

11.519 - A

1

ENCYCLOPÉDIE DES TRAVAUX PUBLICS

THÉORIE ET PRATIQUE

DU

MOUVEMENT DES TERRES

D'APRÈS LE PROCÉDÉ BRUCKNER

*Tous les exemplaires de l'ouvrage de M. Ernest HENRY sur le
Mouvement des Terres devront être revêtus de la signature de
l'auteur.*

Ernest Henry

ENCYCLOPÉDIE

DES

TRAVAUX PUBLICS

Fondée par **M.-C. LECHALAS**, Insp^r gén^{al} des Ponts et Chaussées.

Médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889

THÉORIE ET PRATIQUE

DU

MOUVEMENT DES TERRES

D'APRÈS LE PROCÉDÉ BRUCKNER

PAR

ERNEST HENRY

INSPECTEUR GÉNÉRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE

BAUDRY ET C^{ie}, LIBRAIRES-ÉDITEURS

15, RUE DES SAINTS-PÈRES

MÊME MAISON A LIÈGE

1893

TOUS DROITS RÉSERVÉS

0
625.7
H5217

UFRJ

Centro de Ciências Matemáticas e
de Natureza
Biblioteca Central

N.º REGISTRO

DATA

027897-1 01/12/88

CRITÉRIO

Doação desconhecida

THÉORIE ET PRATIQUE
DU
MOUVEMENT DES TERRES

D'APRÈS LE PROCÉDÉ BRUCKNER

PRÉFACE

Le calcul du mouvement des terres, dont nous présentons la théorie et la pratique, a été imaginé par l'ingénieur bavarois Bruckner. Dès que nous en avons eu connaissance par le *Traité de statique graphique* de M. Culmann (1), nous nous sommes efforcé de le mettre à la portée de tous les agents qui, dans le service vicinal dont nous étions alors chargé, étaient appelés à préparer de nombreux projets de construction de chemins.

Les instructions que nous leur avons adressées à cette fin datent de 1884. Une expérience de plus de huit années a donc été faite sur la méthode dont il s'agit.

Cette expérience, à laquelle ont pris part des agents de valeur très inégale, a été tellement concluante qu'il nous a paru utile de publier les instructions que nous avons élaborées.

Nous avons cru toutefois devoir les compléter en ce qui

(1) *Traduction française* par MM. Glasser, Jacquier et Valat, tome 1^{er}, pages 433 et suiv.

concerne la détermination de la ligne de répartition des terrassements. Cette question, qui est la seule sur laquelle puisse s'exercer la sagacité des auteurs des projets, a été l'objet de développements consignés aux annexes.

Notre but a été de contribuer à la vulgarisation d'un procédé (1), éminemment pratique, qui présente de très grands avantages non seulement pour les agents chargés de préparer les projets de terrassements, mais encore pour tous ceux qui, à divers degrés, sont appelés à vérifier ces projets.

(1) Des mémoires ont été publiés à ce sujet dans les *Annales des ponts et chaussées* par M. Paul Lévy (1883, 2^e semestre, page 54) et par M. Strohl, ingénieur en chef des ponts et chaussées (1884, 1^{er} semestre, page 156).

PREMIÈRE PARTIE

THÉORIE DU PROCÉDÉ BRUCKNER

CHAPITRE PREMIER

PROPRIÉTÉS DE LA COURBE DE BRUCKNER.

§ 1. — Construction de la courbe de Bruckner.

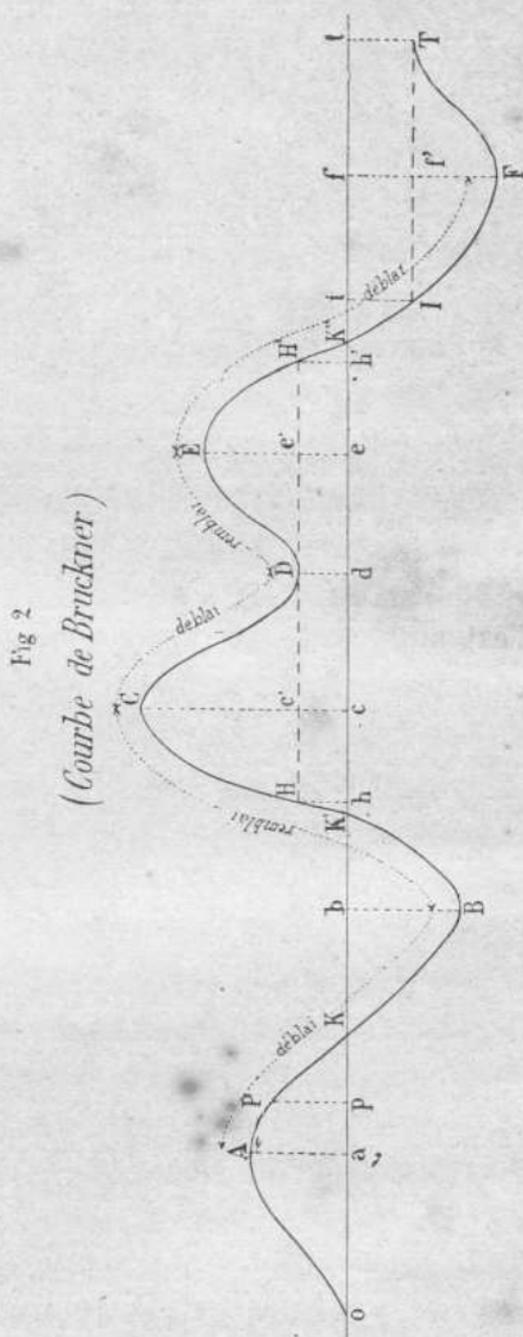
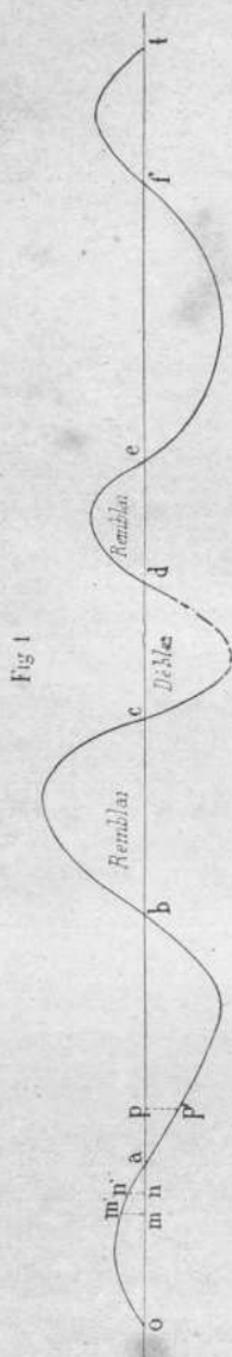
1. — On connaît le moyen de figurer les terrassements d'un projet de route ou de chemin à l'aide d'un profil en long dont les ordonnées représentent les *surfaces* de remblai des profils en travers, quand elles sont au-dessus de la ligne des longueurs, et les *surfaces* de déblai des profils en travers, quand elles sont au-dessous de cette ligne.

Si l'on suppose ces profils en travers suffisamment rapprochés, on obtient une courbe (fig. 1) partagée en segments par la ligne des longueurs ou ligne de terre *ot*.

Les surfaces des segments supérieurs représentent les cubes des remblais, et celles des segments inférieurs les cubes des déblais.

C'est, du moins, ce qui a lieu si l'on admet la méthode expéditive de la moyenne des aires pour la cubature des terrasses. D'après cette méthode, en effet, le cube compris entre deux profils de même nature, tels que les profils *m* et *n*, tous deux en remblai, est égal au produit de la demi-somme des aires de ces profils par la longueur de l'entre-profil : or, ce produit se mesure par la surface du trapèze dont les côtés parallèles sont les ordonnées *mm'* et *nn'*. Dans le cas où un profil en déblai *p* succède à un profil en remblai *n*, on sait qu'il y a lieu de déterminer préalablement un point de passage divisant l'entre-profil *np* en deux parties proportionnelles aux aires de remblais et de déblais : ce

point de passage n'est autre que le point de rencontre a de la courbe avec la ligne de terre et les surfaces des triangles



situés de part et d'autre de ce point a représentent les cubes de remblais et de déblais compris entre les deux profils n

et p , puisque, d'après la méthode expéditive, on obtient ces cubes en multipliant chaque aire par la moitié de la longueur de chacun des entre-profils na et ap .

Le principe du procédé *Bruckner* consiste à construire une courbe dont les ordonnées représentent, non plus des surfaces, mais des *cubes*. Le cube porté à chaque profil est égal à la somme algébrique des remblais et des déblais depuis l'origine jusqu'à ce profil, les remblais étant considérés comme positifs et les déblais comme négatifs. On cumule, par conséquent, les cubes de terrassements en ajoutant les cubes des remblais et en retranchant les cubes des déblais. Quand le résultat est positif, on le porte au-dessus de la ligne de terre; dans le cas contraire, on le place au-dessous de cette ligne.

C'est ainsi qu'a été construite la courbe de la figure 2. L'ordonnée pP , par exemple, est égale à la somme des cubes des remblais, diminuée de la somme des cubes des déblais, depuis l'origine jusqu'au profil p . Ces sommes sont, d'ailleurs, représentées sur la figure 1, savoir : la somme des remblais par la surface du segment supérieur dont la corde est oa , et la somme des déblais par la surface de la portion du segment inférieur qui se termine à l'ordonnée pp' .

Quand les remblais égalent les déblais, la courbe se termine à la ligne de terre.

Sinon, l'ordonnée de l'extrémité de la courbe représente l'excès des remblais sur les déblais, ou des déblais sur les remblais, suivant que cette ordonnée est positive ou négative.

La courbe dont il s'agit jouit de diverses propriétés dont on va faire connaître les principales.

§ 2. — Propriété des portions de courbe descendantes ou ascendantes.

2. — Si l'on compare la courbe de Bruckner avec celle de la figure 1, on voit qu'elle atteint un premier maximum en A, et que ce maximum correspond au point de passage a .

Il est aisé de s'expliquer ce résultat. Entre l'origine et le point a , il n'existe que des remblais, ainsi que le montre la figure 1 : les ordonnées de la courbe de Bruckner doivent donc aller en croissant. Et comme les déblais font leur apparition au point a , ils doivent être retranchés, à partir de ce point, de la somme des cubes obtenus par l'accumulation successive des remblais. C'est donc au point de passage a que les ordonnées de la courbe de Bruckner décroissent après avoir grandi graduellement : un maximum doit se produire en ce point.

Si l'on continue à suivre la courbe à partir de ce maximum A, on reconnaît que les ordonnées diminuent au fur et à mesure que des déblais sont défalqués. Elles deviennent même négatives, dès que la somme des déblais retranchés l'emporte sur le total des remblais précédemment obtenus. Les ordonnées négatives vont en croissant en valeur absolue, tant qu'il existe des déblais, c'est-à-dire jusqu'au point de passage b , indiqué sur la courbe de la figure 1 ; à partir de ce point, les remblais se révèlent et ils interviennent pour réduire, en valeur absolue, les ordonnées situées au-dessous de la ligne de terre ot . C'est ainsi que la courbe présente un minimum en B et que ce minimum correspond au point de passage b .

Il suit de là que les maximum de la courbe de Bruckner correspondent aux points de passage du remblai au déblai,

et les minimum aux points de passage du déblai au remblai.

Par conséquent, la nature des profils est la même dans l'intervalle compris soit entre un maximum et un minimum, soit entre un minimum et un maximum consécutifs. Ce sont exclusivement des déblais entre A et B, C et D, E et F ; ce sont uniquement des remblais entre B et C, D et E. Les portions de courbe indiquent donc des déblais dans l'étendue comprise entre un maximum et un minimum consécutifs, c'est-à-dire quand elles sont descendantes ; elles indiquent des remblais dans l'intervalle compris entre un minimum et un maximum consécutifs, c'est-à-dire quand elles sont ascendantes.

§ 3. — Propriété des segments détachés par la ligne de terre ou par une parallèle à cette ligne.

3. — La ligne de terre *ot*, dans la courbe de Bruckner, détermine des segments supérieurs et inférieurs.

Si l'on considère l'un de ces segments, le premier, par exemple, qui est compris entre les profils *o* et *K*, on constate qu'il embrasse une section où il existe des remblais et des déblais, puisque la courbe limitant ce segment est en partie ascendante et en partie descendante. Il résulte de la construction même de la courbe que les cubes des remblais sont égaux aux cubes des déblais : du moment, en effet, que l'ordonnée est nulle au point *K*, c'est qu'on a soustrait autant de déblais qu'il y avait de remblais depuis l'origine. Ce volume de remblais, qui est égal à celui des déblais, est d'ailleurs représenté par l'ordonnée maximum *Aa*.

Ainsi, la ligne de terre *ot* détache des segments dont les bases représentent des sections dans lesquelles les rem-

blais et les déblais se compensent exactement. De plus, le cube de ces remblais ou de ces déblais se mesure par l'ordonnée maximum du segment.

Cette propriété n'est pas particulière à la ligne ot . Elle est commune à toutes les parallèles à cette ligne. C'est la conséquence de la manière dont la courbe de Bruckner a été tracée.

4. — La propriété qui vient d'être signalée peut être avantageusement utilisée pour le calcul du mouvement des terres.

Ce calcul comprend, en effet, deux opérations principales : l'une consiste à rechercher les cubes de déblais susceptibles d'être employés en remblais, et l'autre a pour objet de trouver la distance moyenne des transports occasionnés par l'emploi de ces terrassements.

Voici comment la courbe de Bruckner se prête à la première opération :

On vient de voir que dans la première section de cette courbe (figure 2), qui est limitée par les profils o et K , tous les déblais compris entre les profils a et K peuvent servir à former les remblais compris entre les profils o et a . Le cube des uns, qui est égal au cube des autres, est représenté par l'ordonnée Aa . De même dans la 2^e section située entre les profils K et K' , où le cube des déblais Bb peut servir à constituer un cube de remblais de même importance.

Dans la 3^e section comprise entre les profils K' et K'' , il y a encore compensation des déblais et des remblais, mais l'emploi des terrassements s'obtient à l'aide du tracé d'une ligne HH' menée par le minimum D parallèlement à la ligne de terre ot . Cette parallèle détermine deux segments, dont les cordes sont HD et DH' et qui jouissent de la même

propriété que les segments détachés par la ligne de terre. Il en résulte que les déblais compris entre les profils c et d peuvent servir à former les remblais compris entre les profils h et c ; leur cube est d'ailleurs représenté par la portion d'ordonnée Cc' . Pareillement pour les déblais et les remblais du second segment, dont le cube est égal à Ee' . Quant aux déblais situés entre les profils h' et K'' , ils peuvent être employés à former les remblais situés entre les profils K' et h ; leur cube est représenté soit par $H'h'$, soit par Hh .

Il pourrait se faire qu'entre les extrémités K' et K'' d'une section, la courbe présentât deux minimum et même un plus grand nombre. Dans ce cas, il suffirait de mener par chaque minimum une parallèle à la ligne de terre, ainsi qu'on l'a fait ci-dessus, et l'on déterminerait d'une manière analogue les emplacements et les quantités des déblais et des remblais qui se compensent.

La 4^e et dernière section, dans la courbe donnée comme exemple, est limitée par les profils K'' et t . Comme l'extrémité T de la courbe n'aboutit point à la ligne de terre, il s'ensuit que dans cette section les déblais et les remblais ne se compensent pas. Si l'on mène par l'extrémité T la droite IT parallèle à la ligne de terre, on détache un segment où les déblais compris entre les profils i et f peuvent former les remblais compris entre les profils f et t , l'importance des uns et des autres étant mesurée par Ff' . Il reste, entre les profils K'' et i , des déblais sans emploi; leur cube est représenté par li ou Tt .

Si l'extrémité de la courbe s'était trouvée au-dessus de la ligne de terre, il y aurait eu, au contraire, excès de remblais et leur emplacement eût pu être déterminé de la même manière.

§ 4. — Propriété des aires des segments.

5. — On vient de voir comment s'opère la distribution des terrassements, lorsque la ligne de terre a été choisie comme ligne de répartition.

Mais il est manifeste que l'on obtiendrait une autre distribution, si l'on prenait comme ligne de répartition une parallèle à la ligne de terre.

Le problème de la répartition des terrasses ne peut donc pas être résolu à l'aide des seules propriétés de la courbe de Bruckner qui viennent d'être exposées.

Il s'agit de découvrir la ligne de répartition qui conduit au minimum de dépense pour les transports.

Ce résultat peut être obtenu en mettant à profit la propriété suivante dont jouissent les aires des segments.

6. — Si l'on envisage un segment quelconque (fig. 3), on peut remplacer la courbe sur laquelle on a raisonné jus-

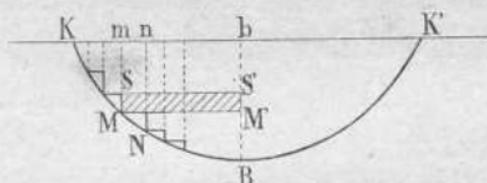


Fig. 3.

qu'à présent par une ligne polygonale dont les gradins correspondent à des profils suffisamment rapprochés. Dans la portion du segment où la ligne est descendante, c'est-à-dire entre les profils K et b, les ordonnées indiqueront l'accumulation successive des déblais et, par conséquent, la hauteur de chaque gradin représentera le cube de déblai afférent à chaque profil. Le total des hauteurs de tous ces gradins sera bien égal à l'ordonnée Bb qui figure le cube total des déblais.

Si l'on considère la quantité de déblai MS du profil m , on reconnaîtra que, pour pouvoir être employée en remblai, cette quantité devra d'abord être transportée jusqu'à la ligne de passage Bb du déblai au remblai. On peut admettre que le transport s'effectuera parallèlement à la ligne de terre, de telle sorte que le parcours sera représenté par la longueur MM'. Si l'on appelle *moment de transport* le produit du cube de déblai par la distance à laquelle il est transporté, le moment de transport de la quantité MS sera figuré par la surface du rectangle hachuré MSM'S'.

Il suit de là que pour l'ensemble des déblais du segment considéré, c'est-à-dire pour le cube Bb, le moment de transport jusqu'à la ligne de passage sera représenté par la surface du demi-segment K**b**B.

On reconnaîtrait d'une manière analogue que le moment de transport des déblais, depuis la ligne de passage jusqu'à la place qu'ils doivent occuper dans le remblai, est représenté par la surface du demi-segment K'**b**B.

Finalement, le moment de transport des déblais en remblais, dans l'étendue de la section KK', est mesuré par la surface totale du segment dont cette section forme la base.

3. — Cette propriété est importante, d'abord parce qu'elle fournit le moyen de découvrir la ligne de répartition la plus avantageuse, ensuite parce qu'elle permet de déterminer la distance moyenne des transports, ce qui constitue la seconde opération nécessitée par le mouvement des terres.

On indiquera plus loin comment ce dernier résultat peut être obtenu.

Il s'agit d'abord d'utiliser la propriété des aires des seg-

ments à la recherche de la ligne de répartition qui conduit à la moindre dépense de transport.

Si l'on admet que le prix de transport est proportionnel à la distance, la dépense est égale au produit du moment de transport par le prix de transport d'un mètre cube à l'unité de distance. Si l'on suppose, en outre, que ce dernier prix est le même pour tous les déblais, la dépense se trouve représentée par le moment de transport. Il en résulte, dès lors, que la ligne de répartition la plus avantageuse est celle qui occasionne le plus petit moment total de transport.

Or, le moment total de transport, abstraction faite des emprunts ou dépôts, est représenté lui-même par l'ensemble des surfaces des segments détachés par la ligne de répartition.

La ligne de répartition doit donc être tracée, dans les hypothèses qui viennent d'être faites, de manière à déterminer des segments dont la surface totale soit aussi petite que possible.

Le chapitre suivant fait connaître comment ce principe peut recevoir son application.

CHAPITRE II

DÉTERMINATION DE LA LIGNE DE RÉPARTITION DES TERRASSEMENTS.

8. — A moins de circonstances exceptionnelles, il est nécessaire de tenir compte de la dépense des emprunts et des dépôts auxquels donne lieu la ligne de répartition.

Il est généralement avantageux de ne pas accroître la masse des terrassements, c'est-à-dire de ne pas créer d'emprunt ou de dépôt, quand il y a égalité entre les cubes totaux de déblais et de remblais, ou bien, dans le cas contraire, de ne pas augmenter le cube des emprunts ou des dépôts révélé par le métré des terrasses.

Aussi, on admettra, dans ce qui va suivre, que le cube des emprunts ou des dépôts ne doit pas être augmenté.

1^{er} CAS. — *La courbe de Bruckner aboutit à la ligne de terre.*

9. — Cette courbe a, dès lors, ses deux extrémités au

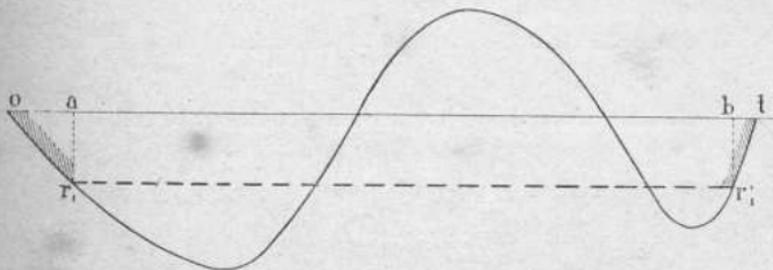


Fig. 4.

même niveau. Il y a égalité entre les déblais et les remblais. Par conséquent, ni dépôt, ni emprunt.

Dans ce cas, la ligne de répartition coïncide nécessairement avec la ligne de terre.

Si, en effet, on imaginait une autre ligne de répartition, telle que $r_1 r'_1$, cette ligne ferait apparaître, entre les profils o et a , un déblai, mesuré par la hauteur $r_1 a$, qui comporterait un dépôt et, entre les profils b et t , un remblai, mesuré par la hauteur égale $r'_1 b$, qui exigerait un emprunt.

2° CAS. — *La courbe de Bruckner se termine soit au-dessus, soit au-dessous de la ligne de terre.*

10. — Cette courbe a, dès lors, ses deux extrémités à des niveaux différents. Il y a excès de remblais ou de déblais. Par conséquent, un emprunt ou un dépôt est indispensable.

On remarquera tout d'abord que la ligne de répartition ne peut être ni inférieure à la plus basse, ni supérieure à la plus haute des deux horizontales passant par les extrémités de la courbe.

Si on choisissait, par exemple, une ligne de répartition $r_1 r'_1$, tracée au-dessous de la ligne de terre ot , c'est-à-dire

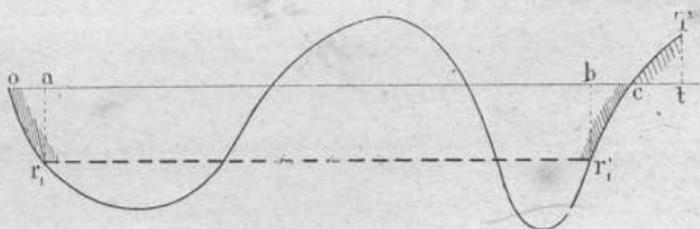


Fig. 5.

de la plus basse des deux horizontales passant par les extrémités de la courbe, on ferait surgir, entre les profils o et a , un dépôt mesuré par la hauteur $r_1 a$, en même temps

qu'on déterminerait, entre les profils b et c , un emprunt supplémentaire mesuré par la hauteur égale $r'_1 b$.

Pareillement, si l'on adoptait une ligne de répartition $r_1 r'_1$ située au-dessus de la ligne AT , c'est-à-dire de la plus

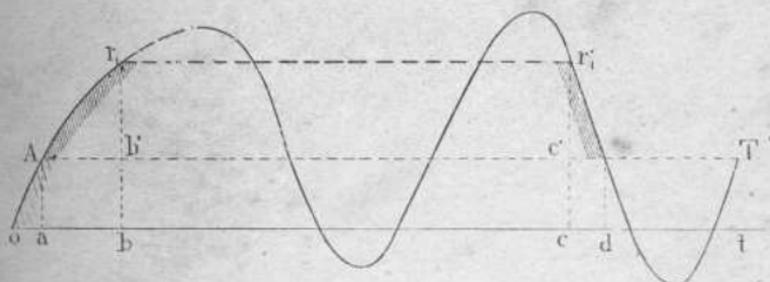


Fig. 6.

haute des deux horizontales passant par les extrémités de la courbe, cette droite $r_1 r'_1$ ferait naître, entre les profils c et d , un dépôt représenté par la hauteur $r'_1 c'$, en même temps qu'elle occasionnerait, entre les profils a et b , un emprunt supplémentaire représenté par la hauteur égale $r_1 b'$.

Dans l'un et l'autre de ces cas, il y aurait augmentation de la masse des terrassements.

11. — La ligne de répartition ne doit donc pas franchir les limites de la zone formée par les deux horizontales passant par les extrémités de la courbe.

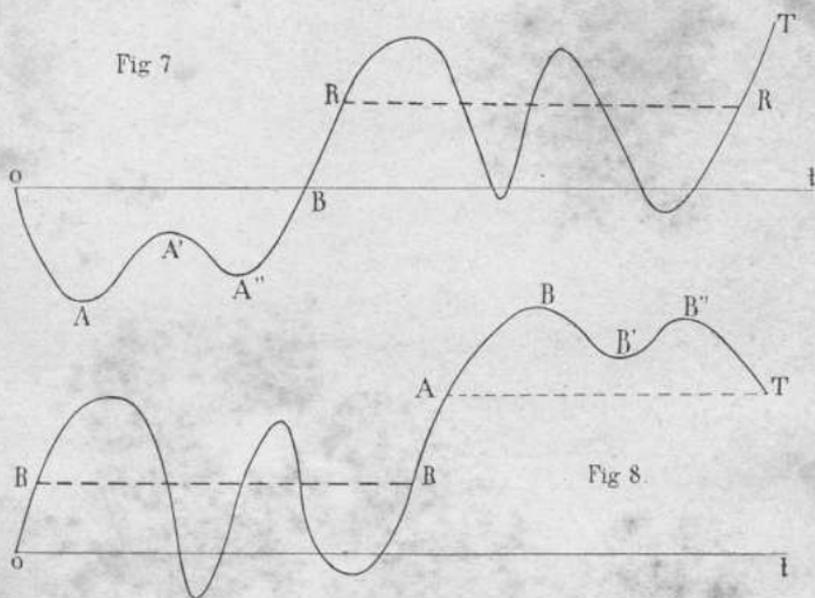
La ligne de répartition peut, en conséquence, soit coïncider avec l'une ou l'autre de ces deux horizontales extrêmes, soit consister en une droite intermédiaire.

12. — Une autre remarque se déduit de la précédente.

Du moment que la ligne de répartition ne peut pas franchir les limites de la zone formée par les deux horizontales extrêmes, les segments qui aboutissent aux extrémités de la courbe et qui sont situés en dehors de ces horizon-

tales extrêmes, ne peuvent être atteints lors des déplacements opérés en vue de la détermination de la ligne de répartition. Leur surface reste invariable.

Ces segments extrêmes doivent donc être laissés à l'écart dans la recherche de la ligne de répartition.



Tel est le cas du segment $OAA'A''B$ dans la figure 7 et du segment $ABB'B''T$ dans la figure 8. La recherche de la ligne de répartition est, en définitive, limitée à la courbe qui commence en B , dans la première de ces figures, et à la courbe qui finit en A , dans la seconde.

13. — On a vu, à la fin du chapitre 1^{er} (n^o 7), que la ligne de répartition doit être menée de manière à détacher des segments dont la surface totale soit aussi petite que possible.

Voici comment on peut arriver à ce résultat :

Soit une portion de courbe (fig. 9) traversée par une ligne de compensation quelconque xy . Il est aisé de re-

connaître comment varie la surface totale des segments, lorsque l'on déplace cette ligne de compensation.

Si le déplacement s'opère vers le haut, la surface de tous les segments supérieurs diminue, et celle de tous les segments inférieurs augmente. La variation de surface subie par chaque segment peut être représentée par l'aire d'un rectangle ayant pour longueur la corde du segment et pour hauteur le déplacement h , en supposant que ce déplacement soit suffisamment petit. Il s'ensuit que la diminution totale est exprimée par l'aire

$$(s + s_1) h$$

et l'augmentation totale par l'aire

$$(i + i_1) h$$

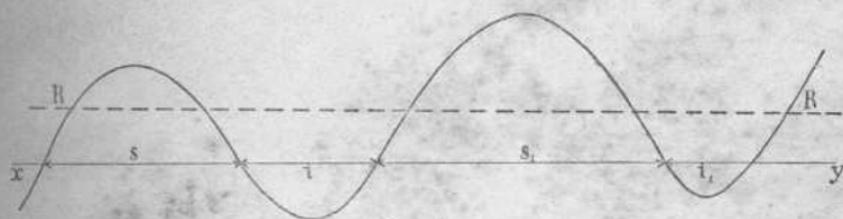


Fig. 9.

s, s_1 étant les cordes des segments supérieurs ; i, i_1 étant les cordes des segments inférieurs.

Si donc la somme des cordes des segments supérieurs est plus grande que la somme des cordes des segments inférieurs, ainsi que le suppose la figure 9, le résultat final se traduira par une diminution de l'ensemble des surfaces des segments.

Il y aura donc lieu, dans ce cas, de faire mouvoir la ligne vers le haut tant qu'il existera un écart entre la somme des cordes des deux catégories de segments.

On constate facilement que cet écart ira en décroissant au fur et à mesure que la ligne s'éloignera de sa position primitive xy . Enfin, quand la somme des cordes des segments supérieurs sera égale à la somme des cordes des seg-

ments inférieurs, la ligne occupera la position RR cherchée, c'est-à-dire celle qui détermine un minimum pour l'ensemble des surfaces de tous les segments. Si, en effet, on continuait à déplacer cette ligne, la somme des cordes des segments inférieurs l'emporterait sur celle des segments supérieurs et une augmentation finale de l'aire totale en découlerait (1).

La figure 10 indique le cas opposé à celui qui a été indi-

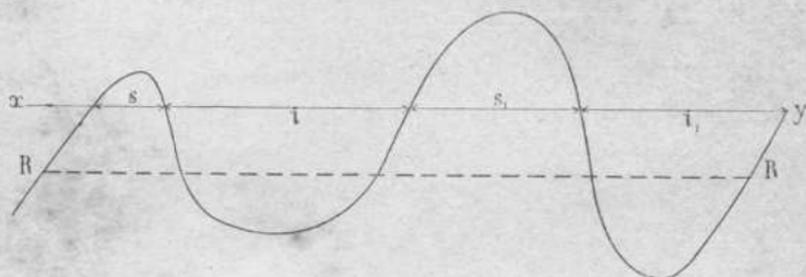


Fig. 10.

qué ci-dessus comme exemple. La ligne xy intercepte une somme de cordes plus grande pour les segments inférieurs. Il s'ensuit qu'il faut, dans ce cas, déplacer vers le bas la ligne de compensation. Les segments inférieurs vont en diminuant, tandis que les segments supérieurs augmentent, mais la diminution des premiers est plus grande que l'augmentation des seconds. C'est encore lorsque l'égalité se produit entre les sommes des cordes des deux catégories de segments que la ligne occupe la position dans laquelle l'aire totale des segments est minimum.

De là, la règle suivante :

L'horizontale de compensation qui détermine l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires est celle qui assigne la moindre surface aux segments traversés (2).

(1) On suppose que, dans ses déplacements, la ligne de compensation rencontre toujours les mêmes segments.

(2) Voir aux Annexes le cas où il est avantageux de rompre la ligne de répartition en la disposant en gradins horizontaux.

Cette horizontale constitue, dès lors, la ligne de répartition cherchée.

14. — La règle qui vient d'être énoncée n'est applicable qu'autant que le déplacement de la ligne de compensation peut s'effectuer, entre les deux horizontales passant par les extrémités de la courbe, jusqu'à la position qui réalise l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires.

Pour qu'il en soit ainsi, deux conditions sont nécessaires. S'il s'agit, par exemple, d'une courbe se terminant

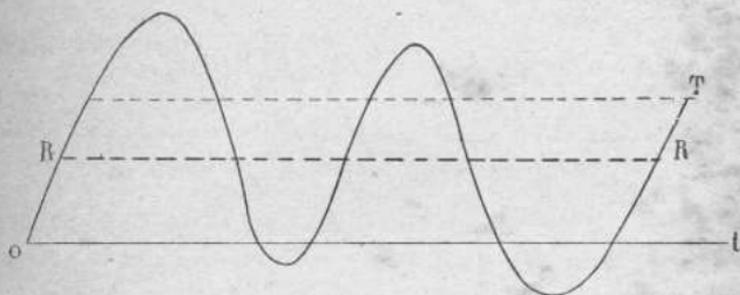


Fig. 14.

au-dessus de la ligne de terre, il faut : 1° qu'en faisant mouvoir la ligne de terre vers le haut, la diminution des segments supérieurs l'emporte sur l'augmentation des segments inférieurs et, par conséquent, que la somme des cordes des segments supérieurs sur la ligne de terre excède la somme des cordes des segments inférieurs ; 2° qu'en faisant mouvoir vers le bas la parallèle menée par l'extrémité libre de la courbe, la diminution des segments inférieurs l'emporte sur l'augmentation des segments supérieurs, et, par conséquent, que la somme des cordes des segments inférieurs, sur la parallèle supérieure, excède la somme des cordes des segments supérieurs.

D'une manière générale, les deux horizontales passant par les extrémités de la courbe doivent intercepter une

somme de cordes plus grande dans les segments qui diminuent que dans les segments qui augmentent, lors du déplacement de chaque horizontale vers l'extrémité opposée de la courbe.

15. — Quand cette double condition n'est pas remplie, l'horizontale de compensation qui assigne la moindre surface aux segments traversés se confond avec l'une des deux parallèles passant par les extrémités de la courbe.

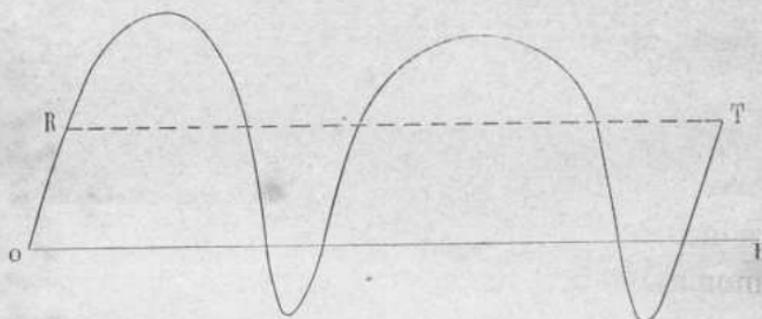


Fig. 12.

Elle coïncide avec la parallèle qui intercepte une somme de cordes plus grande dans les segments qui augmentent que dans les segments qui diminuent, lors d'un déplacement vers la parallèle opposée.

Dans l'exemple de la figure 12, l'horizontale de compensation doit être formée par la parallèle menée par l'extrémité T de la courbe. On reconnaît, en effet, que toute autre horizontale de compensation ne pourrait être obtenue qu'en déplaçant la ligne vers le bas, et ce déplacement donnerait lieu à un accroissement de la surface totale des segments traversés.

L'horizontale de compensation déterminée ainsi qu'il vient d'être dit constitue, dès lors, dans le cas dont il s'agit, la ligne de répartition cherchée.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE LA DISTANCE MOYENNE DE TRANSPORT

16. — Lorsque la ligne de répartition est trouvée, il reste à dégager la distance moyenne des transports dans chaque section où les déblais compensent les remblais. L'emplacement de ces sections est, du reste, déterminé par les profils correspondant aux extrémités des cordes des segments.

La distance moyenne de transport se déduit de la valeur du moment de transport.

Cette distance doit, en effet, être telle que, multipliée par le cube des déblais, elle donne un résultat égal à la somme des produits des cubes partiels par les distances de transport correspondantes. Or, cette somme n'est autre que le moment de transport. Il suffit donc, pour obtenir la distance moyenne des transports, de diviser le moment par le cube des déblais, c'est-à-dire de diviser la surface du segment par l'ordonnée ou flèche de ce segment. Si donc l'on trace un rectangle équivalent au segment et ayant comme hauteur la flèche de ce dernier, la longueur de ce rectangle représentera la distance moyenne cherchée.

Cette solution suppose que le prix des transports est le même sur tous les points du projet. Il n'en est généralement pas ainsi, puisque les terrassements peuvent s'effectuer à la brouette, au tombereau, au wagon, et que chacun de ces modes de transport comporte un prix spécial.

Lorsque les deux premiers modes sont employés, voici

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE LA DISTANCE MOYENNE DE TRANSPORT

16. — Lorsque la ligne de répartition est trouvée, il reste à dégager la distance moyenne des transports dans chaque section où les déblais compensent les remblais. L'emplacement de ces sections est, du reste, déterminé par les profils correspondant aux extrémités des cordes des segments.

La distance moyenne de transport se déduit de la valeur du moment de transport.

Cette distance doit, en effet, être telle que, multipliée par le cube des déblais, elle donne un résultat égal à la somme des produits des cubes partiels par les distances de transport correspondantes. Or, cette somme n'est autre que le moment de transport. Il suffit donc, pour obtenir la distance moyenne des transports, de diviser le moment par le cube des déblais, c'est-à-dire de diviser la surface du segment par l'ordonnée ou flèche de ce segment. Si donc l'on trace un rectangle équivalent au segment et ayant comme hauteur la flèche de ce dernier, la longueur de ce rectangle représentera la distance moyenne cherchée.

Cette solution suppose que le prix des transports est le même sur tous les points du projet. Il n'en est généralement pas ainsi, puisque les terrassements peuvent s'effectuer à la brouette, au tombereau, au wagon, et que chacun de ces modes de transport comporte un prix spécial.

Lorsque les deux premiers modes sont employés, voici

comment la distance moyenne, pour chacun d'eux, peut être obtenue :

On inscrit dans le segment aBc (fig. 13) une ligne mn parallèle à la corde ac et dont la longueur représente le parcours maximum admis pour le transport à la brouette ; on détache ainsi un petit segment mBn pour lequel tous les déblais doivent être transportés à la brouette. On trace le rectangle $defg$ équivalent à ce petit segment. La lon-

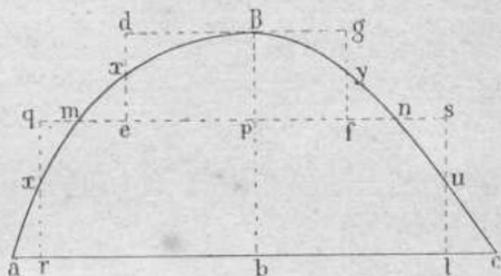


Fig. 13.

gueur ef de ce rectangle mesure la distance moyenne du transport à la brouette, pour un cube de déblais égal à Bp .

Quant au tronçon de segment $amnc$, il ne comporte que des transports au tombereau. Si l'on trace le rectangle équivalent $qrts$, la distance moyenne de transport est mesurée par la longueur rt , pour un cube de déblais égal à pb .

On procéderait de la même manière, si le transport au wagon était prévu au lieu du transport au tombereau.

DEUXIÈME PARTIE

PRATIQUE DU PROCÉDÉ BRUCKNER



CHAPITRE PREMIER

RÉDACTION DE LA PREMIÈRE PARTIE DU TABLEAU DU MOUVEMENT DES TERRES.

13. — La formule dont il convient de faire usage pour la première partie de ce tableau peut être disposée avec l'entête que voici :

N ^o des PROFILS	CUBE des déblais pour chaque PROFIL	CUBE des remblais pour chaque PROFIL	CUBES à employer dans le même PROFIL	EXCÈS DES CUBES		CUBES CUMULÉS	
				de DÉBLAIS	de REMBLAIS	Ordonnées POSITIVES	Ordonnées NÉGATIVES
1	2	3	4	5	6	7	8

Col. 1, 2 et 3. — On reproduit les chiffres fournis par le tableau du métré des terrassements.

Col. 4. — On porte dans cette colonne le plus petit des deux cubes de déblais ou de remblais, qui figurent aux colonnes 2 ou 3.

Cette colonne ne renferme, dès lors, aucun chiffre quand le profil est entièrement soit en déblai, soit en remblai.

La colonne 4 indique les cubes à employer transversalement dans la longueur répondant à chaque profil et, par conséquent, les cubes à employer au jet de pelle.

Col. 5. — Quand le profil comporte plus de déblais que

de remblais, on inscrit dans cette colonne la différence entre le cube des déblais et celui des remblais.

Col. 6. — Quand le profil comporte, au contraire, plus de remblais que de déblais, la différence des cubes est mentionnée dans cette colonne.

Col. 7 et 8. — On porte, en regard de chaque profil, dans l'une ou l'autre de ces colonnes, le cube égal à la somme algébrique des remblais et des déblais depuis l'origine jusqu'à ce profil, les remblais étant considérés comme positifs et les déblais comme négatifs. Quand la somme algébrique est positive, on l'inscrit dans la colonne 7 ; quand elle est négative, dans la colonne 8.

Par conséquent, pour passer d'un profil au suivant, il suffit d'ajouter le cube de la colonne 6, ou de retrancher le cube de la colonne 5, suivant que le nouveau profil correspond à un excès de remblais ou à un excès de déblais, étant entendu que le cube cumulé au profil précédent est positif, s'il figure à la colonne 7, et négatif, s'il figure à la colonne 8. Le résultat de cette addition ou de cette soustraction est, en raison de son signe, porté dans la colonne 7 ou dans la colonne 8.

Totaux et vérifications. — On effectue les totaux des colonnes 2 à 6.

A l'égard de ces totaux, on doit vérifier :

1° Que la différence entre les colonnes 2 et 3 est égale à la différence entre les colonnes 5 et 6 ;

2° Que la colonne 5 est égale à la différence entre les colonnes 2 et 4 ;

3° Que la colonne 6 est égale à la différence entre les colonnes 3 et 4 ;

4° Que le cube cumulé afférent au dernier profil est égal

à la différence entre les cubes, soit des colonnes 2 et 3, soit des colonnes 5 et 6.

Le cube dont il s'agit doit d'ailleurs se trouver dans la colonne 7 ou dans la colonne 8, suivant que le cube des remblais est supérieur ou inférieur à celui des déblais.

CHAPITRE II

TRACÉ DU POLYGONE DE BRUCKNER.

18. — On trace une ligne des abscisses, qui constitue ce qu'on appelle la *ligne de terre*, sur une feuille de papier, de préférence quadrillé. On marque sur cette ligne l'emplacement et le numéro des profils.

On détermine les différents points de la courbe ou plutôt de la ligne polygonale de Bruckner, en portant, au droit de chaque profil, le cube cumulé qui lui correspond. Ce cube est porté au-dessus de la ligne de terre, quand il est pris dans la colonne 7 ; au-dessous, quand il provient de la colonne 8. Il est inutile de tracer à l'encre les ordonnées.

En joignant leurs extrémités, on obtient le polygone de Bruckner.

Il convient d'inscrire en noir la valeur de chaque ordonnée, tirée de la colonne 7 ou 8, près de l'extrémité de cette ordonnée.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DE LA LIGNE DE RÉPARTITION DES TERRASSEMENTS (1).

19. — Lorsque le polygone de Bruckner aboutit à la ligne de terre, la ligne de répartition coïncide avec cette ligne de terre.

20. — Lorsque le polygone de Bruckner se termine, soit au-dessus, soit au-dessous de la ligne de terre, on mène une parallèle à la ligne de terre passant par l'extrémité libre du polygone et on laisse à l'écart, dans la détermination de la ligne de répartition, les segments qui aboutissent aux deux extrémités du polygone et qui sont situés en dehors des deux parallèles passant par ces extrémités.

La ligne de répartition occupe l'une des trois positions ci-après (2) :

Ou bien elle coïncide avec la ligne de terre ;

Ou bien elle se confond avec la parallèle passant par l'extrémité libre du polygone ;

Ou bien elle consiste en une parallèle intermédiaire entre ces deux lignes.

Elle coïncide avec l'une ou l'autre des parallèles extrê-

(1) On suppose que le cube des emprunts ou des dépôts ne doit pas être augmenté.

Voir l'annexe B dans le cas où les lieux d'emprunt ou de dépôt doivent occuper un emplacement déterminé.

(2) Voir l'annexe A dans le cas où il est possible de rompre la ligne de répartition en la disposant en gradins horizontaux.

mes, quand elle intercepte une somme de cordes plus grande dans les segments qui augmentent que dans les segments qui diminuent, lors d'un déplacement vers l'extrémité opposée du polygone.

Quand, au contraire, chacune des parallèles intercepte une somme de cordes plus grande dans les segments qui diminuent que dans les segments qui augmentent, la ligne de répartition est comprise entre les parallèles extrêmes et elle occupe une position telle qu'il y ait égalité entre les sommes des cordes des segments contraires.

Il suit de là que, pour découvrir la ligne de répartition, on peut procéder ainsi qu'il suit :

On examine si la ligne de terre intercepte une somme de cordes plus grande dans les segments qui augmentent que dans les segments qui diminuent, lors d'un déplacement vers l'extrémité libre du polygone.

S'il en est ainsi, la ligne de répartition coïncide avec la ligne de terre.

Dans le cas contraire, on fait mouvoir la ligne de terre jusqu'à ce qu'elle détermine l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires. Sa position est alors celle de la ligne de répartition.

Si cette condition d'égalité ne se réalise pas avant que la ligne de terre atteigne l'extrémité libre du polygone, la parallèle passant par cette extrémité constitue la ligne de répartition.

CHAPITRE IV

DÉTERMINATION DES CUBES DE DÉBLAIS À EMPLOYER EN REMBLAIS ET DE LEUR DISTANCE DE TRANSPORT.

21. — Lorsque la ligne de répartition a été déterminée et tracée en rouge, si elle n'emprunte pas la ligne de terre, on examine la forme que revêtent les divers segments interceptés par cette ligne de répartition.

Pour les segments qui n'offrent qu'un maximum, comme le segment oAK de la figure 2, il n'y a aucune opération complémentaire à effectuer : le cube des déblais à employer en remblais est représenté par l'ordonnée maximum aA et la valeur de ce cube est inscrite à côté de l'extrémité A de cette ordonnée.

Mais quand le segment présente deux maximum, comme le segment $K'CDEK''$ de la figure 2, on mène une parallèle à la ligne de terre par le minimum D , et l'on détache ainsi deux segments HCD et DEH' , ainsi qu'un tronçon de segment $K'HH'K''$.

S'il y a plus de deux maximum, on opère d'une manière analogue en menant des parallèles par les divers minimum.

Enfin, quand l'extrémité du polygone n'aboutit pas sur la ligne de terre, comme dans la figure 2, le dernier segment se trouve fermé à l'aide d'une parallèle à la ligne de terre menée par cette extrémité.

En résumé, on trace des parallèles à la ligne de terre par les minimum, de manière à décomposer les surfaces soit en segments à un seul maximum, soit en tronçons de segments à bases parallèles à la ligne de terre.

On passe ensuite à la détermination des segments ou portions de segments qui peuvent donner lieu à l'emploi de la brouette pour les transports. Ce sont :

1° Les segments dont la corde est inférieure à 90 m., par exemple, si l'on adopte cette longueur pour le maximum de distance du transport à la brouette ;

2° Les segments où l'on peut inscrire, parallèlement à la ligne de terre, une corde de 90 m. de longueur. On divise ainsi ces segments en deux portions qui s'appliquent aux deux modes ordinairement usités pour les transports.

La figure 14 fournit un exemple à ce sujet. La ligne mn ,

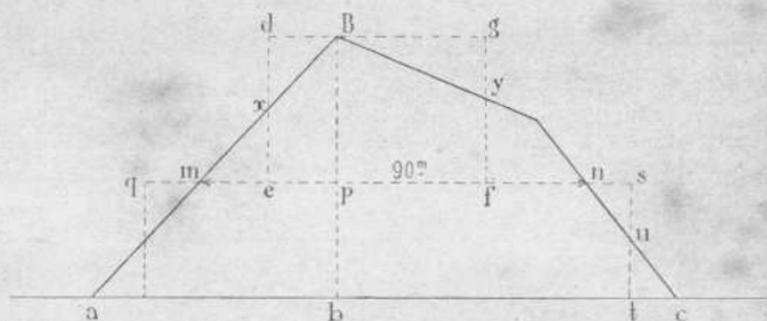


Fig. 14.

qui est égale à 90 m., détache une portion de segment mBn pour terrassements à la brouette et un tronçon de segment $amnc$ pour terrassements soit au tombereau, soit au wagon.

22. — Il reste à tracer les rectangles équivalents aux segments et tronçons de segments ainsi obtenus.

Ces rectangles doivent avoir pour hauteur celle des segments ou des tronçons de segments.

La figure 14 montre en pointillé les rectangles équivalents au segment et au tronçon de segment détachés par la ligne mn .

Pour arriver à réaliser plus facilement cette transfor-

mation en rectangles, on opère séparément sur les portions de segments ou de tronçons de segment situées de chaque côté de l'ordonnée maximum Bb . On trace le rectangle $depB$ équivalent à la portion mBp et le rectangle $Bpfg$ équivalent à la portion Bpn . On obtient ce résultat en cherchant la position du côté inconnu, de telle sorte que les deux surfaces mxe et dxB , opposées par le sommet, soient sensiblement équivalentes. De même pour le côté gf .

Cette équivalence n'a besoin que d'être approchée. Il suffit qu'elle se contrôle à vue de l'épure (1).

Les rectangles sont figurés en rouge.

On complète l'épure en cotant en rouge les longueurs des rectangles, qui sont exprimées en mètres linéaires, et les hauteurs de ces rectangles qui sont exprimées en mètres cubes.

Dans le cas où le projet comporte des emprunts ou des dépôts, il convient d'accuser sur l'épure les portions de ligne polygonale qui leur correspondent. On peut le faire à

(1) Rien n'oblige assurément à transformer en un rectangle unique le segment ou la portion de segment qui représente le moment de transport à la brouette, au tombereau ou au wagon.

Si le tracé d'un rectangle unique comporte quelque incertitude par suite de la forme accidentée des côtés du segment ou de la portion de segment, on peut adopter une transformation en deux ou trois rectangles.

La figure 15 indique une portion de segment ABCDE qui se transforme

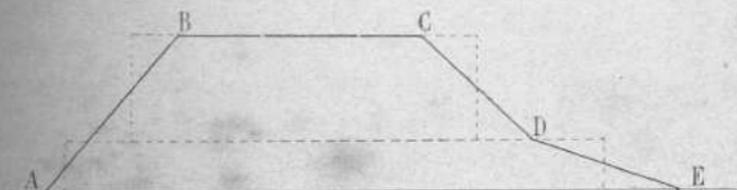


Fig. 15.

rapidement en deux rectangles, alors que le tracé d'un seul rectangle donnerait lieu à des tâtonnements.

l'aide d'un liseré hachuré en rouge. On cote, en outre, la hauteur des portions ainsi représentées, c'est-à-dire les cubes des emprunts ou des dépôts.

Enfin on vérifie, au moyen des cotes noires des ordonnées, toutes les cotes rouges des hauteurs.

CHAPITRE V

RÉDACTION DE LA DEUXIÈME PARTIE DU TABLEAU DU MOUVEMENT DES TERRES.

23. — Les résultats de l'épure permettent de compléter le tableau du mouvement des terres.

La deuxième partie de ce tableau peut présenter le dispositif ci-après :

INDICATION DES SECTIONS	CUBES	DISTANCES MOYENNES	PRODUITS
9	10	11	12
§ 1. — Transport à la brouette.			

Col. 9. — Les sections sont définies par les numéros des profils en travers entre lesquels est comprise la corde de chaque segment ou de chaque portion de segment.

Quand le projet donne lieu à des emprunts ou à des dépôts, leur emplacement, révélé par l'épure, est également défini par les numéros des profils en travers entre lesquels il est situé.

Col. 10. — On porte, en regard de chaque section, le cube par lequel se mesure la hauteur de chaque rectangle.

Dans le cas d'emprunts ou de dépôts, on inscrit le cube mentionné sur l'épure.

Col. 11. — On porte, en regard de chaque section, la longueur du rectangle correspondant.

En ce qui a trait aux emprunts ou aux dépôts, on inscrit la distance moyenne qui résulte des circonstances spéciales dans lesquelles ils doivent s'effectuer.

Col. 12. — Cette colonne renferme le produit des chiffres des colonnes 10 et 11.

Cette deuxième partie du tableau du mouvement des terres comporte autant de paragraphes qu'on a prévu de modes de transport.

On termine chacun de ces paragraphes en faisant le total des cubes de la colonne 10 et celui des produits de la colonne 12. On divise le dernier total par le premier et on obtient ainsi la distance moyenne du transport que l'on consigne dans la colonne 11.

Il convient d'ajouter un dernier paragraphe pour la récapitulation des divers modes de transport.

A titre de vérification, le total des cubes transportés doit être égal au plus grand des totaux des cubes de déblais et de remblais, qui figurent dans les colonnes 5 et 6 de la première partie du tableau.

TROISIÈME PARTIE
APPLICATION A UN EXEMPLE.

EXTRAIT DE L'AVANT-MÉTRÉ DES TERRASSEMENTS.

MOUVEMENT DES TERRES.

N ^o des PROFILS	CUBE des déblais pour chaque PROFIL	CUBE des remblais pour chaque PROFIL	CUBES à employer dans le même PROFIL	EXCÈS DES CUBES		CUBES CUMULÉS	
				de DÉBLAIS	de REMBLAIS	Ordonnées POSITIVES	Ordonnées NÉGATIVES
1	2	3	4	5	6	7	8
1	»	246 ^m	»	»	246 ^m	246 ^m	»
2	22	286	22	»	264	510	»
3	832	»	84	832	»	»	322
4	198	34	34	164	»	»	486
5	710	»	»	710	»	»	1 196
6	»	228	»	»	228	»	968
7	»	566	»	»	566	»	402
8	202	»	»	202	»	»	604
9	»	1 602	»	»	1 602	998	»
10	150	56	56	94	»	904	»
11	698	»	»	698	»	206	»
12	»	380	»	»	380	586	»
13	212	»	»	212	»	374	»
14	»	418	»	»	418	792	»
15	1 494	»	»	1 494	»	»	702
	4 518 ^m	3 816 ^m	112 ^m	4 406 ^m	3 704 ^m		

INDICATION DES SECTIONS	CUBES	DISTANCES MOYENNES	PRODUITS
9	10	11	12
§ 1. — TRANSPORT A LA BROUETTE.			
Entre les profils 0 et 3.	510 ^m	28 ^m	14 280
— 4 et 7.	337	52	17 524
— 7 et 9.	202	28	5 656
— 8 et 11.	792	47	37 224
— 11 et 13.	212	39	8 268
— 13 et 15.	418	32	13 376
Dépôt à une distance moyenne de 20 ^m :			
Entre les profils 2 et 3.	142	20	14 040
— 14 et 15.	560		
<i>Totaux et moyennes.</i>	3 173 ^m	35 ^m	110 368
§ 2. — TRANSPORT AU TOMBEREAU.			
Entre les profils 2 et 9.	260 ^m	257 ^m	66 820
— 3 et 7.	457	125	57 125
— 8 et 15.	348	255	88 740
— 11 et 15.	168	156	26 208
<i>Totaux et moyennes.</i>	1 233 ^m	194 ^m	238 893
§ 3. — RÉCAPITULATION.			
Transport à la brouette à la distance moyenne de 35 ^m	3 173 ^m		
Transport au tombereau à la distance moyenne de 194 ^m	1 233		
<i>Total.</i>	4 406 ^m		

EPURE DU MOUVEMENT DES TERRES

ECHELLES { Abscisses - 0^m.00033 par mètre
Ordonnées - 0^m.000033 par mètre cube

ANNEXES



ANNEXE A

CAS OU IL EST POSSIBLE DE ROMPRE LA LIGNE DE RÉ-
PARTITION EN LA DISPOSANT EN GRADINS HORIZONTAUX

§ 1. — Théorie.

1. — Lorsque l'emplacement des lieux d'emprunt ou de dépôt est indifférent (1), il est avantageux, toutes les fois que cela est possible, de rompre la ligne de répartition en la composant de deux ou plusieurs lignes horizontales de compensation à des niveaux différents.

Soit rr une ligne unique de répartition déterminée de telle sorte que la somme des cordes des segments supérieurs soit égale à la somme des cordes des segments inférieurs.

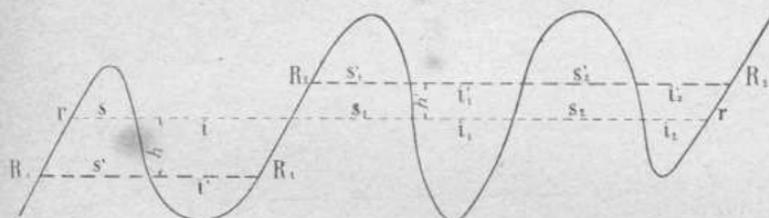


Fig. 16.

On peut diviser les six segments de la courbe en deux groupes, l'un de deux et l'autre de quatre segments, et tracer, pour chacun de ces groupes, une horizontale de répartition satisfaisant à la règle qui vient d'être rappelée. En ce qui concerne le 1^{er} groupe, l'horizontale $R_1 R_1$ intercepte deux cordes égales ; à l'égard du 2^e groupe, l'horizontale $R_2 R_2$ donne lieu à l'égalité entre les sommes des cordes des segments de sens contraire.

(1) C'est ce qui se produit notamment quand les chambres d'emprunt ou les massifs de dépôt peuvent se pratiquer, sur le bord de la voie projetée, dans les mêmes conditions sur toute la longueur du tracé.

Or, il est facile de reconnaître que les deux horizontales de répartition partielle $R_1 R_1$ et $R_2 R_2$ déterminent des segments dont la surface totale est moindre que celle des segments dus à la ligne de répartition unique rr .

Pour le 1^{er} groupe de segments, la diminution de surface est égale à

$$\frac{i + i'}{2} \times h - \frac{s + s'}{2} \times h$$

ou
$$\frac{h}{2} (i - s + i' - s')$$

ou, comme $s' = i'$

$$\frac{h}{2} (i - s)$$

Cette valeur est toujours positive, par la raison que i est plus grand que s . Cela tient à cette circonstance que les cordes i et s sont respectivement au-dessus des cordes i' et s' : comme ces deux dernières cordes sont égales, il s'ensuit que les deux autres sont inégales. Et c'est la corde i qui nécessairement l'emporte sur la corde s .

Une démonstration analogue peut être faite pour le second groupe de segments. La diminution de surface est la suivante :

$$\frac{s_1 + s'_1}{2} \times h' - \frac{i_1 + i'_1}{2} \times h' + \frac{s_2 + s'_2}{2} \times h' - \frac{i_2 + i'_2}{2} \times h'$$

ou
$$\frac{h'}{2} (s_1 + s_2 - i_1 - i_2 + s'_1 + s'_2 - i'_1 - i'_2)$$

ou, comme $s'_1 + s'_2 = i'_1 + i'_2$

$$\frac{h'}{2} (s_1 + s_2 - i_1 - i_2)$$

Cette valeur est toujours positive, parce que les quatre cordes s_1 et s_2 , i_1 et i_2 , sont respectivement au-dessous des quatre cordes s'_1 et s'_2 , i'_1 et i'_2 : comme il y a égalité entre la somme $s'_1 + s'_2$, d'une part, et la somme $i'_1 + i'_2$, d'autre part, il s'ensuit qu'une inégalité doit se produire entre la somme $s_1 + s_2$ correspondant à la première et la somme $i_1 + i_2$ correspondant à la seconde. Et c'est la somme $s_1 + s_2$ qui excède nécessairement la somme $i_1 + i_2$.

Ainsi, il y a diminution dans la surface totale des segments

quand la ligne de répartition unique rr est remplacée par les deux horizontales de répartition partielle $R_1 R_1$ et $R_2 R_2$.

Mais la droite $R_2 R_2$ peut elle-même être l'objet d'une substitution analogue à celle qui a été opérée à l'égard de la ligne unique rr .

On peut diviser les quatre segments traversés par la droite $R_2 R_2$ en deux groupes pour chacun desquels on trace une horizontale de répartition partielle (fig. 17). C'est la droite $R_3 R_3$ pour le 1^{er} groupe et la droite $R_4 R_4$ pour le second, ces deux lignes étant obtenues de manière à intercepter des cordes égales.

Les aires des segments déterminés par les deux horizontales $R_3 R_3$ et $R_4 R_4$ sont donc inférieures aux aires des segments détachés par l'horizontale $R_2 R_2$.

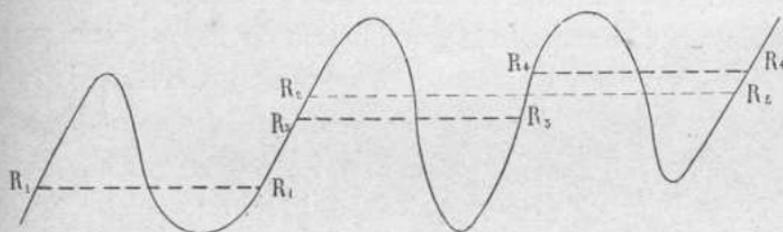


Fig. 17.

Finalement, à l'égard de la courbe envisagée, le minimum des aires se produit quand la ligne de répartition est formée par les trois horizontales de répartition partielle $R_1 R_1$, $R_3 R_3$ et $R_4 R_4$.

2. — De ce qui précède on conclut qu'on diminue l'aire totale des segments en remplaçant la droite unique de répartition par autant d'horizontales de répartition partielle qu'il est possible d'en tracer, à la condition que ces horizontales satisfassent toujours aux règles énoncées aux nos 13 et 15 de la 1^{re} partie. Les droites intermédiaires, c'est-à-dire celles qui sont comprises entre les deux parallèles passant par les extrémités, doivent déterminer l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires ; quant aux droites qui coïncident avec l'une ou l'autre de ces parallèles, elles doivent intercepter une somme de cordes plus grande dans les

segments qui augmentent que dans ceux qui diminuent, lors d'un déplacement vers l'extrémité opposée de la courbe.

Si l'on qualifie d'*irréductibles* les horizontales de répartition qui ne sont pas susceptibles d'être remplacées par deux ou plusieurs droites de répartition partielle, on arrive ainsi à formuler la règle suivante :

La ligne de répartition, pour une courbe déterminée, doit se composer d'horizontales de répartition irréductibles.

Le nombre de ces horizontales est assurément très variable. Il peut se réduire à 1.

3. — Les horizontales de répartition partielle ne peuvent se succéder dans un ordre quelconque.

Si la courbe aboutit au-dessus de la ligne de terre (fig. 18), la ligne de répartition ne peut, par exemple, présenter une horizontale $r_2 r'_2$ inférieure à l'horizontale $r_1 r'_1$ qui la précède : sinon, on

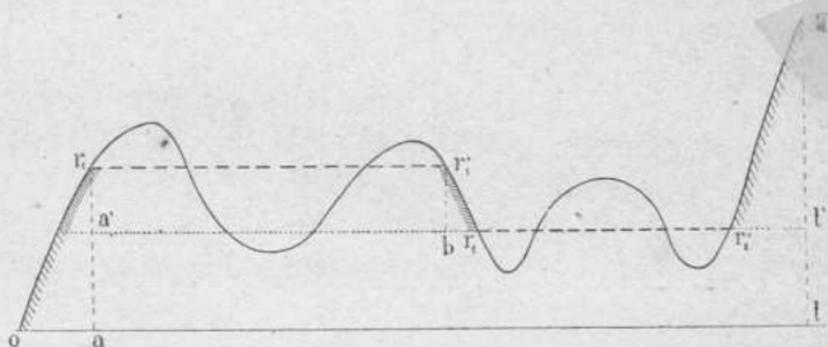


Fig. 18.

créerait un dépôt mesuré par la hauteur $r'_1 b$ et on augmenterait les emprunts d'une quantité représentée par la hauteur égale $r_1 a'$.

De même, si la courbe aboutit au-dessous de la ligne de terre (fig. 19), la ligne de répartition ne peut comporter, par exemple, une horizontale $r_2 r'_2$ supérieure à l'horizontale $r_1 r'_1$ qui la précède : sinon, il en résulterait la formation d'un emprunt mesuré par la hauteur $r_2 b$, en même temps que les dépôts seraient augmentés d'une quantité représentée par la hauteur égale $r'_2 c$.

Il s'ensuit que les horizontales de compensation doivent être disposées en gradins toujours ascendants, quand la courbe se ter-

mine au-dessus de la ligne de terre et en gradins descendants, quand elle se termine au-dessous.

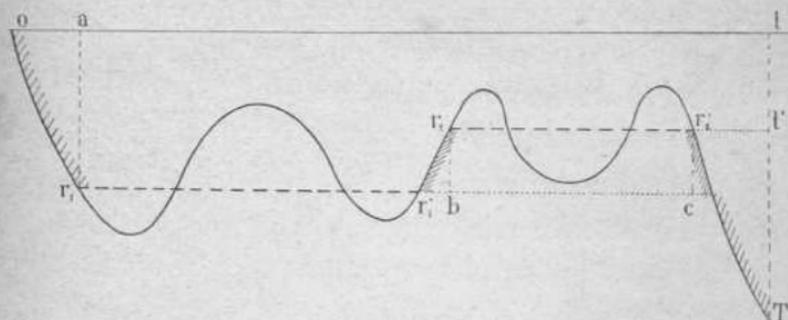


Fig. 19.

4. — Les horizontales de répartition partielle doivent, en outre, satisfaire à une condition qui va être indiquée.

La figure 20 fournit un exemple dans lequel les deux horizontales partielles $r_1 r'_1$ et $r_2 r'_2$ sont inadmissibles.

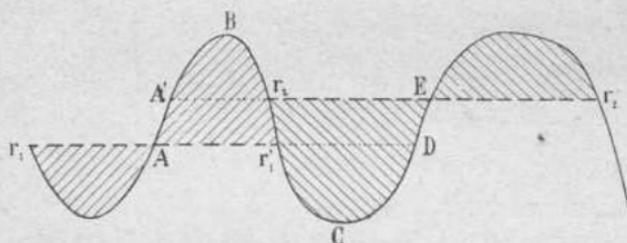


Fig. 20.

Ces droites comportent, en effet, un mouvement de terres impraticable. Si l'on envisage les 2^e et 3^e segments de la courbe, on reconnaît que le remblai BA peut être formé avec le déblai Br'₁, de même que le remblai CD peut être formé avec le déblai Cr'₁. Mais il est manifeste qu'il ne reste pas de déblai pour constituer le remblai DE. Les horizontales de répartition $r_1 r'_1$ et $r_2 r'_2$ indiquent, en définitive, que la portion de déblai $r_2 r'_1$ doit être transportée deux fois, d'un côté en AA', de l'autre en DE, ce qui est de toute impossibilité.

Par conséquent, lorsque deux segments se trouvent en contact sur une certaine hauteur, de telle sorte qu'une portion de courbe

du système, cette horizontale détachera des segments dont la surface sera inférieure à celle des segments correspondants déterminés par les droites du système.

En effet, l'horizontale MN, par cela même qu'elle réalise l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires, détache des segments dont la surface est moindre que celle des segments dus à la parallèle Af. Et ces derniers segments ont eux-mêmes une surface plus petite que celle des segments déterminés par l'horizontale AB et la portion d'horizontale Cg du système, car ceux-ci, comparés à ceux-là, présentent en augmentation la portion de segment *cgfb* et en diminution la portion *CcbB*. Or, la parallèle Af intercepte une somme de cordes

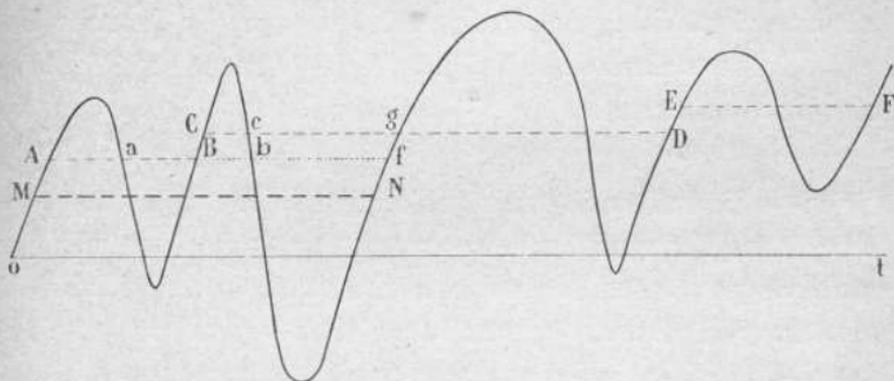


Fig. 21.

plus grande dans les segments inférieurs que dans les segments supérieurs : comme on a

$$Aa = aB$$

il en résulte

$$bf > Bb$$

d'où il suit que la portion de segment *cgfb* l'emporte sur la portion *CcbB*.

Ainsi l'horizontale MN détache, dans les segments qu'elle traverse, des surfaces moindres que l'horizontale AB et la portion d'horizontale Cg appartenant au système de droites irréductibles.

Il y a donc avantage à remplacer les lignes AB et Cg par l'horizontale MN.

Cette substitution est d'ailleurs sans conséquence à l'égard du surplus des segments, puisque l'horizontale MN est au-dessous de ce qui reste des droites du système. Elle permet de tracer, pour le surplus des segments, la meilleure ligne de répartition qui puisse les traverser.

7. — On découvre de la sorte que la première horizontale, à partir de l'origine de la courbe considérée, doit être celle qui peut être tracée au niveau le plus bas.

Quand cette horizontale est obtenue, il reste à chercher le système le plus avantageux pour le surplus de la courbe. La question se représente dans les mêmes conditions que pour la courbe primitive. Il y a lieu, par conséquent, de déterminer l'horizontale la plus basse et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on atteigne l'extrémité libre de la courbe.

8. — Si, au lieu de partir de l'origine de la courbe, on commençait par l'extrémité supérieure, on trouverait d'une manière analogue que la première horizontale, à partir de cette extrémité, doit être celle qui peut être tracée au niveau le plus haut, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on atteigne l'origine de la courbe.

Il est à remarquer que cette manière de procéder conduirait à la même solution que la précédente. Il est indifférent de commencer par l'une ou l'autre des extrémités de la courbe.

9. — On vient d'envisager le cas d'une courbe qui se termine au-dessus de la ligne de terre. Si la courbe aboutissait en dessous, les horizontales devraient être tracées, ou bien le plus haut possible à partir de l'origine de la courbe, ou bien le plus bas possible à partir de l'extrémité libre de cette courbe.

10. — Dans la figure 21, la première horizontale MN occupe la position d'une horizontale intermédiaire de répartition. Mais il peut arriver que, pour être à un niveau aussi bas que possible, la première horizontale doive coïncider avec la ligne de terre : c'est

ce qui a lieu, dans la figure 22, où la portion Aa de la droite irréductible AB doit être remplacée par la portion OL de la ligne de terre (1).

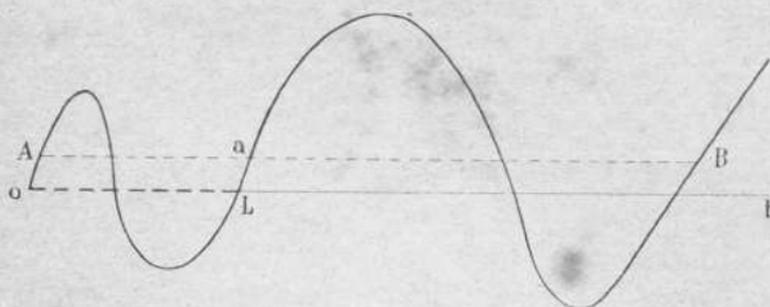


Fig. 22.

§ 2. — Règles pratiques.

11. — Lorsque l'emplacement des lieux d'emprunt ou de dépôt est indifférent, il est avantageux, toutes les fois que cela est possible, de composer la ligne de répartition d'horizontales situées à des niveaux différents.

Ces horizontales, quelque soit leur nombre, doivent satisfaire aux conditions suivantes :

a. — Aucune d'elles ne doit sortir des limites formées par les deux parallèles passant par les extrémités du polygone. Par conséquent, l'horizontale la plus basse ne peut être au-dessous de la parallèle menée par l'extrémité inférieure du polygone et l'horizontale la plus haute ne peut être au-dessus de la parallèle menée par l'extrémité supérieure de ce polygone.

b. — Toutes les horizontales doivent être disposées en gradins ascendants, quand le polygone se termine au-dessus de la ligne de terre, et en gradins descendants, quand il se termine au-dessous.

c. — Les horizontales intermédiaires, c'est-à-dire celles qui ne

(1) Le surplus aB de la droite primitive AB doit alors disparaître, par suite du tracé de la meilleure ligne de répartition à travers les segments qui suivent les deux premiers.

se confondent pas avec l'une ou l'autre des parallèles extrêmes, doivent s'appliquer à un nombre pair de segments et elles doivent être tracées de manière à déterminer l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires.

Quant aux horizontales qui coïncident avec l'une ou l'autre des parallèles extrêmes, elles peuvent ne pas remplir cette condition d'égalité. Elles doivent alors intercepter une somme de cordes plus grande dans les segments qui augmentent que dans les segments qui diminuent, lors d'un déplacement vers l'autre extrémité du polygone.

d. — Toutes les horizontales doivent être *irréductibles*, c'est-à-dire non susceptibles d'être remplacées par deux ou plusieurs droites qui embrassent les mêmes segments, tout en satisfaisant aux conditions précédentes.

e. — Enfin les horizontales de répartition partielle doivent occuper le niveau le plus bas possible, quand on les trace à partir de l'extrémité inférieure du polygone, ou bien le niveau le plus haut possible, quand on les mène à partir de l'extrémité supérieure du polygone. Si donc ces horizontales sont tracées à partir de l'origine du polygone, elles doivent être aussi bas que possible, quand ce polygone se termine au-dessus de la ligne de terre, et aussi haut que possible, dans le cas contraire.

ANNEXE B.

CAS OU LES LIEUX D'EMPRUNT OU DE DÉPÔT DOIVENT OCCUPER UN EMPLACEMENT DÉTERMINÉ

§ 1. — **Théorie.**

1. — On ne s'occupera ci-après que des emprunts. Les dépôts sont soumis aux mêmes règles.

Les points d'arrivée des déblais d'emprunts sur la voie projetée seront indiqués, dans les figures, par les profils passant par ces points.

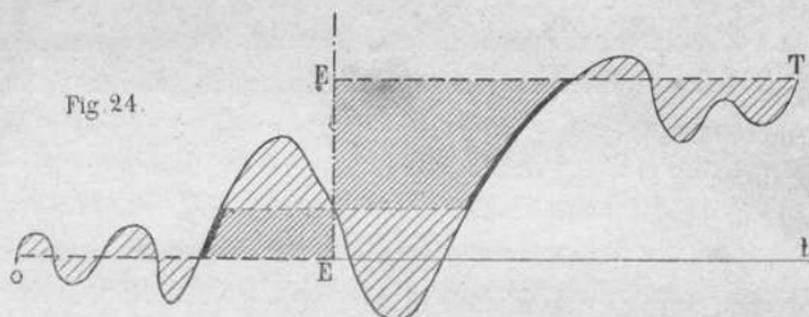
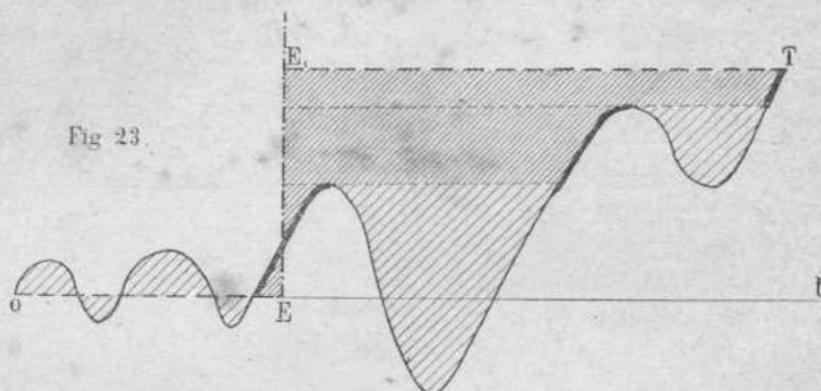
Il est nécessaire que l'épure du mouvement des terres comprenne les transports des déblais d'emprunt sur la voie projetée, depuis les profils dont il vient d'être question jusqu'aux lieux d'emploi. Quant aux transports des déblais d'emprunt entre les centres de gravité des lieux d'extraction et les profils d'arrivée sur la voie, ils ne peuvent qu'être laissés à l'écart, ainsi qu'on la fait précédemment. Il suffit de les ajouter aux transports révélés par l'épure pour obtenir les transports totaux dont les déblais d'emprunt doivent être l'objet.

1° Cas d'un lieu d'emprunt unique.

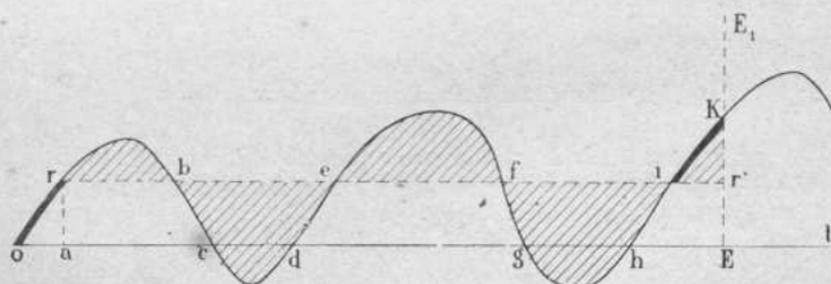
a) *Le profil passant par le point d'arrivée des déblais d'emprunt rencontre la courbe de Bruckner en un point situé entre les deux horizontales passant par les extrémités de cette courbe.*

2. — Soit EE_1 le profil correspondant au point d'arrivée des déblais d'emprunt sur la voie. Du moment que ces déblais, destinés à former les remblais en excès, proviennent de ce profil, les choses doivent se passer comme si la droite EE_1 jouait le rôle d'une portion de ligne en déblai. La courbe peut donc être divisée

en deux parties, séparées par la ligne EE_1 et complétées chacune par l'adjonction de cette ligne.



Il est facile de reconnaître que la ligne de répartition ne peut se composer que des deux horizontales OE et $E_1 T$ passant par les extrémités de la courbe et situées de part et d'autre du profil EE_1 .



Si, en effet, on envisage, par exemple, la partie de courbe à gauche de ce profil (fig. 25), on ne saurait songer à tracer une horizontale au-dessous de la ligne de terre, puisque cette horizontale créerait

à la fois un dépôt et un emprunt supplémentaires et, par conséquent, engendrerait un accroissement de la masse des terrassements.

On ne peut non plus adopter une horizontale rr' menée au-dessus de la ligne de terre, quand même cette horizontale déterminerait des segments de surface moindre. Sans doute, le cube des emprunts, mesuré par les hauteurs ra et Kr' , serait le même que dans le cas où la ligne de terre forme l'horizontale de répartition, mais le moment total de transport serait plus considérable.

Ce moment total serait, en effet, égal à la somme de la surface des segments déterminés par l'horizontale rr' et de la surface du trapèze $roEr'$. Or, cette somme est supérieure à l'aire des segments détachés par la ligne de terre des deux tronçons de segments bcd et $fghi$ (1).

Des considérations semblables permettraient d'établir, pour la partie de courbe à droite du profil EE_1 (fig. 23 et 24), que l'horizontale passant par l'extrémité libre de la courbe est seule susceptible de constituer l'horizontale de répartition.

La ligne de répartition ainsi obtenue détermine des segments qui s'appliquent indistinctement aux transports des déblais de la voie et aux transports des déblais d'emprunt depuis leur point d'arrivée sur la voie jusqu'aux lieux d'emploi. Il est aisé, à vue de l'épure, de séparer les segments ou portions de segments qui concernent ces derniers transports ; ils sont figurés par une double hachure. On détache en même temps les segments relatifs aux transports des déblais de la voie ; ils sont représentés par une simple hachure.

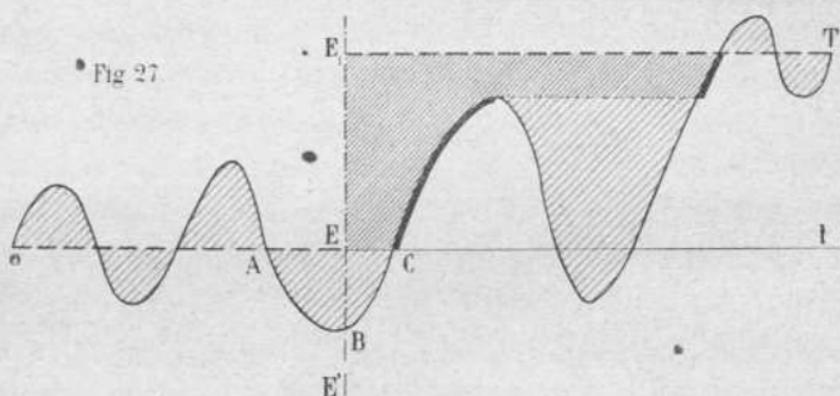
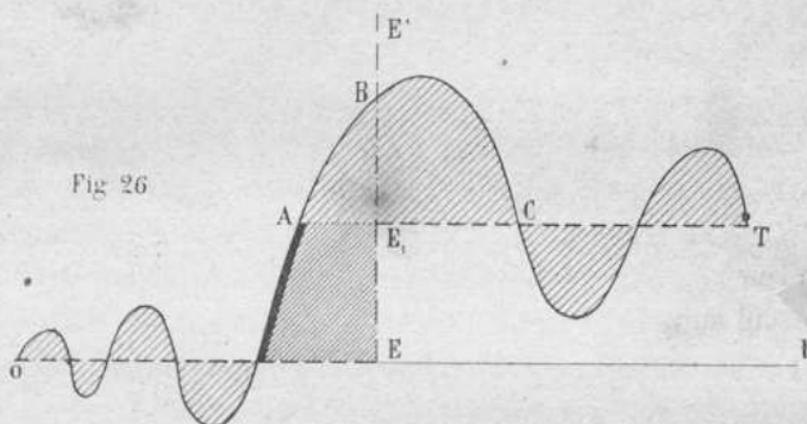
(1) Il est à remarquer que le trapèze $roEr'$ recouvre en partie les segments détachés par l'horizontale rr' . A ce sujet, M. Strohl, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, a formulé la règle générale que voici :

« Les surfaces représentatives des moments de transport des emprunts ne peuvent venir recouvrir celles qui représentent les moments de transport des déblais de la voie employés en remblai ». (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1884, 1^{er} semestre, page 166).

- b) Le profil passant par le point d'arrivée des déblais d'emprunt rencontre la courbe de Bruckner en un point situé en dehors des deux horizontales passant par les extrémités de cette courbe.

3. — La ligne de répartition se trace comme précédemment. Elle est composée des deux horizontales OE et E_1T menées par extrémités de la courbe et situées de part et d'autre du profil $E E_1$.

On remarque que le segment ABC se trouve divisé en deux



portions séparées par la ligne EE' et correspondant aux deux horizontales de répartition. Ces deux portions se réunissent quand on distingue les segments ou portions de segments qui concernent les transports des déblais d'emprunt, de ceux qui concernent les transports des déblais de la voie.

2° Cas de deux lieux d'emprunt.

4. — Soit EE_1 et FF_1 (voir les figures ci-après) les profils correspondant aux deux points d'arrivée des déblais d'emprunt sur la voie.

Si l'on considère la portion de courbe située entre l'origine O de la courbe et le premier profil EE_1 , elle donne lieu, pour les raisons exposées dans le cas précédent, à une droite de répartition partielle OE menée par l'origine O jusqu'à la rencontre du profil EE_1 . Pareillement la portion de courbe située entre le 2° profil FF_1 et l'extrémité T de la courbe comporte une droite de répartition partielle F_1T passant par l'extrémité T et comprise entre le profil F_1 et cette extrémité.

Il reste à rechercher quelle est la ligne de répartition applicable à la portion de courbe située entre les deux profils EE_1 et FF_1 .

On remarque que cette ligne ne peut être ni inférieure à la plus basse, ni supérieure à la plus haute des deux horizontales passant par les extrémités de la courbe. Si non, elle engendrerait un accroissement de la masse des terrassements.

Il s'ensuit qu'elle doit coïncider avec l'une ou l'autre des horizontales extrêmes, ou bien consister en une parallèle comprise entre ces deux lignes, ou bien enfin se composer de deux ou plusieurs parallèles disposées à des niveaux différents entre les deux mêmes lignes.

On supposera d'abord que la ligne de répartition est constituée par une droite unique.

Puisque les déblais destinés à former les remblais en excès proviennent des profils EE_1 et FF_1 , les choses doivent se passer comme si ces profils remplissaient l'office de portions de ligne en déblai. Il y a donc lieu d'adjoindre les deux lignes EE_1 et FF_1 à la courbe intermédiaire et de tracer, à travers cette courbe ainsi complétée, la droite de répartition qui détermine des segments de surface minimum (1).

(1) On admet que les frais d'emprunt jusqu'au profil d'arrivée sur la

Cette droite doit, dès lors, intercepter, dans les segments contraires, des sommes de cordes qui, si elles ne peuvent être égales, doivent présenter le plus petit écart possible.

Elle coïncide avec la ligne de terre (fig. 28), quand la somme des

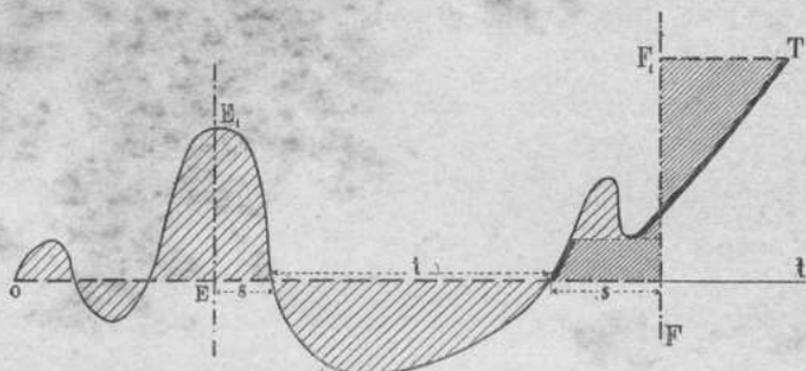


Fig. 28.

cordes des segments supérieurs, sur cette ligne, est plus petite que la somme des segments inférieurs, c'est-à-dire quand on a

$$\sum s < \sum i$$

On ne saurait songer, en effet, à déplacer la ligne vers le haut, par la raison que l'augmentation de la surface du segment infé-

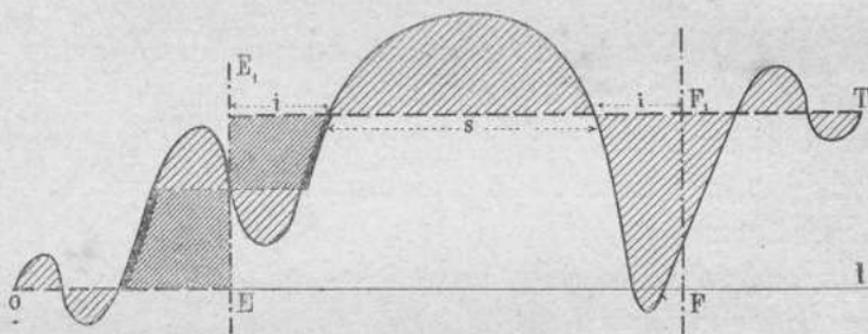


Fig. 29.

voie sont les mêmes pour les deux lieux d'extraction. S'il n'en était pas ainsi, il serait aisé de modifier la courbe à travers laquelle l'horizontale de répartition doit être tracée. Il suffirait de remplacer chacun des profils EE_1 et FF_1 par une parallèle menée à la distance représentative des frais d'emprunt correspondants. On pourrait même se borner à calculer la différence entre les distances représentatives pour les deux lieux d'emprunt et à mener une seule parallèle au profil du lieu le plus coûteux, mais à une distance égale à la différence qui vient d'être indiquée.

rieur l'emporterait sur la diminution de la surface des segments supérieurs.

La droite de répartition se confond avec l'horizontale menée par l'extrémité libre de la courbe (fig. 29), quand la somme des cordes des segments supérieurs, sur cette ligne, est plus grande que la somme des segments inférieurs, c'est-à-dire quand on a

$$\Sigma s > \Sigma i$$

Fig 30

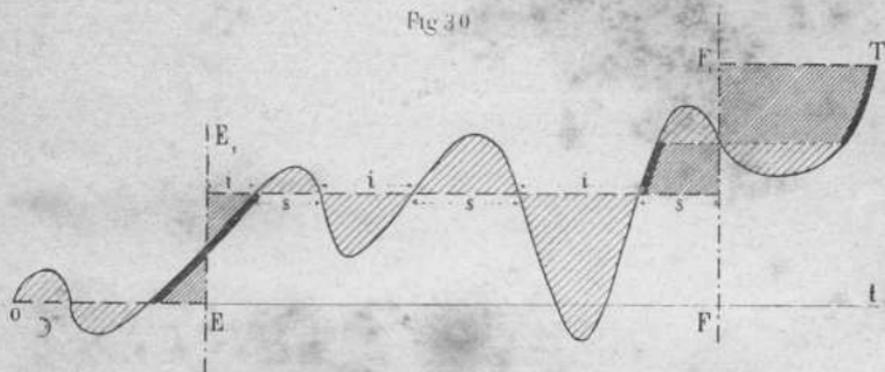
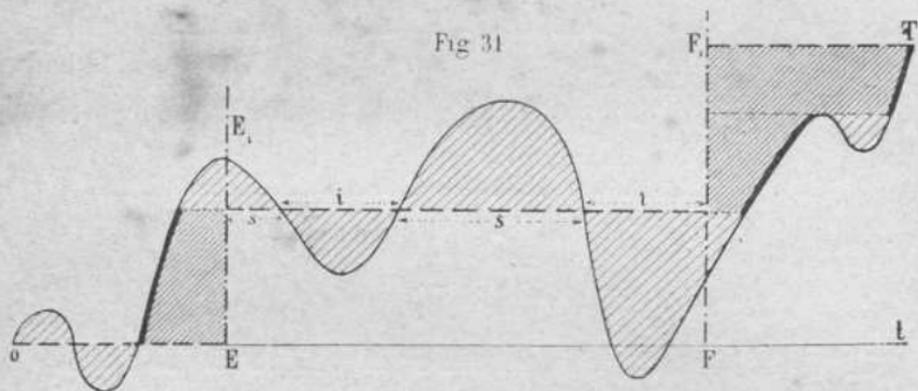


Fig 31



On reconnaît aisément que si l'on venait à déplacer la ligne vers le bas, l'augmentation de la surface du segment supérieur excéderait la diminution de surface des segments inférieurs.

Enfin la droite de répartition est située entre les deux horizontales extrêmes lorsque, sur chacune de ces lignes, la somme des cordes interceptées est plus petite pour les segments qui augmentent que pour les segments qui diminuent, lors du déplacement de chaque ligne vers la ligne opposée.

Quant à la position de la droite de répartition (fig. 30 et 31), elle doit être telle que la somme des cordes des segments supérieurs

soit égale à la somme des cordes des segments inférieurs, c'est-à-dire telle que l'on vérifie l'égalité

$$\Sigma s = \Sigma i$$

5. — On vient de voir comment la ligne de répartition partielle, pour la portion de courbe intermédiaire, doit être tracée quand cette ligne est formée par une droite. Il s'agit de savoir si cette ligne peut être composée de deux ou plusieurs horizontales disposées à des niveaux différents.

Cette solution est impossible.

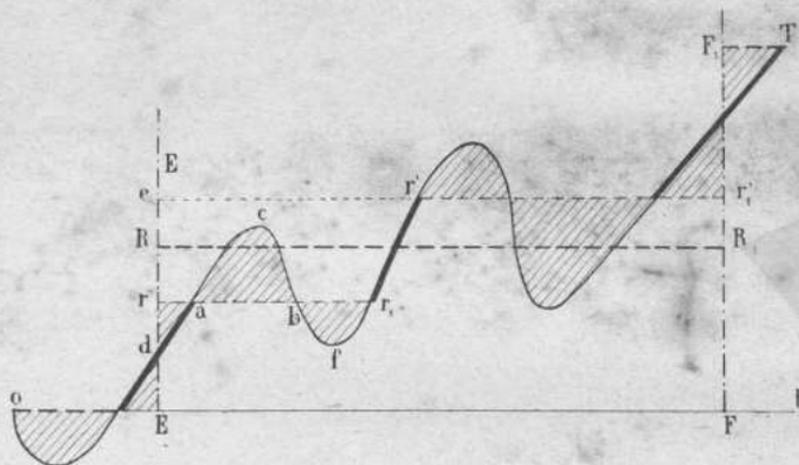


Fig. 32.

On peut vérifier, en effet, que la droite obtenue à l'aide des règles précédentes ne saurait être remplacée par deux ou plusieurs horizontales qui détacheraient des segments de surface moindre.

Soit, par exemple, une droite RR_1 qui détermine l'égalité entre les sommes des cordes des segments contraires. Les deux horizontales partielles rr_1 et $r'r'_1$, qui satisfont à la même condition d'égalité, détachent des segments dont la surface totale est plus petite, mais elles font apparaître, suivant $r_1r'_1$, des remblais qui doivent être formés avec des déblais d'emprunt.

Si ces remblais sont plus voisins du profil EE_1 que du profil FF_1 , il y a donc lieu d'ajouter aux surfaces des segments celle du trapèze $r_1r'_1er$.

Or, l'aire totale ainsi obtenue excède celle des segments détachés par la ligne RR_1 .

On peut s'en rendre compte ainsi qu'il suit :

L'aire totale due aux deux horizontales rr_1 et $r'r'_1$ se compose :

1° De la surface du trapèze $r_1r'er$;

2° De celle des trois segments qui ont pour base la droite rr_1 ;

3° De celle des trois segments qui ont pour base la droite $r'r'_1$.

Mais l'ensemble des deux premières surfaces est égal à la surface du segment $edcfr'$ augmentée de deux fois la surface du segment acb .

Il s'ensuit que l'aire totale dont il est question est supérieure à la somme de la surface du segment $edcfr'$ et de celle des trois segments qui ont pour base la droite $r'r'_1$.

Or, cette dernière somme représente la surface des segments détachés par la ligne er'_1 . Et comme cette surface est plus grande que celle des segments déterminés par la ligne RR_1 , il en résulte finalement que l'aire totale due aux horizontales rr_1 et $r'r'_1$ excède celle des segments détachés par cette dernière ligne RR_1 (1).

Cette démonstration a été appliquée au cas où la droite intermédiaire de répartition est comprise entre les deux horizontales passant par les extrémités de la courbe. Il est facile de reconnaître qu'une démonstration analogue pourrait être faite dans le cas où la droite de répartition intermédiaire coïncide avec l'une ou l'autre des horizontales extrêmes.

3° Cas de plusieurs lieux d'emprunt.

6. — Dans ce cas, la ligne de répartition comprend, à ses deux extrémités, d'une part, la fraction de la ligne de terre située à gauche du premier profil et, d'autre part, à droite du dernier profil, l'horizontale menée par l'extrémité libre de la courbe.

On trace, entre les profils successifs, des droites de répartition

(1) On trouve, dans ce cas, une nouvelle vérification de la règle énoncée par M. Strohl et citée dans une note précédente.

partielle, d'après les règles indiquées ci-dessus. Si toutes les droites ainsi obtenues sont contenues entre les horizontales passant par les extrémités de la courbe et si elles sont disposées en gradins ascendants, elles constituent les droites cherchées.

Dans le cas contraire, elles ne peuvent être admises, par la raison qu'elles entraîneraient l'accroissement de la masse des terrassements. Il faut alors combiner les sections, en poussant la réunion, aussi loin que le besoin s'en fait sentir, jusqu'à ce que les droites partielles, comprenant chacune un nombre plus ou moins grand de sections, aillent en montant depuis l'origine de la courbe jusqu'à son extrémité libre (1).

7. — Il peut arriver qu'en procédant de la sorte, on trouve plusieurs combinaisons qui constituent autant de solutions admissibles. Il s'agit alors de savoir quelle est celle qui comporte la plus faible dépense.

Par des considérations analogues à celles qui ont été développées au n° 6 de l'annexe A, on découvre que les droites partielles doivent être à un niveau aussi bas que possible (2).

8. — *De l'application des procédés qui précèdent.* — Ces procédés ne s'appliquent pas seulement au cas où, par suite de circonstances particulières, l'emplacement des lieux d'emprunt ou de dépôt est obligatoirement fixé à l'avance.

Ils trouvent aussi leur application quand les déblais d'emprunt ne peuvent pas être extraits au droit des profils où ils doivent être employés et, pareillement, quand les déblais à mettre en dépôt ne peuvent être portés au droit des profils d'où ils proviennent.

Dans ce cas, la ligne de répartition, déterminée soit d'après les règles du texte, soit d'après celles de l'annexe A, fait connaître, pour chaque cube de remblai ou de déblai en excès, la position

(1) S'il s'agissait de dépôts, et si, par conséquent, la courbe aboutissait au-dessous de la ligne de terre, les droites partielles, à partir de l'origine de la courbe, devraient être disposées en gradins descendants.

(2) S'il s'agissait de dépôts, les droites partielles devraient être à un niveau aussi haut que possible.

la plus avantageuse du point d'arrivée des emprunts ou du point de sortie des dépôts. Cette position est celle qui correspond au centre de gravité du cube de remblai ou de déblai en excès. Il peut se faire qu'il soit possible d'assigner cette position aux points d'arrivée ou de sortie, mais il arrive le plus souvent que l'emplacement susceptible d'être choisi pour chaque lieu d'emprunt ou de dépôt comporte un point d'arrivée ou de sortie plus ou moins éloigné. Quoiqu'il en soit, dès qu'on a fixé la position des profils d'arrivée ou de sortie, on se trouve dans les conditions qui viennent d'être examinées, et c'est dès lors par les procédés sus-indiqués que la ligne de répartition doit être définitivement obtenue.

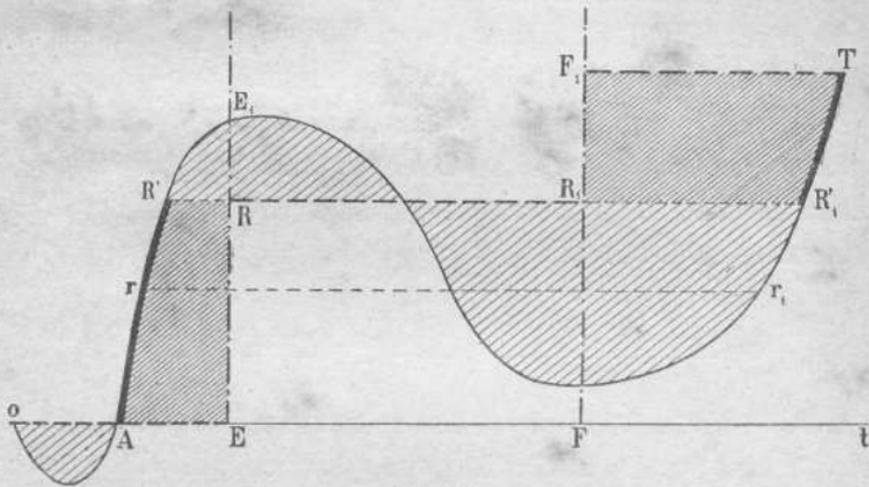


Fig. 33.

Soit, par exemple, une courbe à travers laquelle on a tracé l'horizontale rr_1 , suivant les règles du texte. Les remblais à exécuter par voie d'emprunts sont représentés par les portions de courbe Ar et r_1T . Si les lieux d'emprunts les plus voisins comportent des points d'arrivée en E et en F , il y a lieu de mener les profils EE_1 et FF_1 , passant par ces points et de résoudre la question ainsi qu'il vient d'être indiqué. Les horizontales de la ligne de répartition définitive sont OE , RR_1 et F_1T , et les remblais à emprunter sont figurés par les portions de courbe AR' et R_1T .

§ 2. — Règles pratiques.

9. — Lorsque les lieux d'emprunt ou de dépôt doivent occuper un emplacement déterminé, l'épure fournit le mouvement des terres, pour les remblais à tirer d'emprunts, à partir du point d'arrivée sur la voie, et, pour les déblais à mettre en dépôt, jusqu'au point de sortie hors de cette voie.

Quant aux transports entre les centres de gravité des chambres d'emprunt ou des massifs de dépôt et les points d'arrivée ou de sortie, ils sont laissés à l'écart. Il suffit de les ajouter aux transports révélés par l'épure pour obtenir les transports totaux dont les emprunts ou les dépôts doivent être l'objet.

Les profils passant par les points d'arrivée des déblais d'emprunt ou par les points de sortie des déblais à mettre en dépôt seront ci-après désignés sous le nom de *profils des lieux d'emprunt ou de dépôt*.

1° Cas d'un lieu unique d'emprunt ou de dépôt.

10. — La ligne de répartition se compose des deux horizontales passant par les extrémités du polygone, chacune d'elles étant limitée à la partie comprise entre l'extrémité et le profil du lieu d'emprunt ou de dépôt.

2° Cas de deux lieux d'emprunt ou de dépôt.

11. — La ligne de répartition se compose de trois horizontales. La première et la dernière passent par les extrémités du polygone et chacune d'elles est limitée à la partie située entre l'extrémité et le plus voisin des profils des lieux d'emprunt ou de dépôt.

Quant à l'horizontale intermédiaire, elle est comprise entre les deux profils et limitée à chacun d'eux. Elle ne peut être ni inférieure à la plus basse, ni supérieure à la plus haute des parallèles

passant par les extrémités du polygone. Il en résulte qu'elle doit coïncider avec l'une ou l'autre de ces parallèles, ou bien se trouver dans l'intervalle qui les sépare.

12. — L'horizontale intermédiaire se confond avec la plus basse des parallèles extrêmes, quand la somme des cordes interceptées est plus petite pour les segments supérieurs que pour les segments inférieurs, c'est-à-dire quand on a :

$$\Sigma s < \Sigma i$$

Elle coïncide avec la plus haute des parallèles extrêmes, quand la somme des cordes interceptées est plus grande pour les segments supérieurs que pour les segments inférieurs, c'est-à-dire quand on a :

$$\Sigma s > \Sigma i$$

Enfin elle est comprise entre les deux parallèles, quand ni l'une ni l'autre des conditions qui viennent d'être indiquées n'est remplie. Quant à la position de l'horizontale intermédiaire, elle doit être telle que la somme des cordes des segments supérieurs soit égale à la somme des cordes des segments inférieurs, auquel cas on a :

$$\Sigma s = \Sigma i$$

Pour la vérification de ces conditions, il importe de considérer les profils des lieux d'emprunt ou de dépôt comme constituant des portions de polygone en déblai ou en remblai, suivant qu'il s'agit d'emprunts ou de dépôts et d'admettre que ces profils complètent le polygone de Bruckner (1).

3^o Cas de plusieurs lieux d'emprunt ou de dépôt.

13. — La ligne de répartition comprend toujours deux horizontales, la première et la dernière, qui passent par les extré-

(1) Ces règles sont indiquées dans l'hypothèse où les frais d'emprunt ou de dépôt au dehors de la voie, c'est-à-dire les frais que l'épure du mouvement des terres laisse à l'écart, sont les mêmes pour les deux lieux d'emprunt ou de dépôt.

Dans le cas où il n'en serait pas ainsi, voir la note du n^o 4.

mîtés du polygone, chacune d'elles étant limitée à la portion située entre l'extrémité et le plus voisin des profils des lieux d'emprunt ou de dépôt.

Dans chaque section comprise entre deux profils successifs, on trace une horizontale d'après les règles qui viennent d'être indiquées, au cas précédent, pour l'horizontale intermédiaire. Mais les horizontales ainsi obtenues doivent satisfaire à une condition particulière : elles doivent être disposées en gradins ascendants, quand le polygone se termine au-dessus de la ligne de terre, et en gradins descendants, quand il se termine au-dessous.

S'il ne peut en être ainsi, il y a lieu de combiner les sections, en poussant la réunion aussi loin que le besoin s'en fait sentir, jusqu'à ce que la condition précédente soit remplie.

Cette réunion doit s'effectuer de telle sorte que les horizontales partielles soient aussi bas que possible, quand le polygone aboutit au-dessus de la ligne de terre, et aussi haut que possible, dans le cas contraire.

14. — *Observations sur l'application des règles qui précèdent.*

— Ces règles s'appliquent d'abord au cas où, par suite de circonstances particulières, l'emplacement des lieux d'emprunt ou de dépôt est obligatoirement fixé à l'avance.

Elles trouvent aussi leur application quand les déblais d'emprunt ne peuvent pas être extraits au droit des profils où ils doivent être employés et, pareillement, quand les déblais à mettre en dépôt ne peuvent être portés au droit des profils d'où ils proviennent.

Dans ce cas, on trace provisoirement la ligne de répartition, soit d'après les règles du texte, soit d'après celles de l'annexe A. On recherche les lieux d'emprunt ou de dépôt les plus voisins des cubes de remblai ou de déblai en excès que cette ligne de répartition a fait apparaître. On fixe les points d'arrivée des déblais à tirer des lieux d'emprunt ou les points de sortie des déblais à porter sur les lieux de dépôt. On mène les profils passant par ces points d'arrivée ou de sortie, et on applique ensuite les règles précédentes pour obtenir la ligne de répartition définitive des terrassements.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	v
-------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

Théorie du procédé Bruckner.

CHAPITRE I. — Propriétés de la courbe de Bruckner.	3
§ 1. — <i>Construction de la courbe de Bruckner.</i>	3
§ 2. — <i>Propriété des portions de courbe descendantes ou ascendantes.</i>	6
§ 3. — <i>Propriété des segments détachés par la ligne de terre ou par une parallèle à cette ligne</i>	7
§ 4. — <i>Propriété des aires des segments.</i>	10
CHAPITRE II. — Détermination de la ligne de répartition des terrassements	13
CHAPITRE III. — Détermination de la distance moyenne de transport.	21

DEUXIÈME PARTIE

Pratique du procédé Bruckner.

CHAPITRE I. — Rédaction de la première partie du tableau du mouvement des terres	25
CHAPITRE II. — Tracé du polygone de Bruckner.	28
CHAPITRE III. — Détermination de la ligne de répartition des terrassements	29
CHAPITRE IV. — Détermination des cubes de déblais à employer en remblais et de leur distance de transport.	31
CHAPITRE V. — Rédaction de la deuxième partie du tableau du mouvement des terres	35

TROISIÈME PARTIE

Application à un exemple.

<i>Extrait de l'avant-métré des terrassements</i>	39
<i>Epure du mouvement des terres.</i>	43

ANNEXES

ANNEXE A. — Cas où il est possible de rompre la ligne de répartition en la disposant en gradins horizontaux . . .	47
§ 1. — <i>Théorie</i>	47
§ 2. — <i>Règles pratiques</i>	55
ANNEXE B. — Cas où les lieux d'emprunt ou de dépôt doivent occuper un emplacement déterminé	57
§ 1. — <i>Théorie</i>	57
§ 2. — <i>Règles pratiques</i>	68

2

570

2

CONSOLIDATION
DES TRANCHÉES ET DES REMBLAIS
ARGILEUX

CONSOLIDATION
DES TRANCHÉES ET DES REMBLAIS
ARGILEUX

PAR

L. LEFORT

INGÉNIEUR DES PONTS ET CHAUSSÉES

PARIS ET LIÈGE

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, CH. BÉRANGER, ÉDITEUR

PARIS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, 15

LIÈGE, 21, RUE DE LA RÉGENCE, 21

—
1912

0
624.151
L494C

UFRJ

**Centro de Ciências Matemáticas e
de Natureza
Biblioteca Central**

N.º REGISTRO

DATA

027997-8 09/12/88

ORIGEM

Dois desconhecidos

CHAPITRE PREMIER

CONSOLIDATION DES TRANCHÉES ARGILEUSES

Les ingénieurs qui ont exécuté de grands travaux de terrassement ont rencontré des difficultés parfois considérables résultant des éboulements des talus des tranchées.

Longtemps les règles qui doivent présider aux consolidations sont restées indécises. Elles ne se sont précisées qu'après une longue expérience, qu'après avoir consolidé des centaines de kilomètres de tranchées, qu'après avoir dépensé un nombre respectable de millions et enfin qu'après de nombreuses publications sur la matière.

Ce sont ces règles que nous voulons essayer de mettre en évidence, étant entendu qu'il ne s'agit ici que des consolidations des masses et non des consolidations superficielles des talus.

I. — CONSIDÉRATIONS SUR LES ÉBOULEMENTS DES TRANCHÉES ARGILEUSES.

Composition des tranchées argileuses. — Quand on considère successivement, en des terrains différents de l'échelle géologique, des tranchées contenant des bancs de terre argileuse, on est frappé de la multiplicité des aspects qu'elles présentent.

a) Tantôt, un seul banc d'argile placé à la partie inférieure est recouvert par des terrains perméables.

b) Tantôt, on voit plusieurs bancs d'argile séparés par des couches perméables.

c) Tantôt, le banc d'argile est à la partie supérieure de la tranchée et recouvre des terrains perméables.

d) Tantôt, enfin, l'argile occupe la totalité de la hauteur de la tranchée.

Nous n'examinerons que les deux cas extrêmes (a) et (d) qui suffisent à l'étude de la question que nous nous sommes proposé de résoudre.

Affleurement des eaux. — Toute tranchée argileuse a des points d'affleurement des eaux souterraines à la surface des talus. Une courte expérience permet de découvrir l'emplacement de ces affleurements. En été, de très bonne heure, les lignes de suintement apparaissent nettement sur les talus et notamment sur ceux où les rayons du soleil ne donnent pas. En hiver, pendant les gelées, la ligne des suintements est dessinée par un chapelet de glaçons.

Certitude presque absolue des éboulements. — La pratique a prouvé à maintes et maintes reprises qu'une tranchée renfermant des couches argileuses est sujette, dans presque tous les cas, à des éboulements plus ou moins considérables et dont les volumes varient avec les hauteurs des tranchées, l'inclinaison naturelle des couches du sol, l'abondance des eaux, etc.

§ 1. — Cas d'un seul banc d'argile placé à la partie inférieure de la tranchée et recouvert par des terres perméables.

Etude de l'éboulement. — Nous allons tout d'abord envisager le cas le plus simple et le plus fréquent, celui de terres perméables recouvrant un banc argileux.

Soit CD (fig. 1) la ligne de séparation des deux bancs, c'est-à-dire la ligne sur laquelle a lieu la circulation des eaux pluviales qui ont traversé la couche de terre perméable.

Sur le talus de la tranchée, le point D apparaît mouillé ou humide.

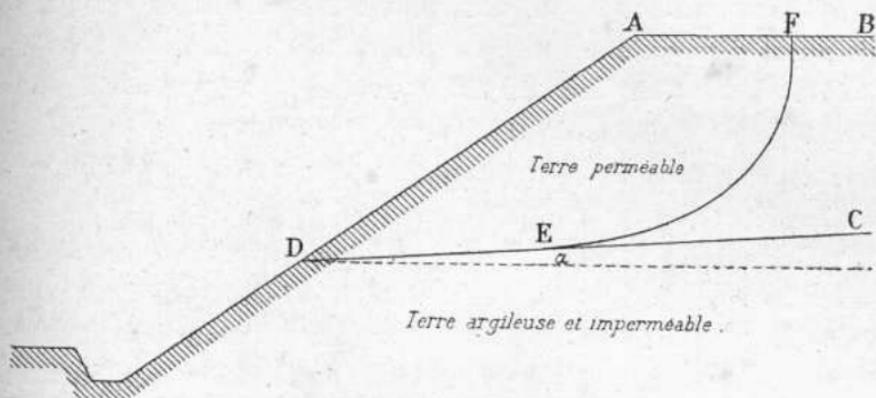


FIG. 1.

Soit α l'angle que fait la ligne CD avec l'horizontale.

Influence des eaux. — La circulation des eaux sur la surface CD, surface argileuse, produit le ramollissement de cette surface qui devient alors un plan de clivage incliné et fort savonneux.

Il en résulte que la couche ABCD, en vertu de son seul poids, sous la seule action de la pesanteur, tend à descendre la pente glissante sur laquelle elle repose et à tomber dans la tranchée.

Prisme d'éboulement. — Mais comme cette couche perméable n'est pas toujours très régulière, que la surface de glissement est elle-même plus ou moins onduleuse, que la cohésion des terres varie d'un point à l'autre, que le volume des eaux en circulation a une répartition inégale, une partie seulement, plus ou moins considérable, de la couche ABCD se mettra en mouvement. L'expérience montre en effet qu'il se produit un décollement suivant une ligne EF. C'est le massif AFED que nous appelons prisme d'éboulement.

Cycloïde de glissement. — La forme de la ligne EF affecte d'une façon à peu près constante le tracé d'une sorte d'arc de cycloïde qui présente à sa partie supérieure un élément ver-

tical et se raccorde assez brusquement parfois avec la ligne CD de la surface du clivage. Plusieurs auteurs ont relevé les formes des courbes EF et ont conclu à la cycloïde. On pourrait aussi dire qu'elles sont des paraboles à axe presque vertical et dans bien des cas nous avons relevé cette dernière forme. Quoi qu'il en soit, il suffit d'avoir observé un seul éboulement pour conserver un sentiment très net de la figure générale présentée par la ligne EF.

Position de la cycloïde. — La position du point F est variable avec les diverses tranchées. Parfois elle se trouve dans le talus AD, parfois vers la crête A, parfois enfin au delà de cette crête, comme sur la figure précédente, à des distances plus ou moins considérables.

Elle varie avec une multiplicité d'éléments :

- a) Inclinaison de la surface de glissement ;
- b) Abondance des eaux ;
- c) Nature de la terre argileuse et du banc perméable ;
- d) Inclinaison des talus de la tranchée ;
- e) Epaisseur de la couche de terrain perméable ;
- f) Cohésion des terres de cette couche ;
- g) Ondulations de la surface glissante ;
- h) Variations atmosphériques : sécheresse, humidité, hauteur des tombées d'eau, etc.

Il n'est donc pas possible de fixer *a priori* la position du point F. Tout au plus, quand on a bien étudié les divers éléments qui peuvent le faire varier, peut-on préjuger vaguement son recul plus ou moins grand vers le coteau.

Nous avons vu des éboulements dans lesquels le point F était placé à plus de 30 m en arrière de la crête de la tranchée. Nous avons même observé un recul de 200 m dans le coteau, mais ce dernier cas est extrêmement rare.

Arc de cercle qui limite l'éboulement en plan. — La ligne des points F n'est pas parallèle à la crête de la tranchée.

Elle se présente en plan, dans la grande généralité des cas, sous la forme d'un arc de cercle ou de parabole dont la conca-

d) Le contour rectiligne DAF a pris la forme d'une masse liquide qui se déverse par-dessus un barrage.

e) Le volume de la terre en mouvement est disloqué, désagrégé et sans cohésion.

g) La surface de glissement DEF est fortement striée par le frottement et a un aspect luisant.

La figure 2 représente ces effets.

h) Les choses restent souvent en cet état pendant de longs jours jusqu'à ce qu'une pluie suffisamment intense vienne liquéfier le volume éboulé et désagrégé et lui fait faire un nouveau pas vers la tranchée.

Eboulements secondaires. — Mais à ce moment aussi un éboulement secondaire se produit ou se prépare. Le talus EF n'étant plus soutenu, une nouvelle fissure se produit en E'F' de la même façon que s'est produite la fissure F. Cependant, on remarque généralement que le deuxième volume de terre qui se détache est beaucoup moins important que le premier. Il ne faut pas oublier en effet que la surface EF, qui en plan a la forme générale d'un arc de parabole ou d'un arc de cercle, constitue l'intrados d'une sorte de voûte à axe vertical présentant une certaine résistance et qui contrebalance dans une certaine mesure l'absence de soutien de la surface EF. Quoi qu'il en soit, l'expérience montre :

a) Que la distance EE' est généralement moindre que la distance DE ;

b) Que l'arc de cercle ou de parabole des points F' est à rayon plus court que celui des points F ;

c) Que la corde de l'arc du nouvel éboulement est plus courte que la corde du premier ou tout au plus se limite aux extrémités de cette dernière, mais sans les dépasser.

A part ces différences, les caractères du premier éboulement se retrouvent dans le second.

Amplitude des éboulements successifs. — L'éboulement secondaire est souvent suivi d'autres en nombre plus ou moins grand, suivant l'amplitude du premier.

Nous avons eu sous les yeux, ainsi que nous l'avons déjà dit, des éboulements qui se sont étendus à 30 m et plus en arrière de la crête de la tranchée.

Etude mécanique de l'éboulement. — On pense se rendre un compte approché, par une étude mécanique, des faits précédents que tous les ingénieurs connaissent.

Reprenons la figure 1 ci-dessus.

Supposons connue la surface EF suivant laquelle le massif d'éboulement se détacherait du sol.

Appelons P le poids de ce massif.

Existence de quatre forces. — Avant l'évènement le prisme d'éboulement est sollicité par quatre forces.

a) Une première force, $P \sin \alpha$, composante du poids P, parallèle à la surface glissante, qui passe par le centre de gravité du prisme d'éboulement et qui tend à l'entraîner vers la tranchée en le faisant glisser sur la surface savonneuse du banc d'argile.

Faible lorsque α est petit, elle prend plus d'importance lorsque α grandit et avec de grandes valeurs de α , elle est le principal auteur de l'accélération du mouvement.

b) La seconde composante du poids du massif, $P \cos \alpha$ normale à la surface glissante, engendre au contact de cette surface une force de frottement

$$f \cdot P \cdot \cos \alpha$$

dirigée dans la surface même de glissement et parallèle à la première ($P \sin \alpha$) mais en sens inverse: elle s'oppose à la progression du massif. f est un coefficient dit de frottement qui varie dans d'énormes proportions, depuis quelques centièmes lorsque la surface argileuse présente son maximum de consistance savonneuse jusqu'à plusieurs dixièmes lorsque la surface glissante est sèche. Dès lors $f \cdot P \cdot \cos \alpha$ varie dans des proportions identiques.

c) La cohésion des terres suivant la surface EF est une troisième force qui entre en jeu. On peut admettre que cette

force K , retardatrice, est parallèle à la surface de glissement et que sa direction passe aux environs du centre de gravité du prisme $ADEF$. Nous ne pensons pas qu'elle soit en général très considérable. Pour un terrain donné, elle est à peu près constante par mètre carré. Nous verrons plus loin son influence.

d) Les pressions hydrostatiques. Voici leur origine. Par les sécheresses de l'été, il est peu de sols qui ne se fissurent jusqu'à une certaine profondeur. Les fissures sont d'autant plus longues, nombreuses et profondes que le sol contient une plus grande quantité d'argile. Pendant les gelées de l'hiver, le même phénomène se produit. Le sol étant ainsi fissuré, s'il arrive une pluie intense et subite, les fissures se remplissent d'eau avant qu'elles aient eu le temps de se boucher. La pression hydrostatique engendrée, n'étant pas contrebalancée du côté de la tranchée, tend à culbuter le massif.

Il est d'expérience, en effet, que les grands éboulements se manifestent après les grands orages d'été ou à la suite de dégels subits accompagnés de fortes pluies.

L'une des composantes des pressions hydrostatiques est parallèle à la surface du glissement et dirigée vers la tranchée. Nous la désignerons par L .

L'autre composante, normale à cette surface de glissement, est fort petite et vient en augmentation ou en diminution du poids $P \cdot \cos \alpha$, et par suite, de la force retardatrice $f \cdot P \cdot \cos \alpha$. Mais vu son peu d'importance nous la négligerons.

Composition des quatre forces. — En résumé le prisme d'éboulement est finalement sollicité par quatre forces parallèles.

Deux sont accélératrices, c'est-à-dire dirigées dans le sens du mouvement :

$$P \cdot \sin \alpha \quad \text{et} \quad L$$

Deux sont retardatrices, c'est-à-dire dirigées en sens inverse du mouvement :

$$f \cdot P \cdot \cos \alpha \quad \text{et} \quad K$$

Ces quatre forces donnent lieu à deux résultantes

$$\begin{aligned} & P. \sin \alpha + L \\ \text{et} & f. P. \cos \alpha + K \end{aligned}$$

qui ont des directions parallèles (celle de la surface de glissement) mais opposées, qui ne passent pas par le même point et qui, par conséquent, se combinent en une force unique et un couple.

La résultante unique a pour valeur

$$R = P. \sin \alpha + L - (f. P. \cos \alpha + K)$$

la direction positive étant dirigée vers la tranchée.

Le couple a pour intensité de ses forces la plus petite des deux quantités.

$$P. \sin \alpha + L \quad \text{ou} \quad f. P. \cos \alpha + K$$

et on peut se rendre compte qu'il tend toujours à culbuter le prisme dans la tranchée.

Action des forces. — Antérieurement au mouvement, ce sont les deux forcés retardatrices qui l'emportent et alors R s'éloigne de la tranchée.

Au moment même de l'ébranlement $R = 0$ et le couple agit seul.

Enfin, aussitôt après l'origine du mouvement, la force K, l'une des retardatrices, disparaît, la résultante R s'accroît d'autant et se dirige vers la tranchée. Il y a glissement du prisme. Mais le couple fait aussi sentir son effet en déterminant des actions moléculaires qui disloquent la masse en mouvement. Il se produit alors une déformation du prisme détaché (voir la 2^e figure) au profit d'un nouvel équilibre qui ne tarde pas à être atteint. Ce mouvement s'arrête provisoirement. Il faut une cause nouvelle pour que le mouvement reprenne.

§ 2. — Cas d'une tranchée entièrement argileuse.

Considérations générales. — Examinons à présent le cas extrême, celui d'une tranchée entièrement argileuse.

A priori, on pourrait croire qu'une telle tranchée n'est pas susceptible de suintements et, par suite, ne peut être exposée aux éboulements. Ce serait une grave erreur. Sans doute, il conviendra d'adoucir le plus possible l'inclinaison de ses talus. Mais cela ne suffit pas dans bien des cas.

Il ne faut pas oublier en effet :

- a) Qu'une masse argileuse n'est pour ainsi dire jamais homogène ;
- b) Qu'elle renferme des vides ou des filons perméables qui favorisent le passage de l'eau ;
- c) Que l'ouverture de la tranchée trouble un équilibre antérieur ;
- d) Que l'inclinaison du talus n'est presque jamais d'accord avec celle qui convient à la nature de la terre argileuse ;
- e) Que la tranchée proprement dite constitue un appel considérable et énergique des eaux intérieures sur ses talus et change la constitution de la masse aux abords de ces talus.

Aussi, n'est-il pas rare de voir les talus d'une tranchée argileuse qui, par la sonde, se présentait comme un terrain sec et résistant, devenir fortement humides aussitôt l'ouverture, puis s'ébouler. Ce phénomène est parfois retardé mais il se produit presque toujours.

Dans le même ordre d'idées, nous avons vu un souterrain ouvert dans un tuf argileux très dur qui a produit un phénomène analogue. On a pu l'ouvrir et établir son revêtement sans difficultés ; mais, au bout de quelques semaines, ce tuf s'est humecté, s'est ramolli, a gonflé et a écrasé, réduit en poussière le revêtement maçonné qu'il a fallu reprendre avec beaucoup de peine et des matériaux de choix bien appareillés tout en lui donnant une épaisseur beaucoup plus grande.

La position du plan de glissement est inconnue. — Le constructeur est dans le cas présent beaucoup plus embarrassé que dans le précédent.

Impossible souvent de reconnaître la position du plan de glissement qui va se produire. Les talus sont couverts de pleurs à toute hauteur, l'on n'aperçoit pas de parties notablement plus humides, on est dans l'inconnu. Et cependant l'on sait que des éboulements se produiront.

Si l'on monte sur le terrain naturel en arrière des talus de la tranchée, par un temps sec, on voit des fissures beaucoup plus nombreuses et plus profondes que dans le premier cas; on voit une multitude de lignes EF sans pouvoir se prononcer sur celle qui donnera le décollement à la première pluie.

L'argile et l'eau sont si intimement liées lorsque cette dernière vient produire son action qu'on ne peut faire que des conjectures vagues sur le tracé et la position de la ligne DEF (fig. 1).

Nous avons vu des tranchées de cette nature, dans les argiles à silex de la Normandie, qui ont offert à ce point de vue un enseignement remarquable, mais jusqu'à un certain point négatif. Au jugé, à l'aspect, les talus avaient même composition sur toute leur hauteur et sur de grandes longueurs. Des éboulements se sont produits sur certains points et non dans d'autres parties. Pour quelques éboulements, nous avons bien remarqué qu'il existait sur le terrain naturel, en dehors de la tranchée et à quelque distance, de petites dépressions favorables à l'accumulation des eaux. Mais pour la plupart nous n'avons pas observé de cause spéciale. Pourquoi un éboulement ici et non là?

Influences diverses. — Il faut chercher la raison de cette incertitude dans la multiplicité des causes en jeu :

a) Constitution intime du sol, homogène en apparence, mais hétérogène en réalité;

b) Disposition variable des veines sableuses dans la masse argileuse;

c) Diversité de la circulation des eaux souterraines d'un point à l'autre ;

d) Configuration variable du réseau de crevasses du sol naturel en arrière de la tranchée.

e) Action variée de la pluie d'un endroit à l'autre.

L'ingénieur ne peut découvrir toutes ces causes, ni apprécier leur importance relative, ni calculer leurs effets particuliers. En général, il est dans l'inconnu. Une seule chose ne doit cependant pas sortir de son esprit : c'est qu'il est en présence d'une masse argileuse sur laquelle l'eau de quelque provenance qu'elle soit, a les plus désastreux effets. On verra plus loin que cette notion générale suffit au travail de consolidation.

Formes des éboulements. — Quand un éboulement s'est déclaré dans un semblable terrain, il présente exactement les mêmes caractères que celui du cas précédent et son étude mécanique conduit aux mêmes résultats.

Résumé des deux cas. — En résumé, l'argile dans une tranchée est certainement un danger parce que l'eau du ciel viendra à un moment donné changer sa constitution.

Quand la pluie tombe sur un sol perméable, elle pénètre à travers ce sol et arrive jusque sur le banc argileux à la surface duquel elle circule. La surface de glissement de l'éboulement est connue à l'avance.

Quand la pluie tombe sur un sol argileux, elle pénètre en petite quantité il est vrai, mais elle pénètre en quantité suffisante, circule en des canaux ignorés et détermine des éboulements suivant des plans de glissement inconnus à l'avance.

Dans le premier cas on connaît *a priori* la position de la surface glissante, sinon la surface de décollement cycloïdale.

Dans le second cas, tout est inconnu.

Autres cas. — Entre les deux cas envisagés ci-dessus et qui sont des cas extrêmes se placent une foule de variantes auxquelles s'appliquent les études et les observations précédentes.

Conclusion. — La conclusion est que la présence de l'argile dans une tranchée entraînera, en règle générale, des consolidations si l'on veut éviter les éboulements.

C'est ici le lieu de dire que le projet de terrassements doit comprendre ces travaux de consolidations qui tous ou presque tous sont bien définis et susceptibles d'une évaluation sinon rigoureusement exacte, du moins très approchée, et qu'en général, à moins d'impossibilité, il convient de les exécuter préventivement ou au cours même de l'ouverture des tranchées de façon à ne pas donner aux forces le temps de se mettre en jeu.

II. — MÉTHODES DE CONSOLIDATION DES TRANCHÉES ARGILEUSES.

Méthodes diverses. — L'étude précédente relative à la nature des éboulements dans les tranchées exige, pour être complète et pour la pratique, d'être complétée par les indications nécessaires pour combattre ou réparer les accidents.

Les opinions ont beaucoup varié au sujet des meilleures méthodes pour consolider les tranchées argileuses.

On a préconisé le mur de soutènement; c'est l'opposition d'une force artificielle à une action naturelle.

On a préconisé plus timidement, les drainages effectués par des pierrées perpendiculaires à l'axe de la tranchée dans le double but de canaliser les eaux souterraines et de diviser la masse susceptible de s'ébouler.

On a préconisé les consolidations préventives.

On a conseillé d'attendre les éboulements avant de consolider.

Chacun avait assurément d'excellentes raisons pour agir de telle ou telle façon. Il n'était même pas mauvais que des expériences diverses fussent faites, car de ces expériences est née une méthode unique que nous exposerons ci-dessous.

Mur de soutènement. — Le mur de soutènement qui, à

première vue, paraît rationnel, est cependant, à l'analyse, un procédé irrationnel. Il est irrationnel :

a) Parce que si, dans un grand nombre de cas, on peut se rendre compte de la position du plan de glissement, on est dans l'ignorance à peu près absolue, de l'importance de l'éboulement et par suite de l'intensité et du point d'application de la poussée exercée sur le mur. Nous voulons parler ici du cas simple que nous avons examiné plus haut et qui est défini par une masse perméable superposée à une couche argileuse.

b) Parce que dans d'autres cas, ceux des tranchées entièrement argileuses, on ne connaît ni la position de l'éboulement, ni la position du plan de glissement, ni la masse qui se détachera, ni les éléments de la poussée, rien qui puisse guider l'ingénieur.

c) Parce que dans les cas qui se placent entre ces deux extrêmes la même ignorance subsiste.

d) Parce qu'enfin on ne peut calculer les dimensions du mur si les forces qui le sollicitent sont inconnues.

La formule habituelle des murs de soutènement ne s'applique pas aux murs de consolidation. — La théorie habituelle qui sert aux calculs des murs de soutènement suppose que ce dernier remplace tout ou partie des talus d'un remblai ou d'un déblai de bonne qualité et qu'il doit tenir lieu d'un pied de talus absent. Elle aboutit à une sorte de formule empirique qui ne possède qu'une précision pratique relative, car elle est fonction de la cohésion des terres soutenues, cohésion qui est difficile à déterminer dans chaque cas d'application.

Habituellement, on donne au mur de soutènement une épaisseur comprise entre le quart et le tiers de sa hauteur.

On ferait une grave erreur si l'on voulait appliquer à la lettre, aux consolidations des tranchées argileuses, la formule tirée de la théorie précédente. En dehors de la cohésion des terres qui est la seule base de cette théorie, il existe dans les tranchées argileuses des forces nouvelles dont nous avons expliqué la nature et qui en résumé, ainsi que nous l'avons

montré plus haut, se traduisent par un couple de renversement et une force entraînant le massif de terre vers le vide. Ces forces ne sont peut-être pas toutes indépendantes de la cohésion, mais la plupart le sont et naissent d'actions extérieures qui n'ont rien à voir avec celle-ci.

Impossibilité de calculer le mur de consolidation. — Nous comprenons l'emploi du mur de soutènement établi suivant la formule précédente quand, pour éviter des déblais dans un sol sec et convenable, on remplace une portion du talus par un mur. Mais ce n'est pas le cas que nous envisageons dans cette étude, où nous supposons des terres argileuses pouvant se mettre en mouvement sous l'action des eaux. Dans le premier cas on n'a affaire en effet qu'à la cohésion et à des actions moléculaires dont les dimensions du mur tiennent un compte suffisant mais exclusif. Dans le second cas, outre la cohésion, entrent en jeu des actions extérieures souvent prépondérantes et presque toujours inconnues au moins quant à leur intensité.

Dès lors, comment établira-t-on le mur de soutènement pour consolider une tranchée ? D'après quelle base calculera-t-on sa hauteur, son épaisseur ? Comment sera-t-on fixé sur sa stabilité ? A ces questions, nul en l'état actuel des données scientifiques et expérimentales, ne peut répondre.

Un grand nombre de murs ont été établis d'après la formule précédente. Les uns ont réussi parce que la force de résistance qu'ils opposaient suffisait pour contrebalancer toutes les actions intérieures et extérieures réunies. Les autres se sont effondrés parce que leur calcul n'avait pas tenu compte des actions extérieures et qu'ils se sont trouvés placés dans des conditions qui n'étaient point prévues. On peut tenir pour certain que lors de leur construction il était à peu près impossible d'affirmer qu'ils résisteraient efficacement.

Perfectionnements apportés aux murs de soutènement. — On a perfectionné ces murs en les perçant de barbacanes et en les munissant à l'arrière d'un filtre à pierre sèche, sorte de

surépaisseur ayant le double avantage d'absorber les eaux et de résister par son poids.

On a même ajouté de distance en distance et toujours en arrière du mur des contreforts également à pierre sèche qui augmentaient encore la stabilité de l'ouvrage et favorisaient l'assèchement.

Mais ces premiers perfectionnements n'ont pas empêché la série des déboires.

On a encore perfectionné ces murs en les disposant en voûtes en arc de cercle, à axe vertical, ayant des ouvertures de 5, 8 à 10 m, dérasées dans le plan du talus et séparées par des contreforts maçonnés jouant le rôle de piédroits. L'amélioration était sérieuse et a réussi en beaucoup d'endroits. Mais au prix de quelles dépenses!

Ouvrir des fouilles profondes en plein talus, presque parallèlement à la tranchée, dans des sols mouillés, conduit à blinder fortement pour éviter les éboulements et occasionne des frais considérables.

Mais, en maintes tranchées, ces arcs eux-mêmes ont été poussés et on a été conduit à les arc-bouter par des piédroits horizontaux placés à travers la plateforme de la tranchée, lesquels ont été eux-mêmes arc-boutés par d'autres voûtes symétriques construites dans l'autre talus.

Et nous avons vu, même dans ce dernier cas, les terres soutenues se réduire en bouillie et se déverser par-dessus le mur de soutènement resté inébranlable pendant le désastre. Le mur en voûte était solidement établi, mais les terres ramollies, sollicitées par les actions analysées précédemment, se sont d'abord heurtées contre l'extrados de l'obstacle, puis sont remontées comme un simple fluide, à la façon de l'eau en amont des barrages, ont franchi le mur et sont tombées dans la tranchée.

Quelques avantages des murs. — Les murs de soutènement ont cependant quelques avantages plus apparents que réels.

a) Ils diminuent ou paraissent diminuer sérieusement le

volume des déblais. Si le talus AB est reporté en CD par suite de la construction du mur AC (fig. 3), si h est la profondeur totale de la tranchée et αh la hauteur EC,

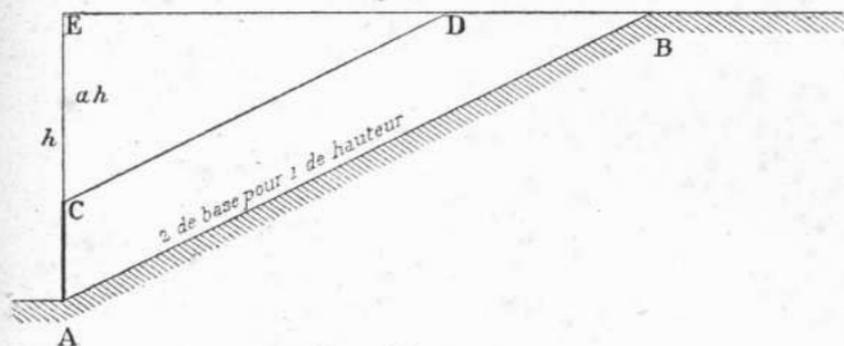


FIG. 3

la similitude des triangles EAB et ECD donne

$$\frac{\text{Surf. EAB}}{\text{Surf. ECD}} = \frac{h^2}{\alpha^2 h^2}$$

Par suite, si V est le volume correspondant au triangle EAB et V' le volume correspondant au triangle ECD, on a aussi :

$$\frac{V}{V'} = \frac{h^2}{\alpha^2 h^2}$$

d'où

$$V' = V\alpha^2.$$

Si l'on se place dans l'hypothèse de talus inclinés à 2 de base pour 1 de hauteur,

$$V = h^2$$

d'où

$$V' = \alpha^2 h^2$$

et

$$V - V' = h^2 (1 - \alpha^2)$$

$V - V'$ est la diminution du volume.

Si

$$\begin{aligned} h &= 9 \text{ m et } \alpha = 2/3 \\ V - V' &= 45 \text{ m}^3, \text{ chiffre important.} \end{aligned}$$

b) Les murs diminuent les emprises de la quantité.

$$\begin{aligned} DB &= EB - ED \\ EB &= 2 h \\ ED &= 2 \alpha h \end{aligned}$$

d'où

$$DB = 2 h (1 - \alpha)$$

Si

$$\begin{aligned} h &= 9 \text{ m et } \alpha = 2/3 \\ DB &= 6 \text{ m, chiffre important.} \end{aligned}$$

Mais ces avantages ne sont bien souvent qu'illusoire.

Tout d'abord, il est impossible, dans la plupart des cas, de donner au profil du talus la forme ACD. Dans une tranchée argileuse et mouillée, il s'éboulerait rapidement.

Ensuite, pendant tout le temps que dure la construction du mur, pendant tout le temps de la prise du mortier, temps souvent considérable, l'ouvrage est en danger de recevoir des poussées et de s'ébouler. Dans ce cas, non seulement le mur lui-même est à recommencer, mais le bénéfice de l'économie des terrassements et des emprises se trouve singulièrement diminué, sinon annulé, souvent négatif.

Et puis, on ne peut procéder à la construction de murs de soutènement pendant les mois d'hiver.

Enfin, le mur ne protège pas la portion de tranchée qui le surmonte contre ses éboulements propres.

Rejet du mur. — Toutes ces circonstances font perdre au système les quelques avantages apparents qu'il présente et ne laissent en relief que les inconvénients précédemment signalés.

Le mur de soutènement doit donc être rejeté.

Cette opinion a été émise, avec un peu moins de netteté il est vrai, il y a plus de soixante ans par un ingénieur éminent, M. Collin, et il y a plus de trente ans par M. l'Inspecteur général Comoy. Ils disaient :

La réussite des murs de soutènement est souvent précaire et s'achète au prix de ruineux sacrifices.

Autres méthodes. — Les échecs répétés des murs de soutènement pour consolider les tranchées argileuses, échecs aggravés par les dépenses d'entretien ultérieures qui prennent parfois des proportions exorbitantes, ont conduit à rechercher d'autres méthodes. Nous ne voulons pas les passer toutes en revue et les discuter, car elles sont trop nombreuses et nous entraîneraient trop loin. Nous avons le désir d'arriver le plus tôt possible à l'exposé de la méthode que nous considérons comme indiscutable et unique. Nous l'examinerons dans les deux cas extrêmes des tranchées argileuses que nous avons déjà envisagés antérieurement.

§ 1. — **Cas d'un seul banc d'argile placé à la partie inférieure de la tranchée et recouvert par des terres perméables.**

Rappel des forces en présence. — Nous avons vu précédemment que dans ce cas le glissement tend à se produire sur la surface argileuse et que les forces en jeu sont :

a) Le poids P du massif qui donne une composante

$$P \sin \alpha$$

parallèle à la surface glissante et appliquée au centre de gravité, et une autre composante se traduisant par une force

$$f \cdot P \cos \alpha$$

opposée au mouvement et située dans le plan de glissement.

b) La cohésion des terres K , opposée au mouvement.

c) Les pressions hydrostatiques agissant dans le sens du mouvement avec une force L .

Nous savons aussi que ces forces se composent en deux forces parallèles non appliquées au même point :

$$\begin{aligned} & P \sin \alpha + L \text{ dans le sens du mouvement,} \\ & f P \cos \alpha + K \text{ dans le sens opposé.} \end{aligned}$$

ou finalement en une force unique

$$(1) R = P \sin \alpha + L - (f P \cos \alpha + K)$$

et un couple de renversement.

Etude de $P \sin \alpha$. — L'angle α d'inclinaison de la couche de glissement sur l'horizon varie dans des limites peu étendues en général. Il ne descend guère au-dessous de 0,05 et s'élève rarement au-dessus de 0,15. De sorte que l'expression $P \sin \alpha$ varie entre 0,05 P et 0,15 P.

Etude de $f P \cos \alpha$. — Dans la pratique, quand $\sin \alpha$ varie entre les limites indiquées au précédent alinéa, $\cos \alpha$ oscille entre 0,99, et 1.

f au contraire a des valeurs extrêmement diverses avec l'état d'humidité de la couche de glissement. A notre connaissance, il n'a pas été fait d'expériences pour déterminer sa valeur dans les diverses circonstances; mais nos observations personnelles nous portent à croire que lorsque l'argile est bien ramollie, f ne dépasse pas beaucoup 0,05 et que lorsque l'argile est sèche f atteint 0,80 et même 0,90.

De sorte que la force $f P \cos \alpha$ oscille entre le minimum

$$0,05 \times 0,99 \times P, \text{ soit } 0,05 P.$$

et le maximum

$$0,90 \times 1 \times P, \text{ soit } 0,90 P.$$

c'est-à-dire dans les proportions de 1 à 18.

Etude de la force K . — C'est une quantité petite. La cohésion des terres ou leur résistance à l'arrachement suivant la forme de cycloïde ne dépasse guère 0,200 kg par décimètre carré ou 20 kg par mètre carré, et 100 kg par mètre linéaire d'éboulement.

Etude de la force L . — Cette force peut être presque nulle dans certains cas, mais dans d'autres circonstances elle peut atteindre une valeur importante, si par exemple, une fissure de hauteur h est remplie d'eau.

$$L = 1000 \text{ kg} \times \frac{h^2}{2} \text{ par mètre courant.}$$

si

$$h = 2m, \quad L = 200 \text{ kg.}$$

Modification artificielle de ces forces par le drainage. — Des quatre forces énumérées ci-dessus, deux sont des constantes pour un même éboulement: $P \sin \alpha$ et K . On voit en effet que la première n'a que des termes connus dès que l'éboulement est déterminé et que l'action retardatrice de la cohésion est invariable.

Les deux autres forces sont au contraire essentiellement variables et peuvent être modifiées profondément par un procédé énergétique de drainage.

Le drainage, en effet:

a) Assèche la surface du glissement, c'est-à-dire qu'il assure au coefficient f de la force $f \cdot P \cdot \cos \alpha$ une valeur atteignant 0,80 à 0,90,

b) Et fait disparaître l'action des pressions hydrostatiques, $L = 0$.

La résultante R devient alors

$$R = P \sin \alpha - (0,80 P \cos \alpha + K)$$

Pour

$$\alpha = 0,05, \quad R = -0,75 P - K$$

Pour

$$\alpha = 0,15, \quad R = -0,64 P - K$$

C'est-à-dire que la résultante est toujours une force retardatrice.

Le drainage a donc pour effet merveilleux de transformer la résultante en une force retardatrice qui rend le mouvement impossible. De plus, il est facile de s'assurer que cette force est considérable et donne une très grande stabilité à la masse.

Mur de soutènement en terre. — Le drainage assure donc la stabilité, au point de vue du glissement sur la couche d'argile, du massif qui pouvait se mettre en mouvement et le lie intimement au sol inférieur. Ce massif rendu solidaire avec

l'argile de base constitue une sorte de mur de soutènement en terre sèche soumise aux actions du sol placé en arrière de lui vers le coteau, actions qui tendent à le renverser. Il est donc indispensable que le massif asséché présente une épaisseur suffisante.

Nous arrivons ainsi à cette idée de constituer de toutes pièces par le drainage un mur de soutènement en terre situé immédiatement en arrière du plan du talus.

Épaisseur du massif asséché. — Quelle sera l'épaisseur de ce massif ?

Comme pour les murs de soutènement en maçonnerie, nous ne pouvons pas fixer de chiffres en nous basant sur l'intensité

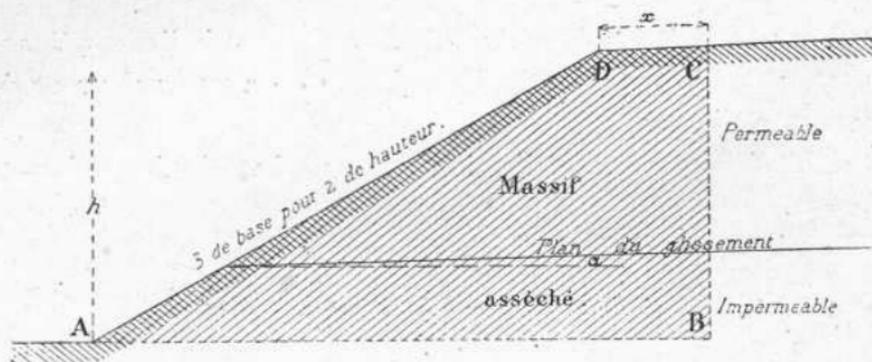


FIG. 4.

des forces. Mais ici il ne sera pas très coûteux de dépasser le but et d'assurer la stabilité et enfin de réussir.

- h étant la hauteur de la tranchée (fig. 4),
- x la quantité dont le massif asséché dépasse la crête,
- e l'épaisseur moyenne du massif ABCD,
- les talus étant supposés inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur,
- on a

$$e = x + \frac{3}{4} h.$$

Si l'on veut que l'épaisseur moyenne soit égale à la hauteur de la tranchée, on posera

$$h = x + \frac{3}{4} h$$

d'où

$$x = \frac{h}{4}$$

si l'on veut que l'épaisseur soit égale à une fois et un quart la hauteur de la tranchée, on posera

$$\frac{5}{4} h = x + \frac{3}{4} h$$

d'où

$$x = \frac{h}{2}$$

L'expérience a montré qu'un massif asséché ayant une épaisseur égale à celle de la hauteur de la tranchée présente en général une résistance suffisante. Mais pour plus de sécurité, on peut prendre pour épaisseur une fois et un quart la hauteur de la tranchée et dans ce cas le massif asséché débordera la crête de la tranchée de la moitié de la hauteur de celle-ci.

Comparaison mécanique du mur en maçonnerie et du mur en terre. — La densité de la terre étant prise de 1.500 kg, on peut facilement calculer le moment de renversement du mur en terre. Le poids du massif par mètre courant est

$$P = h \times \frac{5}{4} h \times 1500 = 1875 h^2$$

Par rapport au point A, la verticale du centre de gravité du massif ABCD passe à une distance d facile à calculer.

$$d = 1,3. h.$$

Le moment résistant du massif en terre est donc

$$P. d = 2437,5 h^3$$

La densité de la maçonnerie étant supposée de 2,200 kg, le

mur ayant une hauteur égale au tiers de la tranchée $\frac{h}{3}$, une épaisseur égale à sa hauteur, ce qui est une exagération manifeste pour ces sortes de construction, le moment de renversement du mur est

$$2200 \times \frac{h^2}{9} \times \frac{h}{6} = 40 h^3$$

C'est-à-dire que le mur en maçonnerie est incomparablement moins puissant que le mur en terre.

Pierrées d'assèchement. — Comment arriver à l'assèchement complet? Par un drainage énergique obtenu par des pierrées profondes, perpendiculaires à l'axe de la tranchée, régnant sur toute la hauteur des couches traversées par les eaux de façon à recueillir celles-ci et à les déverser à l'air libre. On indiquera plus loin la constitution de ces pierrées ainsi que leur mode d'établissement.

Longueur des pierrées. — Par suite des principes du drainage, il convient de faire débordér ces pierrées au delà des limites du massif à assécher (vers le coteau) d'une quantité égale au quart de leur écartement au moins.

Soient AB et CD (fig. 5), deux pierrées espacées de la quantité e .

La pierrée AB manifeste son action sur le périmètre FEIKL.
La pierrée CD exerce son influence sur le contour LKJGH.

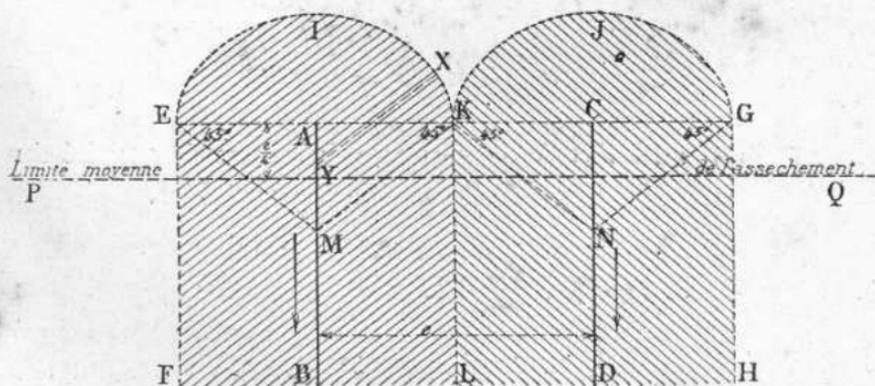


FIG. 5.

Mais on remarquera, en admettant que la circulation de l'eau se fasse dans un angle de 45° dès qu'elle est attirée par les pierrées, que les contours MEIK et NKJG contiennent encore de l'eau en circulation s'acheminant vers les pierrées. Par exemple la molécule qui arrive en X sur le périmètre d'influence de la pierrée AB, suit la trajectoire XY pour se rendre dans la pierrée.

Le terrain véritablement asséché, c'est-à-dire celui dans lequel il ne circule plus d'eau souterraine, est limité par le contour polygonal EMKNG ou moyennement par la ligne moyenne PQ distante de $\frac{4}{e}$ des extrémités des pierrées.

Donc ces pierrées doivent dépasser d'un quart de leur écartement le terrain à assécher.

Ecartement des pierrées. — Quel est l'écartement à donner aux pierrées? On peut d'abord dire que 10 m est un minimum au-dessous duquel on ne descend pas et que 40 m est un maximum que l'on ne dépasse pas.

L'écartement varie donc entre ces deux limites. Il croît avec la profondeur des pierrées elles-mêmes et le degré de perméabilité de la couche supérieure, et la quantité d'eau à écouler.

Ces trois éléments: profondeur du drainage, degré de perméabilité du sol, volume des eaux souterraines, sont presque d'égale importance et règlent l'écartement des pierrées.

Plus le drain est profond dans un même sol et pour un même volume d'eau, plus large est la surface qu'il assèche. Plus le terrain supérieur renferme de vides, pour une même profondeur du drain et pour une même quantité d'eau, plus le cheminement se fait avec facilité et plus la pierrée a d'action. Enfin, moins il y a d'eau et plus on peut éloigner les drains.

L'expérience prouve que dès que l'on atteint une profondeur de 4 à 5 m, l'assèchement des terrains les plus rebelles est complet avec un écartement minimum de 12 à 15 m. Dans un terrain très humide, nous avons établi des pierrées de 5 m

de profondeur, ayant un débordement sur la crête du talus de $\frac{h}{2} + \frac{e}{4}$ distantes de 12 m seulement, qui ont donné chacune d'une façon permanente un volume de 15 à 20 l par minute.

Dans chaque cas, les éléments qui entrent dans le calcul de l'écartement doivent être étudiés avec soin, les indications précédentes faciliteront cette étude si délicate.

Répartition des pierrées. — La répartition des pierrées est souvent arbitraire, surtout quand il s'agit de les établir préventivement et que le terrain est à peu près homogène. Cependant, quelques circonstances, fixent la position d'un certain nombre d'entre elles.

a) Si en arrière de la tranchée, à une distance pouvant aller jusque 100 et même 200 m, on remarque une cuvette plus ou moins prononcée à la surface du sol, il ne faut pas hésiter à placer en face une ou plusieurs pierrées et à leur donner des dimensions et une longueur un peu plus forte.

b) Autant que possible, une source à fleur de sol ne sera pas jetée dans une pierrée, mais conduite par un petit tuyau souterrain étanche jusqu'au talus pour la faire déboucher dans une descente maçonnée. A proximité, on établira une pierrée pour le cas d'accident au tuyau.

c) Il convient enfin de placer une pierrée au centre d'un éboulement qui s'est déjà produit.

Pierrées longitudinales. — En règle absolue, il importe de ne jamais établir de pierrées longitudinales, parallèles à l'axe de la tranchée. Elles donnent lieu, dans bien des cas, à des éboulements qui se détachent précisément à leur aplomb. Nous avons vu ce fait se produire souvent sous nos yeux.

En voici la raison. Un tel ouvrage recueille une grande quantité d'eau puisqu'il barre le chemin aux eaux souterraines. Dès lors, pour peu que celles-ci ne puissent facilement s'écouler soit à cause de la pente du fond de la pierrée qui est généralement faible, soit à cause d'une obturation partielle, soit par suite d'une dislocation, soit pour tout autre motif,

elles quittent la pierrée, cheminent à nouveau à travers le sol naturel, ramollissent le banc de glissement, engendrent de fortes pressions et déterminent des éboulements beaucoup plus importants que les éboulements naturels parce que, sur un ou plusieurs points, l'effet de la pierrée aura contribué à accumuler un fort volume de liquide.

Cependant, dans un cas spécial où l'écoulement de pierrées transversales ne pouvait être réalisé qu'à grands frais, nous avons établi une pierrée longitudinale à quelques mètres en arrière de la crête de la tranchée, mais nous avons pris la précaution de la faire descendre plus bas que le plafond et d'en permettre la visite par l'établissement de puisards.

Exécution des pierrées. — Au regard de l'exécution, et c'est là un avantage considérable sur le mur de soutènement, les pierrées peuvent suivre de très près l'ouverture de la tranchée et dès que les fouilles sont terminées leur effet est total même avant leur constitution propre. Il est donc souvent inutile de faire une exécution préventive. Cependant, dans deux cas différents, nous avons dû installer des pierrées avant l'ouverture complète de la tranchée, pierrées qui passaient sous le plafond de celle-ci et dont nous avons assuré le fonctionnement à l'aide d'épuisements par machines à vapeur pendant tout le temps que l'écoulement n'a pu être naturel. Mais ces cas sont exceptionnels.

Elasticité du système des pierrées transversales. — Le système des pierrées transversales présente aussi une grande élasticité au point de vue des erreurs commises. Si l'on s'aperçoit à un moment donné que leur écartement est trop considérable, que le drainage du sol est incomplet, rien ne s'oppose à ce que l'on en intercale de nouvelles. Cela constitue un avantage très important que ne possèdent pas les murs de soutènement dont on ne peut plus augmenter l'épaisseur dès qu'ils sont établis.

Cloisonnement du sol. — Les pierrées transversales du fait de leur établissement partagent le terrain qu'elles traversent

en tranches bien définies, elles cloisonnent le sol. Si un éboulement se manifeste malgré leur établissement, il est limité par deux pierrées consécutives et ne peut prendre une grande amplitude. Ajoutons que ces éboulements, qui surviennent après la consolidation, sont excessivement rares et doivent être attribués à un manque d'étude sérieuse du projet. La réussite est toujours complète si l'on a bien envisagé la nature du sol de la tranchée et de ses abords, si l'on a convenablement reconnu la position des nappes souterraines, si en un mot, les détails du projet ont été bien raisonnés.

Revers. — Les revers que l'on établit souvent à la crête des tranchées pour empêcher les eaux pluviales de se répandre dans les talus et les dégrader, de même que les chemins latéraux qui, par leurs ornières, retiennent aussi les eaux de ruissellement, constituent deux causes fréquentes d'éboulements. Les eaux pluviales qui, grâce à ces causes, peuvent s'accumuler en longues lignes en bordure de la crête des talus, sont à même de pénétrer dans le sol, de le ramollir, de déterminer des bancs de glissement et finalement des éboulements. Il convient de prendre à leur égard des mesures spéciales. Non seulement on proscriera les revers, mais on ne limitera pas les chemins latéraux par des fossés et en outre on régularisera le sol pour éviter la stagnation des eaux. Cette dernière mesure se poursuivra pendant la période d'entretien.

§ 2. — Cas d'une tranchée complètement argileuse.

Application des pierrées transversales. — Ce que nous avons dit, dans l'examen des cas précédents, au sujet des divers modes de consolidation s'applique encore avec plus de force ici en raison de l'ignorance absolue au sujet de la position du plan de glissement, de l'importance des masses ébouleuses, de l'intensité des forces en jeu, etc. Le mur de soutènement en maçonnerie ne soutient pas l'examen. La pierrée transversale permettra toujours de réaliser le mur de soutènement en

terre. C'est cette dernière qui paraît devoir être employée exclusivement.

Profondeur des pierrées. — Elle doit être celle de la tranchée, à moins de circonstances nettement indiquées par le sol comme la présence d'un filon de sable dans la masse à la faveur duquel les eaux circulent. Quand elles ne descendent pas jusqu'au fond, il peut se produire des bancs de glissement placés plus bas et elles sont entraînées avec l'éboulement. Nous avons vu maintes fois ce cas se produire.

C'est ici le lieu de faire remarquer combien les consolidations de ces sortes de tranchées exigeront de sacrifices pour peu qu'elles aient une profondeur moyenne importante et combien il importe de tenir compte de cette circonstance dans l'étude du projet de tracé et de terrassements.

Ecartement des pierrées. — L'écartement ne doit pas être très grand, car la circulation des eaux est pénible dans ces sortes de terrains et celles-ci doivent trouver à proximité un écoulement facile. Nous pensons qu'on ne peut guère dépasser 20 m. Ici encore apparaît l'élasticité du système des pierrées. On est souvent tenté, pour éviter la dépense, de donner un écartement un peu trop fort. Dans ce cas, si un éboulement indique l'insuffisance de la consolidation, on peut facilement intercaler de nouvelles pierrées.

Longueurs des pierrées. — Comme dans le premier cas et pour les mêmes raisons, les pierrées doivent déborder la crête de la tranchée de la demi-profondeur de celle-ci augmentée du quart de l'écartement.

Répartition des pierrées. — Mêmes règles à suivre que dans le premier cas.

Drainages superficiels. — Dans ces terrains entièrement argileux à la surface desquels les eaux de pluie ruissellent en abondance, nous conseillons de drainer, par un drainage ordinaire, avec des tuyaux en poterie rouge de 0,05 m à 0,10 m de diamètre placés à 1 m ou 1,20 m de profondeur, une zone

de 50, 100 et même 200 *m.* de largeur en arrière de la crête de la tranchée, mais avec les précautions suivantes.

a) Les collecteurs seront tous normaux à l'axe de la tranchée.

b) Sur les 15 derniers mètres de leur parcours, ils seront constitués par un tuyau étanche et ne recevront aucun drain secondaire.

c) Ils seront placés à l'aplomb ou dans le voisinage d'une grande pierrée.

d) Ils déboucheront directement dans les talus dans des descentes maçonnées à mortier.

e) Les drains secondaires seront disposés en chevrons à 45° par rapport aux collecteurs.

Le prix à l'hectare est de 400 à 500 *fr.*, soit 3 à 5 *fr.* par mètre linéaire de talus.

Un tel drainage n'est pas toujours possible à établir en raison des exigences des propriétaires riverains, mais il est bon de le faire quand on le peut.

Modifications à apporter aux pierrées. — Le drainage superficiel d'une zone aussi importante conduit en général à un système spécial pour l'établissement des pierrées. Ne circuleront plus dans l'intérieur du sol que les eaux qui étaient déjà à plus de 1,20 *m.* de profondeur au moment où elles arrivaient à la limite extérieure de la zone drainée. Comme la circulation des eaux a lieu sous l'action de la pesanteur, celles-ci s'enfonceront davantage dans la traversée de ladite zone et gagneront le talus avec un abaissement notable, variable avec la consistance du sol. Dès lors, si l'on établit des grandes pierrées transversales en galeries souterraines de 2 *m.* à 2,50 *m.* de hauteur avec plafond à quelques décimètres au-dessus de la plateforme et en rampe de 4 ou 5 *cm.* par mètre, on est à peu près sûr de capter la totalité des eaux intérieures, même dans des tranchées de grande hauteur.

Nous devons ajouter que nous n'avons pas eu occasion d'appliquer ce procédé sur une grande échelle mais nous

l'avons employé dans un cas spécial et restreint et il a réussi à souhait au point de rendre les grandes pierrées presque inutilés .

Autres cas. — Les autres cas sont des variantes des deux précédents et les règles qui leur sont applicables sont les mêmes.

Résumé. — En résumé, le système, à peu près infallible (il ne nous a jamais fait défaut dans les travaux que nous avons exécutés) pour consolider une tranchée argileuse, consiste dans l'établissement de grandes pierrées, normales à la direction de l'axe de la tranchée dans les conditions ci-dessus définies.

Nous pourrions citer une foule d'exemples probants en faveur de notre conclusion. Mais chacun d'eux est une espèce adaptée à la situation rencontrée et dans chacun desquels on retrouve les principes généraux que nous avons exposés.

C'est à l'ingénieur de se pénétrer de ces principes, de les méditer et d'en faire une application raisonnée dans chaque cas particulier. Le succès est assuré.

CHAPITRE II

CONSOLIDATION DES REMBLAIS ARGILEUX

I. — CONSIDÉRATIONS SUR LES ÉBOULEMENTS DES REMBLAIS ARGILEUX.

Propriétés des terres argileuses. — Pour bien comprendre les origines des éboulements des remblais argileux, il est indispensable de connaître quelques propriétés des terres de cette nature :

a) Les terres argileuses en bancs naturels sont généralement imperméables, c'est-à-dire que mises en contact avec de l'eau elles ne s'en imprègnent pas immédiatement et également.

b) Si le contact avec l'eau n'est qu'accidentel, la surface seule se mouille et, par frottement, devient extrêmement savonneuse.

c) Si le contact avec l'eau se prolonge, elles finissent par prendre une certaine quantité d'eau de constitution, augmentent de volume et se laissent facilement molasser.

d) Une motte pétrie à la façon des terres à briques (qui ne sont qu'une variété des terres argileuses), puis exposée à l'air, perd à la longue son eau de constitution et durcit avec rétrécissement.

Il est clair que ces propriétés se présentent avec des degrés différents et variables avec la nature même des terres argileuses. On sait, en effet, que d'un point à l'autre, la composition de ces terres présente des différences notables.

Causes des variations de la nature des remblais. — Les remblais sont constitués par des terres provenant des tranchées ou des emprunts.

La constitution des remblais exécutés avec des terres argileuses variera avec :

- a) La nature intime de ces terres ;
- b) Le degré d'humidité qu'elles renferment au moment de la mise en remblai ;
- c) Les variations atmosphériques qui se produisent pendant l'exécution de l'ouvrage ;
- d) Le mode d'emploi de ces terres dans les remblais.

Influence de la nature des terres. — Il n'est guère besoin d'insister sur l'influence de la nature intime des terres de chaque remblai. Chacun sait que l'échelle de la composition des terres dites argileuses présente une amplitude considérable : depuis la terre renfermant une proportion de 30 à 40 0/0 d'argile jusqu'à celle qui en renferme 80 et même 90 0/0. Il est clair que, suivant la composition de la terre argileuse, le remblai se comportera différemment, aura des propriétés variables, comme sont variables les propriétés de la terre elle-même.

Influence du degré d'humidité. — Le degré d'humidité des terres joue, dans l'établissement du remblai, le rôle prépondérant au point de vue de sa constitution intime. Si la terre argileuse provient d'un banc sec ou renfermant peu d'humidité, elle est divisée en petites masses assez analogues à celles d'un tas de moellons de petit échantillon qui ont pris naissance sous la pioche du terrassier. Portée au remblai, elle présentera donc aussi la constitution physique d'un tas de pierres toutes venantes avec ses vides, ses arc-boutements et ses talus extérieurs.

Si, au contraire, la terre argileuse provient d'un banc très humide, si en outre elle est extraite par un temps pluvieux, elle se présente dans le véhicule sous forme de pâte plus ou moins molle, quelquefois presque liquide. Versée au remblai, elle conservera ces mêmes caractères ; masse pâteuse qui sou-

vent ne peut porter le poids d'un homme et qui s'étale sur de grandes surfaces au fur et à mesure de l'apport de nouvelles terres. †

Entre ces deux cas extrêmes se placent naturellement une multitude de variantes intermédiaires.

Par expérience directe, nous avons pu constater que certaines terres argileuses peuvent retenir jusqu'à 50 o/o de leur poids d'eau de constitution.

Influence des variations atmosphériques. — L'influence des variations atmosphériques se fera sentir au cours de l'exécution du remblai et tendra à faire varier constamment le degré d'humidité et, par voie de conséquence, la constitution. Tel remblai en cours, exécuté jusqu'alors dans des conditions de sécheresse, sous l'influence d'une pluie prolongée, peut devenir fluent et les talus passer d'une forte inclinaison à une pente plus douce. La gelée persistante, si l'on continue le travail quand même, aura les plus désastreux effets lors du dégel.

Influence du mode d'emploi des terres. — Enfin, le mode d'emploi des terres au remblai a aussi une grande importance. Si l'on se contente, comme cela arrive trop souvent, de verser d'abord les terres en avant pour former un noyau destiné à soutenir la voie, puis en élargissement à droite et à gauche et quelque temps après, on obtient une masse de terre présentant, sur les talus du noyau central, des plans de clivage d'autant plus à craindre qu'entre la pose du noyau et la formation du remblai d'élargissement il se sera écoulé un temps plus long et que les variations atmosphériques auront été plus intenses.

Si au contraire, au pied de la décharge, on reprend les terres à la brouette pour les disposer, sur toute la largeur du remblai, par couches horizontales successives, on obtient une masse plus homogène et débarrassée des deux plans de clivage dont il est parlé ci-dessus.

Si, enfin, on pilonne chaque couche horizontale, on cons-

titue un remblai avec un peu de vides et moins susceptible de tassements ultérieurs.

Ces mains-d'œuvre paraîtront devoir coûter cher, mais un simple calcul montrera que dans la plupart des cas, elles sont moins onéreuses que les consolidations elles-mêmes si des éboulements se produisent.

Influence des remblais argileux sur les prix des terrassements. — Les remblais argileux coûtent toujours cher quoiqu'on fasse. Bien souvent il serait avantageux et économique de mettre en dépôt les terres argileuses pour les remplacer par des remblais en bonne nature. Mais on n'a pas toujours sous la main de la bonne terre et l'ingénieur est forcé de se résigner. C'est alors que les mains-d'œuvre préventives, dont nous parlions tout à l'heure, corrigent ce qu'ont de mauvais les terres argileuses.

En tout cas, lors des études des projets, on doit faire entrer en ligne de compte les mains-d'œuvre supplémentaires et en général les travaux propres à assurer la stabilité de l'ouvrage.

Etude des remblais. — Voilà donc notre remblai en terre argileuse :

- a) Masse sèche avec grandes cavités et mottes très dures ;
- b) Ou masse humide et molle ;
- c) Ou masse d'une constitution intermédiaire aux deux précédentes.

Comment va-t-il se comporter ?

Pour examiner cette question, nous étudierons les deux cas extrêmes qui présentent une matière plus nette au raisonnement et auxquels d'ailleurs peuvent se rapporter les cas intermédiaires.

§ 1. — Remblai constitué par des mottes sèches.

Apparence physique. — Prenons un remblai composé de mottes argileuses sèches. En apparence, il se présente comme un tas de moellons de petit échantillon, avec des talus rugueux,

de grands vides, des talus inclinés à un de base pour un de hauteur environ. Il semble d'une stabilité à toute épreuve, mais ce n'est qu'une apparence.

Action de la pluie. — Vienne une pluie sérieuse, celle-ci tombera à la surface du remblai et pénétrera à l'intérieur à la faveur des vides. Immédiatement, toutes les propriétés de l'argile au contact temporaire de l'eau se manifesteront.

- a) Humidification des surfaces des mottes ;
- b) Ramollissement de ces surfaces ;
- c) Légers gonflements.

Les arêtes presque vives des mottes s'émuelleront. La pesanteur aidant, elles s'écraseront. Les mottes elles-mêmes se mettront en mouvement. Ce mouvement engendrera à son tour une infinité de petites surfaces glissantes de mottes sur mottes. Ces déplacements élémentaires se produiront dans tous les sens et donneront lieu à un mouvement général de la masse qui sera leur résultante. Après quoi s'établira un nouvel équilibre.

L'ensemble du résultat, lorsque l'effet de la première pluie sera complet, se présentera sous les formes suivantes :

- a) La plate-forme du remblai se sera affaissée, conséquence du nouvel équilibre dont la pesanteur est le principal facteur ;
- b) Les mottes se seront arrondies, conséquence de l'humidité et de la pesanteur ;
- c) Les vides intérieurs auront diminué de volume ;
- d) L'inclinaison des talus se sera adoucie, c'est-à-dire que le pied de ces talus aura progressé ;
- e) Le contour du profil en travers aura changé et sa surface aura diminué ;
- f) La masse totale aura acquis dans son ensemble un plus grand degré d'humidité ;
- g) Sur quelques points, des éboulements auront apparu.

On conçoit d'autre part que ces effets seront d'autant plus sensibles que la pluie aura eu une plus grande durée.

Il n'est pas rare d'ailleurs de voir les mouvements élémen-

taires désordonnés dont nous parlions plus haut prendre une vigueur considérable, une sorte d'accélération se traduisant par d'importants éboulements des talus et un étalement des terres. Les éboulements glissent la plupart du temps sur les deux plans de clivage qu'a formés la confection du remblai par avancement et par élargissement.

Donc, la première pluie modifiera profondément le profil normal du remblai en abaissant sa plateforme, en adoucissant ses talus, en dominant sa surface et en créant des lignes de rupture. C'est un nouveau profil d'équilibre.

Rechargements immédiats. — On remarquera de suite que la modification du profil exige, pour lui rendre sa plateforme primitive tant en altitude qu'en largeur, un rechargement avec des terres nouvelles. Ce rechargement, si on l'opère de suite, constituera une surcharge du remblai. Sous l'action de ce nouveau poids, l'équilibre précédent déjà peu stable se trouvera rompu et les mouvements recommenceront, nouvel abaissement de la plateforme, nouveau rechargement, nouvelle rupture d'équilibre, et ainsi de suite.

Il est vrai que ces phénomènes diminuent en général d'amplitude au fur et à mesure qu'ils se répètent, au fur et à mesure que le remblai se contracte, mais il n'en ressort pas moins de l'exposé ci-dessus que les rechargements immédiats exécutés au fur et à mesure des tassements constituent un travail de longue haleine maintes fois abandonné et repris.

Mieux vaut donc ne pas recharger de suite et attendre si l'on a du temps devant soi, ou bien procéder à des consolidations ainsi qu'il sera expliqué plus loin.

Action des pluies ultérieures. — Il ne faut pas croire que la forme nouvelle qu'a prise le remblai sous l'action de la première pluie soit elle-même définitive, même sans rechargement immédiat. Le nouveau remblai est loin d'être stable : il renferme encore des mottes, des vides, il n'est pas compact, ni d'une humidité constante dans toutes ses parties.

Une seconde pluie le pénétrera à nouveau, ramollira la

nouvelle surface de ses mottes, provoquera de nouveaux glissements des mottes les unes sur les autres, diminuera les vides, abaissera la plateforme, adoucira l'inclinaison des talus et dans bien des cas engendrera des mouvements brusques qui, ainsi que nous l'avons expliqué plus haut, se traduiront par des éboulements. Il s'établira finalement un nouvel équilibre répondant à la nouvelle constitution de la masse.

Durée des mouvements. — Ces phénomènes se produiront ainsi pendant de longues années. Nous avons vu et nous connaissons des remblais argileux qui, exécutés depuis quinze, vingt et même trente ans, n'ont pas encore atteint un équilibre définitif.

De même, l'amplitude des glissements atteint parfois des dimensions invraisemblables. Nous avons mesuré fréquemment des avancées de terre allant jusqu'à 30 m pour des remblais de 8 à 10 m de hauteur.

Forme des éboulements. — Comme pour les tranchées, les masses éboulées se détachent et glissent suivant une surface dont le profil en travers est une sorte de cycloïde. A la partie supérieure, le départ de cette cycloïde se fait souvent suivant la ligne de séparation du massif central et des élargissements, de sorte que quand les éboulements se produisent des deux côtés à la fois et en face les uns des autres, la partie immobile n'est autre que tout ou partie du noyau central et constitue une sorte de prisme triangulaire présentant une arête vive au niveau de la plateforme du remblai.

A sa base, la cycloïde est tangente au terrain naturel ou se dessine dans la masse même du remblai sans toucher le sol, mais en restant sensiblement parallèle à ce dernier.

L'éboulement ne règne généralement pas sur toute la longueur du remblai. Il affecte en plan, comme celui des tranchées, la forme d'un arc de cercle dont la concavité est tournée vers l'extérieur. Quelquefois l'arc de cercle est entièrement compris dans le talus, plus souvent il mord de quelques décimètres dans la plateforme, plus rarement il dépasse l'axe du

remblai. Le rayon de cet arc est très variable d'un éboulement à l'autre.

Les éboulements secondaires, c'est-à-dire en arrière d'un éboulement primitif, sont très rares, et cela se conçoit aisément d'ailleurs; il suffit de le faire remarquer.

Conditions de l'équilibre définitif. — Nous avons fait observer qu'il faut un très long temps si on laisse la nature agir seule pour obtenir une stabilité suffisante.

Examinons de plus près cette question.

Quelles sont les conditions de l'équilibre définitif? Elles sont au nombre de quatre.

a) La masse argileuse doit avoir acquis le degré d'humidité qui convient à sa nature;

b) Elle doit être compacte comme un banc naturel, c'est-à-dire ne pas renfermer de vides;

c) Sa surface doit être imperméable.

d) Enfin ses talus doivent avoir une inclinaison convenable.

Or, partant d'un remblai sec composé de mottes dures, renfermant beaucoup de vides, ayant peu d'humidité et possédant des talus raides, on conçoit qu'il faille un très long temps pour réaliser les quatre conditions ci-dessus, que ces conditions ne peuvent être obtenues que par des mouvements importants de la masse et qu'enfin on peut toujours penser que des mouvements se produiront pendant des mois et des années.

Quand on a sous les yeux les propriétés des terres argileuses, il est facile de se rendre compte de ce qui suit.

L'ensemble des mottes sèches ne prendra que peu à peu l'humidité convenable puisque la terre argileuse se laisse difficilement pénétrer: il faudra des pluies nombreuses.

Pour que cette masse devienne compacte et ne renferme plus de vides, il est indispensable que les diverses mottes se soient plusieurs fois écrasées les unes sur les autres, qu'elles se soient accolées fortement, puis pénétrées, ce qui exige un temps fort long et l'apport de l'eau en quantité suffisante pour réaliser ces phénomènes.

La surface des talus primitivement rugueuse comme celle d'un tas de pierre, percé de trous à la façon d'une écumoire ne prendra une imperméabilité suffisante qu'autant que les actions atmosphériques auront convenablement agi.

Enfin, les talus primitivement inclinés à 45° ou au plus à 5 de base pour 4 de hauteur et qui, pour l'équilibre définitif, doivent atteindre une inclinaison de 2 de base pour 1 de hauteur et même souvent $2\frac{1}{2}$ pour 1, auront à subir des déformations nombreuses avant d'avoir acquis cette dernière pente. On peut même ajouter que d'une façon générale ces déformations ne pourront s'effectuer sans éboulements de la masse.

Prévision des éboulements. — Où, quand et comment un éboulement se produira-t-il? L'exposé qui précède montre d'une façon indiscutable que l'on ne peut répondre à cette question, puisque l'éboulement est la résultante de mouvements élémentaires totalement inconnus dans leurs intensités et dans leurs directions.

Peut-on au moins savoir à l'avance la forme définitive du profil du remblai au moment de l'équilibre stable? A la rigueur, on pourrait peut-être préjuger de la surface absolue de ce profil quand les vides auront disparu. Mais quant à son contour, on ne le peut pas. Conservera-t-il la forme d'un trapèze? Sa base doublera-t-elle? triplera-t-elle? De combien s'abaissera la plateforme? Quelle sera la nouvelle inclinaison des talus? Toutes questions qui ne sont pas susceptibles de solutions.

Notre remblai est donc une profonde inconnue et c'est ce qui explique les échecs subis à maintes reprises dans les travaux de consolidation de ces sortes d'ouvrages.

Le malheur est, qu'en général, ce remblai abandonné à lui-même restera pendant longtemps une masse indéchiffrable, dangereuse et impropre aux besoins qui ont fait décider son établissement.

§ 2. — Cas d'un remblai mou

Constitution. — Examinons maintenant le cas d'un remblai exécuté par mauvais temps avec des terres argileuses mouillées.

Le plus souvent il constitue une masse pâteuse ou voisine de la consistance pâteuse.

On a beaucoup de peine à donner à sa plateforme la largeur et l'altitude prévues.

Il a fallu, à cause de l'étalement des terres et de la faible inclinaison de ses talus, doubler, tripler le volume prévu, c'est-à-dire faire des sacrifices considérables en argent.

Bien souvent, même le plus souvent, malgré les sacrifices consentis on n'a pu réaliser la plateforme désirée.

Il a fallu suspendre les travaux et aviser.

Nous avons vu le cas se produire à maintes reprises au cours de nos travaux.

Si l'on examine cette masse au point de vue des qualités qu'elle doit avoir pour être stable, on trouve que sur quatre conditions elle satisfait à trois : elle est compacte et ne renferme généralement pas de vides, sauf quelques petites poches remplies d'eau de pluie ; la surface est lisse et assez imperméable ; enfin les talus ont une inclinaison plus douce que celle que la stabilité exige.

La seule condition qu'elle ne remplit pas c'est que sa teneur en eau est trop considérable et lui enlève tout pouvoir de résistance. Nous avons constaté des teneurs en eau de 40 et même 50 o/o du poids de la terre desséchée. C'est un excès d'eau qui occasionne un changement d'état de la terre argileuse et d'un corps suffisamment résistant en fait un corps presque fluide.

Influence des années. — Si l'on attend l'effet de la nature pour la dessiccation suffisante du remblai, il faudra de longues années. Le propre de l'argile, de même qu'elle se laisse diffi-

cilement pénétrer par l'eau, est aussi d'abandonner difficilement l'eau qu'elle retient, car cette eau, en quelque abondance qu'elle soit, est une eau de constitution.

Un tel remblai abandonné à lui-même ne changera plus de forme sous les influences atmosphériques, il s'améliorera même à la longue sans qu'aucun éboulement se produise. Mais avant qu'on puisse le recharger si besoin est ou le mettre en service, il faudra attendre qu'il ait perdu son eau surabondante sous la seule influence de la pesanteur agissant sur les molécules liquides pour les entraîner à la base puis dans le sol, il faudra de longs mois et parfois de longues années à moins que la main de l'homme n'intervienne pour forcer la nature.

Autres cas. — Entre les deux cas extrêmes que nous venons d'étudier se placent naturellement une multitude de variantes. Parfois un même remblai comporte plusieurs de ces variantes : on conçoit en effet que le changement de la nature de la terre au déblai, les variations atmosphériques, le changement de la méthode de décharge et d'emploi, etc., sont autant de causes qui, d'un point à l'autre, modifient la constitution intime de la masse.

Renseignements à prendre en cours d'exécution. — Quand on s'est résigné à employer des terres argileuses en remblai, il est indispensable de s'entourer des renseignements suivants :

a) Graphique indiquant à sa place exacte dans le remblai le volume employé dans une journée.

b) Prélèvement, chaque jour, de plusieurs échantillons de 1 kg de terre moyenne que l'on fera sécher au four pour obtenir la teneur en eau.

c) Indication aussi approchée que possible de la nature de la terre.

d) Indication des variations atmosphériques journalières, Muni de ces données, l'ingénieur sera renseigné sur les points les plus faibles de l'ouvrage. Il possédera une sorte d'échelle comparative des diverses natures de la constitution du remblai

qui lui sera d'un grand secours si des éboulements se produisent.

II. — MÉTHODES DE CONSOLIDATION DES REMBLAIS ARGILEUX.

Méthodes diverses employées. — Les méthodes et les systèmes employés pour arrêter les remblais ébouleux ont été plus nombreux et plus variés que pour la consolidation des tranchées. Nous avons vu mettre en œuvre :

a) Les murs de soutènement en maçonnerie à mortier contournant la base des masses ébouleées en vue de les retenir.

b) Les pierrées superficielles pour enlever les eaux de surface assez fréquentes sur les masses en mouvement.

c) Les pierrées profondes pour assécher.

d) Les pierrées longitudinales pour drainer les terres en mouvement et en même temps opposer une force de résistance.

e) Les pilots et vannages en bois fonctionnant comme murs de soutènement.

f) Sous le remblai, préventivement, un quadrillage de petits drains à pierre sèche :

g) Au pourtour du remblai, un vaste fossé dont le vide était destiné à recueillir les vases liquides ou molles et dont les terres retroussées étaient destinées à arrêter le mouvement de progression.

h) Les rechargements à outrance.

i) Les enlèvements partiels des terres mauvaises et leur remplacement par de bonnes terres, etc.

k) Souvent, sur un même remblai, plusieurs des moyens précédents.

Cette énumération, longue et incomplète indique nettement que les éboulements des remblais présentent quelque chose de plus redoutable que ceux des déblais et que l'ingénieur qui voit céder le pied des talus, improvise souvent un moyen peu étudié pour les consolider de suite.

Quiconque a suivi de près ces sortes de travaux connaît les difficultés rencontrées dans leur exécution au milieu des terres boueuses et l'embaras dans lequel on se trouve en présence de l'insuccès des moyens employés.

Dans bien des circonstances, les efforts ont été vains : les murs de soutènement et les vannages-en bois ont été surmontés par le flot boueux sinon renversés, les pierrées superficielles emportées sur le dos de l'éboulement, les pierrées plus profondes disloquées, les pierrées longitudinales renversées et noyées dans les terres fluides, etc.

Difficultés de la consolidation. — Le problème de la consolidation des remblais est difficile à résoudre. Il faut arriver à obtenir l'équilibre d'une masse argileuse dont souvent on ne connaît pas bien la constitution et la nature intime.

Conditions d'équilibre. — Nous avons déjà indiqué et nous croyons devoir rappeler les quatre conditions que doit remplir un remblai argileux pour avoir un équilibre stable.

a) La masse argileuse doit avoir acquis le degré d'humidité qui convient à sa nature ;

b) Elle doit être compacte comme un banc naturel, c'est-à-dire ne pas renfermer de vides ;

c) La surface extérieure doit être imperméable à l'humidité ;

d) Enfin, les talus doivent avoir une inclinaison convenable.

Natures diverses des remblais. — D'autre part, les remblais, loin d'avoir dès le début ces caractères bien définis, se présentent sous une infinité de formes qui s'en éloignent souvent beaucoup depuis la masse sèche, en mottes dures avec talus raides et vides considérables, jusqu'à la masse molle, sans vides, avec talus adoucis et excès d'eau.

Nécessité des précautions préventives. — Comme il est difficile après coup de changer la nature d'une masse de terre, il est indispensable que l'ingénieur, qui se voit contraint d'employer en remblai des terres argileuses, prenne soit avant exécution, soit au cours de l'exécution de l'ouvrage un certain

nombre de précautions en vue de se rapprocher des conditions d'équilibre. Ces précautions exigeront une certaine dépense, mais celle-ci sera moins élevée que s'il s'agissait de faire le même travail après exécution du remblai. C'est ici plus qu'en tout autre circonstance qu'il convient d'aider la nature.

Comme nous l'avons déjà fait antérieurement, nous examinerons les deux formes extrêmes sous lesquelles se présentent les remblais.

§ 1. — Cas d'un remblai composé de mottes sèches.

Travaux préventifs. — Dans le cas de remblais que la décharge apporte sous forme de mottes sèches, des précautions primitives s'imposent.

a) Il convient de reprendre les terres au pied de la décharge avec des brouettes, de les disposer par couches horizontales de faible épaisseur, de les pilonner, au besoin de les arroser légèrement pour aider au pilonnage. La dépense sera de 0,50 fr à 1 fr par mètre cube de terre remaniée, mais elle aura pour effet d'avoir fait faire un grand pas vers la stabilité et d'avoir procuré une bien plus grande économie sur les travaux ultérieurs.

b) Il importe aussi au premier chef de disposer la largeur de la base de façon que les talus aient une inclinaison de 2 de base au moins pour 1 de hauteur, inclinaison convenable pour la plupart des terres argileuses.

c) Autre précaution indispensable. Dans le cas où le terrain naturel qui doit recevoir le remblai est en pente suivant une normale à l'axe du remblai, il convient non seulement de le ramener à l'horizontale, mais même si c'est possible de lui donner une petite pente en sens inverse.

d) Une bonne mesure encore est de creuser dans le sol des fossés longitudinaux distants de quelques mètres pour agraffer et souder le remblai au terrain naturel. Ces fossés n'empêchent pas l'essartage du sol. Les terres provenant de ces divers

terrassements sont reportées en cordons sur le pourtour du futur remblai pour constituer une sorte de petite digue.

e) Après exécution du remblai, les eaux qui circulent au fond de la vallée sont soigneusement recueillis dans des fossés de ceinture qui les conduisent aux aqueducs.

f) Ne pas négliger les plus petits détails, car ils conduisent à la stabilité de l'ouvrage et au succès.

Inconvénients de l'absence de travaux préventifs. — Bien souvent, on ne prend aucune précaution et l'on exécute les remblais argileux comme des remblais en bonne terre. Nous avons déjà vu ce qui se passe. Tout d'abord la masse est partagée en trois parties accolées longitudinalement: celle du centre a été formée par la décharge à l'avancement, les parties latérales proviennent de la décharge par côté. Puis il se produit sous l'action des pluies des tassements successifs avec accompagnement d'éboulements et ces phénomènes se poursuivent pendant un temps illimité.

Méthode de consolidation. — C'est la compacité et l'humidité qui manquent principalement. Faut-il attendre les pluies et les tassements? Une méthode rationnelle permet de hâter la stabilité définitive. Elle consiste:

a) A introduire dans la masse un élément d'aération qui apporte en même temps une humidité bienfaisante;

b) À diviser cette masse pour limiter l'amplitude des éboulements s'il s'en produit.

Elle est réalisée par de grandes pierrées transversales reposant sur le terrain naturel dans lequel elles sont légèrement encastrées pour éviter leur dislocation au cas où des mouvements se produiraient, traversant de part en part la base du remblai et ayant une hauteur de 1,80 m à 2,50 m.

Effets des pierrées. — Les pierrées ainsi établies à l'aide de boisages produisent les effets suivants:

a) L'air qui y circule lentement apporte sur le pourtour de la pierrée une humidité qui pénètre peu à peu dans la masse

pour lui rendre une consistance moins sèche et la gonfler légèrement.

b) Au moment des pluies, ces mêmes pierrées font un appel énergique de l'eau, l'attirent rapidement et empêchent un contact prolongé avec l'argile. La pluie agit alors comme un léger arrosage pour donner à la terre un petit accroissement d'humidité. Les tassements qui suivent sont moins violents et les éboulements moins à craindre.

c) En cas d'éboulements, ceux-ci sont limités à deux pierrées consécutives.

d) Le résultat final est une transformation continue de la masse sans mouvements brusques permettant les rechargements partiels mais modérés de façon à maintenir à la plateforme son altitude et sa largeur. C'est une introduction lente d'humidité et une diminution progressive des vides. C'est la marche continue, sûre et assez rapide vers la réalisation des deux premières conditions de la stabilité d'un remblai argileux.

Travaux accompagnant les pierrées. — Concurrément avec l'établissement des grandes pierrées transversales, il conviendra d'élargir la base du remblai de façon à donner aux talus une inclinaison de 2 de base pour 1 de hauteur. On conçoit en effet que si l'on n'exécute pas ce travail par la main de l'homme les éboulements s'en chargeront. Il n'y a, en effet, que ces deux procédés pour passer d'un talus raide à un talus doux. Si l'on a pris soin de donner à la plateforme une sur largeur correspondante au volume nécessaire pour obtenir cette pente, il suffira de reprendre les terres en excès dans la partie haute pour les placer au pied en ayant soin de les disposer par couches horizontales pilonnées.

Si l'on n'a pas de terres à portée pour établir le talus, il n'y a pas à hésiter, il faut en chercher. Dans ce cas, mieux vaut apporter de la terre non argileuse.

Ces diverses mesures auront généralement un résultat complètement efficace et empêcheront les éboulements.

Ecartement des pierrées. — Les pierrées sont d'autant plus

efficaces qu'elles sont plus rapprochées et plus volumineuses. Une distance de 10 m est cependant un minimum. Une distance de 20 m est fort convenable. Un plus grand écartement aurait des résultats incertains.

Hauteur des pierrées. — La hauteur sera voisine du tiers de celle du remblai avec minimum de 1,80 m à 2 m et maximum de 3 m.

Résumé. — Pour cette catégorie de remblais, il convient donc en général :

a) De faire usage de moyens préventifs qui suffiront dans beaucoup de cas ;

b) Si l'on n'a pris ces précautions, d'établir des pierrées transversales et de restituer les talus à 2 de base au moins pour 1 de hauteur.

c) Parfois même d'unir l'action des pierrées et celle des travaux préventifs.

§ 2. — Cas d'un remblai mou.

Remblai mou. — Nous l'avons déjà défini : c'est celui qui provient d'une tranchée argileuse très humide, sinon mouillée et qui est exécuté par la pluie. Il s'étale à la manière d'une pâte molle. Mieux vaudrait à coup sûr porter de telles terres au dépôt. Mais parfois on n'est pas libre du choix.

Précautions préventives. — Si l'on est contraint de constituer des remblais avec de pareilles terres, il est indispensable, si rien ne s'y oppose, de prendre quelques précautions soit pendant, soit avant l'exécution.

a) La pente du sol naturel qui doit servir d'assiette au remblai sera annulée ou même renversée dans le sens perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage.

b) A la décharge, les terres fluides seront reprises, étalées par couches de 0,15 m sur une grande surface, puis pilonnées légèrement pour faire refluer l'eau et enfin abandonnés à elles-mêmes pendant quelques jours si c'est possible. On peut sou-

vent arriver à ce résultat par une disposition judicieuse du chantier. Par le soleil et le vent, ces couches se dessèchent ou tout au moins abandonnent une bonne partie de leur humidité avant que d'autres leur soient superposées. Nous avons employé avec plein succès ce procédé très simple.

c) Entre deux couches ainsi formées, il est bon, d'intercaler une couche plus mince, à la rigueur, formée par les terres les plus sèches provenant de la tranchée. C'est encore une précaution que l'on peut prendre toujours parce que dans une tranchée on rencontre toujours du terrain plus sec. C'est une question de soin. Nous avons obtenu les meilleurs résultats de cette façon de procéder qui est surtout minutieuse.

d) Dans les régalages des terres, ne pas craindre de donner aux talus une inclinaison de deux et demi de base pour un de hauteur. Cette inclinaison est nécessaire quand on a affaire à des terres argileuses trop mouillées.

Il faudrait avoir affaire à de bien mauvaises terres pour donner avec ces précautions un remblai éboulé. Généralement les travaux préventifs suffiront. D'ailleurs ils augmentent déjà dans une large mesure le prix de revient de l'ouvrage.

Au cas cependant où ils seraient insuffisants et où des éboulements se produiraient en cours d'exécution, il ne faut pas se décourager et les poursuivre quand même. Plus tard, on réparera les éboulements comme il sera dit plus loin.

Travaux complémentaires. — Un tel remblai possède toutes les qualités d'un remblai argileux stable, moins une. Il renferme encore un faible excès d'eau qu'il ne pourra perdre que petit à petit, c'est-à-dire que le temps le consolidera.

Si l'on tient, s'il y a nécessité à le rendre de suite tout à fait convenable, l'usage des pierrées transversales s'impose comme dans le premier cas. Ces pierrées draineront et assècheront rapidement la masse.

On peut les écarter d'une vingtaine de mètres et leur donner 1,80 m à 2 m au minimum de hauteur.

Absence de précautions préventives. — Si l'on n'a pris au-

cune précaution préventive, si les terres sont mouillées, on a expliqué comment elles s'étaleront sur le sol, comment il sera difficile de constituer la plateforme et comment il sera impossible d'amener le remblai à sa hauteur. Et cependant un remblai aussi peu stable n'a qu'un seul défaut, mais il est capital, il contient un excès d'eau. Mais il est facile de le lui enlever.

Etablissement de pierrées. — Les pierrées conviendront encore dans la circonstance et joueront le rôle de suceuses. On les établira sur le sol naturel dans lequel on les encastuera légèrement. On leur donnera une direction perpendiculaire à l'axe du remblai qu'elles traverseront de part en part. On fixera leur écartement convenablement, pas moins de 10 m. On les exécutera à l'aide de galeries souterraines et blindées que l'on remplira ultérieurement de pierres sèches.

Effets des pierrées. — L'observation des galeries blindées est remarquable et permet de saisir sur le vif les effets prodigieux du drainage, de constater l'appel énergique de l'eau de la masse argileuse et d'assister à l'assèchement convenable. Dès les premiers jours de l'ouverture des galeries, les planches du blindage restent sèches, mais au bout de peu de temps elles deviennent humides, puis ont des pleurs, enfin elles laissent échapper des gouttes nombreuses. Si l'exécution de la galerie a duré une quinzaine de jours, dès qu'elle est terminée elle présente toute la gamme d'humidité que nous venons de décrire.

Les gouttes s'échappent abondantes pendant plusieurs jours, puis elles deviennent moins nombreuses, puis on ne remarque plus que des pleurs, puis seulement des traces d'humidité et le remblai est asséché, c'est-à-dire qu'il ne renferme plus que la quantité d'eau qui convient à la constitution de la terre qui le compose.

Maintes fois nous avons assisté à ces phénomènes de l'assèchement par les galeries.

Nous avons même fait quelques expériences pour reconnaître la teneur en eau des terres au moment où la galerie

donnait le maximum d'effet. Nous avons prélevé à plusieurs reprises en arrière des planches du blindage 1 kg de terre que nous avons fait sécher au four. Le poids de 1.000 gr, après dessiccation, était ramené à 660 gr, c'est-à-dire que la terre contenait à peu près 50 0/0 de son poids d'eau, avec une consistance très molle.

Les galeries enlèvent donc l'excès d'humidité; elles produisent le résultat inverse du premier cas où au contraire elles contribuent à rendre de l'humidité à la masse.

Les galeries peuvent rester ouvertes pendant un ou deux mois; on peut arranger le remblai, le recharger, lui donner sa forme définitive. Il est très solide et ne bouge plus.

Elles sont ensuite remplies de pierres brutes de façon à maintenir la circulation de l'air et le degré convenable d'humidité.

Ce système nous a toujours réussi et nous ne pouvons que le recommander.

Résumé. — En résumé, pour cette catégorie de remblais:

a) Faire usage de moyens préventifs qui sont presque toujours suffisants et que l'on complète en cas de nécessité par des pierrées transversales placées sur le sol naturel et traversant l'ouvrage de part en part.

b) Si l'on n'a pris aucune précaution préventive, établir les dites pierrées transversales par galeries blindées et espacées de 10 à 20 ou 25 m.

Autres cas. — Une foule d'espèces intermédiaires se présentent naturellement entre les deux précédentes, dans la pratique des travaux.

Elles se traitent par des moyens identiques. D'abord, si on le peut, on a recours aux moyens préventifs qui consistent notamment à reprendre les terres à la décharge pour les installer par couches horizontales de peu d'épaisseur; puis, si le remblai est rebelle, on exécute des pierrées transversales qui en tout état de cause complètent définitivement le travail.

Considération finale. — En général, un remblai est plus dif-

ficile à consolider qu'une tranchée et nous avons vu plus d'insuccès, plus de tentatives infructueuses autour des remblais que dans les tranchées.

Les moyens indiqués plus haut, judicieusement appliqués, entraînent le succès. Il n'est pas aussi immédiat que pour les tranchées puisque, notamment, les remblais trop secs exigent un long temps pour arriver à l'équilibre, mais on obtient rapidement un résultat suffisamment satisfaisant pour permettre de se servir du remblai.

L'ingénieur fera usage, avec profit, des observations journalières que nous avons précédemment indiquées en étudiant la nature du remblai et pourra assigner aux pierrées la meilleure position à leur donner pour arriver avec rapidité au but désiré.

CHAPITRE III

CONSTITUTION ET ÉTABLISSEMENT DES PIERRÉES D'ASSAINISSEMENT

Les grandes pierrées d'assainissement. — Nous n'envisageons ici que les grandes pierrées d'assainissement dont il a été question ci-dessus et que l'on est obligé d'établir pour combattre les éboulements de masse et consolider les tranchées et les remblais argileux.

Comme ces pierrées exigent dans leur établissement un certain nombre de précautions pour assurer la totalité et la réussite de leurs effets, il nous a paru indispensable de traiter spécialement de leur construction.

But à remplir. — Le but de l'établissement d'une pierrée est d'attirer et de recueillir les eaux surabondantes du sol et de les conduire à l'extérieur. Elles jouent le rôle d'un drainage puissant et énergique, d'un drainage de masse. En agriculture on draine la surface ou mieux l'épaisseur de la terre arable sur 0,60 m à 1,20 m. Ici, il s'agit d'assécher le sol et le sous-sol sur plusieurs mètres de profondeur.

L'installation d'une pierrée doit donc permettre :

- a) L'égouttement facile des eaux renfermées dans la terre ;
- b) La circulation et l'évacuation rapide de ces eaux.

Nécessité d'un massif poreux. — Pour permettre aux eaux de s'égoutter les pierrées doivent présenter une sorte de massif très poreux à grandes cavités, à grande surface latérale,

à circulation possible d'air, régnant sur toute la hauteur des couches de terrain mouillées ou humides.

Dans les drainages agricoles, l'emploi de tuyaux en terre poreuse est la plupart du temps suffisant pour créer dans le sol un petit cylindre à circulation d'air dans lequel pénètrent les eaux.

Ici, à la rigueur, on pourrait installer des tuyaux semblables de forts diamètres. Mais outre que l'industrie ne les fabrique pas, ils auraient peu de résistance et céderaient sous les tassements importants qui se produisent parfois.

C'est pourquoi, dans la pratique, on constitue les grandes pierrées avec des moellons bruts ou des pierres grossièrement cassées ou d'autres matériaux analogues, tels que des scories de forges renfermant jusque 40 o/o de vides de grandes dimensions.

Le sable trop fin ou même le gravier ne conviennent pas dans l'établissement des pierrées parce qu'ils ont un volume de vides plus restreints; que ces vides sont de petites dimensions; que les effets de la capillarité s'y font sentir; que, par suite, ils retiennent eux-mêmes une certaine proportion d'eau qui s'oppose à la rapidité et à la sûreté de l'égouttement.

Position de la base de la pierrée. — Comme la circulation naturelle des eaux intérieures du sol a toujours lieu à la surface d'un banc argileux, il s'ensuit que la pierrée doit descendre au moins jusqu'à cette surface. Mais pour assurer la captation totale des eaux, il est indispensable d'encasturer la base de la pierrée de quelques centimètres dans la couche argileuse: 0,15 m à 0,20 m, par exemple, sont suffisants (fig. 6).

Hauteur des pierrées. — Comme d'autre part, la pierrée doit recueillir les eaux des couches mouillées ou humides, sa hauteur est, par ce fait, déterminée dans chaque cas particulier. On l'arasera à quelques centimètres (0,15 m à 0,20 m) au-dessus de la couche humide supérieure. Dans le cas d'un sol entièrement

argileux, l'arasement a lieu le plus haut possible à la demande de chaque espèce.

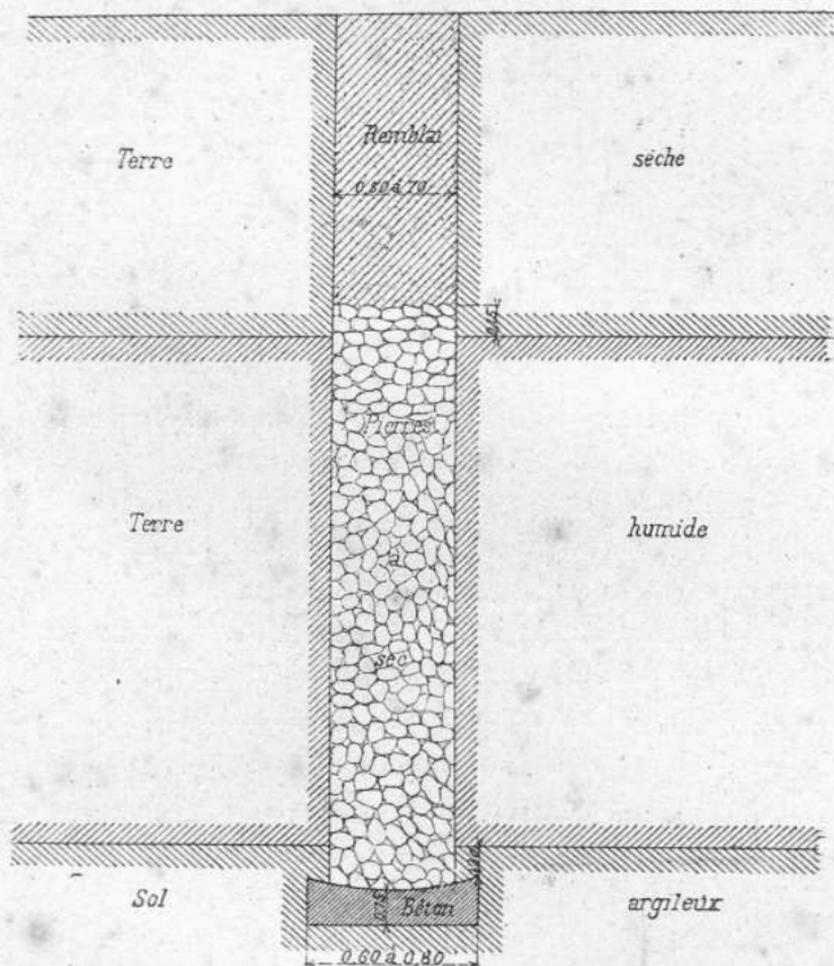


FIG. 6.

Épaisseur des pierres. — L'épaisseur du massif de la pierre n'a pas besoin d'être considérable : 0,50 m est une dimension minima, mieux vaut 0,70 m.

Fondation en béton. — Les eaux recueillies par la pierre tombent à travers les interstices des pierres jusqu'à sa base. Si on établit celle-ci directement sur le sol argileux, ce dernier

se ramollit, se détrempe et est entraîné. La pierrée se disloque et le travail est compromis sinon anéanti dans ses effets, comme nous l'avons vu dans certains cas.

C'est pourquoi nous avons toujours établi nos pierrées sur une petite fondation arrangée de façon à former radier. Cette fondation est en béton, à une épaisseur minima de $0,15\ m$, une largeur un peu supérieure à celle de la pierrée et sa surface supérieure est disposée dans le sens transversal suivant un profil concave de $0,03\ m$ à $0,04\ m$ de flèche. Si l'on prend soin de lisser à la truelle cette surface et même de la badigeonner avec du lait de ciment ou avec du coaltar on se place dans les meilleures conditions pour l'écoulement des eaux.

Pente du radier. — La pente longitudinale du radier ne doit pas dépasser $0,05\ m$, ni descendre au-dessous de $0,005\ m$ par mètre. Si le profil en long de la pierrée a une pente supérieure à $0,05\ m$, mieux vaut la disposer en redans entre lesquels le radier a une pente de $0,05\ m$. Si, au contraire, la pente générale est inférieure à $0,005\ m$, il y a lieu de chercher une combinaison propre à l'augmenter jusqu'à ce chiffre au moins. Quand on est maître de la pente, $0,03\ m$ est un chiffre très convenable.

Exécution de la fouille. — Tels sont les traits généraux d'une pierrée d'assainissement. Mais beaucoup de détails surgissent.

Tout d'abord, par l'examen du profil de la figure 6, on se rend compte qu'en général la fouille nécessaire pour établir la pierrée doit avoir à sa base une largeur au moins égale à celle du radier, c'est-à-dire un peu supérieure à celle de la pierrée elle-même, et présenter des talus verticaux ou légèrement évasés. Si la fouille est profonde, il faut la blinder. Si, en outre, elle est fort mouillée dans un terrain sans consistance, le blindage sera complété par application, sur les parois, de planches jointives. De plus, il faut prévoir de chaque côté de la fouille, au pied de chaque talus, une petite rigole dont les

dimensions ne peuvent guère descendre au-dessous de $0,10\text{ m}$ sur $0,10\text{ m}$ (fig. 7).

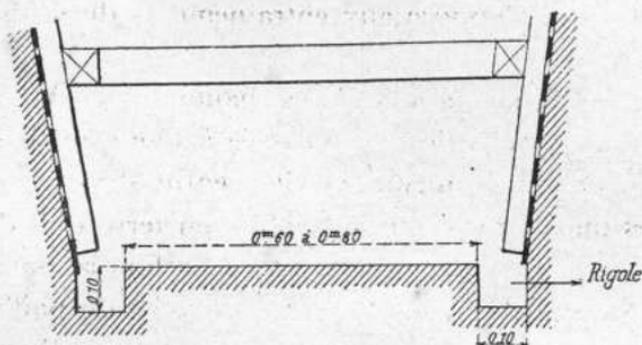


FIG. 7.

Remplissage de la fouille. — La fouille étant ouverte, blindée convenablement, les rigoles d'assainissement étant ouvertes et fonctionnant, on procède aux opérations suivantes :

a) On pose d'abord le béton, on le lisse et on attend la prise, c'est-à-dire deux ou trois jours.

b) On remplit ensuite les deux rigoles et les vides latéraux au béton, jusqu'à quelques centimètres au-dessus de la surface du radier, avec un corroi d'excellente terre végétale pilonnée avec un pilon en fonte de 12 à 15 kg, de façon à refouler les eaux sur le radier où elles couleront désormais.

c) Ensuite, on monte la pierrée à la façon d'une maçonnerie à sec dans laquelle on laisserait le plus de vides possible sans que la stabilité soit fort compromise, les assises ayant $0,15\text{ m}$, ou $0,20\text{ m}$ d'épaisseur.

d) Les vides latéraux à la première assise sont remplis par le corroi précédent monté jusqu'au niveau supérieur de la couche argileuse.

e) Les vides latéraux aux autres assises de la pierrée sont remplis avec de la terre non argileuse. Si le sol naturel, qui constitue les faces de la fouille, est composé de sable très ténu comme cela se rencontre souvent au-dessus des bancs

d'argile, on garnit les vides latéraux avec du sable fin sauf contre les faces latérales de la pierrée où, au lieu de sable, on met de la pierre cassée menue : le tout de façon à obtenir une sorte de filtre qui s'oppose aux entraînements du sable du sol dans la pierrée.

f) La pierrée étant arasée à sa hauteur, on la recouvre d'une première couche de pierre cassée à l'anneau de 0,06 m, puis d'une couche de menu gravier, enfin d'une couche de sable, après quoi on exécute le remblai en terre qui, dès lors, ne peut pénétrer dans la pierrée. On a parfois recouvert simplement le dessus de la pierrée d'une couche de paille ou de gazons renversés sur lesquels on remblayait, mais l'expérience a prouvé que ce système était détestable parce que la paille ou les gazons se pourrissent et ne sont efficaces que pendant un temps très court.

g) Quand une pierrée (le cas est rare) suit l'horizontale d'un coteau, elle ne reçoit l'eau que d'un seul côté. On pourrait croire que le remplissage du vide latéral au-dessus du radier et du côté opposé au coteau peut se faire d'une façon quelconque ; mais il n'en est rien, il convient de l'exécuter avec de la terre fort perméable et bien pilonnée.

h) Nous avons eu à établir une pierrée latérale à un canal de navigation et placée en contrebas du niveau de la retenue normale, suivant la ligne horizontale d'un coteau. Pour éviter le drainage des eaux du canal, nous avons rempli le vide de ce côté, sur toute sa hauteur, par un corroi soigné, en excellente terre végétale. Et pour augmenter l'effet de ce corroi, nous avons élargi le vide en question et porté sa largeur à 1 m.

i) Les blindages sont naturellement enlevés au fur et à mesure du remplissage des fouilles pour servir à nouveau dans d'autres tranchées.

Aqueduc. — Ainsi constituée, la pierrée serait encore imparfaite si l'on ne ménageait à sa base, à la surface du béton, un petit aqueduc.

Habituellement, cet aqueduc est formé (fig. 8) par les pierres de la première assise, disposées en piédroits distants de $0,20\text{ m}$, et par les pierres intermédiaires de la seconde assise que l'on place comme couverte sur les piédroits précédents.

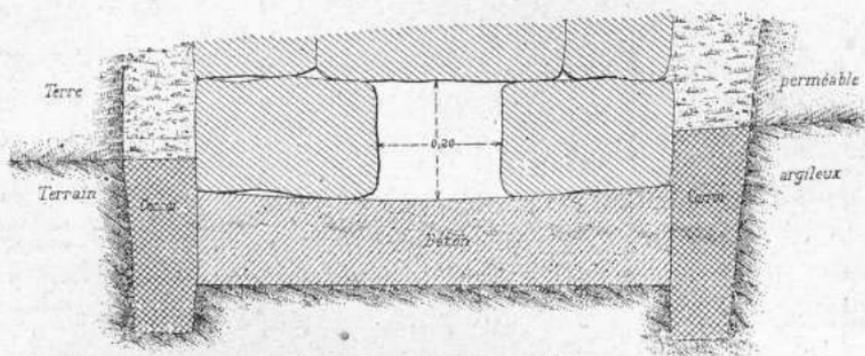


FIG. 8.

Quand, craignant les entraînements de sable, on veut se réserver le moyen de nettoyer cet aqueduc, il importe, et nous l'avons expérimenté, de le constituer par de forts tuyaux de drainage posés très soigneusement qui permettent le passage facile de la curette ou autres instruments de curage. L'aqueduc en pierre, très irrégulier, arrête souvent ces instruments.

Regards. — Quand les circonstances conduisent à la construction de longues pierrées, il est indispensable de les couper par des regards ou puits de visite placés tous les 30 m au plus.

Nous avons eu l'occasion d'établir des regards analogues; les distances de 50 et même de 40 m ont paru excessives.

Le fond du regard est placé à $0,40\text{ m}$ en contrebas des tuyaux de façon à créer un petit puisard qui reçoit les terres entraînées et que l'on cure en temps utile. Ces regards sont munis d'une échelle en fer pour la descente; ils ont $0,70\text{ m}$ à $0,80\text{ m}$ de diamètre pour le passage d'un homme et ils sont recouverts d'une plaque en tôle facilement manœuvrable.

Entre deux regards, on place dans l'aqueduc une chaîne d'une longueur égale au double de leur distance et dont l'ex-

cès de longueur est ramené et accroché dans l'un des regards. Cette chaîne fixée à ses deux extrémités sert au nettoyage par un mouvement de va-et-vient. On la munit quelquefois d'une tête de loup avec fils d'acier.

Cheminées. — Quand une pierrée dépasse 10 m de longueur, il est bon de placer à son extrémité d'amont une cheminée, sorte de petit puisard, de quelques centimètres de côté, de façon :

a) A créer un courant d'air favorable aux effets du drainage ;

b) A permettre, par l'envoi d'un ou plusieurs seaux d'eau, de s'assurer de son bon fonctionnement et de permettre son nettoyage.

Débouchés des pierrées. — Les pierrées aboutissent ou dans un collecteur souterrain ou dans le talus à ciel ouvert d'une tranchée. Dans le premier cas, il est indispensable, en général, d'établir un regard au point de rencontre de la pierrée et du collecteur. Dans le second cas, on arasera le massif de la pierrée dans le plan des talus, on donnera une tête maçonnée au petit aqueduc et on la fera suivre d'une descente ou bavette en maçonnerie à mortier, conduisant les eaux dans le fossé.

Observations. — a) Il est bien entendu que tout ce qui précède s'applique aussi bien au drainage des tranchées, qu'au drainage des remblais, qu'au drainage des terrains fort marécageux.

b) Ces dispositions nous ont été dictées par une longue pratique et nous ne les avons jamais trouvées en défaut quand elles ont été strictement prises. Nous ne sommes parvenus à les régler qu'après des tâtonnements assez nombreux et c'est pour éviter ces tâtonnements que nous faisons connaître ces préceptes.

c) En matière de travaux publics, il convient de construire les ouvrages comme s'ils devaient avoir une durée indéfinie et le drainage en particulier dont dépendent souvent la con-

servation d'importants ouvrages doivent être établis avec un soin extrême. Il faut remarquer qu'une pierrée installée d'une façon sommaire ne résiste pas au temps bien qu'elle ne coûte pas beaucoup moins cher qu'un drainage soigné et que la petite économie réalisée dans le premier cas peut se traduire plus tard, quelquefois à brève échéance, par des désastres importants. Nous terminerons donc cet exposé en posant la maxime suivante : En matière de pierrées d'assainissement, faire immédiatement et solidement.

CHAPITRE IV.

RÉSUMÉ, OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS

Projets des consolidations. — Il résulte de l'étude qui précède que l'on peut, sans hésiter, poser les principes généraux suivants relatifs aux consolidations des déblais et des remblais argileux.

Tout d'abord les projets de tracés et de terrassements seront établis en tenant compte : de l'aspect du terrain, du résultat des sondages, de la composition interne du sol, de l'abondance des eaux, de la profondeur des tranchées, de la hauteur du remblai, des travaux de consolidation à prévoir, de l'époque probable de l'exécution des terrassements, etc. Les pièces du projet comprendront les travaux de canalisation au même titre que les autres travaux, c'est-à-dire les plans, métrés, bordereaux de prix, estimations y relatifs.

Murs de soutènement. — En matière de consolidation de masses ébouleuses, il y a lieu de proscrire les murs de soutènement, soit à mortier, soit en maçonnerie à sec, soit rectilignes, soit curvilignes, soit avec ou sans contreforts, soit avec ou sans filtres.

Consolidation des tranchées. — Les tranchées argileuses seront uniformément consolidées, soit préventivement, soit au plus tard au cours de leur exécution, par des pierrées puissantes.

tes perpendiculaires à leur axe et dont on calculera avec grand soin l'écartement.

a) Leur longueur sera telle qu'elles dépasseront la crête des talus de la moitié de la hauteur de la tranchée augmentée du quart de leur écartement.

b) Si le banc de glissement est connu d'avance, elles seront légèrement encastrées dans ce banc.

c) Si le banc de glissement est inconnu, ou seulement en cas d'incertitude, elles descendront aussi bas que possible.

d) Leur hauteur doit embrasser la totalité des terrains mouillés.

e) Quand les eaux ont des points de rassemblement naturels en dehors de la tranchée, des pierrées doivent être placées en face de ces points.

f) Les eaux courantes superficielles ne seront jamais jetées dans les pierrées, mais conduites sur les talus par des tuyaux étanches débouchant dans des bavettes en maçonnerie à mortier établies sur la pente des talus. A proximité de chacun de ces murs on installera une pierrée.

g) Les revers d'eau au sommet des talus seront rigoureusement prohibés.

h) Les chemins latéraux seront établis sans fossés et les ornières soigneusement comblées.

i) Dans le cas de tranchées complètement argileuses, on établira avec succès des drainages superficiels des zones adjacentes à la tranchée. Les grandes pierrées seront établies à proximité des collecteurs et pourront être construites en galeries souterraines.

k) Les pierrées longitudinales seront proscrites.

Consolidation des remblais. — a) Les remblais argileux devront être repris à la décharge, et régalez par couches de 0,12 m à 0,15 m d'épaisseur.

b) La largeur des couches devra être telle que les talus aient une inclinaison de 2 de base pour 1 de hauteur, dans le cas de

remblais secs, et 2 1/2 de base pour 1 de hauteur, dans le cas de remblais humides.

c) Les couches seront pilonnées fortement s'il s'agit de remblais secs, légèrement s'il s'agit de remblais mous.

d) Dans ce dernier cas on attendra la dessiccation partielle avant de mettre la couche suivante qui, si c'est possible, devra être constituée par de la terre plus sèche.

e) Dans le cas de remblais secs on arrosera légèrement au moment du pilonnage.

f) La pente en travers du sol inférieur sera annulée ou renversée.

h) Des fossés de ceinture conduiront les eaux naturelles aux aqueducs.

i) Le sol qui doit recevoir le remblai recevra un quadrillage de petits fossés pour favoriser la liaison.

k) En tout état de cause, il sera bon de construire quelques pierrées traversant le remblai de part en part et légèrement encastrées dans le terrain naturel. Ces pierrées établies en galerie favoriseront l'apport de l'humidité dans le cas de remblais secs et l'enlèvement de l'excès d'eau dans le cas de remblais humides.

l) Si aucune des précautions précédentes n'a été prise, il conviendra, tout au moins pour les remblais secs, d'apporter le cube nécessaire pour l'adoucissement des talus et, pour les remblais mous, d'éviter les rechargements.

m) Puis on construira des pierrées comme il est dit ci-dessus, mais plus rapprochées.

n) Ensuite, pour les remblais secs, on reconstituera le talus avec les terres apportées en excès et, pour les remblais humides, on attendra la dessiccation par les pierrées avant de recharger.

Constitution des pierrées. — a) Largeur 0,50 m à 0,70 m.

b) Elles seront constituées par des moellons ou matériaux analogues disposés avec beaucoup de vides.

c) Elles reposeront sur une base en béton formant radier.

d) Elles posséderont à la partie inférieure un aqueduc.

e) Le remplissage des fouilles se fera par un corroi solide jusqu'au niveau du plan de glissement et en tous cas jusqu'un peu au-dessus du radier en béton.

f) Le reste du remplissage est soumis à certaines précautions.

g) Si elles sont longues, elles seront coupées par des regards distants de 30 m au plus.

i) En général, leur extrémité sera munie d'une cheminée d'aération.

Introduction des travaux de consolidation dans les devis d'entreprise. — Il est rare de voir, à l'heure actuelle, introduire, dans les détails estimatifs, le travail de consolidation sur le même pied que les autres ouvrages avec quantités et prix d'unités basés sur la nature même des ouvrages à construire par application des vraies méthodes. On se borne à ajouter, à la suite de la dépense habituelle de terrassement, une forte somme globale calculée arbitrairement. Cette façon de procéder est assurément regrettable, car dans la majorité des cas, les sondages d'études et la reconnaissance du sol ont permis de reconnaître, couche par couche, la nature du terrain, la position et l'importance des nappes d'eau et par suite la nécessité et l'importance des consolidations à prévoir. Et pour ces ouvrages, comme pour les fondations de ponts et aqueducs, on peut en donner une évaluation sensiblement exacte avec une certaine réserve pour les imprévus.

Cette méthode de la somme globale pour consolidation coûte finalement très cher, car n'ayant prévu aucun travail déterminé, on attend l'éboulement pour le consolider et au lieu d'exécuter un travail régulier, facile et prévu on se trouve en présence de difficultés multiples que l'on a créées par sa faute :

a) Arrêt ou gêne de l'entrepreneur de terrassements qui réclamera des indemnités importantes.

b) Enlèvement coûteux, par des moyens improvisés et des équipes en régie, de déblais souvent mouillés ou vaseux.

c) Approvisionnement immédiat de matériaux que l'on ne sait ni où prendre, ni comment transporter.

d) Mise en œuvre de ces matériaux d'une façon souvent queiconque et non raisonnée par des procédés également improvisés.

e) Au total un travail fait à la hâte, sans étude préparatoire, dont tous les prix sont exagérés et qui ira peut-être à l'encontre du succès.

Influence des travaux de consolidation sur le mouvement des terres. — Les projets de terrassements se font souvent au cabinet sans trop s'inquiéter de la nature des déblais. On détermine bien les inclinaisons à donner aux divers talus suivant la nature des terres en vue surtout de connaître le volume des terrasses. Mais on s'arrête là. On répartit ce volume au remblai suivant la méthode de la moindre distance moyenne et l'on se tient pour satisfait.

En regardant de plus près les résultats des sondages et en envisageant leurs conséquences au point de vue des éboulements futurs, on arriverait sans doute à se convaincre dans bien des cas :

a) De la nécessité de modifier le tracé ;

b) De la nécessité de ne pas employer certaines terres au remblai ;

c) De la nécessité de procéder à des études comparatives.

d) De la nécessité d'établir une balance entre le prix du tracé donnant le minimum du cube et le minimum de distance de transport avec prévisions de telles et telles consolidations et le prix d'un autre tracé établi en vue d'éviter et de réduire d'une façon notable les travaux de consolidations, balance qui, dans nombre de cas, sera en faveur de ce dernier système.

Nous n'ignorons pas que cette balance comporte des aléas. On ne sait, en effet, si l'exécution se fera par la pluie ou par la sécheresse, si les terrains se comporteront exactement comme on le suppose, si dans la réalité on ne pourra pas éviter

certain travaux, etc. Mais ces aléas sont plus à craindre dans l'étude au moindre cube et à la moindre distance que dans l'étude raisonnée du sol; c'est pourquoi, si la balance penche de ce dernier côté, il n'y a pas à hésiter, il convient de l'adopter.

Nous n'ignorons pas non plus qu'un tracé n'est pas à la discrétion complète de l'ingénieur, qu'il existe des points de passage forcés tant en plan qu'en altitude, qu'il convient de ne pas dépasser certaines déclivités pour la plateforme et de ne pas descendre pour les courbes au-dessous de tels ou tels rayons, qu'on est souvent dans l'impossibilité d'employer telles et telles terres, etc. Bien entendu, l'étude que nous proposons doit tenir compte de toutes ces circonstances, mais nous pensons qu'elle peut se faire quand même et que l'ingénieur doit toujours faire intervenir la nature du sol et la prévision de consolidations (si besoin est) concurremment avec les exigences que réclament le tracé de la plateforme.

Avoir entre les mains des sondages minutieux, reconnaître le sol au préalable, prévoir et étudier les consolidations futures sont les trois conditions qui doivent accompagner l'étude d'un projet de tracé et de terrassement.

Nombreux sont les exemples, où les recommandations précédentes ayant été négligées, de coûteuses consolidations se sont imposées. Le plus saillant, à notre connaissance, est celui d'une tranchée de 80 m de longueur et de 0,50 m de profondeur maxima (profondeur insignifiante) qui a déterminé un éboulement s'étendant à plus de 200 m de distance et dont la réparation a coûté environ 100.000 fr. Il est clair que le moindre examen des lieux et le plus petit sondage auraient dénoncé le péril et qu'il eût été facile de l'éviter par un léger remaniement du profil en long.

Enseignement général donné par l'aspect du sol. — La surface seule du sol révèle souvent sa nature intime.

a) Les canaux où croissent des plantes aquatiques, joncs, leiches et autres doivent être tenus pour suspects; ce sont des terrains mouillés et argileux au premier chef. Et si l'on est

obligé de les entamer, l'étude du sol sera poussée à fond par de nombreux sondages, des consolidations sérieuses seront largement prévues et le cahier des charges devra les comprendre avec détails et les rattacher aux travaux de l'entreprise. Nous avons vu des cas analogues où la consolidation préventive a enlevé toute difficulté d'exécution et a donné un résultat surprenant et économique. Après dix années, les drainages établis donnent encore un volume d'eau abondant.

b) Les tranchées ouvertes en contrebas et dépressions naturelles du sol formeront drainage pour les eaux qui s'accumulent dans ces dépressions et leurs talus s'ébouleront inévitablement; le remède est évidemment un drainage préventif de ces bas-fonds.

c) Un tracé à l'intersection d'une pente brusque d'un coteau et d'une pente adoucie est également suspect. Le sol inférieur est argileux et en cherchant bien on y trouvera l'eau et les ajoncs ou autres plantes aquatiques. Les tranchées ouvertes en ces points ne seront pas stables et il faudra les consolider. Dans un cas semblable, pour n'avoir pas prévu de consolidations préventives, nous avons eu des accidents nombreux. Les consolidations des talus se sont d'abord imposées et un ouvrage fondé sur le sol inférieur a été disloqué par les eaux et littéralement emporté. Les consolidations préventives auraient coûté beaucoup moins cher.

d) En général, les fouilles ouvertes dans des sols argileux où les eaux circulent sur des couches déterminées paraissent devoir être consolidées, quelquefois préventivement, et les travaux des consolidations prévus dans les projets.

Nous pourrions multiplier les citations.

Un souterrain placé 10 m trop bas, dans un sol à l'aspect argileux sur lequel croissaient des plantes aquatiques, a d'abord donné lieu à des tranchées d'accès qui ont subi toutes sortes de bouleversements et ensuite a été lui-même l'objet de difficultés que l'on n'a pu résoudre que par l'emploi de l'air comprimé.

Une très petite tranchée ouverte à l'intersection d'une pente raide d'un coteau et d'une pente plus douce placée en contrebas et de nature argileuse a été l'occasion d'importants travaux de consolidation dont le prix a été hors de proportion avec l'importance du terrassement proprement dit de la tranchée.

De ces remarques naît l'obligation pour l'ingénieur de parcourir lui-même le tracé, de faire une reconnaissance sérieuse du sol pour s'assurer que la surface de ce dernier ne lui donne pas des indications défavorables dont il devrait, le cas échéant, tenir le plus grand compte.

Conclusion. — Comme conclusion de cette étude, nous énoncerons cette pensée: En matière de consolidation on peut prévoir, il faut prévoir et il importe de traiter ces travaux comme ceux du reste du projet.

O. L. avec meilleur

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER

CONSOLIDATION DES TRANCHÉES ARGILEUSES

I. — CONSIDÉRATIONS SUR LES ÉBOUEMENTS DES TRANCHÉES ARGILEUSES.	1
Composition des tranchées argileuses. Affleurement des eaux. Certitude presque absolue des éboulements.	
§ 1. — <i>Cas d'un seul banc d'argile placé à la partie inférieure de la tranchée et recouvert par des terres perméables.</i>	2
Etude de l'éboulement. Influence des eaux. Prisme d'éboulement. Cycloïde de glissement. Position de la cycloïde. Arc de cercle qui limite l'éboulement en plan. Constatations expérimentales. Eboulements secondaires. Amplitude des éboulements successifs. Etude mécanique de l'éboulement. Existence de quatre forces. Composition des quatre forces. Action des forces.	
§ 2. — <i>Cas d'une tranchée entièrement argileuse.</i>	10
Considérations générales. La position du plan de glissement est inconnue. Influences diverses. Formes des éboulements. Résumé des deux cas.	
II. — MÉTHODES DE CONSOLIDATION DES TRANCHÉES ARGILEUSES. .	13
Méthodes diverses. Mur de soutènement. La formule habituelle du mur de soutènement ne s'applique pas aux murs de consolidation. Impossibilité de calculer le mur de consolidation. Perfectionnements apportés aux murs de soutènement. Quelques avantages des murs. Rejet du mur. Autres méthodes.	
§ 1. — <i>Cas d'un seul banc d'argile placé à la partie inférieure de la tranchée et recouvert par des terres perméables.</i>	19
Rappel des forces en présence. Etude de $P \sin \alpha$. Etude de $f \cdot P \cos \alpha$. Etude de la force K. Etude de la force L. Modification artificielle de ces forces par le drainage. Mur de	

soutènement en terre. Comparaison mécanique du mur en maçonnerie et du mur en terre. Pierrées d'assèchement. Longueur des pierrées. Ecartement des pierrées. Répartition des pierrées. Pierrées longitudinales. Exécution des pierrées. Elasticité du système des pierrées transversales. Cloisonnement du sol. Revers.

- § 2. — *Cas d'une tranchée complètement argileuse.* 28
- Application des pierrées transversales. Profondeur des pierrées. Ecartement des pierrées. Longueurs des pierrées. Répartition des pierrées. Drainages superficiels. Modifications à apporter aux pierrées. Autre cas. Résumé.

CHAPITRE II

CONSOLIDATION DES REMBLAIS ARGILEUX

- I. — **CONSIDÉRATIONS SUR LES ÉBOULEMENTS DES REMBLAIS ARGILEUX** 33
- Propriétés des terres argileuses. Causes des variations de la nature des remblais. Influence de la nature des terres. Influence du degré d'humidité. Influence des variations atmosphériques. Influence du mode d'emploi des terres. Influence des remblais argileux sur les prix des terrassements. Etude des remblais.
- § 1. — *Remblai constitué par des mottes sèches* 36
- Apparence physique. Action de la pluie. Rechargements immédiats. Action des pluies ultérieures. Durée des mouvements. Forme des éboulements. Conditions de l'équilibre définitif. Prévision des éboulements.
- § 2. — *Cas d'un remblai mou.* 42
- Constitution. Influence des années. Autres cas. Renseignements à prendre en cours d'exécution
- II. — **MÉTHODES DE CONSOLIDATION DES REMBLAIS ARGILEUX.** 44
- Méthodes diverses employées. Difficultés de la consolidation. Conditions d'équilibre. Natures diverses des remblais. Nécessité des précautions préventives
- § 1. — *Cas d'un remblai composé de mottes sèches* 46
- Travaux préventifs. Inconvénients de l'absence de travaux préventifs. Méthode de consolidation. Effets des pierrées. Travaux accompagnant les pierrées. Ecartement des pierrées. Hauteur des pierrées. Résumé.
- § 2. — *Cas d'un remblai mou.* 49
- Remblai mou, Précaution préventives. Travaux complémen-

taires. Absence de précautions préventives. Etablissement de pierrées. Effets des pierrées. Résumé. Autres cas. Considération finale.

CHAPITRE III

CONSTITUTION ET ÉTABLISSEMENT DES PIERRÉES D'ASSAINISSEMENT

Les grandes pierrées d'assainissement. But à remplir. Nécessité d'un massif poreux. Position de la base de la pierrée. Hauteur des pierrées. Epaisseur des pierrées. Fondation en béton. Pente du radier. Exécution de la fouille. Remplissage de la fouille. Aqueduc. Regards. Cheminées. Débouchés des pierrées. Observations	55
---	----

CHAPITRE IV

RÉSUMÉ, OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS

Projets des consolidations. Murs de soutènement. Consolidation des remblais. Constitution des pierrées. Introduction des travaux de consolidation dans les devis d'entreprise. Influence des travaux de consolidation sur le mouvement des terres. Enseignement général donné par l'aspect du sol. Conclusion	65
---	----

TABLE DES MATIÈRES	73
------------------------------	----

