Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 10 (1868-1870)
Heft: 62

Artikel: Représentation graphique des cubes de terrassements et de leurs transports

Autor: Emery, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-256554

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE

des cubes de terrassements et de leurs transports.

PAR

A. EMERY, ingénieur

(Pl. 9 à 12.)

INTRODUCTION.

Mon but en présentant ce mémoire à la Société vaudoise des sciences naturelles, est :

1° De faire connaître une heureuse application du calcul par le trait aux calculs des terrassements dans les projets de routes ou de chemins de fer ; et

2° De montrer la grande supériorité de cette méthode sur celle par calcul appliquée jusqu'ici.

Cette méthode graphique est décrite dans l'ouvrage de M. Culmann, professeur au Polytechnicum fédéral : « Die graphische Statik, § 21 et 22, » qui en attribue la première idée à l'ingénieur bavarois Bruckner de Neustadt an der Hardt.

La plus grande partie de ce mémoire est extraite de l'ouvrage ci-dessus, dans lequel l'auteur suppose :

1° Que chaque profil en travers ne présente que du déblai ou que du remblai, et 2° que la voie à construire est horizontale.

Or, comme ces deux conditions ne se présentent *jamais* dans les projets de routes et très rarement dans les chemins de fer, j'ai complété cet exposé pour rendre la méthode applicable dans tous les cas, et aussi pratique que possible.

Pour en faciliter la compréhension j'accompagne le mémoire d'un projet complet de terrassements traité par cette méthode.

La pl. II donne la série des profils en travers, avec l'indication des surfaces de remblais ou de déblais.

La pl. III, fig. 1, le profil en long,
fig. 2, le profil des cubes,
fig. 3, la courbe des transports.

Le tableau I, le calcul des cubes à transporter,
id. II, le calcul du déblai total,
id. III, le coût du terrassement.

I^{re} PARTIE.

PROFIL DES CUBES.

1. Pour construire le profil des cubes, on porte comme ordonnée à partir d'une horizontale, et à leur distance respective, les surfaces de chaque profil, à une échelle quelconque (Pl. III, fig. 2 : 2^{mm} pour 1^{mn}), les déblais au-dessus de l'horizontale et les remblais au-dessous.

On se conformera en général aux règles pratiques suivantes (Pl. I, fig. 1) :

a) Les deux profils successifs étant tous deux entièrement en remblai, ou tous deux entièrement en déblai, on joint les extrémités des deux ordonnées.

b) Les deux profils successifs étant l'un entièrement en déblai, l'autre entièrement en remblai, on joint encore les extrémités des deux ordonnées, mais alors cette ligne coupe l'horizontale.

c) Un profil étant entièrement en remblai ou en déblai, et l'autre offrant du déblai et du remblai, on joint les extrémités des ordonnées de même signe, et pour la nature différente on opère comme au *b*, en supposant mené un plan parallèle à l'axe.

d) Les deux profils offrant à la fois du remblai et du déblai :

1° Si les surfaces de même nature sont vis-à-vis l'une de l'autre, on agit comme en *a* ;

2° Si les surfaces qui sont vis-à-vis l'une de l'autre, sont de nature différente, on agira comme si l'on avait 4 profils et l'on retombe dans le cas *b*.

2. La surface entre deux ordonnées consécutives étant égale à l'ordonnée moyenne (qui représente la section moyenne) multipliée par la distance des deux profils, elle est proportionnelle au cube compris entre les deux profils.

Ainsi la somme des surfaces en-dessus de l'horizontale est proportionnelle au total des déblais, et la somme des surfaces en-dessous proportionnelle au total des remblais.

Il suffirait donc pour obtenir le cube des terrassements, de planimètrer ces surfaces et de multiplier le résultat par un coefficient dépendant des échelles employées; mais comme ces surfaces sont une succession de trapèzes et de triangles, il sera tout aussi simple et surtout plus exact dans un projet définitif de calculer les cubes en établissant le tableau II.

3. Aussi ne donnons-nous pas le profil des cubes comme une simplification ou une abréviation dans les calculs de terrassements; mais nous estimons qu'il devrait accompagner tout projet, afin qu'un simple coup d'œil permette de juger de l'importance des terrassements, d'une manière infiniment plus exacte que l'examen même minutieux du profil en long et des profils en travers.

4. Si maintenant dans chaque profil on fait la différence entre la section en déblai et celle en remblai, on obtient, en joignant les points ainsi déterminés, un nouveau profil (---- pointillé) et de nouvelles surfaces (hâchées en couleurs).

Ces surfaces représenteront les cubes *excédants* (ou à transporter) de déblai et de remblai, car nous laissons en dehors du pointillé au-dessus de l'horizontale les cubes de déblai qui seront portés en remblai à la pelle dans *leurs profils.*

Cette disposition a les avantages suivants:

1º Les intersections du pointillé et de l'horizontale donnent la position exacte des passages de remblai en déblai ou de déblai en remblai des terres à transporter;

2º On tient compte des plus petites distances de transport;

3º Elle permet d'éliminer du calcul les cubes transportés à la pelle dans leurs profils, puisqu'il n'y a pas plus de travail de jeter la terre en remblai que de la jeter dans un tombereau ou une brouette. Il suffit d'en tenir compte pour la fouille et charge.

Nous établirons donc les deux tableaux I et II; le premier donnant les cubes excédants de déblai et de remblai, et le second le cube total des déblais, compris celui des emprunts, s'il y en a.

II^{me} PARTIE.

COURBES DES TRANSPORTS.

Construction et caractères généraux.

5. Les ordonnées de cette courbe sont données dans la dernière colonne du tableau I.

L'ordonnée, à un point quelconque, est la somme algébrique de tous les cubes dès l'origine à ce point, les remblais étant positifs et les déblais négatifs.

Ainsi l'ordonnée du profil 0,8752 (Pl. III, fig. 3) représente dans une échelle quelconque (1^{cm} pour $100^{m\Delta}$) le cube $95,040^{m\Delta}$ excédant de déblai avant le profil 0,8752. — La troisième ordonnée sera le volume excédant $220,992^{m\Delta}$ compris entre 0 et 1,40.

Au profil 1,80 commence le remblai, les ordonnées augmentent en valeur absolue et la courbe remonte jusqu'au profil 2,15 où le déblai recommence. Elle redescend alors jusqu'au profil 2,60, pour remonter ensuite. Au profil 4,28 l'ordonnée $+ 701,513^{m\Delta}$ représente l'excédant des remblais sur les déblais dès l'origine en ce point.

6. Les principaux caractères de cette courbe sont les suivants :

1° Elle est ascendante pour les remblais, et descendante pour les déblais ;

2° Les passages de remblai en déblai sont *maxima*, et ceux de déblai en remblai *minima* de la courbe ;

3° La courbe se rapproche d'autant plus de la verticale que le volume entre deux profils consécutifs est plus grand.

Au reste 4° la tangente trigonométrique de l'angle, que fait avec l'horizontale la tangente à la courbe en un point donné, est proportionnelle au profil en travers de ce point. Ainsi elle est positive dans le remblai, négative dans le déblai et nulle au passage de l'un à l'autre.

5° Pour des sections constantes de déblai ou de remblai, la courbe devient une ligne droite.

6° Comme en général les volumes augmentent au commencement pour diminuer ensuite, la courbe aura ordinairement la forme d'un S.

L'étude de cette courbe peut donc nous donner une idée complète du terrassement.

Détermination des sections.

7. Supposons maintenant que nous tracions une horizontale quelconque HH. Cette ligne, appelée *horizontale de compensation*, divise la courbe en différentes parties, les unes en-dessus de l'horizontale que nous appellerons *sections de montagnes* ou simplement *montagnes*, et les autres en-dessous de cette horizontale que nous appellerons les *sections des vallées* ou *vallées*.

Il est à remarquer que suivant la forme de la courbe, les sections déterminées par la ligne HH auront des subdivisions, s'il reste des maxima en-dessous de l'horizontale ou des minima au-dessus. — La fig. 2, Pl. I, représente un cas très fréquent :

Le déblai	*a*	forme le remblai		*a'*	
id.	*b*	id.	id.	*b'*	
id.	*c*	id.	id.	*c'*	
id.	*d*	id.	id.	*d'*	etc. etc.

8. Il est évident que :

1° *Entre les profils, dont les points de la courbe se trouvent sur la même horizontale, il y a compensation entre les remblais et les déblais.*

2° *Les montagnes et les vallées déterminent les différentes sections de transport.*

3° *Les sections de montagnes sont celles où les déblais sont transportés* **en arrière**; *et les sections de vallées celles où les transports ont lieu* **en avant**.

9. Nous allons traiter, comme introduction à la détermination graphique des sections de transport, le cas particulier où la voie à construire serait horizontale, c'est-à-dire, que nous ferons premièrement abstraction complète de la pente; puis nous verrons le moyen d'en tenir compte dans une juste mesure.

CAS PARTICULIER: Voie horizontale.

10. THÉORÈME. *La surface des montagnes et des vallées, au-dessus et au-dessous l'horizontale, est proportionnelle à la partie variable des frais de transport, partie dépendant de la distance.*

Le coût de transport de l'unité cubique se compose d'une valeur constante et d'une variable directement proportionnelle à la distance.

$$p = k + k'd$$

Donc les frais de transport d'un petit élément ΔM (Pl. I, fig. 3) jusqu'au passage de remblai en déblai seront proportionnels au produit $e.\Delta M$, ou à l'élément de surface hâché. Par suite les frais de transport du déblai total AB jusqu'au passage de remblai en déblai sont proportionnels à $\Sigma\ (e.\Delta M)$ ou à la surface ABD.

On prouvera de la même manière que les frais de transport du même cube de terre dès le passage de remblai en déblai jusqu'au point d'application en remblai, sont proportionnels à la surface BCD.

Donc les frais totaux seront proportionnels à la surface ABCD, ce qu'il fallait démontrer.

11. Nous remarquerons en passant que la surface ABD ou $\Sigma\ (e.\Delta M)$ est l'expression du moment statique de toute la masse M par rapport au passage de remblai en déblai; par conséquent elle est proportionnelle au produit du cube total M par la distance de son centre de gravité (en déblai) au même passage.

La même remarque s'applique à la surface BCD qui est proportionnelle au produit du même cube M par la distance du passage au centre de gravité de la masse en remblai. Ensorte que nous avons une démonstration de la règle généralement connue de Gauthey que : « les frais de transport d'un volume quelconque de terre » sont proportionnels au produit de cette masse par la distance de » ses centres de gravité en déblai et en remblai. »

12. Nous avons dit, § 7, que nous tracions une horizontale *quelconque* HH ; or il est évident qu'en changeant sa position on change la division et l'importance des sections de transport.

En remontant l'horizontale de compensation on augmente les sections de vallées, c'est-à-dire, celles où les transports ont lieu en avant, et on diminue les sections de montagne ou celles où les déblais sont transportés en arrière.

Le contraire a lieu si on descend l'horizontale.

Il dépendra donc uniquement des circonstances locales et de notre gré, de modifier les transports; suivant les cas de laisser plus ou moins de terres superflues en un point; ou de prendre plus ou moins de terre dans une chambre d'emprunt; d'augmenter les transports dans un sens ou dans l'autre, etc.

13. Il est cependant une question qui se pose tout naturellement :

Comment les sections de transport doivent-elles être déterminées pour que les frais soient un minimum?

En vertu du théorème du § 10 ci-dessus, la question revient à celle-ci :

Quelle position doit avoir l'horizontale de compensation pour que la somme des surfaces des montagnes et des vallées déterminées par cette ligne soit un minimum ?

En remontant l'horizontale HH d'une quantité infiniment petite Δh, la surface des montagnes sera diminuée de Δh fois la somme des bases de toutes les montagnes; et la surface des vallées sera augmentée de Δh fois la somme des largeurs de toutes les vallées.

La diminution obtenue sera donc

$$\Delta h\ [\Sigma\ (\text{bases de mont.}) - \Sigma\ (\text{larg}^{\text{rs}}\ \text{de vallées})].$$

S'il ne doit pas être possible de diminuer la somme des surfaces par un déplacement de l'horizontale HH, c'est-à-dire, si elle donne déjà le minimum demandé, la quantité ci-dessus doit être nulle, ce qui a lieu si

$$\Sigma\ (\text{bases de mont.}) = \Sigma\ (\text{larg}^{\text{rs}}\ \text{de vallées}).$$

D'où la règle importante :

Les sections de transport d'un terrassement horizontal doivent être déterminées de telle sorte que la somme des longueurs de toutes les sections dans lesquelles on transporte en avant soit égale à la somme des longueurs des sections où l'on transporte en arrière.

CAS GÉNÉRAL : Voie en pente.

14. Les formules de transport ordinairement employées sont de la forme

$$p = k + k' (d + 12h)$$

où p = prix de l'unité cubique transportée,
k et k' = coefficients constants pour chaque mode de transport,
d = distance horizontale de transport,
h = id. verticale id.

Mais on ne considère la valeur de h que pour les transports en remontant; pour ceux en descendant ou horizontalement la variable est tout simplement d.

Soit i la pente de la voie. — On a

$$h = id \text{ d'où } d + 12h = d\,(1 + 12i).$$

Ensorte que le coût d'un transport en remontant une pente i à une distance d est égal à celui d'un transport horizontal à une distance $d\,(1 + 12i)$.

Ce que nous venons de dire pour le cas particulier sera donc applicable intégralement au cas général, en réduisant les transports en remontant en transports horizontaux à une distance

$$d\,(1 + 12i).$$

15. Dans notre exemple (Pl. II et III) les sections I (montagne) et VI (vallée) sont proportionnelles aux frais de transport des terres superflues (voir § 17 ci-après).

Les sections où les transports ont lieu en remontant sont

la section I où $i = 0{,}0458$
id. IV où $i = 0{,}01054$
et id. VI où nous supposons en moyenne $i = 0{,}02$.

L'horizontale HH devra donc satisfaire à la condition :

$$\text{base I } (1 + 12.0{,}0458) + \text{base III} + \text{base V}$$
$$= \text{base II} + \text{base IV } (1 + 12.0{,}01054) + \text{base VI } (1 + 12.0{,}02).$$

16. *1re remarque.* Toutes les opérations indiquées ci-dessus se feront graphiquement avec beaucoup de rapidité.

On multiplie par $(1 + 12i)$ au moyen de triangles semblables ayant un angle commun dont les côtés adjacents sont entr'eux comme $1 : 1 + 12i$.

Au moyen d'un compas on obtient facilement la différence entre les largeurs de vallées et les bases de montagnes. — Deux, ou au plus trois essais suffisent en général pour déterminer la position exacte de l'horizontale de compensation. — En effet dans la fig. 3 Pl. II, une première horizontale passant par A donne un excédant des largeurs de vallées égal à AX, une deuxième horizontale passant par B donne par contre un excédant des bases de montagnes égal à BY. — Joignant X et Y, l'intersection Z avec la verticale AB donne la position de l'horizontale cherchée HH.

En général la ligne XZY est une courbe, mais dans notre exemple elle est une droite, parce qu'il ne se rencontre aucun point d'inflexion de la courbe des transports entre les deux hypothèses.

2me remarque. Si la pente était uniforme sur toute la longueur du projet (ou si l'on pouvait, sans erreur sensible, adopter une pente moyenne) l'horizontale de compensation devrait satisfaire à la condition

$$\frac{\Sigma\ (\text{bases de montagnes})}{\Sigma\ (\text{largeurs de vallées})} = \frac{1}{1 + 12i} \qquad \text{si l'on}$$

descend en avant; et à

$$\frac{\Sigma\ (\text{largeurs de vallées})}{\Sigma\ (\text{bases de montagnes})} = \frac{1}{1 + 12i} \qquad \text{si l'on}$$

remonte en avant.

3me remarque. Le théorème du § 10 pourra s'appliquer aussi dans le cas général en ayant soin de multiplier par $(1 + 12i)$ la surface des sections où les transports ont lieu en remontant.

Représentation des chambres d'emprunt et des dépôts en cavalier.

17. Soit (Pl. I, fig. 4) $ABCDE$ la courbe des transports; $A'B'$ le plan de la voie et Z celui de la chambre d'emprunt.

Dans notre figure nous supposons que de Z dans la direction de B' les transports se fassent suivant la ligne la plus directe mb', ma'; et que par contre dans la direction de A' les chariots doivent toujours passer par le point e'.

Les distances de transport se porteront horizontalement de chaque point correspondant de la courbe dans la direction de la chambre d'emprunt. Ainsi nous faisons :

$ap = a'm$	$cr = c'm$	$ev = e'n$
$bq = b'm$	$ds = dt = d'o$	$fx = e'n + e'f'$, etc., etc.

et point par point nous déterminons une nouvelle courbe de transport $pqrsdtvxu$ et deux nouvelles sections. L'une $Adtu$ est une section de montagne de la 1re partie; l'autre $psdB$ une section de vallée de la 2me partie. — Il doit être tenu compte de ces deux sections dans la détermination des horizontales de compensation.

Il est à remarquer que dans la figure, puisque toutes les terres doivent passer par le point e', le tronçon vu est une verticale.

La représentation des dépôts en cavalier a lieu d'une manière parfaitement identique.

Calcul des frais de transport.

18. La position de l'horizontale de compensation étant déterminée conformément aux règles ci-dessus, il ne nous reste plus qu'à calculer les frais de transport.

Suivant le matériel employé (brouette, camion, tombereau, wagon, etc.) les sections se subdiviseront en tranches horizontales, dont les bases auront une longueur égale à la distance maximum de transport pour chaque engin. (Pl. I, fig. 5.)

Il ne faudra pas oublier que dans les transports en remontant ces bases seront plus courtes et qu'elles ne doivent être égales qu'à la distance maximum divisée par $(1 + 12i)$.

Dans notre exemple (Pl. III, fig. 3) nous avons supposé que les transports à la brouette se font jusqu'à $92{,}50^{m}$; et de là au tombereau. Cette limite est donnée en égalant les deux formules :

(brouette) $p = 0^{fr},005\, d$
(tombereau) $p = 0^{fr},35 + 0^{fr},0012\, d$
dans lesquelles p = prix du $m\Delta$ transporté,
et d = distance de transport en mètres.

En vertu du § 10 et en tenant compte de la 3me remarque du § 16, on pourrait obtenir les frais de transport en planimètrant les surfaces des diverses sections, et multipliant le résultat par un coefficient dépendant des échelles du dessin et du matériel de transport.

19. Mais il nous paraît plus simple de transformer graphiquement (par une méthode que nous rappelons au § suivant) les diverses surfaces en triangles et en trapèzes équivalents, *en ayant soin que la hauteur du triangle ou du trapèze représente* TOUJOURS *le cube à transporter*.

La distance horizontale moyenne de transport sera la $^1/_2$ base dans un triangle, et la $^1/_2$ somme des bases dans un trapèze.

Dans les transports en remontant il faudra multiplier cette distance par $(1 + 12i)$ pour l'appliquer aux formules ou pour chercher le prix correspondant dans un tableau.

Transformation des surfaces.

20. Supposons que la courbe présente les sommets 1, 2, 3, 4, 5 et 6 (Pl. I, fig. 6) et qu'on veuille déterminer une ligne compensant les surfaces à droite et à gauche.

Pour cela on mène

2 2′	parallèle	à	3 1′
3 3′	»	à	4 2′
4 4′	»	à	5 3′
5 5′	»	à	6 4′

La ligne 6 5′ sera la ligne demandée.

Pour ne pas surcharger inutilement le dessin, il suffit de déterminer successivement les points 2′ 3′ 4′ 5′ sans tracer les parallèles.

Tableau II (Voir Pl. 9).

Tableau II.

CALCUL DU DÉBLAI TOTAL.

Nᵒˢ des PROFILS	SECTIONS par profils.	SECTIONS consécutives ajoutées.	SECTIONS moyennes.	LONGUEURS réduites.	VOLUMES
	m^2	m^2	m^2	m	m^3
0.-	0 —				
		0 20	0 10	40 —	4 —
0.40	0 20				
		5 40	2 70	47 52	128 304
0.8752	5 20				
		8 20	4 10	52 48	215 168
1.40	3 —				
		3 —	1 50	60 —	90 —
2.-	0 —				
		-	-	-	-
2.01	0 —				
		1 80	0 90	49 —	44 100
2.50	1 80				
		1 80	0 90	25 —	22 500
2.75	0 —				
-	-	-	-	-	-
4.28	0 —				
		15 20	7 60	28 79	218 813
4.5679	15 20				
		24 80	12 40	43 21	535 804
5.-	9 60				
		9 60	4 80	42 —	201 600
5.42	0 —				
-	-	-	-	-	-
6.7	0 —				
		0 80	0 40	10 —	4 —
6.8	0 80				
		1 20	0 60	9 —	5 400
6.89	0 40				
		0 60	0 30	3 —	0 900
6.92	0 20				
		0 80	0 40	4 —	1 600
6.96	0 60				
		3 —	1 50	24 —	36 —
7.20	2 40				
		4 40	2 20	8 —	17 600
7.28	2 —				
		3 60	1 80	12 —	21 600
7.40	1 60				
		9 20	4 60	42 50	195 500
7.825	7 60				
		23 20	11 60	29 64	343 824
8.1214	15 60				
		15 60	7 80	8 86	69 108
8.21	0 —				
				TOTAL, m^3	2155.821

fig 1.

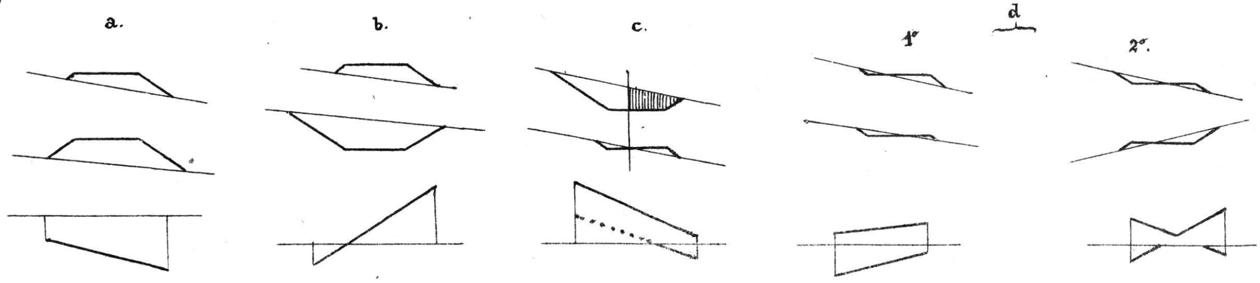


fig 2.

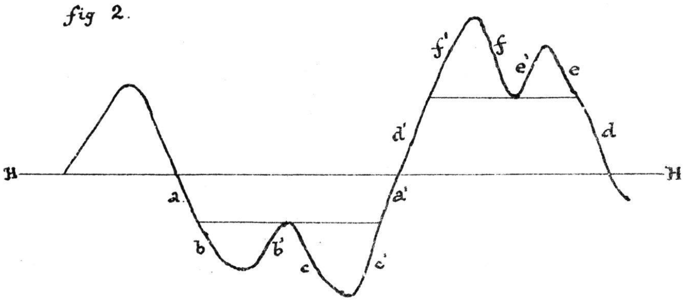


fig. 3.

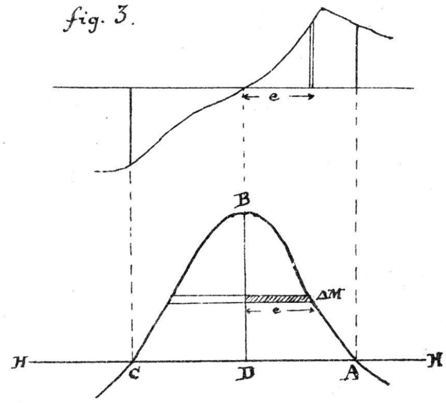


fig 4

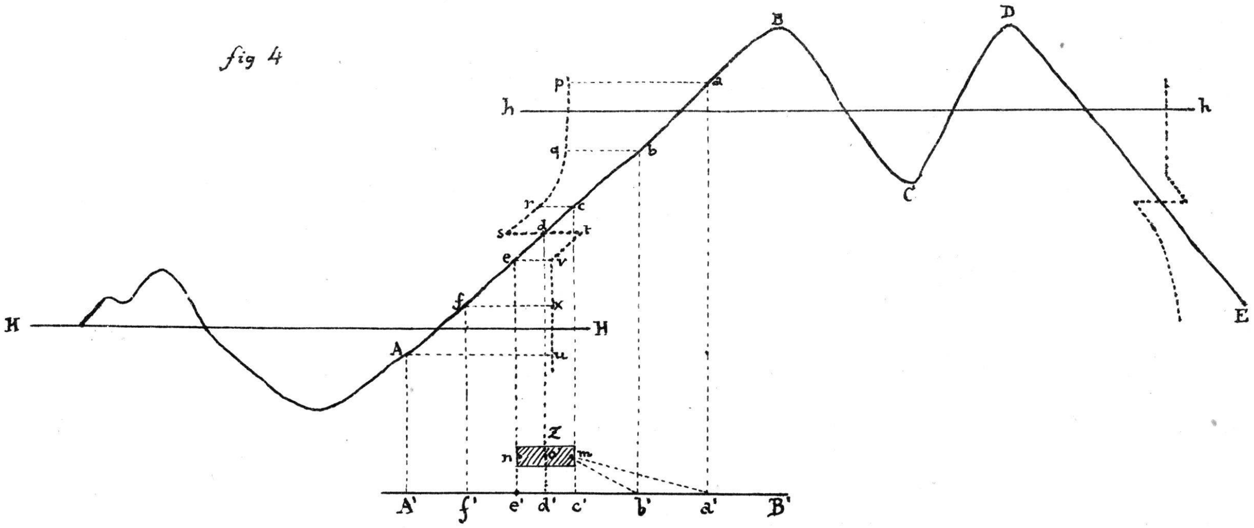


fig. 5

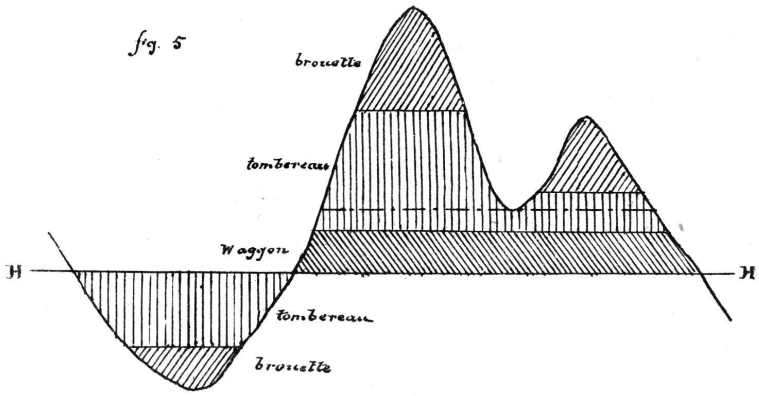
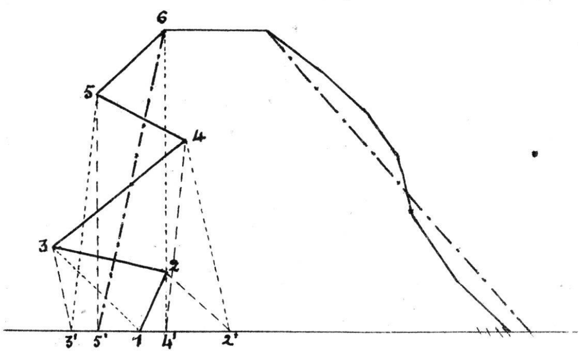
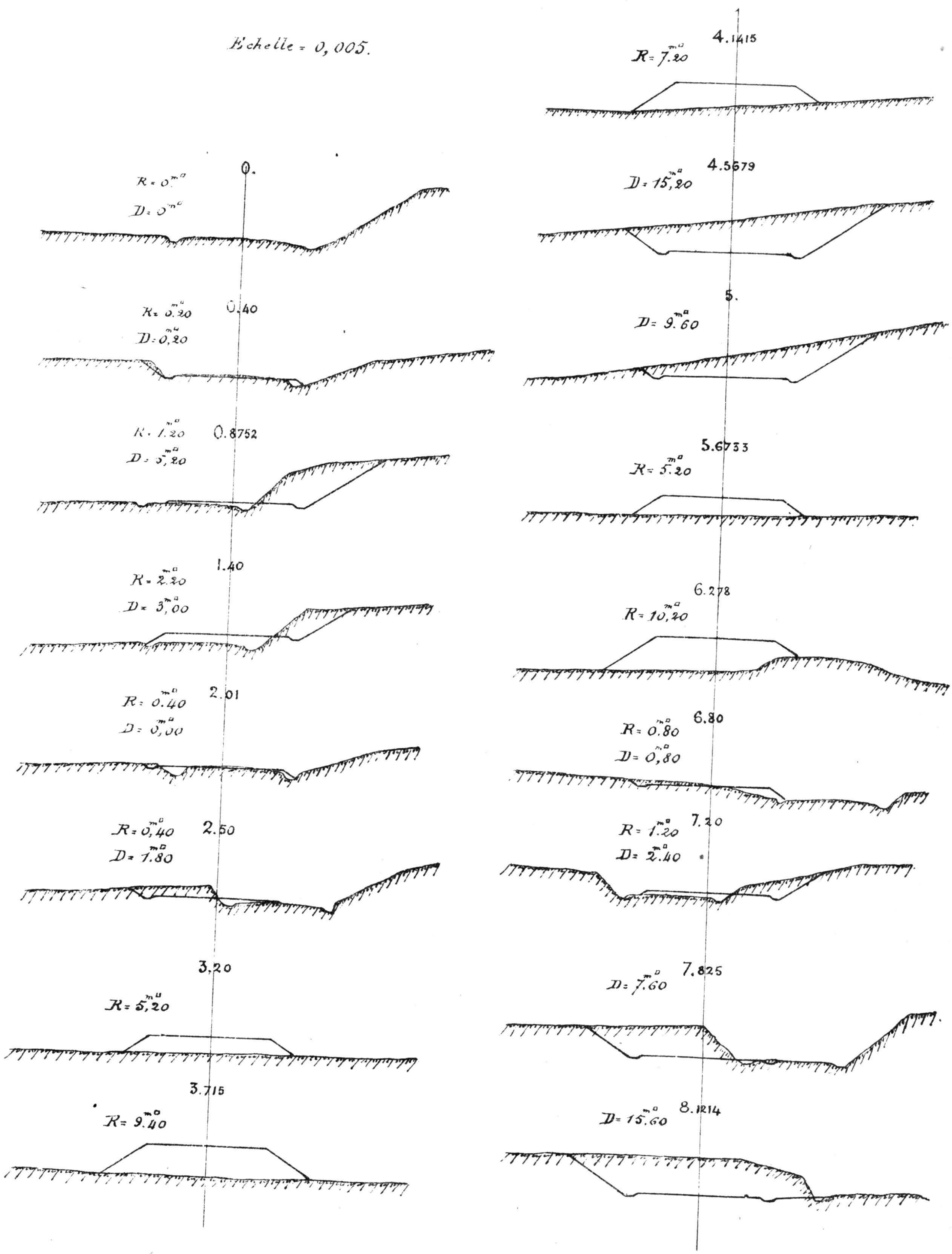


fig 6.



Emery


Echelle = 0,005.
0.
R = 0^m²
D = 0^m²
0.40
R = 0.20
D = 0,20
0.8752
R = 1.20
D = 5,20
1.40
R = 2.20
D = 3,00
2.01
R = 0.40
D = 0,00
2.50
R = 0,40
D = 1.80
3.20
R = 5,20
3.715
R = 9.40
4.1415
R = 7.20
4.5679
D = 15,20
5.
D = 9.60
5.6733
R = 5.20
6.278
R = 10,20
6.80
R = 0.80
D = 0,80
7.20
R = 1.20
D = 2.40
7.825
D = 7.60
8.1214
D = 15.60

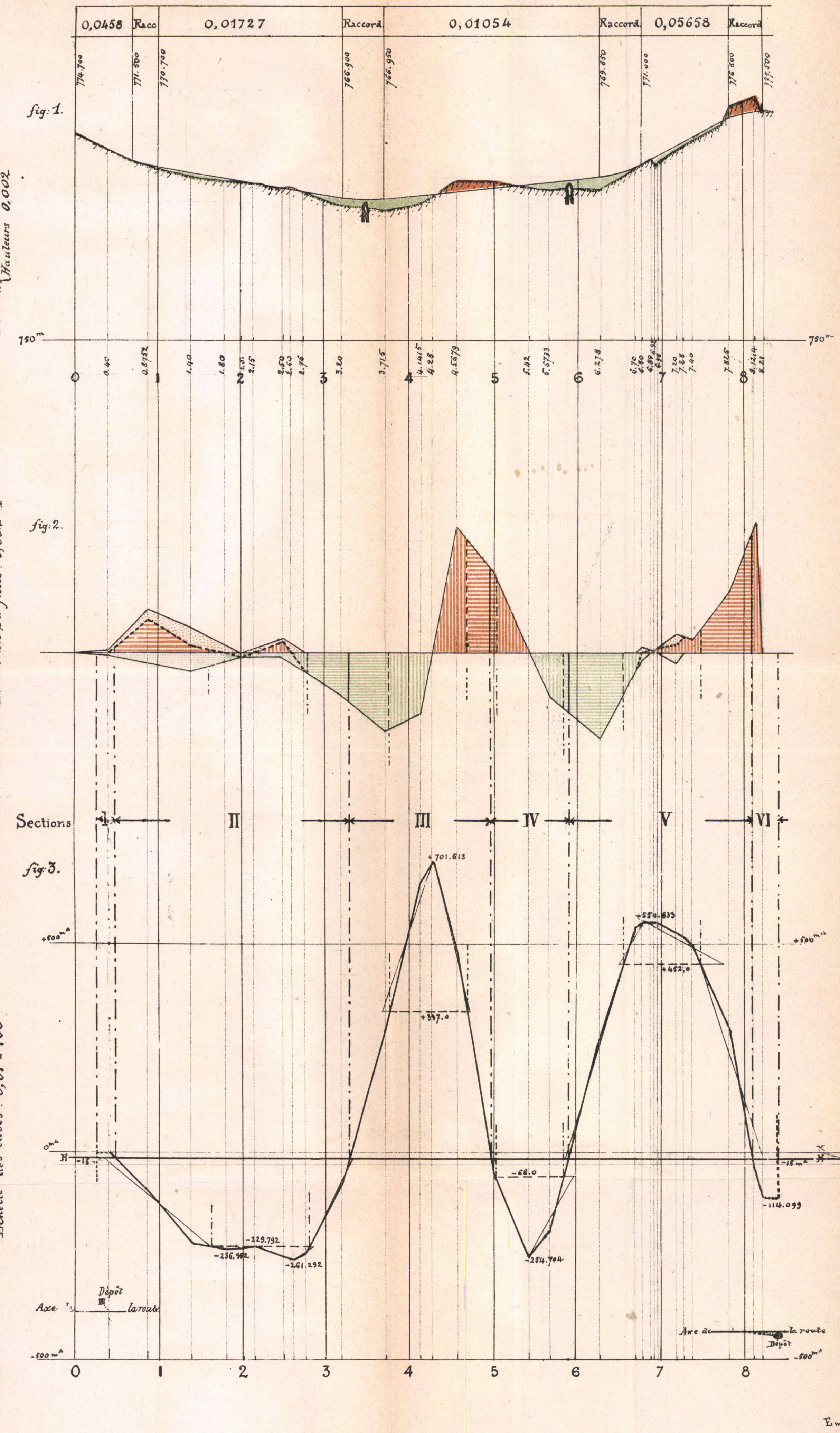

0,0458
Raco
0,01727
Raccord
0,01054
Raccord
0,05658
Raccord
fig: 1.
Echelles { Longueurs 0,0002 / Hauteurs 0,002
750m
fig: 2.
Echelle des Surfaces : 0,002 = 1m²
Sections
I
II
III
IV
V
VI
fig: 3.
+701.513
+558.633
+452,0
+397,0
-68,0
-236.982
-229.792
-261.292
-254.704
-114.099
+500m³
-500m³
Echelle des cubes : 0,01 = 100m³
Dépôt
Axe de la route
0 1 2 3 4 5 6 7 8
Emery

Tableau III.

PRIX DU TERRASSEMENT.

DÉSIGNATION DES OUVRAGES	DISTANCES moy. de transport $d\,(1+12i)$	QUANTITÉS d'ouvrages.	PRIX d'unité.		DÉPENSES	
	m.	m³	fr.	c.	fr.	c.
Ire SECTION. Superflu, transport à la brouette	30 —	15 —	0	15	2	25
IIe SECTION. 1er transport à la brouette . .	27 —	7 140	0	14	1	—
2d id. id. . . .	34 —	31 500	0	17	5	36
Transport au tombereau . . .	208 —	214 792	0	61	131	02
IIIe SECTION. Transport à la brouette . . .	53 —	364 513	0	27	98	42
id. au tombereau . . .	131 —	352 —	0	51	179	52
IVe SECTION. Transport à la brouette . . .	53 50	53 —	0	27	14	31
id. au tombereau . . .	99 50	186 704	0	47	87	75
Ve SECTION. Transport à la brouette . . .	63 —	102 633	0	32	32	84
id. au tombereau . . .	165 —	467 —	0	55	256	85
VIe SECTION. Superflu, transport à la brouette	29 —	99 099	0	15	14	96
Fouille et charge du déblai total	.	2155 821	0	35	754	54
Places de dépôt	.	8 —	8	—	64	—
Dressement et semis des talus	.	.	.	.	157	18
			TOTAL		1800	—

$$\text{Prix par mètre courant} = \frac{1800}{821} = \text{environ 2 fr. 20 c.}$$