



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Larbi Tebessi – Tébessa  
Institut des Mines  
Département des mines et géotechnologie



# Polycopie de cours



---

## Terrassements (Cours et exercice)

---

Réalisé par :

*Dr. Adel DJELLALI*

*Destiné au Master 2 géotechnique*

Année universitaire : 2021-2022

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	01
<b>Chapitre I : Généralités sur les terrassements</b>	02
I.1 introduction	02
I. 2 Historique de la chaussée	02
I.3 Constitutions d'une chaussée	04
I.3.1 Sol support	05
I.3.2 Couche de forme	06
I.3.4 Couches de roulement	08
I.4 Mécanisme de passage d'un véhicule sur une chaussée souple	09
I.4.1 Efforts verticales	09
I.4.2 Contraintes au passage d'une roue	10
I.5 Classification des matériaux	11
I.5.1 Classification des matériaux GTR 92 (norme NF – P 11-300)	11
I.5.1.1 Analyse des différents paramètres de classification des sols	12
I.6 Travaux préparatoire de terrassements	15
I.6.1 Travaux préparatoires	15
I.6.2 Exécution des terrassements	15
I.7 Principe d'utilisation du guide de terrassement routier	16
Exercices	17
I.7.1 Conditions d'utilisation des matériaux en remblai	18
I.7.2 Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme	21
<b>Chapitre II : Méthodes et travaux de terrassement</b>	24
II.1 Introduction	24
II.2 Définitions et lexique	24
II.3 Blindages des fouilles	26
II. 4 Terrassement en présence d'eau	27
II. 5 Notions de déblais et remblais	28
II. 6 Problème du foisonnement	28
Exercices	29
<b>Chapitre III : Cubature des terrassements</b>	36
III.1 Définition	36

III.2 Calcul des volumes de terrassement (profil en long)	36
Exercices	34
III.4 Calcul de surface des profils en travers	41
III.4 Mouvements de terre (Epure des terrassements)	42
III.5 Transport des terres	43
III.6 Epure de Lalanne	43
Exercices	49
<b>Chapitre IV : Engins de terrassement</b>	<b>51</b>
IV.1. Introduction	51
IV.2 Tracteurs	51
IV.3. Bouteurs ou bulldozers	52
IV.4 Décapeuses ou "scraper"	56
IV.5. Chargeurs ou chargeuses	57
IV.6. Pelles hydrauliques	60
IV.7. Camions de chantier	63
IV.8. Niveleuses	64
IV.9. Compacteurs	66
IV.10. Cycle de rotation d'engins	70
IV.10.1 Introduction	70
IV.10.2 Cycle de travail	70
Exercice	73
<b>Chapitre V : Terrassements à l'explosif</b>	<b>76</b>
V.1. Introduction	76
V.2. Action de l'explosif	77
V.3. Explosifs et les dispositifs d'amorçage	81
V.4. Principaux explosifs	82
V.5. Dispositifs d'amorçage	83
V.6. Plan de tir	86
V.7. Conception des plans de tir	87
V.8. Tirs en gradins	89
V.9. Tirs souterrains	92
V.10. Tirs de découpage	94

<b>Chapitre VI : Rippabilité des roches</b>	95
VI.1.Définition	95
VI.2.Action du ripper	96
VI.3.Vitesse sismique	98
VI.4.Critères de rippabilité	99
VI.5.Rendement d'exploitation du ripper	102
Exercice	105
Références bibliographiques	107



## 1. Introduction

Le terrassement peut être défini comme l'ensemble des opérations permettant de préparer un terrain : travaux de fouilles, tranchées, enlèvement de la terre, transport des déchets et autres actions antérieures à une construction, un aménagement ou une transformation de l'espace extérieur. Les travaux de terrassement représentent l'étape préalable à l'édification ou au renforcement d'un ouvrage. À cet effet, différents engins et un matériel spécifique sont employés. Autrement dit, les travaux de terrassement de terrain consistent à préparer le sol en creusant en profondeur et en déplaçant les quantités importantes de terre ou de roche pour mettre le sol à niveau et permettre la réalisation de certains ouvrages (habitation, terrasse, piscine, allée, route et autoroute, mais aussi barrage, immeubles et autres chantiers de grande envergure.) L'objectif est de prévenir les risques de tassement ou de glissement de terrain. Il existe diverses raisons à la réalisation d'un **terrassement** et il est important de bien réfléchir à son projet avant de le mettre en route. Le terrassement facilite les travaux qui suivent et il demeure difficile de reprendre des travaux de terrassement une fois les fondations réalisées.

L'objectif essentiel de ce cours est de fournir à l'étudiant les outils de base en matière de l'ingénierie des terrassements dont la maîtrise de l'exécution des déblais et remblais en terrains rocheux et non rocheux en plus de la compréhension des techniques et technologies de terrassement en surface et en souterrains tout en assurant la stabilité des ouvrages réalisés (à court et à long terme). Le contenu de ce cours est réparti sur six chapitres :

Le **premier chapitre**, présente une généralité sur les terrassements, présentation des ouvrages de terrassements. Les caractéristiques principales des opérations de terrassement, et les phases des travaux de terrassement ;

Le **deuxième chapitre**, englobe les méthodes et travaux de terrassement. Il développe : le décapage, les fouilles les notions de déblayage et remblayage et problème du foisonnement ;

Le **troisième chapitre** aborde les cubatures des terrassements est l'évaluation du volume des terres ;

Le **quatrième chapitre** définit les engins de terrassement : Différent types d'engins, volume et rendement. Aussi il aborde la méthode de calcul du cycle de rotation d'engins ;

Le **cinquième chapitre** est consacré au terrassement à l'explosif, Type, caractéristiques, matériel utilisé, plan de tir, et différent mode de terrassement (à ciel ouvert et en souterrain)

Le **sixième chapitre** est la rippabilité des roches : définitions, action du ripper, vitesses sismiques, critères de rippabilité et rendement d'exploitation du ripper.

# **Chapitre I :**

## **Généralités sur les terrassements**

## **Chapitre I : Généralités sur les terrassements**

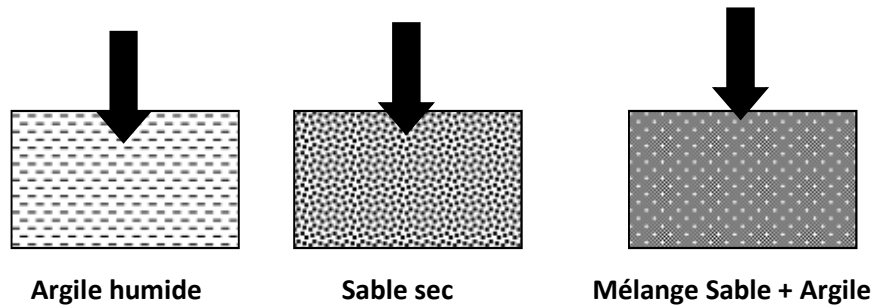
### **I.1 introduction**

De tout temps on a eu besoin de circuler sans être tributaire des saisons, de la pluie, des crues, de la neige, etc. pour cela il faudrait d'abord franchir les cours d'eau, à gué parfois, et ensuite par les ponts. Comme les pentes raides ne peuvent pas être grimées par les chevaux, il faut modeler le terrain, et s'accrocher à flanc de colline. Ensuite l'automobile est apparue, elle s'est véritablement développée qu'il y a un demi-siècle, mais sa vitesse a rapidement exigé des courbes pas trop aiguës et des pentes régulières. Comme la construction des chemins de fer est apparue au paravent, les ingénieurs avaient à leur position de l'expérience et des spécifications géométriques des voies ferrées. Ils ont vite déversé les virages, rectifié les alignements et régularisé les courbes.

Avec cette rapidité de développement des routes, des techniques de construction et d'entretien ont rapidement évolué. Les ingénieurs ont cherché des explications valables aux phénomènes physiques et chimiques qui se manifestent dans les chaussées et interprété leurs dégradations, avec l'étude de leurs comportements vis-à-vis aux différentes sollicitations, et de connaître les causes de ces dégâts pour les contourner totalement ou partiellement et en prolongeant leur durée de vie.

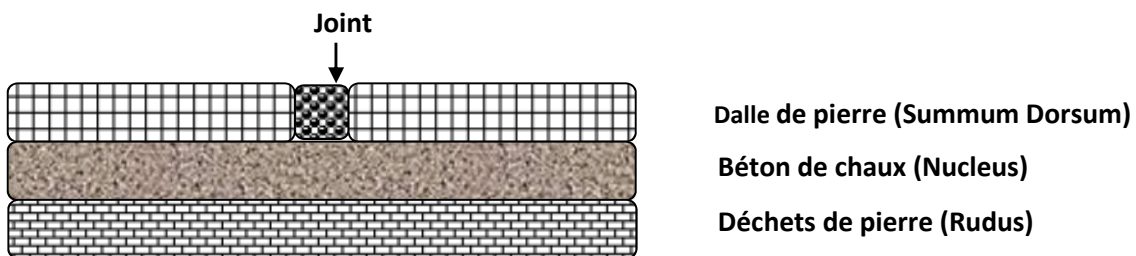
### **I.2 Historique de la chaussée**

La roue, dont l'invention se perd dans l'histoire, est incontestablement l'instrument miracle du transport terrestre. Mais elle a ses inconvénients, quand bien même est munie de pneumatique. On circule sur les plages, mais quand le sable se dessèche il devient impraticable. On circule très bien sur les pistes argileuses bien nivelées, mais quand il pleut l'argile mouillée devient un borbier. Il est tentant de mélanger sable et argile pour avoir un mortier, qu'il soit insensible, du moins peu sensible à la sécheresse et à la pluie. Encore faut-il avoir du sable en régions argileuses ou de l'argile en régions sableuses. Lorsqu'il s'agit de petites quantités on accepte quelques transports, mais la route est une grosse consommatrice de matériaux et elle doit être résistante (Figure 1.1).



**Figure 1.1** Comportement des différents sols

Par la suite, le matelas de pierres est apparu en s'interposant entre la roue et le sol. Cette couche de pierres exige des efforts de confection et de transport, et d'être rigoureusement insensible à l'eau. Évidemment, le dallage et le suprême luxe des romains, des gens riches et disposant d'esclaves, l'avaient adopté pour leur voie impériale. Posée sur un béton de chaux il a traversé les siècles (Figure 1.2). Aujourd'hui les esclaves sont remplacés par des engins de terrassement qui fonctionnent à l'électricité ou au mazout, et sont puissant et consciencieux, mais ils ne savent pas poser les dallages en pierre. Ceci d'ailleurs ne saurait convenir aux exigences de confort et l'adhérence des véhicules modernes (Jeuffroy et al, 1979).



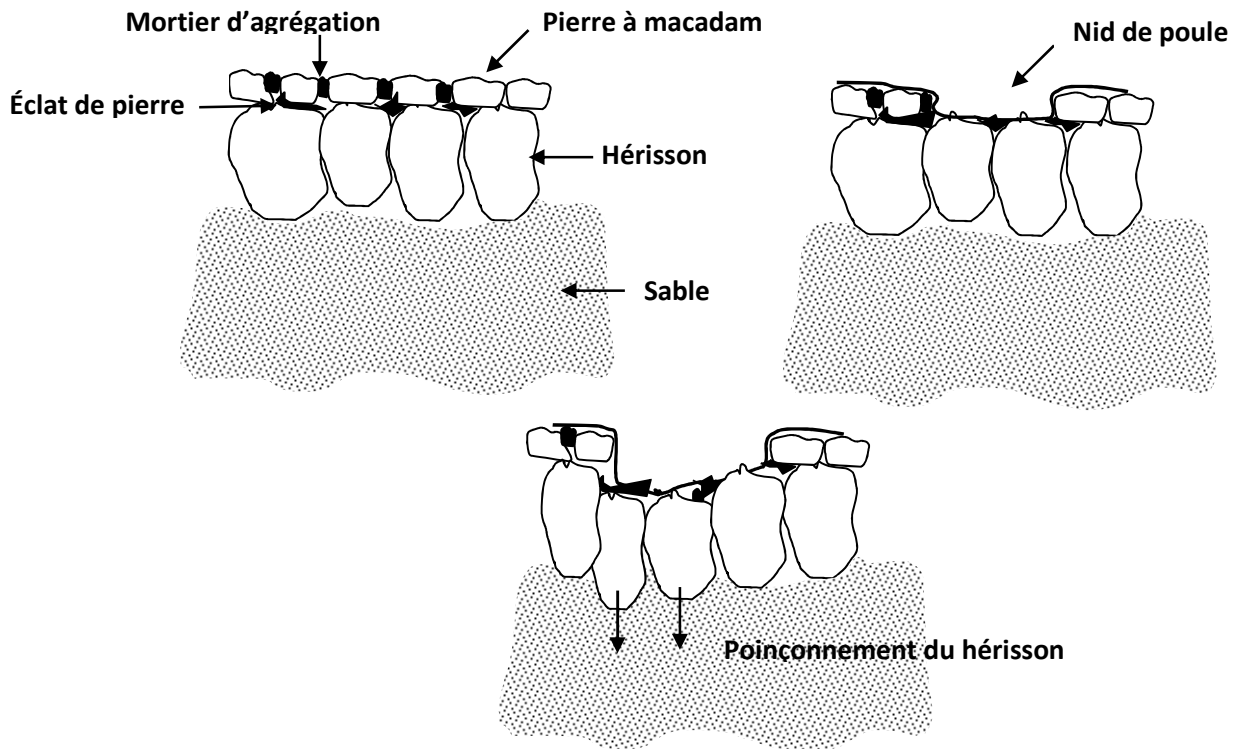
**Figure 1.2** Schéma d'une chaussée romaine

L'idée du matelas de pierre a duré de nombreux siècles, mais a posé dès l'origine plusieurs problèmes :

- En surface, les jantes ne doivent pas déplacer les pierres, pour cela il faut remettre des pierres cubiques et les bloquer par un mortier, c'est le macadam à l'eau ;
- En fondation, la transition de la charge au sol est réalisée par ce qu'on appelait *hérisson*, mais il faut aussi le bloquer par cylindrage, en calant des blocs avec des éclats de pierre (Figure 1.3).

Dès que les charges s'intensifient, deux modes de dégradation apparaissent :

- Arrachement des pierres, qui créent des nids de poule à la surface ;
- Disparition subite des blocs entre les pierres du hérisson en cas de sol support trop argileux, engendrant des effondrements aux premières pluies, au passage des véhicules lourds (Figure 1.3).



**Figure 1.3** Modes de dégradation du macadam classique

Lorsque l'automobile est apparue, la poussière apparut à leur tour. Cette matière sèche, rendant inconfortable, voire dangereuse toute circulation un peu dense. Ensuite les vertus du goudron produit dans les cokeries à gaz et les hauts fourneaux sont découvertes et mis sur les routes. Très vite s'est aperçurent que ce goudron était glissant, ils lui adjoignirent des gravillons. Par la suite les enrobés sont apparus puis le bitume.

### **I.3 Constitutions d'une chaussée**

Une chaussée est constituée de plusieurs couches mises en œuvre sur un sol terrassé appelé *sol support*, surmonté d'une *couche de forme* dont la fonction est double : permettre la circulation des engins pendant les travaux, et rendre le sol support plus homogène, et le protéger contre le gel durant l'exploitation de la chaussée. Ce corps de chaussée proprement dit est constitué de deux de couches : *couche d'assises* et *couche de surface*. L'assise de la chaussée qui est constituée de deux couche : la *couche de fondation* et par-dessus la *couche de base*. Ces couches sont généralement constituées de matériaux liés permettant à la chaussée

de résister aux charges induites par le trafic. La couche de surface est constituée de la couche de roulement (ou d'usure) qui subit directement les sollicitations du trafic et les agressions du climat et à laquelle s'ajoute éventuellement une couche liaison, chargée d'assurer la liaison entre la couche de roulement et l'assise. Ces différentes couches sont présentées dans la figure 1.4.

L'accotement est une zone s'étendant entre les limites de la chaussée et de la plate-forme. Cet accotement comprend une bande dérasée, appelée bande d'arrêt, qui est une zone dégagée de tout obstacle permettant la récupération des véhicules déviant de leur trajectoire, ainsi que l'évitement de collision multivéhicules. La *berme* est la partie non roulable qui assure la transition entre les structures stabilisées et les talus ou cunettes. Elle participe au dégagement visuel et porte certains panneaux de signalisation. Le *talus* est la partie pentue aux extrémités d'un profil en travers en déblai ou en remblai. Quant à la *cunette*, c'est un fossé peu profond engazonné ou revêtu et aux formes douces afin d'améliorer la sécurité, essentiellement utilisée en pied de talus ou de déblais pour récupérer les eaux usées de la chaussée, de l'accotement et du talus.

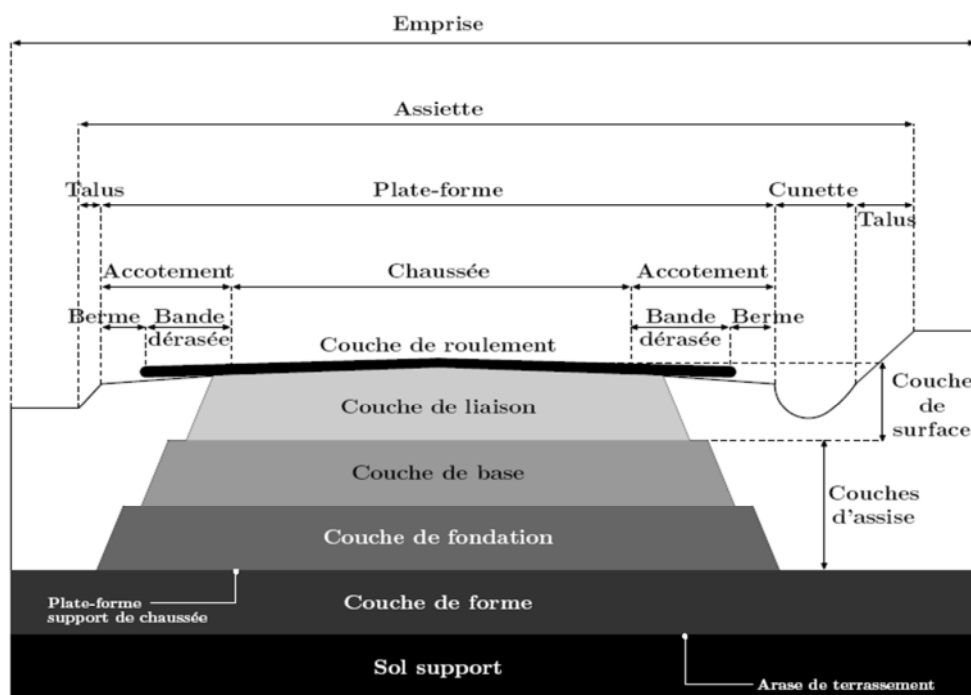


Figure 1.4 Profil en travers d'une chaussée [1]

### I.3.1 Sol support

C'est le matériau in situ préparé et compacté pour recevoir le corps de la chaussée. Le sol support est typiquement décrit par sa portance, d'où sa résistance de déformation sous une

charge externe. En général plus le sol résiste aux déformations, plus il peut supporter des charges critiques. Bien qu'il y a d'autres facteurs impliqués pour évaluer des propriétés du sol support (retrait, gonflement dans certains sols argileux), la rigidité et la résistance sont les caractéristiques les plus utilisées.

La performance du sol support dépend de trois caractéristiques de base :

### **1- *Résistance***

Le sol support doit être capable de supporter des charges transmises par la structure de la chaussée. Cette capacité portante est toujours affectée par le degré de compacité, la teneur en eau, et le type de sol. Le sol support qui peut supporter des grandes charges sans excès de déformation est considéré comme à un bon sol ;

### **2- *Teneur en eau***

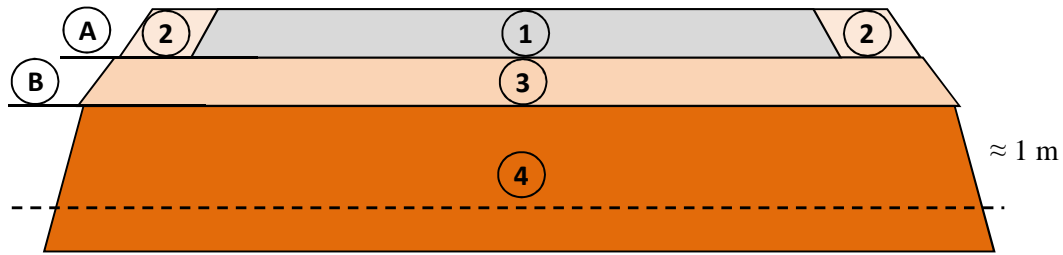
La teneur en eau tend à affecter plusieurs propriétés du sol dont la capacité portante, le retrait et le gonflement, et peut être influencée par plusieurs facteurs comme le drainage, fluctuations de la nappe, infiltration. Généralement l'excès d'humidité engendre des déformations excessives ;

### **3- *Retrait et/ou gonflement***

Certains sols se rétractent ou gonflent en fonction de leur teneur en eau. De plus, les sols qui ont une bonne partie de fraction de fines sont susceptibles aussi de gelé dans les zones gélives. Ces trois phénomènes tendent à déformer et fissurer la chaussée.

## **I.3.2 Couche de forme**

A court terme, la couche de forme doit garantir la traficabilité des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation, permettre le compactage efficace de la couche de fondation, satisfaire les exigences de nivellement de la plate-forme support de la chaussée et assurer la protection de l'arase de terrassement vis-à-vis des agents climatiques en attendant de la conception de la chaussée (Figure 1.5).



**Figure.1.5** Définitions des termes de l'ensemble de la chaussée

- |  |  |
|--|--|
| 1- Chaussée                              | plate-forme A : support et de la chaussée PF |
| 2- Accotement                            | plate-forme B : arase de terrassement AR     |
| 3- couche de forme CDF                   |  |
| 4- partie supérieure de terrassement PST |  |

A long terme, la couche de forme doit homogénéiser la portance du sol support pour concevoir les couches de la chaussées, de préserver la chaussée contre les fluctuations hydriques du sol support sensible à l'eau, de procurer une portance minimale qui peut être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure et d'améliorer la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble des couches de la structure de chaussée.

### I.3.3 Couche d'assise

On distingue généralement six types de couches d'assise qui peuvent être résumées comme suit :

**Chaussées souples**, dont les matériaux sont traités par un liant hydrocarbonaté ;

**Chaussées semi-rigides épaisses**, dont les matériaux sont traités avec un liant hydraulique (ciment, laitier, cendre volante) ;

**Chaussées rigides**, qui sont réalisées en béton de ciment ; ce type de chaussée à un comportement très particulier et son entretien est totalement différent aux deux premiers types ;

**Chaussées bitumineuses épaisses**, dont les matériaux sont traités avec un liant hydrocarboné (bitume) ;

**Chaussées à structure mixte** ; alliant une couche traitée aux liants hydrauliques et une couche traitée aux liants hydrocarbonés ;

**Chaussées à structure inverse**, alliant une couche traitée au liant hydraulique, une couche traitée aux liants hydrocarbonés et une couche non traitée (Figure 1.6).



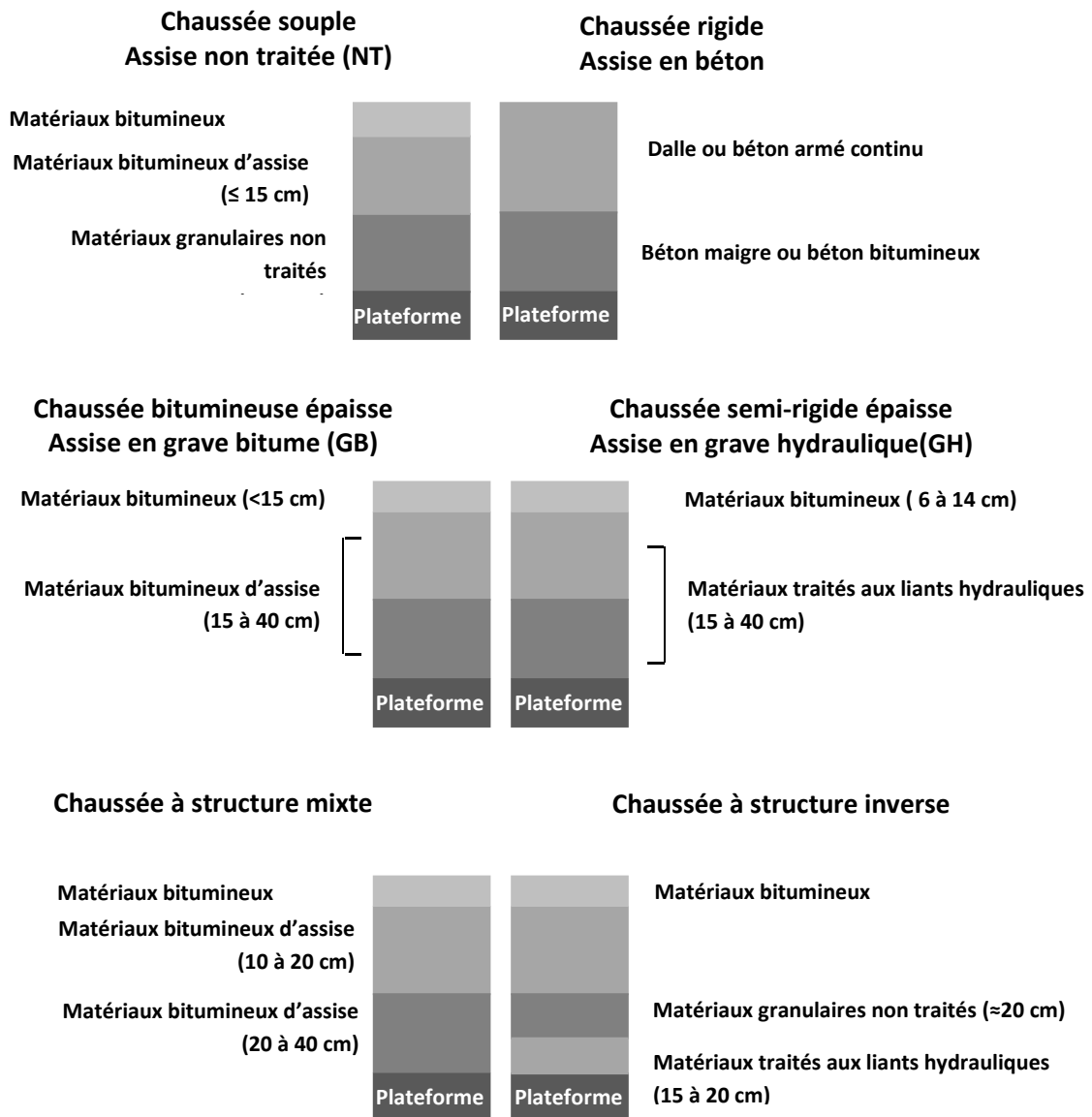


Figure 1.6 Familles des structures de chaussée

### I.3.4 Couches de roulement

La couche de roulement est généralement constituée de béton bitumineux, mais pour les trafics faibles, on se contente quelquefois d'un enduit superficiel à base de bitume en émulsion ou fluidifié par un solvant. Concernant les types de matériaux bitumineux, on peut distinguer :

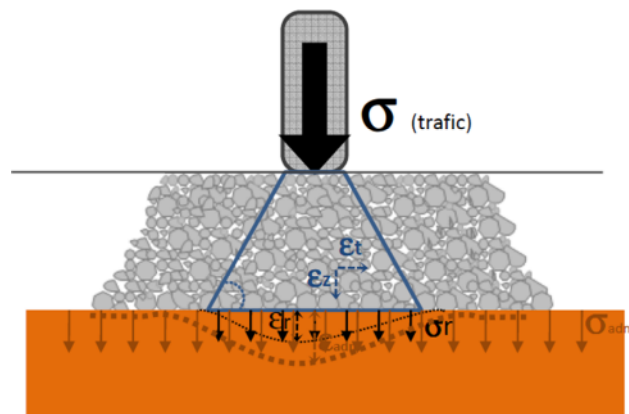
- *Enduits superficiels d'usure* : peuvent être soit en monocouche, bicouche, en grave laitier enduis coulé à froid (ECF) ;

- **Enrobés Coulés à chaud** : peuvent être soit en béton bitumineux ultra mince (BBUM), en béton bitumineux très mince (BBTM), en béton bitumineux mince (BBM), en béton bitumineux semi grenu (BBSG), ou en béton bitumineux à module élevé (BBME) et drainant (BBDr) ;
- **Enrobés coulés à froid** : Ce sont des enrobés coulés à froid, élaborés à partir de granulats de courbe granulométrique continue à une teneur en fines comprise entre 6 et 12 % et d'émulsion de bitume à un dosage de 9 à 14 % ;

## I.4 Mécanisme de passage d'un véhicule sur une chaussée souple

### I.4.1 Efforts verticales

Sous une roue de camion, les efforts sont dix à vingt fois plus élevés qu'une roue d'automobile avec une contrainte sur le sol de 700 kPa répartie sur un cercle de 0.25 m de diamètre avec la même charge à 30 cm à côté. On conçoit que les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lors du passage d'une voiture ou d'un camion. Dans ce cas les routes sont conçues pour les camions car ce sont eux qui les usent et non les véhicules légers.



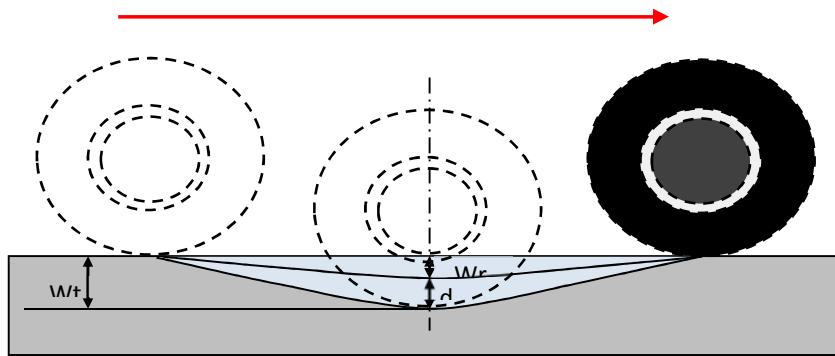
**Figure 1.7** Déformations de la chaussée sous le passage d'un camion [2]

Lors du passage d'un véhicule, il se passe deux choses imperceptibles mais qu'il faut bien comprendre (Figure 1.8).

- Le sol s'affaisse sous le pneu, c'est la déformation totale  $W_t$  ;
- Lorsque la roue s'éloigne, le sol remonte, mais jamais totalement ; il reste un enfoncement résiduel  $W_r$  ;
- La différence entre la déformation totale et résiduelle s'appelle la déflection  $d$ .

On peut reproduire ça de plusieurs façons. Si l'on charge et décharge une plaque appuyée sur le sol, ou en laboratoire, en comprimant et en décompressant un échantillon de sol maintenu latéralement, on constate toujours le même phénomène :

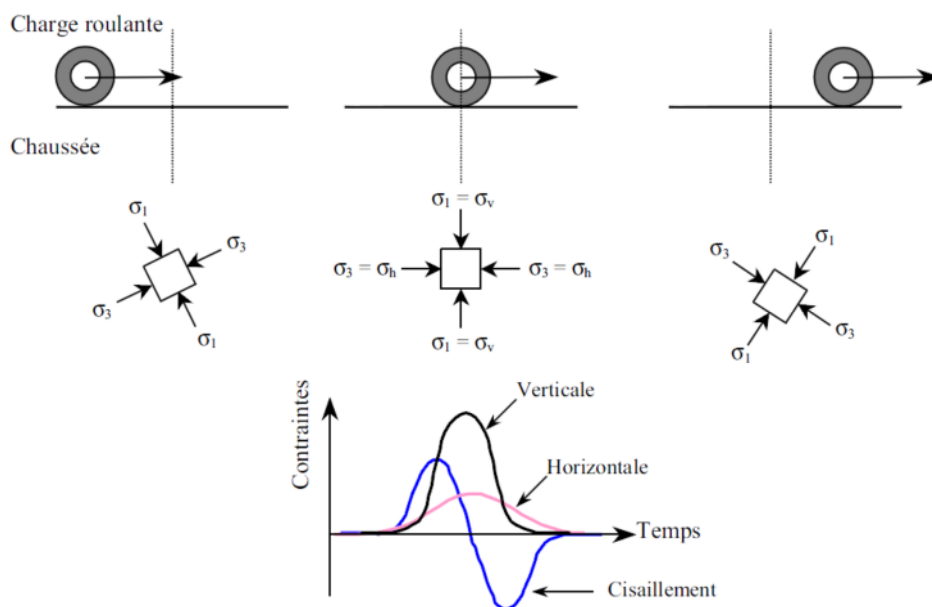
- la déflexion  $d$  est à peu près constante si on répète l'opération des centaines, voire des milliers de fois, à condition d'appuyer faiblement, avec une charge constante ;
- l'orniérage  $Wr$  est la déformation résiduelle qui augmente avec le nombre de passages des véhicules et l'intensité de leurs charges.



**Figure 1.8** Principe de la déflexion d'un sol sous l'effet de passage d'une charge

#### I.4.2 Contraintes au passage d'une roue

Les sollicitations dues au trafic routier se résument aux chargements répétés à la surface de la chaussée (verticale et horizontale). La charge des véhicules n'est pas constante et les véhicules ne circulent pas toujours au même endroit. La Figure 1.9 illustre les contraintes produites en un point de l'assise en grave non traitée de la chaussée, sous le passage d'une charge roulante. Les contraintes verticales et horizontales sont positives dans la couche granulaire. Les contraintes de cisaillements s'inversent au passage de la charge produisant une rotation des directions des contraintes principales



**Figure 3.9** Rotation des contraintes principales lors du passage d'un véhicule [3]

## **I.5 Classification des matériaux**

Dans cette partie le sol va être utilisé en tant que matériau dans les travaux de terrassement. Le domaine des terrassements et des routes est économiquement très important dans les travaux publics puisqu'il représente 25% du chiffre d'affaires de la profession. Les travaux de terrassement s'appliquent :

- aux infrastructures linéaire (routes, autoroutes, voies ferrées) ;
- aux plates-formes aéroportuaires ;
- aux plates-formes industrielles ;
- aux barrages en terre et aux digues;
- aux comblements de tranchées ;
- aux fondations de dallages de bâtiment.

Ces trente dernières années la technique des terrassement a connu une véritable révolution due à l'apparition sur le marché d'engins très variés et spécialisés, au développement des techniques de traitement aux liants hydrauliques et à l'emploi de matériaux artificiels performants, durables et extrêmement variés ( Terre Armée, géosynthétiques et matériaux légers en particulier).

Les choix réalisés lors des études auront des conséquences

Une mauvaise option concernant le réemploi des terres mènera à des surcoûts importants dus à la nécessité d'un traitement non prévu, à la recherche d'un nouveau gisement, aux transports des matériaux et au dépassement des délais.

En ce qui concerne les grandes infrastructures, les principaux paramètres seront les suivants:

- réemploi des terres (opérations de déblai - remblai), caractéristiques intrinsèques et état des matériaux
- incidence des conditions météorologiques
- possibilité d'effectuer des « emprunts » à proximité du remblai à construire
- hauteur du remblai

### **I.5.1 Classification des matériaux GTR 92 [4]**

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Ils permettent de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais.

On distingue trois catégories d'essais:

- essais d'identification ou de nature
- essais d'état
- essais de comportement mécanique

### **I.5.1.1 Analyse des différents paramètres de classification des sols**

Nous allons analyser les différents paramètres qui permettent la classification des sols d'après leur nature, leur état et leur comportement.

#### **I.5.1.1.1 Paramètres de nature**

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu ni dans le temps, ni au cours des manipulations:

- la granularité,
- l'indice de plasticité,
- la valeur au bleu de méthylène (sur la fraction 0/50 mm)

#### ***La granularité :***

- ***le  $D_{max}$ :***

Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol.

Seuil retenu : 50 mm. Cette valeur permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux ( $\leq 50$  mm), des sols grossiers.

#### ***· tamisat à $80 \mu m$ ( ou % de fines ) :***

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux.

Seuils retenus :

- 35 % : Au-delà de 35 % de tamisat à  $80 \mu m$ , les sols ont un comportement assimilable à celui de leur fraction fine.
- 12 % : C'est le seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

#### ***· tamisat à 2 mm :***

Permet la distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

#### ***L'indice de plasticité $I_p$ :***

Ce paramètre caractérise l'argilosité des sols.

*Seuils retenus :*

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

- 12 : Limite supérieure des sols faiblement argileux.
- 25 : Limite supérieure des sols moyennement argileux.
- 40 : Limite entre sols argileux et très argileux.

### ***La valeur de bleu de méthylène VBS :***

Il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité ( ou la propreté ) du sol  
On détermine la VBS ( valeur de bleu du sol ) à partir de l'essai au bleu de méthylène  
à la tache sur une fraction 0/2 mm.

La valeur trouvée est rapportée à la fraction 0/50 mm par une règle de proportionnalité.

### ***Seuils retenus :***

\* 0,1 : Seuil en dessous duquel on peut considérer que le sol est insensible à l'eau.

Ce critère doit cependant être complété par la vérification du tamisat à 80  $\mu$  m qui  
doit être  $\leq 12$  %.

- 0,2 : Seuil au-dessus duquel apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
- 1,5 : Seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.
- 2,5 : Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.
- 6 : Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.
- 8 : Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

### **I.5.1.1.2 Paramètres de comportement mécanique**

L'introduction dans la classification de ces paramètres résulte du fait que des sols de nature comparable peuvent se comporter de manière relativement différente sous l'action des sollicitations subies au cours de leur mise en œuvre.

Les paramètres de comportement mécanique à prendre en compte dans la classification des sols sont la valeur LOS ANGELES LA, et la valeur MICRO DEVAL en présence d'eau MDE, ou la valeur de friabilité des sables FS pour les sols sableux

### ***Seuils retenus :***

- 45 pour les valeurs LA et MDE.
- 60 pour les valeurs FS.

### **I.5.1.2 Paramètres d'état**

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

### *Différents états hydriques considérés*

- état très humide (th) : Etat d'humidité très élevé ne permettant plus la réutilisation du sol dans des conditions technico-économiques normales.
- état humide (h) : Etat d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, etc...) estimées comme normales dans le contexte technico-commercial actuel.
- état d'humidité moyenne (m) : Etat d'humidité optimale (minimum de contraintes pour la mise en œuvre).
- état sec (s) : Etat d'humidité faible mais autorisant encore la mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, sur compactage, etc...) estimées comme normales dans le contexte technico-économique actuel.
- état très sec (ts) : Etat d'humidité très faible n'autorisant plus la réutilisation du sol dans des conditions technico-économiques normales.

### **I.5.1.3 Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique :**

On peut utiliser l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- La position de la teneur en eau naturelle ( $\omega_n$ ) de la fraction 0/20 du sol par rapport à l'optimum Proctor normal ( $\omega_{opt}$ ) exprimée par le rapport :

$$\frac{W_n}{W_{opt}}$$

- La position de la teneur en eau naturelle ( $\omega_n$ ) par rapport aux limites d'Atterberg ( $W_L$  et  $W_p$ ) qui s'exprime par l'indice de consistance ( $I_c$ )

$$I_c = \frac{W_L - W_n}{W_L - W_p}$$

- L'indice portant immédiat ( $IPI$ ) qui exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sans surcharges ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal.

*Seuils retenus* : Ils sont détaillés dans les tableaux de la classification des sols figurant au paragraphe suivant.

### **I.5.2 Tableaux de classification des sols**

Les tableaux ci-après, extraits de la norme NF P 11-300, définissent la classification des sols répartis entre 4 classes : (Voire annexe)

- Classe A : sols fins,
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines,
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments,
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

### **I.6 Travaux préparatoire de terrassements**

Avant de construire une route on doit faoire plusieurs travaux de terrassements

#### **I.6.1 Travaux préparatoires**

Les travaux preparatoires consiste a :

- Abbatre les arbres ;
- Dessouchage divers ;
- Démolitions divers ;
- Déplacements evantuels de réseaux existant ;
- Installation de chantier ;
- Piquetage générale ( traveaux topographiques)

Décapage de la terre végétale : enlever la couche superficielle du terrain naturel sur une épaisseur bien déterminée ( 15 à 30 cm)

- enlever les débris d'arbres ( racines, branches, feuilles) et le sol végétale superficiel.
- Stockage de la T.V pour la reprendre en fin de chantier afin d'établir les divers aménagement végétalisés ( talus, aire de repos , T.P.C, giratoires,...)

#### **I.6.2 Exécution des terrassements**

Dans le but de modeler le terrain naturel en fonction des conditions gométiques définies par les plans d'exécution ( tracé en plan, profil en long, profil en travers) du projet du maitre de l'ouvrage, on procédent d'exécution des déblais ( enlevemets des terres) et des remblais ( apport des terres au niveau du projet)

Travaux de réalisation de la couche de forme ( support du coros de chassée)

Les matéraux qui compose la couche de forme doivent être de bonne qualité et leur compactage soit particulièrement soigné pour leur conférer une portance suffisante. Donc meilleurs sols lui seront réservés ( sols unsensibles a l'eau)



## I.7 Principe d'utilisation du guide de terrassement routier

Les travaux de terrassements consistent au déplacement des terres soit vers la zone de dépôt soit dans la zone de réutilisation en remblais. Cette décision se fait à la base du guide de terrassement routier (GTR). Ce guide permet d'évaluer la possibilité de réemplois des sols de déblais et leur mise en œuvre soit en remblai soit en couche de forme

Le guide GTR prend en compte : L'état du sol in situ et la nature du sol, afin de déduire le comportement du sol.

Le principe d'évaluation passe par trois étapes :

**Etape 1** : classification des sols des déblais (Couleur jaune)

**Etape 2** : vérification de l'aptitude pour une utilisation en remblais ou en couche de forme (respectivement Couleur bleu foncée)

**Etape 3** : établissement des fiches de décision et de suivi des terrassements (compactage de couleur mauve). Exemple : que faire avec un matériau provenant du PK 2+400 à -2m / T.N à un jour de pluie.

### *Explication*

*Etape 1* : classification des sols des déblais

Cette classification comporte 3 niveaux

*Niveau 1* : Classification selon la nature de sol en fonction de :

- La granulométrie ( Dmax, passant à 2 mm, passant à 80  $\mu$ m) ;
- L'argilosité (IP, VBS) ;
- Nature pétrographique pour les sols rocheux ;
- Famille du matériau pour les sols organiques et sous-produits industriels.

On distingue 6 classes de matériaux :

- Classe A : sols fins ;
- Classe B : sols de dimension réduit (sable ou grave) avec fines ;
- Classe C : sols de granulométrie très étalé (fines et gros éléments) ;
- Classe D : sols insensibles à l'eau (la proportion des fines est suffisamment faible pour avoir peu d'effet sur le comportement du matériau ;
- Classe R : Matériaux rocheux (évolutifs et non évolutifs) ;
- Classe F : Sols organiques et sous-produits industriels.

*Niveau 2* : Classification selon la nature de sol à l'intérieur de chaque classe :

On distingue des sous-classes de matériaux (Classe i) :

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

Sous-classes  $A_1, A_2, A_3, A_4$  : en fonction des valeurs de VBS ou IP

Sous-classes  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$  : en fonction des valeurs de VBS ou IP, granulométrie et de l'équivalent de sable (ES)

Sous-classes  $C_1 A_i, C_2 A_i, C_1 B_i, C_2 B_i$  : en fonction de la sous-classe 0/50, de la granulométrie, de l'angularité des grains (Concassés, roulés)

Sous-classes  $D_1, D_2, D_3$  : en fonction des valeurs de  $D_{max}$ , passant à 2 mm ;

Sous-classes  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  : en fonction de la nature pétrographique de la roche (sédimentaires, magmatiques, métamorphiques)

Sous-classes  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9$  : en fonction de la famille de matériaux

*Niveau 3* : Classification selon l'état hydrique et/ou le comportement du sol :

On ajoute des indices aux sous classes (Classe  $ijk$ ) : (j : comportement ; k : hydrique)

k : correspond aux états hydriques suivant : th : très humide ; h : humide ; m : moyen ; s : sec ; ts : très sec)

$A_{ik}$  : en fonction des valeurs  $W_{nat}$  ou IPI

$B_{ijk}$  : en fonction des valeurs VBS ou IP, de MDE, LA et FS

$C_1 A_{ijk}, C_2 A_{ijk}, C_1 B_{ijk}, C_2 B_{ijk}$  : ajout de l'indice de la sous-classe de la fraction 0/50 (A et B)

$D_{1j}, D_{2j}, D_{3j}$  : en fonction des valeurs LA, MDE, FS puisque sont des sols insensibles à l'eau ;

$R_{ijk}$  : en fonction des valeurs  $W_{nat}, \gamma_d, IPI, MDE, LA, FR, DG$  ;

$F_{ijk}$  : en fonction de %NaCl,  $D_{50}, W_{nat}, PF$ , consistance chimique, évaluation visuelle.

### Exercice 1:

Soit un sol qui a les caractéristiques géotechniques suivantes :

- Analyse granulométrique :  $D_{max} = 20$  mm ; Tamisat à  $80 \mu m = 15\%$
- Limites d'Atterberg  $W_L = 40\%$  et  $W_p = 20\%$
- Essais de bleu de méthylène : VBS = 2.5
- Indice Portant immédiat : IPI = 6

Classer le sol et étudier son comportement au cours de terrassement

### *Solution :*

#### *Etape 1*

Selon les abaques du guide de terrassement routier GTR (Voir Annexe 1), le sol est classé :

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

Sables et graves, argileux à très argileux

L'influence des fines est prépondérante ; le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant même plasticité que les fines du sol avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.

Classe du sol : B6h

*Etape 2* : vérification de l'aptitude pour une utilisation du sol en remblais ou en couche de forme

### I.7.1 Conditions d'utilisation des matériaux en remblai

Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai sont indiquées dans le tableau suivant

**Tableau 1.2** Conditions d'utilisation des matériaux en remblai

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code GWTS
Classe et sous-classe et état du matériau au moment de son extraction (résultat de la classification étape 1)	Complément de commentaires sur le comportement du matériau	Indication des différentes situations météorologiques envisagées lors de l'extraction et la mise en remblais : ++ : Pluie forte + : Pluie faible = : ni pluie ni évaporation importante ; - : évaporation importante (canicule, vent);	Conditions à respecter lors de l'exécution des travaux (7 rubriques)	Codification

Les 7 rubriques sont définies comme suit :

Les conditions d'utilisation en remblai présentées dans les tableaux se regroupent en sept rubriques symbolisées par une lettre.

- E : Extraction,
- G : Action sur la granularité,
- W : action sur la teneur en eau,
- T : Traitement,
- R : Régalage,
- C : Compactage,

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

- H : Hauteur des remblais

### **Rubrique E : Extraction**

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais dans la mesure où :

- l'extraction en couche (d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3 m : Scraper) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux. Elle a la particularité d'exposer au maximum les sols aux agents atmosphériques, ce qui selon les cas peut-être un effet recherché ou au contraire contre-indiqué,
- l'extraction frontale (d'épaisseur de l'ordre de 0,5 à 4 m : Pelle hydraulique) se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.

### **Rubrique G : Action sur la granularité**

Dans cette rubrique sont envisagées différentes actions visant à modifier la granularité du matériau entre son extraction et la fin de sa mise en remblai. (Exemple : l'élimination des éléments > 800 mm).

### **Rubrique W : Action sur la teneur en eau**

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux et notamment : l'aération par conditions météorologiques favorables ou l'humidification. (Exemple : humidification ou réduction de la teneur en eau).

### **Rubrique T : Traitement (1)**

Cette rubrique concerne les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels éventuellement). Avec des sols fins moyennement ou très argileux.

### **Rubrique R : Régalage**

Sous cette rubrique est donnée une indication sur l'épaisseur des couches élémentaires à mettre en œuvre. Il ne s'agit que d'une indication approximative compte tenu des méthodes de régalage utilisées en terrassement. Pour fixer les idées, on peut retenir :

- qu'une couche "mince" a une épaisseur de 20 à 30 cm,
- qu'une couche "moyenne" a une épaisseur de 30 à 50 cm.

### **Rubrique C : Compactage**

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

Trois niveaux d'énergie sont distingués : faible, moyen, intense. Comme pour les épaisseurs de régalage il s'agit d'une indication qualitative sur le niveau d'énergie de compactage requis par les différents matériaux (Exemple : compactage faible sur les sols humides afin d'éviter leur mise en saturation, et compactage intense pour les matériaux secs)

### Rubrique H : Hauteur des remblais

L'existence de cette rubrique tient au fait que les possibilités d'utilisation des matériaux sont fonction de la hauteur du remblai. Il est donc précisé sous cette rubrique que certaines conditions de mise en œuvre, qui sont acceptables pour des remblais de faible hauteur, ne doivent pas être employées pour des remblais plus élevés car elles introduiraient des risques excessifs du point de vue du tassement ou de la stabilité.

Pour fixer les idées on considère :

- que les remblais de faible hauteur sont limités à 5 m,
- que les remblais de hauteur moyenne sont limités à 10 m,
- que les remblais de grande hauteur dépassent 10 m.

Le tableau 1.3 récapitule des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai

**Tableau 1.3** Conditions imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm pour traitement
	3	Fragmentation complémentaire après extraction
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un réactif ou un additif adaptés
	2	Traitement à la chaux seule
R Régalage	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
C Compactage	1	Compactage intense
	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
H Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Remblai de hauteur faible ( $\leq 5m$ )
	2	Remblai de hauteur moyenne ( $\leq 10m$ )

*Solution de l'exemple*

**B<sub>6</sub>** (états th, h et m)

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H	
<b>B<sub>6</sub>th</b>	<b>Ces sols sont normalement inutilisables dans l'état</b> en raison de leur portance quasi nulle. Le drainage ou la mise en dépôt provisoire peut permettre de les ramener à l'état (h)			NON	
<b>B<sub>6</sub>h</b>	Ces sols sont très difficiles à mettre en oeuvre en raison de leur portance faible.  La fraction grenue n'est pas suffisante pour modifier sensiblement le comportement de la fraction argileuse. Ils sont sujets au "matelassage", ce qui est à éviter au niveau des arases de terrassement	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai, avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		=	ni pluie, ni évaporation importante	<b>Solution 1 : traitement</b> T : traitement à la chaux seule C : compactage moyen	0 0 0 2 0 2 0
				<b>Solution 2 : utilisation en l'état</b> C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0 0 0 0 0 3 1
		-	évaporation importante	<b>Solution 1 : extraction en couche - aération</b> E : extraction en couche W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1 0 1 0 1 2 2
			<b>Solution 2 : traitement</b> T : traitement à la chaux seule C : compactage moyen	0 0 0 2 0 2 0	

**I.7.2 Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme**

Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme sont indiquées dans le tableau suivant

**Tableau 1.4** Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Épaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plateforme support de chaussée
Classe et sous-classe et état du matériau au moment de son extraction (résultat de la classification étape 1)	Complément de commentaires sur le comportement du matériau	Indication des différentes situations météorologiques envisagées lors de l'extraction et la mise en remblais : ++ : Pluie forte + : Pluie faible = : ni pluie ni évaporation importante ; - : évaporation importante ( canicule, vent);	Conditions à respecter lors de l'exécution des travaux (4 rubriques)	Codification	Épaisseurs des couches

## Chapitre I : Généralités sur les terrassements

Les conditions d'utilisation en couche de forme présentées dans les tableaux se regroupent en quatre rubriques symbolisées par une lettre.

- G : Action sur la granularité,
- W : action sur la teneur en eau,
- T : Traitement,
- Rubrique S : Protection superficielle

### Rubrique S : Protection superficielle

Les matériaux granulaires non traités utilisables en couche de forme requièrent souvent une protection de surface pour leur donner une résistance suffisante aux efforts tangentiels créés par les pneumatiques des engins (accélérations, freinages, virages), ou garantir les exigences de nivellement

Le tableau xx, récapitule les conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en couche de forme

**Tableau 1.5** Conditions imposées pour utiliser les différents matériaux en couche de forme

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
W Action sur la teneur en eau	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
T Traitement	2	Humidification pour changer d'état hydrique
	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
S Protection superficielle	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

### Solution de l'exemple

# Chapitre I : Généralités sur les terrassements

**B<sub>6</sub>**

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
<b>B<sub>6</sub>h</b>	La sensibilité à l'eau et la plasticité des sols de cette classe impliquent nécessairement un traitement pour pouvoir les utiliser en couche de forme.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
		= OU - pas de pluie	T : Traitement mixte chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 3 1					
<b>B<sub>6</sub>m</b>	Ce traitement peut être soit un traitement avec des liants hydrauliques pour les moins argileux et les plus secs d'entre eux soit plus généralement un traitement associant chaux + liant hydraulique. Lorsqu'ils sont dans un état sec et que leur plasticité impose un traitement chaux + liant hydraulique, la chaux peut avantageusement être introduite sous forme de chaux éteinte ou mieux de lait de chaux.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= OU - pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 2 1					
<b>B<sub>6</sub>s</b>	Ces sols se traitent le plus généralement en place ou éventuellement en centrale après les avoir préalablement traités en place à la chaux.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= OU - pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux	0 2 2 1					



## **Chapitre II :**

### **Méthodes et travaux de terrassement**

## Chapitre II : Méthodes et travaux de terrassement

### II.1 Introduction

Pour construire un ouvrage, quel qu'il soit (tunnel, route, pont, bâtiment, barrage, ...), il est nécessaire de modifier le terrain naturel. Il faut profiler la surface du terrain de telle sorte qu'il soit apte à supporter le poids de l'ouvrage et à en intégrer la forme. L'ensemble de ces opérations s'appelle "le terrassement".

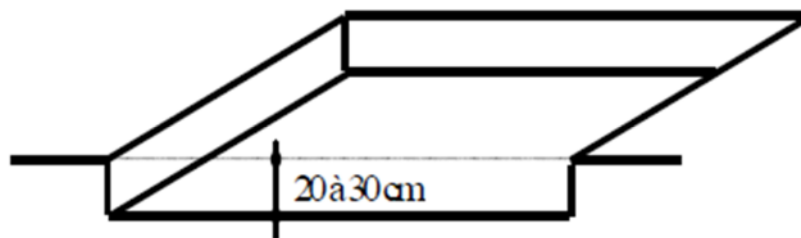
*Terrasser est un travail composite pouvant comprendre* : l'extraction de matériaux, au compactage, avec peut être du décapage de la terre végétale, et de la mise en dépôt des terres.

*Il n'existe pas un seul matériau à terrasser mais plusieurs sortes possibles* : Rochers - terre - gravier et sable - limon – argile [5].

### II.2 Définitions et lexique

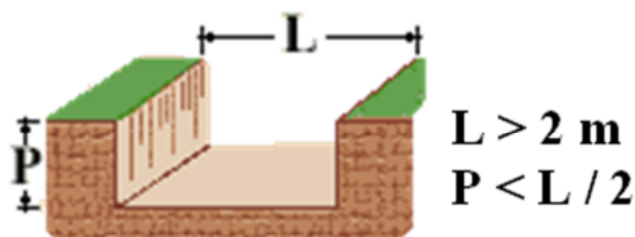
#### II.2.1 Décapage en surface (décapage de la terre végétale).

L'épaisseur de la couche à décaper varie de 20 à 30 cm. On quantifie souvent ce décapage en m<sup>2</sup>.



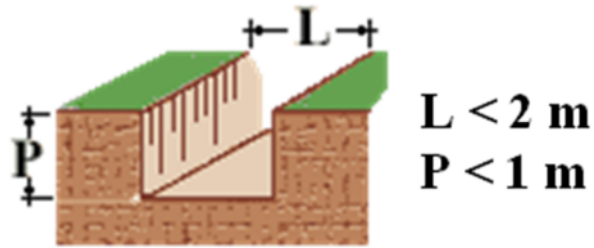
#### II.2.2 Fouilles en rigoles pour fondations

Elles correspondent aux semelles filantes (fondations sous les murs et les voiles de l'ouvrage).



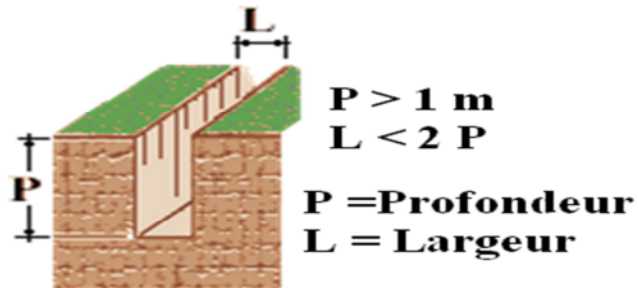
#### II.2.3 Fouilles en trous pour fondations

Elles correspondent aux semelles isolées (Fondations sous les poteaux, sous les murs isolés de petites dimensions).



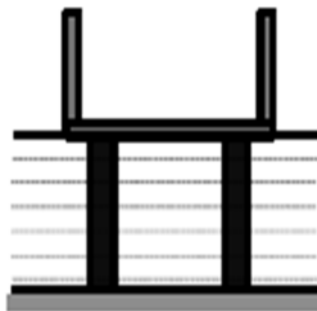
#### II.2.4 Fouilles en tranchées

Elles sont réalisées en général pour la pose de canalisations.



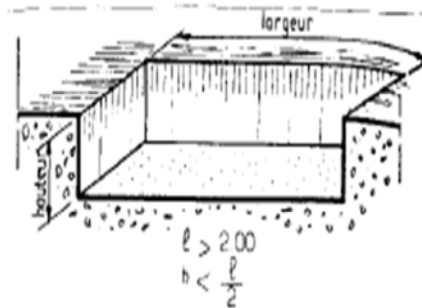
#### II.2.5 Fouilles en puits

Ces fouilles permettent la réalisation de fondations semi-profondes qui transmettent les charges de l'ouvrage sur un sol approprié.



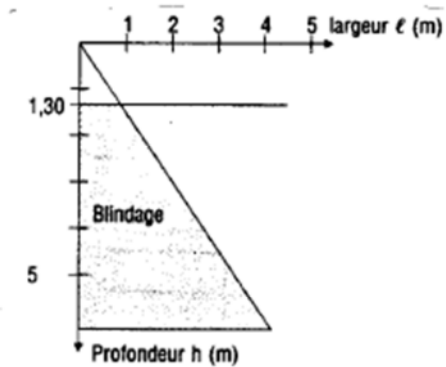
#### II.2.6 Fouilles en pleine masse ou en excavation.

Cela englobe des travaux d'envergure aussi bien en surface qu'en hauteur.

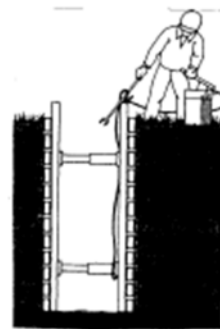


### II.3 Blindages des fouilles

En règle générale, le blindage est requis à partir d'une profondeur de 1.30 m pour les tranchées de largeur inférieure à 1.00 m.



Exemple : si  $\ell > 1,40$  m  
et  $h = 3,1$  m  $\Rightarrow$  blindage obligatoire



**Figure 1** Parois en bois ou métalliques

**Tableau 2.1** Blindage des fouilles - Tableau récapitulatif

Type de blindage	Emploi	Observations
<i>Platelage bétonné</i>	fouille en tranchée provisoire hors nappe	gêne dans les travaux de terrassement
<i>Tubage</i>	fouille en puits provisoire présence de nappe admise	
<i>Parois berlinoises</i>	pleine masse provisoire ou définitive hors nappe ou terrain drainable	emploi en site urbain ; coffrage de la paroi extérieure ; peu coûteux
<i>Parois moulées</i>	pleine masse définitives présence de nappe admise	emploi en site urbain ; s'intègre à la structure du bâtiment ; installation de chantier lourde
<i>Rideaux de palplanches</i>	pleine masse provisoires présence de nappe ou définitif admis	nuisance pour les riverains ; récupération aléatoire
<i>Parois clouées</i>	pleine masse ou provisoire hors nappe	talutage éventuel ; peu coûteux

#### II. 4 Terrassement en présence d'eau

La présence d'eau dans les sols, modifie de manière non négligeable ses caractéristiques et les modes de terrassements pour cela il faut :

- Collecter les eaux de ruissellement ;
- Pomper les venues d'eau (faible) ou drainer ;
- Dans le cas de nappe phréatique avec présence d'eau permanente, il faut procéder à un rabattement de la nappe.

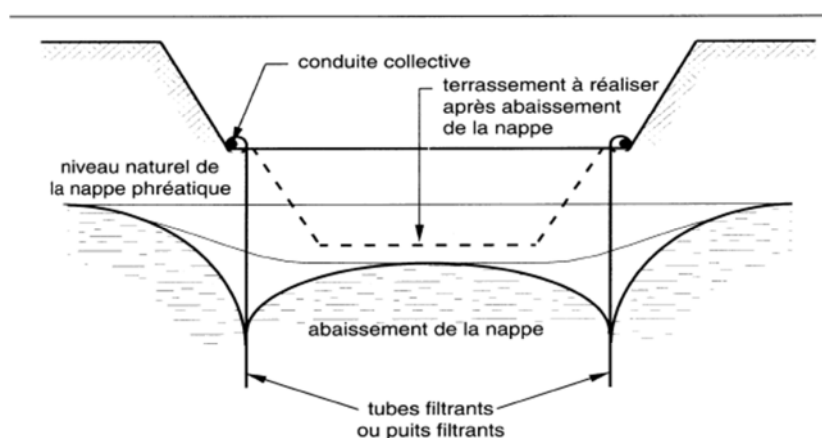


Figure 2 Rabattement de nappe par pompage

## II. 5 Notions de déblais et remblais

- *Le déblayage consiste à enlever des terres*
- *le remblayage à apporter des terres*

Déblais et remblais représentent également, en termes de métier, les terres extraites ou accumulées d'un terrassement.

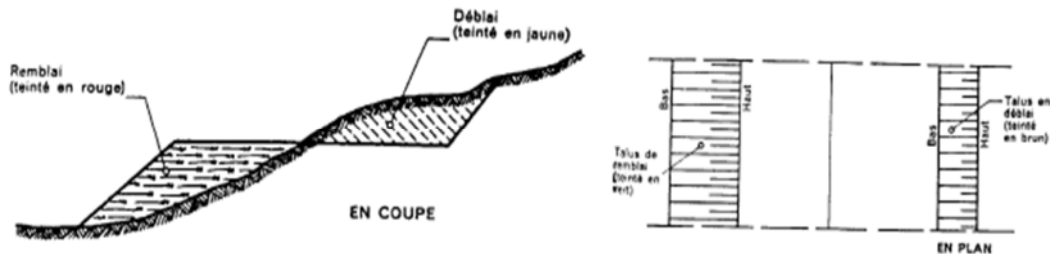


Figure 3 Profil mixte

## II. 6 Problème du foisonnement

Les différents types de volumes sont :

- Lorsque l'on creuse en trou dans le sol, le volume apparent des déblais est supérieur au volume du trou.
- Si l'on remet les déblais en place et après compactage, l'on constate un excédent de matériaux [6].

Ce phénomène de décompression des terres est appelé "foisonnement".

<u>État initial en place</u>	<u>État foisonné</u>	<u>État reconstitué</u>
Volume en place : $V_p$	Volume foisonné: $V_f$	(compacté) Volume reconstitué: $V_r$

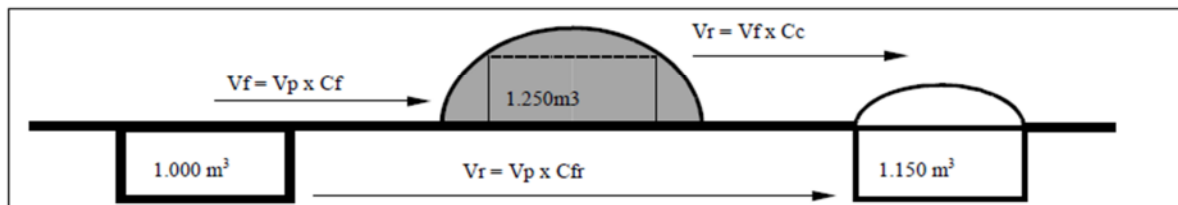


Figure 4 différents états de sol

**II. 6.1 Coefficient de foisonnement (Cf)** permet d'évaluer le volume apparent foisonné ( $V_f$ ) d'un terrain déplacé en fonction du volume en place ( $V_p$ ) :

$$V_f = C_f \times V_p \quad (2.1)$$

**II. 6.2 Coefficient de compactage (Cc)** permet l'évaluation du volume reconstitué ( $V_r$ ) de ce même volume foisonné ( $V_f$ ) après sa mise en place et son compactage définitif. Il est rare d'obtenir un volume de terrain reconstitué ( $V_r$ ) égal au volume initial en place ( $V_p$ ) :

$$V_r = C_c \times V_f \quad (2.2)$$

Dans le cas des terrassements routiers ou sur les chantiers de terrassement très importants, il est intéressant de prévoir l'exacte quantité à extraire. Cela évite les mouvements de terre inutiles et donc onéreux.

$$V_r = V_p \times C_f \times C_c \quad (2.3)$$

### **II. 6.3 Coefficient de foisonnement résiduel**

Le Coefficient de foisonnement résiduel est défini par la formule suivante :

$$C_{fr} = C_f \times C_c \quad (2.4)$$

La connaissance de foisonnement est nécessaire pour des travaux de terrassement a fin de :

- Déterminer la capacité de véhicule de transport de déblais et remblais.
- Effectuer la mise en dépôts quand les décharges à partir du cubage mesuré sur place.
- La dimension initiale a donné le remblai après compactage.

#### **Exercice 01**

Calculer le volume résiduel en fonction de coefficient de foisonnement résiduel

*Solution*

$$V_r = V_p \times C_{fr}$$

#### **Exercice 02**

Soit le foisonnement d'un sol ordinaire est 20 % et le volume en place est  $3 \text{ m}^3$ .

Calculer le volume foisonné.

**Solution**

$$V_f = C_f \times V_p$$

Le foisonnement = 20 %  $\implies C_f = 1.2$

$$V_f = (1.2) (3) = 3.6 \text{ m}^3$$

**Exercice 03**

Dans le but de compacter une tranchée de  $6 \text{ m}^3$ , nous avons le volume de sable d'utiliser pour le compactage est  $7 \text{ m}^3$  avec un coefficient de compactage  $C_c=0.80$

- Trouver si la quantité de sable est suffisante au non ?

Sinon comme bien on doit ajouter.

**Solution**

$$V_f = 7 \text{ m}^3 \quad C_c = 0.8$$

$$V_r = C_c \times V_f \quad V_r = (7) (0.8) = 5.6 \text{ m}^3$$

$$(V_{f1} - V_{f2}) = 6 - 5.6 = 0.4 \text{ m}^3 \text{ la quantité ajouter est } 0.5 \text{ m}^3$$

$$V_r = C_c \times V_f \quad V_f = \frac{V_r}{C_c} = \frac{6}{0.8} = 7.5 \text{ m}^3$$

$$V_{f1} - V_{f2} = 7.5 - 7 = 0.5 \text{ m}^3 \text{ la quantité ajouter est } 0.5 \text{ m}^3$$

**Exercice 04**

Dans le but de compacter un remblai de  $60 \text{ m}^3$ , nous avons le volume du tuf pour le compactage et de  $80 \text{ m}^3$ .

Calculer le résidu de compactage avec  $C_c=0.8$

**Solution**

$$V_f = 80 \text{ m}^3 \quad C_c = 0.8$$

$$V_r = C_c \times V_f \quad V_r = (80) (0.8) = 64 \text{ m}^3$$

$$\text{Le résidu du compactage} = 1 - C_c = 1 - 0.8 = 0.2 = 20\%$$

**Exercice 05**

Soit le résidu au compactage d'un remblai routier est de 8% .

Calculer le coefficient de compactage et trouver le foisonnement résiduel avec  $C_f=1.25$

**Solution**

$$\text{Le résidu du compactage} = 8\% \implies C_c = 1 - 0.08 = 0.92$$



le foisonnement résiduel  $C_{fr} = C_f \times C_c = (1.25)(0.92) = 1.15$

### Exercice 06

La réfection de la pelouse du stade omnisports de la ville de Tébéssa nécessite la mise en place de 3000 m<sup>3</sup> de terre végétale de bonne qualité. Ce volume représente la quantité finale en place et compactée. Quelle doivent être la quantité à transporter (foisonné) et la quantité initiale à prévoir (non foisonné et en place) ?

Avec Coefficient de foisonnement apparent 25 %

Coefficient de foisonnement résiduel 12,5 %

#### Solution

$$C_f = 25\% = 1 + 0.25 = 1.25$$

$$C_{fr} = 12.5\% = 1 + 0.125 = 1.125$$

$$C_{fr} = C_f \times C_c \quad \Longrightarrow \quad C_c = \frac{C_{fr}}{C_f} = \frac{1.125}{1.25} \quad \Longrightarrow \quad C_c = 0.9$$

$$V_r = C_c \times V_f \quad \Longrightarrow \quad V_f = \frac{V_r}{C_c} = \frac{3000}{0.9} \quad \Longrightarrow \quad V_r = 3333.33 \text{ m}^3$$

$$V_f = C_f \times V_p \quad \Longrightarrow \quad V_p = \frac{V_f}{C_f} = \frac{3333.33}{1.25} \quad \Longrightarrow \quad V_p = 2666.66 \text{ m}^3$$

### II. 7 Pente des talus

Pour obtenir un équilibre stable, nécessaire à la bonne tenue des terres en remblais et des tranchées, il convient de donner aux talus qui limitent ces terrassements une inclinaison convenable. Cette pente peut se définir

- Soit par la **tangente de l'angle (pente)** que fait ce talus avec l'horizontale (talus à 4/5 ou à 0.80 m ou encore à 80%)
- Soit par la **cotangente de l'angle (inclinaison)** dont la valeur s'exprime généralement comme celle de la tangente par une fraction (5/1, 3/2, 1/1, 2/3, etc.)

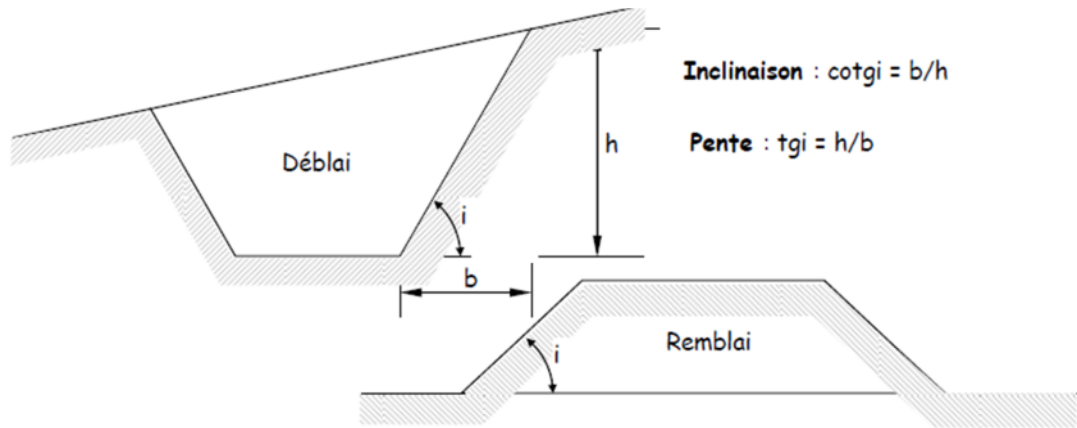


Figure 5 Pentés et inclinaisons des talus

Quelques valeurs usuelles des terrains qui sont classés selon les difficultés d'extraction

Tableau 2.2 Quelques valeurs usuelles des terrains

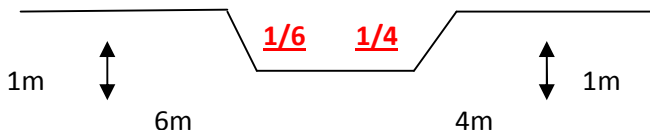
Désignation	Nature des terres	Angle du talus naturel	Coefficient de foisonnement
Terrain ordinaire	Sable	10 à 25°	10 à 20 %
	Gravier	30 à 40°	25 %
	Terre végétale	30 à 50°	10 à 25 %
Terrain semi-compact ou moyen	Cailloux	40 à 50°	50 %
Terrain compact	Argile	30 à 50°	25 %
	Marne	30 à 45°	25 %
Roches	Grès tendre	50 à 90°	50 %
	Roches diverses		plus de 50 %

Exercice 7

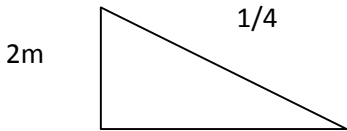
Soit les figures suivantes déterminer les pentes des talus



## Chapitre II : Méthodes et travaux de terrassement



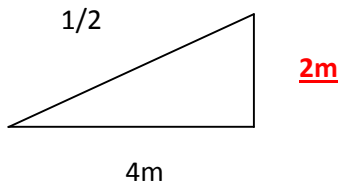
Quelle est la distance horizontale



$$\frac{v}{h} = i = \frac{1}{4} = \frac{2}{h} \text{ donc } h = (4) \times (2) = 8\text{m}$$

**8m**

Quelle est la distance verticale

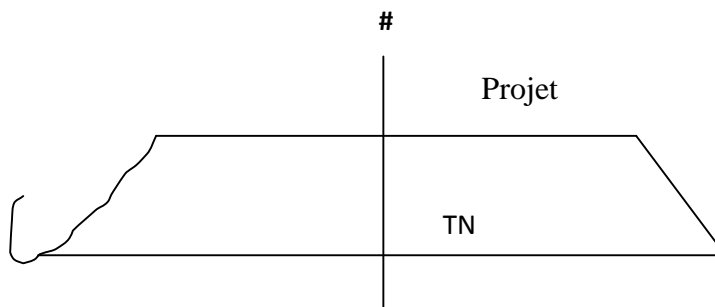


$$\frac{v}{h} = i = \frac{1}{2} = \frac{v}{4} \quad v = (4) \left( \frac{1}{2} \right) = 2\text{m}$$

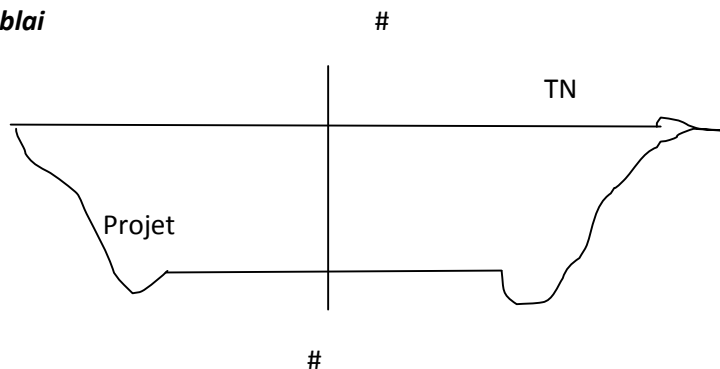
### II. 8 Type de profils

Il y'a trois types de profils

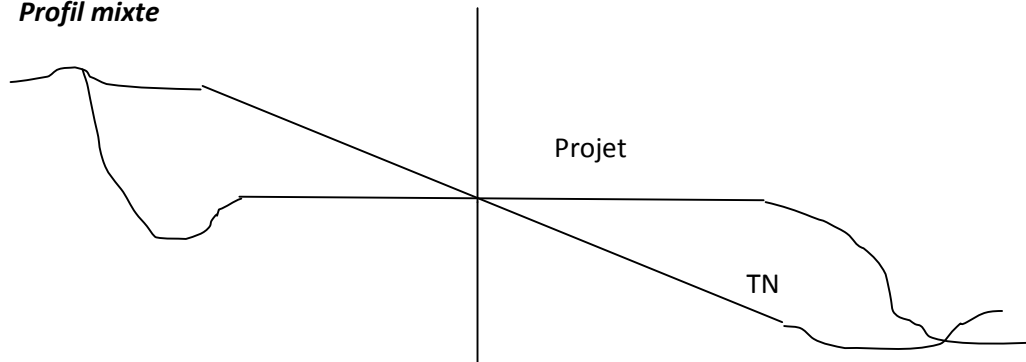
#### 1. Profil en remblai



#### 2. Profil en déblai



### 3. Profil mixte



## II. 9 Profondeur maximale d'une fouille sans blindage

Le creusement d'une fouille sans blindage n'est pas toujours possible surtout si sa profondeur dépassée une certaine hauteur critique ou de laquelle les parois de cette dernière s'effondreraient.

D'une manière générale la profondeur critique est déterminée par la formule suivante :

$$H \text{ critique} = \frac{(\pi+2)c}{\gamma} \quad (2.5)$$

Avec  $c$  : la cohésion  $\gamma$ : le poids volumique

### Exercice 8

Prenons le cas d'une argile pour laquelle  $c=2 \text{ t/m}^2$   $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$

Pour la deuxième tranché on 'un sable argileux pour lequel  $c=0.7 \text{ t/m}^2$   $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$

Calculer la hauteur critique de chaque cas et discuter la stabilité

#### *Solution*

$$H1 \text{ critique} = \frac{(\pi+2)c}{\gamma} = 5.14 \text{ m}$$

$$H2 \text{ critique} = \frac{(\pi+2)c}{\gamma} = 1.99 \text{ m}$$

H1 est plus stable par rapport 1.99m

## II. 10 Tolérances d'exécution des travaux de terrassement

Deux types de tolérances sont à considérer (terrain non rocheux et rocheux).

- **Terrain non rocheux**
  - Tolérance de niveau :  $\pm 5 \text{ cm}$

**Pour les différences de niveaux (plate-forme) et les contours des fouilles**

- Tolérance d'implantation :  $\pm 5 \text{ cm}$
- **Terrain rocheux**

## Chapitre II : Méthodes et travaux de terrassement

- Les parois doivent être purgées des blocs dont la résistance est douteuse.
- Aucune saillie n'est autorisée par rapport aux niveaux prescrits sous les fondations, mais les Sur-profondeurs locales de 10 cm sont autorisées dans le cas des roches.
- Des sur-profondeurs sont autorisées sous réserve d'être soigneusement comblées (éclats de Pierre, sable) et damées pour reconstituer un sol plan au niveau fixé.

## **Chapitre III :**

### **Cubature des terrassements**

## Chapitre III : Cubature des terrassements

### III.1 Définition

La cubature des terrassements est l'évaluation du volume des terres soit à enlever ou à mettre en remblai pour l'exécution du projet, à partir des Surfaces de remblais ou déblais obtenues par le profil en travers, et des Distances entre profils en travers, indiquées sur le profil en long

Il existe 4 méthodes de calcul des cubatures :

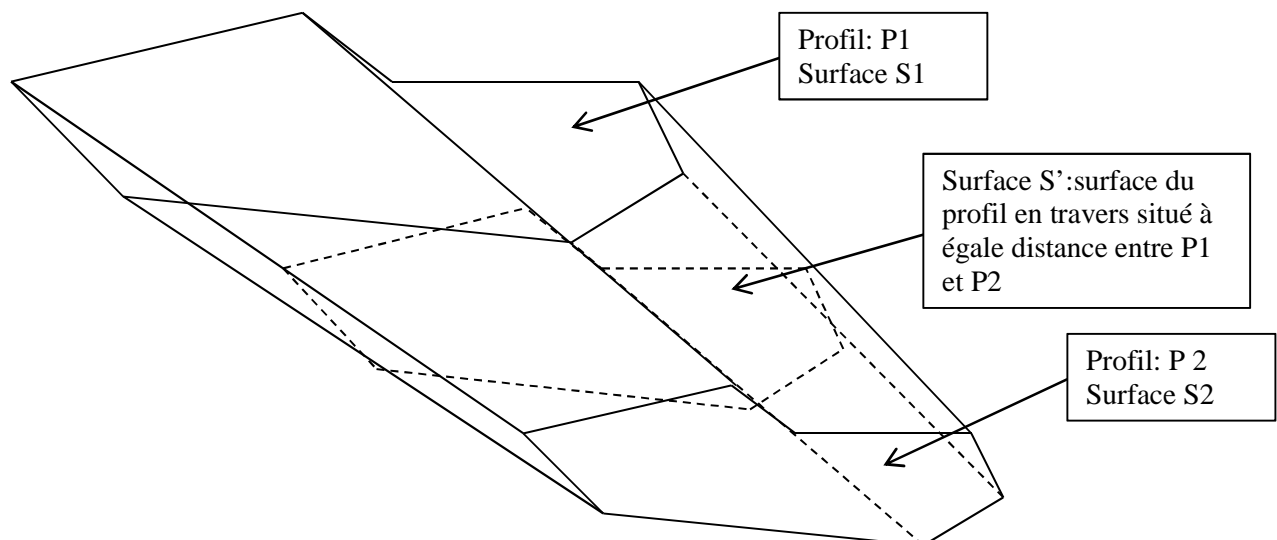
- méthode par le calcul des volumes élémentaires ;
- méthode des aires moyennes ;
- méthode des profils ;
- méthode numérique.

Dans ce cours on va développer seulement la méthode des profils

### III.2 Calcul des volumes de terrassement (profil en long)

#### *Hypothèses :*

- Le calcul des volumes s'effectue dans le sens de parcours du projet.
- Le terrain est supposé régulier entre 2 profils.
- Plus le nombre des profils en travers seront grand, meilleure sera la précision de calcul des terrassements.



**Figure 3.1** Hypothèses de calcul par la méthode des profils

### Chapitre III : Cubature des terrassements

On a

$$V_1 = \frac{L_1}{6} (S_1 + S_2 + 4 S')$$

Pour simplification on considère que  $S' = \frac{(S_1 + S_2)}{2}$

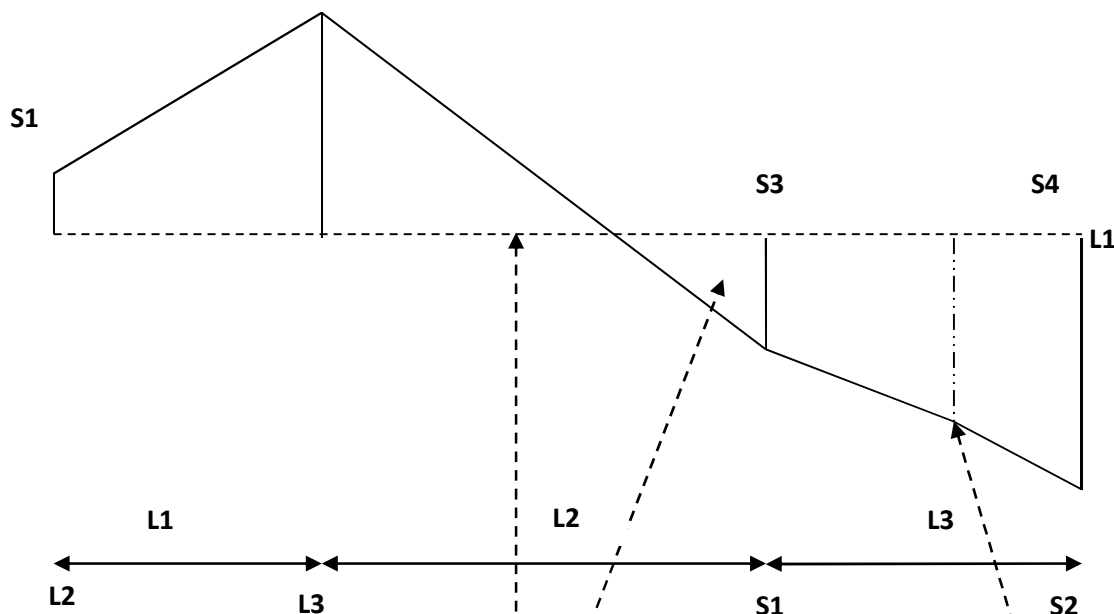
$$V_1 = \frac{L_1}{6} (S_1 + S_2 + 2S_1 + 2S_2)$$

$$V_1 = \frac{3L_1}{6} (S_1 + S_2)$$

$$\text{Donc } V_1 = \frac{L_1}{2} (S_1 + S_2) \quad (3.1)$$

en généralisant a l'ensemble du projet

**Exemple 1:** calculer le volume des terres des profils suivants



Le calcul général donne

$$V_1 = \frac{L_1}{2} (S_1 + S_2)$$

$$V_2 = \frac{L_2}{2} (S_2 + S_3) \quad \{\text{Pb1 : comment déterminer la partie de remblai et celle de déblais ?}\}$$

On interpose un profil en travers **Fictif Pf1** de surface nulle

$V_3 = \frac{L_3}{2} (S_3 + S_4)$  {Pb2 : le calcul de ce volume est approché en raison de la présence du point de **brisure** du TN entre les profils P3 et P4. Attention au choix de la position des profils en travers ( on ajoute si nécessaire : ici le profil P3' )}



**Solution**

$$V_1 = \frac{L_1}{2} (S_1 + S_2)$$

$$V_2 = \frac{L_2'}{2} (S_2 + SF)$$

$$V_2'' = \frac{L_2''}{2} (SF + S_3)$$

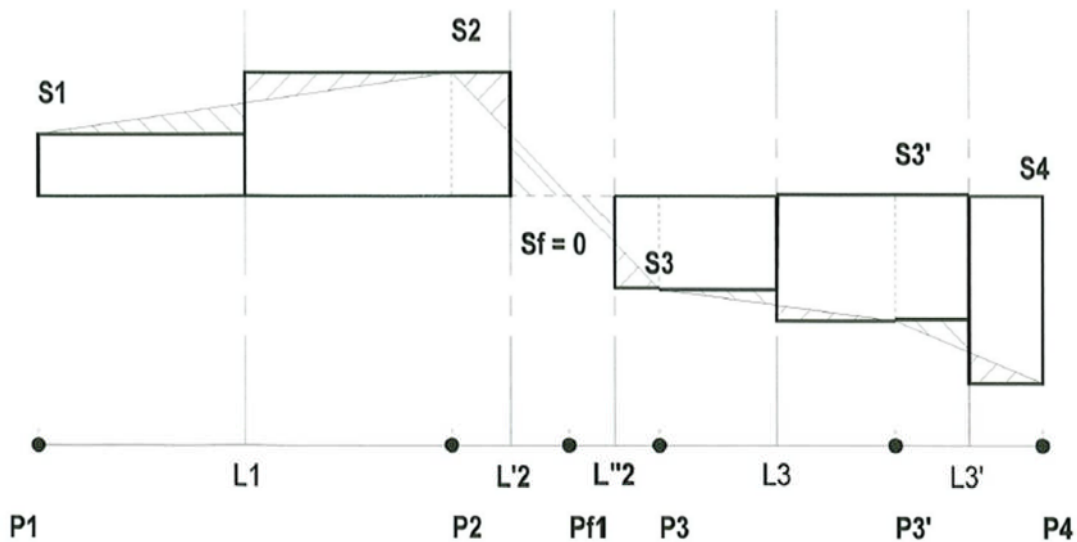
$$V_3 = \frac{L_3}{2} (S_3 + S_3')$$

$$V_4 = \frac{L_3'}{2} (S_3' + S_4)$$

$$V = V_1 + V_2 + V_2'' + V_3 + V_4$$

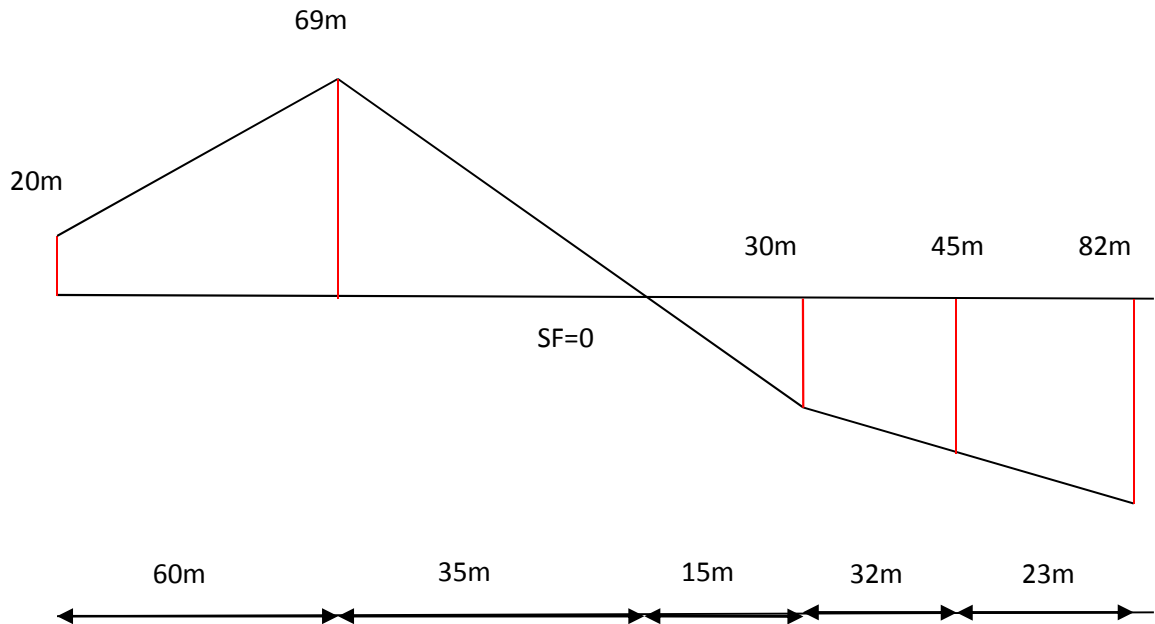
$$V = \frac{L_1}{2} (S_1 + S_2) + \frac{L_2'}{2} (S_2 + SF) + \frac{L_2''}{2} (SF + S_3) + \frac{L_3}{2} (S_3 + S_3') + \frac{L_3'}{2} (S_3' + S_4)$$

$$V = \frac{L_1}{2} (S_1 + S_2) + \frac{L_2'}{2} S_2 + \frac{L_2''}{2} S_3 + \frac{L_3}{2} (S_3 + S_3') + \frac{L_3'}{2} (S_3' + S_4)$$



Cette dernière formulation revient à remplacer les volumes par des prismes ayant pour section la surface du profil en travers pour hauteur la moitié de la distance de ce profil aux 2 profils voisins.

**Exercice 2 :** calcul les volumes des terres de profils suivant



**Solution :**

$$V_1 = \frac{60}{2} (20+69) = 2670 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \frac{35}{2} (69) = 1207.5 \text{ m}^3$$

$$V_2'' = \frac{15}{2} (30) = 225 \text{ m}^3$$

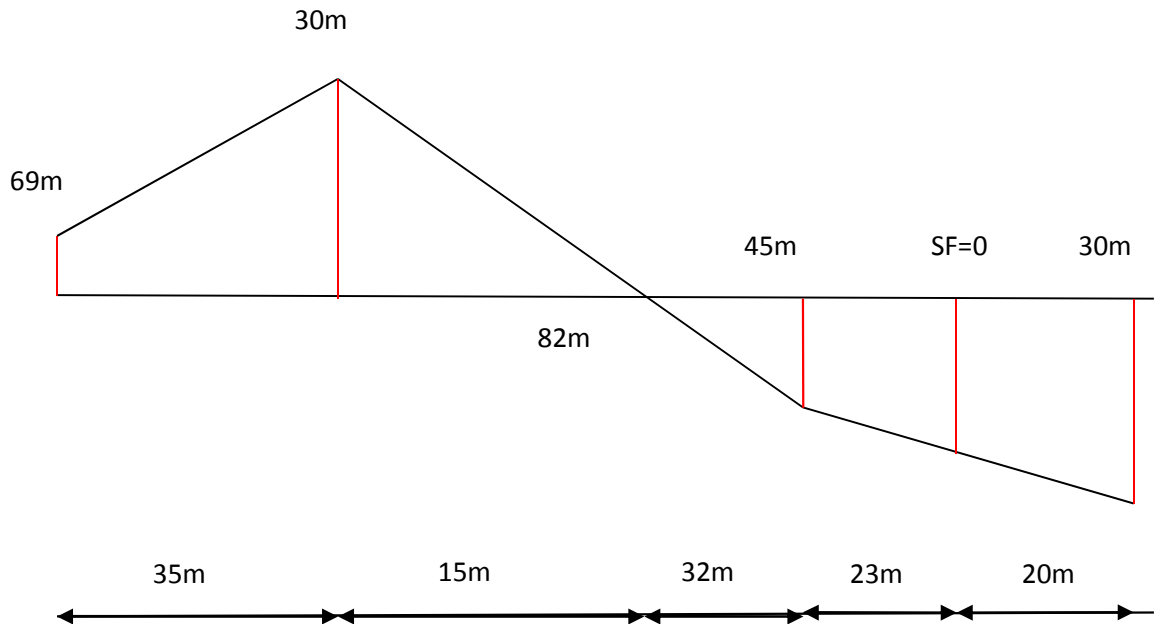
$$V_3 = \frac{32}{2} (30+45) = 1200 \text{ m}^3$$

$$V_4 = \frac{23}{2} (45+82) = 2763 \text{ m}^3$$

$$V = 6763 \text{ m}^3$$

**Exercice 3 :** calcul les volumes des terres de profiles suivant on utilisant le programme excel

### Chapitre III : Cubature des terrassements

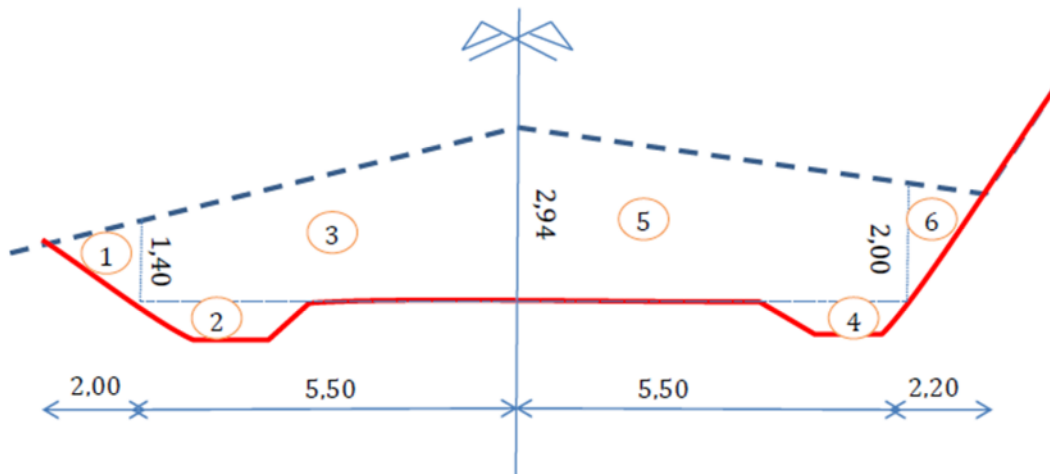


#### Solution

N° Profils	Distances partielles	Longueur d'application	Déblais		Remblais	
			Sur. En m <sup>2</sup>	cube en m <sup>3</sup>	Sur. En m <sup>3</sup>	cube en m <sup>3</sup>
	0					
1	30	15	15	225	0	0
	30					
2	15	22.5	67	1507.5	0	0
	15					
Pf1	10	12.5	0	0	0	0
	10					
3	25.2	17.6	0	0	60	1056
	25.2					
3'	12.8	19	0	0	80	1520
	12.8					
4	0	6.4	0	0	102.3	654.72
	0					
	<b>Total en m<sup>3</sup></b>		<b>1732.5</b>		<b>3230.72</b>	

### III.4 Calcul de surface des profils en travers

Le profil en travers permet le calcul de la surface comprise entre la ligne de projet et la ligne du terrain naturel. Pour cela, mis à part les fossés et les banquettes qu'ayant généralement une section constante d'un profil à l'autre, on divise la surface à calculer par des lignes verticales aux surfaces élémentaires (rectangle triangle ou trapèze) [7].



**Figure 3.2** Section d'un profil en travers

#### Exercice 3

Calculer la surface du profil de la figure 3.2

#### *Solution*

on coupe cette section une surface élémentaire

Fossé  $S_2 = S_4 = 0.5 \text{ m}^2$  (section constante)

$$S_1 = \frac{(1.4)(2)}{2} = 1.4 \text{ m}^2$$

$$S_2 = S_4 = 0.5 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \frac{(2.94+1.4)5.5}{2} = 11.93 \text{ m}^2$$

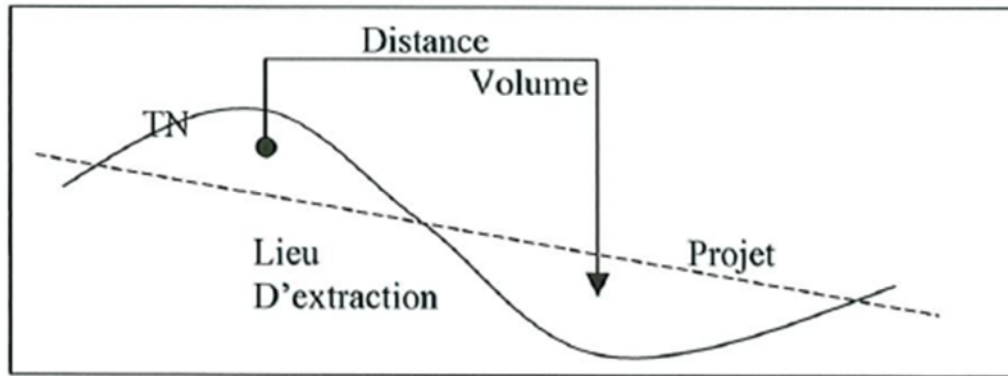
$$S_5 = \frac{(2.94+2)5.5}{2} = 11.93 \text{ m}^2$$

$$S_6 = \frac{(2.2)(2)}{2} = 2.2 \text{ m}^2$$

ST = 30.17 m<sup>2</sup>

### III.4 Mouvements de terre (Epure des terrassements)

Les mouvements des terres on peut objectif d'un indiquer les transports de terres qui doivent être effectués sur un chantier de terrassement



**Figure 3.3** Mouvements des terres sur un projet

Pour chaque volume de matériaux, on indique :

- Le lieu d'extraction.
- Le lieu de mise en dépôt ou en remblai.
- La distance de transport.

Le transport des terres représente une part importante des travaux à effectuer sur un projet (40 à 50% du prix total) une étude soignée doit être réalisée lors des phases de soumission des prix du marché, de préparation du projet, d'exécution des travaux.

Les mouvements des terres ont pour objet :

- La compensation déblais/remblai sur le long du projet ;
- L'évacuation des déblais excédentaires aux dépôts ;
- Emprunt des matériaux sur chantier pour remblaiement lorsqu'il y a un manque ;
- Recherche de la distance moyenne de transport la plus courte possible ;
- Exclure le transport en sens contraire qui se croise ;
- Choix de matériels de transports de terrassement (Motor Scraper, chargeur-camions...);
- Calcul du coût réel de terrassement ;
- Permet d'évaluer les rendements nécessaires en fonction de la durée prévue du chantier ;

- Permet de choisir le matériel adapté au matériau, aux rendements, aux distances de transport ;
- Permet d'établir le planning général des travaux pour l'ensemble du chantier.

### III.5 Transport des terres

#### III.5.1 Transports transversaux

Dans les profils mixtes, on commence d'utiliser au maximum les déblais à la construction des remblais, on fait ces transports perpendiculairement à l'axe de la route. Ces distances sont, généralement courtes, et n'interviennent pas dans la distance moyenne de transport

#### III.5.2 transports longitudinaux

On ne fait les transports longitudinaux qu'après avoir fait les transports transversaux. La recherche de ces transports les plus économiques est effectuée par une méthode graphique

### III.6 Epure de Lalanne

#### III.6.1 Description

L'épure de Lalanne est un graphique inventé par l'ingénieur Léon Lalanne<sup>1</sup> au XIXe siècle. Elle sert à optimiser le profil en long pour la construction d'une route et ainsi minimiser la distance de transport moyenne des terres pour les opérations de terrassement qui vont suivre. Il permet :

- D'équilibrer des déblais et remblais longitudinalement ;
- Trouver rapidement un mouvement des terres ayant la distance de transport moyenne minimum ;
- Minimiser les coûts de transport.

#### III.6.2 Distance moyenne de transport

Les dépenses de transport augmentent avec le volume à transporter et la distance parcourus, elles sont proportionnelles au produit de distance par volume appelé « *Moment de Transport* »

$$V_i \times d_i$$

Soit  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  les volumes transportés aux distances  $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ ,

Le volume total sera  $V = \sum_{i=1}^n V_i$

Alors la distance moyenne de transport  $d_m$  sera

$$d = \frac{1}{V} (V_1 \times d_1 + V_2 \times d_2 + \dots + V_n \times d_n) \Rightarrow d = \frac{\sum_{i=1}^n V_i d_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (3.2)$$

### III.6.3 Etablissement de l'épure de Lalanne

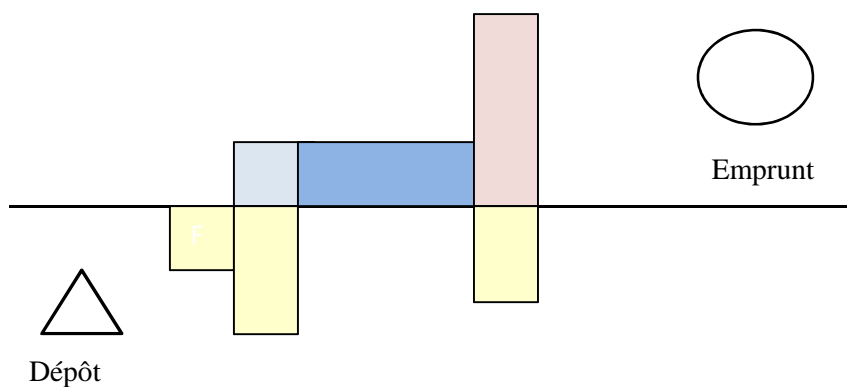
L'épure de Lalanne est un moyen de représentation graphique des terrassements effectués, il s'établit de façon suivante :

- On porte sur une droite, dites ligne de terre HH', ou ligne initiale, les distances entre centres de gravité (les positions des profils en travers). On ne porte pas les profils fictifs.
- Perpendiculairement à cette ligne, on trace les cubes des déblais et des remblais lus dans le tableau du mouvement des terres.
- On choisit pour cela une échelle des cubes (par exemple un centimètre pour  $20 \text{ m}^3$  ou pour  $50 \text{ m}^3$  ou encore pour  $100 \text{ m}^3$ )



On porte

- les déblais de bas en haut
- les remblais de haut en bas
- En sautant d'un centre de gravité à l'autre par un échelon horizontal

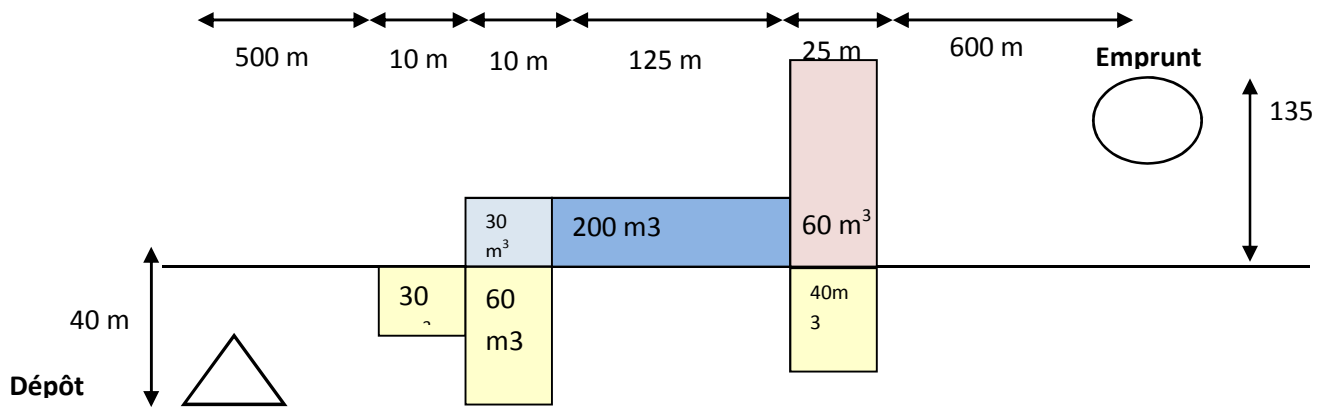


**Figure 3.4** Schéma de l'épure de Lalanne

#### Exercice 4

Dans un chantier routier, nous avons le schéma suivant :

Calculer la distance moyenne de transport



### Suite l'épure de Lalanne

Si l'extrémité du cube du dernier profil se trouve :

a) sur la ligne de terre

- Le cube des déblais = le cube des remblais. ( $D = R$ )

b) au-dessus de la ligne de terre

Le cube des déblais est supérieur au cube des remblais.

Il faudra mettre l'excédent en dépôt. ( $D > R$ )

c) au- dessous s de la ligne de terre

Le cube des déblais est inférieur au cube des remblais. Il faudra faire un ou plusieurs emprunts. ( $D < R$ )

La distance entre la ligne de terre et l'extrémité de l'épure doit être, à l'échelle des cubes, égale à la différence des déblais et des remblais.

### III.6.4 Ligne de répartition des transports

Sur l'épure, les cubes des déblais, représentés par des segments verticaux ascendants, seront transportés aux remblais, représentés par les segments verticaux descendants qui leur font face. On obtiens ainsi des rectangles qui représentent les transports.



On cherche une ligne de répartition des transports, définie par une ligne horizontale « LR », qui peut être différente de la ligne HH' pour organiser les transports en faisant en sorte que la somme des surfaces des rectangles soit la plus petite possible.

- La surface de chaque rectangle (cube X distances) représente donc le moment de transport du cube correspondant au côté vertical du rectangle.
- Les transports se font :
  - évidemment dans le sens déblais vers remblais.
  - de gauche à droite au-dessus de la ligne de répartition
  - de droite à gauche au-dessous de la ligne de répartition

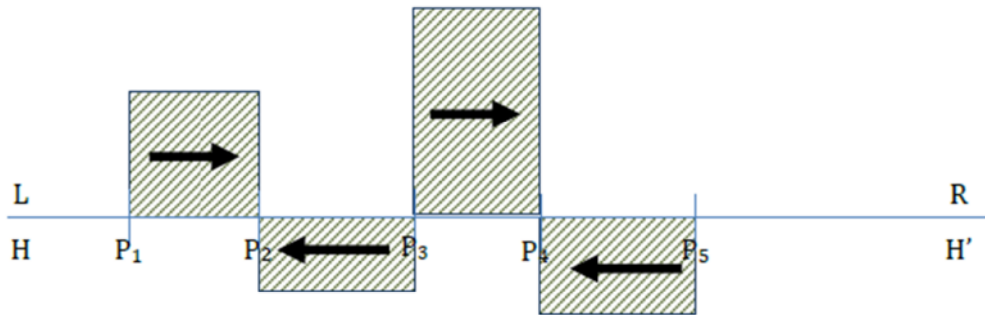


Figure 3.5 Solution envisagée de l'épure de Lalanne 1<sup>er</sup> Cas

### III.6.5 Différents cas envisagés pour la position de la ligne LR

#### III.6.5.1 1<sup>er</sup> Cas: Déblais et Remblais compensés

Cas exceptionnel qui permet de comprendre la solution des autres cas.

Le point final « O » est sur la ligne de terre initiale HH'.

#### III.6.5.2 2<sup>ème</sup> Cas : Dépôt de déblai placé à droite de l'épure

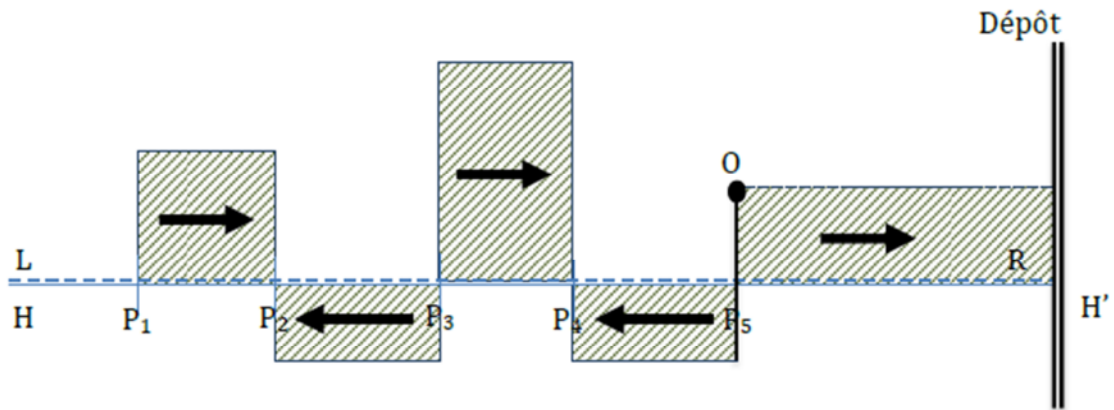


Figure 3.6 Solution envisagée de l'épure de Lalanne 2<sup>ème</sup> Cas

III.6.5.3 3<sup>ème</sup> Cas : Dépôt de déblai placé à gauche de l'épure

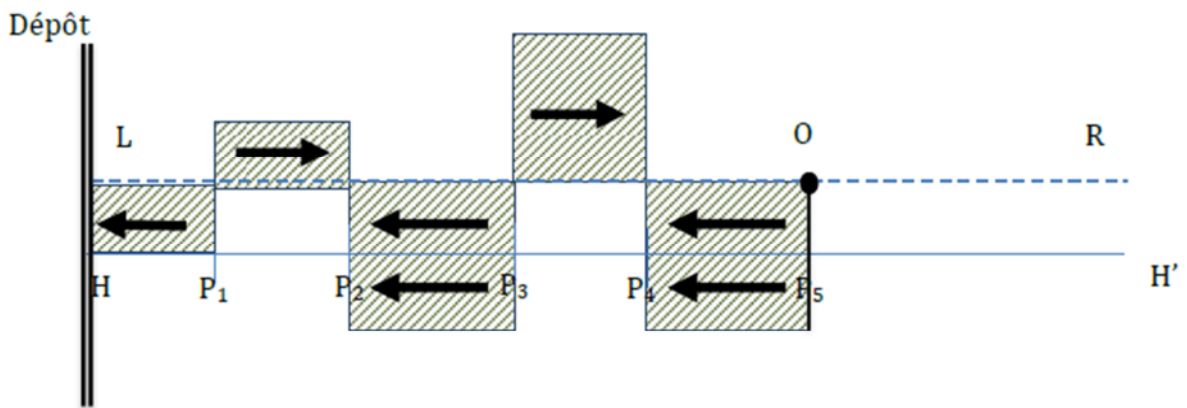


Figure 3.7 Solution envisagée de l'épure de Lalanne 3<sup>ème</sup> Cas

III.6.5.4 4<sup>ème</sup> Cas : Emprunt unique de remblai à droite de l'épure

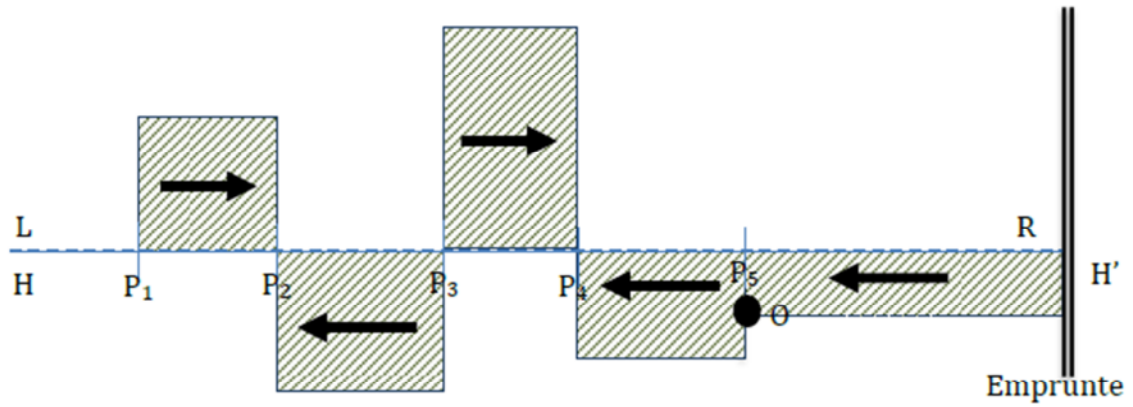


Figure 3.8 Solution envisagée de l'épure de Lalanne 4<sup>ème</sup> Cas

III.6.5.7 5<sup>ème</sup> Cas : Emprunt unique de remblai à l'intérieur de l'épure

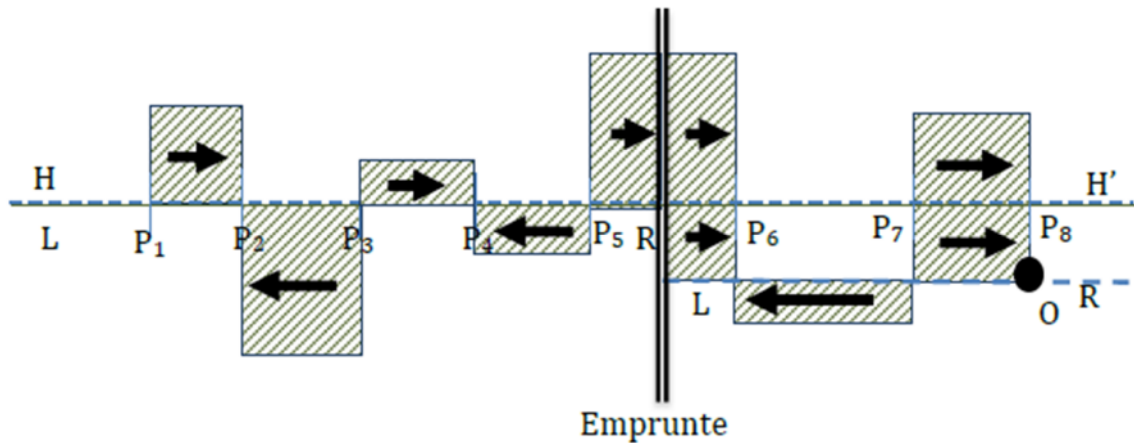


Figure 3.9 Solution envisagée de l'épure de Lalanne 5<sup>ème</sup> Cas

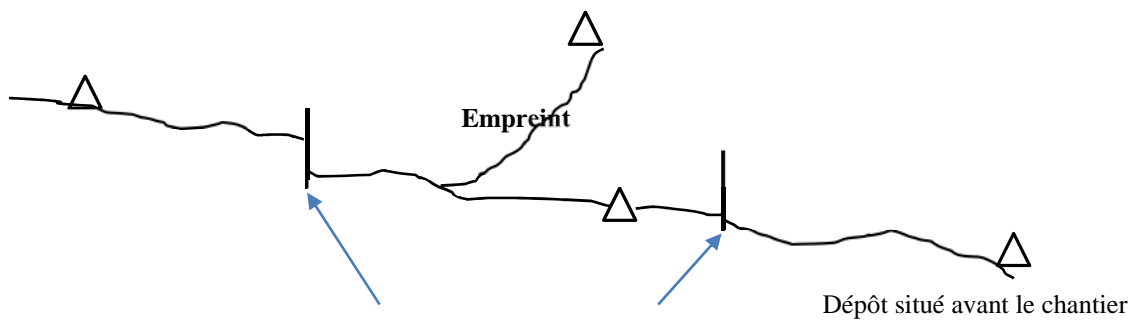


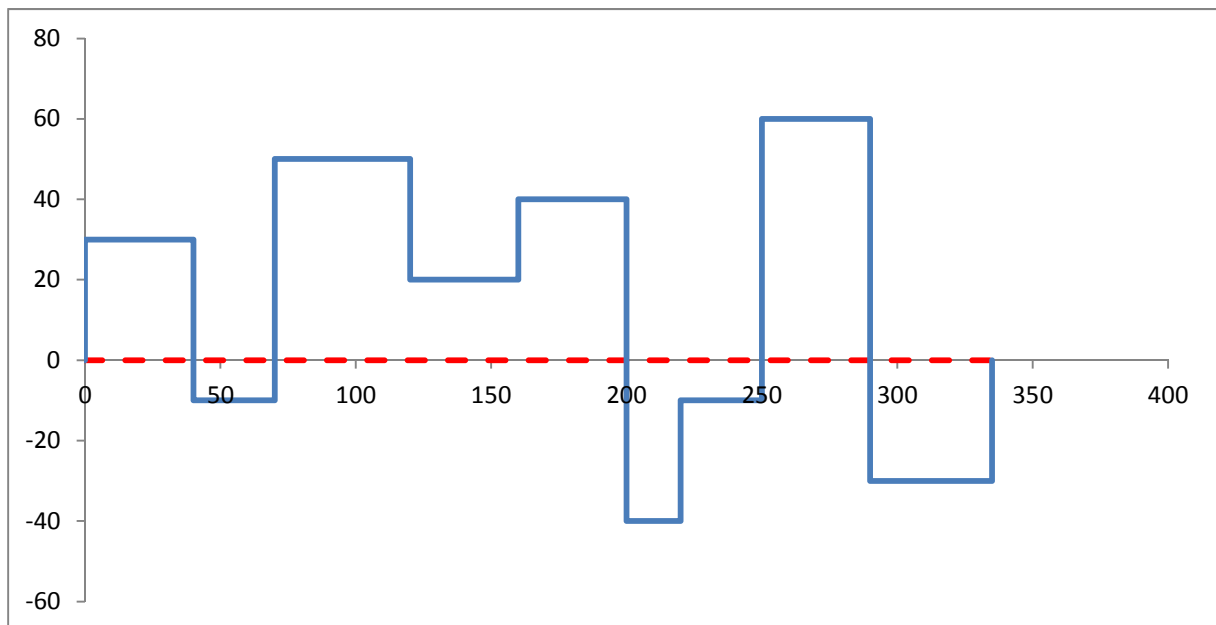
Figure 3.10 Différents cas de positionnement des dépôts

**Exercice 5**

Soit le tableau suivant :  
Tracer l'épure de Lalanne,

N° de profil	excédents		Longueur d'application
	D>R	D<R	
1	30		40
2		40	30
3	60		50
4		30	40
5	20		40
6		80	20
7	30		30
8	70		40
9		90	45
10	30		

**Solution**



**Exercice 6**

Soit le tableau suivant :  
Tracer l'épure de Lalanne,

N° de profil	excédents		Longueur d'application
	D>R	D<R	
1	30		40
2		40	30
3	60		50
4		30	40
5	20		40
6		80	20
7	30		30
8	70		40
9		90	45
10	70		

## **Chapitre IV :**

# **Engins de terrassement**

## Chapitre IV : Engins de terrassement

### IV.1. Introduction

Les engins de terrassement sont des machines qui permettent de travailler, de déplacer, de transporter des matériaux composant les sols tels que les déblais végétaux, la terre, les rochers, etc.

Ils peuvent être classés en plusieurs catégories :

### IV.2 Tracteurs

Les tracteurs sont des engins lourds travaillant en force et pouvant recevoir des équipements spécifiques pour certaines tâches :

- une lame appelée "*bulldozer*" ou *bouteur*,
- une charrue de défonçage appelée "*ripper*",
- des roues en acier pour le compactage.



(a)- Tracteur sur pneu



(b)- Tracteur sur chaîne (bulldozer)

**Figure 1** Types de tracteurs

Les tracteurs sont des engins de terrassement très puissants qui servent de support à des outils travaillant en force: bulldozer, ripper. Ils sont montés soit sur chaînes de roulement, soit sur roues. Ils sont équipés de moteurs diesel à injection d'une puissance allant de 50 à 575 kW au volant. Les outils sont actionnés par des commandes hydrauliques [8].

### **IV.2.1. Tracteurs à chaînes de roulement**

Les tracteurs à chaînes sont utilisés dans les conditions les plus difficiles: terrain glissant, terrain en pente, sol mou, peu portant...

Les chaînes ont un bon coefficient d'adhérence (jusqu'à 0,9) et une faible pression au sol (grande surface de contact). Elles permettent de travailler sur des pentes à 100% .

### **IV.2.2. Tracteurs sur pneus**

Les tracteurs sur pneus sont plus maniables et parfois 3 fois plus rapides que les tracteurs sur chaînes. Leur coefficient d'adhérence est plus faible (0,65 maxi sur sol ferme) et leur pression sur le sol est plus élevée (de l'ordre de 300 kPa). Ils doivent être utilisés sur de "bons sols". Ces engins peuvent se déplacer de façon autonome sans trop de dégâts sur la chaussée.

#### **IV.2.2.1 Choix du type de pneus**

La dimension des pneus, le dessin de leurs sculptures et leur pression de gonflage affectent leur durabilité ainsi leur 'adhérence et de pression au sol. Il faut choisir judicieusement la largeur (large = portance meilleure) et le diamètre (grand = meilleure portance mais puissance diminuée). Pour améliorer les performances, il est possible de lester les pneus avec un mélange de chlorure de calcium et d'eau.

### **IV.3. Bouteurs ou bulldozers**

Les bulldozers ont des lames qui se montent à l'avant des tracteurs et qui permettent le boutage de divers matériaux sur de faibles distances (moins de 200 m). Par extension, on appelle bulldozer ou boteur l'ensemble lame + tracteur.

#### **IV.3. 1 Choix de la lame**

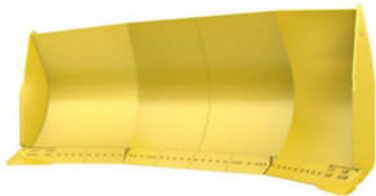
Une lame bulldozer équipé (vérins, bras, ...) pèse de 900 à 15000 kg. La largeur varie de 2,40 à 6,40 m pour une hauteur de 0,80 à 2,30 m. Il existe plusieurs types de lame suivant le travail à effectuer.

- **Lame U** – universelle - pour les gros travaux sur de grandes distances.
- **Lame S** - lame droite - facile à manœuvrer  
fournit une excellente force de pénétration.



## Chapitre IV : Engins de terrassement

- **Lame SU**, compromis entre les deux précédentes. Elle permet aussi le poussage d'un scraper.
- **Lame P** ou lame orientable (+ ou - 25°).
- **Lame C** spécialisée dans le poussage des scrapers.



Lame U



Lame S

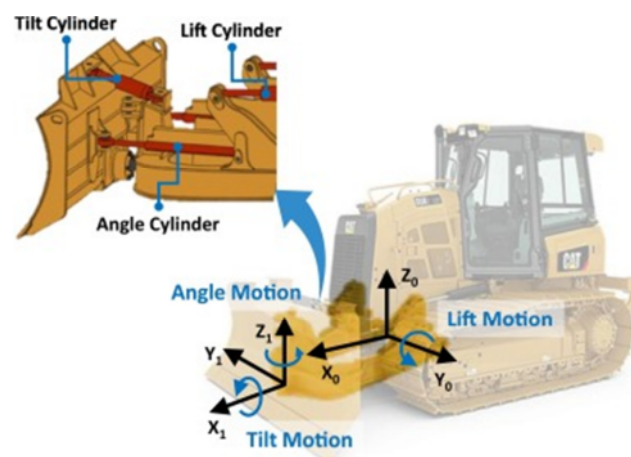


Lame C



Lame SU

**Figure 2** Types de lame bulldozer



**Figure 3** Différentes positions de la lame d'un bulldozer

## Chapitre IV : Engins de terrassement

Il faut se reporter aux recommandations des constructeurs pour choisir la lame à adapter au tracteur pour le type de travail à réaliser. Il faut prendre en compte: Le type de matériau à déplacer (taille, forme, compacité, humidité, ...) - Les possibilités du tracteur.

**Tableau 1** Type de lame utilisé dans les différents terrains

Type de travail	Lame			
	S	U	P	C
mise en tas, matériau léger	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	-
matériau normal	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>P</i>
matériau dur	<i>B</i>	<i>P</i>	-	-
excavation	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>P</i>	-
épandage	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	-
remblayage de tranchées	<i>B</i>	<i>E</i>	<i>E</i>	-
matériaux rocheux	<i>B</i>	<i>P</i>	-	-
prépa aire de travail	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	-
Construction de routes	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	-
dessouchage	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>P</i>	-
dérochement	<i>B</i>	<i>P</i>	<i>P</i>	-
poussage de scraper	<i>B</i>	<i>P</i>	-	<i>E</i>
débroussaillage	<i>E</i>	<i>P</i>	<i>B</i>	-

\* Aptitude au travail: E = excellente; B = bonne; P = passable.

### IV.3. 2 Calculs de la production

La production d'un bulldozer dépend du tracteur sur lequel il est monté et de la distance à parcourir. Par exemple, pour les lames S et U on peut utiliser les abaques ci-dessus.

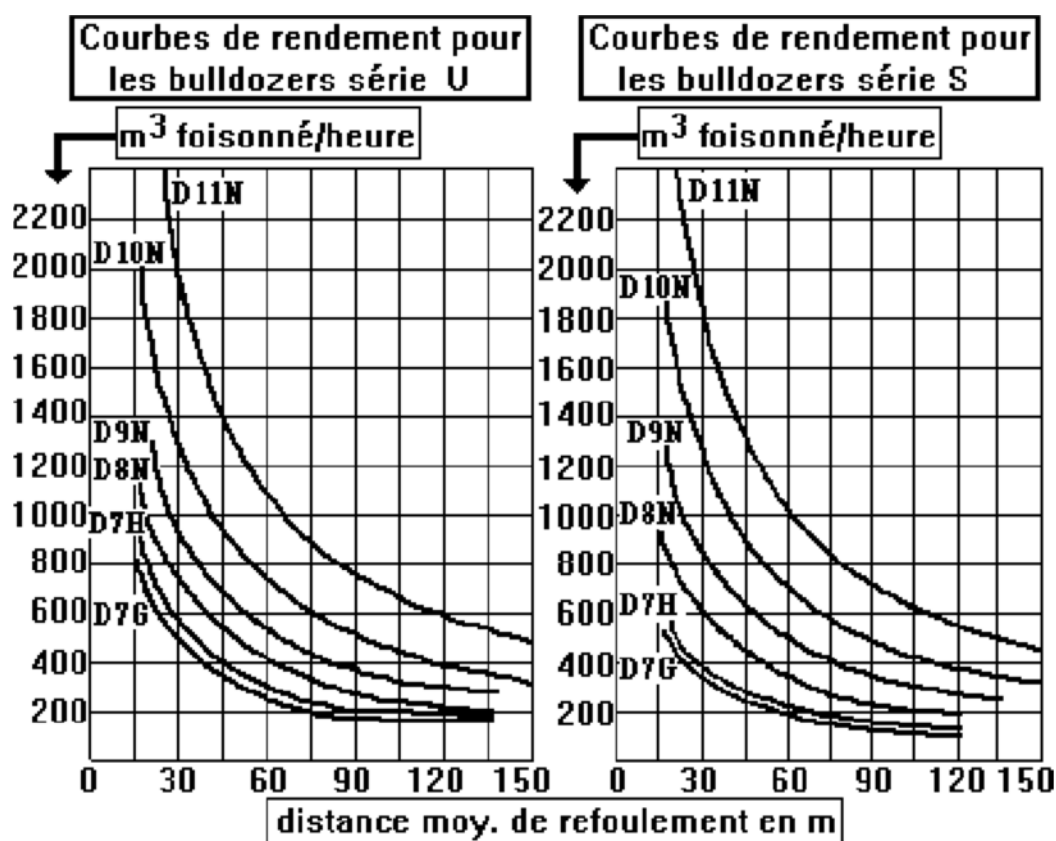


Figure 4 Types de calcul de rendement de Bulldozer

Le m<sup>3</sup> foisonné ainsi trouvé doit être pondéré par le produit des coefficients dépendants des conditions suivantes:

Tableau 2 Coefficient en tenant compte de différentes conditions

Conditions	tracteur à chaînes	tracteur à pneus
conducteur excellent	1	1
conducteur moyen	0,75	0,60
conducteur médiocre	0,60	0,50
matériaux en tas, foisonné	1,2	1,2
mat. difficile à couper	0,6 à 0,8	0,75
mat. dif. à refouler	0,8	0,8
roche fragmentée	0,6 à 0,8	-
visibilité mauvaise	0,8	0,7
efficacité 50 mn/h	0,83	0,83
efficacité 40 mn/h	0,67	0,67

Coefficient tenant compte de la pente:

+30% = 0,25; +20% = 0,5; +10% = 0,7; -10% = 1,2; -20% = 1,4; -30% = 1,6.

#### IV.4 Décapeuses ou "scraper"

Le scraper est un engin souvent impressionnant par sa taille. Il est capable d'excaver, de transporter et épandre des éléments du terrain à grande vitesse (jusqu'à 70 km/h).

C'est un engin qui peut se révéler dangereux à cause de sa vitesse de travail élevée alliée à un poids très important (jusqu'à 120 tonnes) qui lui confère une très grande inertie.

Cet engin assure les différentes phases de terrassement :

- Extraction / Chargement
- Transport
- Épandage.

Sa grande inertie alliée à une vitesse de déplacement importante en fait, ce sont des engins relativement dangereux sur le chantier.



(a)- Scraper automoteur



(b)- Scraper élévateur



(c)- Scraper push-pull

**Figure 5** Types de scrapers

### IV.5. Chargeurs ou chargeuses

Ces engins sont utilisés pour le chargement des matériaux.

Il ne faut pas les confondre avec les bulldozers qui ont une tout autre fonction. Ils existent sur pneus et sur chenille, leur choix dépend essentiellement du terrain.



(a)- Chargeuse sur chaine



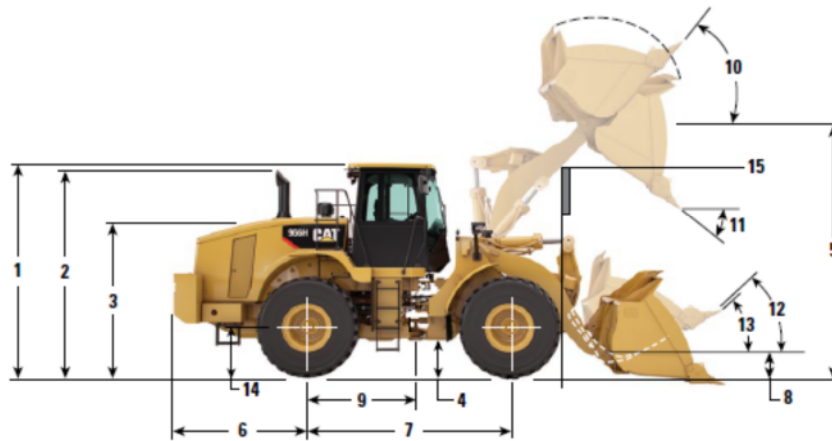
(b)- Chargeuse sur pneu

**Figure 6** Types de chargeuse

Les chargeuses sont des engins destinés à déplacer des matériaux sur de courtes distances (moins de 100 m) à l'aide d'un godet extrêmement mobile situé à l'avant. Elles sont généralement couplées à une noria de camions dont elles assurent le chargement.

#### IV.5.1 Chargeuses sur pneus

La plus grosse machine (992C) fait 5,50 m de haut pour 13,13 m de long. Son godet de plus de 10 m<sup>3</sup> permet de remplir un camion très rapidement. Les chargeuses sur pneus sont équipées de 3 à 4 vitesses dans chaque direction. Ces engins fournissant le même effort en marche avant qu'en marche arrière, les vitesses sont du même ordre de grandeur dans les 2 sens.



**Figure 7** Positions du godet sur chargeur à pneu

### **IV.5.2 Chargeuses sur chaîne**

Les chargeuses à chaînes sont moins puissantes que les chargeuses sur pneus. Elles sont moins maniables. Les chargeuses sur chenilles sont équipées de 3 rapports de vitesses en marche avant et en marche arrière.

#### **IV.5.2.1 Système de chargement**

#### **IV. 5.2.2 Les godets**

La capacité des godets varie de 0,8 à 10 m<sup>3</sup>. Pour travailler, ils sont équipés d'une lame.

Les 2 types de lame sont :

- à dents pour les travaux d'arrachage,
- lisses pour les matériaux meubles.

#### **IV. 5.2.3 Production d'une chargeuse**

Les abaques des constructeurs prévoient 2 cas de chargement du godet:

- à ras
- à refus (nominale).

Le choix de l'un ou l'autre mode de chargement dépend des capacités du conducteur et de la densité du matériau.

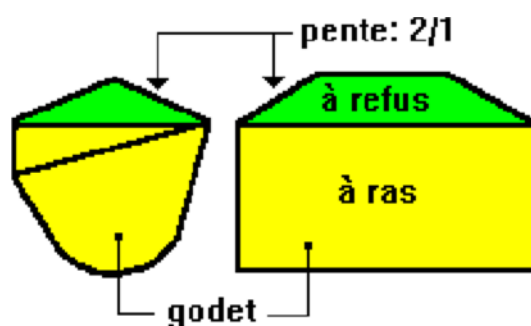


Figure 8 états de chargement d'un godet

### IV. 5.3 Chargeuses sur pneus

On estime que la durée moyenne d'un cycle est comprise entre 0,45 et 0,55 mn pour des distances de chargement pas trop importantes.

Un cycle comprend :

- le chargement ;
- une marche arrière, une marche avant ;
- le déchargement ;
- une marche arrière et une marche avant.

A ces temps moyens, il faut ajouter des temps qui dépendent des facteurs suivants :

Tableau 3 Facteur de chargement d'une chargeuse

Facteur	Temps en mn
matériau non homogène	+0,02
matériau de 3 à 20 mm	-0,02
matériau de 20 à 150 mm	+0,00
plus de 150 mm	+0,03
mal fragmenté	+0,04
mis en tas par bull	+0,01
mis en tas par camion	+0,02
camions et chargeuse de la même	-0,04
camions et chargeuse d'entreprises	+0,04
marche régulière du chantier	-0,04
marche irrégulière du chantier	+0,04

Il faut également tenir compte de l'efficacité du travail. Pour le calcul de la production, il suffit de connaître la capacité du godet, mais le type de matériaux traités influence son chargement. On peut prendre en compte les rendements volumétriques moyens suivants :

**Tableau 4** Facteur de rendement volumétrique d'une chargeuse

Type de matériaux	Rendement volumétrique
matériaux non tassés	
non homogène, humide	95-100%
homogène jusqu'à 3 mm	95-100%
de 3 à 9 mm	90-95%
de 12 à 20 mm	85-90%
plus de 24 mm	85-90%
matériau abattu à l'explosif:	
bien fragmenté	80-95%
moyen	75-90%
mal fragmenté	60-75%

### IV.5.3 Chargeuse à chaînes

Le calcul est légèrement différent du précédent. La durée du cycle comprend 4 étapes:

- temps de chargement
- temps de manœuvre
- temps de transport
- temps de vidage.

Le temps de chargement dépend du matériau:

**Tableau 4** Temps de chargement d'une chargeuse à chaînes

Matériaux	temps en mn
granulats uniformes	0,03 à 0,05
granulats mélangés, humides	0,04 à 0,06
terre végétale humide	0,05 à 0,07
terre, pierres, racines	0,05 à 0,20
rocheux ou agglomérés	0,10 à 0,20

- Temps de manœuvre est d'environ 0,22 mn plein gaz.
- Temps de transport dépend de la longueur du trajet (nul dans le meilleur des cas).
- Temps de vidage varie de 0,00 à 0,10 mn. Pour un camion, il est ramené de 0,04 à 0,07 mn.

### IV.6. Pelles hydrauliques

A l'aide d'un godet, elles arrachent des morceaux de terrain. Contrairement aux autres engins, elles ne se déplacent pas en travaillant. En fonction du montage du godet, une pelle peut travailler en butée ou en rétro.





(a)- Pelle bute



(b)- Pelle rétro



(c)- Pelleteuse chargeuse

**Figure 9** Types de Pelles hydrauliques

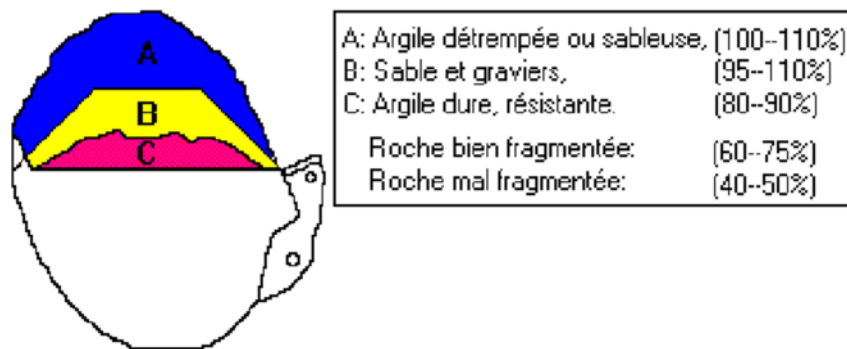
- La pelle « Retro », c'est le type le plus répandu. Le godet est ouvert vers l'intérieur de la flèche.
- La pelle « Bute », c'est un type de machine surtout utilisée en Allemagne. Le godet est ouvert vers l'extérieur de la flèche

#### **IV.6.1 Production d'une pelle hydraulique**

##### **6.1.1 Production moyenne**

Dans de bonnes conditions (conducteur moyen, roches fragmentées, rotation à 90°) un cycle de pelle hydraulique est estimé à 0,35 mn :

- chargement godet: 0,15 mn
- orientation chargée: 0,07mn
- vidage godet: 0,06 mn
- orientation à vide: 0,07 mn

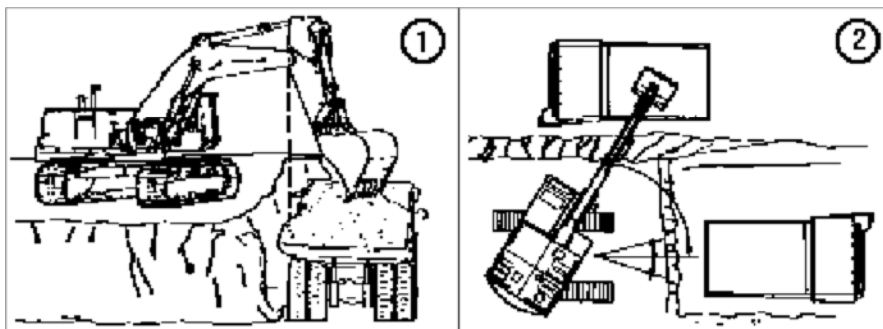


**Figure 10** Rendement volumétrique du godet

Connaissant le rendement volumétrique du godet en fonction du matériau travaillé, on peut en déduire la production horaire

#### IV.6.1.2 Amélioration du rendement

La façon de placer les camions lors du chargement peut améliorer de façon sensible la production d'une pelle



**Figure 11** Positions optimale de la pelle et des camions pour une production accrue.

(1) La hauteur de talus doit être approximativement égale à la longueur du bras. Le camion doit être placé de façon à ce que le bord intérieur de la benne coïncide avec la charnière flèche/bras.

(2) La machine doit restreindre sa zone de manœuvre de 15° de chaque côté de son centre de gravité. Les camions doivent être positionnés dans l'une ou l'autre des 2 positions indiquées ci-dessus.

### IV.7. Camions de chantier

Ils sont utilisés pour le transport des matériaux sur de grandes distances après chargement par chargeuse ou pelle hydraulique.

On distingue :

- Les tombereaux
- Les tombereaux articulés (image du bas)



(a)- Tombereau (Dumper)

(b)- Tombereau articulé

**Figure 12** Types de Tombereau

#### IV.7.1 Dumpers

Le dumper, de l'anglais to dump = déposer, est un engin de transport sur châssis monobloc à deux essieux équipé d'une benne arrière capable de transporter jusqu'à 100 m<sup>3</sup> de matériaux (177 t) à une vitesse de 51 km/h.

**Tableau 5** Quelques exemples de la gamme Caterpillar

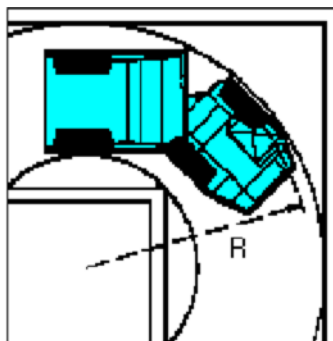
Type	Puissance [kW]	P. V. [t]	P.T.C. [t]	benne [m <sup>3</sup> ]	vit. max *[km/h]	ø ** [m]
769C	336	30.7	67.6	23.5	69	18.5
773B	485	38.7	92.5	34.1	61	23.5
785	963	93.9	230.4	78.2	56	30.5
789	1271	114.3	291.7	100	51	30.2

\* vitesse maximale en charge, \*\* rayon de braquage en m.

#### IV.7.2 Tombereaux articulés

Le tombereau est un engin construit sur la base d'un châssis articulé. La partie avant (le tracteur) comporte le moteur et la cabine montés sur un seul essieu. La partie arrière supporte une benne et repose sur un ou deux essieux. Ces engins peuvent transporter

jusqu'à 23 m<sup>3</sup> de matériaux (36 t) à une vitesse maximale en charge de 55,5 km/h. Les tombereaux articulés sont plus petits que les dumpers. Ils ont un rayon de braquage plus petit ce qui leur confère une meilleure manœuvrabilité.



**Figure 13** Rayon de braquage d'un tombereau articulé

**Tableau 6** Quelques exemples de la gamme Caterpillar

Type	Puissance [kW]	P. V. [T]	P.T.C. [T]	Benne [m3]	vit. max* [km/h]	ø **[m]
D25D	194	20	42.7	14	53	16.14
D30D	213	22.4	49.6	17	56	16.33
D350D	213	24.4	56.2	20.5	53	16.06
D400D	287	28	64.3	23.5	55	16.52

\* vitesse maximale en charge, \*\* rayon de braquage en m.

## IV.8. Niveleuses

La niveleuse est un engin de terrassement équipé d'une lame qui est utilisé pour les travaux de profilage ou reprofilage des chaussées en terre, de création de fossés plats ou cunettes, de décapage léger (faible épaisseur en terrain meuble). Elles sont utilisées régaler et régler les matériaux en couches d'épaisseur définie suivant une pente transversale imposée. Elles peuvent être équipées de petits rippers.

### IV.8.1 Quelques exemples de mise en œuvre à la niveleuse.

#### IV.8.1.1 Orientation de la lame

La lame peut s'orienter en fonction du travail à effectuer:

- Verticale pour un reprofilage ;
- Vers l'arrière pour décaper les surfaces dures ;
- Vers l'avant pour le réglage.

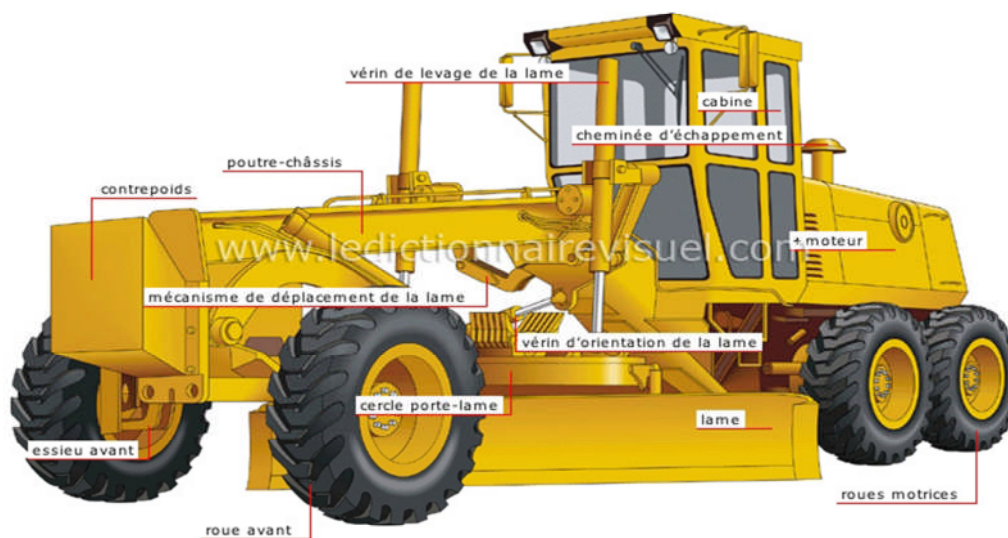


Figure 14 Description des parties d'une Niveleuse



Figure 15 Inclinaison de la lame en fonction du type de travail.

### 8.1.2 Profilage des fossés

La lame peut également s'incliner pour réaliser un fossé dont les 3 opérations importantes sont schématisées ici:

- (1) dégagement de la pente cotée chaussée
- (2) dégagement de la pente extérieure et refoulement de la terre,
- (3) écartement des déblais loin du fossé.

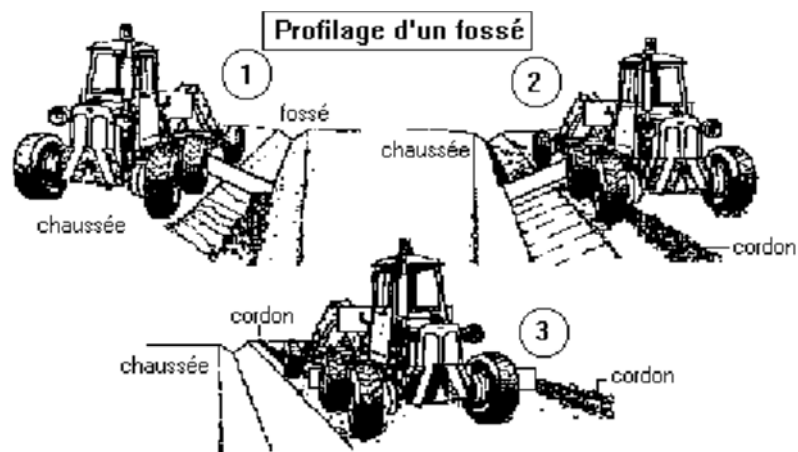


Figure 15 Profilage d'un fossé

#### IV.8.1.3 Création d'un cordon

Les matériaux décapés sont réunis en cordon en dehors de la chaussée par inclinaison de la lame.

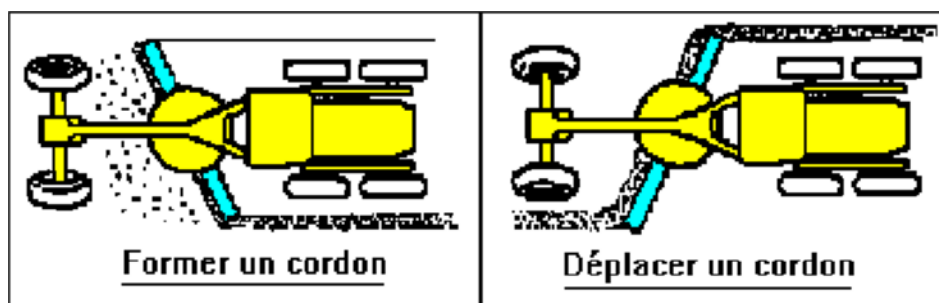


Figure 16 Formation d'un cordon de matériau

### IV.9. Compacteurs

Il existe de nombreuses catégories de compacteurs adaptés à différents types de travaux :

- Compactage des sols en place,
- Compactage de remblai ou couche de forme compactage d'enrobés
- Compactage de tranchées, etc.





(a)- Compacteur à pied de mouton



(b)- Compacteur à pied dameur



(c)- Compacteur vibrant monocylindre



(d)- Compacteur vibrant à 2 cylindres ou tandem



(e)- Compacteur à pneu



(f)- Compacteurs à rouleau à grille

**Figure 17** Types de compacteurs

Le compactage est le procédé physique utilisé pour accroître la densité d'un matériau, et par là même, sa capacité portante.

Trois facteurs importants affectent le compactage:

### 1. **Granulométrie**

Un meilleur compactage se fait lorsque la granulométrie est continue, laissant peu de vides dans le matériau. Lorsque tous les grains ont la même taille, il reste trop de vide entre eux.

### 2. **Humidité**

Le sol ne doit être ni trop humide, ni trop sec. En fait, la courbe PROCTOR donne l'humidité optimale.

### 3. **Effort de compactage**

Le compactage peut être appliqué de façon statique ou dynamique, par pétrissage, par chocs ou par vibration.

## **IV.9.1 Différents types de compacteurs**

Le choix du compacteur est en fonction du sol. Généralement Il existe 8 types de compacteurs : à pieds de mouton, à rouleau à grille, vibrant, à rouleau compacteur lisse en acier, à pneus multiples, à rouleau pneumatique lourd, à pieds dameurs tractés, à pieds dameurs à vitesse élevée.

### **IV. 9.1.1 Compacteur à pieds de mouton ou Tamping**

Il s'utilise dans l'argile et le limon. C'est un tracteur dont les roues en acier sont munies de pieds assurant le pétrissage du sol au moment de son compactage. Ce genre d'engin peut peser de 20 à 30 tonnes (Figure 17-a).

### **IV. 9.1. 2 Compacteur vibrant à pieds dameurs**

Il peut s'utiliser dans les gros et petits enrochements, les graves, le sable, limon et la craie. Sont rouleau vibrant est muni de pieds dameurs qui pétrissent le sol. Le cylindre peut développer jusqu'à 20 tonnes pour une machine de 18,5 T (Figure 17-b).

### **IV. 9.1.3 Compacteur vibrant monocylindre**

Il s'utilise dans le sable et le gravier. On l'utilise également dans les travaux de revêtement routier (couche de base, de roulement, ...). Son cylindre est animé d'un mouvement alternatif vertical par l'intermédiaire d'un excentrique. Il a une force équivalente pouvant dépasser 10 tonnes pour un engin qui ne pèse que 8,5 tonnes (Figure 17-c).



#### **IV. 9.1.4 Compacteur vibrant à 2 cylindres ou tandem**

Idem que le précédent mais avec 2 cylindres vibrants. L'engin pesant 9 tonnes peut développer l'équivalent de 11,8 tonnes par cylindre (Figure 17-d).

#### **IV. 9.1.5 Compacteur à pneumatiques**

Il s'utilise principalement dans les sables, les graves et le limon mais aussi pour les revêtements routiers. Les roues sont placées de telle sorte que les roues arrière passent exactement entre les traces des roues avant. Cet engin peut peser de 14 à 35 tonnes, suivant le lest utilisé (Figure 17-e).

#### **IV. 9.1.6 Compacteurs à rouleau à grille**

Ce compacteur a pour fonction de compacter le sol qui a une structure ou une forme rugueuse. Supposons que la terre soit mélangée à de grosses et petites roches qui nécessitent une égalisation. C'est parce que la forme des roues est conçue pour ressembler à la sangle comme sa fonction. Avec deux roues qui appartiennent à l'avant et deux roues à l'arrière. L'utilisation de ce compacteur est très efficace pour faire le travail (Figure 17-f).

## IV.10. Cycle de rotation d'engins

### IV.10.1 Introduction

Nous savons actuellement calculer de façon précise les volumes de remblais et/ou de déblais. Selon l'importance du chantier, le volume sera par conséquent plus ou moins grand. Si ce volume est du déblai, il faudra prévoir les moyens nécessaires afin d'évacuer les terres au mieux. De la même façon, si on est en présence de remblais, il faudra organiser l'acheminement des terres sur le chantier.

Nous pouvons imaginer que ce sont les engins de transport (camions, tombereaux) qui permettent le mouvement des terres sur des chantiers de terrassement.

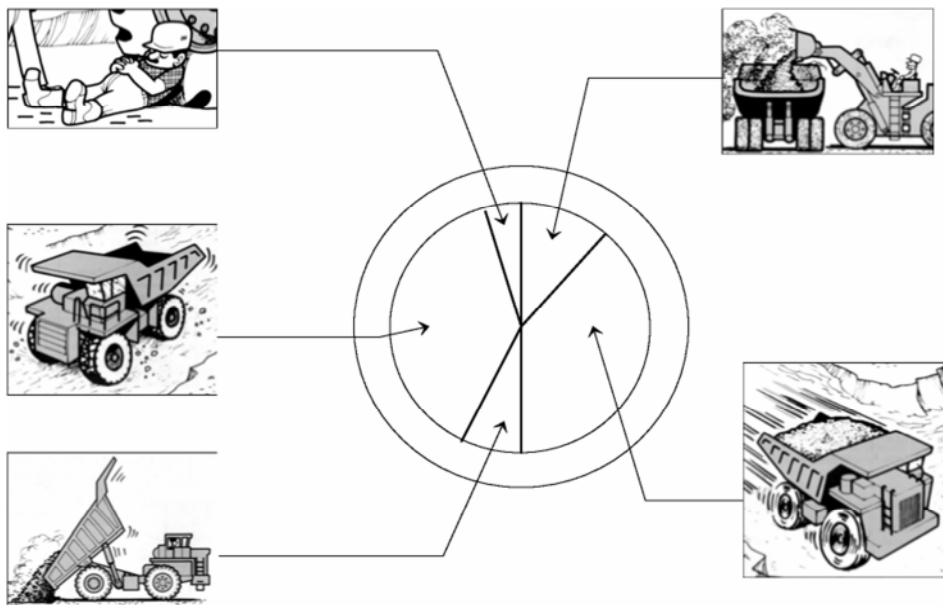
Dans la plupart des cas, les travaux de terrassement nécessitent plusieurs camions : il est donc facile de comprendre que sur un même chantier ceux-ci, par exemple, ne peuvent pas être remplis en même temps par la pelle.

**Il faut par conséquent organiser la rotation (ou noria) des camions afin de les utiliser au mieux.**

### IV.10.2 Cycle de travail

**La durée d'un cycle de production est le temps nécessaire pour exécuter un tour complet, pour une opération donnée.**

Pour estimer la durée d'un cycle, un simple chronométrage suffit. Un bon résultat est obtenu en faisant une moyenne sur quelques rotations. Un cycle est composé de plusieurs étapes ayant chacune une durée élémentaire que l'on peut représenter de la façon suivante :



**Figure 18** Cycle de travail

#### IV.10.2.1 Détail des différentes étapes

**Temps de chargement** est égal à la charge utile du camion divisée par (le rendement théorique de la pelle ( $m^3/h$ ) x coeff d'efficience x M volumique apparente foisonnée( $t/m^3$ )).

$$T_{ch} = \frac{\text{Charge utile (t)}}{\text{le rendement théorique de la pelle x coeff d'efficience x Mvolumique apparente foisonnée}}$$

ex : Une entreprise dispose d'une pelle sur chenilles de rendement théorique  $120m^3/h$ , de coefficient d'efficience 0,83 et de camions bennes de charge utile 26t. La masse volumique apparente foisonnée des matériaux est  $Mv = 1\,600kg/m^3$ .

Qu'est-ce que le coefficient d'efficience ?

Des imprévus dus à l'opérateur, à la marche du chantier ou de la machine diminuent le temps d'utilisation réel par rapport au temps d'utilisation théorique. Pour une heure (60min) de fonctionnement théorique, un engin travaillera effectivement, par exemple, 50min. Le coefficient d'efficience est  $k = 50/60 = 0,83$

$$T_{ch} = 26/(120 \times 0,83 \times 1,6) = 0,163 \text{ h}$$

**Temps de transport en charge** est égal à la distance du lieu d'emprunt au lieu de dépôt divisé par la vitesse en charge moyenne.

$$T_{tc} = \frac{\text{Distance aller (km)}}{\text{Vitesse moyenne (km/h)}}$$

ex : Les matériaux extraits sont déposés dans une décharge publique située à 12 km. La vitesse moyenne en charge est 30km/h.

$$T_{tc} = 12/30 = 0,40 \text{ h}$$

**Temps déchargement** dépend de l'encombrement, de l'espace disponible sur le chantier... et est donné forfaitairement.

ex : temps de déchargement : 5min

$$T_{dé} = 5/60 = 0,083 \text{ h}$$

**Temps de transport à vide** est égal à la distance du lieu d'emprunt au lieu de dépôt divisé par la vitesse à vide moyenne.

ex : vitesse à vide moyenne = 60 km/h

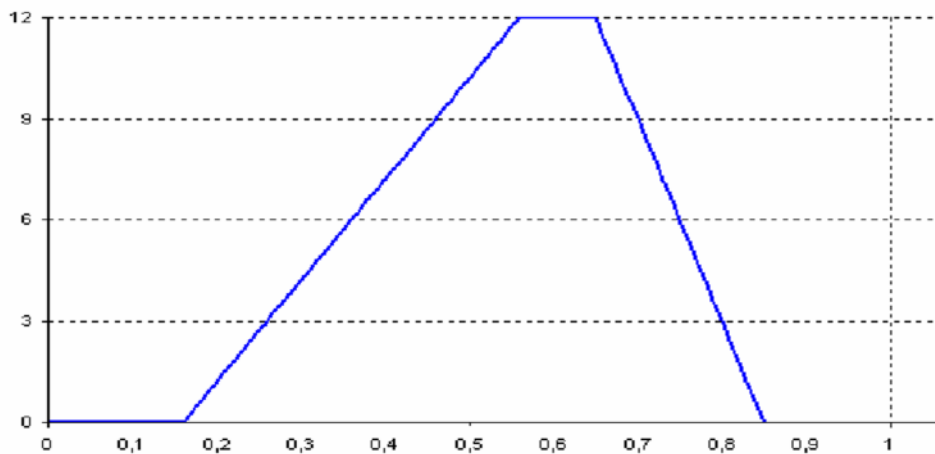
$$T_{tv} = 12/60 = 0,20 \text{ h}$$

### Récapitulatif

Éléments de cycle		Temps (h)
Chargement	T <sub>ch</sub> =	0,16
Transport en charge	T <sub>tc</sub> =	0,400
Déchargement	T <sub>dé</sub> =	0,08
Transport à vide	T <sub>tv</sub> =	0,200
<b>Durée de cycle</b>	T <sub>cy</sub> =	<b>0,84</b>

$$T_{cy} = 0,84\text{h donc en minute } T_{cy} = 0,84 \times 60 = 50,4\text{min}$$

### 2.3 Représentation graphique d'un cycle de camions



### Nombre de camions

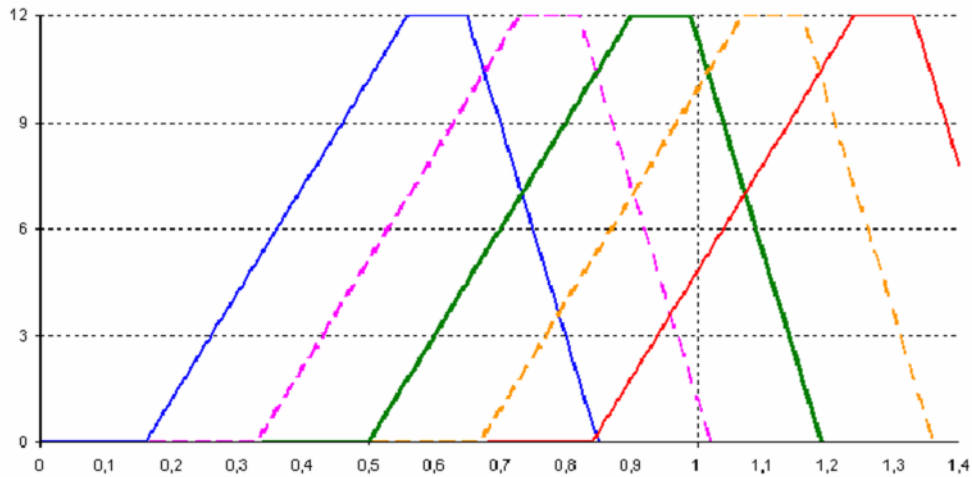
Le nombre de camions à affecter à l'engin d'excavation est égal au temps de cycle d'un camion divisé par son temps de chargement.

$$\text{Donc } n = 0,84/0,16 \text{ soit } n = 5,25 \text{ camions}$$

Conclusion : Nous avons le choix de prendre 5 ou 6 camions.

Nous allons montrer graphiquement que le choix d'une solution ou d'une autre entrainera obligatoirement l'attente d'engin ou d'un autre.

• Cas ou on prend 5 camions :

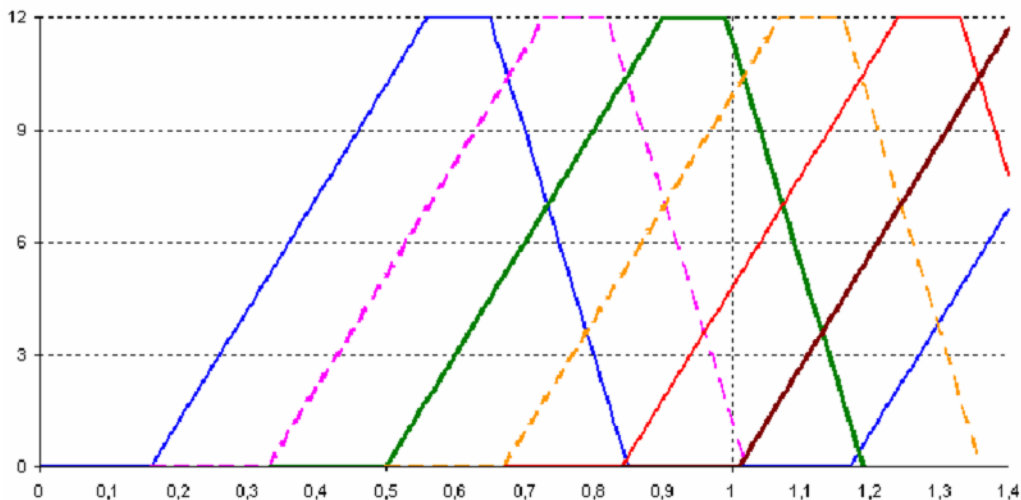


On s'aperçoit que le 5<sup>ème</sup> camion a fini de charger alors que le 1<sup>er</sup> n'a pas encore terminé son 1er cycle : cela veut dire que la pelle va être obligée d'attendre.

**Temps d'attente de la pelle =  $T_{cy} - n \times T_{ch}$**  Temps d'attente de la

pelle =  $0,84 - 5 \times 0,16 = 0,04h$  soit 2,4min.

• Cas ou on prend 6 camions :



On s'aperçoit que le 1<sup>er</sup> camion est déjà revenu alors que le 6<sup>ème</sup> n'a pas encore terminé son chargement : cela veut dire que le premier camion, ainsi que les suivants désormais, va être obligé d'attendre.

**Temps d'attente du camion =  $n \times T_{ch} - T_{cy}$**  Temps d'attente du camion =  $6 \times 0,16 - 0,84 = 0,12h$  soit 7,2 min

**Exercice**

Votre entreprise vient de décrocher un chantier de terrassement dont le volume de déblais en place est estimé à 3820,000 m<sup>3</sup>.

## Chapitre IV : Engins de terrassement

On vous demande d'organiser la rotation de camions qui vont effectuer le transport de ces matériaux. Pour cela, vous bénéficiez des renseignements de l'entreprise suivants :

- Chargeur pour le remplissage des camions:

- rendement: 60,000 m<sup>3</sup> par heure en terrain foisonné.
- Efficience: 50/60.

- Masse volumique apparente du terrain: 1,50 t/m<sup>3</sup>.

- Coefficient de foisonnement du terrain considéré: 20%.

- Temps de déchargement des camions:

- Semi-remorque: 0,25 min par m<sup>3</sup> transporté.

- **Temps de travail journalier: 7 heures par jour MAXIMUM.**

- **Les camions partent du chantier le matin et retournent à celui-ci le soir à la débauche.** Les matériaux doivent être évacués à une décharge publique située à 20km du chantier.

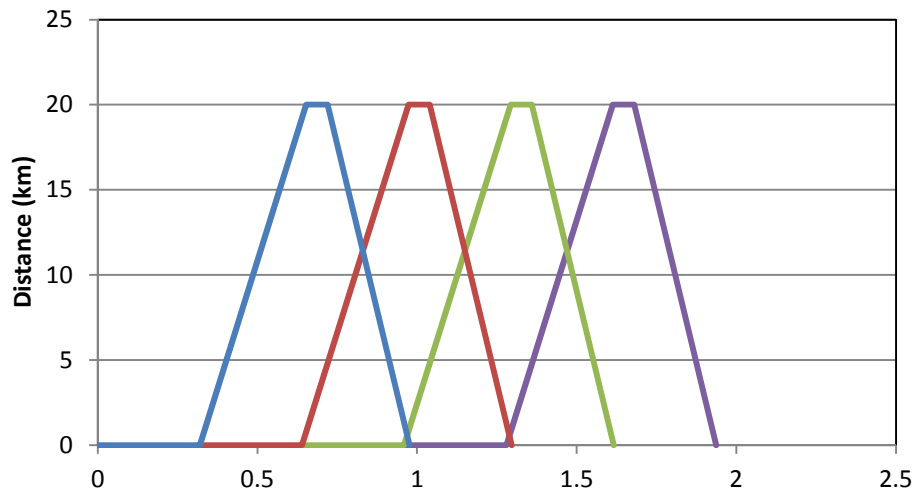
Types camions	Capacité (en m <sup>3</sup> )	Charge utile (en tonnes)	Vitesses (km/h).	
			chargé	vide
Semi-remorque	16	24	60	78

1. De calculer la durée de cycle d'un camion.
2. De calculer le nombre de camions nécessaires.
3. De tracer sur un planning le cyclage journalier des camions retenus.
4. De calculer la durée du chantier

### Solution

<b>Tch</b>	0.32	h
<b>Ttc</b>	0.3333333	h
<b>Tdé</b>	0.0666667	h
<b>Ttv</b>	0.2564103	h
<b>Tcy</b>	0.9764103	h
<b>Nombre de camions</b>	3.0512821	h

## Chapitre IV : Engins de terrassement



<b>Nombre de camions</b>	4	3
<b>Temps d'attente de la pelle (h)</b>	-0.30359	0.01641026
<b>Temps d'attente du camion(h)</b>	0.3035897	-0.0164103

<b>Volume total</b>	4584	<b>m3</b>
<b>Nombre de cycle par jour (1)</b>	7.1691176	
<b>Nombre pour 3 camions</b>	21.507353	
<b>Volume par jour</b>	344.11765	<b>m3</b>
<b>Durée de chantier</b>	13.32	<b>jours</b>

## Cycle de rotation d'engins



**Chapitre V :**

**Terrassements à l'explosif**

## Chapitre V : Terrassements à l'explosif

### V.1. Introduction

Bien qu'habituellement considérée comme faisant partie de "l'art du mineur", l'utilisation des explosifs doit être connue des maîtres d'œuvre, même si leur mise en œuvre finale reste du domaine du spécialiste. Il apparaît donc important que les maîtres d'œuvre ayant à charge la conception d'un projet et le suivi de travaux à l'explosif possèdent des notions de base sur les mécanismes de l'abattage, les produits utilisés et leur mise en œuvre. Le but de ce chapitre est de présenter ces notions pour permettre à chacun d'amorcer le dialogue avec les spécialistes. Tous les paramètres utilisés pour dimensionner un tir concourent au résultat de l'abattage dont l'objectif principal reste la fragmentation contrôlée du massif rocheux ou la réalisation d'un ouvrage rocheux. Le plan de tir représente le document fondamental qui fixe l'ensemble de ces paramètres et notamment :

- les caractéristiques géométriques de la formation, - la nature, les quantités et la répartition des explosifs dans chaque trou, - la nature des artifices d'initiation,
- la séquence d'amorçage. Il est important de noter qu'un plan de tir prévisionnel ne peut s'appliquer de manière rigide et définitive. Le cas échéant, il devra être modifié pour s'approcher au plus près du résultat souhaité. Dans les travaux routiers, où chaque déblai ne représente pas toujours un volume important, il faudra suivre avec attention les résultats des premiers tirs et réagir rapidement si des modifications s'imposent [9].

L'explosif a les caractéristiques suivantes :

Un **explosif** est une substance ou un mélange de substances susceptibles de se décomposer très rapidement, par réaction chimique, en libérant brutalement une grande quantité d'énergie.

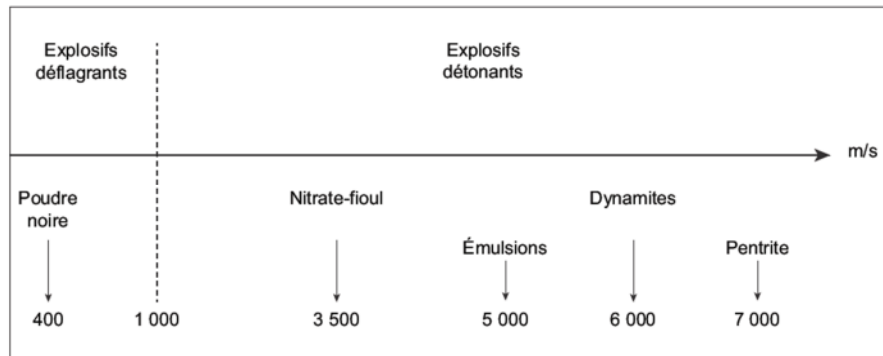
La **puissance d'un explosif** est proportionnelle à la **vitesse** à laquelle cette décomposition se produit. La vitesse détermine le régime normal de la décomposition de l'explosif. Elle permet de classer les explosifs en deux catégories :

**Explosifs déflagrants**, appelés aussi « **poudres** », se décomposent à une vitesse inférieure à 1 000 m/s et dont le plus connu est la poudre noire comprimée (400 m/s). La propagation de la réaction se fait par conductivité thermique.

**Explosifs détonants**, conventionnellement appelés « **explosifs** », dont la vitesse de décomposition est supérieure à 1 000 m/s. Ce sont les dynamites, les explosifs nitrates (nitrates fiouls, gels et émulsions). L'énergie d'un explosif détonant libérée au moment de l'explosion se manifeste sous deux formes :

**Énergie de choc** véhiculée par une onde de choc qui se déplace au sein de la charge et qui est transmise au milieu environnant ;

**Énergie de gaz** engendrée par le dégagement d'un important volume de gaz à très haute température et pression. Dans un trou de mine, l'onde de choc sur son passage fissure le terrain, et les gaz sous pression ouvrent ces fissures et disloquent le matériau.



**Figure 1.** vitesse détonation selon le type d'explosif.

## V.2. Action de l'explosif

Lorsqu'une charge détone dans un massif rocheux, l'énergie libérée se manifeste sous deux formes successives :

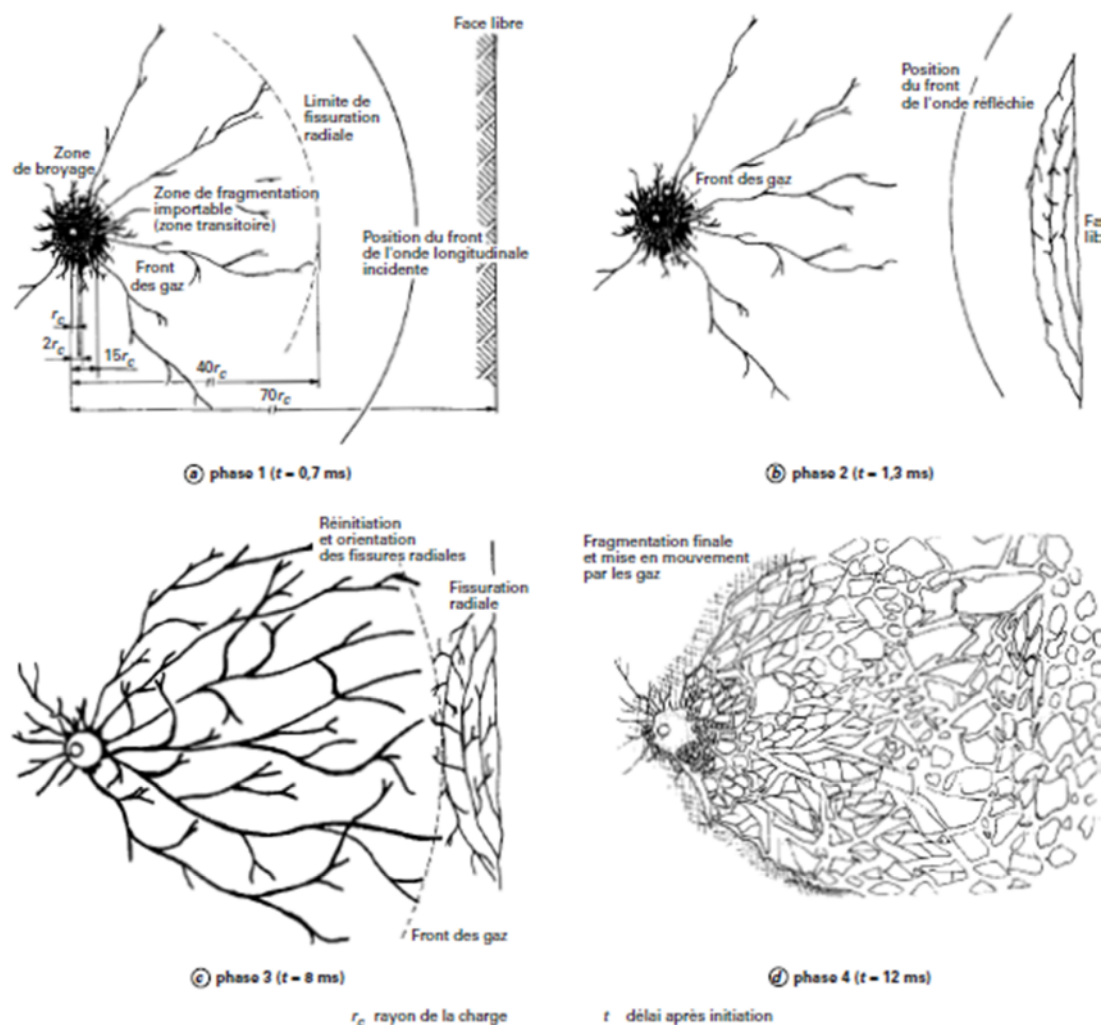
- une onde de choc initiale qui génère une contrainte en compression transmise dans le massif rocheux ;
- la libération à très haute pression et température d'un volume important de gaz.

### V.2.1 Effets de l'onde de choc

L'onde de choc s'accompagne, lors de sa propagation, de phénomènes irréversibles qui peuvent être répartis en trois zones successives à partir de la charge (figure 2)

- La zone de broyage, dont le rayon est de l'ordre de 3 à 5 fois le rayon de la charge, on les contraintes très élevées (400 à 7500 MPa) excèdent la résistance en compression de la roche (RC de 50 à 200 MPa). La roche est totalement détruite dans cette zone.
- La zone de fissuration radiale qui correspond à l'action de la contrainte tangentielle en traction. Dans cette zone la roche présente une fissuration en étoile centrée sur la charge (figure 2). Son extension dépend de la résistance en traction de la roche et peut atteindre plusieurs mètres.
- La zone sismique, qui correspond aux zones sollicitées à un niveau de contrainte inférieur à la résistance de la roche, mais susceptible d'affecter les discontinuités [10].

Lorsque cette onde de choc rencontre une discontinuité (surface libre ou fracture à l'intérieur du massif), elle se scinde en une onde transmise et une onde réfléchi qui sollicite la roche à nouveau en traction. Compte tenu de la relative faiblesse de la résistance en traction de la roche ( $R_t$  de 2 à 20 MPa), on observe une fissuration parallèle au plan d'onde appelée "écaillage" (figure 2).



**Figure 2.** Effet de l'onde de choc et évolution des contraintes induite par le tir.

### V.2.2 Effets des gaz

Les gaz issus de l'explosion pénètrent dans les fissures créées par l'onde de choc ou déjà existantes dans le massif et les prolongent puis mettent en mouvement les blocs. Ces gaz sont responsables en atteignant une surface libre, des projections ainsi que de l'onde de surpression aérienne et notamment du bruit associés au tir.

### V.2.3 Importance relative des deux types d'énergie libérée

L'énergie de choc, libérée en premier affaiblit le massif. L'importance de ce travail, difficile à évaluer, dépend de la brisante de l'explosif, de la capacité du massif à transmettre les vibrations. Ce phénomène est fondamental dans le bon fonctionnement du mécanisme de fragmentation de la roche et montre l'intérêt de ménager de surfaces libres pour favoriser le travail de l'explosif.

On estime qu'en réalité 5 à 20 % seulement des énergies mises en œuvre sont utilisées dans la fragmentation du massif. L'adaptation du type d'explosif au massif et la qualité de sa mise en œuvre jouent un rôle fondamental dans la réussite d'un tir. On peut retenir qu'en général, les énergies de gaz sont toujours largement suffisantes et que l'on a intérêt à rechercher le maximum d'énergie de choc pour assurer la fragmentation.

Il faut, dans tous les cas, chercher à optimiser l'efficacité du "premier concasseur" qu'est l'explosif pour :

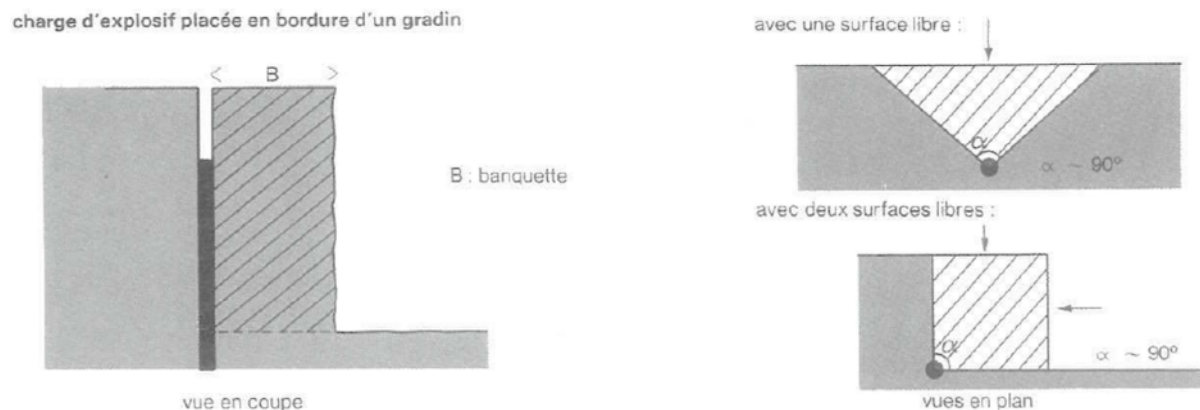
- optimiser la granularité d'abattage (remblai, couche de forme, enrochements, granulats...);
- réduire l'utilisation de brise roches hydraulique ;
- améliorer le temps de chargement des matériaux abattus ;
- limiter l'usure des matériels de chargement ou de transport.

### V.2.4 Mécanisme de l'abattage

Les effets recherchés de l'explosif sur un massif rocheux sont :

- l'arrachement de la base du gradin ;
- la dislocation de la partie supérieure.

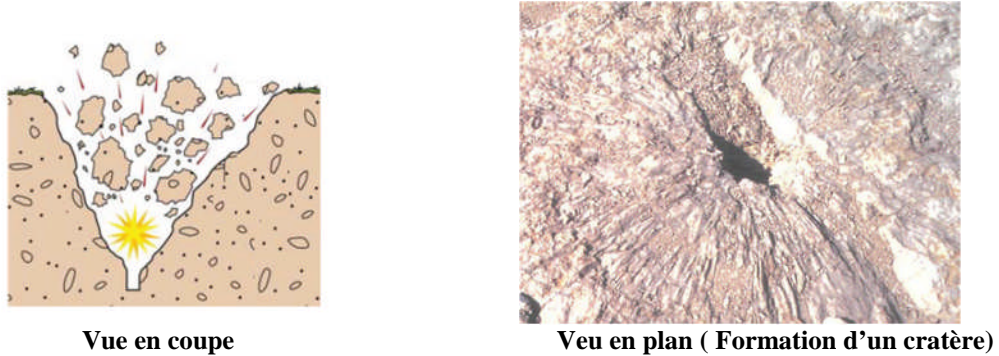
L'énergie nécessaire à l'arrachement de la base (charge de pied) est plus importante que celle permettant la fragmentation de la partie supérieure (charge de colonne). Cela se traduit généralement par l'usage d'explosifs plus performants à la base du trou de mine (figure 3).



**Figure 3.** Action de l'explosif sur une mine d'abattage classique

L'action d'une charge est différente selon sa position vis-à-vis de la ou des surfaces libres. On peut retenir que les fissures ont tendance à se propager vers la surface libre la plus proche. Dans la configuration de la figure 4, la seule surface libre est la plate-forme supérieure, imposant des tirs peu profonds et générant un mauvais rendement énergétique de l'explosif. Pour limiter ces inconvénients, il convient de concevoir un phasage de mise à feu du tir permettant la création de surfaces libres à proximité de chaque trou avant sa détonation.

C'est le rôle de la séquence de tir. Le décalage entre les charges permet de créer des surfaces libres qui bénéficient à la charge suivante.



**Figure 4.** Action d'une charge d'explosif dans un massif rocheux

### V.2.5 Cas particulier du découpage

La technique du découpage a pour but de favoriser la création d'une fissure dans un plan prédéfini comportant des forages coplanaires espacés d'environ 10 fois le diamètre du trou.

Ce plan de foration présentant des trous rapprochés privilégie la formation d'une fissure reliant les différents trous (figure 5).



**Figure 5** Découpage vu en surface. *La mise à feu d'un explosif approprié à l'intérieur de plusieurs trous rapproché et coplanaires permet d'obtenir une fissure de découpage.*

Deux théories peuvent s'envisager pour expliquer ce phénomène :

- Une approche "dynamique" qui trouve son origine dans l'interaction des ondes de contrainte développées par des trous de mine détonant simultanément. C'est le cas lorsqu'on utilise un explosif brisant, type cordeau détonant.
- Une approche "quasi statique" liée pour l'essentiel à l'action des gaz et qui suppose la formation d'une fissure et sa propagation sous l'action des gaz. Cette théorie ne

nécessite pas la simultanéité de détonation des charges pour être applicable. Dans la pratique, il est vraisemblable que les deux phénomènes interviennent dans le découpage, le choix de l'explosif favorisant une action plutôt qu'une autre.

### **V.3. Explosifs et les dispositifs d'amorçage**

#### **V.3.1 Les explosifs**

Un explosif est un corps ou un mélange de corps chimiques susceptibles de se décomposer très brutalement en libérant une onde de choc et un volume important de gaz à hautes pression et température. Il est difficile de caractériser simplement un explosif dont les performances vont dépendre des conditions de mise en oeuvre, de la qualité de l'amorçage et de la stabilité du produit lui-même dans le temps. Ces produits font l'objet de fiches techniques précisant leurs principales caractéristiques vis-à-vis d'essais normalisés ne reproduisant pas toujours les conditions de chantier. Ces principales caractéristiques sont :

##### **V.3.1. Vitesse de détonation**

C'est la vitesse à laquelle se propage la réaction de décomposition dans l'explosif.

On différencie :

- les explosifs déflagrants dont la vitesse de détonation très faible ( $\leq 1000$  m/s) ne produit pas d'onde de choc. La poudre noire, très peu utilisée, est l'exemple type de ces produits,
- les explosifs détonants utilisés en TP qui libèrent une énergie de choc généralement proportionnelle à leur vitesse de détonation supérieure à 2000 m/s. En réalité, elles varient en fonction des conditions de mise en oeuvre et d'amorçage, dans des proportions importantes pouvant aller jusqu'à la simple déflagration.

##### **V.3.2. Diamètre critique**

Le diamètre critique correspond au diamètre de la charge au-dessous duquel l'explosif n'est plus capable de détoner de manière fiable. Il varie d'environ 20 mm pour les dynamites à près de 100 mm pour certains nitrates fioul alourdis.

##### **V.3.3. Sensibilité à l'amorçage**

La sensibilité à l'amorçage d'un explosif définit la puissance minimale du système d'amorçage (détonateur, bousteur, cartouche d'explosif...) nécessaire pour initier la détonation de la charge dans des conditions optimales de sécurité et d'efficacité.

##### **V.3.4. Densité**

Il convient de distinguer :

- la densité des produits qui varie de 0,80 pour le nitrate-fioul à 1,5 pour les dynamites, qu'il est important de prendre en compte, notamment en présence d'eau dans les trous à charger ;

- la densité de chargement qui, rapportée au volume du trou de mine, conditionne la masse d'explosif que l'on peut placer dans un volume donné.

### **V.3.5. Énergie spécifique**

L'énergie spécifique représente la quantité énergie libérée par un kilogramme d'explosifs, mesuré à partir d'essais normalisés ou calculé théoriquement à partir des formulations des produits. On différencie les énergies de choc et de gaz. L'énergie totale libérée varie de 2 à 5 MJ/kg en fonction des produits.

### **V.3.6. Résistance à l'eau**

Il s'agit d'une appréciation du comportement du produit en présence d'eau qui va de "résistance nulle" pour les nitrates fioul à "très bonne" pour les dynamites.

## **V.4. Principaux explosifs**

### **V.4.1. Dynamites**

Les dynamites contiennent de la nitroglycérine et du nitroglycol (antigel) qui sont des liquides explosifs imbibant un comburant (nitrate d'ammonium) et un combustible (papier, farine de bois...). Elles sont uniquement utilisées en cartouches. Les dynamites se caractérisent par :

- une densité  $\geq 1,25$  et un diamètre critique faible ( $\approx 25$  mm),
- une vitesse de détonation élevée ( $\approx 5000$  à  $6000$  m/s),
- une énergie de choc très élevée ( $\approx 2,5$  MJ/kg),
- une bonne sensibilité à l'amorçage (détonateur),
- une très bonne résistance à l'eau.

### **V.4.2. Nitrates fioul**

Les nitrates fioul sont composés de granules de nitrate d'ammonium ( $\approx 94$  %) et de fioul ( $\approx 6$  %). Ils sont utilisables en vrac et compensent leurs performances relativement modestes par un excellent remplissage du trou. Ils se caractérisent par :

- une densité faible  $\leq 0,9$  et un diamètre critique voisin de 40 mm,
- une énergie de gaz relativement élevée ( $\approx 2$  MJ/kg) pour une énergie de choc faible,
- une vitesse de détonation théorique comprise entre 3000 et 3500 m/s dépendant du diamètre des forages et de la qualité de l'amorçage,
- une sensibilité faible à l'amorçage nécessitant une charge amorce ou un bousteur voire un cordeau détonant,
- une résistance nulle à l'eau.



### V.4.3. Les émulsions

Les émulsions sont un mélange :

- de nitrate d'ammonium en solution aqueuse,
- d'une matrice liquide à base d'huile et d'émulsifiant,
- d'un sensibilisant constitué d'une solution chimique gazéifiante ou de micro-billes de verre.

. Elles se caractérisent par :

- une densité supérieure à 1 et des diamètres critiques voisins de 25 mm,
- des vitesses de détonation théoriques voisines de 5000 m/s variables en fonction du diamètre des cartouches,
- une bonne sensibilité à l'amorçage,
- une bonne résistance à l'eau.

### V.5. Dispositifs d'amorçage

Les explosifs sont des substances dont la décomposition ne s'opère que sous l'effet d'un amorçage apportant l'énergie nécessaire à l'initiation de la réaction chimique. La chaîne d'amorçage comprend le dispositif de mise à feu (exploseur classique, séquentiel ou électronique...) les dispositifs d'amorçage (détonateurs électriques, détonateurs non électriques de type Nonel, électroniques, cordaux détonants, bousteurs...) et les charges d'explosif.

#### V.5.1. Exploseur

L'exploseur est en pratique un générateur de courant associé à un condensateur dont la décharge fournit le courant électrique nécessaire à l'allumage des détonateurs électriques. Ses caractéristiques dépendent du type et du nombre de détonateurs.



**Figure 6** Exploseur

## V.5.2. Détonateurs

Les détonateurs sont composés, quel que soit leur type :

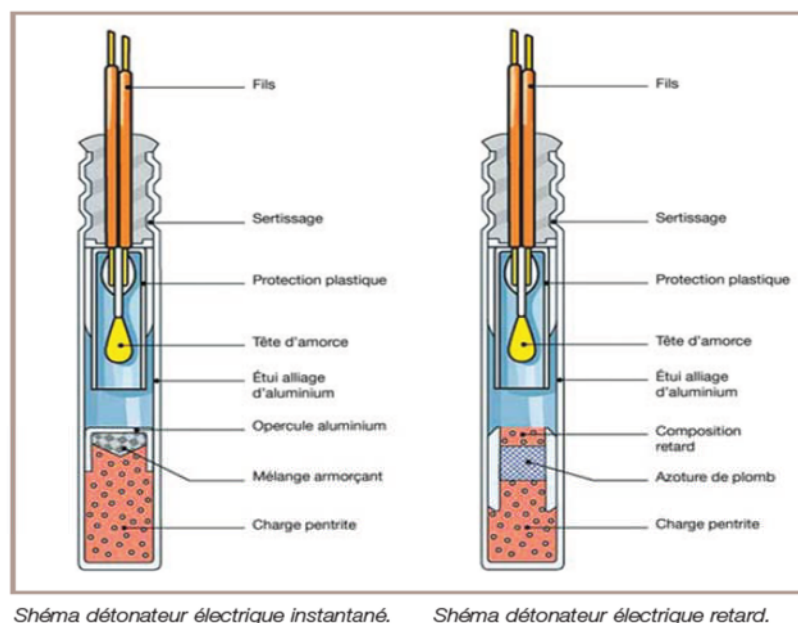
- d'un dispositif d'allumage thermique ou de choc,
- d'un système de retard éventuel,
- d'un explosif primaire très sensible,
- d'un explosif secondaire (0,6 à 0,8 g de pentrite en général) amorcé par l'explosif primaire et apportant une énergie de choc suffisante pour amorcer la décomposition des explosifs du tir.

### V.5.2.1 Détonateurs électriques instantanés

Ils sont constitués d'un tube en aluminium ferme à l'une de ses extrémités et serti à l'autre sur un bouchon en matière plastique laissant passer deux fils électriques appelés « tiges » de longueur variable (en général 4 ou 6 m). A l'intérieur du tube, ils sont constitués d'une charge détonante identique à celle des détonateurs à mèche et d'une tête d'allumage constituée d'un filament relié aux deux fils électriques et enrobé d'une poudre d'allumage. Lorsque le courant est envoyé dans le circuit de tir, le filament rougit, enflamme la poudre d'allumage et le détonateur explose. Ce type de détonateur est appelé détonateur électrique instantané, car il explose dès que la tête s'enflamme, cette dernière étant à proximité de la charge détonante.

### V.5.2.2 Détonateurs électriques à retard

Lorsqu'une volée comportant un grand nombre de mines est tirée, il est intéressant d'échelonner les explosions afin d'obtenir une meilleure fragmentation du rocher et de réduire les vibrations dans le sol. Cela est possible grâce à l'utilisation de détonateurs électriques à retard. Ceux-ci comprennent, entre la charge détonante et la tête d'allumage, un cordon de poudre retardatrice qui brûle à une vitesse bien déterminée. Lorsque la tête s'enflamme, elle met le feu au cordon de poudre retardatrice et le détonateur n'explose que lorsque le cordon est entièrement consumé. Plus le cordon est long, plus le retard est important. Ce retard est indiqué par un numéro inscrit sur une petite plaquette sertie sur les tiges du détonateur.



**Figure 7** Détonateurs électrique instantanée et à retard

### V.5.2.3 Détonateurs électroniques

Les détonateurs électroniques sont constitués de trois systèmes : électronique, électrique et pyrotechnique.

**Le système électronique** : c'est un circuit électronique qui remplit les fonctions suivant :

- réception, compréhension et exécution des ordres provenant des consoles de tir et/ou de programmation ;
- acquisition et stockage de la numérotation d'ordre du détonateur ;
- acquisition et stockage de la date de détonation ;
- stockage de l'énergie nécessaire pour demeurer autonome pendant la phase de tir ;
- stockage de l'énergie nécessaire à la mise à feu de la tête d'amorce ;
- gestion du retard programme ;
- ouverture du circuit d'initiation du système électrique ;
- déclenchement de l'ordre de mise à feu à la date de détonation programmée.

**Le système électrique** : il est analogue à celui du détonateur électrique. La perle d'allumage est reliée à un condensateur destiné à emmagasiner l'énergie électrique de mise à feu. Il est placé en aval du circuit électronique.

**Le système pyrotechnique** : il est analogue à celui du détonateur électrique.

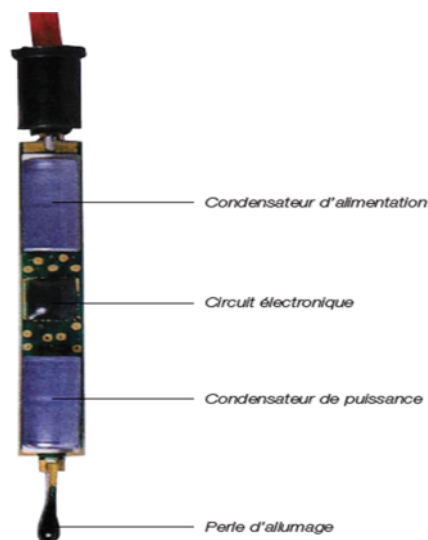


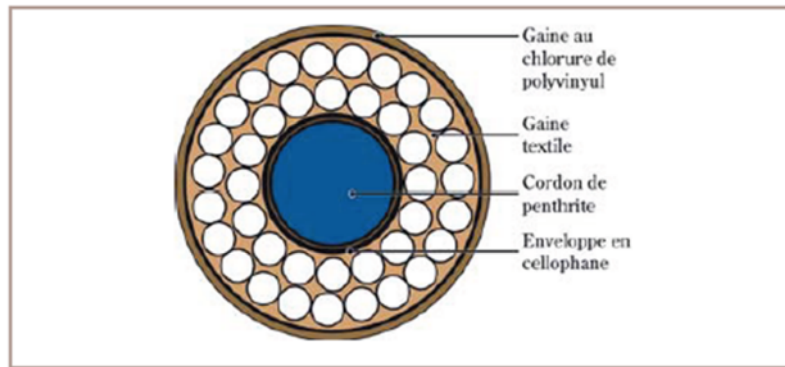
Figure 8 Détonateurs électronique

### V.5.3. Cordeaux détonants

Ils sont constitués d'un cordon d'explosif très puissant (la penthrite) enveloppé d'une gaine de textile elle-même enrobée d'un revêtement plastique. Leur vitesse de décomposition est de l'ordre de 7 000 m/s.

Il existe trois types de cordeau détonant :

- le cordeau détonant de transmission de 3 à 6 g/m. Il sert à transmettre une détonation en surface ;
- le cordeau détonant d'amorçage de 10 à 25 g/m. Il sert à initier des explosifs ;
- le cordeau détonant à forte charge de 30 à 100 g/m. Il sert aux techniques de découpage. Des cordeaux à l'hexogène servent à couper des métaux.



**Figure 8** Schéma d'un cordeau détonant

#### V.5.4. Bousteurs

Il s'agit de dispositifs chargés d'explosifs denses à haute vitesse de détonation. Ils sont destinés à amorcer les explosifs peu sensibles et doivent être initiés par un détonateur. Il est en général constitué par une enveloppe en carton ou en matière plastique, contenant un ou plusieurs explosifs puissants : pentrite, pentolite, hexolite, etc. Il est muni d'un logement destiné à recevoir le détonateur et ses fils, ou un brin de cordeau détonant.



**Figure 9** Bousteur (Booster)

#### V.6. Plan de tir

Le plan de tir est un document qui contient toutes les informations sur la position des trous et leur écartement, les charges, l'amorçage et les retards. Sa conception prend en compte les grands principes du travail de l'explosif dans la roche (adaptation explosive/massif) afin d'optimiser l'énergie transmise à ce milieu et de créer des surfaces libres permettant la réflexion des ondes favorisant la fissuration.

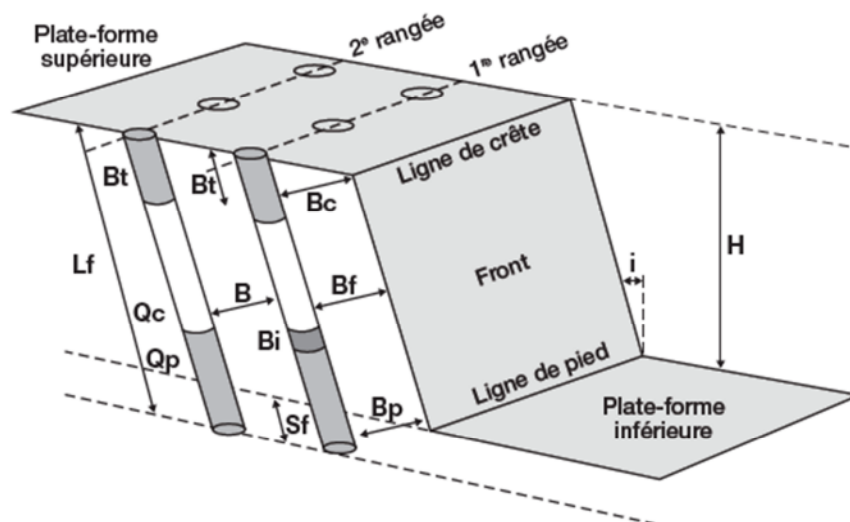
##### V.6. 1. Bourrage

Lorsque la charge est introduite, le trou de mine doit être bouché afin de garantir un bon rendement des explosifs. Ce bouchon va permettre de réduire les projections ainsi que le bruit. Le bourrage est obligatoire. Les matériaux utilisés doivent avoir une consistance suffisante pour résister à la pression dans le trou au moment du tir.

Le bourrage terminal Bt, qui permet de confiner la charge, est défini par la relation :

$$B_t = B$$

Il peut être réduit à 0,5 B dans le cas d'amorçage fond de trou.



**Figure 10** Vocabulaire du plan de tir.

$\phi$  diamètre de foration ; Bt bourrage terminal; Lf longueur de foration; Bi bourrage intermédiaire ;i inclinaison ; E espacement entre trou ; Sf surforation ; H hauteur du front ;B banquette nominale ; E.B maille nominale ;Qp banquette en pied ; Qp charge de pied ; Bf banquette en front ; Qc charge de colonne ; Bc banquette en crête

### V.6. 2. Maille

La maille est le rapport entre l'espacement E et la banquette B. Elle est dite carrée, si  $E = B$  ; elle est dite rectangulaire si B est différent de E.

On parle de maille inverse si  $E/B$  est inférieur à 1, cette configuration favorise la production de blocs. On favorise la fragmentation si  $E/B$  est supérieur à 1 ; généralement ce rapport est compris entre 1,10 et 1,25 pour un optimum.

### V.6. 3. Surprofondeur

En TP, la surprofondeur s'applique à la dernière phase de minage ; elle est souvent voisine de 0,50 m. En fonction des résultats constatés, suite à des sondages et relevés GPS, cette surprofondeur peut être augmentée ou diminuée, voire supprimée.

### V.7. Conception des plans de tir

La conception d'un plan de tir correspond à la définition de la géométrie de foration, du chargement des mines et des dates d'initiation. Fondamentalement, elle consiste à assurer :

- **le fonctionnement normal des charges** pour leur offrir une surface libre et un volume de dégagement adapté : il s'agit de la maîtrise du fonctionnement du tir, mine par mine : à ce principe correspondent des règles dites d'efficacité. Les processus de fragmentation (propagation des ondes de chocs et des gaz) et de déplacement de la roche (gonflement du massif) doivent avoir le temps de se réaliser ;

- **le fonctionnement correct des produits** en évitant les problèmes de désensibilisation de l'explosif (incapacité à s'amorcer) ;
- **la sécurité de fonctionnement de la totalité du tir** : le fonctionnement théorique des produits explosifs et de chaque charge, dans les conditions d'amorçage données, ne garantit pas le fonctionnement de la totalité du tir mis en œuvre. D'autres facteurs peuvent être à l'origine d'anomalies ou de dysfonctionnements graves des tirs.

### V.7.1 Technique générale de foration

La répartition des explosifs à l'intérieur du massif et le respect des distances aux surfaces libres facilitent le transfert de l'énergie vers le rocher. La mise en place des charges étant réalisée dans des trous de mines, la foration intervient donc directement sur les résultats de tir.

La foration s'appuie sur deux principes :

- la rotation ;
- la rotopercussion.

### V.7.2 Techniques d'amorçage

L'amorçage a deux fonctions essentielles :

- la mise en détonation correcte des charges ;
- la séparation des détonations des charges dans le temps.

Pour ce faire, le système d'amorçage est composé de divers éléments ayant chacun un ou plusieurs rôles précis :

- initiation ;
- retard ;
- transmission ;
- amorçage à proprement parler.

La chaîne d'amorçage ainsi constituée peut être parfois complexe.

#### V.7.2.1 Mise en détonation de l'explosif

Elle peut être réalisée par du cordeau détonant (il s'agit alors d'un amorçage latéral), ou par un détonateur éventuellement accompagné d'un bousteur ou d'une cartouche (amorçage ponctuel).

Tous les explosifs présentent des comportements différents selon l'énergie de l'amorçage qui leur est adjoint. On peut distinguer trois domaines pour des énergies croissantes du dispositif d'amorçage :

- insensibilité sans perturbation ;
- insensibilité avec perturbation (désensibilisation partielle) ;
- sensibilité.

#### V.7.2.2 Transmission de l'ordre de détonation

Elle se fait en surface et, pour le cas de l'amorçage ponctuel, dans le trou. Cette dernière ne doit pas être perturbée par les détonations de charges voisines.

L'**amorçage ponctuel** utilisant un détonateur électrique ou *Nonel* et un bousteur est universel  
L'**amorçage ponctuel en fond de trou** est une pratique relativement courante dans le cas des mines de moins de 6 m.

### V.7.2.3 Retards

Ils sont soit en surface (relais, raccords, détonateurs sur cordeau, explodeur séquentiel), soit dans le trou (détonateurs), soit les deux.

Par ailleurs, seule la combinaison de retards de surface et dans le trou autorise la réalisation des tirs séquentiels, tirs avec un choix de retards qui permet :

- le contrôle des projections ;
- le contrôle des vibrations ;
- une meilleure fragmentation.

## V.8. Tirs en gradins

### V.8.1 Principes

La technique du tir en gradins consiste en la réalisation d'une « falaise » artificielle appelée **front de taille**. Les explosifs sont mis en oeuvre sous la forme de charges cylindriques allongées, sensiblement parallèles à la paroi quasi verticale du front, seule face libre active du tir.

### V.8.2 Détermination des charges

Les relations les plus courantes permettant de déterminer la charge en explosif ont été développées empiriquement par Langefors (in *The modern technique of rock blasting*. 1979. AWC/GEBERS. Stockholm).

Les **règles de Langefors** définissent de manière précise les éléments de la géométrie du tir, qui sont déterminés en fonction de la banquette  $B$  : épaisseur de la tranche de massif abattue par une mine (figure 11).

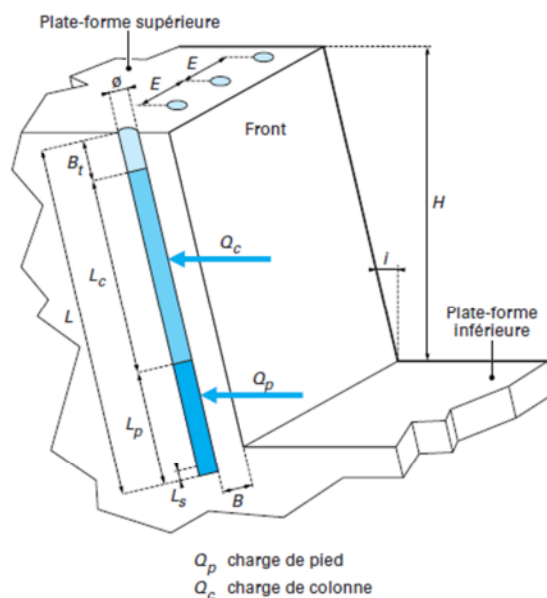


Figure 11 Géométrie du tir

Les relations suivantes ne sont applicables qu'à des fronts élevés, de hauteur supérieure au double de la banquette. En deçà, l'énergie explosive contenue dans le trou de mine est approximativement proportionnelle au volume abattu par cette mine [11].

La foration présente une surprofondeur  $L_s$  par rapport à la plateforme inférieure définie par la relation :

$$L_s = 0,3B \quad (1)$$

Le bourrage terminal  $B_t$ , qui permet de confiner la charge à l'intérieur du trou de mine, est défini par la relation :

$$B_t = B \quad (2)$$

Il peut être réduit jusqu'à  $0,5B$  dans le cas d'amorçage en fond de trou. Il doit être réalisé, dans la mesure du possible, avec des matériaux concassés (en général du 4/6 mm) qui créent un confinement suffisant pour le bon fonctionnement des produits explosifs.

La charge explosive, elle-même, peut être décomposée en deux parties, la charge de pied de longueur  $L_p$  – partie inférieure de la charge explosive – et la charge de colonne. La longueur de la charge de pied est déterminée par :

$$L_p = 1,3B \quad (3)$$

La longueur de la charge de colonne  $L_c$  se déduit alors de la longueur totale de la foration  $L$  par la relation :

$$L_c = L - 2,3B \quad (4)$$

La **banquette (épaisseur de roche à abattre) maximale** peut être évaluée à partir des caractéristiques du massif à abattre, des paramètres géométriques du gradin et de la foration, des performances de l'explosif de pied utilisé, par la formule suivante :

$$B_{max} = K\phi \left[ \frac{S_p \rho_p}{S_0 \rho_{p0}} \right]^{1/2} \frac{\phi_c}{\phi} \quad (5)$$

avec  $K$  coefficient constant dépendant de la référence utilisée et du massif rocheux,

$\phi$  (mm) diamètre de foration,

$\phi_c$  (mm) diamètre de la charge explosive de pied,

$s_p$  (MJ/kg) énergie pondérale de l'explosif de pied utilisé,

$\rho_p$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique de l'explosif de pied utilisé,

$s_0$  (MJ/kg) énergie pondérale de l'explosif de référence,

$\rho_0$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique de l'explosif de référence.

Cette relation permet de ramener l'explosif de pied utilisé à un explosif de référence, en utilisant d'autres caractéristiques énergétiques que la « strength », plus représentative, comme les énergies mesurées dans les tests en piscine (encore appelés tests de la bulle).

Si l'on utilise comme référence le *Dynamex* suédois ou un explosif analogue (dynamite *F16*, dynamite *NCI*), compte tenu du rapport courant entre le diamètre des cartouches et celui du trou de foration, le coefficient  $K$  vaut :

$$K = 38 \quad (6)$$

La relation (5) correspond à un écartement entre trous  $E$  tel que :

$$E = 1,25B \quad (7)$$

Cette valeur correspond à un compromis entre une bonne granulométrie résultante du tir et une géométrie finale satisfaisante.



Toute variation de l'espacement  $E$  s'accompagne d'une variation conjointe de  $B$ , la maille, produit de  $E$  par  $B$ , restant approximativement constante. En prenant une foration de qualité moyenne et une hauteur de front courante de 15 m, la relation (6) devient alors :

$$K = 32 \quad (8)$$

La **charge de colonne minimale** correspondante se déduit de la charge de pied par la relation :

$$S_{c\rho_{IC}} = 0.5 S_p\rho_{Ip} \quad (9)$$

avec  $S_c$  (MJ/kg) énergie pondérale de la charge de colonne,

$\rho_{IC}$  (kg/m) masse linéique de la charge de colonne,

$S_p$  (MJ/kg) énergie pondérale de la charge de pied,

$\rho_{Ip}$  masse linéique de la charge de pied.

### V.8.3 Conception et calcul informatique des tirs

La conception d'un tir fait intervenir de nombreux paramètres (géométrie des forages et du front, choix et répartition des explosifs) dans le respect des contraintes du site (matériel de foration et d'extraction utilisé, destination et traitements ultérieurs des matériaux extraits, contraintes d'environnement).

Compte tenu de ces complexités, les concepteurs de tirs ont été amenés à développer des programmes informatiques de calcul, seule possibilité existante de prendre en compte la multiplicité des paramètres et des solutions.

Citons les programmes **BLASPA** de R. Favreau, **THP-BLAST** de SNPE ou **EXPLO-TECH** en France, **SABREX** de ICI.

### V.8.4 Tirs de masse

Les tirs de masse consistent en la mise en œuvre de charges peu profondes réparties sur une grande surface.

Grâce à un choix judicieux de retards (figure 12), il est possible de créer des **surfaces libres intermédiaires** qui définissent des éléments de massif dont la forme est approximativement une portion de sphère au centre de laquelle se trouve une charge explosive, également quasi sphérique, prête à détoner. Ces surfaces libres intermédiaires se forment pendant le tir peu de temps avant d'être utilisées.

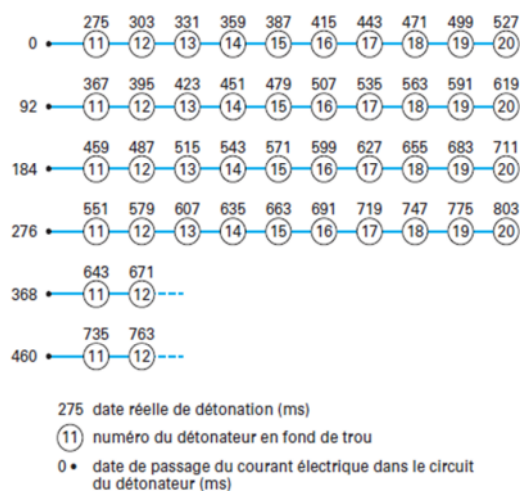


Figure 12 Tir séquentiel

### V.9. Tirs souterrains

Lors du creusement d'une galerie, l'explosif ne dispose initialement que d'une surface libre, le front de galerie. L'objectif des premières charges, constituant le bouchon, est de créer une nouvelle surface libre active orthogonale au fond de la galerie et un volume de dégagement pour les charges ultérieures de la volée (figure 13).

La technique la plus ancienne, **bouchons à mines non parallèles**, consiste à passer progressivement d'une foration peu inclinée sur le front à une foration orthogonale à ce dernier. L'avancement réalisable dépend alors essentiellement de la largeur de la galerie en raison de l'encombrement des glissières des engins de foration (figure 14).

Les **bouchons canadiens** formés de trous chargés très proches, éventuellement accompagnés de trous vides de décompression de même diamètre, pulvérisent localement la roche. (figure 15).

Les **bouchons à gros trou** utilisent un trou foré comme première surface libre et volume de dégagement. L'avancement est limité par la précision de la foration, et plus particulièrement son parallélisme, et par le diamètre de foration du gros trou (figure 16).

Le **fonçage des puits** utilise les mêmes techniques de bouchons que le percement des galeries (figure 17).

Les mines suivantes de la volée, dites de dégraissage, respectent les mêmes règles que celles des tirs à ciel ouvert. La consommation en explosif varie entre 1 et 1,4 kg/m<sup>3</sup>. Pour les mines de la partie inférieure de la volée (sole et piédroits), elle augmente de 10 % environ pour tenir compte du confinement défavorable.

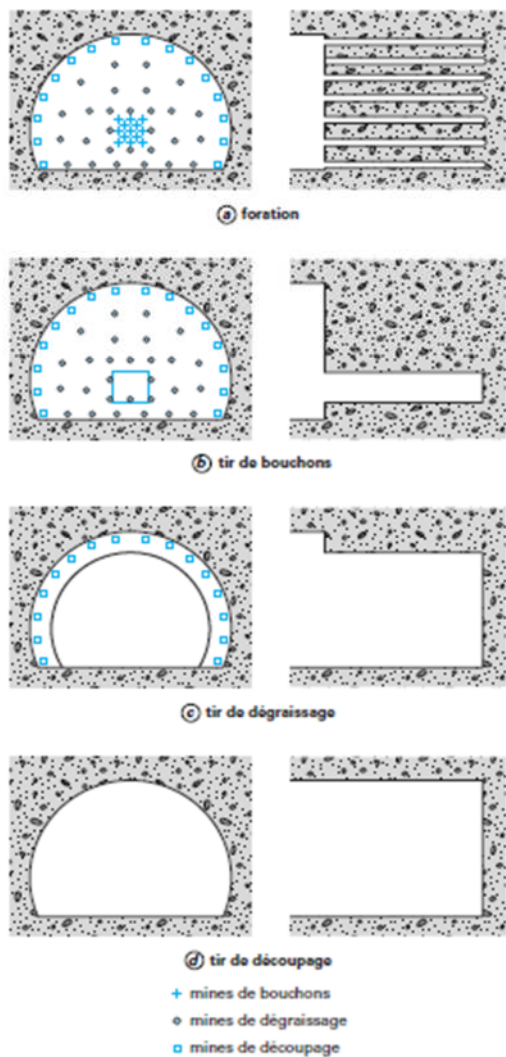
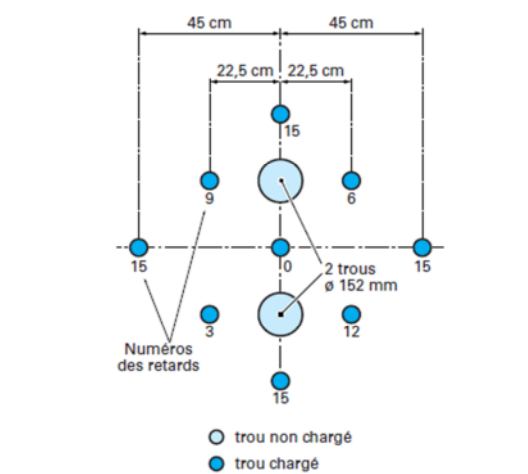
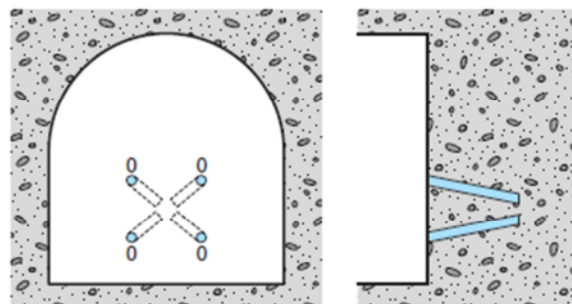


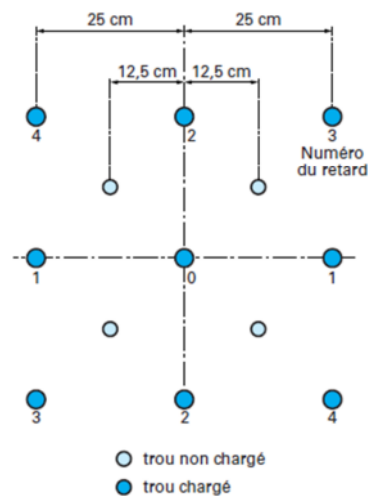
Figure 13 Phases successive du tir d'une volée en galerie



16 – Bouchon à double gros trou central



14 – Bouchon à mines non parallèles



15 – Bouchon canadien

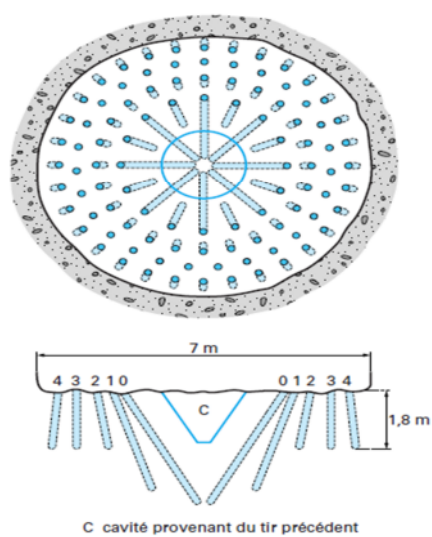


Figure 17 – Fonçage des puits

### V.10. Tirs de découpage

Les techniques de découpage permettent d'améliorer l'état final des excavations à l'explosif. Elles consistent à forer des trous coplanaires à faible distance les uns des autres et à les faire détoner simultanément ou par petits groupes. Une fissure se propage alors dans le plan de foration des trous.

Pour ce faire, l'explosif est découplé, c'est-à-dire séparé de la roche par un vide d'air annulaire. Le seul intérêt de l'onde de choc est éventuellement de créer une amorce de fissure au voisinage immédiat du trou de mine.

La pression des gaz après détonation à l'intérieur du trou de mine, dite *pression de paroi*, est approximativement égale à :

$$P = \frac{1}{8} \rho V^2 \left[ \frac{\phi_c}{\phi} \right]^{2.6} \quad (10)$$

avec  $P$  (Pa) pression de paroi,

$\phi_c$  (m) diamètre de la charge explosive,

$\phi$  (m) diamètre du trou de mine,

$V$  (m/s) vitesse de détonation de l'explosif  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique de l'explosif.

La pression de paroi doit être inférieure à la résistance en compression de la roche de manière à éviter son broyage. Par ailleurs, la pression développée par les gaz doit excéder la résistance du massif pour ouvrir une fissure entre les trous. Elle suit donc la relation :

$$P\phi = (R_t + \sigma_i) (E - \phi) \quad (11)$$

avec  $P$  (Pa) pression de paroi,

$\phi$  (m) diamètre du trou de mine,

$R_t$  (Pa) résistance à la traction de la roche,

$\sigma_i$  (Pa) contrainte interne du massif,

$E$  (m) espacement entre les trous.

La pression de paroi devra être la plus élevée possible sans excéder la résistance à la compression de la roche

Le **prédécoupage** est réalisé avant les tirs de production, qu'il soit tiré indépendamment ou à l'intérieur du tir de production (figure 18).

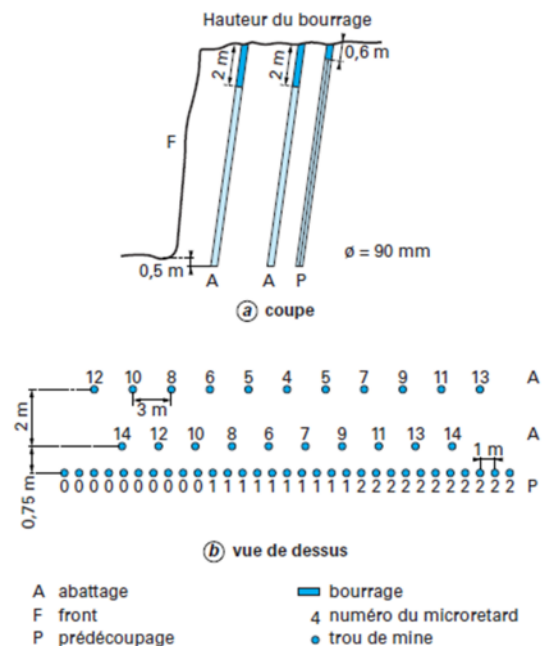


Figure 18 Prédécoupage et tir ménagé en production.

**Chapitre VI :**

**Rippabilité des roches**

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

### VI.1.Définition

La *rippabilité* est l'aptitude d'une roche à être désorganisée par la ou les dents du ripper de manière à pouvoir être ensuite reprise par les engins de terrassement classiques : chargeurs, scrapers ou bulls.

Le *ripper* est constitué de dents (une à trois) montées sur un châssis solidaire du tracteur. L'action de vérins permet d'exercer une poussée sur les dents pour les enfoncer dans le sol. La traction exercée par le tracteur produit la fragmentation de la roche.

Deux types de rippers sont généralement utilisés

- les rippers type Kelley (fig. 1 a) à bâti triangulaire pivotant autour d'un axe horizontal lié au tracteur et actionné par deux vérins,
- les rippers dits « à parallélogramme » (fig. 1 b) à bâti constitué d'un parallélépipède déformable actionné par deux vérins placés suivant les diagonales des deux faces verticales parallèles à l'axe de l'engin.



a- Ripper type Kelley



b- Ripper parallélogramme

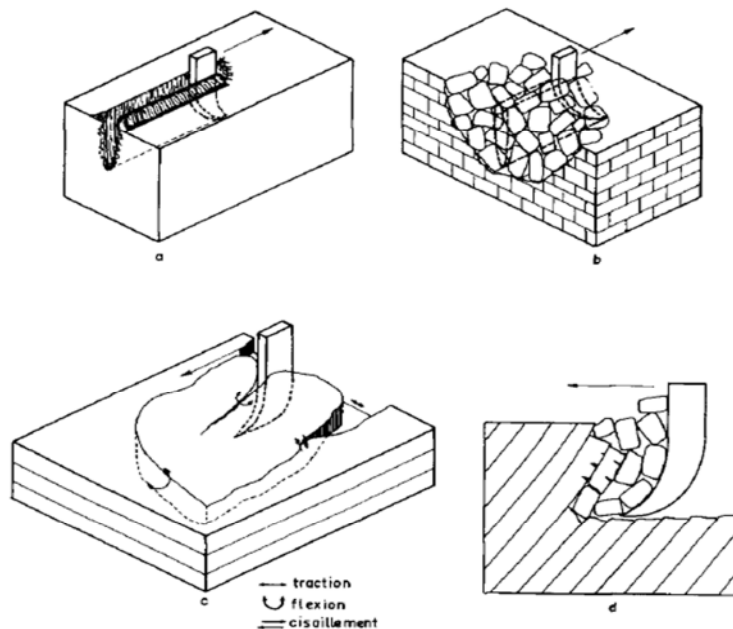
**Figure 1** type des rippers

Pour ces deux types de ripper, l'angle d'attaque de la dent reste constant ; un type de ripper tout récent permet de faire varier cet angle par allongement ou rétrécissement d'un côté du « parallélogramme » constitué par un vérin.

### VI.2.Action du ripper

L'efficacité du rippage est étroitement liée à la nature de la roche, à la géométrie des discontinuités et au sens de travail du ripper par rapport à celles-ci (fig. 2) :

- Marnes compactes peu raides sans joints de stratification apparents : le ripper pratique une saignée, mais ne disloque pas un volume important de matériau à chaque passe. De nombreuses passes entrecroisées sont nécessaires.
- Roche à fissuration dense (fissures espacées de 0,10 à 0,30 m) : le ripper désorganise le matériau aisément sur 1 à 1,5 m de largeur et la hauteur de la dent.
- Roche stratifiée horizontalement en bancs continus : la dent du ripper soulève les dalles, provoquant des ruptures par traction, flexion et cisaillement.



**Figure 2** Action du ripper [12]

- a) dans les marnes
- b) dans une roche à fissuration dense
- c) dans une roche stratifiée horizontalement en bancs continus
- d) dans une roche à stratification, inclinée le ripper travaillant dans le sens du pendage

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

- Roches à stratification inclinée : les ruptures ont lieu par cisaillement à la pointe de la dent, par flexion et traction latéralement. Le meilleur rendement est obtenu en travaillant dans le sens du pendage, sans trop enfoncer la dent si l'on veut garder une surface régulière pour le passage suivant.

Toutes les roches ne peuvent pas être fragmentées. Chacun des trois types de roches basiques, ignées, sédimentaires et métamorphiques présente des caractéristiques qui influent sur la rippabilité.

- Les roches ignées sont les plus difficiles à fracturer car elles n'ont pas la stratification et les plans de clivage essentiels à la fracturation des roches dures.
- Les roches sédimentaires sont généralement les plus faciles à fracturer, car elles sont construites avec des couches différentes en matière, en texture, en couleur et en épaisseur.
- Les roches métamorphiques varient en rippabilité avec le degré de stratification ou de clivage causé par la transformation de la roche préexistante.

L'état du rock affecte également sa rippabilité. Bien que les roches sédimentaires offrent la meilleure opportunité de se fracturer et d'ignée et métamorphique le moins, le granite décomposé et d'autres roches ignées et métamorphiques peuvent souvent être fracturés économiquement.

Les caractéristiques physiques qui favorisent les déchirures peuvent être résumées comme suit :

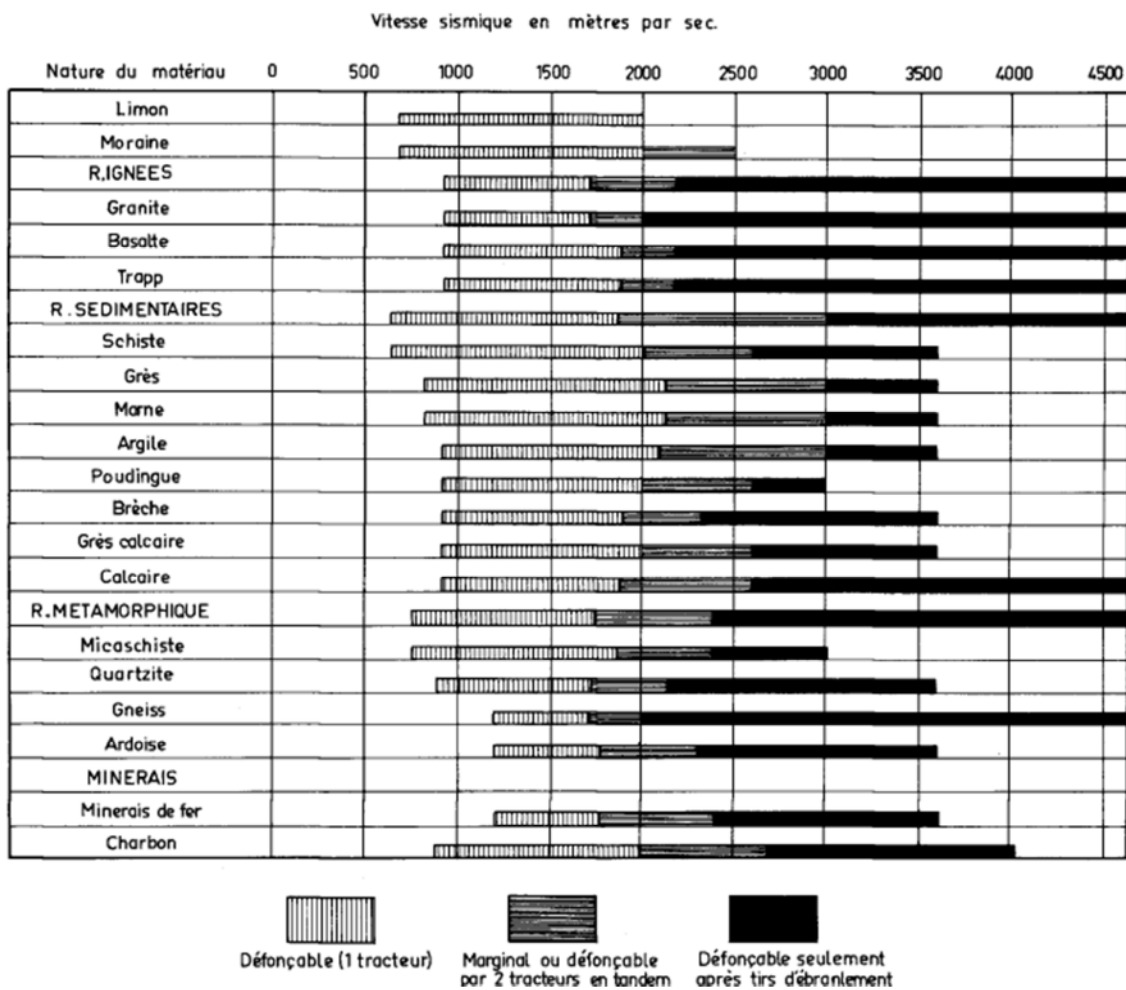
- Fractures, défauts et plans de faiblesse de toute sorte;
- L'extinction, résultante des changements de température et d'humidité ;
- La fragilité et la nature cristalline;
- Haut degré de stratification ou de stratification ;
- Grande taille des grains ;
- Les argiles imprégnées d'humidité, les schistes et les formations rocheuses ; Et
- Faible résistance à la compression.

Le ripage est un phénomène complexe dont l'efficacité est liée à la géométrie des discontinuités de la roche et à ses caractéristiques mécaniques, sans qu'il soit très aisé de définir l'influence exacte de chacun de ces paramètres. La rippabilité est liée à la vitesse sismique du matériau. La roche avec une vitesse sismique de moins de 2 km/s peut généralement être fragmentée.



**VI.3.Vitesse sismique**

Les recherches concernant la rippabilité des roches ont commencé en France dans les laboratoires des Ponts et Chaussées en 1962 avec l'acquisition de petits appareils de sismique réfraction du type Caterpillar MD 1 ou MD 3 et Hunting FS 2. L'expérience possédée sur les corrélations vitesse sismique- rippabilités était celle du constructeur d'engins Caterpillar qui a établi des tables indiquant, pour les grandes familles de roches, les possibilités de rippage par type de tracteur (Fig.3)



**Figure 3** Table Caterpillar pour tracteur D 9G (390 CV) avec ripper 9B une dent.

#### **VI.4.Critères de rippabilité**

Pour une roche et un chantier donnés, ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

##### **VI.4.1 Critères non liés à la roche**

- puissance des tracteurs et type de ripper,
- possibilité de coupler deux tracteurs,
- prix de soumission de l'entreprise, d'où la notion de rendement minimal pour que le travail soit rentable,
- granularité maximale exigée par le maître d'œuvre,
- conditions météorologiques (adhérence des chenilles de tracteur).

Ces critères sont liés au caractère particulier de chaque chantier et ne feront pas l'objet de conclusions générales. Il est cependant nécessaire de tenir compte de ces éléments dans la phase d'interprétation de l'étude de rippabilité.

##### **VI.4.1 Critères liés à la roche**

- géométrie des discontinuités,
- caractéristiques mécaniques,
- hétérogénéité (présences de blocs ou de zones saines dans la tranche d'altération, existence de filons ou masses de roches de nature différente de celle de la roche encaissante).

L'état actuel de nos connaissances dans ce domaine conduit à estimer que pour les tracteurs puissants (400 CV environ) les roches sont rippables dans de bonnes conditions s'il existe trois familles de discontinuités espacées au plus de 50 à 70 cm, exceptionnellement de 1 m. Pour les roches stratifiées en bancs continus horizontaux, le ripage s'effectue normalement si l'épaisseur des bancs n'excède pas 30 cm (roches dures) à 50 cm (roches mi-dures).

La disposition des zones dures non rippables au sein de la roche rippable est très importante ; l'état de mécanisation actuel des chantiers peut conduire à un traitement généralisé à l'explosif si elles sont dispersées régulièrement et ne permettent pas au tracteur une évolution normale sur des distances de l'ordre de 30 m.

Plusieurs autres facteurs importants dans le choix de l'équipement de fracturation correcte sont :

- La pression vers le bas disponible à la pointe de l'étireur,
- La puissance du volant du tracteur et
- Le poids brut du tracteur.

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

La pression vers le bas à la pointe détermine si la pénétration du broyeur peut être obtenue et maintenue.

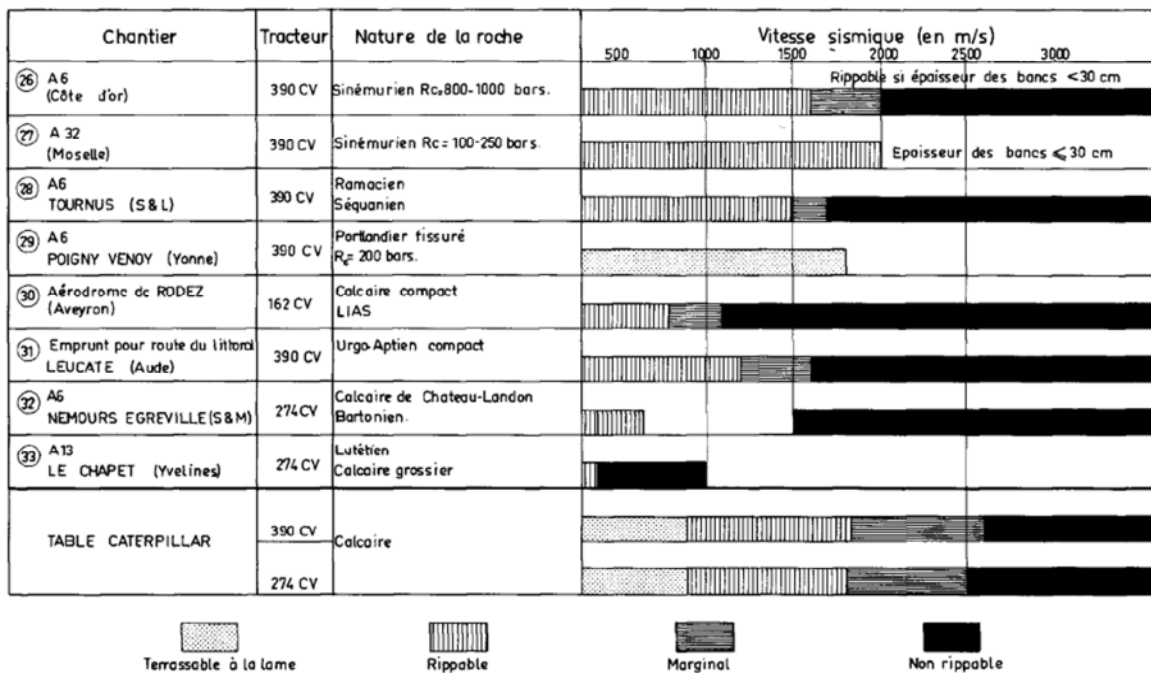
La puissance nominale du volant détermine si le tracteur a le pouvoir de faire avancer la pointe.

Le poids brut du tracteur détermine si le tracteur aura suffisamment - pour utiliser la puissance.

Les caractéristiques qui influent sur la rippabilité ne sont pas représentées en vitesse sismique.

Comme en général, la vitesse sismique ne peut être déterminée à une précision supérieure à 20%

La figure 4 montre que les matériaux (calcaires) sont rippables < 2 000 m/s; Marginal > 2 000 m/s et non rippable > 2 800 m/s.



**Figure 4** Corrélations vitesse sismique/rippabilité dans les calcaires.

Le mouvement productif des rippers est réalisé dans un sens si la couche de roche est inclinée.

La profondeur de l'émottage est égale :

0,4 – 0,5 m pour le ripper remorqué

1,2 – 2,0 m pour le ripper d'abris

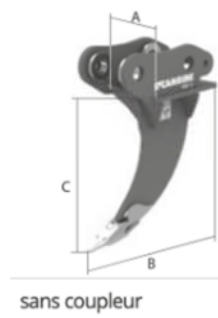
## Chapitre VI : Rippabilité des roches

Les rippers avec une dent sont utilisés pour foisonner les roches dures et à plusieurs dents pour foisonner les demi-rochers.

En pratique les rippers sont utilisés pour l'émottage des roches avec  $f < 6$ .

Les paramètres de l'organe de travail

- $\gamma$  : angle de coupe (30-40°)
- $\omega$  : angle tranchant (20-30°)
- $\varphi$  : angle arrière



Tons	0,6 - 2,5	2,5 - 4,0	4,0 - 7,5	7,5 - 14,0
<b>MOD.</b>	<b>RCB45</b>	<b>RCB53</b>	<b>RCB67</b>	<b>RCB80</b>
<b>A</b> mm	250	265	295	330
<b>B</b> mm	490	545	665	755
<b>C</b> mm	450	525	665	810
sans coupleur kg	27	36	63	105

Figure 5 Schéma d'un organe de travail du ripper (dent)

Lors du mouvement du ripper, la roche est détruite dans les limites de la fente trapézoïdale. La distance entre les passages doit assurer la granulométrie nécessaire et la profondeur suffisante de l'émottage. Tous les rippers à suspension tracteurs sont équipés d'un système hydraulique qui permet de baisser et monter les dents, de changer la profondeur de l'émottage et d'augmenter la pression d'une dent sur la roche. Après pénétration d'une dent dans la roche, le ripper se déplace sur la plateforme horizontale ou inclinée en faisant des sillons avec la vitesse qui ne dépasse pas 1,2m/s

La destruction de la roche s'effectue d'avantage par la compression et le cisaillement devant la face d'attaque de la dent.

La résistance spécifique de la roche à la destruction est :

$$K = (1,3 - 1,5) \sigma_{tr} \quad (1)$$

Avec  $\sigma_{tr}$ : résistance de la roche à la traction

Le foisonnement du massif s'effectue par les passages adjacents parallèles du ripper

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

hf : puissance de la roche

ht : hauteur effective du travail ;

c : distance entre deux passages voisins.

Entre deux sillons adjacents dans la partie inférieure se forment des piliers qui empêchent l'extraction de la roche à la profondeur de pénétration de la dent qui peut être déterminée par :

$$hf = 1/K_2 [ K_1 ht - 0,5 \operatorname{tg} \alpha (c - bs) ] \quad (2)$$

K<sub>1</sub> : coefficient qui tient compte de la forme de la section de la fente ;

K<sub>2</sub> : coefficient qui tient compte de l'influence de l'état du massif sur les dimensions des piliers non détruits qui se forment lors des passages parallèles

$\alpha$  : angle du bord de la fente (30-40°)

bs : largeur de la fente

ht : profondeur de pénétration de la dent

La destruction des piliers peut être réalisée par les passages croisés du ripper perpendiculairement aux passages initiaux. On prend c' la distance entre les passages croisés

$$c' = (1,2 - 1,5) c \quad (3)$$

On utilise les dents larges pour les roches tendres, les dents minces pour les roches dures.

**Tableau 1** Classe des roches d'après la rippabilité

Classe des roches d'après la rippabilité	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	Bs, m
Facilement Ameublées	1,0	0,85	0,3 — 0,5
Moyennement ameublées	0,95	0,95	0,2 — 0,3
Difficilement ameublées	0,9	1,0	0,15- 0,25

La distance optimale entre les passages parallèles :

$$C_0 = K_f ht \operatorname{ctg} \alpha + 0.5 bs, \text{ m} \quad (4)$$

### VI.5. Rendement d'exploitation du ripper

*Le rendement d'exploitation du ripper lors des passages parallèles* (m<sup>3</sup>/h) est défini comme suit :

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

$$Qt = \frac{3600 \times h_{eft} k_u}{\frac{1}{v_r} + \tau}, m^3/h \quad (5)$$

Où :

heft : profondeur de desserrage efficace (m)

ku : facteur d'utilisation du ripper (0.7-0.8)

vr : vitesse de ripage du ripper, m/s

$\tau$  : temps de passage au sillon suivant, s (30-60)

$\tau$  : durée des opérations auxiliaires ( $\tau = t_1 + t_2 + t_3$ , sec)

t1 : durée de l'enlèvement de la dent, s 2 :3 s

t2 : durée de retour du ripper et des trajets sur les nouveaux passages 12 -30s

t3 : durée de pénétration de la dent, 4-8s

l : longueur du panneau d'émottage, m

***Le rendement d'exploitation du ripper lors des passages croisée ( $m^3/h$ ) est défini comme suit :***

$$Qt = \frac{3600 \times h_t k_u}{\frac{1}{v_r} \left( \frac{1}{c} + \frac{1}{c'} \right) \times \tau \left( \frac{1}{cL} + \frac{1}{cL'} \right)}, m^3/h \quad (6)$$

Où :

ht : profondeur de pénétration de la dent

ku : facteur d'utilisation du ripper (0.7-0.8)

vr : vitesse de ripage du ripper, m/s

c : distance entre les passages parallèles, m

c' : distance entre les passages croisés, m

L : longueur du panneau d'émottage parallèle, m

L' : longueur du panneau d'émottage croisé, m

tp : durée d'un poste de travail du ripper, h

$\tau$  : temps de passage au sillon suivant, s (30-60)

**Tableau 2** Vitesse du ripper Vr m/s

N°	Roche	Vitesse du ripper Vr m/s
1	Roche dense avec inclusion de blocs, houille dure, masse cimentée de débris rocheux, schistes brisés	0,9-1,5
2	calcaire tendre, schistes, marne, craie, opoka, gypse, argile durcie et gelée	0,8-1,2
3	fortement jointées, calcaires dure, grès et schistes	0,6-1,2
4	Moyennement jointées, Calcaires, dolomies, grès, marbre, schiste argileux	0,4-0,8

***Procédure de terrain***

Méthode volume par longueur

La production horaire est calculée comme suit : Taux de production horaire,

$$Q_h = Q_c \times 60 \times E / t \quad (7)$$

Où,  $Q_c$  : Production par cycle, m<sup>3</sup>/heure

E : Efficience de l'opérateur

t - Temps de cycle, minutes

Pendant les cycles de rippage direct, l'efficacité de l'opérateur, longueur de rippage (L), profondeur de rippage (D), largeur de rippage (W), temps de rippage (tr) et temps de manœuvre (tm) sont enregistré

• un cycle de production peut être déterminé comme suit :

$$Q_c = A \times L \quad (8)$$

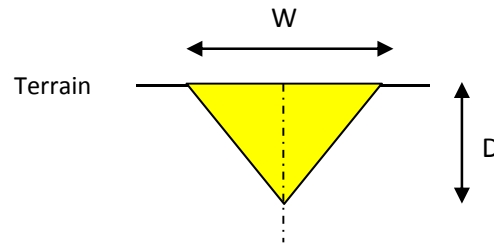
Où ,  $Q_c$  :Production par cycle en m<sup>3</sup>

A : Surface de la section transversale, m<sup>2</sup>

## Chapitre VI : Rippabilité des roches

L : longueur de rippage, m

La surface de la section transversale peut être calculée en considérant la section transversale triangulaire suivante coupée par le ripper au sol



**Figure 6** Coupe transversale triangulaire sur coupe

Aire de la section transversale,  $A = DW/2$

Où, D- profondeur de rippage, m

W -largeur de rippage, m

En substituant toutes ces valeurs, nous pouvons obtenir production horaire.

### Exercice

Calculer

- La résistance spécifique de la roche à la destruction
- La distance entre les passages croisés
- La distance optimale entre les passages parallèles
- la profondeur de pénétration de la dent
- Le rendement d'exploitation du ripper lors des passages parallèles avec :

Terrain difficilement ameublies

Type de ripper RCB 45

$\sigma_{tr} = 20$  MPa

$c = 0.5$

Profondeur de la pénétration de la dent 0.10 m

Profondeur de desserrage efficace 0.05 (m)



## Chapitre VI : Rippabilité des roches

Longueur du panneau d'émottage 0.5 m

### Solution

La résistance spécifique de la roche à la destruction est :

$$K = (1,3 - 1,5) \sigma_{tr} = 1,5 \times 20 = 30 \text{ MPa}$$

La puissance de la roche est :

$$hf = 1/K2 [ K1 ht - 0,5 \operatorname{tg} \alpha (c - bs) ] = 1/1 (0,9 \times 0,3 - \operatorname{tg} (40) (0,5 - 0,25)) = 0,06 \text{ m}$$

Distance entre les passages croisés

$$c' = (1,2 - 1,5) c = 1,2 \times 0,5 = 0,6 \text{ m}$$

La distance optimale entre les passages parallèles :

$$C0 = Kf ht c \operatorname{tg} \alpha + 0,5 bs = 0,06 \times 0,10 \times 0,5 \operatorname{tg} (40) + 0,5 \times 0,25 = 0,12 \text{ m}$$

Le rendement d'exploitation du ripper lors des passages parallèles

$$Qt = \frac{3600 \times h_{eft} k_u}{\frac{1}{v_r} + \bar{t}} = \frac{3600 \times 0,05 \times 0,7}{\frac{1}{0,6} + \frac{60}{0,5}} = 0,10 \text{ m}^3/\text{h}$$

## Références bibliographiques

1. Lorino, T., 2004. Autopsie d'une chaussée, Paris, école Nationale des Ponts et Chaussées édition, Division ESAR, Section AGR, pages 83
2. Robert, M., Lafon, JF., 2012. ROUTES, Matériaux, Durabilité des chaussées. Tome I, université Paule Sabatier, Toulouse III. France
3. Xuan, N.H., 2013. comportement hydromécanique des matériaux granulaires compacts non saturés. Thèse de doctorat, université de INSA de Strasbourg, (ED n°269)
4. GTR., 2000. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Edition du SETRA-LCPC, Bagnaux, Fascicule I&II, Paris
5. DRIF (2005) Connaissance des différents matériels et travaux de terrassement. Edition ISTA.ma. <http://www.ista.ma>
6. CIMBÉTON (2019) Conception et dimensionnement. Voiries et aménagements urbains en béton Caractéristiques générales des chaussées. Tome 1
7. Nehaoua A (2013) Cubature et mouvement des terres. Département de Génie civil - Faculté : TECHNOLOGIE-U.F.A.S . Université Ferhat Abbas
8. BTS TP (1992) Engins de terrassement. Technologie des Constructions. Académie Versailles éducation nationale enseignement supérieur recherche. France
9. OPPBTP (2012) Travaux à l'explosif Cpt – Généralités. Université de Franche-Comté. [www.univ-fcomte.fr](http://www.univ-fcomte.fr)
10. SETRA (2001) Terrassements à l'explosif dans les travaux routiers: guide technique. Front Cover. Comité français pour les techniques routières. - 127 pages.
11. Blanchier A., Sauvage A C. (2022) Utilisation des explosifs dans le génie civil. Technique de l'ingénieur C5420 v2. France
12. Darcy J (1970) Applications de la mécanique des roches aux terrassements rocheux. Journées du comité français de mécanique des roches. Bull. Liaison Labo. P. et Ch. 5 0 (Janv.-Fév. 1971) - Réf. 963