

UNIVERSITÉ de LIÈGE  
—  
FACULTÉ des SCIENCES  
APPLIQUÉES

Cours édité par la  
Société Coopérative de l'A. E. E. S.  
17, rue Sœurs de Hasque, Liège

---

**F. CAMPUS**

Professeur à l'Université de Liège

---

# Cours des Procédés Généraux de Construction

FASCICULE II

EXÉCUTION DES TERRASSEMENTS



1946

MAISON DESOER  
21, rue Ste-Véronique  
— LIÈGE —

Tous droits de reproduction réservés

# COURS D'EXÉCUTION DES TERRASSEMENTS



## Chapitre I

### RÉDACTION DES PROJETS DE TERRASSEMENTS ET CUBATURES

#### § 1.- REDACTION D'UN PROJET DE ROUTE.-

Le point de départ est le programme que nous avons analysé dans le cours de routes. L'ingénieur procède et fait procéder aux diverses études: géographique, topographique, économique, etc... au moyen de reconnaissances, levés, enquêtes et tous documents utiles.

L'avant-projet comporte: un plan de situation au 1/10000; un profil en long de 1/5000 ou 1/2000 pour les distances, 1/500 ou 1/200 pour les hauteurs; des profils en travers au 1/200; une épure de cubature et de transport des terres avec un tableau, le plus souvent établi par une méthode expéditive, un devis approximatif.

Le projet définitif comporte les mêmes éléments, généralement aux échelles respectives de 1/5000, 1/1000 et 1/100; un avant-métré des terrassements; le tableau des distances moyennes de transport et de la répartition des terres, le plan d'emprise ou plan terrier ou parcellaire, établi d'après les données cadastrales (1). Un devis estimatif détaillé et un cahier des charges, clauses et conditions de l'entreprise; un rapport explicatif détaillé, justifiant notamment le tracé et les ouvrages annexes. Le projet comporte généralement l'étude des revêtements et celle des ouvrages d'art, dont nous nous occuperons dans d'autres parties du cours.

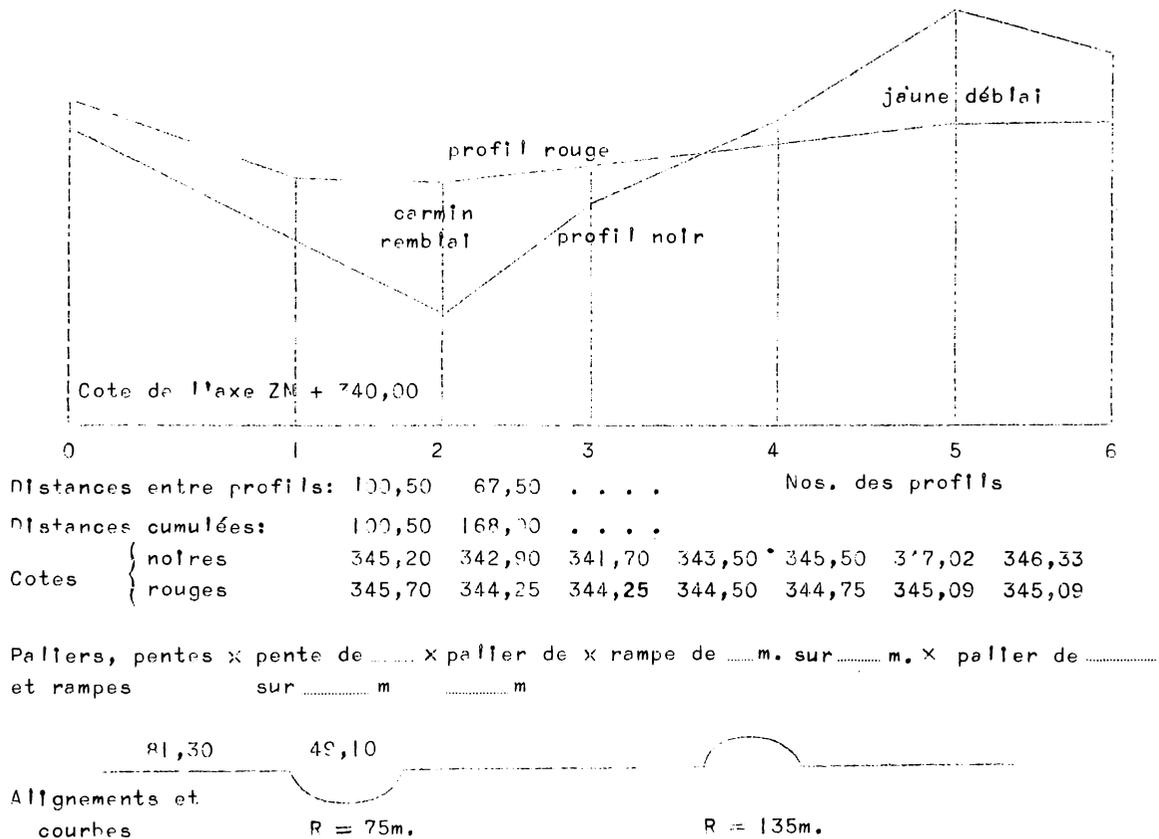
#### § 2.- REDACTION D'UN PROJET DE CHEMIN DE FER.-

L'étude, l'avant-projet et le projet définitif comportent en principe les mêmes éléments que le projet de route. L'établissement du programme et les études sont généralement plus complexes, plus longues et plus approfondies à cause des intérêts plus considérables qui entrent en jeu, tout au moins par rapport à des routes ordinaires. Des routes très importantes à usage spécial, telles que des auto-routes, exigent des études aussi importantes que des voies ferrées. Pour ces dernières et les éléments techniques qui servent de base au tracé, je me réfère au Cours d'Exploitation des Chemins de fer

(1)

Les limites d'emprises sont teintées en carmin et les différentes sections sont munies de numéros d'ordre; elles sont énumérées avec toutes indications utiles, dans un tableau, établi généralement d'après un formulaire ad hoc.

(rampes limites, rayons minima des courbes, raccordements horizontaux et verticaux, divers, profils, etc...). Pour les considérations générales relatives aux circonstances topographiques et au tracé, je me réfère au cours de topographie.



Je me borne à ces indications très sommaires pour la rédaction des projets. Généralement, les projets sont établis par des administrations publiques ou privées, qui possèdent des prescriptions plus ou moins développées pour leur établissement. Ce sont elles évidemment qui définissent la voie à suivre et les documents à fournir.

### § 3.- PROFIL EN LONG.-

Le profil en long est le développement sur un plan tangent du cylindre vertical ayant pour directrice l'axe du tracé plan.

Il comporte un axe longitudinal des abscisses ou distances à partir duquel les ordonnées ou cotes se comptent positivement vers le haut. Sous l'axe des abscisses, on porte l'indication des distances partielles et des distances cumulées; on indique également les alignements droits et les courbes, leurs longueurs, les rayons des courbes et leur sens.

En réunissant les points terminaux des ordonnées correspondant aux cotes du terrain naturel, on obtient le profil noir; les cotes sont inscrites dans le tableau sous l'axe des abscisses et s'appellent cotes noires sur l'axe.

Les ordonnées des points de l'axe de la voie de communication sont ensuite reportées sur le dessin; la ligne polygonale qui les joint, constitue le profil rouge dont les cotes inscrites sous l'axe des abscisses s'appellent cotes rouges sur l'axe.

Ces deux profils représentent l'un, le terrain naturel, l'autre, la pla-

teforme de la voie de communication. Selon leur situation relative, il y a déblai ou remblai. Les zones de déblai se teintent en jaune ou gris, les zones de remblai en rose carmin.

Le profil en long se trace pour l'avant-projet d'après les cartes topographiques ou levés sommaires; pour le projet, d'après les levés définitifs.

Les échelles sont différentes pour les abscisses et les ordonnées, ordinairement 1/2000 ou 1/1000 pour les distances et 1/200 à 1/100 pour les hauteurs. On complète le tableau sous l'axe des abscisses par:

la cote absolue de cet axe;

les numéros des profils;

la longueur et l'inclinaison des rampes et des pentes (en considérant la circulation de gauche vers droite).

l'indication des accidents topographiques importants: localités, voies de communication, cours d'eau, etc.

#### §4.- PROFILS EN TRAVERS.-

Les profils en travers donnent la représentation du terrain et de la voie de communication par projection sur les plans verticaux normaux au cylindre du profil en long.

Ils comportent un axe des abscisses ou distances et un axe des ordonnées, qui est la trace du plan du profil en long. Les distances se portent de part et d'autre de cet axe.

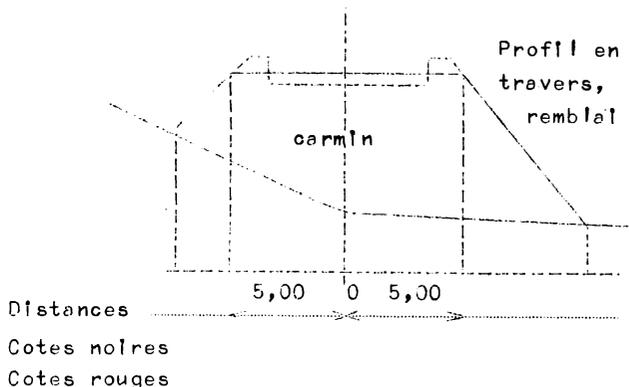
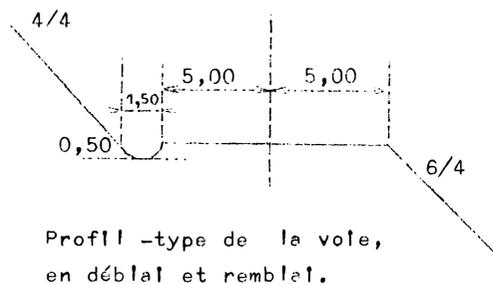
Le terrain naturel est représenté par une ligne brisée noire, les cotes correspondantes sont les cotes noires, la cote sur l'axe est celle indiquée sur le profil en long.

La voie de communication est définie par la cote rouge sur l'axe qui permet de tracer la plateforme de largeur imposée, le talus de remblai ou déblai, les fossés, etc...

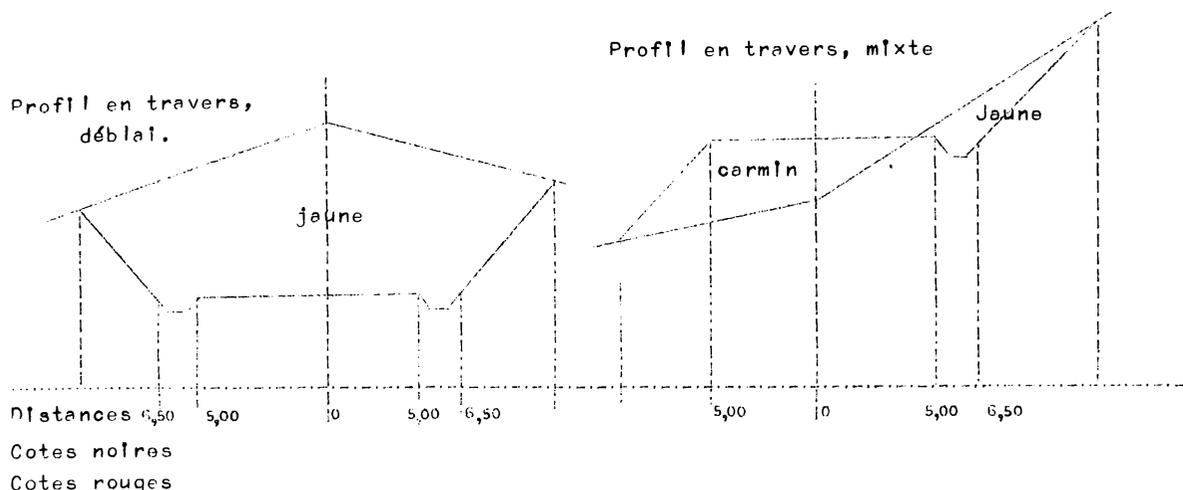
Les surfaces du profil correspondant au déblai sont teintées en jaune ou gris; celles correspondant au remblai, en carmin.

Ces profils en travers complètent, avec le profil en long et le plan, la représentation pratique du terrain et de la voie de communication.

Les profils en travers sont choisis aux points intéressants: ruptures de pentes ou d'alignements de la voie, changements de pentes du terrain naturel, etc... Pour une étude très sommaire, on envisage parfois des entredistances égales. Les échelles des distances et des hauteurs sont égales, 1/200 ou 1/100 généralement. Le profil type de la voie de communication doit être donné, voir, par exemple, le profil-type ci-contre, qui peut convenir pour une route à double voie charretière de 6 ou 7 m. de largeur. Les formes caractéristiques des profils en travers sont: a) le profil en remblai; b) le



profil en déblai; c) le profil mixte.



En se servant du plan topographique indiquant le tracé, du profil en long et des profils-types de la voie de communication, il est possible de tracer tous les profils et de calculer toutes les cotes. C'est un travail élémentaire, mais qui doit être fait avec soin.

La plateforme du profil ne correspond pas à l'état définitif de la route, qui doit recevoir le coffre de la chaussée et les accotements. Elle constitue une ligne de compensation du profil, la cote définitive sur l'axe sera partout légèrement supérieure d'une quantité uniforme. Mr. d'Ocagne fait observer que si le profil en long est incliné, la pente constante donnée aux lignes de talus diffère légèrement de la plus grande pente des talus.

Si  $i$  est l'inclinaison de la route,  $p$  celle de la ligne de talus et  $P$  la plus grande pente de talus,

$$P = \sqrt{p^2 + i^2}$$

$i$  étant toujours petit, on peut écrire, sans erreur sensible  $P - p = \frac{i^2}{2p}$

Cette différence est toujours très faible et négligeable.

#### §5.- PRINCIPE DES CUBATURES.-

Les profils en long et en travers montrent que des terres doivent être enlevées là où la voie est en déblai et rapportées là où elle est en remblai. Le calcul des volumes des terres à enlever et à rapporter est une des opérations principales de l'étude d'un projet de voie de communication; elle correspond à une partie fondamentale du travail et de la dépense. Si les remblais sont plus importants que les déblais, il faut faire des emprunts, en cas contraire, il faut faire des dépôts ou cavaliers. Il est toujours désirable qu'il y ait équilibre ou compensation entre les remblais ou les déblais.

L'étude du volume des terres à mettre en oeuvre et de la compensation s'appelle cubature des terrassements.

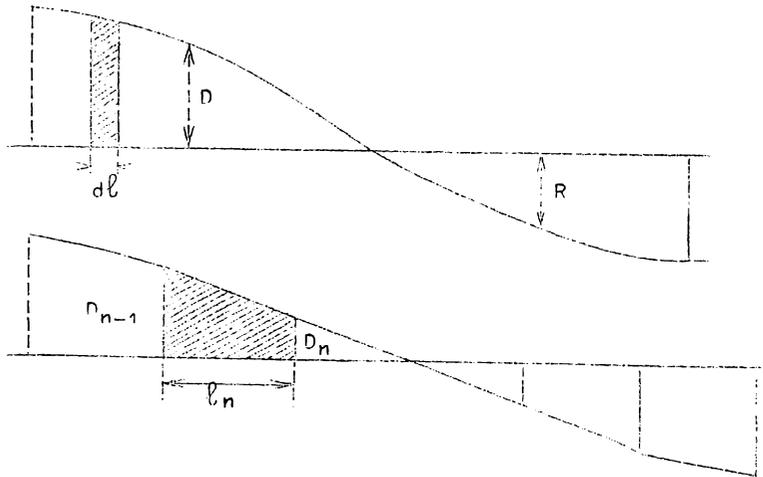
Elle s'accompagne de l'étude des surfaces d'emprise, qui sont définies par l'axe en plan et les largeurs maxima des profils en travers, en tenant compte des emprunts ou dépôts éventuels. Comme ce problème est élémentaire, il n'est évoqué que pour mémoire. J'ai d'ailleurs déjà indiqué dans le cours de routes qu'il ne convient pas toujours et qu'il n'est pas toujours possible de limiter les emprises aux largeurs strictement ou immédiatement nécessaires; il est utile d'envisager une réserve d'avenir.

Supposons une partie de route en remblai et soit  $R$  la surface d'un profil en travers. L'axe étant rectiligne, le volume compris entre ce profil et un profil infiniment voisin, distant de  $dl$ , est:

$$dV = Rdl.$$

le volume d'un tronçon de longueur définie de la voie est donc:

$$V = \int Rdl.$$



Pour calculer cette intégrale, il faudrait connaître la relation analytique entre  $R$  et  $l$ , ce qui est pratiquement impossible. Pour résoudre approximativement l'intégrale, on procède comme suit: Supposons que, sur l'axe des abscisses du profil en long, pour les diverses abscisses, nous portions en ordonnées des segments représentatifs, à une certaine échelle, des aires  $R$  ou  $D$ , des

profils en travers. Nous obtiendrions une courbe dont la surface représenterait  $\int R dl$ , donc  $V$ , à une certaine échelle. Si l'axe est rectiligne, cette méthode est théoriquement exacte. Mais, on ne connaît pas la variation continue de  $R$ . On substitue à la courbe une ligne polygonale, obtenue en joignant les sommets des ordonnées correspondant à des profils en travers situés à des distances finies les uns des autres.

Par approximation, on détermine  $V$  par la surface de cette ligne polygonale. Donc, en commençant la numérotation des profils par zéro:

$$V = \Sigma \frac{R_{n-1} + R_n}{2} l_n$$

On opère séparément pour les remblais et les déblais et l'on a:

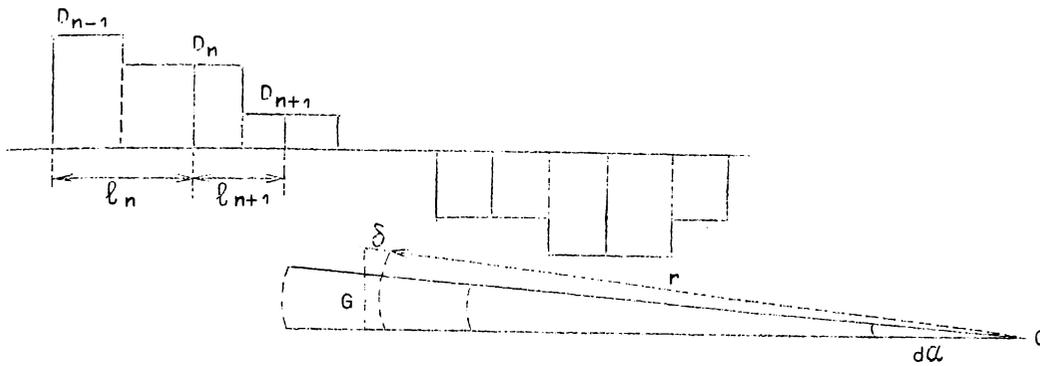
$$V_R = \Sigma_m^o \frac{R_{n-1} + R_n}{2} l_n$$

$$V_D = \Sigma_m^o \frac{D_{n-1} + D_n}{2} l_n$$

Ces formules correspondent à une surface des aires composées du trapèze. Ces formules peuvent s'écrire aussi:

$$V_R = \Sigma R_n \frac{l_n + l_{n+1}}{2}$$

$$V_D = \Sigma D_n \frac{l_n + l_{n+1}}{2}$$



La longueur  $\frac{l_n + l_{n+1}}{2}$  est appelée parfois longueur applicable au profil  $R_n$  ou  $D_n$ . Ces formules correspondent à une surface des aires composée d'une succession de rectangles.

Lorsque l'axe de la route est courbe, le volume élémentaire est:  
 $dV = R (r \pm \delta) d\alpha$  ( $r$  = rayon de courbure de l'axe;  $\delta$  = distance du centre de gravité à l'axe).

$$dV = Rdl + R \delta d\alpha .$$

Si le terrain naturel est horizontal,  $\delta = 0$  et  $dV = Rdl$ ;  $r d\alpha = dl$ .

En fait,  $\delta$  est toujours petit, tantôt positif et tantôt négatif; on le néglige donc et on écrit:  $dV = R dl$ .

La méthode de la moyenne des aires est donc applicable également dans ce cas, avec une approximation satisfaisante.

Cette méthode est celle de la moyenne des aires; c'est la plus appliquée. Elle donne d'ordinaire des erreurs par excès.

#### § 6.- FIGURATION GEOMETRIQUE.-

On choisit un axe des abscisses et, sur les ordonnées correspondant aux divers profils en travers, on porte des segments représentant vers le haut (ordonnées positives) les aires des profils de déblai; vers le bas les aires de profil en remblai (ordonnées négatives).

Dans les profils mixtes, il y aura, à la fois, une ordonnée positive et une ordonnée négative. On les figurera toutes deux.

Lorsqu'une ordonnée négative succède à une ordonnée positive (ou vice versa) on passe du déblai au remblai; il y a passage. Le point de passage s'obtient à la rencontre de l'axe des abscisses avec le côté correspondant de la ligne polygonale des aires.

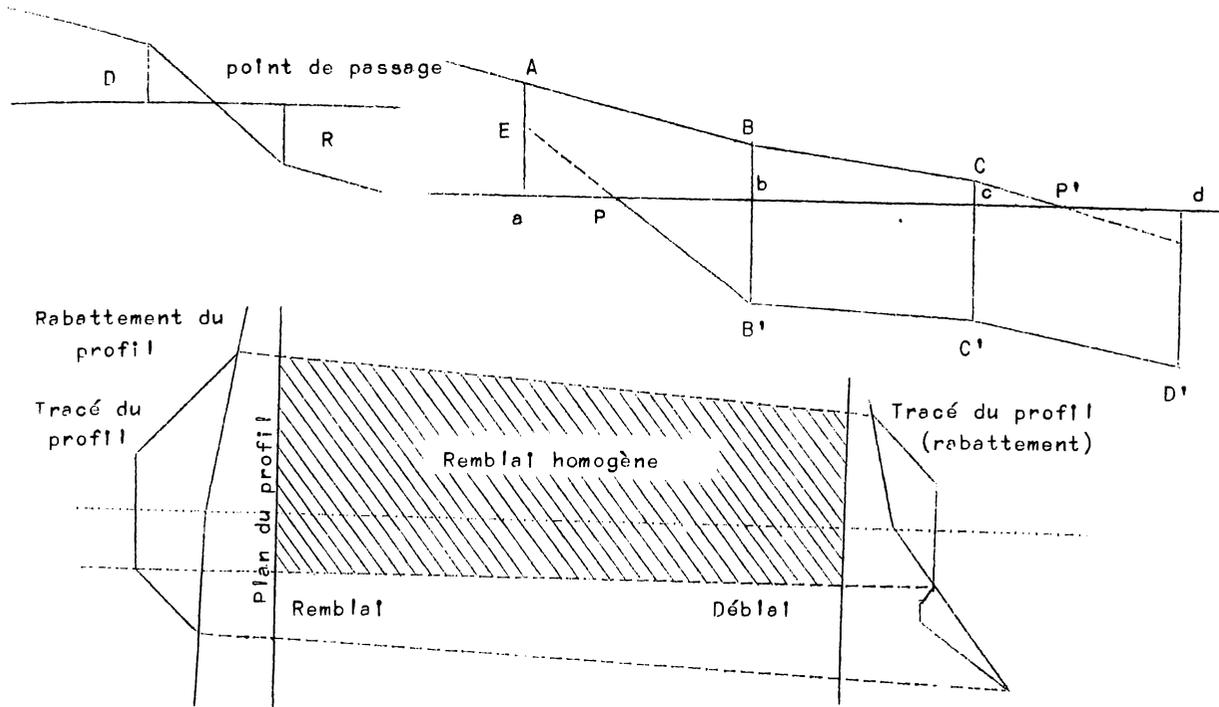
Pour le calcul, il faut nécessairement intercaler un profil fictif d'aire nulle. Lorsque deux profils mixtes se succèdent, on procède séparément à la cubature des volumes de remblai et de déblai.

Lorsqu'un profil homogène et un profil mixte se succèdent, il y a en réalité un point de passage. On le prendra conventionnellement en un point P obtenu en joignant B' au point E tel que

$$\frac{AE}{Ea} = \frac{bB}{bB'}$$

On remarquera que cette construction satisfait aux deux cas extrêmes:

$$Bb = 0 \text{ ou } bB' = 0$$



Dans les cas compliqués et quand on veut être assez précis, on divise la cubature en cas simples par des plans verticaux parallèles à l'axe passant par les points de changement de profil, cette méthode complique cependant les calculs pour un mince avantage.

La cubature s'effectue en déterminant les aires des surfaces de déblai (au-dessus de l'axe des abscisses) et des surfaces de remblai (en-dessous de l'axe des abscisses) par le calcul ou des méthodes graphiques (intégration graphique) ou par le planimètre.

On dresse habituellement un tableau d'avant-métré des terrassements, d'après le modèle ci-dessous. On y inscrit les distances applicables aux profils ou les entredistances, les aires partielles ou totales des profils et éventuellement leurs moyennes. On note les profils fictifs aux points de passage.

AVANT-MÉTRÉ DES TERRASSEMENTS.

No des profils	Entredistances ou longueurs applicables à chaque profil	Déblai					Remblai					Observations
		Surface des profils				Cubes	Surfaces des profils				Cubes	
		à gauche de l'axe	à droite de l'axe	totale	moyennes		à gauche de l'axe	à droite de l'axe	totale	moyennes		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0												
1												
P.F.												
2												

N.B. Les colonnes (6) et (11) n'existent pas lorsque l'on calcule les cubes au moyen des entredistances.

§7.- AUTRES METHODES DE CUBATURE.-

Il n'existe, en principe, aucune méthode exacte, puisque la surface du terrain ne peut, en aucun cas pratique, être considérée avec une rigueur complète.

Dans la méthode dite exacte, on suppose que le terrain est un paraboloïde hyperbolique en alignement droit, un héliçoïde, en courbe.

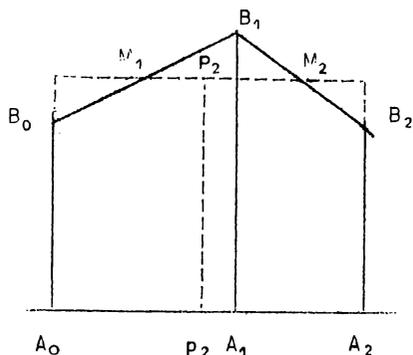
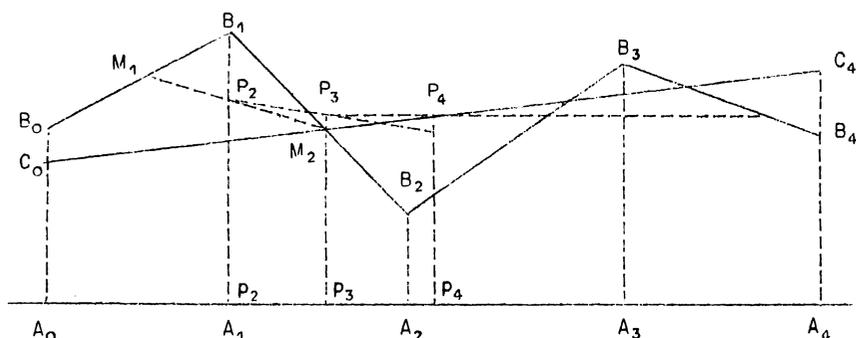
La plateforme de la voie est un plan ou un héliçoïde de vis à filet carré. On peut tracer des lignes de passage par des considérations géométriques et effectuer les cubatures par le calcul de volumes de troncs de prismes en alignement droit, par des formules plus compliquées encore en courbe. Les calculs sont fastidieux et purement théoriques, ils ne présentent guère d'intérêt que pour la cubature de massifs isolés. On obtient le volume plus sûrement en le décomposant en solides simples.

Une méthode approximative, rarement employée, est celle de l'aire de la section médiane. Pour chaque entreprofil, on multiplie la longueur par l'aire du profil équidistant des extrémités, rigoureusement calculé. Dans les courbes, on multiplie l'aire de cette section médiane par la longueur de l'arc de cercle passant approximativement par la projection du centre de gravité de cette section (méthode barocentrique).

Cette méthode donne le volume par défaut avec une erreur environ deux fois moindre que la méthode de la moyenne des aires (voir G. Darles, Cubature des terrasses).

§8.- COMPENSATION APPROXIMATIVE.-

Il y a compensation lorsque le volume des déblais est égal à celui des remblais, c'est-à-dire que la surface totale de la courbe des aires est nulle. Il y a approximativement compensation lorsque la surface de déblai du profil en long, (teintée en jaune) est égale à la surface de remblai (teintée en rose carmin). Le profil noir étant immuable, cette équivalence des aires dépend du profil rouge. On peut le faire varier de manière à assurer la compensation approximative, bien entendu en satisfaisant aux conditions de pente. Cette opération, peut être facilitée par le moyen géométrique du centre de compensation.



Soient  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, \dots$  le profil noir et  $C_0, C_4$  un profil rouge rectiligne réalisant la compensation approximative. Il en résulte que l'aire du trapèze  $A_0C_0C_4A_4$  est égale à la somme des aires des trapèzes  $A_0B_0B_1A_1, \dots, A_2B_3B_4A_4$ .

Soit  $p_4$  le milieu de  $A_0A_4$  et  $P_4$  le point de  $C_0C_4$  situé sur l'ordonnée médiane.

$$\text{Aire } A_0C_0C_4A_4 = A_0A_4 \times p_4 P_4 = \Sigma \text{ aires } A_0B_0B_1A_1,$$

donc

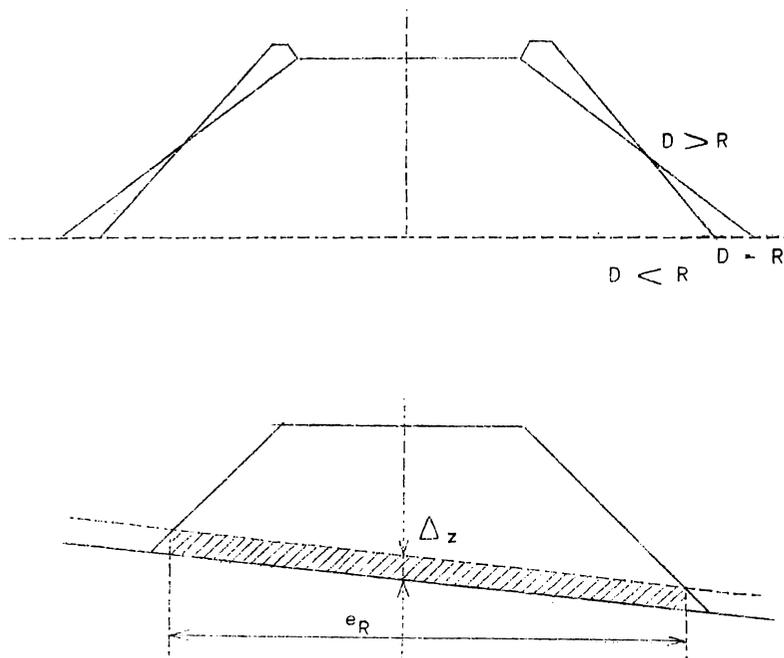
$$p_4 P_4 = \frac{\Sigma \text{ aires } A_0B_0B_1A_1}{A_0A_4}$$

Le point  $P_4$  est le centre de compensation du profil  $B_0, B_1, B_2, \dots, B_4$ ; toute droite passant par  $P_4$  jouit de la propriété de  $C_0, C_4$  de réaliser la compensation, de même que tout tracé polygonal symétrique par rapport à  $P_4$ . Le centre de compensation peut se déterminer géométriquement, de proche en proche, par la construction de Collignon.

Pour un profil à deux côtés, la droite qui joint les milieux est évidemment une ligne de compensation. Et le point  $P_2$  de cette ligne, sur la médiane de  $A_0, A_2$  est le centre de compensation correspondant. Cette construction se repète de proche en proche.

§ 9.- COMPENSATION EXACTE.-

La compensation précédemment établie serait exacte, si les profils en long de déblai et de remblai étant identiques, pour



une même différence des cotes rouges et noires, il y avait identité des aires des profils de déblai et de remblai. Il n'en est rien. L'identité n'est généralement atteinte que pour une cote déterminée et assez élevée. Pour les projets de routes, les aires des profils en déblai sont généralement supérieures à celles des profils en remblai, de même hauteur. L'inverse peut se produire pour hauteurs plus grandes (chemins de fer). Seulement les profils en long de remblai et de déblai ne sont pas identiques. Dans ces conditions pour que la compensation approximative soit exacte, il faudrait que la largeur moyen-

ne des profils de déblai soit égale à celle des profils de remblai, ce qui n'est qu'exceptionnellement réalisé. En considérant à la fois les profils en long et les profils en travers, on peut se faire une idée approximative des écarts entre ces largeurs moyennes.

Si les cubatures décèlent un excédent, par exemple du déblai sur le remblai, il faut procéder à un relèvement uniforme  $\Delta z$  du profil rouge, ce qui n'altère pas les pentes. Ainsi les déblais sont diminués et les remblais augmentés d'une quantité correspondante, afin de réaliser la compensation exacte.

Comme  $\Delta z$  est petit, en négligeant les quantités du second ordre, on peut écrire:

$$\Delta V_R = E_R \Delta z = e_R \Delta l \Delta z$$

$E_R$  étant la surface d'emprise du remblai.

$$\Delta V_D = E_D \Delta z = e_D \Delta l \Delta z$$

$E_D$  étant la surface d'emprise du déblai. La compensation exige que:

$$V_D - \Delta V_D = V_R + \Delta V_R$$

d'où  $\Delta V_R + \Delta V_D = V_D - V_R = (E_R + E_D) \Delta z = E \Delta z,$

$E$  étant la surface d'emprise totale:

Donc: 
$$\Delta z = \frac{V_D - V_R}{E}$$

La hauteur dont il faut relever le profil rouge est égale au quotient de l'excès du volume de déblai sur le volume de remblai par la surface totale de l'emprise.

§10.- EFFETS DU FOISONNEMENT ET DU TASSEMENT.-

Il faut tenir compte, dans la compensation, du foisonnement des déblais et du tassement des remblais, qui peuvent d'ailleurs être inégaux et dont la différence constitue le foisonnement permanent.

	<u>Fois.initial</u>	<u>Fois.permanent</u>
Sable, gravier, pierrailles .....	$\beta = 10$ à 20%	$\alpha = 1$ à 2%
Sable argileux .....	20 " 25%	3 " 5%
Marne .....	25 " 30%	6 " 8%
Argile compacte et roche tendre .....	30 à 35% et plus	8 " 10%
Roc dur .....	35 à 50%	10 à 15% et davantage

Donc, le volume des déblais doit être plus petit que celui des remblais de la quantité égale au foisonnement permanent.

$$R = \frac{1 + \alpha}{100 D}, \quad \text{d'où} \quad D = \frac{100}{100 + \alpha} R \quad R \simeq \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) R$$

Il faut en tenir compte dans la compensation.

Dans l'exécution des terrassements, on doit commencer par augmenter la cote d'une quantité correspondant au foisonnement temporaire. Le volume de remblai initial doit être:

$$D \frac{100 + \beta}{100} = \frac{100 + \beta}{100 + \alpha} R = \left(1 + \frac{\beta - \alpha}{100}\right) R,$$

$D$  et  $R$  étant les volumes finaux de déblai et de remblai. Il faut tenir compte de cette augmentation du volume pour le transport (coefficient de chargement  $\frac{1 + \beta}{100}$  . Pour les valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  voir le tableau du chap.III § 1).

§11.- MESURE DES AIRES DES PROFILS EN TRAVERS.-

A) PAR LE PLANIMETRE.- Convient pour les avant-projets ou bien lorsque le terrain naturel est très accidenté dans l'étendue d'un profil (terrain rocheux).

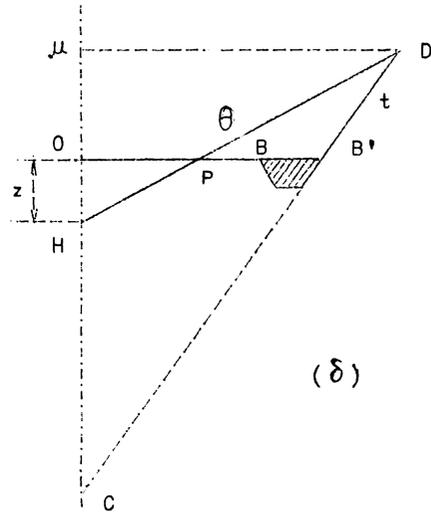
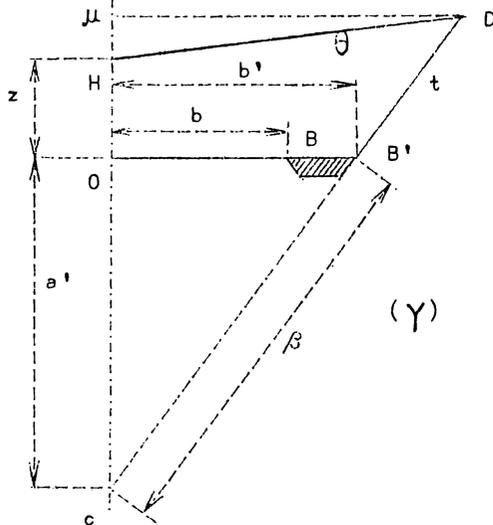
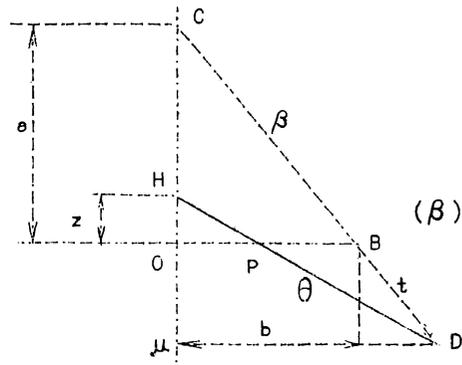
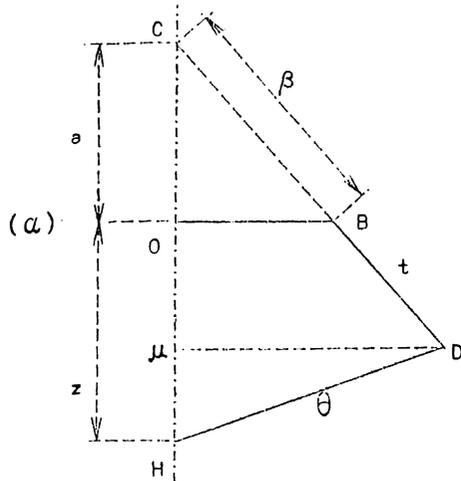
B) PROCEDES GEOMETRIQUES.- Il en existe de nombreux; nous n'en étudierons qu'un seul, le procédé de Garceau, qui substitue au demi-profil, un triangle de même aire, dont la mesure se réduit à celle d'une longueur. Observons que l'allure du terrain permet, en général, de le représenter à droite et à gauche de l'axe du profil en travers par des segments de droites. Soit un demi profil en remblai ACDB. On joint CB et on mène DE // à CB. Le point de rencontre E avec l'axe détermine le 3e sommet d'un triangle ACE équivalent à ACDB .



c) METHODE ALGEBRIQUE (Formule de Fourier).-

Nous adopterons les expressions de Mr d'Ocagne, qui sont les plus systématiques, mais nous les établirons d'une manière un peu différente.

Solent  $\theta$  et  $t$  les inclinaisons du terrain naturel et d'un talus.



$z$  est positif vers le haut (donc en cas de déblai).

$\theta$  est positif quand le terrain monte; en s'éloignant de l'axe vers l'extérieur du profil

$\theta$  est une quantité algébrique.

$t$  idem (donc en cas de déblai),  $t$  étant toujours donné en valeur absolue; doit donc être affecté d'un signe.

Calculons les coordonnées du point de rencontre  $a$  du terrain naturel et du talus:

$$\varepsilon(t - \theta) = bt + z$$

$$\varepsilon = \frac{bt + z}{t - \theta} \quad (\text{largeur d'emprise})$$

$$h = t(\varepsilon - b)$$

La longueur BC du talus est:  $\beta = (\varepsilon - b) \sqrt{1 + t^2}$

L'ordonnée à l'origine de AC est  $x_0 = \frac{-z}{\theta}$

Les aires des demi-profiles sont entièrement déterminés par la considération de deux triangles ayant un angle commun et dont les côtés communs sont l'axe et la ligne du talus, les 3<sup>es</sup> côtés étant respectivement les lignes de terrain et de plateforme.

C) PROFIL HOMOGÈNE EN REMBLAI. -  $z < 0, -t < 0, \theta \geq 0.$

Si  $\theta > 0, x_0 - \frac{-z}{\theta} > b$ , d'où  $b\theta + z < 0$

Si  $\theta < 0, -\frac{z}{\theta} < 0$ , donc  $\frac{-z}{\theta} < b$  ou  $b\theta + z < 0$ .

Posons  $OC = bt = a$ ,  $Bc = \beta = b\sqrt{1+t^2} = sb$ , aire  $OCB = \frac{b^2 t}{2} = o$

On a  $CM = \varepsilon t$ ,  $MH = \varepsilon\theta$ , donc on a:  $a - z = \varepsilon(t + \theta)$  et  $E = \Sigma = \frac{a - z}{t - \theta}$

D'autre part,  $T = s\varepsilon - \beta = \mathcal{C}$

Enfin  $R = HCD - OCB = \frac{(a - z)\varepsilon}{2} - o = \frac{(a - z)^2}{2(t + \theta)} - o = \sigma - o$ .

$\beta$ ) PROFIL MIXTE EN REMBLAI. -

$z > 0, -t < 0, \theta < 0, x_0 = \frac{-z}{\theta} < b$ , donc  $z + b\theta < 0$ ,

On a comme ci-dessus:  $E = \Sigma, T = \mathcal{C}$

Mais  $D = \frac{z^2}{2[\theta]} = \gamma; R = HCD + OHP - OCB = \sigma + \gamma - o = \sigma - o + \gamma$

$\gamma$ ) PROFIL HOMOGÈNE EN DEBLAI. -  $z > 0, t' > 0, \theta \geq 0.$

Si  $\theta > 0, \frac{-z}{\theta} < 0$ , donc  $\frac{-z}{\theta} < b$  et  $b\theta + z > 0$

Si  $\theta < 0, \frac{-z}{\theta} > b, b + \frac{z}{\theta} < 0$  d'où  $b\theta + z > 0$

Posons  $OC = b't' = a'$ ,  $B'c - BB' = \sqrt{1+t'^2} b' - \varphi = s'b' - \varphi = \beta'$ ,  $\varphi$  étant le périmètre du fossé; aire  $OB'B'C = \frac{b'^2 t'}{2} - F = c'$ ,  $F$  étant l'aire du fossé.

On a:  $E = \frac{a' + z}{t' + \theta} = \varepsilon'; T = \varepsilon's' - \beta' = \mathcal{C}'$

$D = CHD - c' = \frac{\varepsilon'(a' + z)}{2(t' - \theta)} - c' = \sigma' - o'$

$\delta$ ) PROFIL MIXTE EN DEBLAI. -

$z < 0, t' > 0, \theta > 0$ ; donc:  $\frac{-z}{\theta} < b$  et  $b\theta + z > 0$ .

Comme précédemment,  $E = \varepsilon', T = \mathcal{C}'$

$R = \frac{z^2}{2\theta} = \frac{z^2}{2[\theta]} - \gamma$

$D = HCD + OPH - c' = \sigma' + \gamma - c' = \sigma' - c' + \gamma$ .

En résumé, en posant:  $bt = a, b't' = a', \frac{b^2 t}{2} = o, \frac{b'^2 t'}{2} = F - o'$ ,

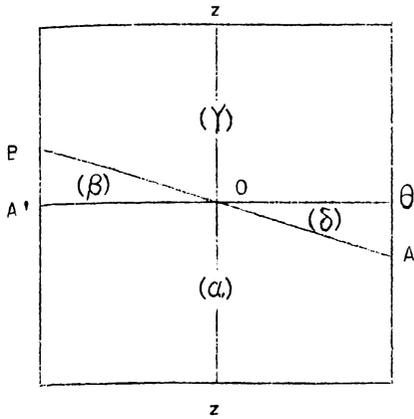
$\sqrt{1+t^2} = s, \sqrt{1+t'^2} = s', bs = \beta, b's' - \varphi = \beta'$ ;

puis  $R: \varepsilon = \frac{a - z}{t + \theta}, \mathcal{C} = s\varepsilon - \beta, \sigma = \frac{(a - z)^2}{2(t + \theta)}$

$D: \varepsilon' = \frac{a' + z}{t' - \theta}, \mathcal{C}' = s'\varepsilon' - \beta', \sigma' = \frac{(a' + z)^2}{2(t' - \theta)}$

$C: \gamma = \frac{z^2}{2[\theta]}$

Les valeurs des éléments cherchés dans les divers cas sont:



cas $\alpha$ ( $z < 0, z + b\theta < 0$ )	$E = \Sigma$	$T = \mathcal{C}$	$R = \sigma - c$	$D = 0$
cas $\beta$ ( $z > 0, z + b\theta < 0$ )	$\Sigma$	$\mathcal{C}$	$\sigma - c + \gamma$	$\gamma$
cas $\gamma$ ( $z > 0, z + b\theta > 0$ )	$\Sigma'$	$\mathcal{C}'$	0	$\sigma' - c'$
cas $\delta$ ( $z < 0, z + b\theta > 0$ )	$\Sigma'$	$\mathcal{C}'$	$\gamma$	$\sigma' - c' + \gamma$

On distingue aisément entre les divers cas en se reportant au profil. Si on ne l'a pas sous les yeux, on peut recourir au tableau de Lalanne. Les éléments distinguant les cas sont  $\theta$  et  $z$ . En les considérant comme coordonnées d'un point en coordonnées cartésiennes, à chaque demi-profil correspond un point du plan. On trace les axes des  $\theta$  (abscisses) et des  $z$  (ordonnées) et la droite AB d'équation  $z + b\theta = 0$ .

Si le point est en dessous de l'axe  $\theta\theta'$  et de la droite BA, il y a remblai homogène ( $\alpha$ ).  
 S'il est au-dessus de  $\theta\theta'$  et en dessous de BA, il y a remblai mixte ( $\beta$ ).  
 S'il est au-dessus de  $\theta\theta'$  et au-dessus de BA, il y a déblai homogène ( $\gamma$ ).  
 Enfin, s'il est en-dessous de  $\theta\theta'$  et au-dessus de BA, il y a déblai mixte ( $\delta$ ).  
 A l'aide des formules, on calcule successivement les deux demi-profil d'un profil en travers et on inscrit les résultats partiels et le total dans le tableau du modèle indiqué.

D) PROCEDES PAR LES TABLES NUMERIQUES. - D'après les formules algébriques, certains auteurs ont établi des tables numériques, notamment Coriois, Lefort, etc... Elles ne sont plus guère employées pratiquement.

E) PROCEDES PAR LES TABLES GRAPHIQUES, NOMOGRAMMES OU ABAQUES. - Il existe de très nombreux abaques; un des plus connus est l'abaque anamorphosé de Lalanne. Bien entendu, ils sont établis pour des valeurs particulières de  $b, b', t$  ou  $t'$ . Un des nomogrammes les plus pratiques est celui à points alignés de M. d'Ocagne; il interprète les formules algébriques sous la forme exposée ci-dessus. Il y a un nomogramme pour le déblai (D), un pour le remblai (R) et un pour le terme complémentaire (C). Ils sont établis pour des valeurs particulières de  $b, b', t, t', F$  et  $q$ . (Voir M. d'Ocagne, Nomographie ou Cours de Topométrie).

METHODE SOMMAIRE DE CUBATURE PAR REDUCTION DE LA DECLIVITE DU TERRAIN A L'HORIZON. -

La méthode est due à une observation de Lalanne.

Lorsque le terrain naturel est horizontal,  $\theta = 0$  et les formules algébriques se simplifient. En cas de remblai, nécessairement homogène, on a, pour le profil entier:

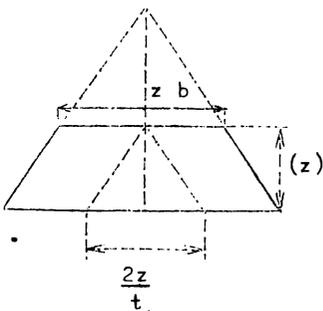
$$R = \frac{z^2}{t} - 2bz = \frac{z^2}{t} + 2bz$$

Le volume du remblai est:

$$V_R = \Sigma \frac{z^2}{t} + 2b \Sigma |z|$$

Si la longueur des entreprofils est constante et si  $n$  est leur nombre, on a:

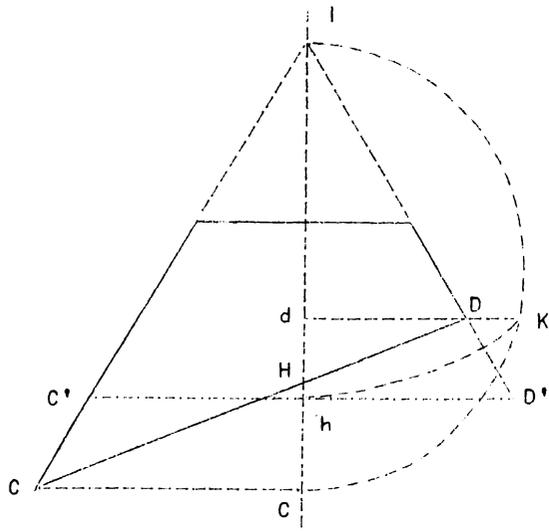
$$V_R = L \left( \frac{1}{t} \Sigma \frac{z^2}{n} + 2b \Sigma \frac{|z|}{n} \right)$$



La même formule convient pour le déblai, en remplaçant  $b$  par  $b'$ ,  $t$  par  $t'$  et en ajoutant le volume  $2 FL$  des fossés. Si l'on suppose le volume divisé en entre-profilés infiniment voisins, on a :

$$V_R = \frac{1}{t} \int z^2 dl + 2b \int |z| \quad dl = \frac{2}{t} \int \frac{z^2 dl}{2} + 2b \int |z| \quad dl = 2 \left( \frac{M}{t} + b S \right)$$

$S$  est la surface de la courbe des cotes  $z$  (profil en long réduit à l'horizon), et  $M$  son moment par rapport à l'axe des abscisses. Ces quantités peuvent se déterminer par intégration graphique. Il n'est donc pas nécessaire, pour la cubature, de déterminer les surfaces des profils.



D'après Mr Daries, pour les valeurs de  $\theta$  inférieures à 0,10 ou 0,15, l'erreur totale sur les cubatures, en supposant  $\theta = 0$  et en employant la méthode expérimentive, est inférieure à 5%.

On peut rendre la méthode rigoureuse en procédant à la réduction de la déclivité du terrain à l'horizon, par la construction graphique de Mr Boulanger. Soit  $C'D'$  l'horizontal, donnant le profil de même aire que  $CD$ .

On a :  $IC \cdot ID = \overline{ID'}^2$

ou  $IC \cdot Id = \overline{Ih'}^2$

d'où la construction indiquée, car

$$IK^2 = IC \cdot Id \quad \text{et} \quad Ih = IK$$

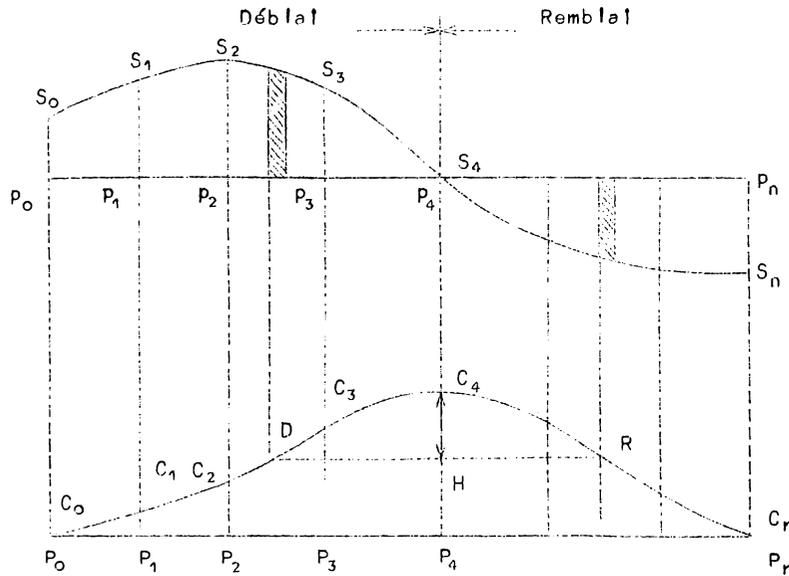
On observe que, pour les faibles valeurs de  $\theta$ ,  $h$  est toujours voisin de  $H$ , ce qui corrobore l'observation faite plus haut au sujet de l'erreur commise en supposant  $\theta = 0$

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

MOUVEMENT ET RÉPARTITION DES TERRES  
DISTANCES MOYENNES DE TRANSPORT

§ 1.- COURBE DE BRUCKNER.-

Pour l'évaluation des cubatures, nous avons tracé la courbe des aires



des profils de déblai et de remblai. Les surfaces comprises entre ces courbes et l'axe des abscisses représentent les volumes des déblais ou remblais correspondants.

Ces courbes constituent les bases de l'étude de la répartition et du transport des terres. Il faut cependant les transformer à cet effet, en observant que dans les profils mixtes, les déblais sont employés, dans la mesure du possible, dans le profil même. Dans les profils mixtes, on portera donc, comme ordonnée, la différence des volumes de remblai et de déblai, de sorte

que la courbe des aires devient un polygone unique et continu, ayant éventuellement des points de passage fictifs. A l'aide de cette courbe, on peut déterminer la courbe de Brückner, qui représente les volumes cumulés, tant positifs (déblais) que négatifs (remblais), après compensation transversale, c'est-à-dire les volumes cumulés intervenant dans le mouvement et la répartition longitudinaux. Cette courbe n'est donc autre chose que la ligne intégrale de la courbe des aires telle qu'elle vient d'être définie. Cette dernière étant polygonale, la courbe de Brückner sera composée d'une succession d'arcs de paraboles tangents. On pourrait aussi tracer la courbe de Brückner par la méthode de Mohr; on obtiendrait alors un polygone. En partant du diagramme des aires en gradins, on obtiendrait aussi, par intégration graphique, un polygone rectiligne. L'épure se dispose très facilement. En abscisses, on porte les distances cumulées. Les aires et volumes de déblai sont positifs, les aires et volumes de remblai négatifs. Soit  $S_0 S_n$  un segment de courbe des aires dans l'étendue duquel il y a compensation. Il y a un point de passage  $p_4$ ; le déblai est à gauche, le remblai à droite. La courbe de Brückner part de l'axe des abscisses et est d'abord croissante; elle atteint son maximum en  $c_4$ , sur l'ordonnée de  $p_4$ , puis décroît pour s'annuler en  $c_n$  sur l'ordonnée de  $s_n$  et sur l'horizontale de  $P_0$  puisqu'il y a compensation.  $C_0 C_n$  est un segment de répartition,  $P_0 P_n$  est une ligne de répartition. Il est évident que les terrassements se feront en par-

tant de  $P_4$  et en rejetant les déblais immédiatement à gauche de ce point, en remblai immédiatement à droite.

Si on considère une horizontale quelconque DR, la portion très petite de déblai située en D sera transportée en remblai à l'autre extrémité R de l'horizontale. Le remblai progressera en même temps que le déblai, les longueurs de l'un et de l'autre sont définies par les segments délimités par  $C_4$  et  $P_4$  sur une corde horizontale quelconque DR du segment. La flèche  $HC_4$  de cette corde mesure la quantité de terres déplacée; le remblai est égal au déblai.  $P_4C_4$  mesure le cube total correspondant au segment  $C_0C_n$ .

Donc, tout segment limité à une horizontale est un segment de répartition, toute horizontale, une ligne de répartition.

La courbe de Brückner possède donc les propriétés géométriques suivantes: 1) Les maxima et minima correspondent aux points de passage de la courbe des aires;

2) La nature des profils est la même dans l'intervalle compris entre un maxima et un minimum ou inversement.

3) Des horizontales déterminent sur la courbe des segments dans l'étendue desquels les terrassements se compensent.

## §2.-MOMENTS DE TRANSPORT ET DISTANCES MOYENNES.-

On appelle moment de transport d'un cube de terrassement, le produit de son volume par la distance de transport. Le travail de transport est proportionnel à ce moment en terrain horizontal.

Si on considère un volume élémentaire représenté par  $dy$  de la courbe de Brückner au point D et si  $x$  est la longueur de la corde horizontale qui représente la distance de transport de  $dy$ ,  $dM = xdy$  est le moment élémentaire correspondant.

Le moment total, proportionnel au prix total de transport, est:

$$M = \int x dy = \text{aire du segment } P_0C_4P_n$$

Donc: L'aire de la courbe de Brückner déterminée par une ligne de répartition est le moment de transport correspondant.

On appelle distance moyenne de transport d'un segment de répartition la distance de transport appliquée au cube total transporté qui donnerait lieu à la même dépense, c'est-à-dire au même moment. Si  $V$  est le volume,  $\Delta$  la distance moyenne:

$$V \Delta = M$$

donc: 
$$\Delta = \frac{M}{V} = \frac{\text{aire } P_0C_4P_n}{P_4C_4}$$

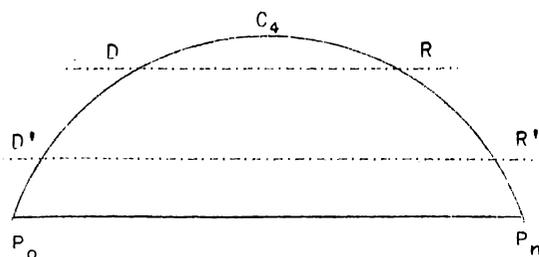
Cette distance moyenne est la base du rectangle de hauteur  $P_4C_4$  et d'aire équivalente à celle du segment  $P_0C_4P_n$ : c'est la corde horizontale moyenne. C'est la distance des centres de gravité des masses de déblai et de remblai dans le cas simple du segment  $P_0C_4P_n$ , représenté.

L'aire du segment peut se déterminer par diverses méthodes géométriques ou graphiques; il est avantageux d'employer pour toute l'épure, l'intégration graphique. La courbe de Brückner est formée, avons-nous vu, d'arcs de paraboles du 2e degré; son intégrale est composée d'une succession d'arcs de paraboles cubiques.

## §3.-LIGNE DE REPARTITION, CAS SIMPLES.-

On appelle ligne de répartition, l'horizontale ou l'ensemble des horizontales qui déterminent à la fois la répartition des terres, l'aire de la courbe

de Brückner et les distances moyennes de transport. Dans le cas simple que nous venons d'examiner, il y a compensation; les deux extrémités de la courbe sont sur une même horizontale, qui est généralement la ligne de répartition.



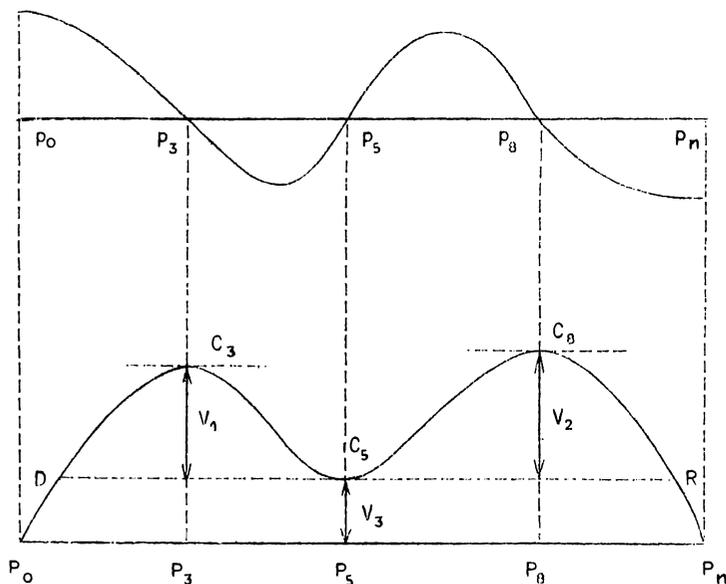
Toute autre ligne de répartition augmente le volume des terrassements. Elle entraîne, en effet aux deux extrémités un dépôt ou un emprunt qui se compensent.

Dans le cas, où il y aurait lieu de distinguer entre plusieurs modes de transport, se succédant d'après la distance maximum de transport (0 à 90 m. à la brouette, 90 à 200 m. au tombereau, au-

delà en wagon), on trace les horizontales interceptant des segments de cette longueur maximum, p.ex. DR pour la brouette, D'R' pour le tombereau, etc... Ce segment DC<sub>4</sub>R correspond au transport à la brouette, il détermine le cube transporté, le moment de transport et la distance moyenne.

Les segments D'D et RR' correspondent au transport au tombereau, ils définissent les mêmes éléments.

Cette répartition n'est plus guère usitée de nos jours, tous les transports se font, en général, par le même moyen: wagonnets Decauville ou wagonnets de terrassement ou camions.



Considérons un segment à partie rentrante, mais donnant lieu à compensation. Par le point le plus bas, menons l'horizontale DR.

Nous voyons que les segments DC<sub>3</sub>C<sub>5</sub> et C<sub>5</sub>C<sub>8</sub>C<sub>3</sub> se compensent et que les terrassements se feront comme si la ligne de répartition était DC<sub>5</sub>R; quant aux déblais du segment P<sub>0</sub>D, ils seront transportés pour former les remblais de RP<sub>n</sub>. Le cube total mis en oeuvre est la somme des cubes V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>3</sub> des différents segments. Il n'y a rien de changé pour la détermination des moments de transport total ou partiels et des distances moyen-

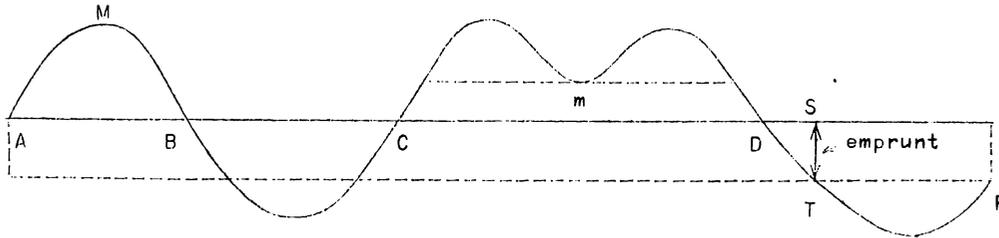
nes de transport.

#### 94.- REPARTITION DANS LE CAS GENERAL.-

Dans le cas général, la ligne de Brückner ne se termine pas sur l'axe des abscisses. Si elle reste au-dessus, il y a excès de déblai, il faut un dépôt. Si elle reste au-dessous, il y a excès de remblai, il faut un emprunt.

Si on prend comme ligne de répartition, l'axe des abscisses, la zone de dépôt ou d'emprunt en résulte immédiatement. D'après ce que nous avons vu

dans les § précédents, la zone d'emprunt, dans le cas de la figure, est la région ST. On pourrait la placer en R, mais on voit que l'aire de la courbe, donc le moment de transport augmente. Donc, la ligne de répartition la plus



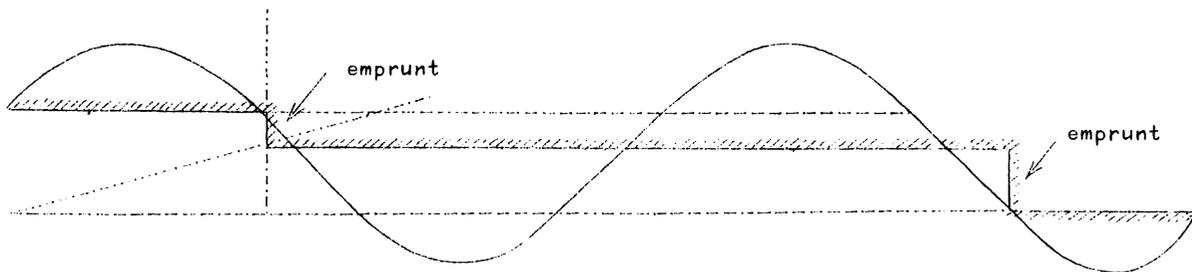
favorable est ASTR. Si on prend comme ligne de répartition, l'horizontale passant par l'extrémité R, l'emprunt total se fait en A. Mais on voit que cette solution est moins avantageuse que la précédente, car elle donne une aire plus grande, donc un moment de transport plus élevé.

La ligne de répartition peut d'ailleurs occuper une position quelconque; il faut rechercher la plus avantageuse. C'est elle qui donne le plus petit moment de transport, c'est-à-dire intercepte l'aire la plus petite de la courbe de Brückner. Elle doit toutefois satisfaire aussi à la condition de ne pas augmenter le volume des terrassements, dépôts et emprunts compris.

Observons que si la ligne de répartition se déplace entre les horizontales passant par les extrémités de la courbe, le volume total des terrassements ne change pas. Il augmente lorsque la ligne de répartition sort de cette bande appelée, pour cette raison, bande utile. Il est apparent sur la figure qu'en sortant de la bande utile on crée aux deux extrémités un déblai et un remblai supplémentaires qui se compensent, dont la distance de transport est grande et qui représentent un travail perdu.

Donc la ligne de répartition doit être comprise entre les horizontales extrêmes. La plus favorable est celle qui donne l'aire minimum.

L'aire est formée d'une somme d'aires de segments, les uns à maxima, les autres à minima, dont nous devons considérer la somme des valeurs absolues comme surface totale.



Appelons  $s$  les cordes des premiers, qui diminuent vers le haut et  $i$  les cordes des seconds qui diminuent vers le bas.

$$\text{L'aire } \sigma = \Sigma \sigma_s - \Sigma \sigma_i \quad (\sigma_s = \int_0^y s dy > 0 \text{ et } \sigma_i = \int_0^y i dy < 0)$$

$$\text{Il faut que: } d\sigma = \Sigma d\sigma_s - \Sigma d\sigma_i = 0$$

$$\text{ou } d\sigma = dy [\Sigma s - \Sigma i] = 0,$$

$$\text{donc } \Sigma s = \Sigma i.$$

La ligne de répartition la plus favorable est celle qui assure la condition de l'égalité de la somme des cordes  $s$  et de la somme des cordes  $i$ , ou une somme nulle des cordes, en affectant les cordes  $s$  du signe positif et les cordes  $i$  du signe négatif.

Pour trouver cette ligne, on trace, à partir de l'ordonnée passant par l'origine de la courbe la ligne sommatoire des cordes (suivant la convention de signes énoncée). On en cherche les points sur les horizontales extrêmes. S'ils sont du même côté de l'ordonnée initiale, la ligne sommatoire coupe l'ordonnée en dehors de la bande utile. La solution optimum pour la ligne de répartition est alors l'horizontale extrême donnant la plus petite valeur de

$\Sigma s - \Sigma i$ , donc celle ayant la plus petite abscisse de ligne sommatoire. Si les deux points sont de part et d'autre de l'ordonnée, la ligne sommatoire rencontre l'ordonnée dans la bande utile et ce point de rencontre détermine la situation de la ligne de répartition. La ligne sommatoire est à peu près polygonale ou droite. Elle est théoriquement polygonale si on détermine pour la ligne de Brückner un polygone par la méthode de Mohr. Il suffit généralement d'en déterminer un petit nombre de points.

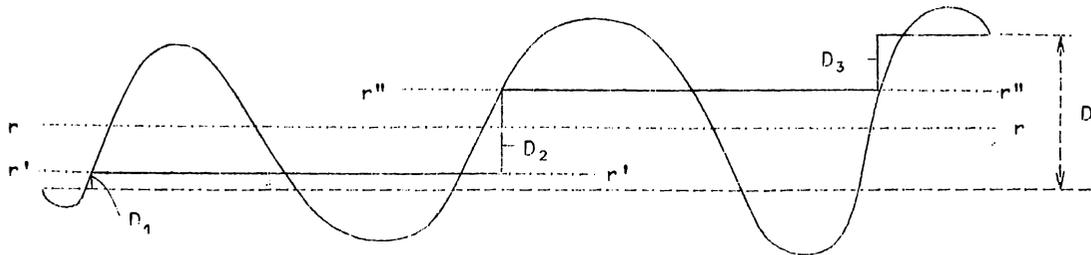
La ligne de répartition ainsi trouvée détermine complètement la répartition et le transport des terres, les emprunts et dépôts et le moment de transport, ainsi que la distance moyenne.

Observons que, si les horizontales extrêmes interceptent des segments de la ligne de Brückner, comme la ligne de répartition doit se mouvoir dans l'intérieur de la bande utile, ces segments extrêmes ne doivent pas intervenir dans la recherche précédente et les ordonnées initiales ou finales peuvent être reportées à leurs extrémités intérieures.

Observons que la différence entre les ordonnées initiales et finales de la courbe de Brückner n'a pas de signification. Elle ne représente pas le volume total de terre mis en oeuvre ainsi qu'il a été montré à la fin du chapitre précédent. De même, la différence des ordonnées initiale et finale de la courbe des moments (intégrale de la courbe de Brückner) ne représente pas le moment de transport total puisque ce dernier est égal à la somme arithmétique des aires des segments de répartition des deux sens. Or l'ordonnée finale donne leur somme algébrique.

#### §5.- LIGNES DE REPARTITION EN GRADINS.-

Dans la bande utile, il est possible de prendre une ligne de répartition en gradins formée de plusieurs tronçons d'horizontales et donnant une solution plus avantageuse qu'une ligne de répartition non brisée.



Considérons une courbe de Brückner à plusieurs segments et soit  $rr$  la ligne de répartition déterminée comme ci-dessus. Divisons la courbe en deux groupes, l'un formé de deux premiers segments, l'autre, du reste.

Par les méthodes du § précédent, nous déterminons pour chacun des groupes la ligne de répartition la plus avantageuse. Pour le 1er groupe de 2 segments, c'est  $r'r'$  telle que:  $s' = i'$ .

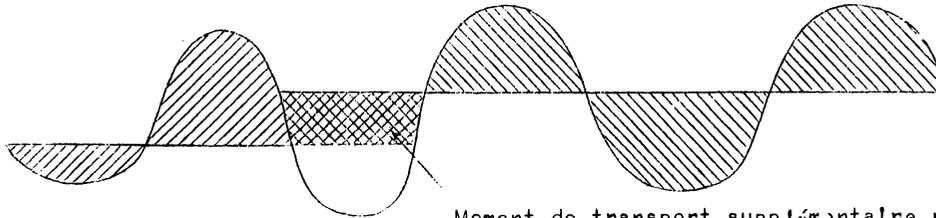
Pour le 2e groupe, c'est  $r''r''$  telle que  $\Sigma s'' = \Sigma i''$ .

Il est évident que l'aire correspondant à ces deux lignes de répartition est inférieure à celle qui correspond à  $rr$ .

Pour le second groupe, on peut procéder comme pour le premier et de proche en proche déterminer une série de lignes de répartition irréductibles pour les segments considérés.

Elles doivent remplir diverses conditions:

- a) être situées à l'intérieur de la bande utile, pour la raison précédemment exposée;
- b) être disposées de telle sorte que leurs extrémités ne se recouvrent pas, ce qui donnerait lieu à des transports supplémentaires.

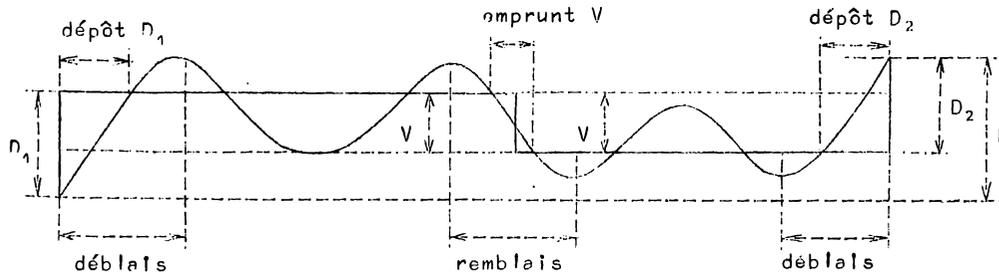


Moment de transport supplémentaire résultant du recouvrement des lignes de répartition en gradins.

- c) ne pas augmenter le volume total des terres, compte tenu des emprunts et dépôts.

Il en résulte qu'elles doivent être disposées en gradins ascendants au-dessus de l'axe des abscisses, en gradins descendants en-dessous. L'inverse donne lieu à des terrassements supplémentaires, d'après le croquis.

Les dernières conditions annoncées exigent que les lignes de répartition partielles des divers gradins soient toutes relatives à des groupes



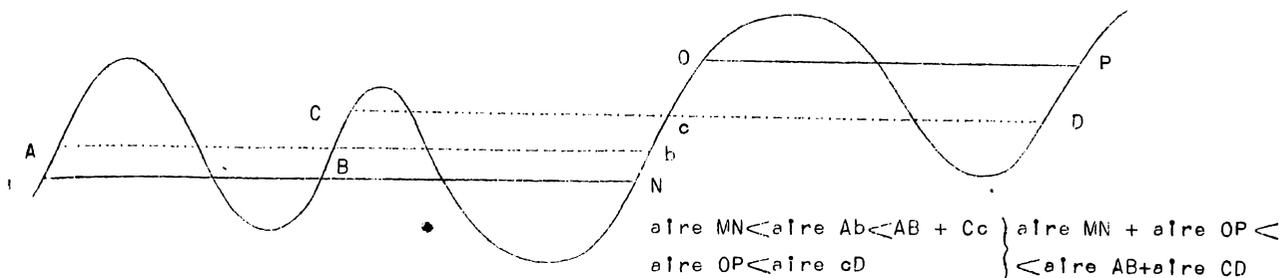
$V$  = volume de terre supplémentaire.  
 $D = D_1 + D_2 - V$ .

de nombres pairs de segments, sauf si elles coïncident avec les horizontales des extrémités. Dans ce dernier cas, elles ne doivent pas satisfaire à la condition de l'égalité des  $\Sigma s$  et des  $\Sigma i$ , mais correspondre à la somme

$\Sigma s - \Sigma i$  la plus petite en valeur absolue.

- d) Enfin, elles doivent être plus basses possibles si elles sont au-dessus de l'axe des abscisses, les plus hautes possibles, si elles sont en-dessous.

Il est en effet, possible de déterminer plusieurs systèmes de lignes de répartition irréductibles, le plus avantageux satisfait à la condition d) comme le montre le croquis ci-dessous (voir Henry, Théorie et Pratique du mouvement des terres par le procédé Brückner).

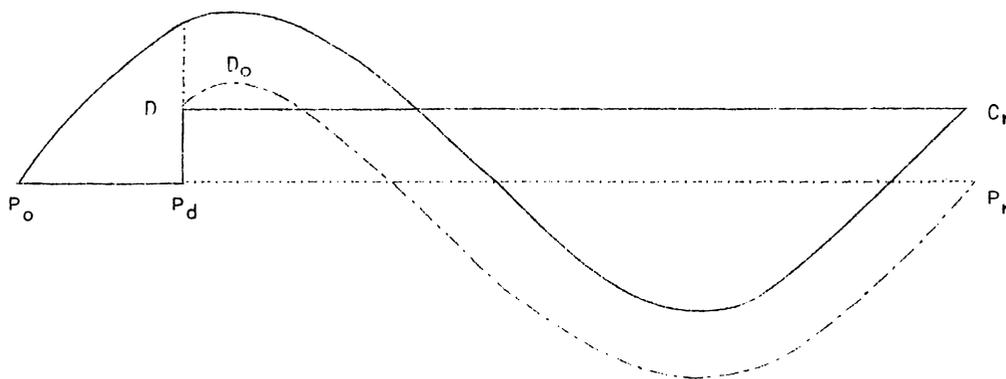


CAS OU LES LIEUX D'EMPRUNT OU DE DEPOT SONT IMPOSES.-

Dans les conditions du § précédent, les lieux d'emprunt ou de dépôt sont complètement déterminés par la ligne de répartition choisie. La situation peut se présenter différemment lorsque les lieux d'emprunt ou de dépôt sont imposés, ainsi qu'éventuellement les cubes.

Mr d'Ocagne donne une représentation très intuitive et très simple de la solution par déplacement vertical de certains segments de la courbe de Brückner (v.fig. ci-dessous). Cette construction est applicable aussi s'il y a plusieurs dépôts ou emprunts.

Pratiquement il est gênant de déplacer la courbe; il est préférable de déplacer la ligne de répartition (dans le cas de la fig. en D<sub>0</sub>C<sub>n</sub>) selon la mé-



thode proposée par Mr Henry. On pourrait procéder de même dans le cas de lieux de dépôt ou d'emprunt imposés en nombre quelconque, les cubes étant fixés, ou déterminer, la répartition la plus avantageuse entre plusieurs lieux d'emprunt ou de dépôt imposés sans fixation de cubes.

- DISPOSITIONS PRATIQUES.-

Nous avons indiqué que l'on peut tracer la courbe de Brückner et son

Cubes des déblais pour chaque profil	Cubes des remblais pour chaque profil	Cubes à employer dans le profil même	Excès des cubes		Cubes cumulés		Segments de répartition	Cubes	Distances moyennes	Moment de transport	Observations
			de déblai	de remblai	ordonnées positives	ordonnées négatives					
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

intégrale à partir de la courbe des aires des profils par intégration graphique.

La courbe de Brückner s'accompagne d'un tableau d'après les indications de la page précédente.

La question des prix de transport est examinée dans un chapitre ultérieur.

#### §8.- CRITIQUE DE LA METHODE DE BRÜCKNER.-

La méthode de Brückner constitue une étude systématique et rationnelle du mouvement des terres. Elle suppose cependant un transport horizontal suivant un axe longitudinal. Elle ne rend pas compte du travail de transport latéral (profils mixtes) non plus que du travail de transport vertical (pentes et rampes). Il y a donc des termes complémentaires ou secondaires à ajouter au travail de transport déterminé par la méthode de Brückner.

Le libre choix de la ligne de répartition donne assez bien de latitude, mais sa fixation détermine complètement la répartition théorique des terres. Elle suppose notamment que les masses sont transportées par quantités élémentaires successives.

Cela correspond assez bien au transport par véhicules isolés: brouette, tombereau, wagonnet avec déversement en tête. Mais l'exécution des terrassements par trains de véhicules à déversement latéral ne correspond pas à cette hypothèse simple et complique la notion mathématique de distance moyenne de transport. La méthode de Brückner n'est donc qu'une approximation.

Il y a quelques observations à faire au sujet des dépôts ou emprunts: La méthode de Brückner permet théoriquement d'en déterminer les emplacements les plus favorables. Pratiquement, le cas ne peut guère être envisagé que dans les pays où les terrains et les terres ont peu de valeur. Là où les terrains sont mis en valeur, les emprunts et dépôts constituent toujours une gêne, tôt ou tard ils doivent disparaître et ils entraînent ainsi non seulement une immobilisation de valeurs, mais, en outre, une double dépense de constitution et d'enlèvement. En principe, il faut donc éviter les emprunts et dépôts.

Des exceptions à cette règle s'imposent toutefois lorsque les dépôts peuvent servir à combler des dépressions de terrain, mares, etc... et servir ainsi à mettre des terrains en valeur, de même quand les emprunts peuvent réaliser le déblai de buttes ou contreforts gênants. Les lieux de dépôt ou d'emprunt sont alors déterminés d'avance, on en tient compte dans l'épure de Brückner.

En pays industriels, les voies principales de communication sont souvent établies dans les vallées et demandent beaucoup de remblai. On utilise les déchets industriels abondants et souvent abandonnés gratuitement: scories, laitiers, déblais de mines. Au voisinage des grandes villes, on utilise les immondices ou leurs cendres. L'ingénieur doit, bien entendu, vérifier la qualité de ces matériaux aux points de vue: possibilité de combustion, cohésion en remblai, poussée, influence de l'humidité, actions chimiques sur les matériaux, etc. Les distances de transport sont parfois élevées, mais comme on utilise des trains complets à voie normale, les transports sont économiques.

En cas d'excès de déblai, si les terres disponibles représentent une valeur, on la réalise par vente à des tiers. Sinon, on les laisse enlever gratuitement. Le chargement et le transport s'effectuent généralement aux frais du preneur.

Les grandes exploitations (compagnies de chemin de fer) emploient généralement leurs déblais à d'autres travaux.

Ces opérations sortent du cadre de l'épure de Brückner. Pour les emprunts, le moment et le prix de transport sont aisés à déterminer, on peut ad-

mettre la distance du lieu d'emprunt ou lieu de déchargement (centres de gravité des masses). Pour les déblais en excès, la distance de transport est nulle. Les effets de rampes seront envisagés dans l'établissement du prix de transport. Dans le terrassement de chemins de fer et de routes, les masses de déblai sont généralement situées à un niveau supérieur aux remblais, les transports des terres se font généralement en pente. Du moins, les remblais sont disposés en-dessous de la voie, les déblais sont enlevés au-dessus de la voie. Le matériel de transport vide, doit généralement seul remonter en rampe. Dans ces conditions, les rampes sont sans influence. Il n'en est pas généralement de même pour les tranchées de canaux, bassins, etc. et tous les terrassements ou les remblais peuvent être à un niveau supérieur à celui des déblais.

#### §9.- TRANSPORTS TRANSVERSAUX.-

Dans les profils mixtes, il y a un transport transversal de déblai en remblai. Pour les routes et chemins de fer, ce transport s'effectue toujours de haut en bas et à faible distance; l'effet de ces transports est donc minime. Lorsque les distances et quantités sont très petites, les terrassements se font à la pelle et on ne tient pas compte des transports. Au delà, on emploie la brouette ou des wagonnets ou des transporteurs; on envisage comme distance moyenne de transport horizontal la distance des centres de gravité des aires de remblai et de déblai qui se compensent dans le profil. Les transports transversaux prennent une grande importance lorsque la largeur de plateforme est très grande (faïsses de voies ferrées, gares) ou lorsque les déblais sont en-dessous du niveau des remblais (canaux, bassins), nous examinerons ces cas dans la suite.



#### §10.- CAS DES TRANCHEES DE CANAUX, BASSINS, ETC...-

Les masses de remblai sont souvent à un niveau supérieur à celles de déblai, lorsqu'on les dispose en cavaliers de dépôt au-dessus du terrain naturel.

On les divise, d'après les circonstances topographiques, en portions correspondantes qui se compensent et on détermine les distances verticales et horizontales de leurs centres de gravité. On opère les cubatures au moyen des profils moyens auxquels s'appliquent des longueurs mesurées sur les plans et profils. On détermine alors les distances de transport en rampe. Ces transports sont fréquemment obliques, c'est-à-dire tant longitudinaux que transversaux. On développe des chemins de roulement ou des voies en rampe limite le long des talus, on y applique les prix de transport en rampe. Il faut, bien entendu, tenir compte, en outre, des transports horizontaux qui peuvent s'ajouter aux précédents, calculés d'après les circonstances de chaque cas concret. Cette méthode s'applique sans restriction lorsque les déblais sont chargés dans le fond de la fouille, soit à la main, soit mécaniquement dans des véhicules quelconques.

Avec les machines excavatrices à godets, le chargement se fait au haut de la fouille, la considération du transport vertical est donc sans objet; on rentre éventuellement dans le cadre de la théorie de Brückner en cas de transport longitudinal.

11.- TERRASSEMENTS SUPERFICIELS.-

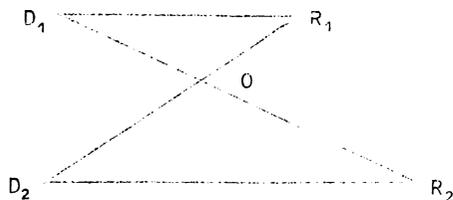
La théorie de Brückner ne considère que des transports longitudinaux; elle envisage, en réalité, des terrassements dont les dimensions transversales sont modérées (routes, chemins de fer en voie courante).

Pour les gares, faisceaux de triage, etc..., la plateforme reçoit une très grande largeur; les terrassements deviennent superficiels. La théorie de Brückner ne donne plus qu'une approximation très imparfaite et elle ne donne plus aucune indication plausible sur les chemins de transport, parce que les dimensions transversales, qui sont comparables aux distances longitudinales, ne sont pas du tout considérées. Par exemple, dans le cas d'une plateforme de gare de triage en remblai, dont les terres proviennent de déblais exécutés dans divers raccordements d'accès. La cubature s'effectue cependant d'ordinaire faute d'une meilleure méthode pratique, par la méthode exposée. Il convient de réduire les entreprofils; moyennant cette précaution, l'approximation est satisfaisante.

La distance moyenne de transport s'évaluera dans les cas favorables par la méthode de Brückner, sinon par la distance barycentrique des volumes correspondants de déblai et de remblai.

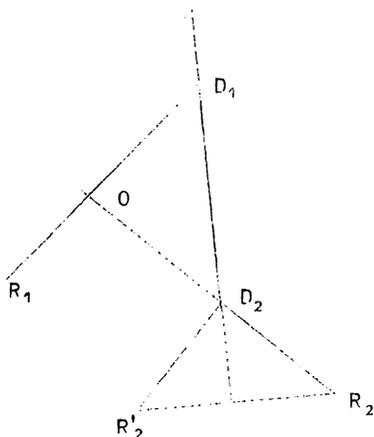
L'étude de la répartition la plus avantageuse est un problème de mathématiques transcendentes. Il a été étudié par Monge, Dupin, Appell, etc... Ces théories ne peuvent trouver place dans le cours, elles n'ont d'ailleurs pas d'intérêt pratique. Nous nous bornerons à exposer quelques principes généraux élémentaires et susceptibles d'utilité.

A. PRINCIPE DE MONGE.- Dans le système de routes le plus avantageux, il est impossible que deux routes se croisent entre leurs extrémités.



Si on suppose que les points  $D_1$  et  $D_2$  du déblai sont portés sur  $R_1$  et  $R_2$  du remblai et que  $D_1R_2$  et  $D_2R_1$  se croisent en  $O$  entre leurs extrémités, il est impossible que ces routes soient les plus avantageuses. Car il résulte des relations entre les côtés des triangles  $OD_1R_1$  et  $OD_2R_2$  que les routes  $D_1R_1$  et  $D_2R_2$  sont plus courtes au total que les précédentes. Cette observation reste vraie si  $O$  se confond avec un des quatre points.

Si le point  $O$  est en dehors des extrémités de l'une des routes, on peut lever l'indétermination apparente par un rabattement symétrique. Ainsi, dans la figure ci-après, on envisage le symétrique  $R'_1$  de  $R_2$  par rapport à  $D_1D_2$ , et on en déduit que le système le plus avantageux est  $D_1R_2$  et  $D_2R_1$ .



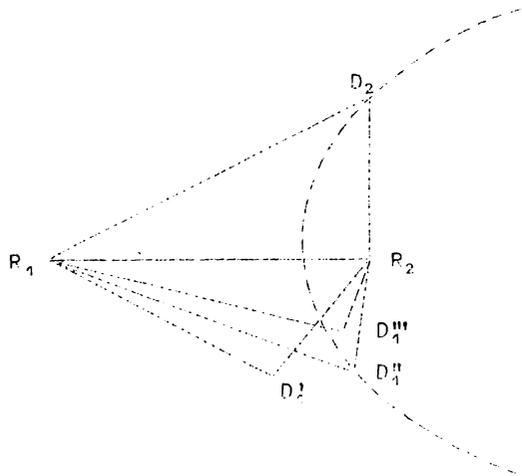
Si le point  $O$  est en dehors des extrémités de toutes les routes, le principe de Monge ne donne plus de résultat. Le principe de Monge suppose implicitement que les volumes  $D_1$  et  $D_2$ ,  $R_1$  et  $R_2$  sont égaux.

B. METHODE DE DUPIN.- On a recours, dans ce cas, à la méthode de Dupin. Le choix du système de routes est indifférents lorsque

$$D_1R_1 + D_2R_2 = D_1R_2 + D_2R_1$$

d'où 
$$D_1R_1 - D_1R_2 = D_2R_1 - D_2R_2$$

Cette égalité exige que les points  $D_1$  et  $D_2$  se trouvent sur une branche d'hyperbole dont  $R_1$  et  $R_2$  sont les foyers.



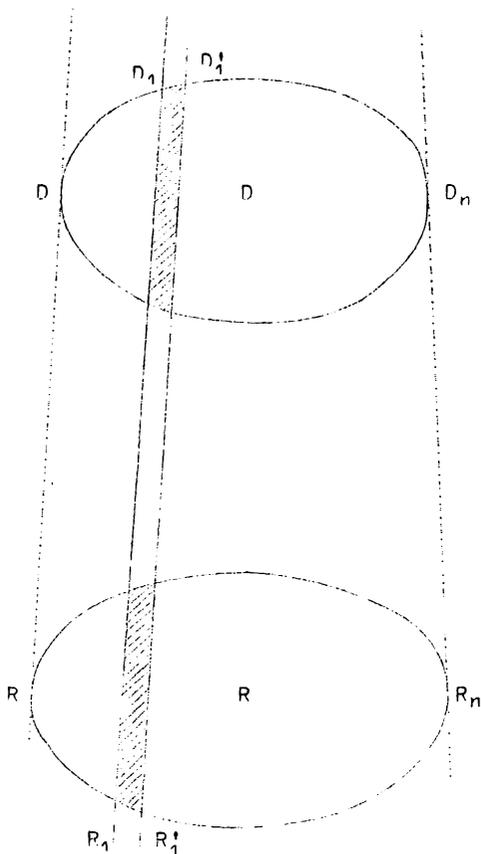
Cette hyperbole divise le plan en deux régions telles que dans le système de routes le plus avantageux, une route quelconque ne peut couper la courbe, car si \$D\_1', D\_1''\$ et \$D\_1'''\$ sont des points situés à l'extérieur, sur et à l'intérieur, on a:  $D_1' R_1 - D_1' R_2 < D_1'' R_1 - D_1'' R_2 < D_1''' R_1 - D_1''' R_2$ , et  $D_1'' R_1 - D_1'' R_2 = D_2 R_1 - D_2 R_2$ .  
Donc:  $D_1' R_1 + D_1''' R_2 < D_1' R_2 + D_1''' R_1$ ,

ce qui démontre la propriété énoncée. L'hyperbole est appelée la courbe séparatrice. Donc lorsque l'on a à constituer 2 masses de remblai, chacune d'elles doit recevoir tous les déblais situés dans l'intérieur des branches correspondantes de la courbe séparatrice. La répartition éventuelle des

masses de déblai situées en dehors de cette courbe se fait d'après le principe de Monge.

C. TRANSPORT D'UNE SURFACE SUR UNE AUTRE.— Soient deux surfaces: l'une de déblai, l'autre de remblai R. Traçons les tangentes communes extérieures RD et \$R\_n D\_n\$ aux deux aires et considérons \$D\_1 D\_1' R\_1 R\_1\$. La bande infiniment petite de déblai \$D\_1 D\_1'\$ est transportée en \$R\_1 R\_1'\$. Comme les routes ne peuvent se croiser, il en résulte que aire \$D\_1 D\_1' R\_1 R\_1 = aire R\_1 R\_1' R\_1 R\_1\$ car aucun élément de \$D\_1 D\_1'\$ ne peut être transporté sur \$R\_1 R\_1'\$. Donc toutes les routes successives se suivent depuis la tangente RD jusqu'à la tangente \$R\_n D\_n\$ formant une suite continue de droites; il faut que:

$$\text{aire } R R_1 R_n R_1' = \text{aire } D D_1 D_n D_1' \text{ (en cas de densité uniforme de déblai et de remblai sur les deux surfaces).}$$



L'enveloppe de cette suite de droites doit être extérieure à la surface R, sinon deux routes infiniment voisines se couperaient entre leurs extrémités, ce qui est inadmissible.

S'il existe donc un pareil système de routes à enveloppe extérieure aux surfaces, il constitue, en général, le système le plus avantageux.

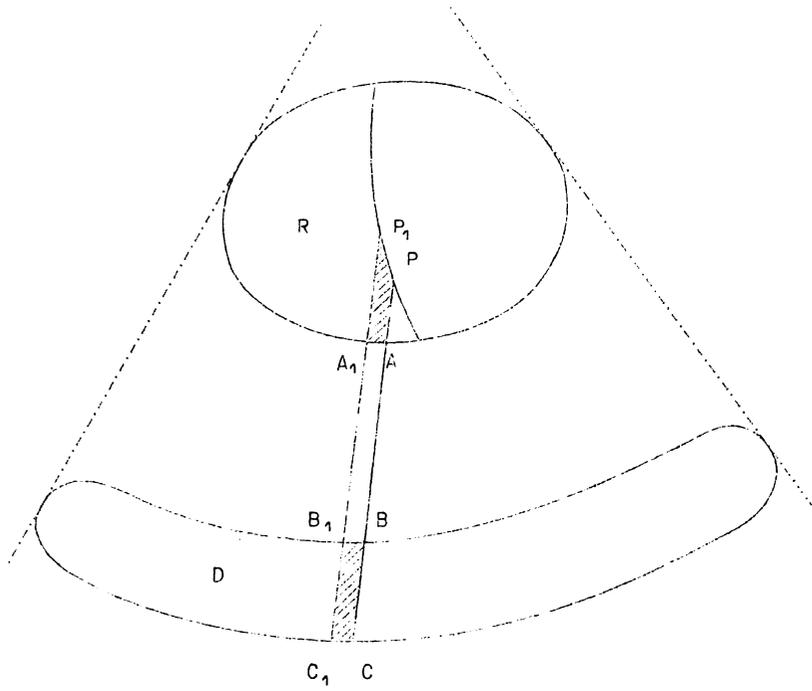
S'il n'en existe pas, c'est-à-dire si les routes infiniment voisines se coupent à l'intérieur des surfaces, le système le plus avantageux s'obtient par la considération d'une courbe séparatrice. Cette courbe est telle, par exemple, que si \$PABC\$ et \$P\_1 A\_1 B\_1 C\_1\$ sont deux routes infiniment voisines

$$\text{aire } P P_1 A_1 A = \text{aire } B B_1 C_1 C.$$

La courbe séparatrice doit traverser toute la surface \$R\_1\$ sinon deux routes pourraient se couper entre leurs extrémités.

L'étude analytique développée de ces courbes est très compliquée, même dans les cas les plus simples.

L'équation différentielle générale s'établit assez aisément (voir G. Darboux, p. 168) mais d'aucune utilité directe; nous ne l'étudierons donc pas.



Les consi-  
derations qui  
précèdent donnent  
cependant des  
éléments d'ap-  
préciation qui  
peuvent être  
utiles pour  
déterminer la  
répartition des  
terres dans les  
terrassements  
superficiels.

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*



# EXÉCUTION DES TERRASSEMENTS, SONDAGES, FOUILLES ET CHARGE

### § 1.- NATURE DES TERRES.-

Il est toujours nécessaire de s'informer de la nature géologique des terrains d'assiette des voies de communication et des ouvrages, qui donne certaines indications générales utiles (origine, nature, superposition des terrains, etc...) Dans des cas spéciaux ou difficiles (éboulements, glissements, suintements, altérations de roches, etc...) la collaboration d'un géotechnicien ou d'un laboratoire spécialisé est souvent nécessaire.

Au point de vue de la technique des constructions, les terres se caractérisent par leurs propriétés mécaniques, dont découlent la plus ou moins grande facilité de fouille (déblais), la stabilité en massifs (talus et remblais) et l'aptitude à supporter des charges (fondations). Nous n'envisagerons pas les propriétés chimiques, qui les rendent plus ou moins propres à l'emploi comme matériaux, directement ou après un traitement approprié. Il faut cependant prendre garde à l'altération physique ou chimique que certaines terres ou roches peuvent subir sous l'action de l'atmosphère, de l'eau, etc... (altération des feldspaths, des roches argileuses, décalcification par dissolution des calcaires par les eaux acides ou très pures; hydratation de l'anhydrite donnant de forts gonflements, dissolution du gypse ou plâtre, etc...). Il faut prendre garde aussi aux altérations chimiques que les terres, par les eaux qu'elles contiennent, peuvent faire subir aux matériaux de construction (mortiers, bétons, etc...)

Au point de vue physique, les terres varient de l'état solide plus ou moins parfait (roc) à l'état d'amas pulvérulent. Dans le premier cas, les vides appréciables sont accidentels (diaclasses, fissures, géodes, cavernes, grottes...); dans le second, il y a nécessairement des vides entre les particules et d'autant plus que les particules sont plus uniformes et plus petites. La cohésion varie, de valeurs notables à des valeurs très petites dont, par prudence, on ne tient généralement pas compte. Pour l'état pulvérulent, cette cohésion varie d'ailleurs d'après le tassement et peut être accrue par des opérations mécaniques: pilonnage, corroyage, etc...

L'humidité possède une grande influence sur les qualités des terres. Toutes les terres, y compris les roches (humidité de carrière) contiennent une certaine proportion d'humidité, certaines roches durcissent après évaporation de l'eau de carrière. Jusqu'à un certain pourcentage d'humidité normale, les propriétés mécaniques des terres ne sont guère influencées. Dans certains cas (sables), un peu d'humidité augmente la cohésion par tension superficielle (plage de sable humide). Mais lorsqu'il y a un excès d'eau, notamment qu'il y en a plus que le volume des vides, les particules deviennent mobiles, la terre devient coulante et la cohésion, comme la force portante diminuent très rapidement. Ce phénomène est d'autant plus marqué que les grains sont plus petits et plus mobiles. Des poudres très fines et sèches sont, par elles-mêmes, très mobiles; légèrement mouillées, elles peuvent s'agglomérer; très mouillées, elles deviennent fluides. Les sables bouillants, qui réalisent plus ou moins cet état donnent souvent lieu à de grandes difficultés.

N° de classe	Nature des terres.	Poids par m <sup>3</sup> de déblai	Coefficient de foisonnement (1 + β) (*)	Foisonnement permanent (1 + α) (*)	Fouille		Charge	
					Outils employés	Heures d'ouvrier par m <sup>3</sup>	Outils employés	Heures d'ouvrier par m <sup>3</sup>
I	Terres sans cohésion Sables humides Fin gravier	1500	1,10	1,03	pelle	1/2 à 3/4		
II	Terres peu cohérentes Sable et gravier argileux Argile légère	1600	1,20	1,04	bêche (pioche)	< 1	1/3 h.	1/2 h.
III	Terres très cohérentes Argile, glaise, marne, gros gravier, sol rocailleux	1800	1,25	1,00	bêche (pioche)	1 1/2 < 2		
IV	Eboulis très tendre Calcaire tendre, schiste fragile, gravier compact	2000	1,50	1,08	pic -- levier	2 à 3		
V	Roches stratifiées en bancs minces et peu résistants Schistes et grès calcaires Craies. Agglomérats	2200	1,35	1,10	pic, levier, coins, masse (pétardements) forages explosifs (forage) levier	3 à 4	1/2 h.	2/3 h.
VI	Roches en bancs épais Phyllaides, grès et calcaires durs	2500	1,40	1,13	forages explosifs (forage) levier	4 à 5		
VII	Roches anciennes très dures (Granites, porphyres, quartzites, etc.)	2800	1,50	1,15	forages explosifs	6 et davantage	2/3 h.	3/4 h.

(\*) Pour la signification de α et de β voir chapitre I § 10.

Les argiles, formées de grains impalpables de silicates d'alumine hydratés, se comportent différemment. Elles sont compactes, mais très avides d'eau, et par absorption, gonflent fortement. A la dessiccation, il se produit un retrait donnant lieu à des fentes, qui facilitent une absorption d'eau ultérieure. Quand elle est détrempee, l'argile devient plus ou moins fluide; les particules d'argile sont très mobiles et s'insinuent partout. L'argile devient également glissante; comme elle est souvent stratifiée ou disposée en couches minces entre des bancs, elle peut donner lieu à des glissements qui provoquent des éboulements.

Nous n'examinerons la nature des terres, actuellement, qu'au point de vue de la difficulté de fouille et de manipulation dans les terrassements. (L'étude plus approfondie des propriétés mécaniques des terres est faite dans le cours d'Ouvrages Terrassés). Les terres et roches peuvent être divisées en classes; le tableau ci-joint donne une classification assez étendue et les valeurs caractéristiques moyennes correspondantes. Les terres sont supposées sèches ou normalement humides et ne présenter aucun caractère exceptionnel augmentant la difficulté du travail. Les chiffres de ce tableau n'ont d'ailleurs aucune signification absolue et ne sont destinés qu'à fixer des ordres de grandeur. La même remarque s'applique à tous les renseignements numériques des § suivants.

Un degré d'humidité plus élevé augmente la difficulté de travail avec toutes les terres, surtout avec les terres argileuses. Les temps de fouille et de charge sont augmentés de 15 à 30% et davantage.

Pour la fouille sous le sol, le temps unitaire de fouille est à augmenter de 50% pour une profondeur de 2 m; par mètre supplémentaire de profondeur, il faut ajouter 1/2 heure par m<sup>3</sup>.

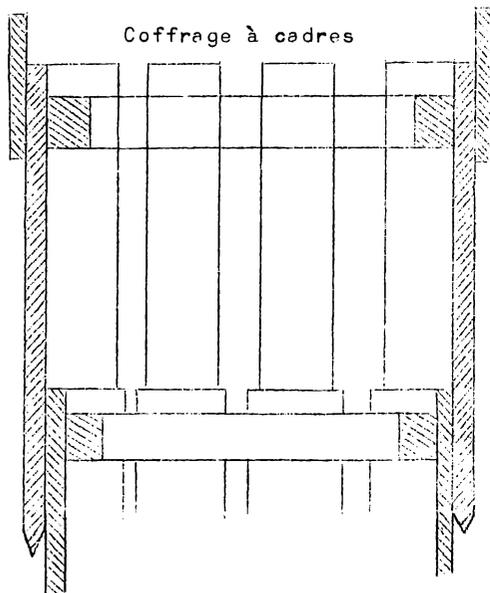
## §2.- SONDAGES ET FORAGES.

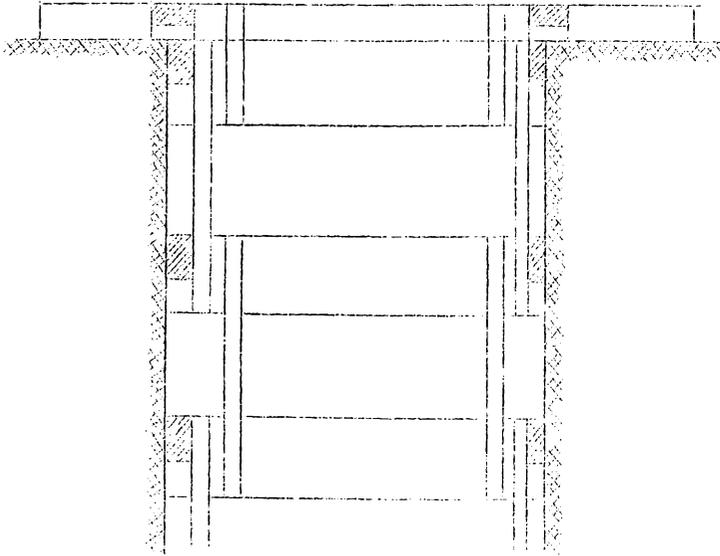
Pour les terrassements comme pour les fondations, il est nécessaire de procéder à la reconnaissance des terres par le moyen de sondages.

Pour les ouvrages peu importants et de très faible profondeur, on peut faire une reconnaissance rapide au moyen de l'aiguille à sonder, tige d'acier acérée et munie d'une poignée que l'on enfonce dans le sol à la manière d'une aiguille. La résistance et la profondeur d'enfoncement permettent de se faire une idée de la consistance du terrain (outil à employer pour la fouille) ou de la force portante (bon terrain).

Pour des profondeurs moyennes, on peut creuser des puits de sondage de 1 à 3 m<sup>2</sup> de section, selon la profondeur et la nature du terrain.

Au-delà de 3,00 jusqu'à 6 m. de profondeur, il faut étançonner (madrriers verticaux et poussards); au-delà, il faut un revêtement analogue à ceux qui sont mis en oeuvre pour les travaux de mine (voir croquis ci-contre). On emploie des cadres en bois d'équarrissage 10 x 10 environ, espacés de 2 à 1 m., selon la profondeur et la poussée, sur lesquels prennent appui, au contact des terres (serrage par coins), des planches verticales d'environ 1" d'épaisseur, plus





Puits à la boule.

ou moins jointives selon la nature du terrain. On peut aussi, pour de petits puits, employer des cadres coffrants plus ou moins espacés (puits à la Boule) (voir croquis ci-contre). Ce procédé demande un matériel spécialement préparé, tenu seulement par des spécialistes et est, en somme, peu employé.

La méthode des puits est la plus certaine, la plus probante, les puits peuvent être visités pendant longtemps. Mais elle est coûteuse, surtout

si la profondeur devient grande. Le m<sup>3</sup> de déblai coûte, en effet, par rapport au prix normal: 140%, 210%, 300% pour une profondeur de 2m, 4m, 6m.

Lorsque les sondages doivent être profonds ou très nombreux, ce qui justifie l'emploi d'un matériel spécial, on effectue des sondages propres dits ou forages. Les sondages consistent à forer dans le sol, au moyen d'appareils spéciaux, des trous de faible diamètre, allant de quelques centimètres (5 cm), à quelques décimètres (jusque 6 et même exceptionnellement 10).

Les sondages prennent une importance particulière dans les recherches et exploitations minières, l'étude des procédés puissants et perfectionnés relève du cours d'exploitation des mines.

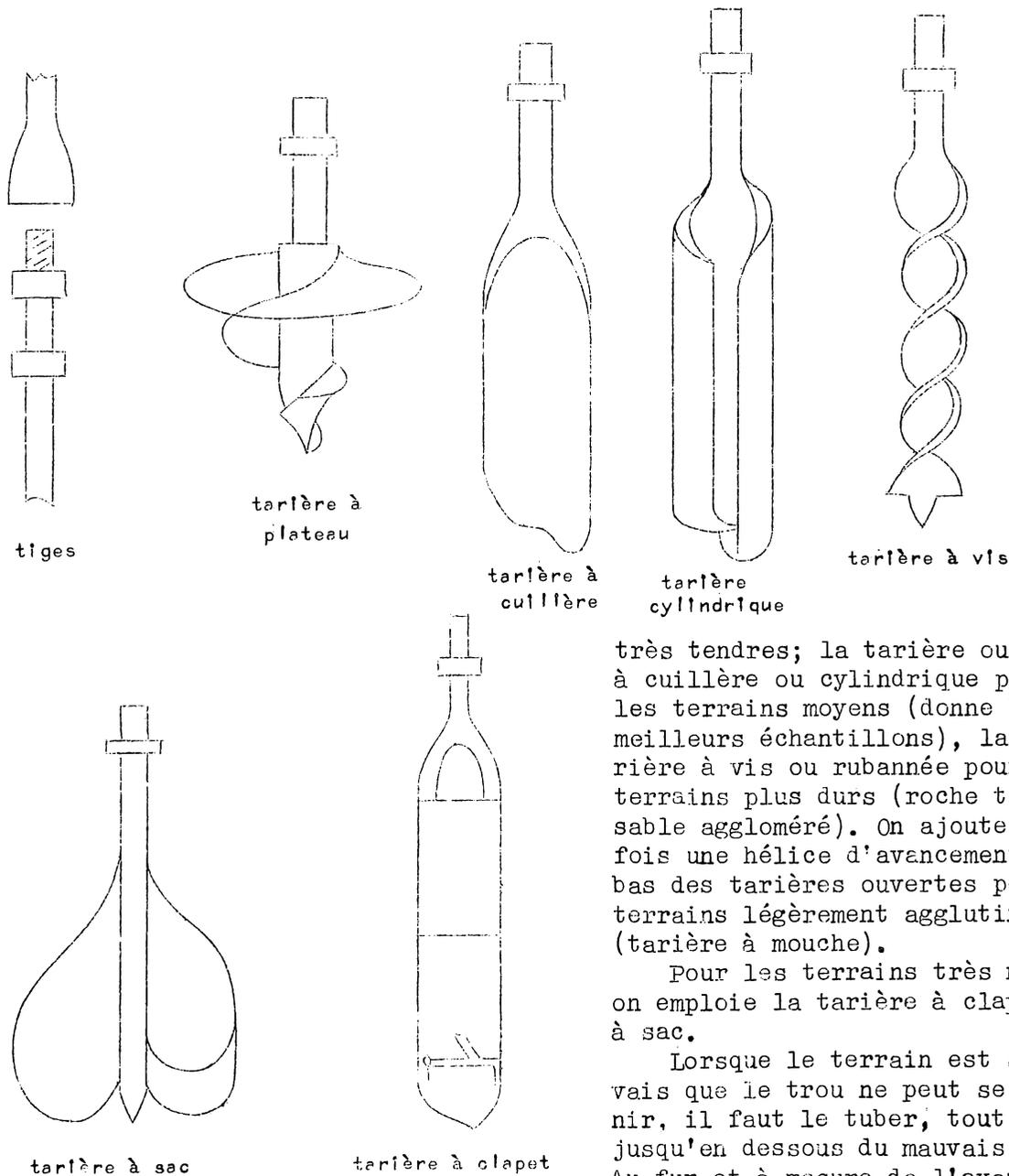
Dans le domaine de la construction, on ne rencontre que des sondages à faible profondeur (on ne dépasse guère 100 m., profondeur déjà exceptionnelle). On emploie généralement des appareils simples: sondes à main ou bien de petites sondes mécaniques lorsque les trous sont très nombreux ou pour des buts très spéciaux (entrepreneurs spécialistes ayant un matériel approprié).

On distingue, au point de vue des applications à la construction, deux systèmes principaux de sondages: le sondage rotatif et le sondage par percussion ou au trépan. Ils peuvent se faire à la main ou mécaniquement, à sec ou avec injection d'eau. Le sondage rotatif à main s'emploie dans les terrains peu durs, non rocheux: terres de consistances diverses, roches très tendres. Les appareils courants sont construits pour des profondeurs de 2 à 50 m. On l'emploie rarement pour des profondeurs très supérieures à 10m. L'opération se fait à sec; quelquefois, on verse un peu d'eau de temps en temps dans le trou, pour favoriser l'avancement ou pour agglomérer des terrains trop pulvérulents.

L'appareil se compose de tiges d'acier (anciennement bois), pleines ou creuses, de 1,00 à 5,00 m. de longueur, d'après l'importance des appareils. Dans le cas des grandes longueurs, il y a un jeu de tiges de longueurs fractionnaires. Ces tiges s'assemblent bout à bout, généralement par vis. L'extrémité inférieure porte l'outil ou tarière; à l'extrémité supérieure on

serre sur la tige un tourne-à-gauche manoeuvré par deux ouvriers, Lorsque l'outil a avancé de sa longueur, on retire la sonde en séparant les diverses tiges, on retire les terres de l'outil et on redescend la sonde en remontant les tiges les unes sur les autres. Quand l'avancement a atteint une longueur de tige, on en ajoute une. Lorsque la profondeur dépasse quelques mètres, le poids de la sonde devient trop grand pour la manoeuvre à bras. On la suspend à une chaîne ou câble, passant sur un palan ou un treuil, qui sert à retirer ou descendre la tige, éventuellement à l'équilibrer. Le dispositif de suspension permet la rotation des tiges. Les tiges ont un diamètre variant de 15 à 50 mm., selon qu'elles sont pleines ou creuses.

Comme outils, on emploie: la tarière à plateau pour les terrains

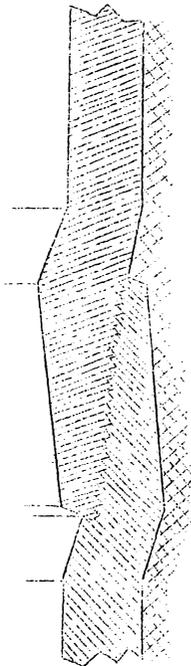


très tendres; la tarière ouverte à cuillère ou cylindrique pour les terrains moyens (donne les meilleurs échantillons), la tarière à vis ou rubannée pour les terrains plus durs (roche tendre, sable aggloméré). On ajoute parfois une hélice d'avancement au bas des tarières ouvertes pour les terrains légèrement agglutinés (tarière à mouche).

Pour les terrains très mous, on emploie la tarière à clapet ou à sac.

Lorsque le terrain est si mauvais que le trou ne peut se maintenir, il faut le tuber, tout au moins jusqu'en dessous du mauvais terrain. Au fur et à mesure de l'avancement du sondage, on enfonce dans le trou, par rotation ou par percussion, un

tube en acier formé de tronçons de 2,5 à 5 m. assemblés à vis, par bout mâle vers le bas et femelle vers le haut et présentant une surface extérieure aussi lisse que possible afin de faciliter la descente. En cas de nécessité, la descente est aidée par une surcharge statique ou par un mouton (puits abyssiniens) ou par des presses à vis ou hydrauliques.



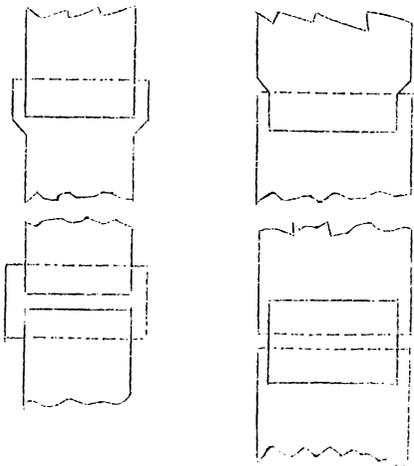
Les assemblages peuvent aussi se faire par des manchons très peu saillants (grande résistance, paroi interne lisse,) ou des manchons intérieurs (danger d'accrochage des outils) ou des extrémités emboîtées (rétrécies ou élargies). Les surfaces internes lisses sont les meilleurs pour les débits liquides. Il faut une certaine aisance pour les outils (8 à 10 mm.)

Si le sondage n'est pas permanent (prise d'eau), après réalisation du but, on retire les tubes au moyen de leviers, de palans ou de vérins à vis ou hydrauliques.

A cause de l'assemblage à vis des tiges de sondage, on ne peut tourner que dans un sens (direct); pour dégager les tarières à vis en sol dur, il faut pouvoir tourner en sens inverse: il faut alors un assemblage à méplat et clavette.

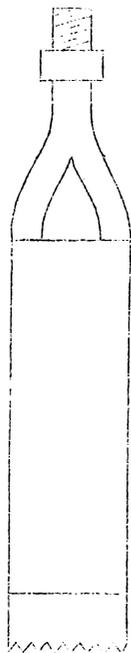
Le matériel est généralement fourni en assortiments complets. On a: les types à une tige pour de petits sondages jusque 2 m (1 extrémité: tarière, l'autre extrémité: trépan  $\varnothing$  4 cm., aiguille perfectionnée). Types de 5 à 10 m. avec tige de 1 m. ou de 2,50 m.

Poids pour un  $\varnothing$  de sondage de 48 mm.: 18 ou 25 kgs (outil complet). On peut avoir des diamètres jusqu'à 30 cm. Types de 20, 30 et 50 cm., tiges de 2,50 m. à 5m., poids de 3 à 5 kgs par mètre d'après le développement plus ou moins grand de l'appareil et le  $\frac{1}{4}$ , non compris les trépieds, treuils, palans ou leviers.



Le sondage rotatif à sec convient le mieux pour les reconnaissances. Il donne de bons échantillons, dont le niveau est bien certain, mais il ne peut s'effectuer qu'en terrain tendre et l'avancement est lent. Avec les petits appareils à main, on peut avancer de 2 à 6 m/h, selon la nature du sol, à moins de 10 m. de profondeur. Avec des appareils plus lourds et des sondages plus profonds, on ne peut guère obtenir plus de 0,20 à 0,60 m. par heure sans tubage. Avec les sondes à injection d'eau, qui évacuent les déblais sans qu'on doive retirer la sonde, l'avancement peut-être plus que double et atteindre jusqu'à 2 m. par heure. En terrain rocheux dur, le système ne convient plus.

Si l'on désire obtenir de bons échantillons de sondage en terrains rocheux et compacts, ce qui est nécessaire pour certaines constructions spéciales, telles que les tunnels et souterrains, les barrages de réservoir, etc., il faut employer le forage rotatif mécanique à couronne d'acier ou à la grenaille.



couronne

La tige de sondage est mise en mouvement de rotation rapide, généralement par un moteur, parfois à main pour les petites profondeurs. Au bout de la tige, se trouve un tube creux terminé par une couronne en acier dur dentée qui, par légère pression et par rotation, use la roche en réservant une carotte à l'intérieur du tube. Entre la couronne et la roche, on peut introduire de la grenaille d'acier par l'eau d'injection, pour augmenter l'action abrasive. Dans les sondages à grande profondeur, on emploie des couronnes garnies de diamants, ou constituées par une concrétion de poussière de diamant (diamant Boart). Vitesse, 200 à 300 tours par min. Le sondage se fait avec injection d'eau par l'intermédiaire des tiges creuses; l'eau remonte par le sondage. Le tubage est nécessaire pour la sécurité de l'outil et pour éviter toutes chutes, l'eau expulse les boues de sondage et refroidit la couronne; elle réduit le poids des tiges.

Un type d'appareil, très convenable, est celui des petites sondeuses sensibles, d'un poids total de 225 kgs (à main) à 310 kgs (avec moteur à air comprimé de 10 CV) permettant des sondages de 40 à 60 mm à des profondeurs de 100 à 250 m.

Le dispositif d'équilibrage et la commande de l'avancement par levier sensitif sont très simples et permettent de suivre très exactement le fonctionnement de la couronne dans le fond. Ces appareils permettent des forages dans toutes les directions; ils sont donc intéressants pour les grands déblais rocheux, les tunnels, etc... Par suite de leur facilité d'emploi et de leur grand rendement, leur emploi paraît destiné à se répandre, même lorsque le système plus primitif du trépan peut suffire. L'avancement peut être de 1 à 5 mètres ou davantage, par journée de 8 heures de travail d'après le terrain. Certains types vont jusqu'à 225 mm. de  $\varnothing$ , ce qui peut suffire pour les puits de prise d'eau.



En terrain moyen et très dur, lorsque le prélèvement d'échantillons précis n'a pas ou guère d'importance, on peut sonder au trépan. Les tiges (qui peuvent être plus faibles, car il n'y a pas de torsion) portent à l'extrémité inférieure un trépan, outil tranchant plus ou moins aigu selon que la roche est plus ou moins tendre, en acier trempé et recuit. Si le poids du trépan lui-même n'est pas suffisant, on le surcharge d'une tige lestée. On souève toute la sonde d'une certaine hauteur et on la laisse retomber de tout son poids, elle agit par percussion en brisant des éclats de la roche. Chute 0,60 à 1,20 m. Après chaque chute, on fait tourner l'outil d'une fraction de tour pour avoir un trou aussi cylindrique que possible. Après un certain avancement (1,50 m), on retire la sonde et on enlève les débris à la cuillère, qui est une tarière à clapet attachée à la tige de sondage ou à un câble lesté par un élément de tige lestée. Ceci suppose le sondage fait à sec. Si l'on opère par injection

d'eau (tige creuse), les boues s'évacuent par l'eau et le sondage est beaucoup plus rapide, la sonde ne devant pas être retirée. On peut obtenir des renseignements sur les couches traversées par les boues recueillies.

Même quand il n'y a pas injection d'eau, il faut humecter le sondage, pour refroidir l'outil et tenir les boues en suspension.

Jusqu'à 2 m. de profondeur et pour les petits diamètres, le trépan constitue une barre à mine.

Pour de petites profondeurs et tant que le poids est inférieur à 50 kgs, la manoeuvre peut se faire à bras par deux hommes. Pour un poids supérieur, on élève un trépied et on manoeuvre avec un câble à tirades sur poulie de renvoi (50 m) ou au treuil (50-80 m) ou au levier de battage, à bras ou mécanique (grandes profondeurs au delà de 80 m). Les appareils à bras permettent des  $\phi$  de 50 à 200 mm.; les appareils mécaniques à injection d'eau, des  $\phi$  très supérieurs. L'attache au câble de suspension permet la rotation de la tige. L'avancement en terrain moyennement dur est de 0,20 à 0,60 par heure à sec et à main, le double et davantage avec injection d'eau et mécaniquement. Au-delà de 100 m. de profondeur, le système simple n'est plus recommandable.

En terrain dur et si le travail justifie le déplacement d'un matériel, il est recommandable d'employer même à de plus petites profondeurs, des appareils mécaniques plus perfectionnés (rotatifs ou à percussion rapide, etc...). Le système de sondage à employer pour les reconnaissances de terrain dépend du but de la reconnaissance, de la nature présumée des roches, de la profondeur et du nombre de trous. On aura d'autant plus intérêt à recourir à un matériel mécanique perfectionné que le terrain est plus dur, les trous plus profonds et plus nombreux. Les travaux de sondage sont par essence longs et coûteux. Il y a donc avantage à employer non seulement un matériel approprié, mais aussi perfectionné. Cela est aussi de nature à réduire le caractère aléatoire des sondages de reconnaissance.

Pour des forages destinés à des trous de mines de grand diamètre, on emploie le trépan aux petites profondeurs, la sondeuse à couronne pour des profondeurs moyennes ou les forages non verticaux. Pour les petits diamètres, on emploie les barres à mine et les perforatrices (voir chap. V.)

Pour les forages destinés aux prises d'eau, puits filtrants, etc..., on emploie généralement un matériel mécanique spécial (entrepreneurs spécialistes), généralement des sondeuses à trépan ou rotatives pour les terrains mous. On n'emploie pas l'injection d'eau, afin de déceler le niveau de l'eau souterraine et ne pas introduire d'eau étrangère dans le sondage.

Pour la construction des puits, dits abyssiniens, on enfonce directement dans le sol, au moyen d'un mouton de 60 à 90 kgs, un tube terminé par un fort sabot pointu en acier. Diamètre maximum 50/60 mm., profondeur maximum 20 à 30 m.

Le système ne peut s'employer qu'en terrain tendre.

### § 3.- EXECUTION DES FOUILLES.-

Elle se fait à la main au moyen des outils connus: pelle, bêche, pioche, pic, levier, etc..., pour les terres et roches tendres. Nous examinerons ultérieurement les déblais rocheux.

L'outillage pneumatique peut augmenter le rendement: marteau piqueur, brise-béton, marteau-bêche. Un même appareil pneumatique peut recevoir des outils différents: pic, burin, tranche, bêche, pilette. Le marteau-bêche aurait un rendement quadruple du travail à main dans les terres moyennes et fortes. Pour les terrassements importants, on emploie de plus en plus des moyens mécaniques. On utilise en Amérique des charrues spéciales, le plus souvent à tracteur automobile, pour le creusement des fossés ou tranchées

étroites et peu profondes; d'autres pour l'enlèvement des terres en surface, qui sont ensuite chargées directement dans des voitures pour le transport, par le moyen de petits élévateurs à courroies (scrapers, graders, etc.)

Ces appareils, enlevant des tranches superficielles de terrains, dérivent du principe du soc de la charrue appliqué à des appareils de très grandes dimensions. Un autre appareil qui procède également par enlèvement de tranches superficielles dérive de la drague à câble (voir "dragages" cours de "voies navigables") qui a d'ailleurs été adoptée pour les terrassements à sec dans les appareils d'origine américaine appelés drag-lines (pl.II, fig.1.) Ce sont des bennes traînantes commandées par une grue et des treuils. On construit de tels appareils mobiles et demi-fixes de très grande capacité (benne de 6 à 7,5 m<sup>3</sup>); rendement de 200 m<sup>3</sup> à l'heure avec transport de 250 m., poids d'un appareil sur chenille: 650 tonnes). Ils peuvent creuser en fouille, transporter les déblais et remblayer sur une légère hauteur. Ces appareils conviennent surtout pour des exploitations (alluvions métallifères, etc...). On peut aussi les employer pour les terrassements; c'est un cas d'espèce qu'il faut étudier au point de vue du rendement et de l'économie totale sur la base de données certaines. Les circonstances américaines sont très différentes de celles d'exécution des travaux en Europe, notamment au point de vue de la main d'oeuvre. Le choix d'un appareil doit toujours se faire en connaissance de causes et de manière à être adapté le mieux possible aux circonstances du chantier. C'est cela qui doit déterminer le choix du type et de la puissance de l'engin.

En Europe, les appareils fondamentaux restent les pelles mécaniques et les excavateurs à godets ou dérivés.

La pelle mécanique (pl.fig.1), est constituée par une grue tournante sur voie ferrée ou, plus récemment, sur chenille, dont la flèche supporte une benne ou pelle suspendue par un câble à la tête de la flèche et prolongée par une forte crémaillère engrenant sur un pignon fixé sur le milieu de la flèche. Le bord de la benne est renforcé et armé de crocs solides en acier extra dur, le fond se rabat vers le bas. L'appareil comporte trois commandes, le plus souvent à moteurs différents.

- 1) de rotation ou d'orientation de la grue;
- 2) de soulèvement de la benne par treuil et câble;
- 3) d'avance de la benne par rotation du pignon qui engrène avec la crémaillère.

La première commande sert aussi à l'avancement des pelles sur rails. Les pelles sur chenille ont un moteur spécial de propulsion.

Les deux dernières commandes s'effectuent ensemble à partir du pied du front d'attaque, de telle sorte que la benne racle ce front sur toute sa hauteur en restant toujours fortement appliquée. La benne se remplit en enlevant des tranches minces; le profil d'attaque est concave. Chaque fois que la benne est remplie, elle est amenée par rotation au-dessus d'un wagonnet, le couvercle est rabattu de la cabine de manoeuvre, les terres tombent dans le wagonnet et la benne est ramenée au front d'attaque.

L'avancement sur truck à chenille est très simple. Si le truck est sur voie ferrée, généralement large (2,00 m. et plus), il suffit de construire une petite longueur de voie (une dizaine de mètres) en tronçons tout montés de 2,50 m. réunis par éclisses. Lorsqu'il est arrivé au bout de la voie dans le sens de l'avancement, on détache le tronçon arrière et on le repose en avant en se servant de l'appareil comme grue (pl. I fig.2 et pl.II fig.1). Cet avancement fait perdre peu de temps au travail, pratiquement pas,

car il se fait pendant l'attente entre 2 trains. La mise en place de l'appareil depuis le lieu de montage jusqu'au front d'attaque où tout déplacement continu est lent (200 à 300 m. par jour).

Ci-après les caractéristiques de quelques types de Menck et Hambrock:

Contenue de la benne	M <sup>3</sup>	1	2	3,1
Eff.max.de levage	t	8,3	16,00	25,0
Hauteur max.de coupe	m	4,55	5,7	6,6
Translation de la benne	m	3,0	3,7	4,3
Largeur max. de coupe (2 fois portée max.)	m	12,4	15,6	18,00
Largeur max.de décharge- ment.	m	6,6	8,3	9,6
Poids total	t	28,7	50,0	70,6
Rend <sup>t</sup> théorique max.	m <sup>3</sup> /h	180	360	560

Les wagonnets doivent pouvoir contenir deux charges au moins (3 à 6 m<sup>3</sup>).

Le rendement pratique est, pour un grand terrassement: 40% pour la classe 1; 30% pour la classe 2; 20% pour la classe 3, en moyenne: 54 m<sup>3</sup>, 110 m<sup>3</sup> 170 m<sup>3</sup>

En terrain plus dur ou rocheux tendre, le rendement peut descendre au 1/3 ou au 1/4 de ces rendements pratiques; on pétarde pour disloquer les roches tendres qui peuvent être alors désagrégées par la benne. La consommation d'explosifs est faible; il faut simplement un ébranlement sans projections. La puissance varie de 100 et 200 chevaux et plus (1,5 à 2 CV par m<sup>3</sup>/h). La pelle mécanique est un bon engin, convient pour tous les terrassements, se déplace facilement, est relativement léger, mais puissant. Il ne peut travailler qu'en butte et non creuser en profondeur, en fouille ou tranchée et sa hauteur de travail est limitée. Pour des terrassements profonds, il faut procéder par plusieurs étages successifs de coupe. Il convient en sol varié et peut donner des à-coups à cause de sa puissance. La commande se fait le plus généralement à la vapeur, la chaudière et le tank à eau servent de contre-poids d'équilibrage. On construit des appareils à commande électrique et à moteur à combustion interne.

C'est un cas d'espèce; la vapeur paraît d'emploi plus universel et indépendant, sans infériorité économique accusée.

Les excavateurs à godets (pl.II, fig.2 a et b et pl.III fig.1 c,d, et e) sont constitués par une grue fixe sur voie ferrée ou sur chenilles dont la flèche ou élinde supporte le chemin de roulement d'une chaîne à godets roulant sur des galets fixés à l'élinde. Cette chaîne est mise en contact avec le front d'attaque et mise en mouvement par un tambour polygonal d'entraînement; les godets raclent le terrain par leurs bords et se remplissent. En passant sur le tambour supérieur d'entraînement, ils se vident dans une trémie ou goulotte d'où les terres se déversent dans des wagons placés latéralement ou sous l'excavateur (portique). Les excavateurs peuvent travailler en fouille, les godets pleins remontent par dessous l'élinde (pl.II fig. 1 a et b). Ils peuvent travailler en butte de deux manières; à mouvement rétrograde, les godets pleins étant en-dessous (pl.III, fig. 1c) ou à mouvement direct, les godets pleins étant au-dessus (pl.III, fig.1d). Lorsque les godets pleins sont en-dessous, ils sont ouverts sur la face de la chaîne et se vident par

cette face en se redressant. Le dégagement des terres lourdes est facile et peut être favorisé par des couteaux fixés près du tambour. Lorsque les godets pleins sont au-dessus, ils ont une paroi sur la face de la chaîne et se vident par le dessus, au renversement. La vidange de ces godets est plus difficile si les terres sont lourdes.

Dans la marche rétrograde, toute une file de godets travaille simultanément, en nombre constant; la chaîne peut être flottante, elle peut alors s'infléchir contre les obstacles, blocs, souches, etc... Le profil est irrégulier ou concave (pl.II. fig. 2a). La chaîne peut être guidée; le profil est alors régulier; il peut être polygonal (bermes, plafonds, etc.) Ce dispositif convient pour les grands profils réguliers et aussi pour les terres compactes (argile) (pl.II fig.2b et pl.III fig.1 c et e).

Dans la marche directe, un ou peu de godets travaillent au moment où ils passent sur le tambour inférieur (pl.III fig. 1d).

L'églinde est mobile dans un plan normal aux voies de l'excavateur, elle est le plus souvent articulée et démontable pour permettre le travail en tranchée et en butte et suivant des profils divers (pl.III, fig.1c) L'articulation d'attache est généralement peu-au-dessus du niveau du rail. Des tambours de renvoi (au moins un inférieur) guident la chaîne. Le nombre de rails varie de 2 à 3 et un nombre suffisant d'essieux répartissent les charges. L'appareil doit se déplacer d'une manière continue parallèle au front d'attaque, afin d'enlever des tranches et non de creuser des rainures.

Vitesse de déplacement max.: 6 m/'. Vitesse de godets: 0,7 à 1 m/" en fouille, 0,4 m/" en butte et retour par dessus,

Distance des godets 1,20 à 1,80. Commande généralement à vapeur, récemment électrique à grande puissance, moteur unique. On accole parfois aux excavateurs travaillant en fouille du côté opposé à la tranchée, un transporteur à courroie formant contrepoids et qui permet alors un transport vertical total de 20 m., un transport horizontal de 50 m.

Ci-après quelques spécifications.

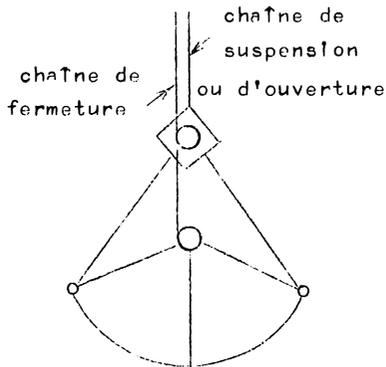
	Portique	Déversement latéral
Capacité des godets (Litres)	600-200	180 - 150
Poids (Tonnes)	230 - 70 (*)	50 - 40
Rendement théorique horaire m <sup>3</sup>	600 - 240	220 - 180
Profondeur normale m	20 - 10	8 - 7
Profondeur maximum m	27 - 14	10 - 9
Hauteur normale		
Mouvement direct m	6,5 - 5,5	5
Mouvement rétrograde m	20 - 10	8 - 7
Nombre de rails	3	2
Pression maximum des roues t	13 - 12	12 - 10
Capacité des wagons m <sup>3</sup>	5 - 3	3 - 2

Pour les travaux du bassin-canal d'Anvers, on a employé des excava-

(\*) Le poids maximum correspond à un portique à 3 voies, églinde à très grande profondeur, transporteur à courroie, etc...

teurs du type (Lübecker Maschinenfabrik), à godets de 600 litres. Poids: 130 tonnes; rendement journalier 3500 à 3750 m<sup>3</sup> dans du sable léger. Profondeur de fouille: 12 m. Portique à 3 voies. Puissance 50 à 200 CV (0,3 à 0,5 CV par m<sup>3</sup>/h). La charge du moteur est très uniforme, par contre, la machine convient mal en terrain varié (blocs, souches, etc...). Ce genre d'excavateurs convient surtout pour les grands terrassements à profil très régulier en terrain très uniforme (canaux, bassins, etc.). Le rendement dans les terres des classes I, II et III est de 70%, 42%, 28% du rendement théorique; il est donc élevé surtout pour les terres très légères; il décroît très rapidement quand la consistance des terres croît. L'engin ne convient pas du tout pour les terres rocheuses ou agglomérées. On emploie cependant des types spécialement construits par les grandes carrières d'argile, de tourbe, de lignite.

En terre très légère ou marécageuse ou vaseuse, ou en terre ameublée, ou bien pour déblayer des graviers, éboulis, roches pétardées et, en général, pour fouiller dans un espace étroit: puits, batardeau, soule ou



Benne Priestmann

silo, etc..., on peut employer les bennes à mâchoires ou grappins, qui sont suspendues au câble d'une grue tournante (pl.I, fig.2). La manoeuvre est d'une grande facilité; le matériel est peu coûteux et demande peu de puissance; le rendement est relativement satisfaisant.

Le prototype est la benne Priestman à deux chaînes. Le dernier modèle comporte une chaîne de suspension et une chaîne de commande du grappin. Il existe des dispositifs à une chaîne, dont le principe est le même, la chaîne de suspension ou d'ouverture étant remplacée par un accrochage fixé à la flèche de grue.

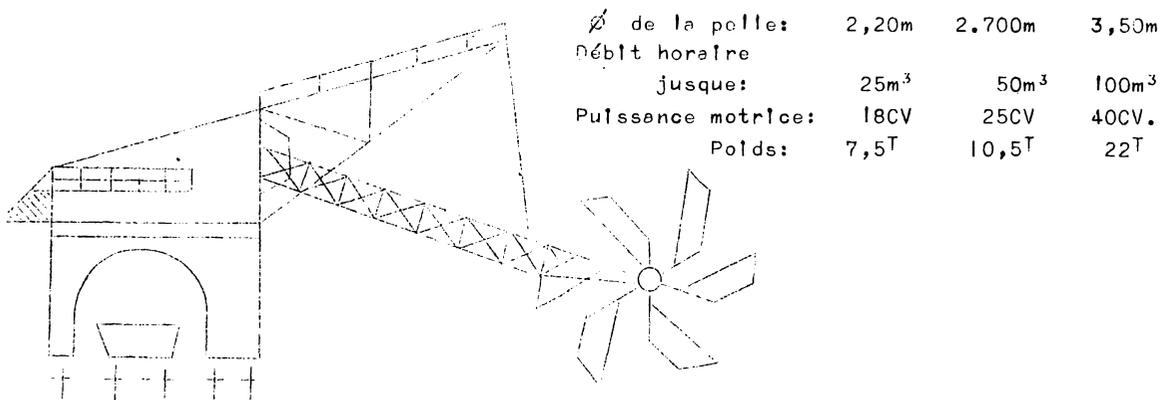
Bennes de 500 à 1000 litres; poids 800 à 1500 kgs; force de la grue 3 à 6 tonnes. Rendement horaire: 25 à 45 m<sup>3</sup> dans la vase, 17 à 32 m<sup>3</sup> dans le gravier et l'argile, élévation verticale de 6 à 12 m.

Le remplissage est généralement de 0,80. Opérations: 30 à 60 par heure selon capacité et profondeur (2 CV par m<sup>3</sup>/h).

La pelle Clère est un engin plus récent qui participe de la pelle mécanique et de l'excavateur à godets (pl.III, fig.2 et 3). Comme dans la première, l'outil placé à l'extrémité d'une flèche est orientable dans toutes les directions horizontales et peut également se déplacer dans des plans verticaux, depuis le niveau du sol jusqu'à une hauteur maximum qui, dans les plus grands types actuels peut atteindre 20 m. L'appareil ne travaille donc qu'en butte, comme la pelle à vapeur. La particularité réside dans la pelle proprement dite, qui est une couronne dont le  $\phi$  varie de 2 à 6 m., d'après la puissance et dont la périphérie est munie de grands godets de forme appropriée, généralement au nombre de 6. La couronne est animée d'un mouvement de rotation et appliquée contre le front d'attaque. Les godets se remplissent et se déversent d'une manière continue dans la rotation ascendante. Les terres tombent dans une trémie qui les déverse sur un transporteur à courroie ou godets généralement disposé dans la flèche de support de la pelle.

Les terres peuvent être alors reprises par d'autres transporteurs quelconques ou déversées en wagonnets, etc...

Ci-dessous les caractéristiques d'un type moyen:



Les pelles Clère peuvent être montées sur chenille ou sur rails. Les grands types de 400 m<sup>3</sup>/h sont à portique comme les grands excavateurs à godets. Un seul moteur entraîne la pelle et le transporteur ainsi que les mouvements de rotation et d'élévation. Pour le type moyen la puissance est d'environ 0,4 CV par m<sup>3</sup>/h en terres moyennes, comme pour les excavateurs à godets. Des avantages du type sont le grand rendement et le travail constant économisant la puissance comme pour l'excavateur à godets; la facilité de déplacement et les possibilités d'emploi universel comme pour la pelle à vapeur. Convient, en principe, pour tous les terrains, mieux pour les terrains durs que l'excavateur à godets, moins cependant que la pelle à vapeur qui est un engin pouvant exercer des très grands efforts instantanés. A rendement égal, la pelle Clère est plus légère, presque de moitié, que les deux autres types d'engins. Elle peut très bien convenir pour les travaux en fouille étroite ou même souterrains (pl.III, fig.3), le transporteur facilite l'évacuation des déblais. On rencontre cependant très rarement sur les chantiers des machines de ce type.

Il existe aussi des machines spéciales pour le creusement de fossés ou tranchées étroites, plus généralement pour travailler en fouille, dérivant de l'excavateur à godets ou de la pelle Clère.

Plus récemment, on a réalisé de nombreux types de ce genre dérivés de la pelle à vapeur. La partie fondamentale de ces appareils est constituée par la grue tournante avec sa flèche et ses treuils et elle peut être équipée d'outils de formes diverses comportant divers types de pelles mécaniques pour travailler en butte ou en fouille, directs ou rétrogrades, et également l'équipement en drag-lines ou avec excavateur à grappin ou même avec un scraper. Ces appareils sont généralement de dimension moyenne et propulsés par chenille.

#### §4.- PRIX DE LA FOUILLE ET DE LA CHARGE.-

Le prix d'un travail de terrassement comporte une partie fixe; transport et montage du matériel, aménagement du chantier et frais journaliers pour cette période préparatoire; une partie variable ou proportionnelle à la quantité de terrassements: salaires, matières d'exploitation (combustible, eau, huiles), réparations, intérêt et amortissement du matériel, frais généraux, etc... Les frais d'entretien annuels sont de 3 à 5% pour les machines, 5 à 7% pour les wagonnets, 1,5 à 2% pour les voies.

L'amortissement du matériel est rapide et décroissant; on peut admettre 30%, en général, la première année, 20 à 15% la 2e année (selon les appareils), 20 à 10% la 3e, 10 à 5% les suivantes. Le matériel est amorti plus que de moitié en 3 ans, presque entièrement en 6 ans.

Pour les terrassements à la main, il n'y a presque pas de frais d'outils pour les classes 1 et 2, les ouvriers apportant et entretenant leurs outils. Pour les classes 3 et 4, les outils à air comprimé favorisent le travail.

Pour la part des salaires, on multipliera les durées données dans le tableau par le salaire horaire pour obtenir le prix unitaire. Avec un salaire de 0,60 fr. Or, on trouve, en moyenne, par m<sup>3</sup> pour la fouille et la charge sans difficultés spéciales (grande profondeur, terrain humide...)

Classe	I	II	III	IV
	0,60	0,90	1,20	1,50

Pour les autres classes, il faut recourir aux explosifs et le matériel employé influe beaucoup sur les prix. Les chiffres dépendent surtout des circonstances particulières. Les salaires indiqués ci-dessus doivent être augmentés des frais généraux; ils sont majorés en cas de grande humidité des terres, en cas de fouille profonde, etc... Il faut aussi tenir compte des étonçonnages éventuels, de telle sorte que, en y ajoutant le bénéfice d'entrepreneur, le prix de m<sup>3</sup> peut atteindre 200% et plus de la part des salaires précitée.

Le prix des terrassements mécaniques est sensiblement inférieur et plus économique dès que le cube total dépasse 25.000 à 10.000 m<sup>3</sup> pour les classes I à III. L'excavateur à pelle est le plus avantageux pour les terres fortes (classe III); il est plus avantageux que l'excavateur à godets pour les terres moyennes tant que le cube est inférieur à 400.000 m<sup>3</sup> environ et pour les terres légères seulement si le cube est inférieur à 100.000 m<sup>3</sup>. Le prix de revient varie de 20 à 30 cent.or par m<sup>3</sup> à 6 m. de profondeur pour des terres des classes I à III (sans frais généraux ni bénéfiques).

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*

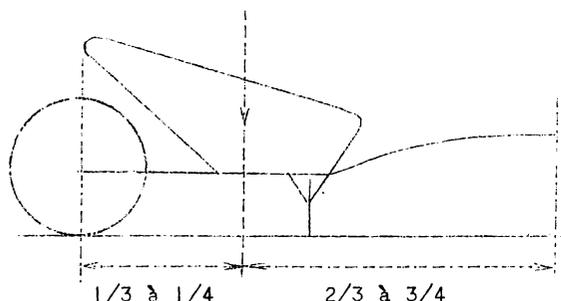
### TRANSPORT. REMBLAIS. CHANTIERS.

#### §1.- MOYENS DE TRANSPORT.-

1) Le jet de pelle, distance horizontale 3 à 4 m., exceptionnellement 5 m. Distance verticale 1,5 à 2,00. On peut procéder par jets de pelle successifs, les distances ci-dessus indiquant les relais. Les relais verticaux demandent l'établissement de plateformes de travail. Ce moyen ne convient que pour les petites distances et les petits cubes ainsi que pour les travaux accessoires: amorce et finissage des terrassements sur les grands chantiers, fossés, talus, etc..., pour autant que des moyens mécaniques ne sont pas employés.

2) La brouette, capacité moyenne 60 litres. Poids: vide 30 - 50 kgs, chargée 60 à 100 kgs. Vitesse moyenne 60 m/'. Coefficient de traction: 5 à 7%. Rampe maximum 8 1/2%. S'emploie aux distances de 10 à 300 m. (exceptionnel); la distance moyenne maximum est de 90 m., comportant

3 relais de 30 m. Le transport se fait par équipes de 15 à 20 hommes affectées chacune à un relai. En rampe limite, la longueur des relais est réduite à 20 m. En terrain mou, on fait un chemin de roulement en mardriers de 20 à 25 cm. de largeur et de 4 à 6 cm. d'épaisseur.



On construit des brouettes métalliques à face arrière très inclinée facilitant le déversement par l'arrière. Durée normale d'une brouette en bois pour

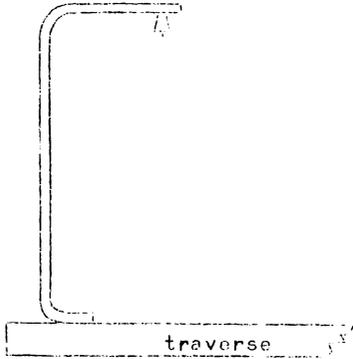
l'amortissement: 1/2 année ou 150 jours de travail.

3) Le camion à bras à deux roues, de 300 litres, ne s'emploie plus guère.

4) Le camion ou tombereau à traction hippomobile, de 500 à 1000 litres, pour 1 cheval, ne s'emploie plus guère que pour des cas spéciaux: enlèvement des déblais dans la construction des bâtiments, mais pas sur les grands chantiers, à cause du coefficient de traction défavorable de 0,05 et plus. Le camion automobile, à benne basculante, par exemple, lui fait d'ailleurs grande concurrence. Son emploi sur les chantiers est aussi défavorable, à cause du coefficient de traction élevé et du prix élevé du matériel (1 moteur par véhicule et au maximum 1 remorque). Le transport des terres des machines américaines agissant par enlèvement superficiel (scrapers, graders...) se fait généralement par des remorques sur chenilles, formées en trains de quelques véhicules tirés par des tracteurs à chenilles.

5) Le wagonnet, se différencie par la largeur de voie (0,60, 0,75 ou 1,00 m.) et par le mode de traction: à bras, hippomobile ou mécanique. Pour les deux derniers modes de traction, les wagonnets sont assemblés en

en trains. La traction mécanique peut se faire par locomotive à adhérence totale, à essence (petites puissances, de 10 à 20 CV) électriques (25 - 200 CV) ou à vapeur (20 - 150 CV). Les deux premières catégories de locomotives sont toujours en ordre de marche; elles n'exigent pas de parcs à charbon ni de réservoir d'eau. Par contre, les locomotives électriques ont l'inconvénient de dépendre de la fourniture de courant et d'exiger des canalisations aériennes dangereuses et qu'il faut déplacer avec les voies.



Cela se réalise toutefois assez simplement en fixant les supports de canalisation aux traverses. Les locomotives à accus ont une faible capacité, les accus (fer-nickel) peuvent cependant donner des résultats intéressants, mais leur prix est élevé. Les locomotives-tenders à vapeur pour les grands chantiers et à essence pour les petits chantiers sont les plus répandues, toutefois l'électrification des grands chantiers est en progrès. Les locomotives à vapeur ont une puissance par T de poids en service variant de 4 CV pour les petites à 8 CV pour les plus grandes.

Appliquons, pour fixer les idées, les équations élémentaires de la traction au transport des terrassements.

$$L.f = (Q + L) (i + f_1)$$

- L = poids adhérent de la locomotive (adhérence totale)
- Q = poids des charges trainées par la locomotive
- i = rampe
- f<sub>1</sub> = coefficient global de résistance à la traction (en moyenne 0,01 - voie peu soignée).
- f = coefficient d'adhérence (en moyenne 0,15 - petite vitesse)

Envisageons une rampe maximum de 3% (i + f<sub>1</sub> = 0,04)  
Effort maximum de traction par T de poids adhérent: 150 kg.

$$Q_1 + L = \frac{L f}{i + f_1} = \frac{1000 \times 0,15}{0,04} = 3750 \text{ kg.}$$

Donc:

$$Q_1 = 2750 \text{ kg pour } L_1 = 1000$$

La puissance de la locomotive est

$$\Phi = L.f.v = (Q + L) (i + f_1) v$$

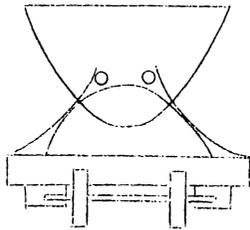
Pour une puissance de 4 CV par T. de poids adhérent (petite locomotive) soit 300 kgm/sec, la vitesse théorique correspondante (en envisageant un rendement de 100%) est, d'après la formule qui précède,

$$\frac{300}{150} = 2 \text{ m/sec. ou } 7,2 \text{ km/H.}$$

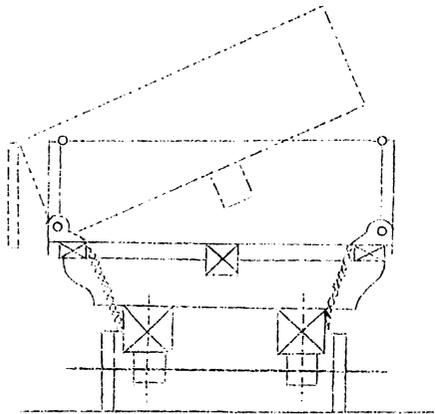
Pour les grandes locomotives à la puissance de 8 CV par tonne de poids adhérent correspondent des vitesses théoriques doubles de 4 m/sec. ou 14,4 km/H.

Les vitesses réelles sont plus petites de 10 à 20% pour les locomotives en bon état.

Les wagonnets sont généralement basculants. Pour les voies Decauville, on emploie généralement le wagonnet métallique à basculement latéral. Il en existe aussi à basculement frontal ou à basculement dans toutes les directions sur pivot et couronne (surtout pour les bétonnages).



Wagonnet basculant  
Decauville



Wagonnet de terrassement.

Pour les voies de 0,75 ou de 1,00, on emploie souvent les wagonnets sur trucks en bois ou métalliques, à caisses en bois basculant autour de charnières ou autres dispositifs et à parois latérales mobiles. Le basculement est aidé par l'action de ressorts dans les wagonnets de grande

capacité (5 m<sup>3</sup>). On emploie aussi parfois des wagons métalliques basculants de grande capacité ou auto-déchargeurs, à trappes de fond ou latérales ou à basculement par l'air comprimé.

Pour les déblais rocheux ou compacts, les plateformes conviennent bien.

On dispose parfois entre l'appareil de terrassement et les engins de transport, des trémies fixes ou mobiles qui facilitent la charge et peuvent rendre le rythme de la fouille plus ou moins indépendant de celui des transports. Il suffit pour cela que la trémie ait une certaine capacité d'emmagasinement. Les appareils de terrassement déversant leur produit d'une manière continue dans les trémies qui se vident par des trappes, par gravité

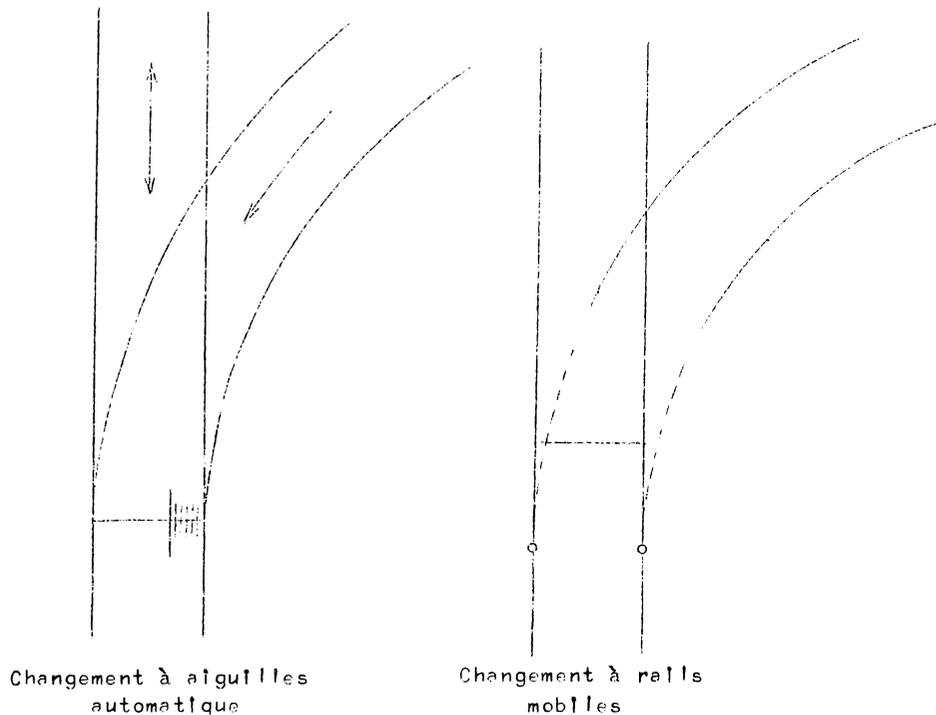
dans les wagonnets (ou autres engins de transport) qui passent en-dessous.

Pour les voies, on emploie des rails Vignole de 4 à 21 kgs/m et, pour des wagonnets d'une capacité atteignant jusqu'à 6 m<sup>3</sup>.

D'une manière générale, le poids des rails par mètre est égal à  $10 \sqrt[3]{P^2}$  kgs, P étant la charge maximum d'une roue en tonnes. En effet, le poids par mètre est  $p = Kh^2$ .

Le moment résistant  $KP = K'h^3$ , d'où  $h = K' \sqrt[3]{P}$  et  $p = K'' \sqrt[3]{P^2}$ .

On emploie des traverses métalliques (Decauville) ou en bois, espacées au maximum d'environ 1,00. Les voies Decauville sont divisées en éléments tout montés sur les traverses, de longueur telle qu'ils puissent être manipulés par 1 ou 2 hommes (1,25 à 7,00 de long); l'assemblage se fait par éclisses avec un certain jeu. Le poids de la voie par m. est environ triple de celui du rail. On peut poser de même des voies plus lourdes, au moyen de grues ou de machines spéciales. Il est recommandable d'employer des changements de voie à aiguilles, bien montés et bien fixés, pour éviter les déraillements, et les accidents; les changements à rails mobiles donnent aisément lieu à des déraillements et demandent plus de personnel de manoeuvre



Changement à aiguilles automatique

Changement à rails mobiles

les premiers peuvent être automatiquement taillonnables. Pour les changements temporaires, rapidement montés, on peut se servir d'aiguilles dérailleuses. Le coefficient de traction varie de 0,008 à 0,012 d'après le soin apporté à la confection de la voie. Lorsqu'une voie est semi-permanente, on la pose sur plateforme de sable ou de ballast bourrée,

on effectue éventuellement des terrassements pour améliorer le tracé et le profil. Pour les voies temporaires et les voies de déversement, qui doivent être déplacées fréquemment ou ripées, on les pose à même le sol. Dans ce cas, elles sont posées d'une manière qui les rende facilement enlevables tout en leur conservant une fixité et une stabilité suffisantes.

Les données moyennes caractéristiques sont contenues dans le tableau ci-après:

	<u>Traction à bras</u>	<u>Hippomobile</u>	<u>Mécanique</u>
Traction	1 à 2 hommes	1 cheval	1 locomotive
Voie	60	60 -75	75-100-1,44
Capacité du wagon	0,5 à 1 m <sup>3</sup>	1 à 1,5 m <sup>3</sup>	1,5 à 5 m <sup>3</sup>
Vitesse moyenne	3,6 km/h	4 km/h	10 à 15 km/h (250 m/')
Rampe limite	0,04	0,03	0,02 à 0,025
Distance moyenne	300 - 500 m	750 m	1000 m. et plus
Cube total	10 à 20.000	20 à 50.000	> 50.000
Effort de traction moyen	12 kgs par homme	75 kg	$Lf \geq (Q+L)(f_1 + i)$

L étant le poids adhérent en tonnes, Q la charge totale remorquée,  $f = 0,15$  environ

Le poids propre des wagonnets est généralement 0,3 du poids total ou environ 0,4 de la charge utile. Un certain nombre de wagonnets sont munis de freins.

6) On emploie aussi, le cas échéant, des moyens spéciaux.

a) Transporteurs aériens à bennes, d'une capacité de transport de 10 à 36 m<sup>3</sup> à l'heure et de longueur variable. Puissance nécessaire en transport horizontal  $3 \text{ à } 9 \times L \text{ CV}$ , L étant la longueur en kilomètres.

Selon Mr Giulio Ceretti (Génie Civil, 27 novembre 1920), il faut envisager 2 à 3%

de résistance par tonne de charge pour évaluer la puissance motrice nécessaire. La vitesse  $v$  est de 1 à 3 m par sec.

On a: 
$$\frac{0,03 QV}{75} = \rho \Phi \times L$$

d'où 
$$\frac{Q}{L} = \frac{\Phi \times 75}{0,03 v} = 2500 \rho \frac{\Phi}{v}$$

Le débit horaire du câble est: 
$$\frac{Q}{L} \times 3600 v = 2.500 \times 3,6 \Phi = 900 \rho \Phi$$

Si  $\Phi = 3$  à 9, le débit varie de 27.000 à 81.000 kg. par heure.

$\rho$  varie de 0,67 à 0,80 des petites aux grandes puissances.

b) Transporteurs à bandes en toile métallique ou textile caoutchoutée, roulant sur galets. La bande a une forme concave.

Si  $b$  est la largeur (0,3 à 1 m.),  $v$  la vitesse en m/sec. (1 à 3 m.), le rendement horaire volumétrique est  $200 (0,9 b - 0,05)^2 v$  en  $m^3$ , correspondant à une largeur de chargement de  $(0,9 b - 0,05)$  m et à une épaisseur de chargement égale à 1/12 environ de la largeur.

Il varie de 10 à 500  $m^3/H$ . Le transport est horizontal ou en rampe assez faible (lim. 27°).

c) Transport vertical ou très incliné par élévateur à godets, dont il existe des types mobiles très maniables, à petit moteur électrique ou à essence.

d) Transport par corbeilles (Orient), schlittes (dans les montagnes), par barques ou péniches (à proximité des voies d'eau). Le transport par péniche peut être très économique si les opérations de chargement et de déchargement se font mécaniquement.

## 62.- PRIX DE TRANSPORT.-

Ils comportent comme pour la fouille et la charge, une partie fixe, qui comprend tous les frais de transport, de montage et de démontage du matériel, aménagement du chantier, etc..., avec les frais généraux et les charges financières correspondantes, bref, toutes les immobilisations avant et après le travail. Elle n'existe, en somme, que pour les transports par wagonnets.

La partie proportionnelle est  $pM$ ,  $M$  étant le cube total et  $p$  le prix unitaire. Dans le transport au jet de pelle,

$$p = \frac{ns}{r}$$

$n$  = nombre de relais =  $\frac{1}{\lambda} = \frac{\text{distance totale}}{\text{distance d'un relai}}$ ;  $s$  = salaire horaire;  
 $r$  = rendement (1 à 1,5  $m^3/h$ ).

Pour les moyens de transport à véhicules,  $p$  se compose des frais de transport proprement dits  $p_1$  et des frais accessoires  $p_2$  dans lesquels on englobe souvent la partie fixe.

Soient:  $l$  la distance de transport.

$s$  le coût horaire des moyens de traction

$v$  la vitesse en m/min.

$c$  la capacité d'un véhicule.

$n$  le nombre de véhicules d'un train.

$t$  le temps perdu à chaque voyage pour le déchargement, repos, attente de chargement, etc., en min.

Le cube transporté en un voyage est  $C = nc$ .

Le temps d'un voyage est  $t = \frac{2l}{v} + t_1$  en min ou  $\frac{t}{60}$  en H.

Le temps nécessaire pour le transport d'un  $m^3$  au moyen de  $n$  véhicules:

$$\tau = \frac{t}{60C} = \frac{2l + t_1 v}{60Cv} \quad (\text{en heures})$$

Donc avec  $n$  véhicules, on transporte  $l m^3$  en  $\tau$  heures, avec  $n\tau$  véhicules, on transporte donc  $l m^3$  en un temps

$$\frac{\tau}{n} = 1 \text{ H}$$

c'est-à-dire que le nombre de véhicules nécessaires pour  $l m^3$  par heure est

$$n\tau \quad \text{ou} \quad \frac{2l + t_1 v}{60 Cv}$$

Le prix de transport est  $p_1 = \tau s = (K + K'l) s$ .

Éléments correspondant aux prix des transports en palier.

<u>Moyen de transport</u>	<u>s (cent. or)</u>	<u>v (m/')</u>	<u>c</u>	<u>n</u>	<u>t (en minutes)</u>
Brouette	40 - 60	60	60 lit	1	0,8+0,0033 l
Camion	80 - 120	70	300 lit	1	6
Tombereau	100 - 150	75	1000 lit	1	15
Wagonnets à bras	40 - 60	60	500 à 1000 l.	1	8
Wagonnets à chevaux	100 - 150	70	1 à 1,5 m	3 à 2	15

Traction mécanique:

a) voie étroite	75 à 60 L	200	1 à 2,5 m	$8 \frac{L}{c}$ (*)	23
b) Voie normale	56 à 50 L	200	3,5 à 7 m	$10 \frac{L}{c}$ (*)	20+3 c

Par exemple, pour la voie étroite:

$$\tau = \frac{2l + t_1 v}{480 Lv}; \quad p_1 = \frac{s}{L} \left( \frac{l}{4800} + \frac{t_1}{480} \right)$$

Il y a une relation entre  $s$  et  $L$ , qui dépend du type de la locomotive. Il faut que  $\frac{s}{L}$ , c'est-à-dire les frais horaires de locomotive par tonne de poids adhérent, soient les plus petits possible. On voit que l'influence des temps perdus est considérable pour les petits transports, elle devient relativement moindre lorsque la distance de transport est assez longue ( $l > 100 t_1$ ). Il faut néanmoins les réduire le plus possible en toutes circonstances.

Les frais accessoires horaires comportent:

Une partie indépendante des salaires: intérêts, amortissements, certains frais généraux.

Une partie dépendante des salaires: charges sociales, entretien,

(\*) est le poids adhérent en tonnes de la locomotive.

On a:  $(f - f_1) L = f_1 l,4 \cdot \Delta c$  ( $\Delta$  = poids spécifique de la terre).  
 $f = 0,15$   $\Delta = 1,30 - 1,25$ ;  $f_1 = 0,008$  d'où  $c = 10 L$  = ne d'où  $n = \frac{10 L}{c}$  pour la voie normale,

Pour la voie étroite,  $f_1 = 0,01$  et  $n = \frac{8 L}{c}$

surveillance et direction.

Les frais accessoires par m<sup>3</sup> comportent, comme les frais de transport proprement dits, une partie pour les temps de pause et une autre pour les périodes de travail, qui est proportionnelle à l.

Enfin on y ajoute souvent les frais fixes rapportés à la longueur kilométrique. On a donc une expression du genre:

$$p_2 = K_1 + K_1' s + (K_2 + K_2' s + \frac{P'}{M}) l$$

Donc, enfin,  $p = p_1 + p_2 = A + Bl.$

A et B étant deux coefficients dépendant de s et de M lorsque le transport se fait sur voies ferrées; P' est une constante en valeur or pour un type déterminé de voie et de matériel.

Dans le cas de la traction mécanique, le facteur s dépend du type de locomotive et est fonction de son poids adhérent (on considère généralement qu'il y a proportionnalité pour des locomotives d'un type donné.

Il faut tenir compte dans ces prix de la réserve de 10% de wagonnets et d'une locomotive de réserve pour trois en service.

On peut admettre comme moyenne, en centimes or par m<sup>3</sup> pour un salaire de base horaire de 50 cms-or, l étant en mètre et M en m<sup>3</sup>.

	<u>p</u>	<u>Suppléments en rampes</u>	
A la brouette	16 + 0,5 l	(0,175 + 0,008 l) i	
Camion	40 + 0,175 l	(0,625 + 0,003 l) i	
Tombereau (hippo)	50 + 0,085 l	(0,875 + 0,0015 l) i	
Wagonnet à bras	25 + (0,085 + $\frac{200}{M}$ ) l	(1,125 + 0,0045 l) i	i en mm par m
Wagonnets à chevaux	32 + (0,045 + $\frac{250}{M}$ ) l	(1 + 0,002 l) i	
Trains de wagonnets (tract.méc.à voir étr.)	35 + (0,022 + $\frac{300}{M}$ ) l	(0,375 + 0,00016 l) i	
Voie normale	43 + (0,02 + $\frac{350}{M}$ ) l	(0,375 + 0,00011 l) i	

Nous considérons le transport du m<sup>3</sup> tel qu'il est chargé, c'est-à-dire compte tenu de son foisonnement (coefficient de chargement). Les calculs ci-dessus ne conviennent que pour les transports horizontaux. Il faut appliquer un coefficient de majoration ou un supplément pour les transports en rampe. Les effets des petites rampes peuvent être négligés (0,04 pour la brouette, 0,01 pour le camion). Les courtes rampes sont gravies, par les locomotives, par l'élan; enfin, il y a certaines compensations dans les descentes.

Les frais de transport proprement dits p, peuvent être majorés par exemple dans le rapport (1 + i/f) correspondant à la formule la plus simple de longueur virtuelle horizontale. Les indications données dans le cours de routes permettent de calculer les longueurs virtuelles, dont on peut introduire les valeurs dans la formule A + Bl de p. Mais on préfère généralement majorer le prix de transport proportionnellement à i, selon les formules du tableau ci-dessus. A la descente, il n'y a de supplément que pour les pentes très raides, qui ne sont généralement pas employées. On ne tient pas compte de l'avantage à la descente sur faibles pentes, à cause de la remonte du matériel vide.

On peut tracer des diagrammes très simples des formules précitées, qui permettent, dans chaque cas, de comparer les différents moyens de transport. Il ne faut attacher aux données numériques qui précèdent aucune signification absolue, mais considérer que cela fixe simplement des ordres de grandeur. Pour un travail concret, il importe naturellement de faire une étude exacte des prix unitaires.

On emploiera la brouette aux petites distances (10 à 100 m) pour les transports transversaux, les travaux de préparation et d'achèvement; enfin, dans les petits chantiers. On emploiera le Decauville à bras (voie de 0,60 m) pour des cubes d'environ 10.000 m<sup>3</sup>. On emploiera des chevaux pour des cubes de 20 à 50.000 m<sup>3</sup> (voie de 0,60 à 0,75). On emploiera la traction mécanique pour des cubes dépassant 50.000 m<sup>3</sup> et des distances de l'ordre d'un km. et plus.

On n'emploiera la voie normale que pour des terrassements de très longue durée et à grande distance, sur voie fixe bien établie.

Remarquons que, aux grandes distances et pour les terrassements mécaniques, les frais de transport constituent un multiple des frais de fouille et de charge; il y a avantage à réduire les distances de transport le plus possible et à rechercher la plus grande économie dans les transports, notamment en tous cas à réduire les temps perdus.

Il faut une organisation rationnelle, dont tous les éléments découlent les uns des autres. De la nature et de l'étendue des terrassements, ainsi que du déblai d'exécution, on déduit les moyens à mettre en oeuvre et le cube journalier ou horaire. De ce cube et de la distance moyenne de transport, on déduit le nombre de wagonnets et de locomotives ou d'engins de traction nécessaires pour assurer le transport journalier, ainsi que les longueurs et dispositifs de voies nécessaires. Les procédés et engins de décharge doivent satisfaire à la même condition. On ajoute une réserve pour les avaries et les à-coups, de l'importance indiquée précédemment.

On établit de la sorte, d'avance, un graphique ou plan de travail et on donne aux équipes les consignes strictes correspondantes. Cette méthode d'organisation porte le nom de planing. On relève journallement l'avancement et on en fait un graphique que l'on compare au plan, ce qui permet de juger de la marche du chantier et de prendre, à tout moment, les mesures adéquates au but poursuivi.

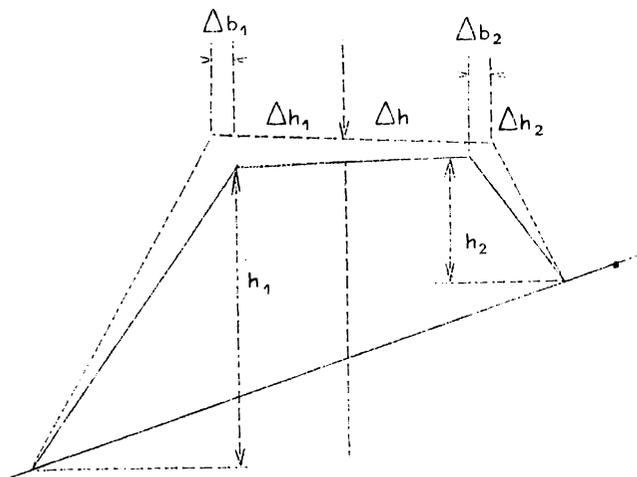
### § 3.- FORMATION DES REMBLAIS.-

Les remblais sont formés par déversement des terres rapportées au jet de pelle, brouette ou wagonnet. Il est recommandable d'effectuer les terrassements par couches horizontales; ce procédé n'est employé cependant qu'avec les moyens de transport tels que la brouette ou le tombereau ou autres qui ne sont pas liés à des voies fixes. Il est bon aussi pour la solidité du remblai de consolider ces couches par pilonnage ou cylindrage, cette dernière opération portant le nom de corroyage quand elle est faite avec des terres choisies, généralement argilo-sableuses, donnant, par la compression, une masse très compacte et étanche. Le corroyage s'effectue pour les remblais dont on exige des qualités spéciales d'étanchéité et de stabilité: digues longitudinales des cours d'eau et canaux, digues-barrages de réservoirs, etc... Ce pilonnage à main moins efficace et plus coûteux, s'emploie pour les petits ouvrages: réparations de digues, remblais derrière les ouvrages d'art, batardeaux, etc... Le pilonnage mécanique des remblais

ordinaires s'effectue lorsqu'on veut les stabiliser immédiatement, il doit se faire par couches assez minces. Les études préalables et le contrôle des compacités des terres damées se fait par des essais géotechniques spéciaux, tels que ceux de Proctor.

Dans les remblais dont les terres sont apportées par wagonnets, le déchargement se fait par déversement, la voie étant poussée le plus rapidement possible au niveau de la plateforme. Les terres s'étalent selon le talus naturel et les remblais sont donc formés par tranches obliques. Si le déversement est latéral, dans les remblais larges, les voies sont déplacées parallèlement à elles-mêmes vers le vide au fur et à mesure de l'élargissement, c'est ce que l'on appelle le ripage. Ce mode de déversement donne un grand foisonnement initial et il faut, pour tenir compte du tassement, donner un surhaussement à la plateforme qui dépend de la nature des terres. Il y correspond également une sur-largeur. Le coefficient à adopter dépend de la nature des terres, de leur état d'humidité, de leur résistance aux influences atmosphériques et du mode de formation des remblais. On peut, pour les grands travaux, le déterminer par des expériences.

On peut admettre, en première approximation, pour les terres sèches, un surhaussement de:



Pour  $\Delta b$ , on prend généralement  $\frac{3}{2} \Delta h$

gravier ou sable pur:

$$\gamma = 5\%$$

Classes I et II

$$\gamma = 10\%$$

classe III

$$\gamma = 15\%$$

classes IV et V

$\gamma = 20\%$  et davantage si la roche est altérable.

Sur terrain horizontal:

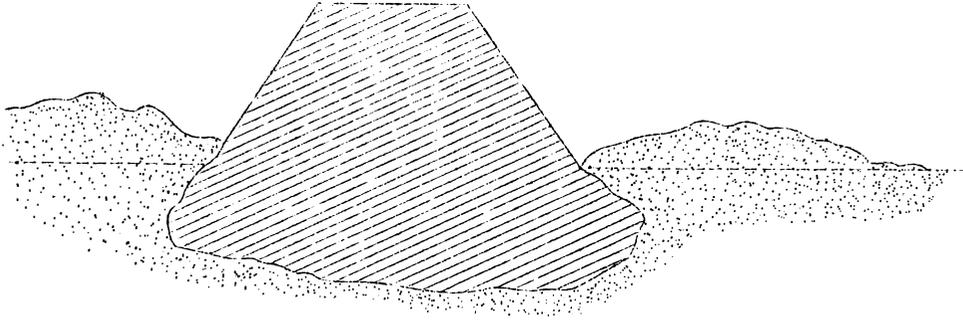
$$\Delta h = \gamma h$$

Sur terrain incliné:

$$\Delta h_1 = \gamma \frac{h + h_1}{2}$$

$$\Delta h_2 = \gamma \frac{h + h_2}{2}$$

Ce qui précède, suppose le remblai assis sur un sol ferme, peu compressible, le surhaussement doit compenser la compression généralement inconnue d'avance. Dans les terrains marécageux, cette compression peut être telle que le surhaussement exige un multiple du volume du remblai. Le remblai s'enfonce littéralement dans le marécage, dont le sol reflue à droite et à gauche. Ce phénomène continue jusqu'à ce que le sol du marais ait été comprimé localement d'une façon suffisante et que la base du remblai dans le marais soit assez large pour établir son état d'équilibre. C'est un procédé employé pour la construction de remblais en terrain marécageux (voir Cours d'Ouvrages Terrassés).



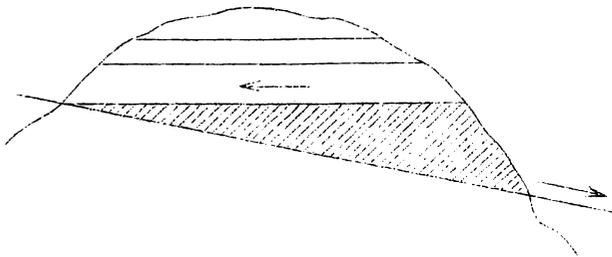
#### § 4.- DISPOSITION DES CHANTIERS DE DÉBLAI.-

Dépend de la nature des terrains, de leur disposition, du délai de travail, du matériel, de la qualité de la main d'oeuvre, etc...

Il faut chercher à assurer un bon écoulement des eaux de manière à avoir un chantier toujours sec; à créer le plus tôt possible plusieurs fronts de travail indépendants, de grande étendue, permettant l'utilisation maximum et aussi uniforme que possible du matériel, du personnel et des moyens de transport; enfin, éviter les transports en rampes prononcées, par petites quantités et à de grandes distances. A cet effet, on avancera autant que possible avec une légère rampe dans le creusement des tranchées, même si le plafond doit être horizontal ou en pente; le volume restant après l'ouverture de la tranchée pouvant généralement s'évacuer par l'extrémité. Il faut observer cependant qu'avec les engins mécaniques, ces reprises sont généralement coûteuses et pas toujours possibles (épaisseurs trop faibles). On amorcera le plus tôt possible les fossés latéraux et, en cas de déclivité transversale du terrain, on protégera le talus le plus élevé par un fossé de crête, dont les eaux descendront éventuellement par des caniveaux ou cascades définitives ou provisoires dans les fossés de la tranchée. Il est à noter que pour les terrassements des voies terrestres, l'assèchement est toujours possible du fait que les déblais sont à un niveau supérieur à celui des remblais voisins. Pour les déblais de canaux ou de bassins, il n'en est pas toujours ainsi et de ce fait, l'assèchement de ces tranchées peut requérir des solutions particulières qui sont susceptibles d'influer beaucoup sur l'économie et l'avancement des travaux.

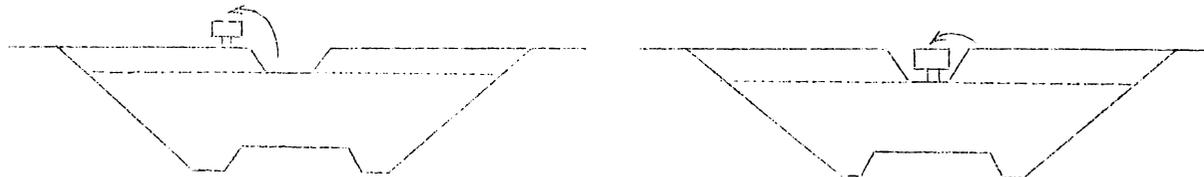
On créera les fronts de travail autant que possible à la base de longs talus et de manière, si c'est possible sans danger, d'utiliser la descente des terres par éboulement. Dans les terres très légères ou peu cohérentes (sable fin et sec, gravier, etc...) ou très cohérentes (roc), cette méthode

est applicable; il faut être très prudent avec les terres dont la cohésion apparente peut brusquement disparaître (argile, terres lourdes). Il faut éviter, dans ce cas, les hauts talus ( $>4$  m). Il faut éviter aussi, autant que possible, le travail en fouilles étroites.

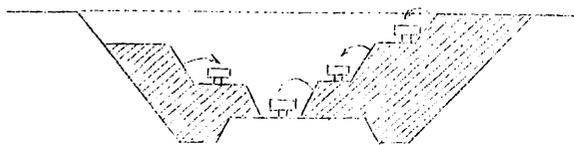


Avant d'enlever les terres

en profondeur, il faut toujours enlever, au moyen d'outils appropriés (couteaux et bêches à gazon avec traction par corde) les gazons superficiels et les mettre en tas pour la couverture des talus. La disposition la plus favorable du chantier, s'obtient en avançant le plus tôt possible jusqu'à l'extrémité opposée de la tranchée, par des cunettes et en s'étendant ensuite en largeur, c'est l'attaque latérale. Elle est toujours possible en terrain meuble et la plus employée; elle convient aussi à tous les engins mécaniques et moyens de transport. En terrain meuble et donc peu déclin, ce terrassement s'effectue par tranches de hauteur appropriée à l'outillage: jet de pelle: 1,5 m.; excavateur 5 à 6 m. On commence, pour chaque tranche par creuser une cunette de largeur appropriée au matériel d'excavation.



La voie ferrés de transport éventuelle se trouve à la plateforme supérieure près du talus. Le plus tôt possible, la voie est descendue dans le fond de la cunette; au niveau de l'étage de terrassement, on élargit alors l'étage, éventuellement des deux côtés. On peut travailler à plusieurs étages à la fois. Pour éviter les reprises ultérieures au talus, les voies doivent être disposées par rapport aux engins de terrassement du côté opposé au talus, donc vers le centre.



Cette disposition permet d'ailleurs une bonne constitution de faisceaux. Cette méthode convient bien pour les excavateurs quelconques travaillant en butte. Les excavateurs à pelle ou les

draglines peuvent convenir pour le creusement des cunettes et pour le finissage des talus. Le travail en fouille des excavateurs à godets demande un terrain très peu déclin et une profondeur telle que la tranchée soit effectuée autant que possible en un seul étage; cependant, on peut le conjuguer avec le travail en butte à d'autres excavateurs à des étages supérieurs.

Les voies de garage et les évitements nécessaires pour la succession des trains avec la moindre interruption de travail possible des excavateurs doivent être disposées près de ceux-ci.

Si le terrain est très déclin transversalement, généralement rocheux et à couches dressées, les différentes tranches sont attaquées à partir du terrain naturel, le travail se fait donc en terrasses latérales.

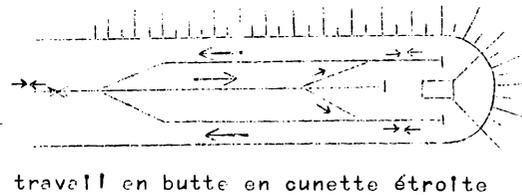
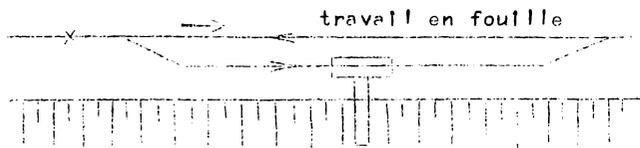
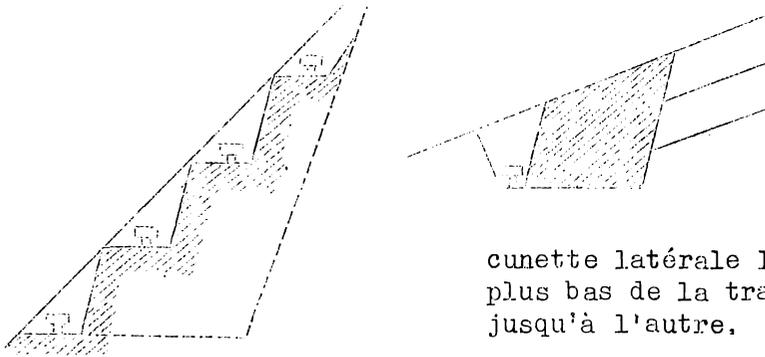
La méthode convient au déblai des roches dressées.

En terrain rocheux peu décliné, la méthode est peu appropriée, sauf si la tranchée est peu profonde et si les couches sont inclinées perpendiculairement à la tranchée. On creuse alors une

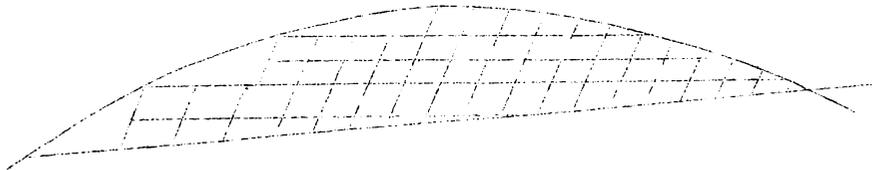
cunette latérale le long du bord le plus bas de la tranchée et on l'élargit jusqu'à l'autre.

Dans cette méthode, les voies de transport et de déplacement des engins doivent se déplacer constamment parallèlement à elles-mêmes: c'est le ripage.

Il s'effectue pour les voies par des équipes spéciales, au moyen de leviers et sans désalignement. Récemment, on a mis sur le marché des machines à riper américaines

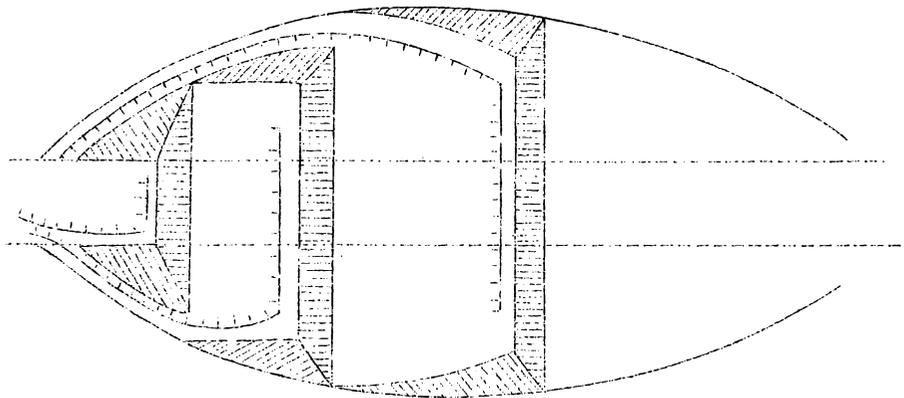


cainées et européennes à soulèvement et à inflexion latérale. Elles sont peu efficaces et peu employées. Pour le ripage des voies des excavateurs il s'effectue de la même manière pour les longues voies d'excavateurs à

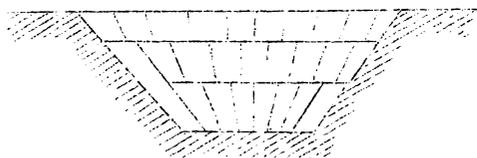


godets et par déplacements longitudinaux obliques pour les pelles mécaniques sur rails et sur chenilles.

L'attaque frontale s'emploie pour les déblais rocheux moyennement profonds ou profonds, principalement s'ils sont très durs ou si les couches sont inclinées légèrement vers le front. Pour multiplier les chantiers de déblai, on travaille en gradins ou terrasses. Le transport s'effectue initialement sur le terrain naturel (éventuellement par plans inclinés à

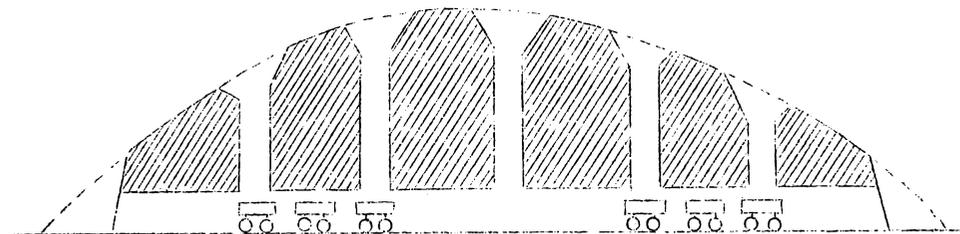


câbles ou à chute libre en terrain très déclif).

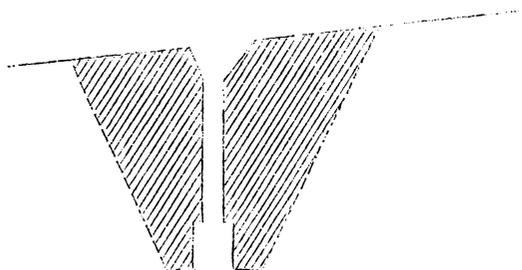


On réserve latéralement des bermes pour les voies de transport; on voit que ces bermes doivent être enlevées après l'ouverture de la tranchée, ce qui donne lieu à une reprise. Les fronts d'attaque étant transversaux, ce procédé permet d'amener par une courbe les voies parallèlement à ces fronts.

Enfin, pour les tranchées profon-



des en terrain de consistance moyenne, on peut employer le procédé par galerie et puits ou méthode anglaise, assez employée dans les pays très ac-



cidentés, où le matériel et le personnel pour le travail en tunnel sont sur place (ligne de chemin de fer dans le Trentin, l'Arberg, région de Trieste, Bohême). Le perfectionnement des excavateurs semble restreindre les cas d'application de cette méthode, qui expose toujours aux aléas du travail souterrain, coûteux et lent et qui fait fortement souffrir le matériel de transport. Le procédé consiste à construire une galerie

de mine de 2,30 à 2,50 de long sur 2,60 à 2,80 de haut. De distance en dis-

tance (10 à 15 m), on creuse des puits allant de la surface du terrain à la galerie (1 à 2 m<sup>2</sup>). Ensuite on laisse ébouler les terres de la surface dans ce puits; on les recueille dans des wagonnets dans la galerie. Pour augmenter la rapidité d'avancement, on peut commencer les puits en même temps que la galerie, d'ailleurs attaquée aux 2 extrémités, de manière à multiplier les fronts d'attaque.

Une adaptation moderne de la méthode anglaise a été employée pour la fouille de la grande tranchée de Caster du Canal Albert d'environ 70 m. de profondeur. Un puits unique de grande section, dénommé silo, assurait la descente des déblais qui y étaient amenés à l'étage supérieur. Au niveau de base, deux galeries de part et d'autre du silo permettaient le chargement des trains de remblayage par des trémies obturées par des clapets mobiles. Ce silo était situé vers l'extrémité de la tranchée voisine des remblais à constituer, de manière à réduire la longueur des galeries. Le rendement était très élevé. La nature du terrain, qui était en majeure partie du tuffeau, assez aggloméré favorisait ce mode d'exécution.

Avantage du procédé: Indépendance des conditions topographiques, assèchement facile, facilité de fouille, de charge et de transport, voie de transport permanente.

#### 55.- DISPOSITION DES CHANTIERS DE REMBLAI.-

On effectue des travaux préparatoires analogues à ceux des déblais: enlèvement des gazons et de la terre arable de la surface d'assise, enlèvement des souches et racines, captage des sources et assèchement de la plateforme par des drains en pierrées ou poterie, creusement des fossés latéraux aux pieds des talus, constitution de gradins si la pente transversale du terrain est élevée et peut faire craindre des glissements. La pente limite dépend de la nature du terrain et des remblais; il est prudent de ne pas dépasser 10%.

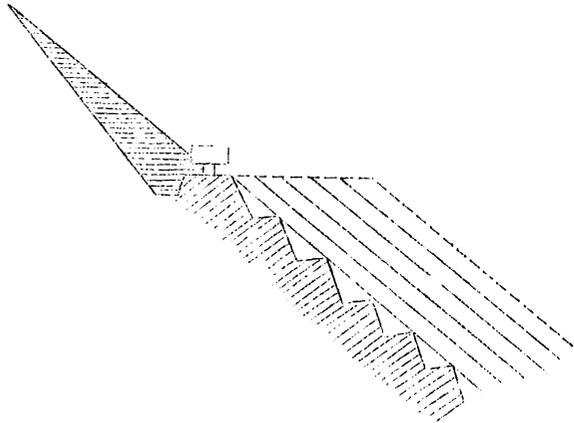
La disposition des chantiers de remblai doit s'harmoniser avec celle des chantiers de déblai et assurer une utilisation maximum et uniforme du personnel et du matériel de transport. Il faut, comme pour les déblais, chercher à multiplier les points de déversement et, autant que possible, avoir de grandes longueurs de déversement. Ces desiderata sont réalisés surtout par le déversement latéral, qui peut s'opérer en remblayant sur toute la hauteur ou par couches.

Il faut, autant que possible, effectuer les transports en pente, même si la plateforme est horizontale ou en rampe. Il reste une masse de remblai finale en rampe à constituer qui peut souvent être avantageusement exécutée en pente par l'autre extrémité, les reprises n'ont pas d'inconvénients aussi grands que pour les déblais.

Pour le déversement latéral, il faut, en tous cas, commencer par constituer un remblai étroit (cavalier) de hauteur convenable pour constituer la plateforme initiale de déversement, éventuellement pour la voie. Ce remblai est effectué par le moyen des engins de transport ordinaires. Le déversement en tête est le plus favorable pour ces remblais étroits, mais le plus souvent, on opère par déversement latéral, avec élévation progressive des voies, afin d'éviter l'emploi d'un matériel de terrassement différent de celui qui sert à effectuer la majeure partie du remblai. Cela exige de nombreux déplacements de voies si la hauteur est grande. Le matériel sur chenilles facilite naturellement la formation des cavaliers. Il peut être préférable de constituer le remblai initial par déversement

latéral du haut d'une voie fixe posée au niveau voulu sur estacades. Cette difficulté n'existe pas si le profil est mixte, la partie en déblai constitue la plateforme initiale. On peut aussi se servir d'appareils mécaniques spéciaux: élévateurs, transporteurs, grues à bennes, drag-lines, etc...

Le remblai est ensuite élargi par déversement latéral, les voies sont ripées vers le vide au fur et à mesure de l'élargissement. Lorsque la plateforme est élargie, on peut poser deux voies et déverser des deux côtés à la fois. On peut aussi, par le moyen d'aiguillages et d'embranchements en épis déverser en plusieurs chantiers sur un ou deux bords. L'opération de ripage est coûteuse et peu avantageuse. On emploie déjà



transporteurs à courroies mobiles ou orientables. Les trains, posés sur une voie fixe, déversent au pied de l'appareil qui reprend les terres par une chaîne à godets ou une pelle-clère, les transporte latéralement et les déverse au point voulu (fig.2, planche III). Les grands draglines avec grue à câbles permettent un travail analogue.

Le remblai se constitue par couches parallèles au talus naturel et a donc une tendance à s'ébouler; les

terres doivent être bonnes.

Si ce n'est pas le cas, et si la hauteur est très grande, on peut



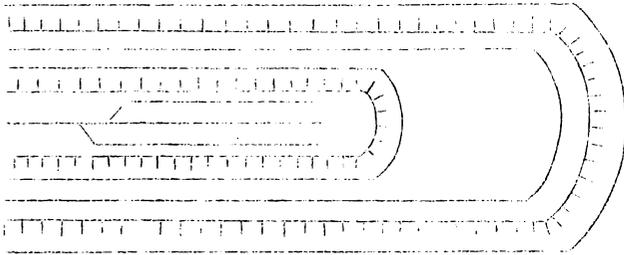
constituer le remblai par couches de 1 à 5 en cas de terrassements par wagonnets. Afin de réduire les déplacements de voies, les différentes couches sont remblayées en sens inverse, le transport sur les différentes couches en assure un premier raffermissement. Cette méthode est la plus favorable pour la stabilité des remblais.

Ce mode de construction exige des pentes assez fortes; les limites peuvent être élevées, puisque les trains remontent à vide. Néanmoins, dans certains cas, il sera nécessaire d'allonger le chemin pour ré-

duire les pentes dans la mesure convenable. La méthode n'est guère applicable en cas de forte pente transversale; il faut alors déverser sur toute la hauteur en prenant les mesures nécessaires pour assurer la stabilité du

remblai.

Pour les remblais étroits et très élevés, on peut opérer par déversement, en tête en partant de la ligne de passage du déblai au remblai. Les terres sont déversées suivant le talus naturel dans le sens longitudinal au remblai. Il en résulte une formation par couches très inclinées, qui participe cependant des avantages de la constitution par couches peu inclinées, car la poussée interne agit pour comprimer les terres contre le terrain naturel au passage du déblai en remblai. Pour les remblais élevés, on peut déverser à plusieurs étages, ce qui fait que l'on réalise alors à peu près complètement les avantages de la constitution du remblai par couches horizontales. Seulement, à moins de laisser subsister les bermes, il faut ensuite régulariser les talus. Les voies sont en rampe-limite pour descendre d'un étage à l'autre.



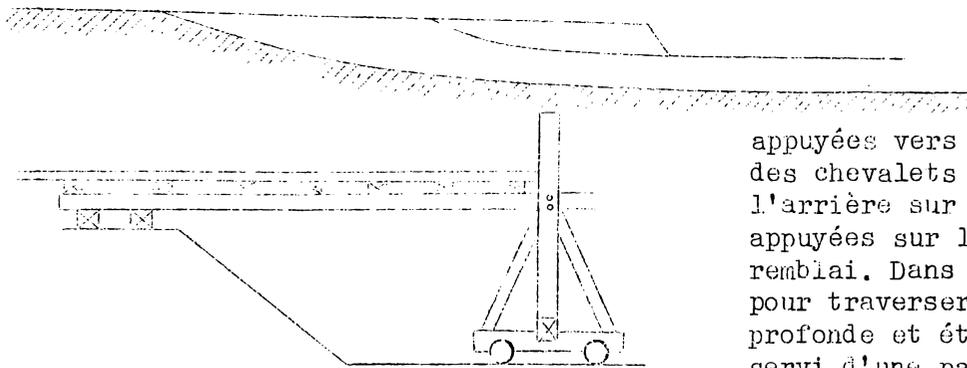
Le transport à la brouette ne convient pas. Le transport au tombereau exige un plancher et le recul du cheval; une grosse poutre transversale est posée à l'extrémité du remblai pour arrêter le tombereau, que l'on bascule.

Le transport par wagonnets basculant en tête convient surtout. On peut

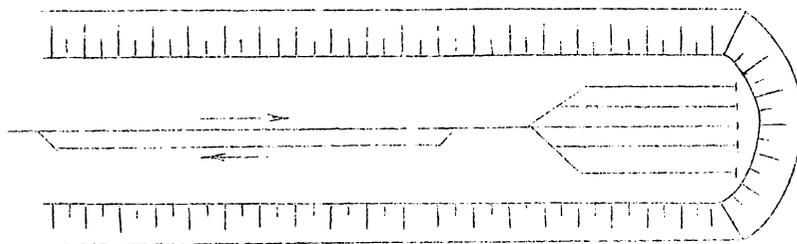
lancer le véhicule à bras ou par un cheval dételé une vingtaine de mètres avant le bord du remblai. On dispose un buttoir en pièces de bois; le choc fait basculer la benne qui déverse les terres; le cheval reprend ensuite le wagonnet vide (décharge à l'anglaise ou à la volée). Cette méthode peut s'employer aussi avec estacade; le buttoir peut être remplacé par un taquet réglable provoquant le basculement en tête ou latéral à l'endroit voulu.

Les estacades peuvent être à palées et contreventements perdus (ligne du Brenner, remblais de 50 m. de hauteur). Les longerons sont récupérés. Le système est coûteux, mais les supports contreventés contribuent à la stabilité du remblai et les avantages de la solidité et de la permanence de la voie sont appréciables.

Pour des remblais moins élevés, on peut se servir d'estacades mobiles



appuyées vers l'avant sur des chevalets mobiles, vers l'arrière sur des traverses appuyées sur l'extrémité du remblai. Dans certains cas, pour traverser une vallée profonde et étroite, on s'est servi d'une passerelle suspendue à des câbles d'acier, sur laquelle on ne poussait toutefois que les wagonnets vides après déversement à l'entrée de la passerelle. On peut



déverser en tête les wagonnets un à un et les faire avancer ensuite sur la passerelle; les wagonnets vides sont réunis en train sur la passerelle et repris par la locomotive. Si la passerelle est assez solide, on peut aussi faire

avancer le train plein et déverser latéralement par wagonnets alternés à gauche et à droite. Le plus souvent, on videra les wagonnets latéralement au fur et à mesure que la locomotive les refoule sur la passerelle. Les estacades et passerelles sont le plus souvent à voie simple; il est généralement préférable d'en disposer plusieurs parallèles, à 3 m. au moins de distance axiale plutôt que de constituer des passerelles à plusieurs voies, trop encombrantes. Cependant pour la confection d'un remblai de la ligne Fexhe à Kinkempois sur le territoire de Sclossin, on a employé une passerelle métallique à trois voies dont une située entre les deux maîtresses poutres et les deux autres sur des pièces de pont en porte à faux.

Pour multiplier les points de déversement, on constitue un faisceau permettant de déverser plusieurs wagonnets en tête à la fois, un par voie. Les wagonnets vides sont garés sur une voie d'évitement en arrière. On peut aussi employer les wagonnets à déversement latéral, mais il faut des plaques tournantes qui ralentissent les opérations et dont le déplacement est difficile. Le déversement en tête assure, au contraire, l'avantage de la permanence de la voie, qui peut-être bien établie, réduit les frais de ripage tout en permettant, avec le travail à plusieurs équipes et un matériel de grande capacité, des rendements élevés, qui peuvent dépasser 700 m<sup>3</sup> par voie et par jour.

Quelle que soit la méthode employée, il faut prendre des précautions pour le remblai des ouvrages d'art qui doit se faire autant que possible symétriquement et par couches damées. Cela exige en principe que l'on puisse amener les terres des deux côtés à la fois. Cependant pour les ouvrages longs bien calculés et bien fondés, on peut remblayer dissymétriquement jusqu'au niveau voulu pour pouvoir franchir l'ouvrage par un remblai étroit permettant le passage d'une voie. On élargit ensuite symétriquement par rapport à l'ouvrage.

## § 6.- INSTALLATION DES CHANTIERS. TRAVAUX PRELIMINAIRES.-

Après établissement du projet définitif et conclusion du marché sur la base de ces plans et des devis de soumission, l'entrepreneur prend possession des terrains pour installer le chantier. On procède au tracé qui consiste en piquetage de l'axe et des profils en travers; on se réfère aux repères qui subsistent éventuellement des levés d'étude, mais il faut toujours les contrôler. Entre les piquets principaux correspondant aux profils, on place des petits piquets en alignement ou courbe à des distances de 15 à 20 m. On matérialise de même les bords en remblai ou déblai sur le terrain au moyen de piquets ou de sillons. Eventuellement, on dresse des gabarits en lattes pour les talus. Pour la vérification des hauteurs, on procède par nivellement; parfois on place des mâts de repère qu'on laisse enterrés dans les remblais ou que l'on enfonce dans les puits ou trous

de sondage pour les déblais. Les ouvrages d'art sont tracés spécialement. Ces tracés se font par les soins de l'auteur du projet ou par l'entrepreneur mais, dans ce dernier cas, l'auteur du projet doit vérifier et réceptionner le tracé.

L'entrepreneur installe des établissements fixes, dont l'importance varie avec celle du travail en un point aussi favorable que possible: accès, communications, surveillance et tel que, tout en étant le plus près possible du chantier, ils ne doivent pas être déplacés au cours de l'exécution. Ils comportent: le bureau technique (études, dessins, commandes, attachements, surveillance, embauche, correspondance, etc.) et le bureau comptable (listes de salaires, factures, décomptes, paiements, correspondance, etc.); le magasin (outils, rechanges, matières d'exploitation, etc...) dont il faut soigner les accès tant vers l'extérieur que vers tous les points du chantier; le dépôt de matériel (locomotives, automobiles, etc...) avec atelier de réparation; les cantines et dortoirs, infirmerie. Eventuellement, on place près des magasins et ateliers, une station centrale de force motrice et d'éclairage, soit par station génératrice (généralement en courant continu) ou station de transformation (généralement alternative). Le courant continu est généralement préféré, parce que les moteurs permettent une plus grande gamme d'adaptation d'après l'enroulement inducteur (série, shunt ou compound) et les variations aisées de vitesse. Cependant quand le courant alternatif s'obtient à bon compte, il est préférable de l'employer sans redressement. Il est favorable de pouvoir se raccorder à une distribution, les producteurs livrent toujours le courant à un prix inférieur au prix de production sur chantier, car le travail, se faisant généralement de jour, en dehors des heures de pointes, améliore le facteur d'utilisation des centrales.

Si l'électrification du chantier est possible, elle est généralement recommandable. Toutefois, s'il faut du matériel spécial, son achat ou sa location ne se justifient que pour des travaux assez importants. Il est, en somme, avantageux d'avoir le plus de machines possible à moteur indépendant: pompes, treuils, bétonnières, etc...

La vapeur convient pour les grands et moyens chantiers; les moteurs à combustion interne ont des avantages de mobilité, d'encombrement et de rendement pour les petits chantiers, les puissances sont généralement faibles. La tendance est au développement des engins mécaniques.

Dans quelle mesure il faut établir la proportion entre le mécanisme et la main-d'œuvre, dépend de la nature du travail, du délai, de la région, de la situation sociale et économique, du matériel disponible, etc...

Des cabines mobiles servent dans les chantiers pour le personnel de surveillance. Des rapports très complets, précis et circonstanciés, mais sans phrases, autant que possible sous forme de tableaux, doivent être faits et tenus à jour au sujet de l'avancement des travaux, du rendement des engins et de la main d'œuvre et des prix. Ils sont utiles à l'auteur du projet, autant qu'à l'entrepreneur et servant de base à une expérience chiffrée et contrôlable, une expérience basée sur des impressions dégénère facilement en routine ou préjugé.

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*

### DÉBLAIS ROCHEUX. TRAVAUX DE MINE.

#### § 1.- FORAGES.-

Dès que la roche est dure au point que les outils ordinaires: pioche, pic, levier ou les engins mécaniques ne parviennent plus pratiquement à la débiter, il faut travailler à la mine, c'est-à-dire par forages et explosifs. Selon la dureté, les pétards ont pour but de rompre la cohésion de la roche, sans séparation ni projection, ou bien de diviser la roche en fragments. Cette dernière méthode s'emploie notamment dans les carrières pour ballast; la première dans les carrières pour pavés. Sans explosifs, on peut abattre par coins et par havage (coupures horizontales et verticales faites par foreuses ou haveuses), pour l'extraction des pierres de taille.

La première opération consiste en forages pour le placement des explosifs dans l'intérieur de la masse rocheuse. Pour le forage vertical à la main, on emploie:

- 1°) le fleuret, barre à extrémité tranchante que l'on frappe à la masse. Longueur: 0,40 à 1,20;  $\varnothing$  0,02 environ.
- 2°) la barre à mine, sorte de trépan à tige unique, de 1,50 à 3,00 de longueur;  $\varnothing$  foré jusqu'à 40 m/m.
- 3°) de petites perforatrices rotatives ou sondeuses rotatives à couronne mues par volants à main, selon la profondeur et le  $\varnothing$  du trou ( $\varnothing$  jusqu'à 60 m/m, profondeur de plusieurs mètres).

Pour les forages inclinés ou horizontaux, on emploie aussi les derniers appareils.

Pour le forage mécanique vertical, on emploie:

- 1°) Les perforatrices généralement pneumatiques, dont il existe des types à main sans support appelés marteaux perforateurs. Les types plus puissants se fixent généralement sur trépiéds lestés.  $\varnothing$  28 à 45 m/m, profondeur 1,80 m.
- 2°) Les sondeuses rotatives à couronne légères pour les trous plus larges et plus profonds. Ces appareils conviennent pour les forages inclinés et horizontaux; les perforatrices à air comprimé sont alors fixées sur des affûts orientables appropriés, à trépiéd, colonne ou chariot.

Il existe aussi des perforatrices électriques et à vapeur. La description détaillée des perforatrices sort du cadre de ce cours. Les appareils à air comprimé sont à percussion ou à percussion et rotation simultanées. Il existe des types à rotation à moteur indépendant que l'on rencontre peu sur les chantiers de construction. Le nombre de coups par min. est normalement de 1200 pour les petits appareils et atteint 1400 et même davantage (2000). Pour les machines plus lourdes, il est de 400 ou plus (600).

L'avancement est de l'ordre de grandeur de 3 à 20 cm par min., selon la dureté des roches et la puissance de l'appareil. Les taillants des fleurets sont plus ou moins compliqués, en Z ou X ou à plusieurs taillants || .

La consommation d'air comprimé varie d'une centaine à 500 litres par min. et davantage.

L'air comprimé est un fluide moteur qui a comme inconvénient de fuir très facilement, même dans les installations fixes, bien faites et entretenues. Sur les chantiers, avec des canalisations temporaires et très exposées, souvent déplacées, avec beaucoup de raccords flexibles, les chances de fuite sont multipliées. On peut vérifier la consommation à vide. Les installations centrales de compression paraissent donc peu recommandables sauf possibilité d'établir une distribution très soignée. Les compresseurs mobiles, à moteur indépendant ou fixé sur le truck, le plus souvent électrique ou à essence, paraissent préférables. Il en existe de nombreux types commerciaux. Pour apprécier le rendement et les appareils, il faut convertir la compression d'air en puissance.

PUISSANCES THEORIQUES DES COMPRESSEURS POUR UNE ASPIRATION DE 1 m<sup>3</sup> air/min.

<u>Pression effective</u>	<u>Etages de compression</u>				<u>Compression isothermique</u>
	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	
1	1,70	1,65	--	--	1,55
2	2,85	2,65	--	--	2,45
3	3,75	3,40	3,30	--	3,10
4	4,50	4,00	3,85	3,80	3,55
5	5,20	4,55	4,30	4,25	4,00
6	5,75	5,00	4,75	4,65	4,30
7	6,35	5,35	5,10	4,95	4,60
8	6,80	5,70	5,40	5,25	4,90
9	--	6,05	5,70	5,55	5,15
10	--	6,35	5,95	5,80	5,55 C.V.

Les puissances théoriques doivent être divisées par le rendement, dont la moyenne est 0,80. Pour les petites machines 0,77 (0,75), pour les grandes 0,833 (0,85). Ce sont les puissances sur l'arbre du compresseur; il faut tenir compte encore du rendement de la transmission éventuellement.

Les chiffres moyens ci-après sont déduits de la 1ère colonne en admettant un rendement de 0,75.

1 m<sup>3</sup>/h. d'air comprimé consommé réellement au compresseur; correspond,

pour une pression finale absolue de 2 3 4 5 6 7 kg/cm<sup>2</sup>  
à une puissance de: 0,076 0,19 0,333 0,50 0,70 0,89 CV.

Si on considère le m<sup>3</sup>/heure d'air aspiré par le compresseur, aux mêmes pressions correspondent des puissances de:

0,038 0,0632 0,083 0,10 0,116 0,127 CV.

Ces chiffres sont plutôt défavorables pour des compresseurs à bon rendement, (> 0,75) pour des compresseurs de chantier à mauvais rendement; il faut parfois majorer de 10 à 20%.

Le rendement total du travail est très faible (en moyenne 50%). La puissance nécessaire au compresseur est en moyenne double de celle du marteau.

On peut considérer en moyenne que 1 CV heure absorbé par le compresseur produit à 7 atm.abs. un volume en m<sup>3</sup> réduit à la pression atmosphérique:

pour un compresseur à piston bien construit:	10 m <sup>3</sup>
pour un turbo-compresseur	: 8 m <sup>3</sup>

Donc, si une perforatrice consomme 30 m<sup>3</sup>/heure à 6 atm.abs., la puissance correspondante est:

$$\frac{30 \times 6}{10} = 18 \text{ C.V. environ}$$

Les trous de mine doivent être humectés et il faut enlever de temps en temps les boues et débris à la curette ou raclette, petite cuillère en métal fixée au bout d'une longue tige. Plus récemment, on construit des perforatrices pneumatiques à injection d'eau qui présentent les mêmes avantages que les sondeuses à injection. Le travail est plus rapide (puisqu'il ne faut pas retirer pour enlever les boues); l'outil refroidi s'émousse moins et travaille mieux dans le fond du trou. On indique pour un marteau une consommation de 3 lit. d'eau par mètre d'avancement. Il ne faut pas de pompe; l'eau est refoulée par la pression de l'air comprimé admis dans un réservoir spécial.

Lorsque le trou a la profondeur voulue, on le sèche à l'étaupe et on introduit la charge et le bourrage, sinon, on le ferme par un bouchon de bois pour éviter l'introduction de détritrus.

Dans les roches calcaires, on peut employer les mines acidées, qui consistent à créer dans le fond du forage une poche sphérique par dissolution du calcaire par une solution de HCl. On peut alors employer de plus fortes charges. Ce système assez ancien convient pour les poudres peu Brisantes. On obtient le même résultat plus rapidement par chambrage, c'est-à-dire explosion sans bourrage d'une cartouche brisante dans le fond du trou. Dans de l'argile, une cartouche de mélinite crée par explosion une chambre d'un volume égal à 50 fois celui de la cartouche. En terrain très dur, ce volume est réduit de moitié ou plus.

## §2.- ACTION DES FOURNEAUX DE MINE.-

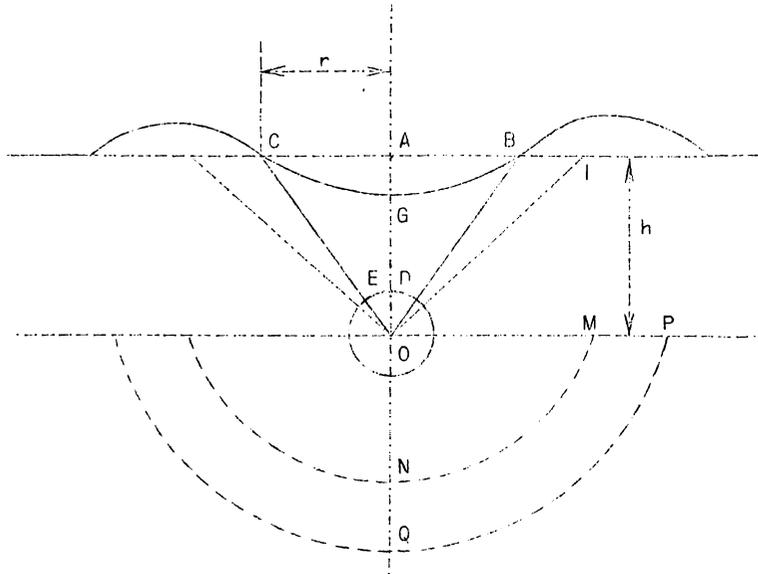
Un fourneau de mine placé dans les terres à proximité d'une face libre que nous supposons horizontale crée, par explosion, des effets qui se transmettent dans toutes les directions. Les lieux des points de même ébranlement seraient des sphères en milieu homogène indéfini pour une charge ponctuelle ou sphérique. On conçoit que ces surfaces, pour les effets au-dessus du plan diamétral horizontal passant par le niveau de la charge, donc vers la surface du sol, soient très différentes de la sphère et dépendent de la profondeur de la charge. En dessous de ce plan, comme la résistance des terres est plus grande vers le bas que latéralement, on considère des ellipsoïdes de révolution dont les petits axes sont verticaux.

On distingue la chambre de compression sphérique, de petites dimensions; la surface de bonne rupture, dans l'intérieur de laquelle les matériaux sont détruits et la surface de rupture-limite, en dehors de laquelle les ébranlements n'ont plus d'effets permanents importants.

Si nous considérons une charge enterrée assez près de la surface du sol, son explosion produit un entonnoir. On distingue l'entonnoir apparent bordé de lèvres en saillie et l'entonnoir réel qui descend jusqu'à la chambre de compression, qu'il en-

globe, mais que l'on peut considérer théoriquement comme un cône dont le sommet est au centre de la charge. Il est partiellement comblé par les terres retombées après l'explosion.

Si  $h$  est la profondeur de la charge ou ligne de moindre résistance et  $r$  le rayon de l'entonnoir, le rapport  $n = \frac{r}{h}$  qui mesure l'évasement de l'entonnoir réel est ce que l'on appelle l'indice du fourneau.



Le volume de l'entonnoir, réel théorique est

$$V = \frac{h}{3} n^2 r^2 = 1,05 n^2 h^3$$

On constate expérimentalement que les volumes de 2 entonnoirs réels semblables (même valeur de  $n$ ) sont proportionnels aux charges.

Donc:

$$C = KV = K'h^3$$

C'est la formule générale des fourneaux de mine enterrés.

La hauteur  $OA = h$  s'appelle ligne de moindre résistance, le rayon de l'en-

tonnoir est  $AC = r$ ; le rayon d'explosion est  $OB = R = h \sqrt{1 + n^2}$

On appelle  $OI = F$ , le rayon de friabilité;  $F = 1,41 R$ , c'est le rayon dans lequel la cohésion des terres est détruite.

$AI = f$  est le rayon du cercle de friabilité  $f = \sqrt{F^2 - h^2}$

On appelle fourneau ordinaire, le fourneau d'indice 1; c'est le plus efficace.

La ligne de moindre résistance correspondante est  $H$  et on a:

$$C = KH_3$$

avec  $r = H$ ;  $R = 1,41 H$ ;  $F = 1,41 \times R = 2 H$ ;  $f = H \sqrt{3}$

La profondeur  $AG = p$  de l'entonnoir apparent est  $1/3 H$ .

Pour les explosifs brisants (mélinite) on a approximativement:

(Les valeurs de  $K$  données, ci-dessous ainsi que les indications générales qui précèdent et qui suivent sont reproduites à titre purement documentaire d'après des règlements, déjà anciens, des troupes du génie militaire français et belge).

VALEURS DE K.

Terres légères	0,70
Terres fortes	1,00
Terres mêlées de pierres	1,20
Argile ou tuff	1,30
Maçonnerie médiocre, roc tendre	1,50
Roc ordinaire, bonne maçonnerie	1,75 à 2,65
Roc très dur, béton de ciment	2,65 à 4,00

Le coefficient K dépend aussi de la nature des explosifs; il est 1,7 fois plus grand que ci-dessus pour la poudre noire,

Remarquons qu'une charge peut être définie aussi bien par H que par C.

Les ellipsoïdes inférieurs de bonne rupture et de rupture limite ne dépendent que de H (p.ex.: ON = H; OM =  $\sqrt{2}H$ ; OQ =  $H\sqrt{2}$  et OP = 1,75 H pour des galeries coffrées en bois, d'après les règlements militaires français).

D'après les mêmes règlements, à un fourneau d'indice n dont la ligne de moindre résistance est h, correspond H h ( $\sqrt{1+n^2} - 0,41$ ).

Donc:

$$C_n = Kh (\sqrt{1+n^2} - 0,41)^3$$

donc:

$$K' = K (\sqrt{1+n^2} - 0,41)^3$$

Lorsque  $n > 1$ ,  $H > h$ : le fourneau est surchargé.

Lorsque  $n < 1$ ,  $H < h$ : le fourneau est sous-chargé.

Pour  $n = 0$ ,  $H = 0,59h$ ; c'est le camouflet maximum (c'est-à-dire la plus forte charge ne produisant pas d'entonnoir apparent) et  $K' = 0,21 K$ . Pour toutes les valeurs de  $H = \sqrt[3]{\frac{C}{K}} < 0,59 h$ , il y a camouflet, sans projection aucune.

Pour un fourneau d'indice n,  $r = nh$ ;  $R = h \sqrt{1+n^2}$

$$F = 1,41 R, f = h \sqrt{1+2n^2}, p = \frac{1}{3} h (2n-1).$$

c'est-à-dire que l'entonnoir apparent est pratiquement nul dès que  $n < \frac{1}{2}$

Pour  $1 < n < 3$ , on peut employer la formule:  $C = K n^3$  qui donne des charges un peu trop fortes. Il s'agit de fourneaux surchargés; ce cas ne se rencontre guère en constructions civiles. Les charges sont placées dans des chambres de mine.

Dans les déblais rocheux, on cherche, au contraire, les camouflets, explosions sans projections, qui s'effectuent par des pétardements, c'est-à-dire par des charges assez faibles placées au fond des trous de mine étroits, sans chambre de mine proprement dite. Si les pétards sont mis à feu simultanément, on emploie la formule:  $C = mgh^3$ , h étant la ligne de moindre résistance, m le rapport  $\frac{e}{h}$  ou  $\frac{e}{h}$  représente l'espacement des fourneaux. On prend généralement  $m = 1,50$ .

Si les fourneaux sont mis à feu successivement, on emploie la formule:

$$C = 1,50 gh^3 \text{ et on fait: } e = h.$$

Le coefficient g est le produit de deux facteurs g' et g'' dont les valeurs figurent dans les tableaux ci-après.

$$g = g' g''$$

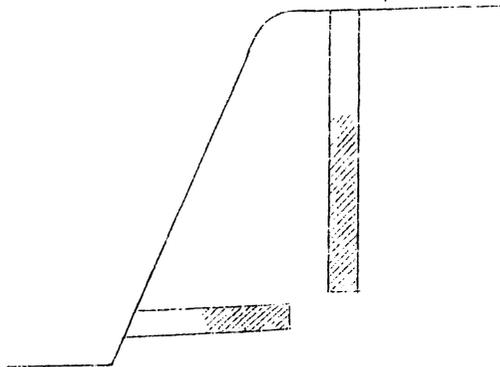
Valeurs de g'		Valeurs de g''	
Dynamite-gomme	0,70	Roches très dures: granites, quartzites	0,65
Grisoutine-gomme à 30%	0,80	" dures: granites, gneiss	0,45
" " 12%	0,90	" " schistes et calcaires, schistes	0,35
Dynamite n° 1	1,00	" peu dures: calcaires, schistes	0,20
Tonite, oheddite	1,20 à 1,30	" tendres: houille, orale, schistes	0,10
Dynamite ammoniacale (30% de dynamite)	1,35	" grenues ou terres: alluvions, sable	0,03
Dynamite n° 3	1,80	Maçonnerie de briques	0,27
Poudre de mine noire comprimée	2,00	Béton de ciment: environ	0,40
" " " " granulée	2,50		

Si l'on veut éviter tout ébranlement, on réduit la valeur de g dans une proportion que l'on détermine par des essais; on procède par charges, les plus petites possibles et que l'on fait sauter successivement.

L'effet des coups de mine et fourneaux est accru par l'explosion simultanée. Les

formules précédentes supposent le bourrage parfait, qui exige une épaisseur de bourrage de 1,5 à 2 H. Dans un forage, on bourre généralement sur une longueur au moins égale à la 1/2 profondeur. Si le bourrage est imparfait, il faut augmenter la charge d'une quantité qui, pour les explosifs brisants atteint environ 30% en cas de défaut complet de bourrage. Avec les poudres lentes, la majoration serait beaucoup plus forte; il faut toujours un bourrage soigné.

Si la charge agit sur plusieurs faces en formant plusieurs entonnoirs, il faut un supplément d'environ 10% par entonnoir supplémentaire, avec limite de 30%, en cas d'explosif brisant.



Les fourneaux que nous venons d'examiner sont de dimensions telles qu'on puisse les considérer comme ponctuels (petit nombre de pétards en paquets). Pour faire des abattages considérables (foudroyages), il arrive qu'on fore à faible distance d'une paroi verticale abrupte des trous profonds (à la sondeuse), que l'on remplit d'explosifs sur presque toute la hauteur (2/3 ou 3/4). Un tel fourneau agit comme un fourneau allongé et donne un entonnoir allongé dont la largeur correspond au rayon de l'entonnoir d'une charge concentrée

$$\frac{c}{\alpha}$$

On peut donc appliquer les formules précédentes à la charge  $\frac{c}{\alpha}$

$\alpha$  est le rapport du grand axe au petit axe de l'entonnoir elliptique qui se produit lorsque la longueur  $l$  de la charge est inférieure à 60 fois son  $\phi$  d. On a:

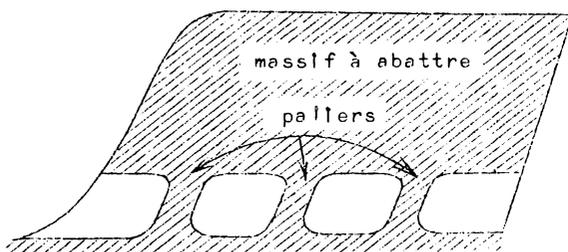
$$\alpha = 0,66 \sqrt[4]{\frac{l}{d} + 4}$$

Lorsque  $\frac{l}{d} > 60$ , la valeur de  $\alpha$  est celle qui correspond à  $\frac{l}{d} = 60$ , soit 1,86

Lorsque  $\frac{l}{d} < 60$ ,  $\frac{c}{\alpha}$  est le poids de la charge; lorsque  $\frac{l}{d} > 60$ ,  $\frac{c}{\alpha}$  est le poids

de la charge de longueur égale à 60 fois le  $\phi$ . Parfois aussi, pour les foudroyages, on crée de grands fourneaux dans des chambres de mine profondes auxquelles on accède par galeries et rameaux bien bourrés avant mise à feu. (C'est le cas notamment pour la destruction des récifs sous-marins). Ces méthodes ont comme inconvénient une assez forte consommation d'explosif. Pour faire du foudroyage avec une moindre consommation d'explosif, on peut procéder au déblai par minage d'une saignée horizontale profonde à la base du massif à abattre en conservant pour son support un nombre suffisant de piliers. Ceux-ci sont ensuite foudroyés simultanément.

Les charges superficielles ont un effet beaucoup moins fort que les charges enterrées et le bourrage joue un rôle très important. A une certaine profondeur sous eau, on peut considérer la charge comme parfaitement bourrée



Une charge concentrée détruit en profondeur sur une épaisseur  $e$  telle que:

$$c = Ke^3 ;$$

une surcharge allongée telle que:

$$c = Ke^2 ;$$

$c$  étant la charge par mètre dans ce cas. Pour les explosifs brisants tels que la mélinite, cheddite, tonite, on peut admettre en cas de

bouillage parfait  $K = 10$  pour les charges concentrées et le roc très dur et  $K = 6$  pour les charges allongées dans les mêmes conditions. Lorsqu'il n'y a pas de bouillage, il faut multiplier la charge concentrée par 6,5, la charge allongée par 4 à 5 environ.

### § 3.- EXPLOSIFS.-

Je renvoie au cours de chimie pour l'étude physico-chimique des explosifs. Au point de vue de leurs effets, on distingue les explosifs lents (poudre noire, nitro-cellulose) et les explosifs brisants (acide picrique ou trinitrophénoï, trinitrotoluène).

Les explosifs lents ne sont guère utilisés: ce sont des explosifs propulsifs.

Comme explosifs brisants, on emploie surtout les dynamites, mélanges de matières inertes et de nitroglycérine. La manipulation n'est pas sans danger, surtout des cartouches gelées ou suintantes. La dynamite dégage, par explosion, des vapeurs nitreuses très nocives. La dynamite-gomme, mélange de nitrocellulose et de nitroglycérine est puissante et moins dangereuse à manipuler. Les explosifs, dits de sûreté, très stables et à basse température d'explosion, sont composés en majeure partie de nitrate d'ammoniac mélangé à des corps combustibles ou explosifs, les gaz ne sont généralement pas nocifs.

L'acide picrique (mélinite) et le trinitrotoluène (trotyle) sont des explosifs brisants et très stables; ils ne sont guère employés que dans les usages militaires; ils sont moins brisants que la dynamite (mélinite = 1,7 fois poudre noire, dynamite = 3 à 4 fois poudre noire).

On fait beaucoup de propagande, en ce moment, pour les explosifs à l'air liquide. Les cartouches sont formées de matières combustibles enveloppées dans un sac, que l'on plonge, au moment de l'emploi dans l'air liquide. La cartouche doit servir immédiatement, sinon l'air liquide s'évapore. Comme matières combustibles, on emploie du charbon de bois pulvérisé, de la suie, de la naphthaline, etc... La brisance est comparable à celle de la dynamite et il n'y a pas de dégagement de gaz délétères.

Les explosifs brisants de sûreté, tels que les ammonites, etc... n'explosent en grande masse que sous l'effet de l'explosion d'un détonateur secondaire assez puissant, formé, en général, de quelques cartouches d'un explosif moins stable. Les explosifs brisants tels que la mélinite, le trotyle, n'explosent pas au choc et à la flamme, mais sous l'effet d'un détonateur faible (capsule de fulminate). La dynamite est généralement amorcée au fulminate, mais peut détuner à la chaleur et au choc.

### § 4.- TIRAGE DES MINES.-

Les explosifs sont introduits dans le trou de mine en cartouches ou paquets de cartouches. Les pétards sont amorcés par des capsules de fulminate. La charge amorcée est recouverte d'un bouillage en terre, enfoncé dans le trou de mine par un bcurroir en bois. Les bouillages augmentent sensiblement les effets des explosifs même brisants et doivent être soignés.

L'allumage peut se faire par mèche Bickford ou électriquement.

Comme on tire souvent plusieurs mines simultanément, on dispose les détonateurs électriques en parallèle (détonateurs à étincelles) ou en série (détonateurs à filament); le courant est produit à l'aide d'un exploseur à induction magnéto-électrique ou d'une batterie. Si le tirage se fait par mèche, les pétards sont reliés à des tronçons de cordeau détonant (à l'acide picrique ou au trinitrotoluène) qui sont amorcés eux-mêmes par une cartouche avec capsule de fulminate et mèche Bickford, qui brûle à raison d'environ 70 cm. par min. Les liaisons entre les divers pétards réalisées par des conducteurs électriques ou des cordeaux détonnants, portant le nom de comassement.

Le cordeau détonant peut être utilisé pour élargir les trous de mine étroits, par explosion de quelques brins, selon le diamètre.

§5.- PRIX DES DEBLAIS ROCHEUX.-

Le prix de la main d'oeuvre s'apprécie d'après les indications données sur le rendement. Les frais d'outillage sont importants et comportent environ par m<sup>3</sup>:

pour les classes	II	III	IV	V	VI	VII
en centimes - or	3 - 6	6 - 10	10-12	12-16	16-20	20-25

La consommation d'explosifs (dynamite) est par m<sup>3</sup> 40 à 80 - 110 à 160 - 200 à 300 grs.

La dépense correspondante par m<sup>3</sup> est d'environ: centimes-or: 13 à 25 - 40 à 50 - 65 à 95

On voit que la dépense de main d'oeuvre reste prépondérante, d'où l'intérêt de développer l'outillage et de bien désagréger la roche par les explosifs.

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*

TABLE DES MATIERES.

\*\*\*

CHAPITRE I.— PÉDACTION DES PROJETS DE TERRASSEMENTS ET CUBATURES .....	2
§ 1. Rédaction d'un projet de route .....	2
§ 2. Rédaction d'un projet de chemin de fer .....	2
§ 3. Profil en long .....	3
§ 4. Profils en travers .....	4
§ 5. Principe des cubatures .....	5
§ 6. Figuration géométrique .....	7
§ 7. Autres méthodes de cubature .....	9
§ 8. Compensation approximative .....	9
§ 9. Compensation exacte .....	10
§ 10. Effets du foisonnement et du tassement .....	11
§ 11. Mesure des aires des profils en travers .....	11
§ 12. Méthode sommaire de cubature par réduction de la déclivité du terrain à l'horizon .....	15
 CHAPITRE II.— MOUVEMENT ET REPARTITION DES TERRES, DISTANCES MOYENNES DE TRANSPORT .....	17
§ 1. Courbe de Brückner .....	17
§ 2. Moments de transport et distances moyennes .....	18
§ 3. Ligne de répartition, cas simples .....	18
§ 4. Répartition dans le cas général .....	19
§ 5. Lignes de répartition en gradins .....	21
§ 6. Cas où les lieux d'emprunt ou de dépôt sont imposés .....	23
§ 7. Dispositions pratiques .....	23
§ 8. Critique de la méthode de Brückner .....	24
§ 9. Transports transversaux .....	25
§ 10. Cas des tranchées de canaux, bassins, etc .....	25
§ 11. Terrassements superficiels .....	26
 CHAPITRE III.— EXECUTION DES TERRASSEMENTS, SONDAGES, FOUILLES ET CHARGE .....	29
§ 1. Nature des terres .....	29
§ 2. Sondages et forages .....	31
§ 3. Exécution des fouilles .....	36
§ 4. Prix de la fouille et de la charge .....	41
 CHAPITRE IV.— TRANSPORT, REMBLAIS, CHANTIERS .....	43
§ 1. Moyens de transport .....	43
§ 2. Prix de transport .....	47
§ 3. Formation des remblais .....	50
§ 4. Disposition des chantiers de déblai .....	52
§ 5. Disposition des chantiers de remblai .....	56
§ 6. Installation des chantiers. Travaux préliminaires .....	59
 CHAPITRE V.— DEBLAIS ROCHEUX. TRAVAUX DE MINE .....	61
§ 1. Forages .....	61
§ 2. Action des fourneaux de mine .....	63
§ 3. Explosifs .....	67
§ 4. Tirage des mines .....	67
§ 5. Prix des déblais rocheux .....	68

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*