettes horaires en mètre cube en place des différents types de pelles hydrauliques, caractérisés par la capacité à ras des godets, l'équipement, les différentes natures de matériaux rencontrés, les conditions d'extraction et l'angle de rotation adopté ([tableaux VIII et IX](#)).

Tableau VII. – Temps de cycle des pelles hydrauliques (en minutes décimales) (1).														
Capacités SAE à ras des godets m ³		Condition d'extraction ou de reprise	Classification des sols et matériaux suivant la fluidité (2)											
			A : matériaux de bonne fluidité C _r = 1			B : matériaux de moyenne fluidité C _r = 0,85			C : matériaux de mauvaise fluidité C _r = 0,60			D : matériaux de très mauvaise fluidité (3) C _r = 0,75		
			Angle de rotation			Angle de rotation			Angle de rotation			Angle de rotation		
			45°	90°	180°	45°	90°	180°	45°	90°	180°	45°	90°	180°
Pelles équipées en rétro	Inférieures à 1,50 m ³	Facile	0,29	0,33	0,38	0,29	0,33	0,38	0,31	0,36	0,41	0,35	0,40	0,46
		Normale	0,30	0,35	0,40	0,30	0,35	0,40	0,33	0,38	0,44	0,37	0,42	0,48
		Difficile	0,33	0,38	0,44	0,33	0,38	0,44	0,37	0,42	0,48	0,40	0,46	0,53
	Comprises entre 1,50 et 2,50 m ³	Facile	0,30	0,35	0,40	0,30	0,35	0,40	0,33	0,38	0,44	0,37	0,42	0,48
		Normale	0,32	0,37	0,43	0,32	0,37	0,43	0,35	0,40	0,46	0,38	0,44	0,51
		Difficile	0,36	0,41	0,47	0,36	0,41	0,47	0,38	0,44	0,51	0,42	0,48	0,55
	Supérieures à 2,50 m ³	Facile	0,35	0,40	0,46	0,35	0,40	0,46	0,37	0,43	0,49	0,42	0,48	0,55
		Normale	0,37	0,42	0,48	0,37	0,42	0,48	0,39	0,45	0,52	0,44	0,50	0,58
		Difficile	0,40	0,46	0,53	0,40	0,46	0,53	0,43	0,49	0,55	0,48	0,55	0,63
Pelles équipées en butte	Inférieures à 1,50 m ³	Facile	0,32	0,36	0,44	0,37	0,41	0,48	0,43	0,47	0,54	0,48	0,51	0,59
		Normale	0,34	0,38	0,46	0,39	0,43	0,51	0,45	0,49	0,57	0,50	0,64	0,62
		Difficile	0,37	0,42	0,51	0,43	0,47	0,56	0,49	0,54	0,63	0,55	0,59	0,68
	Comprises entre 1,50 et 3,00 m ³	Facile	0,34	0,38	0,46	0,40	0,44	0,51	0,46	0,49	0,57	0,51	0,55	0,63
		Normale	0,36	0,40	0,48	0,42	0,46	0,54	0,48	0,52	0,60	0,54	0,58	0,66
		Difficile	0,40	0,44	0,53	0,46	0,51	0,59	0,53	0,57	0,66	0,55	0,64	0,73
	Supérieures à 3,00 m ³	Facile	0,36	0,40	0,48	0,43	0,47	0,54	0,48	0,52	0,60	0,53	0,69	0,67
		Normale	0,38	0,42	0,50	0,45	0,49	0,57	0,51	0,55	0,63	0,58	0,62	0,70
		Difficile	0,42	0,46	0,55	0,49	0,54	0,63	0,56	0,60	0,69	0,64	0,68	0,77

(1) Entrent dans le calcul du temps de cycle : temps de chargement, rotation et vidage.

(2) Pour la classification des matériaux, se reporter au tableau VI (p. C 5360-17).

(3) La mauvaise fluidité est liée à l'indice des vides, le coefficient de remplissage C_r, à la nature du matériau.

Tableau IX. – Production nette horaire des pelles hydrauliques équipées en butte (en m ³ en place) (1).												
Capacité SAE à ras des godets standards m ³	Classification des sols et matériaux suivant la fluidité (2)											
	Bonne fluidité C _r = 1,0			Fluidité moyenne C _r = 0,85			Mauvaise fluidité C _r = 0,60			Très mauvaise fluidité C _r = 0,75		
	Angle de rotation			Angle de rotation			Angle de rotation			Angle de rotation		
	45°	90°	180°	45°	90°	180°	45°	90°	180°	45°	90°	180°
0,30	44	39	32	33	29	25	20	18	16	22	21	18
0,50	73	65	54	54	49	41	33	30	26	37	35	30
0,80	117	105	87	87	79	66	53	49	42	60	55	48
1,00	146	131	108	108	98	83	66	61	52	75	69	60
1,20	176	157	130	130	118	100	80	73	63	90	83	72
1,50	210	190	158	155	140	119	95	88	76	106	99	87
2,00	277	249	208	201	184	157	125	115	100	138	129	113
2,50	345	312	259	252	230	195	156	144	125	173	161	141
3,00	398	358	299	290	266	225	179	166	145	200	185	181
4,00	524	474	398	376	345	297	234	217	190	258	241	213
5,50	721	652	548	517	475	408	322	299	261	354	331	293
7,50	983	889	747	705	648	557	439	407	356	483	452	400
8,50	1 114	1 008	847	800	734	631	498	462	403	547	512	454
(1) Le coefficient d'efficienc est de 0,83 et les conditions d'extraction normales. Si celles-ci sont faciles ou difficiles, les productions pourront varier dans une marge de ± 10 %.												
(2) C _r : coefficient de remplissage. Pour la classification des matériaux, se reporter au tableau VI (p. C 5360-17).												

Les calculs des temps de cycle tiennent compte du coefficient de remplissage du godet donc du foisonnement des matériaux (Tableau I – Annexe D.7.3).

Pour les calculs des productions nettes horaires en mètre cube en place, le coefficient d'efficacité a été pris égal à 0,83 avec des conditions d'extraction normales.

Tableau I. – Coefficients de foisonnement et de remplissage de quelques types de sols.								
Classe R.T.R.	Dénomination R.T.R. (2)	Types de sols le plus fréquemment rencontrés	Densité en place t/m ³	Coefficient de foisonnement	Densité foisonnée t/m ³	Coefficient de remplissage des godets (1)		
						Pelles	Chargeuses	
A	Sols fins	Limons peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,40	1,260	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Limons très plastiques	1,7 à 1,9	1,35 à 1,55	1,240			
		Loess	1,5 à 1,7	1,20 à 1,30	1,280			
		Arènes peu plastiques	1,7 à 1,9	1,30 à 1,45	1,310	0,75 à 0,85	0,85 à 0,95	
		Argiles et marnes peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,45	1,240			
		Argiles et marnes très plastiques	1,7 à 2,0	1,40 à 1,60	1,250			
		Marnes	1,8 à 2,4	1,30 à 1,40	1,560	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Sables fins argileux	1,8 à 2,1	1,25 à 1,35	1,500			
		Sables fins peu argileux	1,6 à 1,8	1,10 à 1,15	1,510			
B	Sols sableux ou graveleux avec fines	Silts	1,5 à 1,7	1,10 à 1,20	1,390	0,90 à 1,00	0,95 à 1,00	
		Sables silteux	1,6 à 1,8	1,05 à 1,15	1,545			
		Graves silteuses	1,7 à 2,0	1,10 à 1,20	1,610			
		Graves peu argileuses	1,8 à 2,1	1,10 à 1,20	1,695			
		Graves argileuses	1,7 à 2,0	1,15 à 1,25	1,540			
		Graves très silteuses	1,6 à 1,9	1,15 à 1,25	1,460			
C	Sols comportant des fines et de gros éléments	Argiles à silex	1,9 à 2,2	1,30 à 1,45	1,490	0,75 à 0,85	0,75 à 0,85	
		Argiles à meulière	1,8 à 2,1	1,30 à 1,45	1,420			
		Éboulis	1,8 à 1,9	1,40 à 1,50	1,275			
		Moraines	1,8 à 2,0	1,40 à 1,50	1,310			
		Roches altérées	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520			
		Alluvions grossières						
D	Sols et roches insensibles à l'eau	Sables alluvionnaires propres	1,6 à 1,9	1,05 à 1,15	1,590	1,00 à 1,10	0,95 à 1,00	
		Sables de dunes	1,4 à 1,5	1,00 à 1,10	1,380			
		Graves alluvionnaires	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520			
		Roches non évolutives						
		Calcaires durs	2,2 à 2,8	1,40 à 1,60	1,660	0,40 à 0,75	0,60 à 0,75	
		Granit	2,4 à 2,9	1,40 à 1,60	1,770			
		Porphyres	2,6 à 2,9	1,40 à 1,60	1,830			
		Grès durs	1,9 à 2,7	1,40 à 1,60	1,530			
		Basalte	2,7 à 3,0	1,40 à 1,60	1,900			
		E	Roches évolutives	Craies	1,5 à 2,3	1,30 à 1,50	1,360	0,60 à 0,75	0,60 à 0,75
Schistes	1,9 à 2,3			1,30 à 1,50	1,500			
F	Matériaux putrescibles et polluants	Terre végétale	1,2 à 1,4	1,07 à 1,15	1,170	0,60 à 1,00	0,60 à 1,00	
		Humus forestiers	0,7 à 1,1	1,20 à 1,25	0,730			
		Tourbes	0,3 à 0,9	1,00 à 1,10	0,570			
(1) Les valeurs indiquées dans le tableau sont approximatives et ne sont données qu'à titre indicatif. Elles devront être précisées dans chaque cas, notamment pour les sols sensibles à l'eau.								
(2) R.T.R. Recommandations pour les terrassements routiers (cf article <i>Terrassements. Matériaux</i> dans cette rubrique).								

4-3 Production des chargeuses

4-3.1 Généralités

L'avantage des chargeuses réside dans le fait qu'elles peuvent transporter leur chargement.

Cette remarque est surtout intéressante pour les grosses chargeuses (plus de 6 m³) qui peuvent être concurrentielles avec d'autres engins de transport lorsque les distances n'excèdent pas 200 à 300 m au maximum.

Domaine d'utilisation en terrassements routiers

Sur les chantiers de terrassements importants, les grosses chargeuses sont utilisées :

- soit à l'extraction des sols meubles et peu cohérents,
- soit à la reprise au chargement des matériaux.

Les limites d'emploi concernant ces matériels vont de l'extraction des terres meubles au chargement des roches défoncées.

Quand les machines sont amenées à travailler sur des sols agressifs ou en carrière, il peut être avantageux de les équiper avec des pneus à patins d'acier beaucoup plus résistants aux crevaisons, à l'usure et aux risques d'entailles.

Ce type de monte peut s'avérer rentable quand la durée de vie des pneus classiques limite les opérations de chargement et de transport.

En tout état de cause, une étude comparative des prix de revient devra être entreprise avant le choix du type de pneumatiques à adapter à la machine suivant l'utilisation que l'on sera amené à en faire.

Rapport de capacité de chargement

Les rapports de capacité entre les chargeuses et les engins de transport sont les mêmes que pour les pelles hydrauliques.

Il faut toujours qu'il y ait équilibre sur les rapports volume des godets des chargeuses et ceux des bennes des engins de transport :

Capacité des godets de chargeuses	Capacité des engins de transport
0,5 à 2,5 m ³	camions routiers de 10 à 20 t
2,5 à 3,5 m ³	tombereaux ou camions de 20 à 35 t
3,5 à 5 m ³	tombereaux de 35 à 45 t
> 5 m ³	tombereaux de plus de 45 t

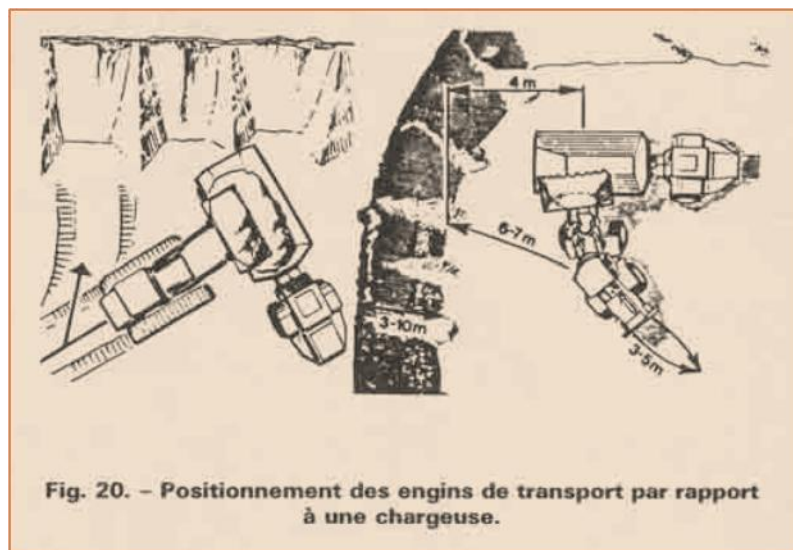
Travail des chargeuses sur chenilles et sur pneus

Lorsque l'on utilise une chargeuse sur chenilles comme engin de reprise au chargement (ce qui n'est guère le cas sur les chantiers de terrassements routiers), associée à des camions ou tombereaux de terrassements, il n'est pas nécessaire d'avoir un engin pour dégager l'aire de travail (petit boueur sur chenilles, par exemple) des matériaux qui pourraient s'y être répandus au cours du chargement.

Par contre, si l'on utilise une chargeuse sur pneus (cas le plus fréquent), l'aire de travail où se déplace la machine doit être maintenue propre pour éviter une usure prématurée des pneumatiques. Il faudra donc associer à la chargeuse un petit boueur pour assurer le nettoyage.

Les chargeuses, qu'elles soient sur chenilles ou sur pneus, sont des engins mobiles, par opposition aux pelles hydrauliques sur chenilles qui sont des machines stationnaires.

Au chargement, il n'est donc pas nécessaire d'avoir un positionnement aussi rigoureux des engins de transport que pour les pelles hydrauliques sur chenilles comme le montre la [figure 20](#).



Il convient toutefois de veiller à ce que les engins de transport soient positionnés de telle sorte qu'ils évitent de trop longues manœuvres à la chargeuse, ce qui aurait pour effet d'augmenter le temps de cycle de chargement, donc une baisse de rendement de la machine.

4-3.2 Facteurs de production des chargeuses

Depuis quelques années, l'augmentation de la capacité des godets des chargeuses, parallèlement à la capacité de chargement des tombereaux de chantier, est un facteur d'économie et de compétitivité des chargeuses.

L'association chargeuses + tombereaux de chantier pour la reprise des matériaux au chargement est maintenant devenue classique. La production des chargeuses dépend :

- des possibilités de chaque machine (taille, puissance, capacité du godet), du poids des matériaux et du temps de cycle ;
- du choix de la machine : il faut choisir une machine en rapport avec le travail à effectuer suivant le délai que l'on s'est fixé ;
- de la charge à transporter : pour déterminer la capacité de la charge à transporter, il faut multiplier le volume à transporter (m³ en place), soit le volume à ras du godet, par la masse spécifique du matériau.

On obtient généralement de bonnes cadences de travail lorsque la capacité effective de chargement ne dépasse pas 50% de la charge de basculement statique (poids minimal qui, appliqué au centre de gravité du godet chargé à sa capacité nominale SAE, fait décoller les roues arrière de la machine du sol).

4-3.3 Calcul de la production nette d'une chargeuse

Le calcul de la production nette d'une chargeuse est identique à celui d'une pelle.

Seuls les coefficients de remplissage à prendre en compte en fonction de l'état et de la nature des matériaux différents (tableau I).

4-3.4 Temps de cycle et production horaire

Les tableaux suivants récapitulent les calculs :

- des temps de cycle (tableau X) ;

- des productions horaires en mètre cube en place des différents types de chargeuses caractérisées par la capacité à ras des godets, l'équipement (pneus ou chenilles), les différentes natures de matériaux rencontrés, les conditions d'extraction et de reprise des matériaux ([tableau XI](#)).

Tableau X. – Temps de cycle des chargeuses sur pneumatiques et chenilles (en minutes décimales) (1).

Capacités SAE à ras des godets standards m ³	Condition d'extraction ou de reprise	Classification des sols et matériaux suivant la fluidité (2)							
		A: Matériaux de bonne fluidité C _r = 1		B: Matériaux de moyenne fluidité C _r = 0,85		C: Matériaux de mauvaise fluidité C _r = 0,60		D: Matériaux de très mauvaise fluidité C _r = 0,75	
		Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles	
Inférieures à 2,50 m ³	Facile	0,42	0,46	0,44	0,48	0,48	0,52	0,56	0,60
	Normale	0,44	0,48	0,46	0,50	0,50	0,54	0,58	0,62
	Difficile	0,48	0,52	0,50	0,54	0,54	0,58	0,62	0,66
Comprises entre 2,50 et 5,00 m ³	Facile	0,44	0,48	0,46	0,50	0,50	0,54	0,58	0,62
	Normale	0,46	0,50	0,48	0,52	0,52	0,56	0,60	0,64
	Difficile	0,50	0,54	0,52	0,56	0,56	0,60	0,64	0,68
Supérieures à 5,00 m ³	Facile	0,46	0,50	0,48	0,52	0,52	0,56	0,60	0,64
	Normale	0,48	0,52	0,50	0,54	0,54	0,58	0,62	0,66
	Difficile	0,52	0,56	0,54	0,58	0,58	0,62	0,66	0,70

(1) Entrent dans le calcul du temps de cycle: temps de chargement, manœuvres, pivotement, translation sur 10 m, déchargement.
(2) C_r: coefficient de remplissage. Pour la classification des matériaux, se reporter au tableau VI (p. C 5360-17).

Tableau XI. – Production nette horaire des chargeuses sur pneumatiques et chenilles (en m³ en place) (1).

Capacité SAE à ras des godets standards m ³	Classification des sols et matériaux suivant la fluidité								
	Bonne fluidité C _r = 1		Fluidité moyenne C _r = 0,85		Mauvaise fluidité C _r = 0,60		Très mauvaise fluidité C _r = 0,75		
	Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles		Chargeuses sur pneus sur chenilles		
0,50	51	47	42	38	27	25	29	27	
0,80	82	75	67	61	43	40	47	44	
1,00	102	94	83	76	54	50	58	54	
1,40	143	131	116	107	76	70	81	76	
2,00	204	187	166	153	108	100	116	109	
2,50	245	225	199	184	130	121	141	132	
3,00	293	270	239	221	156	145	169	158	
3,50	342	315	279	257	182	169	197	185	
4,00	391	360	319	294	208	193	225	211	
5,00	469	433	382	354	250	233	272	256	
6,00	562	519	459	425	300	279	327	307	
7,00	656	606	535	496	350	326	381	358	
8,00	750	692	612	567	400	372	435	409	

(1) Le coefficient d'efficiences est de 0,75 et les conditions d'extraction normales. Si celles-ci sont faciles ou difficiles, ces productions pourront varier dans une marge de ± 10%.

Dans cet article, le calcul des temps de cycle a été fait en considérant les chargeuses comme assurant uniquement les fonctions de chargement et de levage.

Seule une translation maximale de 10 m (manœuvres) a été prise en compte pour déterminer les temps fixes.

Les coefficients de remplissage du godet, sont ceux du tableau I.

Pour les calculs de production horaire en mètre cube en place, le coefficient d'efficiences a été pris égal à 0,75 avec des conditions de travail normales.

4-4 Production des décapeuses

4-4.1 Choix des décapeuses

Différents types de matériel

Le matériel utilisé extrait, charge, transporte et décharge lui-même les matériaux entre la zone d'emprunt et la zone de réemploi.

Les machines utilisées sont des décapeuses automotrices sur pneumatiques.

Cette famille de matériel comprend plusieurs modèles et types de décapeuses, mais sur les chantiers de terrassements, on en utilise principalement trois types :

- les décapeuses automotrices monomoteur à deux essieux (dites conventionnel/es),
- les décapeuses à autochargeur monomoteur à deux essieux (dites aussi décapeuses à élévateur).
- les décapeuses automotrices bimoteurs à deux essieux tracteurs.

Le choix du type de décapeuse dépend des règles ci-après.

Toutefois, au niveau d'une étude de préparation de chantier, le choix définitif dépend d'autres facteurs qu'il est nécessaire d'étudier plus en détail, par exemple :

- la nature et l'état des matériaux à charger ;
- les distances de transport ;
- l'état des pistes et itinéraires où circuleront les machines (résistance au roulement, pente, adhérence, largeur des pistes, etc.) ;
- la capacité de charge effective des décapeuses ;
- la durée des cycles ;
- la production sera-t-elle économique comparée à un autre mode de chargement-transport ?

Décapeuses à un ou deux moteurs

Il faut tout d'abord, considérer le matériau concerné (terre, sable, argile, graviers, limons).

Ces types de sols sont généralement décapables. Il faut se rappeler toutefois qu'une argile trop humide ou trop dure et très cohérente peut être difficile à charger à l'aide d'une décapeuse.

Dans certains cas, il sera donc préférable de choisir d'autres types d'engins d'extraction.

On peut aussi être amené à ameublir une argile trop raide en la scarifiant au ripper multident ou bien aérer une argile trop humide par le même procédé pour en diminuer la teneur en eau.

De même, un terrain souple et peu portant peut présenter des difficultés pour certains types de décapeuses, notamment de portance ou d'adhérence.

On peut y pallier en partie, en utilisant des décapeuses à deux moteurs permettant ainsi d'avoir quatre roues motrices au lieu de deux sur une décapeuse à un avant-train et à un essieu.

Les décapeuses à deux essieux moteurs ont :

- une accélération plus rapide,
- des vitesses utiles de transport plus élevées,
- la possibilité de gravir des pentes plus fortes.
- un effort à la jante plus élevé.

Néanmoins, tout avantage se paie et ces machines sont d'un prix de revient plus élevé que les décapeuses automotrices classiques.

Décapeuses à élévateur

Ces machines peuvent être utilisées pour les travaux de déblais et de finition.

En général, 70 à 80 % des matériaux qui peuvent être chargés par les décapeuses conventionnelles peuvent l'être également par des décapeuses à élévateur.

Les restrictions intéressent surtout les argiles très plastiques et très grasses, les argiles trop dures qui, une fois scarifiées, produisent des blocs, les matériaux rocheux, ainsi que les matériaux à forte proportion de graviers.

4-4.2 Distances de transport. Etat des pistes

Sur le plan économique, le rapport poids à vide / poids total en charge des décapeuses est important :

- 55,4 % pour les décapeuses conventionnelles un moteur,
- 58,6 % pour les décapeuses bimoteurs,
- près de 59 % pour les décapeuses à élévateur.

Pour ces trois machines, les capacités de benne sont de 16 m³ à ras.

Les coûts d'exploitation sont élevés, notamment en ce qui concerne les consommations de carburant. Il faut donc :

- soit augmenter le nombre d'unités pour garder une même production horaire
- soit choisir un type de machines plus rapide

L'augmentation des temps de transport pour un même nombre d'unités aura obligatoirement une incidence négative sur le rendement horaire de l'atelier de production, Il faut alors :

- déterminer avec soin la production qu'un échelon de machines (4 ou 5 par exemple) est capable d'assurer par heure ou par jour pour une certaine distance de transport,
- calculer l'incidence sur le prix de revient qu'aura l'introduction d'une nouvelle unité.

Le tableau XII donne les distances de transport maximales admissibles pour les décapeuses au-delà desquelles les temps de transport sont trop longs.

<i>Tableau XII. – Distances de transport économiques des décapeuses.</i>	
Types de décapeuses	Distances de transport m
Décapeuse monomoteur	50 à 2 000
Décapeuse monomoteur à élévateur .	50 à 1 200
Décapeuse bimoteur	50 à 3 000 (1)
(1) Distance moyenne économique: 1 500 m.	

État des pistes de transport

En général les décapeuses circulent en charge et à vide sur une partie de l'emprise des terrassements puisqu'elles sont principalement utilisées dans les mouvements des terres de déblai-remblai.

La zone de chargement présente en général des résistances au roulement élevées (100 à 120 kg/t, voire plus).

Il en est de même des zones de déchargement.

Pour que les décapeuses puissent se déplacer dans les meilleures conditions d'exploitation (temps de cycle le plus court), il faut que la zone de transport entre l'extraction et le déchargement ait une résistance au roulement inférieure à 60 kg/t.

Ceci correspond à une valeur moyenne prise en compte dans les calculs de production. Il faut donc que les pistes de circulation des engins soient entretenues.

De plus, il est nécessaire que la partie de l'emprise neutralisée pour le transport soit suffisamment large (≈ 10 à 12 m) pour que les machines puissent se déplacer au maximum de vitesse admissible et qu'elles puissent se croiser en toute sécurité.

Les rampes et pentes des circuits devraient être inférieures à 10% en principe, pour réduire le plus possible les accélérations et les décélérations brutales des machines, les brusques changements de régime amenant toujours des surconsommations de carburant.

4-4.3 Capacité de chargement

Le taux de remplissage de la benne dépend des caractéristiques du sol en place (compacité, teneur en eau, plasticité, granulométrie, indice des vides).

Le coefficient d'adhérence des roues à pneumatiques joue également un rôle important dans le remplissage de la benne (d'où la nécessité d'assister le chargement des décapeuses automotrices par un ou deux pousseurs).

Le volume chargé par une décapeuse correspondant à sa capacité en dôme ou à refus pour les décapeuses à élévateur, la production volumétrique théorique par rapport au matériau en place sera pris égale à la capacité à ras de la benne.

Ce calcul conventionnel prend donc en compte implicitement le coefficient de remplissage de la benne qui n'interviendra pas d'une façon explicite dans les calculs de production. Seuls interviendront le coefficient d'efficacité de la machine (pour les décapeuses, l'efficacité dans les conditions normales de travail est de 50 min/h, soit un coefficient de 0,83) et le temps de cycle.

4-4.4 Assistance au chargement des décapeuses

L'emploi de pousseurs

L'emploi de pousseurs est absolument nécessaire pour assister les décapeuses automotrices à avant-train moteur et un seul essieu. Les raisons en sont les suivantes :

- dans le cycle des opérations d'une décapeuse, on peut considérer que 15 à 25 % du temps sont utilisés pour le chargement de l'engin ;
- plus on réduit le temps de chargement, plus on augmente la production de l'atelier des décapeuses ;

- le tracteur à avant-train moteur qui tire la décapeuse n'offre pas suffisamment d'adhérence (diminution de l'effort à la jante} sur le sol pour permettre un chargement efficace et rapide de la décapeuse.

Malgré le gain de puissance que leur confèrent les deux trains moteurs, ce type de décapeuses se fait aussi très souvent pousser par de gros tracteurs.

Toutefois, ces modèles disposent de beaucoup plus de puissance grâce au deuxième moteur monté à l'arrière de la décapeuse.

Toutes les roues sont donc motrices, ce qui augmente l'effort total à la jante de la machine et donne à celle-ci un bon comportement sur les pentes raides en terrain mou, même à pleine charge.

Les décapeuses automotrices autochargeuses à un ou deux essieux moteurs sont capables de se charger toutes seules et n'ont pas besoin d'être assistées par un pousseur ; toutefois, elles ne se chargent pas de la même façon que les décapeuses classiques à un ou deux trains moteur.

Elles se chargent en pelletant le matériau dans la benne à l'aide d'un élévateur à chaînes.

Puissance des tracteurs-pousseurs sur chenilles

La puissance du tracteur-pousseur est, en principe, du même ordre de grandeur que la puissance du moteur de la décapeuse.

Capacité de poussées réelles des tracteurs sur chenilles

Dans le cycle complet d'une décapeuse conventionnelle de 450 ch. (16 m³ de capacité de la benne à ras), 15 à 25 % du temps environ sont nécessaires à l'opération de chargement.

Nous avons vu au paragraphe 4,440 que l'adhérence sur le sol du train moteur de la décapeuse n'était pas suffisante pour assurer un chargement efficace et économique de la machine. De ce fait il faut utiliser un tracteur de renfort pour assister la décapeuse au chargement.

Le choix de ce tracteur-pousseur doit porter sur l'engin offrant le plus de puissance, donc celui qui donnera le plus grand effort de traction.

Dans la pratique, on associe à la décapeuse, pour l'assister pendant son chargement, un tracteur (ou deux suivant le cas) dont la puissance se rapproche le plus de celle de la décapeuse. Par exemple, si un échelon est composé de décapeuses de 450 ch. on utilisera si possible des tracteurs de 410 ch.

Suivant la nature des matériaux à décaper et leur état, l'association de deux tracteurs-pousseurs sur chenilles en tandem permet un gain de 40 à 50% sur le temps de chargement, ce qui se traduit par une augmentation substantielle de la production des échelons de décapeuses.

Détermination théorique du nombre de pousseurs

Sur le plan théorique, on peut déterminer le nombre de tracteurs-pousseurs qu'il faudra pour assister un échelon de décapeuses (3, 4, 5 ou 6 machines) au chargement :

- nombre de pousseurs

- nombre total de cycles effectués par les décapeuses pendant 1 h / nombre de poussées possibles/h

De même on peut déterminer le nombre de décapeuses qui pourront être assistées par un tracteur-pousseur :

- nombre de décapeuses assistées
- temps total de cycle d'une décapeuse / temps total du cycle du pousseur

Dans la pratique, on utilise plus généralement le nombre de poussées que pourront effectuer un ou deux tracteurs-pousseurs par heure de travail.

Ces nombres de poussées sont issus de statistiques établies à partir de nombreux relevés sur chantier.

Le tableau XIII donne quelques valeurs qui peuvent être retenues dans le calcul de production des échelons de décapeuses de type conventionnel de 450 ch. à un avant-train moteur (capacité de benne : 16 m³ à ras).

Tableau XIII. – Détermination des pousseurs pour décapeuse conventionnelle (1).		
Nature des sols et état in situ	Nombre et puissances des pousseurs	Nombre de poussées possibles/h (efficacité 0,83)
Terre végétale de consistance moyenne peu humide	{ 2 × 410 ch en tandem 1 × 410 ch (2)	{ 40 à 42 30 à 32
Sols sableux et limoneux peu plastiques, consistance moyenne	2 × 410 ch en tandem	40 à 50
Sols gravo-sableux ou limoneux peu plastiques	2 × 410 ch en tandem	45 à 48
Sols limoneux ou argileux de plasticité moyenne	2 × 410 ch en tandem	35 à 40
Sols plastiques et collants. Limons argileux, argiles plastiques	2 × 410 ch en tandem	32 à 35
Roches défoncées (pas de blocs supérieurs à $\varnothing = 0,30$ cm)	2 × 410 ch en tandem	30 à 33

(1) Décapeuse de 450 ch à un avant-train moteur (capacité de benne: 16 m³ à ras).
 (2) Un pousseur si la distance de transport et les cycles sont courts. Si la terre végétale contient des blocs, cailloux, racines et n'est pas réutilisable, utiliser deux engins.

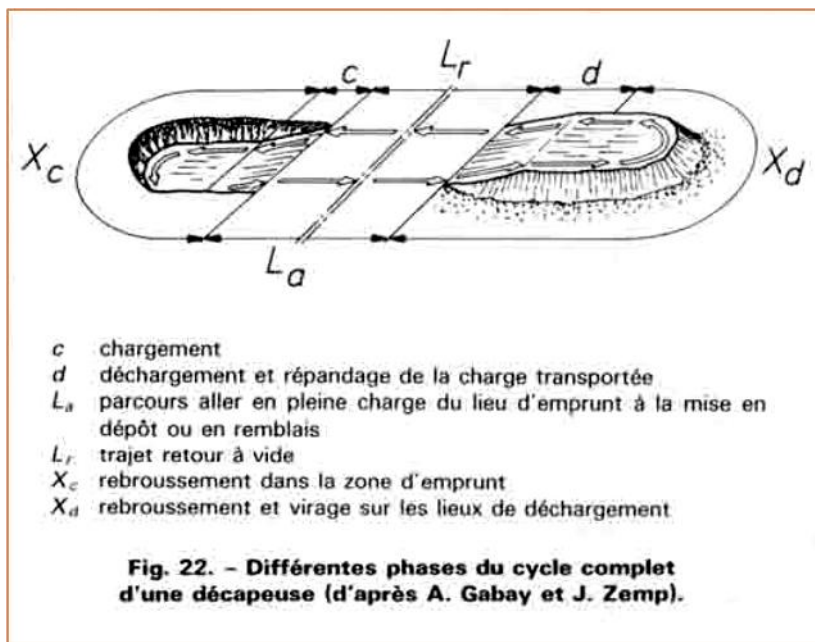
4-4.5 Facteur de production des décapeuses

Durée de cycle des opérations

Les opérations sont les suivantes : chargement, transport en charge, déchargement, retour à vide au lieu de chargement.

Le cycle des opérations se décompose en plusieurs phases.

La figure 22 indique les différentes phases qui interviennent dans le cycle complet d'une décapeuse. Cette figure correspond au cycle complet d'une décapeuse tractée par un tracteur à chenilles, mais est aussi valable pour les décapeuses automotrices sur pneumatiques.



Détermination des temps fixes

Temps fixes = temps de chargement + temps de manœuvres + temps de déchargement.

Le [tableau XIV](#) indique les temps moyens de chargement, manœuvre, déchargement des engins pour divers types de sols et pour certains modèles de décapeuses.

Catégories de sols à décapier	Modèles de décapeuses	de chargement	Temps fixes de manœuvres	de déchargement	Total des temps fixes
- Terre végétale légère	Conventionnelle	0,90	0,70	0,60	2,20
- Terre végétale grasse		1,00	0,70	0,60	2,30
- Humus forestier		0,80	0,70	0,60	2,10
- Limons peu plastiques, sables limoneux, limons sableux, sables et graviers		0,90	0,70	0,60	2,20
- Graves limoneuses		0,85	0,70	0,60	2,15
- Sables propres		0,50	0,50	0,50	1,50
- Terre végétale légère	A élévateur	1,00	0,70	0,60	2,30
- Terre végétale grasse		1,00	0,70	0,70	2,40
- Humus forestier		1,00	0,70	0,60	2,30
- Sables limoneux et argileux, silts, sables alluvionnaires ou de dune		0,90	0,70	0,60	2,20
- Argiles et marnes peu plastiques	Conventionnelle	0,90	0,70	0,60	2,20
- Argiles plastiques		1,00	0,70	0,60	2,30
- Graves argileuses		0,90	0,70	0,60	2,20
- Argiles à meulière		1,00	0,70	0,70	2,40
- Mélange de terre, pierres, racines et petits blocs	Conventionnelle	1,00	0,70	0,60	2,30
- Roches altérées, grossières		1,00	0,80	0,80	2,60
- Matériaux pétardés	Conventionnelle				
- Sols compacts rippés (craies, schistes et blocs inférieurs à 300 millimètres)		1,00	1,05	1,00	3,05

(1) Suivant l'état du sol en place, son degré d'humidité, de compacité, la nature des matériaux rippés ou ameublés après scarification, le type de décapeuse retenu ainsi que le nombre de pousseurs utilisés pour le chargement des décapeuses conventionnelles, les temps fixes peuvent varier de plus ou moins 15 %.

Détermination des temps variables

On reporte sur un même graphique le plan de trajet et le profil en long et l'on décompose en différentes sections le trajet emprunté par les décapeuses. Sur le profil en long, on reporte pour chaque section les rampes et pentes en % (favorables ou défavorables), ainsi que les longueurs de section.

Chaque pour-cent de pente défavorable augmente de 10 kg/t la résistance au roulement. Chaque pour-cent de pente favorable diminue d'autant la résistance au roulement. L'ensemble des pourcentages de pentes défavorables vient s'ajouter à la résistance au roulement moyenne de la piste de transport. L'ensemble des pourcentages de pentes favorables se retranche de la résistance au roulement moyenne de la piste.

Les vitesses de déplacement en charge et à vide étant données au paragraphe ([Tableau XX – Annexe D.7.5](#)), l'ensemble de ces éléments permettent de calculer les temps variables (temps de transport).

Productions nette et totale d'une décapeuse

La production nette horaire (en m³/h) d'une décapeuse s'exprime comme suit : $V = Q \times 60 \times C_e / T$

avec

Q (m³) capacité à ras de la benne,

T {minute décimale} temps de cycle complet.

C_e coefficient d'efficience.

Suivant le volume de déblai estimé à déplacer par heure ou par jour, on calculera le nombre d'unités machines à mettre en œuvre pour assurer la production à réaliser, compte tenu de la production horaire ou journalière d'une machine.

Le tableau [XV](#) donne les productions nettes horaires des décapeuses automotrices en fonction du temps total de cycle (temps fixe + temps variable).

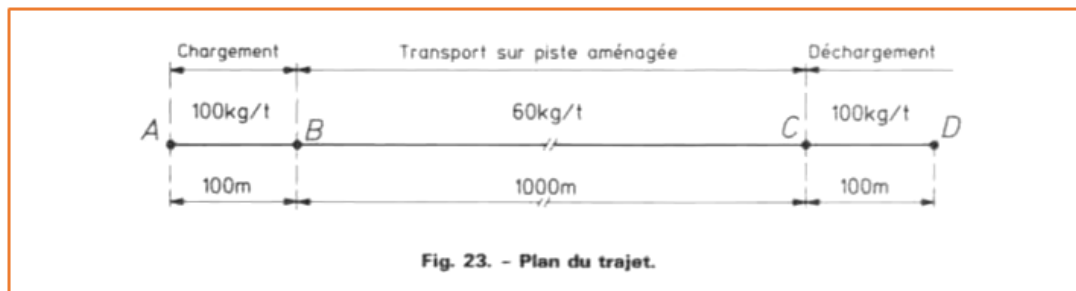
Tableau XV. – Production nette horaire des décapeuses automotrices en fonction du temps total de cycle (en m ³ en place) (1).						
Temps de cycle total min	Nombre de cycles horaires	Décapeuses conventionnelles Capacité de la benne à ras/en dôme			Décapeuses à élévateur Capacité à refus	
		11 / 15 m ³	16 / 23 m ³	22 / 29 m ³	8,5 m ³	17 m ³
4,00	12,45	136,9	199,2	273,9	80,9	149,5
4,25	11,72	128,9	187,5	257,8	76,2	140,6
4,50	11,07	122,5	177,1	243,5	71,9	132,8
5,00	9,96	109,6	159,4	219,1	64,7	119,5
5,50	9,05	99,6	144,9	199,2	58,9	108,7
6,00	8,30	91,3	132,8	182,6	53,9	99,6
6,50	7,66	84,3	122,6	168,6	49,8	91,9
7,00	7,11	78,3	113,8	156,5	46,2	85,4
8,00	6,23	68,5	99,6	137,0	40,5	74,7
9,00	5,53	60,9	88,5	121,7	36,0	66,4
10,00	4,98	54,8	79,7	109,6	32,4	60,0
11,00	4,53	49,8	72,4	99,6	29,4	54,3
12,00	4,15	45,7	66,4	91,3	27,0	49,8
13,00	3,83	42,1	61,3	84,3	24,9	46
14,00	3,56	39,1	56,9	78,3	23,1	42,7
15,00	3,32	36,5	53,1	73,0	21,6	39,8
16,00	3,11	34,2	49,8	68,5	20,2	37,4
17,00	2,92	32,2	46,9	64,4	19,0	35

(1) Le coefficient d'efficience est de 0,83.

Exemple de calcul

Calculons, par exemple, la production des décapeuses à partir du plan du trajet (figure 23) des temps de cycle, d'un coefficient d'efficience de 0.83.

Il s'agit de graves limoneuses (classe R.T.R. B 1) de densité en place 1,8 t/m³



	Masse de l'engin t	Pente ou rampe %	Résistances			Vitesse utile km/h	Distance de transport m	Temps min
			Au roulement R_r kg/t	A la pente $\pm R_p$ kg/t	Au trajet total $R_t = R_r \pm R_p$ kg/t			
Aller en charge	75							
Section AB			100		100	12	100	0,50
Section BC			60		60	20	1 000	3,00
Section CD			100		100	12	100	0,50
Retour à vide	40							
Section DC			100		100	15	100	0,40
Section CB			60		60	35	1 000	1,71
Section BA			100		100	15	100	0,40
Temps fixe (cf tabl. XIV)	Chargement + Manœuvres + Déchargement = 0,85 + 0,70 + 0,60 =							2,15
Durée totale du cycle	Temps de trajet aller et retour + Temps fixe =							8,66
Production horaire pour décapeuse	$\frac{60 \times 0,83 \times 15,5}{8,66} = 89,1 \text{ m}^3/\text{h}$							

Le cubage total des terres à mettre en remblai est de 47000 m³ le tableau ci-dessus donne la capacité de production.

5- Transport des matériaux

L'étude d'un chantier de terrassement routier fait apparaître que les déplacements de matériaux y occupent une place importante. La répartition des coûts d'opérations est la suivante :

Extraction	Transport		Déchargement	Réglage et compactage
35%	≤ 500m	40%	15%	10%
25%	≥ 1500 m	50%	15%	10%

Ce tableau montre, en effet, que comparée aux autres tâches : extraction, chargement, réglage, réglage et compactage, l'incidence des transports représente actuellement entre 40 et 50% du prix de la prestation à exécuter suivant la distance à laquelle on transportera les matériaux.

En première approximation on peut donc en déduire que le volume de la production sera fonction des moyens mis en œuvre (unités de transport) et de la durée des transports.

Ce n'est que lorsqu'il y aura une parfaite synchronisation entre les différentes tâches d'un mouvement de terre, c'est-à-dire entre chargement - transport- déchargement - retour au chargement que l'on pourra espérer le maximum de production d'un poste de travail.

5-1 Engins de transport

La plupart des grands mouvements de terre sur les chantiers de construction de routes et autoroutes sont essentiellement effectués par quatre types de matériels de transport :

- les tombereaux de chantier à deux essieux dont un moteur, à déversement par benne basculante vers l'arrière ;
- les tombereaux articulés à deux ou trois essieux dont deux moteurs (à avant-train moteur du type décapeuse), à déversement par benne basculante vers l'arrière ;
- les camions type gabarit routier à trois essieux dont deux moteurs du type 6 X 4 équipés d'une benne du type Travaux Publics (basculement vers l'arrière) ;
- les camions semi-remorques à quatre essieux dont un moteur à benne basculante vers l'arrière du type Travaux Publics.

Le tableau XVI donne quelques indications sur les quatre principaux types d'engins utilisés dans les transports. Figurent également dans ce tableau les caractéristiques d'une décapeuse conventionnelle de 34 t de charge utile, engin le plus répandu sur l'ensemble des chantiers.

Comme le montre ce tableau, les capacités de chargement (charge utile) des engins de transport se situent généralement entre 25 et 40 t.

Lorsque l'on désire utiliser des matériels ayant de plus fortes capacités de chargement, 45 t et plus, il faut s'assurer que les déplacements de ces véhicules ne seront pas limités sur le chantier par des contraintes dimensionnelles (gabarit) ou de charge par essieu, notamment pour le franchissement d'ouvrages d'art.

En général, l'utilisation, pour les transports, de tombereaux lourds de chantier ne se justifie que sur les installations où le transport est intégré dans un système cohérent (carrière à ciel ouvert, barrages en terre. etc.).

Tableau XVI. – Caractéristiques de quelques engins de transport.										
Caractéristiques	Tombereaux rigides 2 essieux			Tombereaux articulés				Camions routiers		Décapeuse conventionnelle
				2 essieux		3 essieux		Benne 6 X 4	Semi- remorque 4 X 2	
Charge utile (t)	25	32	45	32	40	25	32	15	25	34
Poids à vide (t)	21	28	38	20	28	19,2	21,2	11	13	40
Poids total en charge ... (t)	46	60	83	52	68	44,2	53,2	26	38	74
Charge par essieu:										
– avant (t)	15,4	20,5	28	18	33,7	15,7	18,7			40
– intermédiaire (t)						14,4	17,4			
– arrière (t)	30,6	39,5	55	34	34,3	14,1	17,1			34
Pression de gonflage .. (bar)	5 à 6			5 à 6		3 à 3,5		6 à 8,5		4,5
Puissance au volant (ch)	295	450	650	255	450	255	255	250	250	450
Charge utile/poids total. (%)	54,3	53,3	54,2	61,5	58,8	56,6	60,1	57,6	65,8	45,9
Puissance/poids total. (ch/t)	6,41	7,50	7,83	4,90	6,62	5,77	4,79	9,61	6,58	6,08

5-2 Capacité de chargement des engins de transport

5-2.1 Capacité de la benne des camions

En considérant la capacité moyenne possible d'un chargement, le volume effectivement transporté pourra être limité :

- soit par le volume géométrique de la benne dans le cas de matériaux légers,
- soit par la charge utile admissible sur le porteur en cas de matériaux lourds.

Il est donc essentiel, avant tout calcul de transport de vérifier la charge utile.

En cas de transports importants de matériaux, il est nécessaire de bien définir la charge de transport en fonction du volume du godet de la machine choisie pour l'extraction et le chargement des matériaux.

De plus, il faut examiner s'il y a intérêt à choisir un camion ayant une benne suffisamment grande pour augmenter d'autant les volumes transportés (notamment pour les transports longs) ou si l'on a, au contraire, intérêt à se contenter, en cas de transport de matériaux lourds, d'une capacité plus petite assurant une plus grande sécurité aux surcharges et économisant par-là, les frais d'entretien et de réparation.

5-2.2 Nombre d'unités à mettre en service

C'est le nombre d'engins à mettre en service pour permettre un équilibre entre le débit de chargement et de transport.

5-3 Choix et adaptation des matériels de transport au chantier

L'analyse de la production des engins de chargement

L'analyse de la production des engins de chargement à l'extraction a montré que ce sont toujours ces matériels qui conditionnent le choix, le nombre et la capacité de chargement des matériels de transport en fonction de la durée des cycles de transport.

Comme dans tout choix de matériel lors d'une étude de terrassements, celui-ci est toujours conditionné par la nature du chantier à réaliser.

Le choix des matériels de transport n'échappe pas à cette règle ; c'est pourquoi, dans toute étude mettant en mouvement les matériaux, il faudra bien réfléchir à l'organisation des transports avant d'opérer un choix parmi les moyens disponibles.

Tout d'abord, en ce qui concerne le type même du chantier concerné :

- les déplacements de matériaux pourront-ils être effectués sur des itinéraires à l'intérieur même du chantier ?
- le chantier sera-t-il fermé à toute circulation d'autres véhicules que ceux utilisés pour la réalisation des travaux ?
- le chantier sera-t-il réalisé partiellement ou totalement sous circulation ?
- les engins de chantier effectuant les transports devront-ils partiellement emprunter les itinéraires du réseau national ?
- les engins de transport auront-ils à franchir ou contourner des obstacles sur le chantier (voies ferrées, cours d'eau, ouvrages d'art nouvellement construits. etc.) ?
- le chantier est-il situé en rase campagne, en montagne ou en zone urbaine ?

Le choix entre ces matériels dépendra essentiellement des cadences, de la production que l'on s'est fixé et de la disponibilité des moyens en matériel.

5-3.1 Choix des matériels de transport

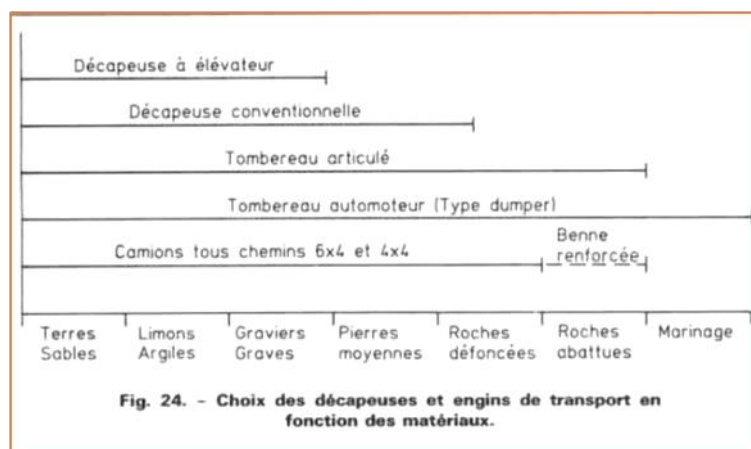
Le choix des matériels de transport doit être dicté en premier lieu par :

- la nature des matériaux à transporter,
- la distance de transport.

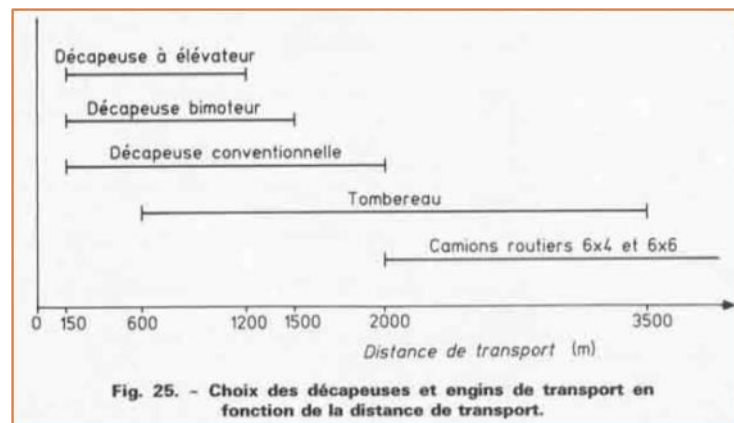
Nature des matériaux à transporter

Suivant la nature des matériaux, tous les engins ne peuvent convenir pour effectuer des transports dans des conditions économiques.

La figure 24 donne quelques indications sur les restrictions liées à la nature et à l'état des matériaux à transporter dans le choix du matériel.



Distance de transport



Au-delà de certaines distances de transport, quelques matériels utilisés pour effectuer le transport de matériaux ne sont plus techniquement économiques, comme le montre la figure 25.

Si le chantier impose des cadences élevées et qu'il est fermé à toute circulation extérieure, il est préférable d'utiliser, dans la mesure du possible, les gros engins.

Toutefois, il faudra s'assurer que les itinéraires sur lesquels s'effectueront les transports ne présentent pas de difficultés particulières qui pourraient avoir des incidences sur les vitesses de déplacement des engins et donc sur la durée des cycles de transport.

5-3.2 Itinéraires de transport sur chantier

Tracé

En général, sur un chantier de terrassements les tracés des pistes de chantier empruntent ou longent la plate-forme des terrassements.

Leur tracé doit donc permettre aux engins de circuler dans les meilleures conditions d'exploitation du matériel (production) et en offrant le maximum de sécurité.

De bonnes pistes de chantier devraient présenter les caractéristiques en plan suivantes :

- profil en long: les rampes et pentes ne devraient pas être supérieures à 4 - 5 %;
- largeur: les pistes devraient avoir une largeur de 8 à 10 m;
- virages: les virages ne devraient pas avoir de rayons en plan inférieurs à 50 m.

Sur le plan de la résistance mécanique, les pistes doivent être réalisées de telle sorte que la couche de roulement ait des caractéristiques de portance suffisantes pour présenter les plus faibles résistances au roulement. Celles-ci ne devraient pas excéder 40 à 50 kg/t.

Les sols sur lesquels vont circuler les engins ne doivent pas devenir glissants en cas de pluie.

Enfin, les pistes de transport doivent être entretenues pour éviter la présence de nids de poule. Cet entretien ne nécessite d'ailleurs pas de matériel important.

En général, une niveleuse à temps partiel et une arroseuse par temps chaud pour éviter la formation de poussières s'accommodent facilement à cet entretien.

Sécurité

Les pistes de circulation doivent permettre aux engins de se croiser ou de se doubler sans risques d'accidents.

La signalisation doit être assurée et indiquer notamment :

- les vitesses autorisées ;
- les virages, les interdictions de doubler ;
- les intersections avec les routes et les passages piétons ;
- les points singuliers dangereux et les obstacles (ponts, poteaux, étranglements, etc.).

Réglementation

Il existe, en ce qui concerne l'ouverture des pistes de circulation sur chantier, des fiches de sécurité établies par l'O.P.P.B.T.P. (Office professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics).

5-3.3 Situation du chantier**Chantier hors circulation**

Sur un chantier fermé à toute circulation extérieure, la production des engins de transport dépendra essentiellement de l'organisation du chantier.

On veillera donc à étudier plus particulièrement les moments de transport en essayant de réduire, dans les limites du possible, les distances de transport (économie).

Les matériels de transport utilisés sur les chantiers fermés à toute circulation sont généralement :

- les tombereaux de chantier classique à deux essieux de 30 à 35 t de charge utile ;
- les tombereaux articulés à deux ou trois essieux de 25 à 35 t de charge utile ;
- les camions de chantier type Travaux Publics 6 X 4.

Chantier nécessitant l'usage du réseau routier

Certains chantiers (il s'agit le plus souvent de travaux routiers de réfection ou d'élargissement de voies existantes) nécessitent que les engins de transport utilisent partiellement des itinéraires routiers hors du chantier lui-même.

Dans ce cas, le choix des moyens de transport est limité aux véhicules à gabarit routier. Les gros tombereaux de chantier (hors gabarit) devront être exclus et remplacés par certains types de tombereaux articulés à gabarit routier (15 à 25 t de charge utile) ou, le plus souvent, par des camions Travaux Publics (type 6 X 4) de 15 à 26 t de charge utile.

Obstacles et ouvrages en construction sur le chantier

Si le matériel effectuant des transports est obligé de franchir certains obstacles (ou les contourner), le choix des itinéraires devra être étudié de manière à allonger le moins possible le cycle des engins.

Chantier en montagne

Sur un chantier de terrassement routier en montagne, l'espace permettant l'évolution des engins peut parfois être limité.

Il peut arriver que les pistes de circulation ne puissent avoir des largeurs suffisantes pour permettre la circulation dans les deux sens des engins.

On peut être amené, dans ce cas, à envisager la construction de créneaux de dépassement.

Les pentes et rampes des itinéraires peuvent être très importantes : 8 à 10 %.

Il faudra en tenir compte dans les calculs de production (vitesse de translation des matériels de transport plus lente).

En haute montagne (au-delà de 2 300 m. la puissance des moteurs peut se trouver diminuée de 10 à 20 % et plus, suivant que les moteurs sont à aspiration naturelle ou qu'ils sont suralimentés), le manque de puissance des moteurs aura une incidence sur les vitesses de déplacement ; il faut donc en tenir compte.

Chantier en zone urbaine ou suburbaine

L'évacuation de certaines terres excédentaires nécessite parfois leur transport dans des zones de décharge (contrôlées ou non).

Celles-ci peuvent être plus ou moins éloignées du chantier.

Les engins de transport retenus seront, dans ce cas, des camions à gabarit routier. Il sera nécessaire d'étudier avec soin les itinéraires que devront emprunter les véhicules pour réduire le plus possible les temps de trajet. De ce fait, le trajet le plus court n'est pas forcément le plus rapide.

Il faudra également tenir compte des nuisances dues aux bruits des engins sur le chantier : certains gros matériels peuvent être rejetés, tels que brise-roche, pneumatiques, etc.

5-4 Pneumatiques

On ne saurait terminer l'étude des transports, sans évoquer l'influence du tracé et l'entretien des pistes de transport sur les pneumatiques.

En effet, le profil en long et en travers a une influence sur la surcharge dynamique (montée ou descente en charge). Les efforts latéraux (virages) qui accroissent à la fois la surcharge dynamique et le ripage, favorisant ainsi la séparation entre la bande de roulement du pneu et sa carcasse.

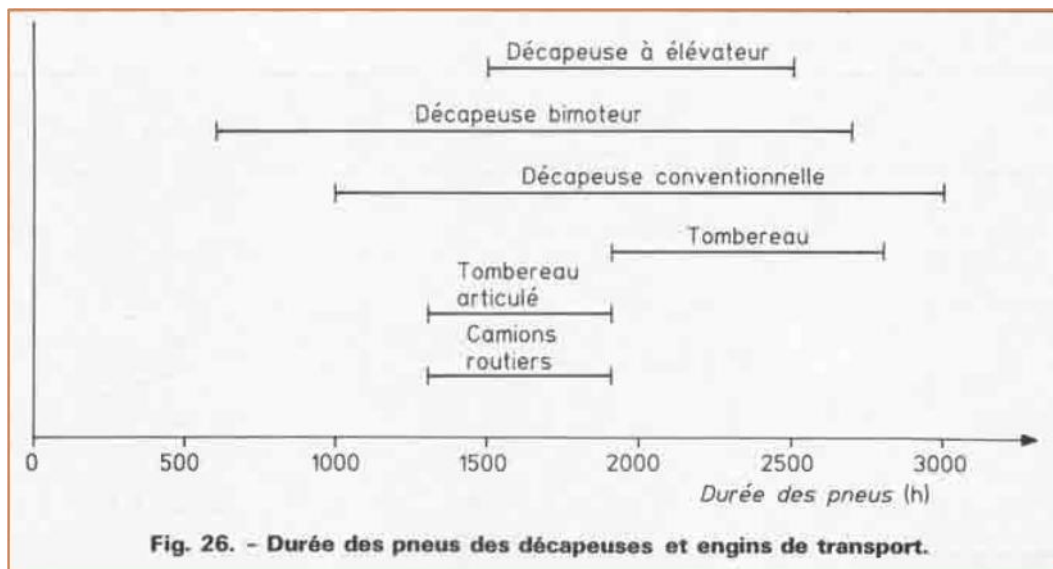
Il est bien évident que les profils des pistes varient en fonction de l'évolution des travaux, mais l'entretien des pistes (bon ou mauvais), l'enlèvement ou non de blocs de roches tombé en cours de transport des engins, le nettoyage ou non des : zones de chargement auront une grande influence sur la durée de vie des pneumatiques.

Autre paramètre à prendre en compte : le nombre de kilomètres parcourus dans l'heure par le véhicule.

Des vitesses de pointe plus élevées et des cycles plus longs font obligatoirement augmenter la vitesse moyenne.

Des vitesses élevées et des cycles longs feront augmenter la température d'échauffement des pneus et donc accentueront l'usure.

La figure 26 donne des indications sur la durée de vie des pneumatiques dans des conditions d'exploitation normales des engins.



Il faudrait encore signaler comme autres paramètres exerçant une influence sur la durée de vie des pneus :

- l'influence du conducteur (coups de frein brutaux, accélérations. etc.) ;
- le nombre d'heures de roulage par 24 h (ce paramètre a une grande influence sur l'échauffement des pneus);
- l'entretien mécanique des véhicules (parallélisme, freins, rattrapage de jeux de fusée, etc.) ;
- le jumelage (vérification des pressions de pneus jumelés) ;

- la température ambiante et les conditions climatiques ;
- les méthodes de travail et l'exploitation des engins (travail des machines sur des zones rippées, circulation sur des argiles à silex. etc.).

5-5 Vitesse des engins de transport

5-5.1 Vitesses utilisables pour les camions routiers du type Travaux Publics

La vitesse moyenne d'un engin ou d'un camion en charge et à vide est fonction :

- de l'état mécanique des véhicules et de leur puissance,
- de la distance à parcourir,
- du tracé de l'itinéraire.

En général, on peut admettre pour les camions à gabarit routier une vitesse moyenne de déplacement sur route de 50 km/h.

Toutefois, compte tenu des distances à parcourir, des tracés en plan et en profil de la route, cette vitesse moyenne est à corriger à l'aide des coefficients suivants donnés dans les [tableaux XVII, XVIII et XIX](#).

Tableau XVII. – Incidence de la distance sur la vitesse des camions.		
Longueur du trajet d km	Coefficient correctif	Vitesse possible (1) km/h
$0 < d \leq 0,25$	0,10	5
$0,25 < d \leq 0,5$	0,30	15
$0,5 < d \leq 1,5$	0,50	25
$1,5 < d \leq 3,5$	0,60	30
$3,5 < d \leq 6$	0,70	35
$6 < d \leq 10$	1,00	40
$d > 10$	1,00	50

(1) Compte tenu d'une vitesse moyenne de 50 km/h.

Tableau XVIII. – Incidence du tracé en plan sur la vitesse des camions.		
Caractéristiques de l'itinéraire	Distance à parcourir km	Correctif à appliquer à la vitesse possible (du tableau XVII)
Route très sinueuse ou comportant de nombreuses intersections rendant obligatoire des ralentissements fréquents	$0 < d \leq 0,25$	1,00
	$0,25 < d \leq 0,5$	0,90
	$0,5 < d \leq 10$	0,85
	$d > 10$	0,80
Route sinueuse ou comportant quelques intersections entraînant des ralentissements obligatoires	$0 < d \leq 0,25$	1,00
	$0,25 < d \leq 0,5$	0,95
	$0,5 < d \leq 10$	0,90
	$d > 10$	0,85
Circulation intense moyenne faible	.....	0,90
	.....	0,95
	.....	1,00

Tableau XIX. – Incidence du tracé en profil sur la vitesse des camions. Coefficients à appliquer après ceux des tableaux XVII et XVIII.				
Rampes ou pentes	Route très sinueuse		Route sinueuse	
	Transport en charge	Transport à vide	Transport en charge	Transport à vide
<i>Rampes :</i>				
7 à 12 %	0,80	0,85	0,75	0,80
4 à 7 %	0,85	0,90	0,80	0,85
2 à 4 %	0,90	0,95	0,85	0,90
<i>Pentes :</i>				
7 à 12 %	0,85	0,90	0,80	0,85
4 à 7 %	0,90	1	0,85	1
2 à 4 %	1	1	1	1

5-5.2 Vitesses utilisables pour les gros engins de transport de chantier sur pneumatiques

En raison des variations de profil en long des pistes et des zones de circulation des engins sur un chantier, il est rarement possible que ceux-ci puissent atteindre et conserver les vitesses théoriques Indiquées dans les feuilles de spécifications des constructeurs.

En effet, au cours des transports sur chantier, les engins sont fréquemment soumis à des changements de régime dus à l'état même des pistes de circulation (résistance au roulement, adhérence, rampes ascendantes et descendantes, patinage dû aux accélérations et décélérations, etc.) et à l'usure prématurée des pneumatiques (pour des raisons d'échauffements anormaux).

Afin de ramener la vitesse théorique maximale à la vitesse pratique d'utilisation, il faut appliquer à la vitesse théorique des coefficients de correction.

Tableau XX. – Vitesses utiles des engins de transport sur chantier en fonction de la résistance au trajet.								
Enfoncement des pneus dans le sol cm	Résistance totale au trajet (1) kg/t | %		Vitesses utiles des engins sur piste de chantier (en km/h)					
			Décapeuses automotrices		Tombereaux essieux rigides		Tombereaux articulés deux ou trois essieux	
			Aller en charge	Retour à vide	Aller en charge	Retour à vide	Aller en charge	Retour à vide
3,5	40	4	30	42	28	50	27	45
7	60	6	20	35	20	45	18	38
10	80	8	15	28	15	33	14	30
Enfoncement des pneus dans le sol cm	Résistance totale au trajet (1) kg/t | %		Vitesses utiles des engins (en km/h) sur courtes distances ≤ 200 m (ou transports en zones de chargement et déchargement) (2)					
			Décapeuses automotrices		Tombereaux essieux rigides		Tombereaux articulés deux ou trois essieux	
			Aller en charge	Retour à vide	Aller en charge	Retour à vide	Aller en charge	Retour à vide
13	100	10	12	15	12	22	14	24
17	120	12	10	12	10	20	12	22
21	150	15	8	11	8	18	10	20
27	180	18	6	8	7	15	8	18

(1) On rappelle que 1 % = 10 kg/t.

(2) Cas des déblais transportés en remblai dans le même profil, ou des déblais mis en dépôt provisoire à l'avancement le long de l'emprise des terrassements.

Le tableau XX donne, pour les gros engins de transport sur chantier, les vitesses utiles en charge et à vide à prendre en compte dans les calculs de production.

Les vitesses indiquées tiennent compte des facteurs précédemment énumérés et sont données pour différentes résistances au trajet.

Lorsque les engins de transport se déplacent à une courte distance sur l'aire de chargement / déchargement et que la reprise au chargement les conduit à circuler sur des matériaux agressifs (cas de rocher non compact en zone de défonçage), les vitesses de retour doivent être minorées de 15 % pour tenir compte :

- des pertes d'adhérence et de traction,
- des effets d'abrasion,
- de chocs et de perforation des pneus, notamment pour les matériaux comportant des silex (cas des argiles à silex ou des marnes) ou des rochers ripés produisant des blocs de 30 à 40 cm de diamètre à arêtes coupantes.

5-5.3 Vitesse moyenne sur trajet aller-retour

La vitesse moyenne d'une unité de transport sur un trajet aller- retour de distance totale 2 D n'est pas la moyenne arithmétique des vitesses moyennes réalisées sur le parcours aller et celui du retour, mais les vitesses moyennes que peut atteindre l'engin de transport sur chacun des trajets $D_1, D_2, \dots, D_n$:

Vitesse moyenne

$$V_m = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + \dots + D_n}{\frac{D_1}{V_1} + \frac{D_2}{V_2} + \frac{D_3}{V_3} + \frac{D_4}{V_4} + \dots + \frac{D_n}{V_n}}$$

avec V_1, V_2, V_n vitesses moyennes atteintes sur les trajets de distance D_1, D_2, D_n .

5-6 Temps de cycle des engins de transport

5-6.1 Temps fixes

Pour les décapeuses, les éléments permettant de calculer les temps fixes sont indiqués au paragraphe 4.452 de l'Annexe D.7.4.

Pour les engins de transport (tombereaux, camions), ces temps fixes seront déterminés comme suit :

- chargement : celui de l'engin de chargement ;
- manœuvres, accélération, décélération, virages, déchargement ; pour un chantier moyen, ces temps peuvent être évalués à 1,60 min.

5-6.2 Temps variables

Pour les engins de transport routier les temps variables seront calculés à l'aide des éléments donnés aux Tableaux XVII à XIX et des distances de transport.

Pour les gros engins de transport de chantier ils seront déterminés à partir de la vitesse de déplacement des engins, des résistances au trajet (en kg/t) et des distances de transport (Tableau XX).

Le Tableau XXI donne les temps de trajet précalculés pour :

- les décapeuses automotrices,

- les tombereaux automoteurs rigides,
- les tombereaux articulés,

pour une distance de transport de 100 m et pour des résistances au trajet variant de 40 à 180 kg/t.

Les temps de trajet étant proportionnels à la distance, pour une distance quelconque exprimée en hectomètres, le temps de trajet correspondant sera obtenu par le produit de cette distance et des chiffres du [tableau XXI](#).

Tableau XXI. – Temps de trajet aller et retour pour une distance de transport de 100 m en fonction des résistances au trajet.														
Types d'engins	Temps de trajet aller (en minutes décimales)							Temps de trajet retour (en minutes décimales)						
	Résistance au trajet (en kg/t)							Résistance au trajet (en kg/t)						
	40	60	80	100	120	150	180	40	60	80	100	120	150	180
	Transport en zones de chargement et déchargement ou distances < 200 m							Transport en zones de chargement et déchargement ou distances < 200 m						
Décapeuses automotrices ..	.....	.....	.....	0,50	0,60	0,75	1,00	.....	.....	.....	0,40	0,50	0,55	0,75
Tombereaux rigides .....	.....	.....	.....	0,50	0,60	0,75	0,86	.....	.....	.....	0,27	0,30	0,33	0,40
Tombereaux articulés .....	.....	.....	.....	0,43	0,50	0,60	0,75	.....	.....	.....	0,25	0,27	0,30	0,33
	Trajet sur piste de chantier							Trajet sur piste de chantier						
Décapeuses automotrices ..	0,20	0,30	0,40	.....	.....	.....	.....	0,14	0,17	0,21	.....	.....	.....	.....
Tombereaux rigides	0,21	0,30	0,40	.....	.....	.....	.....	0,12	0,13	0,18	.....	.....	.....	.....
Tombereaux articulés	0,22	0,33	0,43	.....	.....	.....	.....	0,13	0,16	0,20	.....	.....	.....	.....

5-7 Nombre d'unités de transport

Les décapeuses assurant à la fois les fonctions production et transport, la production nette horaire de ces engins est calculée globalement pour ces deux fonctions.

Pour les engins de transport proprement dit il y a lieu de s'assurer d'un bon équilibre entre les capacités du matériel de chargement et celui de transport.

5-7.1 Cas des transports sur trajet fixe

C'est le cas où les transports s'effectuent sur un trajet préalablement défini, où les pentes et rampes sont connues par avance, de même que les caractéristiques mécaniques des pistes de transport.

Ce type de transport s'apparente à celui que l'on rencontre en carrière pour le transport des matériaux, depuis le front d'abattage jusqu'à la station de traitement des matériaux.

Sur un chantier de terrassement, on détermine des distances moyennes de transport pour chacun des différents mouvements de terre à partir des moments de transport.

Selon les différentes longueurs des transports, ceux-ci seront effectués soit directement sur l'emprise des terrassements, soit sur des pistes aménagées sur une partie de cette emprise.

Suivant la longueur des sections, les déclivités et l'état de surface du sol de roulement, il faudra déterminer, pour chacune des sections du trajet, la vitesse moyenne des unités de transport pour calculer la durée T du trajet aller-retour.

Pour déterminer le nombre d'unités de transport qui pourront écouler la production de l'engin de chargement à une distance D_n , on calculera le débit horaire de production d'une unité de transport soit : D_{tr50} c'est-à-dire le débit de production net : débit brut multiplié par coefficient d'efficience pour les unités de transport (soit $50/60 = 0,83$), à partir:

- de la capacité de chargement de l'unité de transport C_{tr} (en t ou en m³),
- de la durée totale du cycle complet T de l'unité de transport.

Le débit de production net de l'unité de transports s'exprime comme suit :

$$D_{tr\ 50} = 60 \times 0,83 \times C_{tr} / T$$

Connaissant la production brute de l'engin de chargement, il est aisé de déterminer le nombre d'unités de transport à mettre en service pour assurer la production de l'engin de chargement

$D_{ch\ 60}$ (débit de l'engin de chargement à 100% d'efficience).

$$\text{Nombre d'unités de transport} = D_{ch\ 60} / D_{tr\ 50}$$

Pour éviter de façon certaine l'arrêt momentané de l'engin de chargement, faute de retour à temps au poste de chargement des unités de transport, il faut toujours déterminer le nombre d'unités de transport à mettre en service à partir de la production brute.

5-7.2 Cas des transports sur trajet variable.

Lorsque les transports s'effectuent sur des trajets de longueurs variables. Il faut toujours garder l'équilibre entre le débit de l'engin de chargement et celui des unités de transport mises en service, et ceci quel que soit l'allongement du trajet.

De ce fait, ce n'est pas le nombre d'unités de transport nécessaires pour assurer sans temps morts le débit horaire de l'engin de chargement qu'il faut déterminer, mais la distance à laquelle un nombre d'unités de transport donné pourra assurer l'écoulement de la production de l'engin de chargement.

Il s'agit donc de déterminer la distance du trajet au-delà de laquelle les unités de transport n'arrivent plus à temps au chargement et de calculer la distance à partir de laquelle il faudra introduire dans le circuit une nouvelle unité de transport.

On appelle cet allongement distance critique d .

La distance critique pour deux unités de transport est donnée par la formule :

$$d_2 = (t_{f1} - t_{f2}) V_m$$

avec :

d_2 (m) distance critique pour deux unités de transport;

t_{f1} (min) temps de chargement pour une unité de transport ;

t_{f2} (min) temps fixe pour virages, déversement de la charge, rebroussement et positionnement chargement; t_{f2} est une grandeur sensiblement constante quelle que soit la longueur des trajets (distance aller- retour)

V_m (m/min) vitesse moyenne

Pour trois unités de transport, nous aurons : $d_3 = (2 t_{f1} - t_{f2}) V_m$

Nous donnons ci-après la valeur des différents coefficients à appliquer aux distances critiques calculées avec la formule ci-avant pour déterminer la distance critique économique à donner à l'introduction dans le circuit d'une nouvelle unité de transport :

Nombre d'unités de transport en service	Avance à appliquer à la distance critique d
2	0,50 à 0,55
3	0,45 à 0,50
4	0,40 à 0,45
5	0,35 à 0,40
6	0,30 à 0,35
7	0,25 à 0,30
8	0,20 à 0,30

6- Matériels annexes à la production

L'ensemble des éléments donnés jusqu'ici dans cet article concernait les matériels de production et de transport utilisés dans un poste de travail. Ces matériels sont ceux qui assurent : l'extraction, le chargement et le transport des matériaux.

Selon la nature et le volume de production à atteindre, les matériels sont regroupés par atelier plus communément appelé échelon.

On entend par échelon le nombre d'engins qui, selon leur type, seront utilisés pour assurer la production.

Il forme un tout homogène, chaque poste de travail pouvant être constitué de plusieurs échelons (exemple : trois échelons de quatre décapeuses + deux pousseurs).

En dehors de ces matériels, un certain nombre de matériels d'assistance à la production ou de matériels spéciaux sont nécessaires :

- soit au niveau des déblais,
- soit au niveau des remblais,
- soit au niveau de l'entretien des pistes de transport.

6-1 Matériels d'assistance à la production

Le nombre d'unités des matériels d'assistance est fonction de la production réalisée par les échelons production. Ils sont constitués principalement par les engins suivants :

- bouteurs à chaînes de 180 à 270 ch.
- bouteurs à pneus de 170 à 300 ch.
- niveleuse de 180 à 250 ch.
- rock tamping articulé de 270 ch.
- rock tamping simple de 130 ch.
- citerne d'eau,
- compacteurs à pneus de 2,5 à 6 t,
- rouleaux vibrants de 15 à 45 kg de charge statique par cm de génératrice,
- rouleaux à pieds dameurs de 30 à 60 kg/cm de charge moyenne,
- rouleaux vibrants tractés (à chaînes ou à pneus).

Le [tableau XXII](#) donne en fonction des engins utilisés au poste de travail production la nature des engins d'assistance.

6-2 Matériels spéciaux

Certaines natures de travaux nécessitent l'utilisation de matériels spécifiques, dont certains sortent du cadre de cet article, et devront faire l'objet, le cas échéant, d'une étude particulière.

Le tableau XXIII récapitule un certain nombre de matériels spéciaux généralement utilisés en fonction des travaux à exécuter.

Tableau XXII. – Matériels d'assistance à la production.			
Assistance au déblai	Matériel de production	Assistance au remblai	Pistes
Bouteur + scarificateur (suivant nature et état du sol en place)	• Décapeuses conventionnelles (16 m³) Échelon 3-4-5 machines + pousseur (1 ou 2 pousseurs suivant durée du cycle et nombre de décapeuses) • Décapeuses bimoteur (16 m³)	• Régilage (pas nécessaire) • Compacteurs (type et nombre) suivant cadences et nature des sols • Régilage : niveleuse temps partiel + arroseuse si nécessaire, suivant état des sols	Niveleuse + arroseuse (temps partiel)
Bouteur + scarificateur (suivant nature et état du sol en place : ameublement)	• Décapeuses type élévateur (16 m³) Échelon 3-4 machines (pas de pousseur)	• Régilage (pas nécessaire) • Compacteurs : nombre, suivant nature des sols et cadences (R.T.R.) • Régilage : niveleuse temps partiel + arroseuse si nécessaire suivant état des sols	Niveleuse + arroseuse (temps partiel)
Pas d'assistance si extraction directe Si reprise au chargement après ripage. Bouteur pour approvisionnement pelle	• Pelles hydrauliques sur chenilles + tombereaux, tombereaux articulés ou camions (type Travaux publics) [nombre d'unités de transport selon capacité de production de la pelle (butte ou rétro) et durée du cycle de transport]	• Régilage : bouteur ou tamping • Compacteurs : nombre suivant nature des sols et cadences (voir R.T.R.) • Régilage : niveleuse temps partiel + arroseuse si nécessaire suivant état des sols	Niveleuse + arroseuse (temps partiel)
Extraction sols meubles et reprise au chargement Petit bouteur nettoyage aire de travail	• Chargeuses sur pneumatiques + tombereaux ou camions type Travaux publics	• Même matériel d'assistance que pour les pelles	Niveleuse + arroseuse (temps partiel)

Tableau XXIII. – Matériels spéciaux.	
Nature des travaux	Types de matériels généralement utilisés
Travaux préparatoires : déboisement, dessouchage, nettoyage, décapage terre végétale	Gros bouteurs sur chenilles, pelles hydrauliques sur pneus ou sur chenilles, cisailles mécaniques, niveleuses, décapeuses conventionnelles ou auto-chargeur.
Confection des talus : – talus en remblai – talus en déblai	Bouteur, si pente (2/1) et nature des matériaux le permettent, pelles hydrauliques godet large. Bouteur avec ou sans slopper niveleuse, pelle hydraulique longue flèche, godet large.
Aménagement des dépôts	Bouteur, tamping, compacteur si difficultés accès au dépôt.
Drainage et assainissement : Purges, substitutions. Déblais en présence d'eau. Rabattement de nappes.	Petites trancheuses, bouteur, pelles hydrauliques. Pelles hydrauliques (bras long), groupes électrogènes, pompes, aiguilles filtrantes.
Traitement des sols fins : Traitement à la chaux, au ciment. Traitement mixte ciment + chaux.	Silos pour stockage liants hydrauliques, épandeurs de liants, charrues à disques, pulvimixeurs + matériel usuel de réglage + nivellement + compactage.

7- Exemples de documents techniques des fournisseurs de matériels

Introduction

Les constructeurs mondiaux de matériels de terrassement présents sur le Marché depuis de nombreuses décennies sont essentiellement installés dans les Etats-Unis, précurseurs en la matière, dans les Pays Européens, notamment Allemagne, France, Suède, Grande-Bretagne, ..., également Japon et Chine plus récemment.

Nous pouvons nous référer notamment aux gammes de matériels : CATERPILLAR, KOMATSU, HITACHI, LIEBHERR, VOLVO, BOMAG,

Les grands constructeurs éditent des Guides qui comportent des informations pour chaque gamme de matériels :

- Des fiches de caractéristiques des engins : puissances, capacités, données de fonctionnement
- Des informations pour l'emploi optimal des engins
- Des graphiques de production et de rendement
- Des informations sur la mécanique et l'entretien des machines
- ...

7-1 Exemples de fiches de caractéristiques des constructeurs - Références CATERPILLAR

(Caterpillar Performance Handbook - Edition 2009)

□ Pelles hydrauliques équipement rétro (1)

MODÈLE	375 L		375 L	
	Japon, États-Unis		Belgique	
Fabrication	319 kW 428 HP		319 kW 428 HP	
Puissance au volant	82 380 kg 181,500 lb		80 700 kg** 177,340 lb**	
Poids en ordre de marche*	1,5-4,4 m² 1,96-5,75 y²		2,7-5,6 m² 3,5-7,3 y²	
Capacité des godets (à refus)	3406C ATTAC		3406C ATAAC	
Modèle de moteur	1800		1800	
Régime nominal du moteur (tr/min)	€		€	
Nombre de cylindres	137 mm 5,4"		137 mm 5,4"	
Alésage	165 mm 6,5"		165 mm 6,5"	
Course	14,6 L 893 po³		14,6 L 891 po³	
Cylindrée	2 x 430 L/min 2 x 114 gal/min		2 x 435 L/min 2 x 115 gal/min	
Débit maxi de la pompe hydraulique d'équipement au régime nominal du moteur	31 400 kPa 4550 psi		31 400 kPa 4550 psi	
Tarage des clapets de décharge :	34 300 kPa 4980 psi		34 300 kPa 4980 psi	
Commandes d'équipement	27 500 kPa 3980 psi		—	
Commandes de translation	3500 kPa 508 psi		3480 kPa 505 psi	
Commandes d'orientation				
Commandes pilotes				
Effort maximum à la barre	546 kN 122,800 lb		Lo: 546 kN 122,795 lb Hi: 278 kN 62,390 lb	
	Deux gammes de vitesse		Deux gammes de vitesse	
Vitesse max. de translation au régime nominal du moteur	Lo: 2,7 km/h 1,7 mi/h Hi: 4,4 km/h 2,7 mi/h		Lo: 2,7 km/h 1,7 mi/h Hi: 4,5 km/h 2,8 mi/h	
Largeur du patin standard	750 mm 2'6"		610 mm 2'0"	
Longueur des chaînes hors tout	6,36 m 20'10"		6360 mm 20'10,4"	
Surface de contact avec le sol avec patins standard	8,33 m² 12,910 po²		6,77 m² 10,500 po²	
Voie	2,75 m 9'0"		2,75 m 9'4"	
Élargie	3,51 m 11'6"		3,51 m 11'6"	
Contenance du réservoir de carburant	990 L 262 gal U.S.		990 L 262 gal U.S.	

*Poids en ordre de marche avec liquide de refroidissement, lubrifiants, plein de carburant, bêche monobloc, bras long, godet de petite taille, conducteur 75 kg (165 lb) et patins larges.

**Poids en ordre de marche avec liquide de refroidissement, lubrifiants, plein de carburant, bêche normale, configuration de bras moyen, godet et conducteur 75 kg (165 lb).

REMARQUE : On ne trouve pas la gamme complète de modèles dans certaines régions.
Les caractéristiques techniques peuvent aussi varier en fonction de ces régions.
Prendre contact avec le concessionnaire Caterpillar pour tous détails.

Hi = Élevée
Lo = Basse

□ Pelles hydrauliques équipement rétro (2)

Pelles hydrauliques		Fiches techniques					
							
MODÈLE		365C L		385C		385C L	
Fabrication		Belgique		Belgique		Belgique	
Puissance au volant		301 kW	404 HP	390 kW	523 HP	390 kW	523 HP
Poids en ordre de marche*		70 348 kg	155,117 lb	84 128 kg	185,502 lb	86 549 kg	190,840 lb
Capacité des godets (à refus)		1,54-3,28 m³	2,02-4,29 yd³	2,06-4,66 m³	2,69-6,1 yd³	2,06-4,66 m³	2,69-6,1 yd³
Modèle de moteur		C15 ACERT		C18 ACERT		C18 ACERT	
Régime nominal du moteur (tr/min)		1800		1800		1800	
Nombre de cylindres		6		6		8	
Alésage		137 mm	5.4"	145 mm	5.71"	145 mm	5.71"
Course		171 mm	6.75"	183 mm	7.2"	183 mm	7.2"
Cylindrée		15,2 L	928 po³	18,1 L	1104 po³	18,1 L	1104 po³
Débit maxi de la pompe hydraulique d'équipement au régime nominal du moteur		2 × 400 L/min	2 × 105 gal/min	2 × 490 L/min	2 × 129 gal/min	2 × 490 L/min	2 × 129 gal/min
Tarage des clapets de décharge :							
Commandes d'équipement		32 000 kPa	4640 psi	32 000 kPa	4640 psi	32 000 kPa	4640 psi
Commandes de translation		35 000 kPa	5080 psi	35 000 kPa	5080 psi	35 000 kPa	5080 psi
Commandes d'orientation		28 050 kPa	4070 psi	26 000 kPa	3770 psi	26 000 kPa	3770 psi
Commandes pilotes		4120 kPa	600 psi	4100 kPa	590 psi	4100 kPa	590 psi
Effort maximum à la barre		462 kN	103,860 lb	592 kN	133,200 lb	592 kN	133,200 lb
Vitesse max. de translation au régime nominal du moteur		Deux gammes de vitesse Lo: 2,5 km/h Hi: 3,9 km/h		Deux gammes de vitesse Lo: 2,8 km/h Hi: 4,5 km/h		Deux gammes de vitesse Lo: 2,8 km/h Hi: 4,5 km/h	
Largeur des patins		750 mm	2'6"	650 mm	2'1"	750 mm	2'6"
Longueur des chaînes hors tout		5,86 m	19'2"	5,84 m	19'2"	6,36 m	20'10"
Surface de contact avec le sol avec patins standard		7,06 m²	10,943 po²	6,54 m²	10,137 po²	7,22 m²	11,191 po²
Vole		2,75 m	9'0"	2,75 m	9'0"	2,75 m	9'0"
Elargie		3,25 m	10'8"	3,51 m	11'6"	3,51 m	11'6"
Contenance du réservoir de carburant		800 L	211 gal U.S.	1240 L	328 gal U.S.	1240 L	328 gal U.S.
Circuit hydraulique (réservoir compris)		670 L	177 gal U.S.	995 L	263 gal U.S.	995 L	263 gal U.S.
Réservoir hydraulique		310 L	82 gal U.S.	810 L	214 gal U.S.	810 L	214 gal U.S.

*Poids en ordre de marche de la 365C L avec liquide de refroidissement, lubrifiants, plein de carburant, flèche monocric, bras long, godet de petite taille, conducteur 75 kg (165 lb) et patins larges.
Poids en ordre de marche des 385C et 385C L avec liquide de refroidissement, lubrifiants, plein de carburant, flèche normale, configuration de bras moyen, godet et conducteur 75 kg (165 lb), et 1500 kg (3300 lb) pour les équipements.
REMARQUE : On ne trouvera pas la gamme complète de modèles dans certaines régions.
Les caractéristiques techniques peuvent aussi varier en fonction de ces régions.
Prendre contact avec le concessionnaire Caterpillar pour tous détails.

Hi = Elevée
Lo = Basse

□ Décapeuses conventionnelles à un moteur

Wheel Tractor-Scrapers		Specifications	
		● Standard Scrapers	
		 	
MODEL		621G	631G
Flywheel Power		246/272 kW	330/365 hp
Approx. Operating Weight (Empty)◀		33 995 kg	74,946 lb
Scraper Capacity: Struck		12 m³	15.7 yd³
Heaped		17 m³	22 yd³
Rated Load		23 950 kg	52,800 lb
Weight Distribution — Empty:			
Drive		67%	64%
Rear		33%	36%
Weight Distribution — Loaded:			
Drive		52%	52%
Rear		48%	48%
Engine Model		C15 ACERT	C18 ACERT
Rated Engine RPM		1800	1800
Displacement		15.2 L	928 in³
Top Speed (Loaded)		51 km/h	32 mph
180° Curb-to-Curb Turning Width		11.7 m	38'5"
Tires — Tractor Drive		33.25R29**E2/E3	37.25R35**E2/E3
Scraper		33.25R29**E2/E3	37.25R35**E2/E3
Width of Cut		3.02 m	9'11"
Maximum Depth of Cut		333 mm	13.1"
Maximum Depth of Spread		522 mm	20.6"
Fuel Tank Refill Capacity		606 L	160 U.S. gal
GENERAL DIMENSIONS:			
Height to Top of Scraper		3.71 m	12'2"
Wheelbase		7.72 m	25'4"
Overall Length		12.88 m	42'3"
Overall Width		3.58 m	11'9"
Shipping Width			
(Draft Arm on Inside of Bowl)		—	3.63 m
Scraper Tread		2.23 m	7'4"
Tractor Tread		2.20 m	7'3"

◀ Operating weight includes standard machine, coolant, lubricants, full fuel tank, and operator.

□ Décapeuses bimoteurs (push pull)

Specifications
● Tandem Powered Auger

Wheel Tractor-Scrapers

627G

637G

657G

MODEL

Flywheel Power: Tractor	246/272 kW	330/365 hp	345/373 kW	462/500 hp	421/447 kW	564/600 hp
Scraper	178/198 kW	239/266 hp	198/211 kW	266/283 hp	306/337 kW	410/451 hp
Approx. Operating Weight (Empty)◀	41 907 kg	92,388 lb	59 455 kg	131,076 lb	80 830 kg	178,200 lb
Scraper Capacity (Heaped)	15.96 m³	21 yd³	23.7 m³	31 yd³	33.6 m³	44 yd³
Rated Load	22 861 kg	50,400 lb	33 747 kg	74,400 lb	41 911 kg	92,400 lb
Approx. Operating Weight (Loaded)	64 768 kg	142,788 lb	93 202 kg	205,476 lb	122 742 kg	270,600 lb
AUGER ATTACHMENT:						
Auger Diameter	1320 mm	4'4"	1524 mm	5'0"	1676 mm	5'6"
Auger RPM	Variable 55 to 35 RPM		Variable 55 to 35 RPM		Variable 55 to 35 RPM	
Auger Power	149 kW	200 hp	201 kW	270 hp	354 kW	475 hp
Hydraulic Flow	273 L/min	72 gpm	378 L/min	100 gpm	549 L/min	145 gpm
Cooling Flow	—		—		132 L/min	
System Pressure	41 370 kPa	6000 psi	37 923 kPa	5500 psi	41 340 kPa	5700 psi
Auger Control	electronic		electronic		electronic	

◀ Operating weight includes standard machine, coolant, lubricants, full fuel tank and operator.

The auger scraper is a self-loading system that offers an alternative to conventional, push-pull or elevating scrapers. An independent hydrostatic system powers the auger which is located near the center of the bowl. The rotating auger lifts and evenly distributes over 50% of the material that flows over the scraper cutting edge. This action reduces the cutting edge resistance allowing the wheel tractor-scraper to continue moving through the cut and quickly obtain full rated loads.

Advantages:

- Self-load in equal or less time
- Requires shorter cut distance
- Complete material ejection (angled ejector pushes material)
- Significantly reduces dust problems in dry material
- Increased tire life
- Broader material appetite
- Better material retention on haul road (closed apron instead of open elevator)

8

□ Bouteurs terrassements

Waste Handling Track-Type Tractors		Specifications							
									
MODEL		D7R Series 2 WHA		D7R XR Series 2 WHA		D7R LGP Series 2 WHA		D8R WHA	
Flywheel Power		179 kW	240 hp	179 kW	240 hp	179 kW	240 hp	228 kW	305 hp
Operating Weight*		28 108 kg	61,912 lb	28 764 kg	63,357 lb	30 328 kg	66,802 lb	37 630 kg	82,880 lb
Power Shift Differential Steer		3176C SCAC		3176C SCAC		3176C SCAC		3406E TA	
Engine Model		2100		2100		2100		2100	
Rated Engine RPM		6		6		6		6	
No. of Cylinders		125 mm	4.92"	125 mm	4.92"	125 mm	4.92"	137 mm	5.4"
Bore		140 mm	5.5"	140 mm	5.5"	140 mm	5.5"	165 mm	6.5"
Stroke		10.3 L	629 in³	10.3 L	629 in³	10.3 L	629 in³	14.6 L	893 in³
Displacement		7		8		7		8	
Track Rollers (Each Side)		—		—		9		—	
ERF†		560 mm	1'10"	610 mm	2'0"	914 mm	3'0"	560 mm	1'10"
Width of Standard Track Shoe		2.89 m	9'5"	3.05 m	10'0"	3.16 m	10'5"	3.21 m	10'6"
Length of Track on Ground		3.22 m²	4096 in²	3.72 m²	5768 in²	5.78 m²	8960 in²	3.57 m²	5544 in²
Ground Contact Area (w/Std. Shoe)		1.98 m	6'6"	1.98 m	6'6"	2.24 m	7'4"	2.08 m	6'10"
Track Gauge		GENERAL DIMENSIONS:							
		Height (Stripped Top)**							
		Height (To Top of ROPS Canopy)							
		Height (To Top of ROPS Cab)							
		Overall Length (with SU Blade)***							
		(without Blade)							
		Overall Length (with S Blade)							
		(without Blade)							
		Width (Over Trunnion)							
		Width (without Trunnion — Std. Shoe)							
		Ground Clearance							
		Blade Types and Widths:							
		Straight							
		Angle Straight							
		Full 25° Angle							
		Universal							
		Semi-U							
		Fuel Tank Refill Capacity							
		479 L	127 U.S. gal	479 L	127 U.S. gal	479 L	127 U.S. gal	625 L	165 U.S. gal

FTC — Fingertip clutch/brake control

□ Bouteurs (Terrassements et utilisation pousseurs)

		Specifications				Waste Handling Track-Type Tractors	
							
MODEL		D8T WHA		D9T WHA		D10T WHA	
Flywheel Power		231 kW	310 hp	306 kW	410 hp	433 kW	580 hp
Operating Weight*		38 660 kg	85,150 lb	49 567 kg	109,180 lb	65 764 kg	144,986 lb
Power Shift Differential Steer		C15 ACERT		C18 ACERT		C27 ACERT	
Engine Model		1850		1800		1800	
Rated Engine RPM		6		8		12	
No. of Cylinders		137 mm	5.4"	145 mm	5.7"	137 mm	5.4"
Bore		172 mm	6.75"	183 mm	7.2"	152 mm	6"
Stroke		15.2 L	928 in³	18.1 L	1106 in³	27 L	1649 in³
Displacement		8		8		8	
Track Rollers (Each Side)		560 mm	1'10"	610 mm	2'0"	610 mm	2'0"
Width of Standard Track Shoe		3.21 m	10'6"	3.47 m	11'5"	3.88 m	12'9"
Length of Track on Ground		3.58 m²	5544 in²	4.24 m²	6569 in²	4.74 m²	7347 in²
Ground Contact Area (w/Std. Shoe)		2.08 m	6'10"	2.25 m	7'5"	2.55 m	8'4"
Track Gauge		GENERAL DIMENSIONS:					
		Height (Stripped Top)**					
		Height (To Top of ROPS Canopy)					
		Height (To Top of ROPS Cab)					
		Overall Length (with Blade and Ripper)					
		(without Blade and Ripper)					
		Overall Length (with SU Blade)***					
		(without Blade)					
		Width (Over Trunnion)					
		Width (without Trunnion — Std. Shoe)					
		Ground Clearance					
		Blade Types and Widths:					
		Angle Straight					
		Full 25° Angle					
		Universal					
		Semi-U					
		Fuel Tank Refill Capacity					
		643 L	170 U.S. gal	889 L	235 U.S. gal	1109 L	293 U.S. gal

25

□ Bouteurs (Accompagnement échelons - régalage- talus)

MODEL	Specifications		Waste Handling Track-Type Tractors	
	 D6T XL WHA	 D6T XW WHA	 D6T LGP WHA	
Flywheel Power	149 kW 200 hp	149 kW 200 hp	149 kW 200 hp	
Operating Weight (Power Shift Differential Steer)* SU Blade	20 148 kg 44,420 lb	20 739 kg 45,723 lb	21 783 kg 48,024 lb	
Engine Model	C9 ACERT	C9 ACERT	C9 ACERT	
Rated Engine RPM	1850	1850	1850	
No. of Cylinders	6	6	6	
Bore	112 mm 4.4"	112 mm 4.4"	112 mm 4.4"	
Stroke	140 mm 5.9"	140 mm 5.9"	140 mm 5.9"	
Displacement	8.8 L 537 in³	8.8 L 537 in³	8.8 L 537 in³	
Track Rollers (Each Side)	7	7	8	
Width of Standard Track Shoe:				
VPAT	560 mm 1'10"	760 mm 2'6"	915 mm 3'0"	
Length of Track on Ground	560 mm 1'10"	760 mm 2'6"	810 mm 2'10"	
Ground Contact Area (with Std. Shoe)	2.87 m 9'5"	2.87 m 9'5"	3.28 m 10'9"	
VPAT	3.22 m² 4972 in²	4.36 m² 6780 in²	5.99 m² 9288 in²	
Track Gauge	3.22 m² 4972 in²	4.36 m² 6780 in²	5.31 m² 8256 in²	25
VPAT	1.88 m 6'2"	2.03 m 6'8"	2.29 m 7'6"	
VPAT	2.13 m 7'0"	2.29 m 7'6"	2.29 m 7'6"	
GENERAL DIMENSIONS:				
Height (Stripped Top)**	2.38 m 7'10"	2.38 m 7'10"	2.43 m 8'0"	
Height (To Top of ROPS Canopy)	3.20 m 10'6"	3.20 m 10'6"	3.25 m 10'8"	
Height (To Top of ROPS Cab)	3.20 m 10'6"	3.20 m 10'6"	3.25 m 10'8"	
Overall Length (without Blade)	3.86 m 12'8"	3.86 m 12'8"	4.25 m 13'11"	
with S Blade	—	—	5.47 m 17'11"	
with SU Blade	5.33 m 17'6"	5.33 m 17'6"	—	
with VPAT Blade	5.27 m 17'4"	5.27 m 17'4"	5.97 m 19'7"	
with Angle Blade	5.21 m 17'1"	5.21 m 17'1"	—	
Overall Length (VPAT)	3.86 m 12'8"	3.86 m 12'8"	4.25 m 13'11"	
with S Blade	—	—	5.47 m 17'11"	
with SU Blade	5.33 m 17'6"	5.33 m 17'6"	—	
with VPAT Blade	5.27 m 17'4"	5.27 m 17'4"	5.97 m 19'7"	
with Angle Blade	5.21 m 17'1"	5.21 m 17'1"	—	
Width (Over Trunnion)	2.64 m 8'8"	2.95 m 9'8"	3.43 m 11'3"	
Width (without Trunnion — Std. Track)	2.44 m 8'0"	2.74 m 9'0"	3.15 m 10'4"	
Ground Clearance	383 mm 1'3"	383 mm 1'3"	433 mm 1'5"	
Blade Types and Widths:				
Straight	—	—	4.06 m 13'4"	
Angle Straight	4.17 m 13'8"	4.20 m 13'9"	—	
Full 25° Angle	3.78 m 12'5"	3.81 m 12'6"	—	
Semi-U	3.26 m 10'8"	3.56 m 11'8"	—	
VPAT (Variable pitch, angle, and tilt) straight	3.88 m 12'9"	4.16 m 13'8"	4.16 m 13'8"	
VPAT Full 25° Angle	3.55 m 11'8"	3.81 m 12'6"	3.81 m 12'6"	
Fuel Tank Refill Capacity	424 L 112 U.S. gal	424 L 112 U.S. gal	424 L 112 U.S. gal	

□ Chargeuses sur pneus

MODEL	Specifications		Waste Handling Wheel Loaders	
	 966H WHA	 972H WHA	 980H WHA	
Net Power	195 kW 262 hp	214 kW 287 hp	237 kW 318 hp	
Gross Power	211 kW 283 hp	229 kW 307 hp	261 kW 351 hp	
Engine Model	C11 ATAAC	C13 ATAAC	C15	
Rated Engine RPM	1800	1800	1800	
Bore	130 mm 5.1"	130 mm 5.1"	137 mm 5.4"	
Stroke	140 mm 5.5"	157 mm 6.2"	171 mm 6.75"	
No. Cylinders	6	6	6	
Displacement	11.1 L 677 in³	12.5 L 763 in³	15.2 L 928 in³	
Speeds Forward				
1st	6.7 km/h 4.2 mph	7.2 km/h 4.5 mph	6.6 km/h 4.1 mph	
2nd	12.6 km/h 7.8 mph	12.6 km/h 7.8 mph	11.8 km/h 7.3 mph	
3rd	22.1 km/h 13.7 mph	21.4 km/h 13.3 mph	20.7 km/h 12.9 mph	
4th	37.4 km/h 23.2 mph	36.9 km/h 22.9 mph	36.3 km/h 22.6 mph	
Speeds Reverse				
1st	7.4 km/h 4.6 mph	8.2 km/h 5.1 mph	7.6 km/h 4.7 mph	
2nd	13.7 km/h 8.6 mph	14.2 km/h 8.8 mph	13.5 km/h 8.4 mph	
3rd	23.4 km/h 15.1 mph	24.3 km/h 15.1 mph	23.7 km/h 14.7 mph	
4th	37.4 km/h 23.2 mph	38.8 km/h 24.0 mph	41.5 km/h 25.8 mph	
Hydraulic Cycle Time*				
Rated Load in Bucket:				
Raise	Seconds 5.9	Seconds 5.9	Seconds 6.0	
Dump	1.6	2.1	2.0	
Lower (empty, float down)	2.4	2.4	3.4	
Total	9.9	10.4	11.4	
Tread Width**	2.23 m 7'4"	2.23 m 7'4"	2.44 m 8'0"	
Width Over Tires**	3.00 m 9'10"	3.00 m 9'10"	3.23 m 10'7"	
Ground Clearance**	496 mm 20"	496 mm 20"	442 mm 17'4"	
Fuel Tank Capacity	380 L 100 U.S. gal	380 L 100 U.S. gal	479 L 127 U.S. gal	
Hydraulic Tank Capacity	110 L 29 U.S. gal	110 L 29 U.S. gal	125 L 33 U.S. gal	
Hinge Pin Height:				
Full Lift Std.	4.23 m 13'10"	4.87 m 14'8"	4.51 m 14'9"	
High Lift w/L-5 tires	4.79 m 15'8"	4.81 m 15'9"	4.75 m 15'7"	
Operating weight up to:	24 237 kg 53,443 lb	26 051 kg 57,442 lb	31 599 kg 69,676 lb	

□ Tombereaux articulés (1)

Articulated Trucks | Specifications

			
MODEL	725	730	730 Ejector
Gross Power — SAE J1995	230 kW 309 hp	242 kW 325 hp	242 kW 325 hp
Net Power — SAE J1349	225 kW 301 hp	237 kW 317 hp	237 kW 317 hp
Net Power — ISO 9249	227 kW 304 hp	239 kW 321 hp	239 kW 321 hp
Net Power — EEC 80/1269	227 kW 304 hp	239 kW 321 hp	239 kW 321 hp
Operating Weight (Empty)*	22 260 kg 49,075 lb	22 850 kg 50,376 lb	25 550 kg 56,328 lb
Top Speed (Loaded)	56.8 km/h 35.3 mph	55.3 km/h 34.4 mph	55.3 km/h 34.4 mph
GMW — Gross Machine Weight	45 850 kg 101,082 lb	50 970 kg 112,370 lb	53 670 kg 118,322 lb
Distribution Empty:			
Front	58.5%	57.5%	54.7%
Center	21.7%	21.9%	23.3%
Rear	19.8%	20.6%	22.0%
Distribution Loaded:			
Front	32.7%	31.1%	27.7%
Center	34.1%	34.7%	36.5%
Rear	33.1%	34.2%	35.8%
Max. Capacity**	23.6 t 26 T	28.1 t 31 T	28.1 t 31 T
Struck (SAE)	11.1 m³ 14.5 yd³	13.1 m³ 17.1 yd³	13.5 m³ 17.7 yd³
Heaped (2:1) (SAE)	14.3 m³ 18.7 yd³	16.9 m³ 22.1 yd³	16.9 m³ 22.1 yd³
Engine Model	ACERT C11	ACERT C11	ACERT C11
No. Cylinders	6	6	6
Bore	130 mm 5.1"	130 mm 5.1"	130 mm 5.1"
Stroke	140 mm 5.5"	140 mm 5.5"	140 mm 5.5"
Displacement	11.2 L 680 in³	11.2 L 680 in³	11.2 L 680 in³
Tires, Front, Center, Rear	23.5R25 Radials	23.5R25 Radials	750/65 Radials
Circular Clearance Diameter	15.2 m 49'9"	15.2 m 49'9"	15.4 m 50'5"
Fuel Tank Refill Capacity	360 L 95 U.S. gal	360 L 95 U.S. gal	360 L 95 U.S. gal
General Dimensions (Empty):			
Height to Cab Top	3.44 m 11'3"	3.44 m 11'3"	3.45 m 11'3"
Wheel Base (Front-Center of Bogie)	4.67 m 15'4"	4.67 m 15'4"	4.67 m 15'4"
Overall Length	9.92 m 32'5"	9.92 m 32'5"	9.73 m 31'9"
Loading Height (Empty)	2.76 m 9'1"	2.89 m 9'5"	3.05 m 10'0"
Height at Full Dump	6.41 m 21'1"	6.50 m 21'3"	—
Body Length	5.78 m 19'0"	5.84 m 19'2"	5.35 m 17'6"
Width (Operating)	3.54 m 11'7"	3.54 m 11'7"	3.54 m 11'7"
Front Tire Tread	2.28 m 7'5"	2.28 m 7'5"	2.28 m 7'5"

□ Tombereaux articulés (2)

Specifications | Articulated Trucks

			
MODEL	735	740	740 Ejector
Gross Power — SAE J1995	324 kW 435 hp	350 kW 469 hp	350 kW 469 hp
Net Power — SAE J1349	313 kW 419 hp	338 kW 453 hp	338 kW 453 hp
Net Power — ISO 9249	319 kW 424 hp	342 kW 458 hp	342 kW 458 hp
Net Power — EEC 80/1269	319 kW 424 hp	342 kW 458 hp	342 kW 458 hp
Operating Weight (Empty)*	31 391 kg 69,206 lb	33 100 kg 72,973 lb	35 610 kg 78,507 lb
Top Speed (Loaded)	51.3 km/h 31.9 mph	54.7 km/h 34 mph	54.7 km/h 34 mph
GMW — Gross Machine Weight	64 091 kg 141,297 lb	72 600 kg 160,055 lb	73 610 kg 162,282 lb
Distribution Empty:			
Front	60.5%	58.6%	55.6%
Center	20.8%	21.8%	23.1%
Rear	18.7%	19.6%	21.3%
Distribution Loaded:			
Front	34.9%	33.9%	29.1%
Center	33.1%	33.5%	35.9%
Rear	32%	32.6%	35.0%
Max. Capacity**	32.7 t 36 T	39.5 t 43.5 T	38 t 42 T
Struck (SAE)	14.5 m³ 19.0 yd³	18.5 m³ 24.2 yd³	17.8 m³ 23.3 yd³
Heaped (2:1) (SAE)	19.7 m³ 25.8 yd³	24 m³ 31.4 yd³	23.1 m³ 30.2 yd³
Engine Model	ACERT C15	ACERT C15	ACERT C15
No. Cylinders	6	6	6
Bore	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"
Stroke	171.5 mm 6.75"	171.5 mm 6.75"	171.5 mm 6.75"
Displacement	15.2 L 926 in³	15.2 L 926 in³	15.2 L 926 in³
Tires, Front, Center, Rear	26.5R25 Radials	29.5R25 Radials	29.5R25 Radials
Circular Clearance Diameter	17.2 m 56'5"	17.2 m 56'5"	18.2 m 59'6"
Fuel Tank Refill Capacity	532 L 140.5 U.S. gal	532 L 140.5 U.S. gal	532 L 140.5 U.S. gal
General Dimensions (Empty):			
Height to Cab Top	3.7 m 12'1"	3.75 m 12'3"	3.75 m 12'3"
Wheel Base (Front-Center of Bogie)	5.23 m 17'2"	5.23 m 17'2"	5.58 m 18'3"
Overall Length	10.89 m 35'7"	10.89 m 35'7"	11.59 m 38'0"
Loading Height (Empty)	2.98 m 9'10"	3.2 m 10'6"	3.07 m 10'1"
Height at Full Dump	6.81 m 22'4"	7.1 m 23'4"	—
Body Length	6.09 m 20'0"	6.3 m 20'6"	6.73 m 22'1"
Width (Operating)	3.82 m 12'6"	3.82 m 12'6"	3.82 m 12'6"
Front Tire Tread	2.69 m 8'8"	2.69 m 8'8"	2.69 m 8'8"

*Includes coolant, lubricant and full fuel tank.

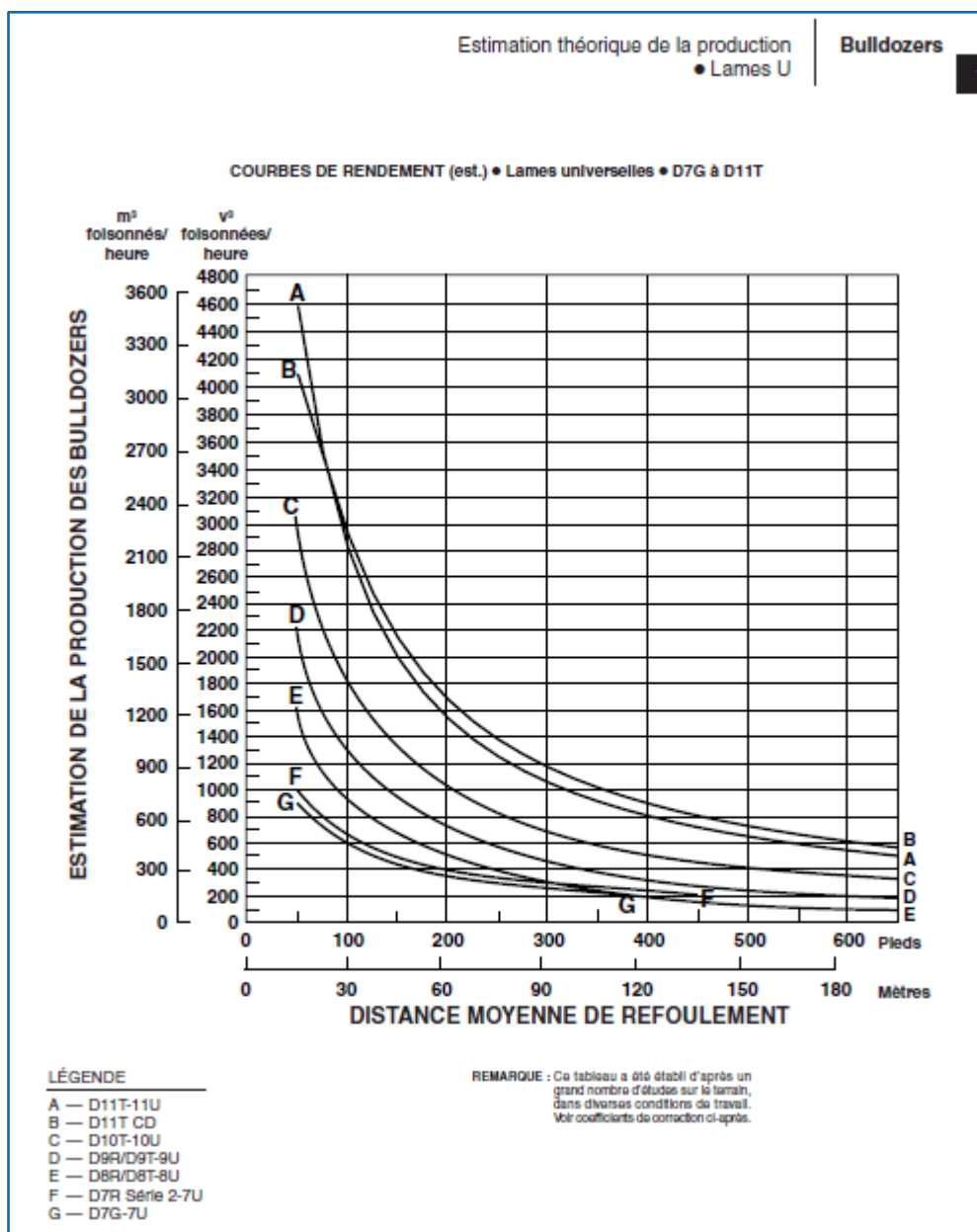
**Rating dependent on optional equipment. Maximum gross weight (empty weight plus payload) should not be exceeded.

□ Tombereaux rigides (1)

MODEL				
Body Type	Medium Impact Steel Flat Floor	Medium Impact Steel Dual Slope	Medium Impact Steel Flat Floor	Medium Impact Steel Dual Slope
Gross Machine Weight	71 214 kg 157,000 lb	71 214 kg 157,000 lb	82 100 kg 181,000 lb	82 100 kg 181,000 lb
Chassis Weight*	24 613 kg 54,262 lb	24 613 kg 54,262 lb	25 425 kg 56,053 lb	25 425 kg 56,053 lb
Body System Weight	10 029 kg 22,119 lb	10 019 kg 22,068 lb	10 439 kg 23,013 lb	10 413 kg 22,956 lb
Target Payload**	36 572 kg 80,628 lb	36 582 kg 80,650 lb	46 236 kg 101,934 lb	46 262 kg 101,991 lb
Capacity:				
Struck (SAE)	16.4 m³ 21.5 yd³	16.4 m³ 21.5 yd³	23.3 m³ 30.5 yd³	24.2 m³ 31.7 yd³
Heaped (2:1) (SAE)	25.1 m³ 32.8 yd³	25.1 m³ 32.8 yd³	31.3 m³ 41.0 yd³	31.2 m³ 40.8 yd³
Distribution Empty:				
Front	48%	48%	48%	48%
Rear	52%	52%	52%	52%
Distribution Loaded:				
Front	33%	33%	33%	33%
Rear	67%	67%	67%	67%
Engine Model	C15 ACERT	C15 ACERT	C15 ACERT	C15 ACERT
Number of Cylinders	6	6	6	6
Bore	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"	145 mm 5.7"	145 mm 5.7"
Stroke	171 mm 6.7"	171 mm 6.7"	183 mm 7.2"	183 mm 7.2"
Displacement	15 L 928 in³	15 L 928 in³	18 L 1105 in³	18 L 1105 in³
Net Power	325 kW 475 hp	325 kW 475 hp	399 kW 535 hp	399 kW 535 hp
Gross Power	381 kW 511 hp	381 kW 511 hp	446 kW 598 hp	446 kW 598 hp
Standard Tires	18.0R33 (E4)	18.0R33 (E4)	21.0R33 (E4)	21.0R33 (E4)
Machine Clearance				
Turning Circle	20.2 m 66'3"	20.2 m 66'3"	21.6 m 70'10"	21.6 m 70'10"
Fuel Tank Refill Capacity	529 L 140 U.S. gal	529 L 140 U.S. gal	529 L 140 U.S. gal	529 L 140 U.S. gal
Top Speed (Loaded)	74.8 km/h 46.5 mph	74.8 km/h 46.5 mph	70.7 km/h 43.9 mph	70.7 km/h 43.9 mph
GENERAL DIMENSIONS (Empty):				
Height to Canopy Rock Guard Rail	4.14 m 13'7"	4.14 m 13'7"	4.22 m 13'10"	4.22 m 13'10"
Wheelbase	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"
Overall Length (Operating)	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"
Overall Length (Shipping)	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"	8.74 m 28'9"
Loading Height (Empty)	3.12 m 10'3"	3.12 m 10'3"	3.50 m 11'6"	3.50 m 11'6"
Height at Full Dump	8.28 m 27'2"	8.28 m 27'2"	8.36 m 27'5"	8.36 m 27'5"
Body Length (Target Length)	5.55 m 18'3"	5.55 m 18'3"	5.55 m 18'3"	5.55 m 18'3"
Width (Operating)	4.75 m 15'8"	4.75 m 15'8"	4.75 m 15'8"	4.75 m 15'8"
Width (Shipping)***	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"	3.96 m 13'0"
Front Tire Tread	3.11 m 10'3"	3.11 m 10'3"	3.17 m 10'5"	3.17 m 10'5"

□ Tombereaux rigides (2)

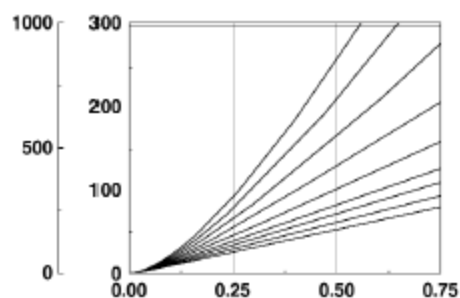
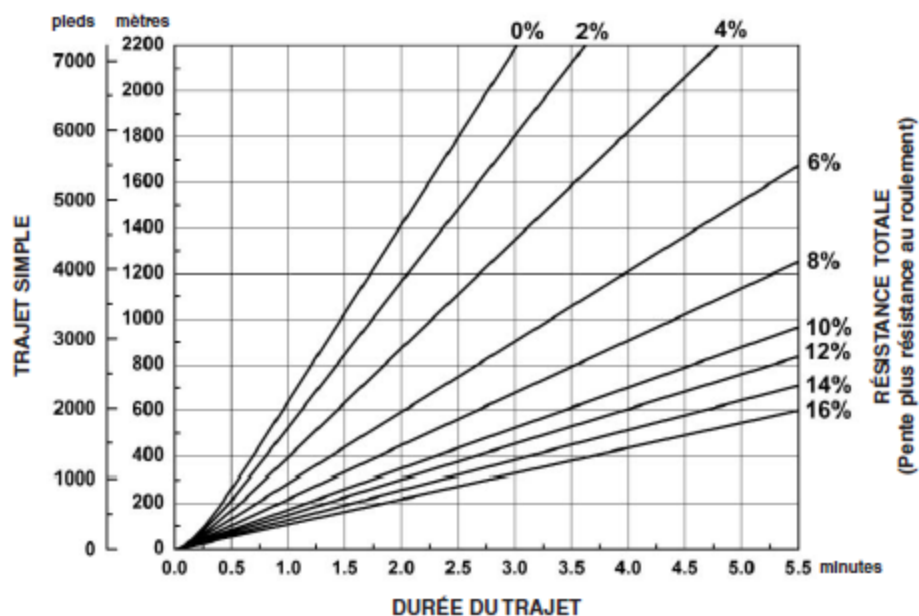
MODEL				
Body Type	Medium Impact Steel Flat Floor	Medium Impact Steel Dual Slope	Medium Impact Steel Flat Floor	Medium Impact Steel Dual Slope
Gross Machine Weight	100 698 kg 222,000 lb	100 698 kg 222,000 lb	109 769 kg 242,000 lb	109 769 kg 242,000 lb
Chassis Weight*	32 164 kg 70,908 lb	32 164 kg 70,908 lb	32 164 kg 70,908 lb	32 164 kg 70,908 lb
Body System Weight	12 905 kg 28,451 lb	12 961 kg 28,574 lb	13 456 kg 29,665 lb	13 552 kg 29,877 lb
Target Payload**	55 629 kg 122,641 lb	55 573 kg 122,518 lb	64 149 kg 141,427 lb	64 053 kg 141,215 lb
Capacity:				
Struck (SAE)	25.9 m³ 33.8 yd³	26.8 m³ 35.0 yd³	32.0 m³ 41.8 yd³	33.1 m³ 43.3 yd³
Heaped (2:1) (SAE)	35.1 m³ 45.9 yd³	35.6 m³ 46.5 yd³	41.9 m³ 54.8 yd³	42.5 m³ 55.6 yd³
Distribution Empty:				
Front	51%	51%	49%	49%
Rear	49%	49%	51%	51%
Distribution Loaded:				
Front	35%	35%	33%	33%
Rear	65%	65%	67%	67%
Engine Model	C27 ACERT	C27 ACERT	C27 ACERT	C27 ACERT
Number of Cylinders	12	12	12	12
Bore	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"	137 mm 5.4"
Stroke	152 mm 6"	152 mm 6"	152 mm 6"	152 mm 6"
Displacement	27 L 1649 in³	27 L 1649 in³	27 L 1649 in³	27 L 1649 in³
Net Power	524 kW 703 hp	524 kW 703 hp	552 kW 740 hp	552 kW 740 hp
Gross Power	552 kW 740 hp	552 kW 740 hp	587 kW 787 hp	587 kW 787 hp
Standard Tires	24.00R35 (E4)	24.00R35 (E4)	24.00R35 (E4)	24.00R35 (E4)
Machine Clearance				
Turning Circle	26.1 m 85'8"	26.1 m 85'8"	26.1 m 85'8"	26.1 m 85'8"
Fuel Tank Refill Capacity	700 L 185 U.S. gal	700 L 185 U.S. gal	700 L 185 U.S. gal	700 L 185 U.S. gal
Top Speed (Loaded)	67.5 km/h 41.9 mph	67.5 km/h 41.9 mph	67.5 km/h 41.9 mph	67.5 km/h 41.9 mph
GENERAL DIMENSIONS (Empty):				
Height to Canopy Rock Guard Rail	4.44 m 14'7"	4.46 m 14'8"	4.43 m 14'6"	4.43 m 14'6"
Wheelbase	4.22 m 13'10"	4.22 m 13'10"	4.22 m 13'10"	4.22 m 13'10"
Overall Length (Operating)	10.33 m 33'11"	10.25 m 33'7"	10.33 m 33'11"	10.33 m 33'11"
Overall Length (Shipping)	9.20 m 30'2"	9.20 m 30'2"	9.21 m 30'3"	9.21 m 30'3"
Loading Height (Empty)	3.77 m 12'5"	3.82 m 12'6"	3.97 m 13'0"	3.95 m 12'11"
Height at Full Dump	9.26 m 30'5"	9.26 m 30'5"	9.26 m 30'5"	9.26 m 30'5"
Body Length (Target Length)	6.34 m 20'9"	6.25 m 20'6"	6.20 m 20'4"	6.12 m 20'1"
Width (Operating)	5.43 m 17'10"	5.43 m 17'10"	5.39 m 17'8"	5.26 m 17'2"
Width (Shipping)***	3.99 m 13'1"	3.99 m 13'1"	3.97 m 13'0"	3.97 m 13'0"
Front Tire Tread	3.21 m 10'6"	3.21 m 10'6"	3.21 m 10'6"	3.21 m 10'6"



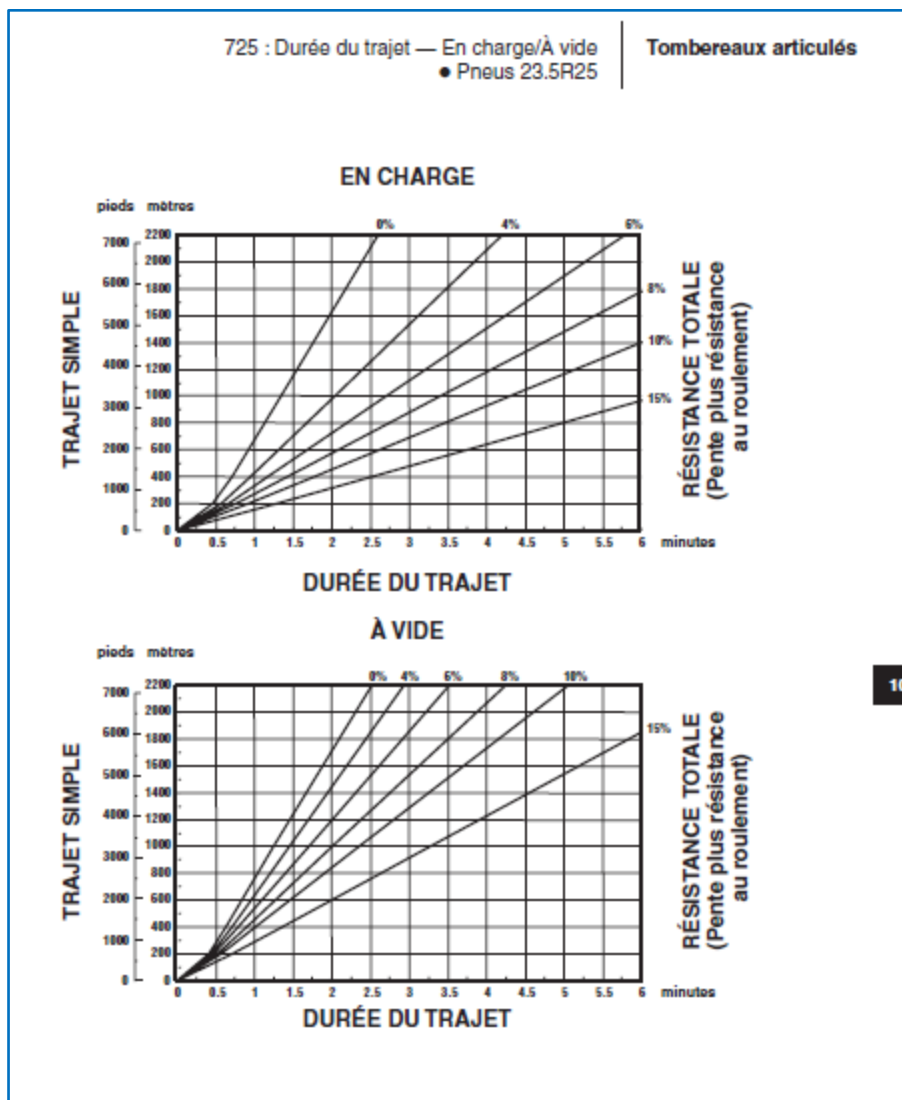
Décapeuses automotrices

Durée du trajet, 613G — en charge
● Pneus 23.5R25

EN CHARGE



Poids à vide : 16 887 kg (37,229 lb)
Charge utile : 11 975 kg (26,400 lb)



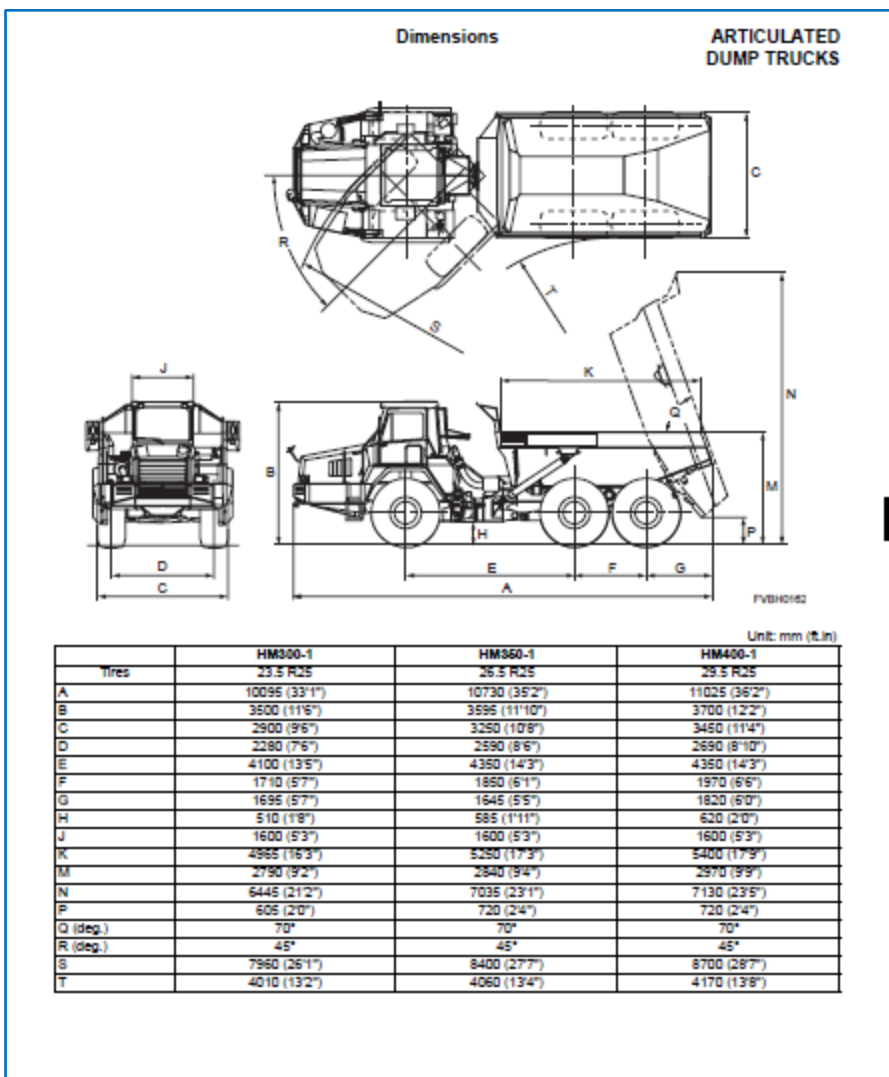
7-2 Exemples de fiches de caractéristiques des constructeurs

Références KOMATSU

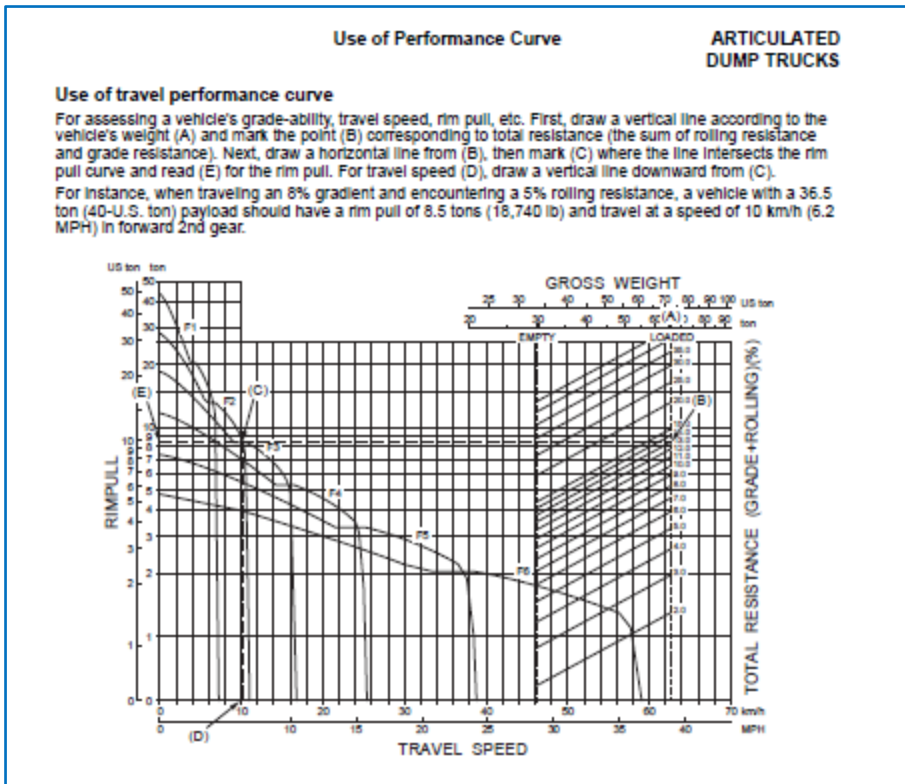
SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK - Edition 24 - March 2003

KOMATSU

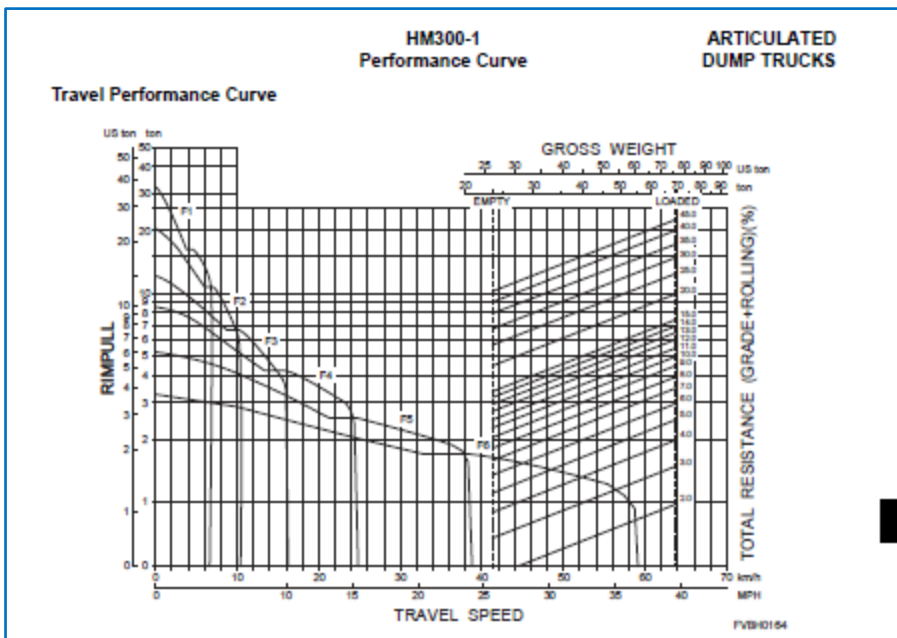
☐ Tombereaux articulés (1)



□ **Tombereaux articulés (2)**



□ **Tombereaux articulés (3)**



□ Tombereaux rigides (1)

Dimensions

OFF-HIGHWAY DUMP TRUCKS

The image contains two technical drawings of an off-highway dump truck. The top drawing is a side profile view showing the truck's chassis, wheels, and the dump body. Dimension lines are labeled with letters: A (wheelbase), B (overall length), C (overall width), D (front overhang), E (rear overhang), F (ground clearance at front), G (ground clearance at rear), H (height to top of cab), J (height to top of dump body), K (height to top of dump body at rear), M (height to top of dump body at front), N (height to top of dump body at rear), P (height to top of dump body at front), Q (height to top of dump body at rear), R (height to top of dump body at front), and S (height to top of dump body at rear). The bottom drawing is a front view showing the truck's width and height. Dimension lines are labeled with letters: A (wheelbase), B (overall width), C (overall height), D (height to top of cab), E (height to top of dump body), F (height to top of dump body at front), G (height to top of dump body at rear), H (height to top of dump body at front), J (height to top of dump body at rear), K (height to top of dump body at front), M (height to top of dump body at rear), N (height to top of dump body at front), P (height to top of dump body at front), Q (height to top of dump body at rear), R (height to top of dump body at front), and S (height to top of dump body at rear).

Unit: mm (ft.in)

	HD266-6	HD326-8	HD326-8 4WD	HD406-8	HD486-7	HD806-7	HD786-6	HD786-6**	HD986-6
Tires	16.00-25- 28PR	18.00-33- 28PR	18.00-R33	18.00-R33	24.00-35- 36PR	24.00-R35	27.00-R49	27.00-R49	30.00-R51
A	7290 (23'11")	8365 (27'5")	8365 (27'5")	8365 (27'5")	9355 (30'8")	9355 (30'8")	10490 (34'5")	10620 (34'10")	10610 (34'10")
B*	3560 (11'8")	4150 (13'7")	4150 (13'7")	4150 (13'7")	4400 (14'5")	4400 (14'5")	5050 (16'7")	5270 (17'3")	5120 (16'3")
C	3200 (10'6")	3660 (12')	3660 (12')	3660 (12')	4170 (13'8")	4170 (13'8")	5210 (17'1")	5430 (17'10")	5210 (17'1")
D	3600 (11'10")	3750 (12'4")	3750 (12'4")	3750 (12'4")	4300 (14'1")	4300 (14'1")	4950 (16'3")	4950 (16'3")	4950 (16'3")
E	2140 (7')	2630 (8'8")	2630 (8'8")	2630 (8'8")	3070 (10'1")	3070 (10'1")	3390 (11'1")	3370 (11'1")	3510 (11'6")
G	490 (1'7")	480 (1'7")	480 (1'7")	480 (1'7")	480 (1'7")	490 (1'7")	450 (1'6")	430 (1'5")	350 (1'2")
H	405 (1'4")	500 (1'8")	500 (1'8")	500 (1'8")	645 (2'1")	645 (2'1")	875 (2'10")	810 (2'8")	875 (2'10")
J	2700 (8'10")	3150 (10'4")	3190 (10'6")	3150 (10'4")	3515 (11'6")	3515 (11'6")	4230 (13'11")	4230 (13'11")	4420 (14'6")
K	2180 (7'2")	2550 (8'4")	2550 (8'4")	2550 (8'4")	3080 (10'1")	3080 (10'1")	3500 (11'6")	3500 (11'5")	3720 (12'2")
M	4570 (15')	5500 (18'1")	5500 (18'1")	5590 (18'4")	6450 (21'2")	6600 (21'8")	7480 (24'7")	7760 (25'5")	7550 (24'9")
N	2995 (9'10")	3380 (11'1")	3380 (11'1")	3380 (11'1")	3870 (12'8")	3870 (12'8")	4880 (16')	4990 (16'4")	4870 (16')
P	500 (1'8")	530 (1'9")	530 (1'9")	530 (1'9")	560 (1'10")	560 (1'10")	810 (2'8")	800 (2'7")	855 (2'10")
Q	45*	48*	48*	48*	48*	48*	48*	48*	47*
R	2940 (9'8")	3200 (10'6")	3200 (10'6")	3430 (11'3")	3600 (11'10")	3960 (12'8")	4285 (14'1")	4290 (14'1")	4545 (14'11")
S	7060 (23'2")	7865 (25'10")	7865 (25'10")	7865 (25'10")	8800 (28'10")	8800 (28'10")	10080 (33'1")	10210 (33'6")	10135 (33')

* Includes canopy spill guard.

** USA source

□ Tombereaux rigides (2)

Model Selection		EXCAVATORS (BACKHOE)		
1. Basic idea for excavator selection The concept of the combination of bucket size, arm length, and boom length for hydraulic excavators to match the nature of the operation is as follows.				
Main-types of work		Combination		
		Boom/Arm	+	Bucket
1) Wider working range		Long boom Long arm	+	Small capacity bucket
2) Larger production		Short boom Short arm	+	Large capacity bucket
3) Larger digging force, Larger lifting capacity		Short arm	+	Narrow bucket Ripper bucket
4) Heavy-duty work		Strengthened boom Strengthened arm	+	Heavy-duty bucket
2. Wrong combination 1) Long Arm with Large Capacity Bucket If the machine is operated with a long arm and a large capacity bucket with a capacity larger than recommended, the machine will become unstable, and it will also lose digging power, so the operating efficiency will drop. In particular, if a strong shock load is applied to the bucket, there is danger that the arm may break.				
2) Additional Counterweight If an excessive capacity bucket or heavy attachment is installed, the machine will become unstable, so it is common to see additional counterweights used. However, this means that an excessive load is applied not only to the work equipment and undercarriage, but also to the whole machine, so this will lead to a reduction in the service life of the machine.				

☐ Pelles hydrauliques équipement rétro (2)

Model Selection

HYDRAULIC EXCAVATOR AND DUMP TRUCK COMBINATION

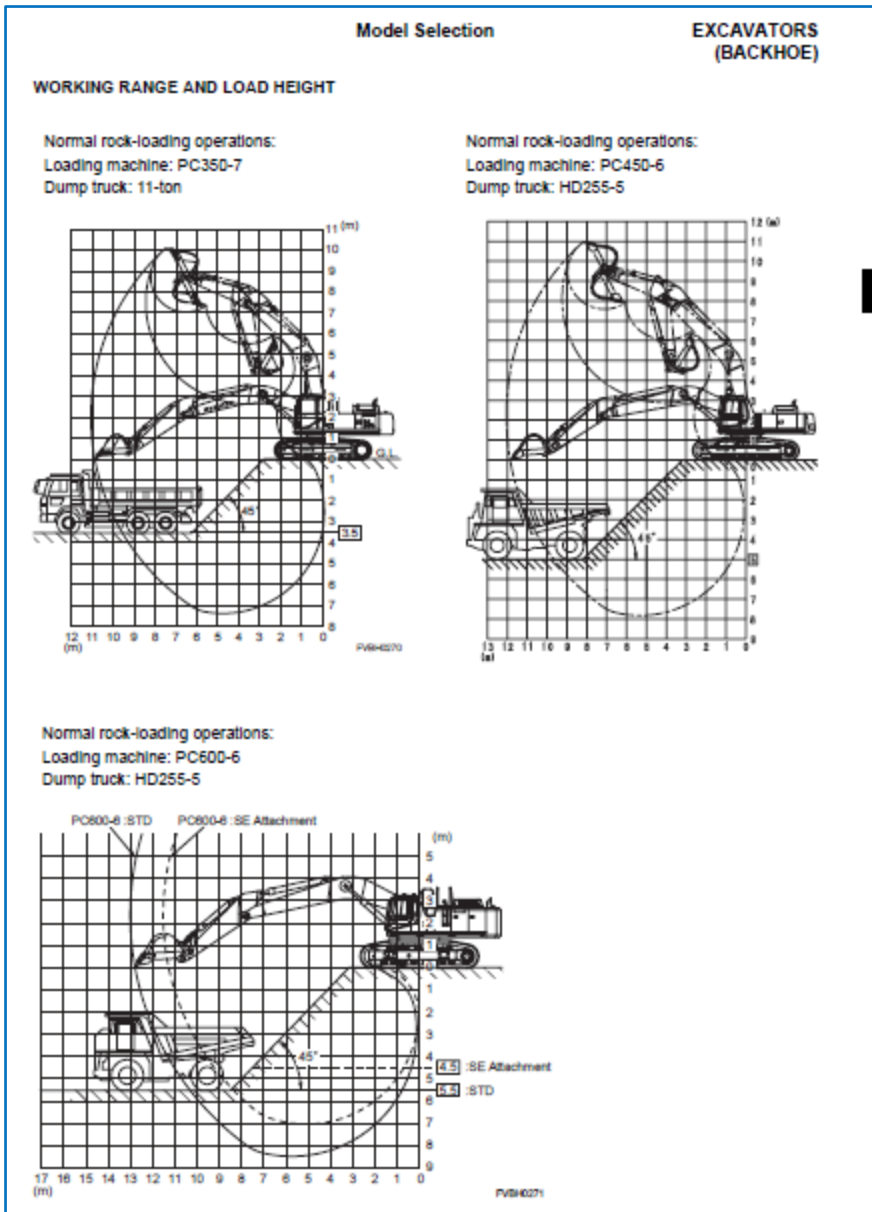
EXCAVATORS (BACKHOE)

HYDRAULIC EXCAVATOR			DUMP TRUCK									
MODEL	BUCKET CAPACITY (HEAPED) m ³ (cu.yd)		OFF-HIGHWAY DUMP TRUCK									
	(SAE)	(CECE)	HD255	HD325	HD405	HD465	HD605	HD785	HD985	HD1200	HD1500	
PC350 B/H	1.40 (1.83)	1.2 (1.57)	(13)									
PC400 B/H	1.8 (2.35)	1.6 (2.09)	10	(13)								
PC450 B/H	2.06 (2.69)	1.8 (2.35)	9	(12)								
PC600 B/H	2.0 (2.62)	1.8 (2.35)	9	(12)	(14)							
	2.4 (3.14)	2.1 (2.75)	7	10	(11)							
	2.7 (3.53)	2.4 (3.14)	7	9	10	(13)						
	2.8 (3.66)	2.5 (3.27)	6	9	10	(12)						
	3.5 (4.58)	3.1 (4.05)	5	7	8	10	(11)					
PC750 B/H	2.8 (3.66)	2.5 (3.27)	6	9	10	(12)	(14)					
	3.1 (4.05)	2.8 (3.66)	6	8	9	(11)	(13)					
PC750SE B/H	4.0 (5.2)	3.5 (4.6)	4	6	7	9	10					
PC800SE B/H	4.3 (5.6)	3.8 (5.0)	4	6	6	8	9					
	4.5 (5.9)	4.0 (5.2)	4	5	6	8	9					
PC800 B/H	3.4 (4.45)	3.0 (3.92)	5	7	8	10	(12)					
PC1250 B/H	3.4 (4.4)	3.0 (3.9)	5	7	8	10	(12)					
	4.0 (5.2)	3.5 (4.6)	4	6	7	9	10					
	5.0 (6.5)	4.3 (5.6)	4	5	5	7	8	(12)				
	5.2 (6.8)	4.5 (5.9)	4	5	5	7	8	(12)				
PC1250GP B/H	6.5 (8.5)	5.7 (7.5)	3	4	4	5	6	9				
PC1800 B/H	5.6 (7.3)	5.0 (6.5)				6	7	(11)		(13)		
	8.5 (11.1)	7.6 (9.9)				4	5	7	8	8	9	
	10.1 (13.2)	9.0 (11.2)				3	4	6	6	7	8	
	11.0 (14.4)	9.8 (12.8)				3	4	6	6	6	7	
	12.0 (15.7)	11.0 (14.4)				3	3	5	5	6	7	

Note: B/H: BACKHOE
Number of loads: 3 ~ 10 Suitable, (11) ~ (14) Possible
Above combination is determined by following method;
(1) Suitable loading times (n):

$$n = \frac{\text{Max. payload of dump truck}}{\text{Bucket capacity} \times \text{Bucket fill factor} \times \text{Specific weight}} \quad \text{or} \quad n = \frac{\text{Heaped capacity of dump truck}}{\text{Bucket capacity} \times \text{Bucket fill factor}}$$

□ Pelles hydrauliques équipement rétro (3)





Copyright by the World Road Association. All rights reserved.

World Road Association (PIARC)

La Grande Arche, Paroi Sud, 5e étage, F-92055 La Défense cedex