

10

PROFILS, CUBATURES

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la représentation d'un terrain en trois dimensions ; en effet, sur une carte, sur un plan, l'altimétrie est une donnée essentielle.

1 COURBES DE NIVEAU

1.1 Définitions

Les courbes de niveau, appelées isophyses, sont destinées à donner sur une carte un aperçu du relief réel. Une courbe de niveau (fig. 10.1.) est l'intersection du relief réel avec un plan horizontal d'altitude donnée en cote ronde (généralement un nombre entier).

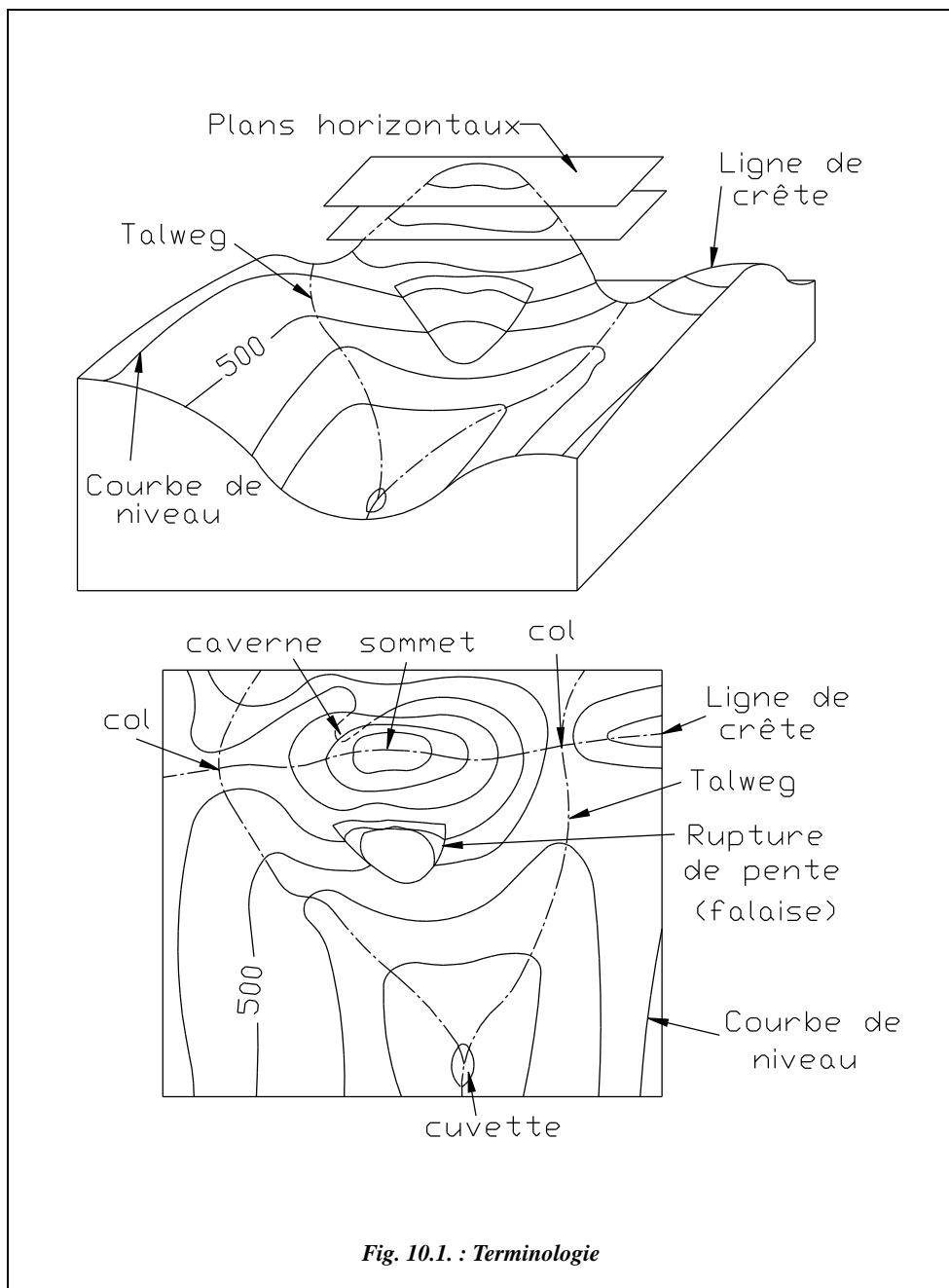
Les courbes sont équidistantes en altitude ; leur espacement horizontal dépend de la déclivité du terrain à représenter et de l'échelle du plan ou de la carte. Sur une carte IGN au 1/100 000, les plans horizontaux sont distants de 20 m en altitude et les courbes principales y sont repérées tous les 100 m. Les **courbes maîtresses** sont en trait continu épais et placées toutes les cinq courbes ; les **courbes ordinaires** sont en trait continu moyen, les courbes intercalaires en trait interrompu fin.

On visualise en trois dimensions le terrain dessiné à plat sur la carte. Cela est renforcé sur les cartes par des coloriages pour souligner les lignes de crête : ils représentent l'ombre créée par une lumière fictive qui viendrait du nord-ouest de la carte. Sur l'exemple ci-après, on peut lire sur la vue en plan les pentes du terrain naturel ; on repère les **sommets**, les **cols topographiques**, les **cuvettes** (ou dolines), les **ruptures de pente**.

On distingue les zones en forte déclivité, où les courbes de niveau sont très proches, des zones de moindre déclivité, où les courbes sont plus espacées.

Plusieurs courbes qui fusionnent en une seule indiquent une falaise verticale (fig. 10.1.).

Une courbe de niveau est une courbe fermée qui ne peut croiser une autre courbe de niveau d'altitude différente, sauf dans une caverne, auquel cas il y a deux croisements (voir fig. 10.1.).



Pour renforcer la lisibilité d'un plan, sont ajoutées :

- les **lignes de crête** en rouge qui joignent les sommets et les cols ; elles figurent les lignes de partage des eaux qui séparent deux bassins-versants contigus dont les eaux s'écoulent vers deux talweg différents. En zone peu accidentée, on parle de ligne de faite ;
- les **lignes de talweg** (en allemand chemin de fond de vallée) en bleu rejoignent les points les plus bas d'une vallée et figurent les lignes d'écoulement des eaux. La ramification de ces lignes se fait de l'aval vers l'amont et donne sur le plan une figure nommée le **chevelu** (voir chap. 8, § 2.4.6.2).

Les lignes de crête et de talweg sont perpendiculaires aux courbes de niveau.

Les courbes de niveau des cartes à petite échelle ne sont pas levées directement sur le terrain : ce serait fastidieux. Elles sont tracées par restitution photogrammétrique (voir chap. 7, § 5).

Dans un lever de détails, les courbes de niveau sont toujours une information supplémentaire importante ; elles sont donc souvent tracées. Elles sont généralement levées avec des stations totales par la création de **semis de points**, puis tracées automatiquement sur informatique.

1.2 Principe de l'interpolation

Comprendre l'interpolation permet de choisir judicieusement le nombre et la position des points à lever.

L'altitude au point M situé entre les courbes de niveau 530 et 540 est déterminée en considérant le terrain en pente constante entre A et B. Les points A et B sont les points les plus proches de M sur les courbes de niveau 530 et 540 ; ici $\Delta H = 10$ m. La pente au point M vaut :

$$p = \frac{\Delta H}{ab}.$$

La distance ab est la distance réelle, c'est-à-dire la distance mesurée sur le plan et divisée par l'échelle du plan. L'altitude de M est :

$$H_M = H_A + am \cdot \frac{\Delta H}{ab}.$$

On peut appliquer cette dernière formule avec les distances mesurées sur le plan ; le facteur d'échelle se simplifie.

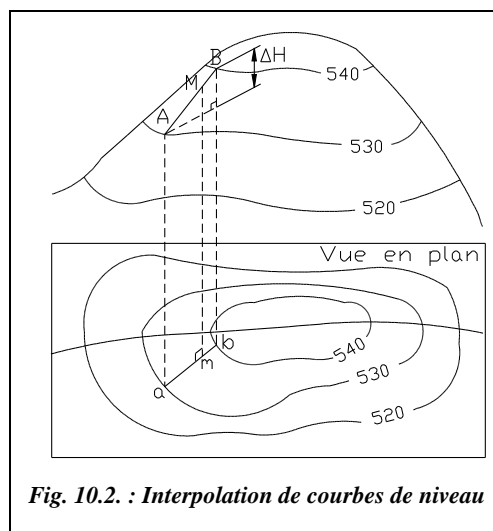


Fig. 10.2. : Interpolation de courbes de niveau

1.3 Lever de courbes de niveau

L'interpolation implique de collecter sur le terrain un point à chaque changement de pente. En pratique, on lève les lignes de changement de pente, les crêtes et pieds de talus et on densifie le nombre de points dans les zones de forte déclivité. Dans tous les cas, il faut collecter un nombre suffisant de points pour que les interpolations faites soient proches de la réalité.

La densité à l'hectare des points nécessaires pour obtenir une représentation fiable du terrain est fonction des changements de déclivité du terrain et de l'échelle du plan. Le tableau ci-après donne quelques ordres de grandeur.

Échelles	1/100	1/200	1/500	1/1 000	1/2 000	1/5 000
Très accidenté	400	250	150	80	40	20
Accidenté	340	200	130	70	35	15
Peu accidenté	250	150	80	40	20	10

Il existe différentes méthodes de levé de courbes, à savoir :

- **le lever des lignes caractéristiques** (crêtes, talwegs, ruptures de pente), dont on déduit les courbes de niveau. Ce type de lever doit être complété par des semis de points dans les versants entre les lignes caractéristiques. C'est une méthode qui donne des résultats satisfaisants et qui est adaptée aux stations totales ;
- **le quadrillage du terrain** : lorsque le terrain est peu accidenté, on peut construire un quadrillage régulier constitué de mailles carrées (par exemple 6 m × 6 m pour un plan au 1/100) dont une direction correspond à la ligne de plus grande pente du terrain. Le quadrillage peut être implanté au moyen d'une simple équerre optique et le lever altimétrique peut être réalisé au niveau, ce qui fait de cette méthode une alternative intéressante lorsque l'on ne dispose pas de station ;
- **le filage de courbes** : il consiste à suivre la courbe de niveau avec une mire pour marquer puis lever tous les points d'une courbe : c'est un procédé long.

Il faut ajouter à ces méthodes le lever par photographies aériennes et restitution photogrammétrique (voir chap. 7, § 5), qui permettent d'obtenir rapidement les courbes de niveau pour une zone de très grande étendue et avec une précision homogène à la modélisation du terrain et l'échelle de représentation choisie.

1.4 Report de courbes de niveau

1.4.1 Report manuel

Ce travail fastidieux est maintenant pris en charge par les logiciels de topographie cependant il est formateur d'avoir effectué au moins un report manuel pour assimiler la discrétisation du terrain.

Le tracé manuel consiste à réaliser l'interpolation inverse de celle qui est détaillée au paragraphe 1.2. Par exemple, la figure 10.3-a. représente la courbe d'altitude 129,50 m à partir d'un semis de points. On repère les points qui encadrent cette courbe : 17 et 19 sont au-dessus, 18, 20 et 24 sont au-dessous. Les points 31 et 23 sont trop éloignés : ils ne seront pas pris en compte. Il reste à déterminer par interpolation des points de passage de la courbe sur les quatre segments 17-18, 17-20, 19-20 et 19-24 ; ces segments sont choisis de manière à être les plus courts et les plus perpendiculaires possibles à la future courbe de niveau ; on écarte par exemple le segment 17-24.

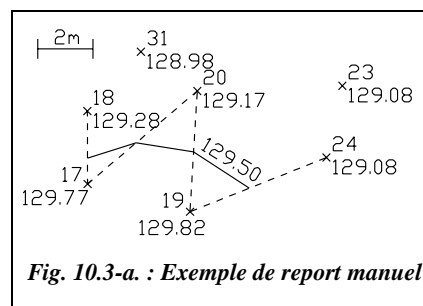


Fig. 10.3-a. : Exemple de report manuel

Le calcul d'interpolation est réalisé en utilisant la formule suivante :

$$am = (H_M - H_A) \frac{ab}{\Delta H}$$

avec $H_M = 129,50$ m. Ce qui donne pour notre schéma le tableau ci-contre :

Points	$H_M - H_A$ (m)	ΔH (m)	ab (m)	am (m)
17-18	0,22	0,49	2,6	1,2
17-20	0,33	0,60	5,2	2,9
19-20	0,33	0,65	4,4	2,2
19-24	0,42	0,74	5,3	3,0

Avec un peu d'habitude et si la précision recherchée l'autorise, on peut aussi faire mentalement cette interpolation et placer approximativement les points de passage de la courbe. Il faut garder présent à l'esprit que ces courbes ne sont qu'un modèle approximatif et qu'il est illogique de faire des calculs au centimètre près.

Il existe une méthode graphique plus rapide dont la précision est généralement largement suffisante. L'opérateur dispose d'une feuille A4 sur laquelle il dessine des lignes horizontales régulièrement espacées (fig. 10.3-b.), numérotées par exemple de 0 à 100. Afin de placer la courbe de niveau 129,50 m entre les points 19 et 24 (fig. 10.3-a. et 10.3-b.), il dispose la feuille A4 de façon que la ligne 129,08 m passe sur le point 24, ce positionnement s'effectue à vue puisque la ligne 129,08 m n'existe pas, et de façon que la ligne 129,82 m passe par le point 19 ; il reste à piquer l'intersection de la droite 19-24 et de la ligne 50 de la feuille A4 pour obtenir un point de passage de la courbe 129,50 m.

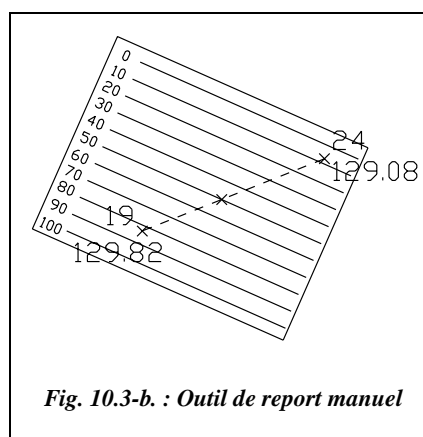
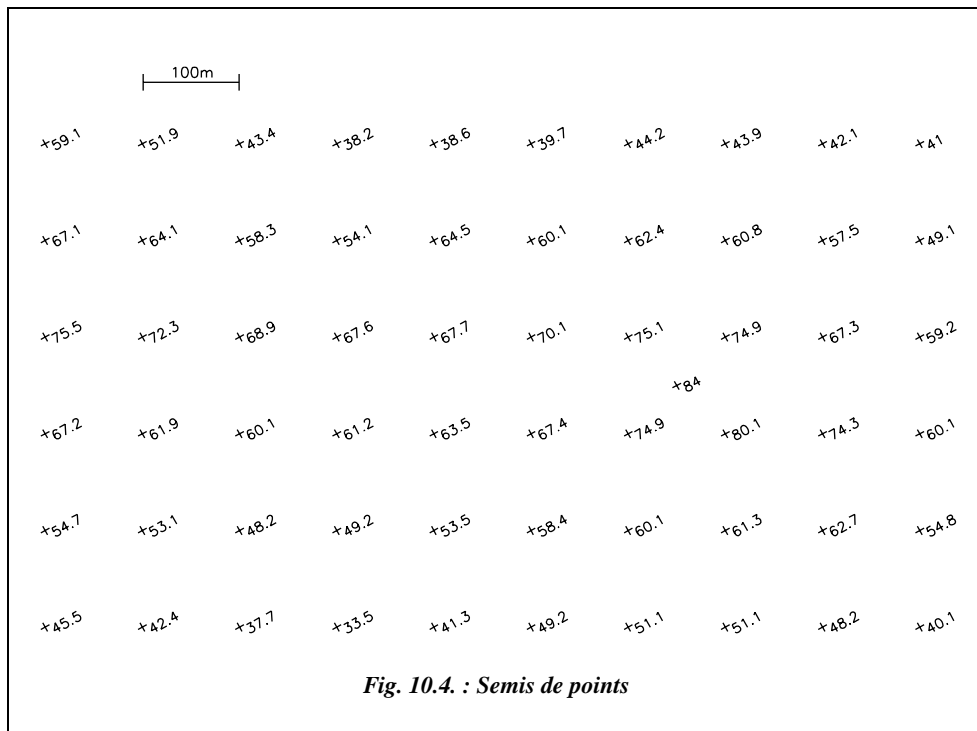


Fig. 10.3-b. : Outil de report manuel

Application (correction au paragraphe 1.5)

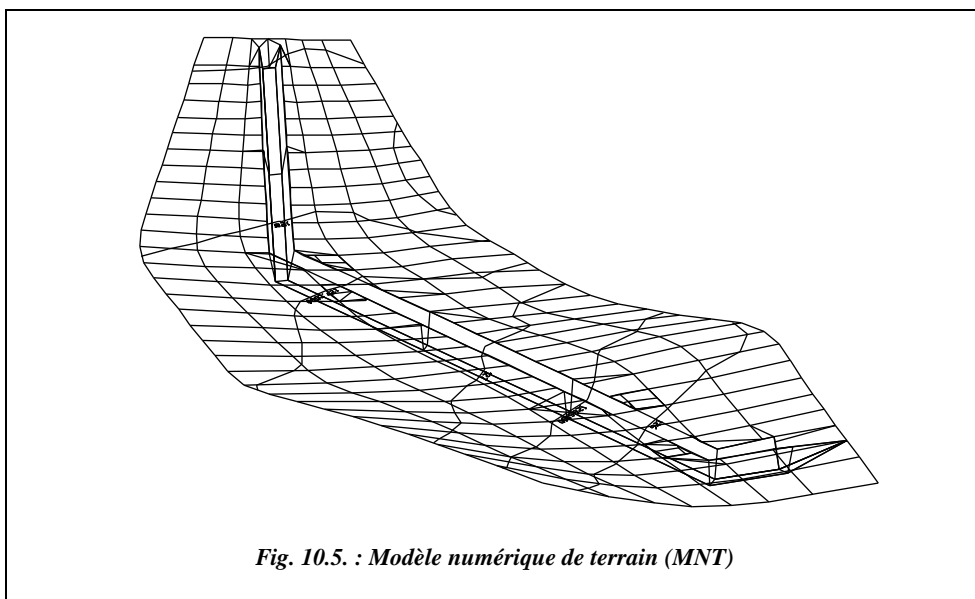
Tracez les courbes de niveau tous les 10 m à partir du levé de la figure 10.4. Le maillage est de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$.



1.4.2 Report automatique

Les logiciels de topographie proposent un tracé automatique des courbes de niveau à partir d'un semis de points.

Ce tracé fonctionne plus ou moins sur le même principe que le tracé manuel : création d'un maillage du terrain, soit constitué de triangles s'appuyant sur les points levés, soit constitué de mailles régulières (fig. 10.5.) s'appuyant sur le contour de la zone à mailler ; dans ce cas, le programme détermine l'altitude des nœuds du maillage en s'appuyant sur le semis de points. Le logiciel détermine ensuite tous les points d'intersection entre les côtés du maillage et les plans horizontaux d'altitude entière pour tracer les courbes de niveau point par point.



Une vue en perspective d'un maillage de terrain est présentée ci-dessus (fig. 10.5.), en vert, fait à partir d'un semis de points. On distingue les courbes de niveau calculées par le logiciel ainsi qu'une tranchée inscrite dans le maillage du terrain.

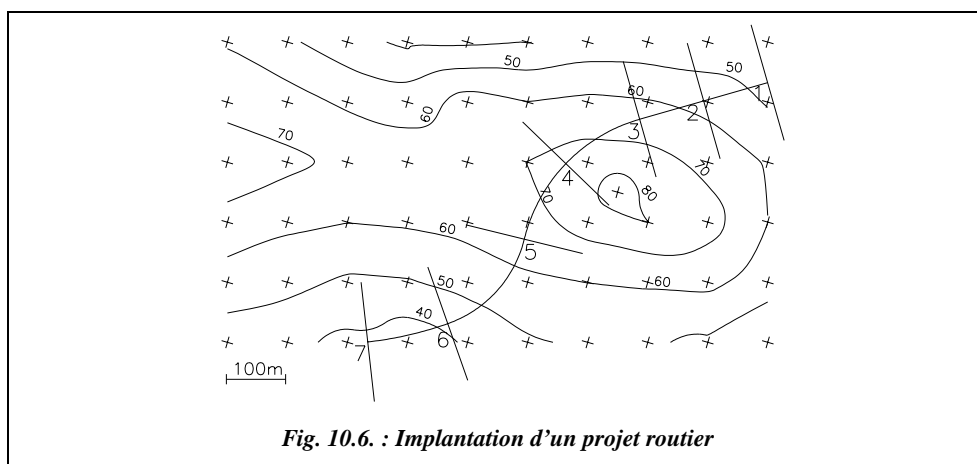
1.5 Applications au tracé de profils en long et en travers

Lors d'un avant-projet sommaire de l'étude d'un projet routier, le projeteur a besoin d'une vue en coupe du terrain naturel suivant l'axe du projet qu'il étudie : ce graphique est le profil en long du terrain naturel (voir l'étude complète au paragraphe 2). Des vues en coupe perpendiculairement à l'axe sont aussi nécessaires à l'étude : ce sont les profils en travers. Ces deux types de graphiques permettent d'obtenir, après plusieurs études un tracé « idéal » répondant aux impératifs du projet que sont la visibilité, l'emprise sur le terrain, la déclivité maximale, le moindre coût, etc. Le rôle de l'informatique est alors déterminant grâce au gain de temps sur les tracés des profils et les calculs des cubatures (voir le paragraphe 2.1), mais aussi parce qu'il est possible d'envisager une programmation qui aboutisse automatiquement, en plusieurs passes de calcul, au tracé « idéal » en fonction de paramètres fixés par le projeteur.

Application

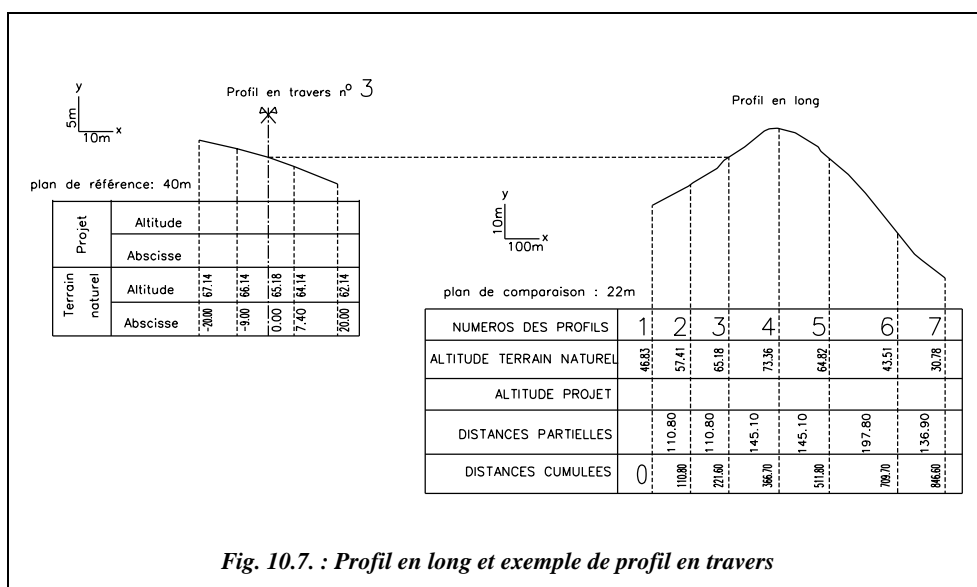
La figure 10.6. donne une correction de l'exercice du paragraphe 1.4. Le tracé en plan de l'axe d'un projet routier et huit profils en travers y sont ajoutés. Déduisez-en le profil du terrain naturel le long de l'axe du projet et le profil en travers.

Les courbes de niveau de la figure 10.6. sont obtenues par une modélisation à base de triangles qui correspond au mode de tracé manuel par interpolation. Les courbes brutes, qui sont des assemblages de segments, sont ensuite lissées de manière à obtenir une représentation plus conventionnelle.



Réponse

Les distances horizontales sont mesurées sur le plan : cela donne les profils de la figure 10.7. (voir au paragraphe 2 la représentation complète et normalisée des profils en long et en travers).



1.6 Digitalisation de courbes de niveau

La digitalisation, ou numérisation, d'un plan est la retranscription sur un support informatique des points connus, des détails et des courbes de niveau permettant de bénéficier des facilités de calcul graphique d'un logiciel de DAO. Cette opération au moyen d'une table ou tablette (fig. 10.8.) à digitaliser sur laquelle est fixé le plan à numériser. Différents modèles existent du format A4 au format A0. Les points sont entrés dans l'ordinateur en les pointant les uns après les autres avec un dispositif (fig. 10.9.) ressemblant à une souris et muni d'un réticule en forme de croix. Le déplacement du dispositif de pointage à l'écran est capté par le support magnétique de la tablette alors que, pour une souris, c'est généralement la rotation d'une boule retranscrite par des capteurs optiques qui permet le déplacement d'une mire à l'écran.

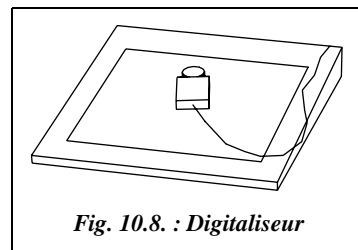


Fig. 10.8. : Digitaliseur



Digitalisation sur AutoCAD : il faut disposer d'une tablette à digitaliser et de la version complète d'AutoCAD ou bien d'AutoCAD LT 95. Depuis la version 13, on peut utiliser en même temps une tablette à digitaliser et une souris. Sur la version complète d'AutoCAD, la commande *TABLETTE* gère les tablettes à digitaliser. Ses options sont les suivantes :

- option configurer (*CFG*) : définition des zones de menu pour utiliser la tablette en tant que dispositif de pointage, c'est-à-dire comme une souris. Un dessin associé au menu standard d'AutoCAD (ou AutoCAD LT) est fourni avec le logiciel, il peut être imprimé et fixé sur la tablette ;
- option calibrer (*CAL*) : en s'appuyant sur au moins deux points, le calibrage permet d'adapter le repère du plan à numériser au repère général du logiciel. La routine de calibrage détermine un facteur d'échelle, un angle de rotation et un vecteur de translation qui ramènent les déplacements du curseur dans le repère (X, Y) général (voir tome 2, chap. 1, § 10.3). On peut entrer plus de deux points pour améliorer la précision de cette transformation. Les points d'appui les plus intéressants sont les croix du quadrillage (ou un couple de points connus en coordonnées) qui permettent de travailler directement en repère Lambert. À défaut, une droite de longueur connue permettra d'effectuer une restitution en repère local sans contrôle.

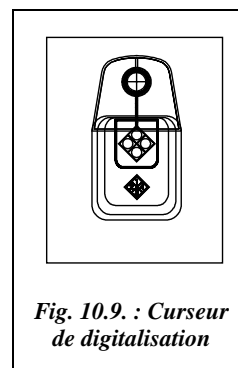


Fig. 10.9. : Curseur de digitalisation

Depuis la version 13 d'AutoCAD, une nouvelle possibilité de digitalisation est offerte : il est possible de **recupérer en fond de plan l'image scanérisée** (numérisée au moyen d'un scanner) d'un plan existant sur papier et redessiner par dessus les éléments intéressants. Le fond de plan arrive sous forme d'image point par point (ou Bitmap de format .BMP, .TIF, .GIF, etc.). Il faut ensuite faire subir au plan digitalisé une adaptation

d'échelle, une translation et une rotation pour rétablir les dimensions réelles en s'appuyant, par exemple, sur le quadrillage. L'avantage de cette méthode est qu'il est possible de suivre à l'écran le travail de digitalisation et de vérifier que l'on n'oublie pas de points. On peut aussi utiliser les possibilités des fonctions de zoom du logiciel.

1.6.1 Utilisation de la digitalisation

Cette opération est à réserver aux études sommaires ou à l'obtention de fonds de plan peu précis. La précision obtenue est fonction des paramètres suivants :

- le **jeu du papier** : déformation du papier due au vieillissement et aux variations hygrométriques de l'air qui est plus grande dans le sens du laminage du papier et qui entraîne des déformations en planimétrie du terrain représenté et les éventuelles déformations de photocopie ;
- la **précision du pointé** avec le curseur, d'autant moins précise que l'échelle du support papier est petite ;

la précision de la connaissance dans un repère général ou local **d'au moins deux points** du terrain sur lesquels on s'appuie pour restituer la digitalisation à échelle réelle.

1.6.2 Digitalisation des courbes de niveau

Deux solutions sont possibles pour obtenir des courbes de niveaux numérisées :

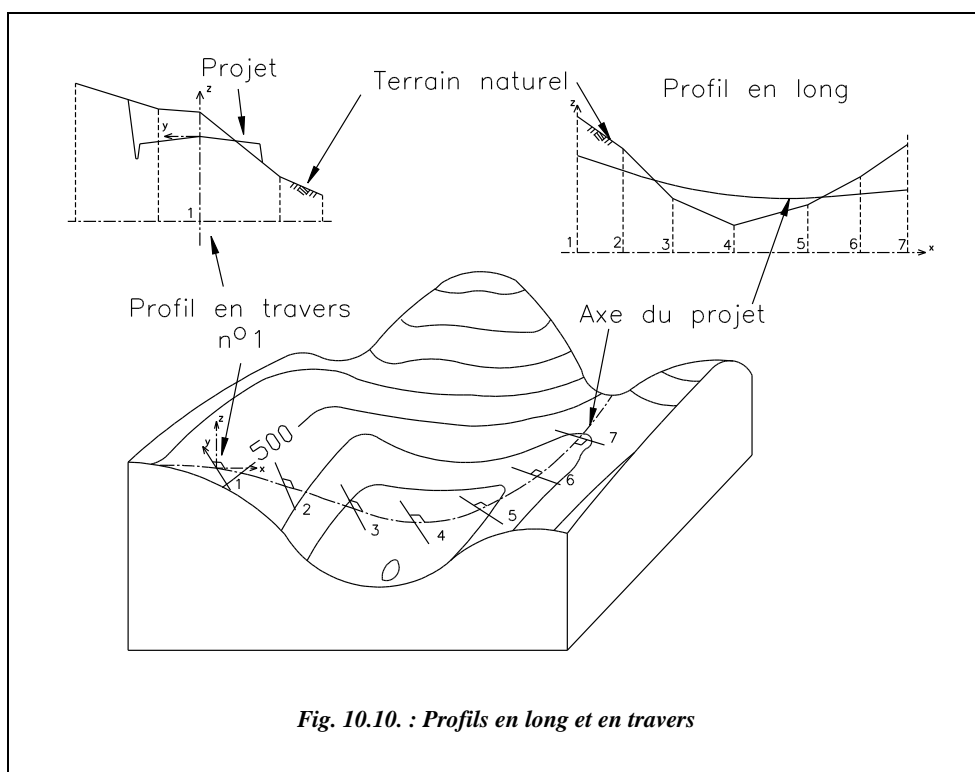
- digitaliser **directement les courbes de niveau** puis utiliser un logiciel capable de modéliser le terrain à partir des courbes de niveau (ADTOPO permet cette modélisation). Il faut veiller à dessiner chaque courbe (utiliser la commande *POLYLIGNE* option Arc) à son altitude : pour cela, il est possible de changer de SCU. Par exemple, avant de digitaliser la courbe de niveau 80 m, changez de SCU par *SCU* ↵ *Origine* ↵ *0,0,80* ↵. Revenez ensuite toujours au SCU général. Une fois la courbe terminée, elle peut être lissée (commande *PEDIT* ↵ option Lissage ou Pspline) ;
- Digitaliser un **semis de points** cotés sur le plan support et modélisez le terrain à partir de ceux-ci comme si l'on partait d'un ensemble de points levés. Chacun devant être entré à une altitude donnée, il faut utiliser le **filtre .XY**. Une séquence de digitalisation se déroule ainsi : *POINT* ↵ *.XY* ↵ (cliquez le point) Z demandé (entrez l'altitude du point puis validez par ↵). Cette séquence peut être automatisée en entrant une macro-commande dans un bouton de la boîte à outils. Pour cela, cliquez sur un bouton de la boîte à outils avec le bouton de droite de la souris et modifiez la ligne de commande ainsi : *POINT* □ *.XY* □ puis validez avec OK (□ représente un espace qui simule la touche entrée ↵).

Il est également possible d'affecter cette commande à un bouton de la souris (ou du dispositif de pointage de la tablette) : dans le fichier ACAD.MNU, modifiez ainsi la troisième ligne de la section *****BUTTONS1** : *^C^CPOINT* □ *.XY* □

2 PROFILS EN LONG ET EN TRAVERS

2.1 Définitions

Un profil en long est la représentation d'une coupe verticale suivant l'axe d'un projet linéaire (route, voie ferrée, canalisation, etc.). Le profil en long est complété par des profils en travers qui sont des coupes verticales perpendiculaires à l'axe du projet. Leur établissement permet en général le calcul des mouvements de terres (cubatures) et, par exemple, permet de définir le tracé idéal d'un projet de manière à rendre égaux les volumes de terres excavés avec les volumes de terre remblayés. L'informatique joue ici aussi un rôle déterminant puisque ces calculs sont répétitifs. En effet, il faut plusieurs essais lors d'une recherche de tracé avant d'arriver au tracé définitif.



Par exemple, sur la figure 10.10., un projet routier est figuré en trait d'axe. Le profil en long constitue un développement suivant son axe sur lequel sont représentés le terrain naturel et le projet. Les profils en travers, régulièrement espacés, sont une vue en coupe qui fournit l'inscription de la route dans le relief perpendiculairement à l'axe.

2.2 Le profil en long

Le profil en long est un **graphique** (fig. 10.11.) sur lequel sont reportés tous les points du terrain naturel et de l'axe du projet. Il est établi en premier lieu. On s'appuie sur ce document pour le dessin des profils en travers (fig. 10.12.). Ce graphique s'oriente de la gauche vers la droite ; les textes se rapportant au projet sont en rouge, écriture droite et ceux qui se rapportent au terrain naturel en noir et en italique (si l'on travaille exclusivement sur un support en couleur, on peut ne pas utiliser la représentation en italique). Distances et altitudes sont données en mètres au centimètre près.

On choisit en général un plan de comparaison d'altitude inférieure à l'altitude du point le plus bas du projet ou du terrain naturel. Ce plan de comparaison est l'axe des abscisses du graphique sur lequel sont reportées les distances horizontales suivant l'axe du projet. Sur l'axe des ordonnées, sont reportées les altitudes.

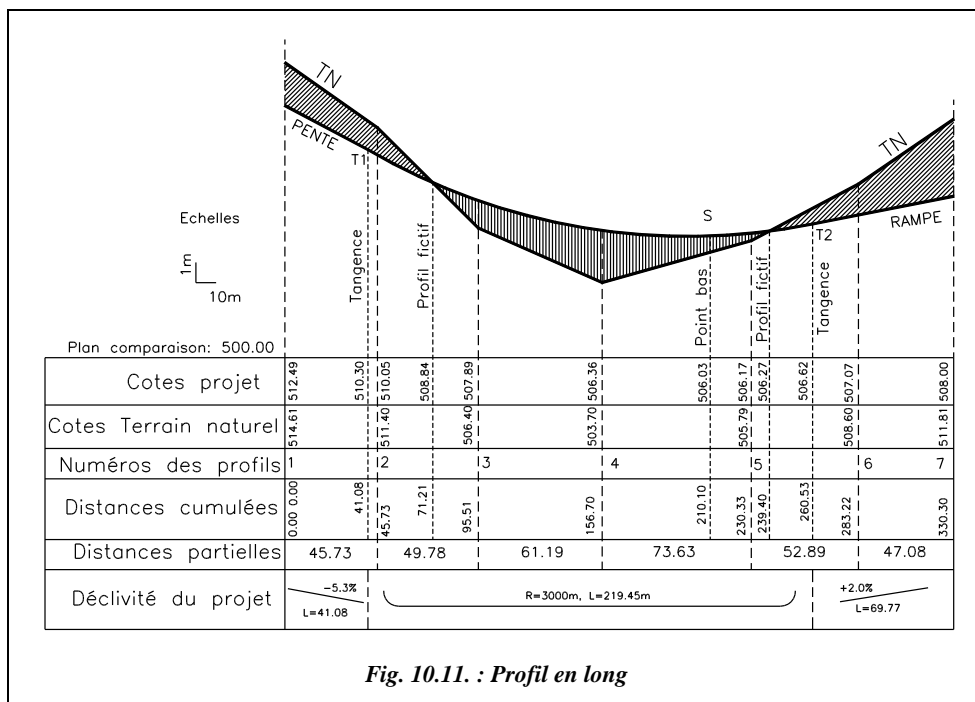
Les échelles de représentation peuvent être différentes en abscisse et en ordonnées (en rapport de l'ordre de 1/5 à 1/10) de manière à souligner le relief qui peut ne pas apparaître sur un projet de grande longueur.

On dessine tout d'abord le terrain naturel (TN), généralement en trait moyen noir. Son tracé est donné par la position de chaque point d'axe d'un profil en travers, le terrain naturel étant supposé rectiligne entre ces points. On reporte en même temps dans le cartouche des renseignements en bas du graphique : les distances horizontales entre profils en travers dites distances partielles, les distances cumulées (appelées aussi abscisses curvilignes) depuis l'origine du projet et l'altitude de chaque point.

On positionne ensuite le projet (trait fort rouge) en tenant compte de tous les impératifs de visibilité : pente maximale (voir chap. 9, § 6), égalité des déblais et des remblais, etc. Ce tracé donne des points caractéristiques comme les points de tangence entre droites et parties courbes, les points hauts (ou sommets situés à la fin d'une rampe et au début de la pente suivante), les points bas (situés à la fin d'une pente et au début de la rampe suivante). Une rampe est une déclivité parcourue en montant dans le sens du profil ; une pente est parcourue en descendant. Un parcours horizontal est aussi appelé palier. Les déclivités des parties droites, les longueurs projetées des alignements droits et des courbes ainsi que les rayons de courbure sont reportés en bas du cartouche ; on reporte également les longueurs développées des courbes.

Les cotes des points caractéristiques du projet sont reportées dans les lignes de renseignement en bas du graphique : distance à l'origine du projet (distance cumulée) et altitude. Dans la phase d'avant-projet sommaire, elles sont mesurées sur le graphique du profil en long. Elles sont calculées exactement en phase de projet d'exécution, à partir du profil en long et des profils en travers réels, levés sur le terrain. La manière la plus efficace de faire ce calcul est de construire le profil sur un logiciel de DAO et d'y lire les coordonnées des intersections (voir l'exemple du paragraphe 2.4).

Les calculs des positions des points caractéristiques se ramènent à des intersections droites-droites, droites-cercles ou droites-paraboles dans le repère associé au profil en long.



On peut colorier de manière différente les **remblais** (en rouge) et les **déblais** (en bleu).

Les profils en travers fictifs (surface nulle) dont on doit déterminer la position (abscisse et éventuellement l'altitude) sont les points d'intersection entre le terrain naturel et l'axe du projet ; ces profils particuliers sont utiles pour le calcul des cubatures. Il faut connaître leur position en abscisse par rapport aux deux profils en travers qui les encadrent.

Remarque

Veillez à ne pas confondre le système de coordonnées dans lequel sont repérés le profil en long et le profil en travers (x , y associé au graphique, l'axe des y représentant les altitudes) avec le repère général (ou local) dans lequel les points du terrain sont exprimés pour les implantations (altitudes cotées sur l'axe des Z).

Attention au fait que l'on utilise des échelles différentes en abscisse et en ordonnée. Les pentes sur le graphique sont multipliées par un facteur d'échelle qui est le rapport de l'échelle des ordonnées sur celle des abscisses. Les courbes sont aussi transformées mais de manière non homothétique (puisque seule l'échelle en ordonnée varie) : un cercle devient donc une ellipse et les rayons de courbure sur le graphique n'ont plus

rien à voir avec la réalité... Cette erreur peut facilement être évitée par une construction graphique avec un logiciel de DAO : la construction est faite à l'échelle 1 en abscisse et en ordonnée (on en déduit les cotes réelles) et, ensuite, pour les besoins de la représentation, on peut multiplier l'échelle des ordonnées par 5 ou 10. (voir l'exemple traité au paragraphe 2.4).

2.3 Le profil en travers

Les profils en travers (sections transversales perpendiculaires à l'axe du projet) permettent de calculer les paramètres suivants :

- la position des points théoriques d'entrée en terre des terrassements ;
- l'assiette du projet et son emprise sur le terrain naturel ;
- les cubatures (volumes de déblais et de remblais).

Le profil en travers (fig. 10.12.) est représenté en vue de face pour une personne qui se déplacerait sur l'axe du projet de l'origine à l'extrémité du projet. La voie de gauche doit donc se situer sur la partie gauche du profil.

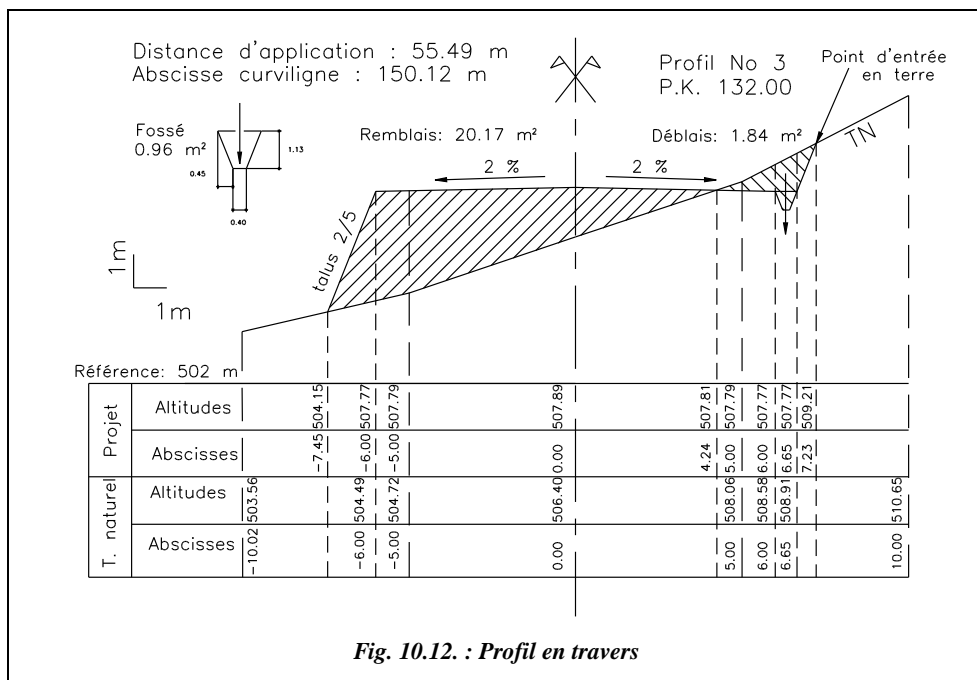
On commence par dessiner le terrain naturel à partir d'un plan horizontal de référence qui n'est pas forcément celui du profil en long, de manière à obtenir le profil en travers à l'échelle maximale sur le format choisi. L'échelle de représentation est de l'ordre de 1/100 à 1/200 (jusqu'à 1/50 pour les voies les moins larges). Il n'y a pas d'échelle différente en abscisse et en ordonnée de manière à pouvoir mesurer directement sur le graphique des longueurs dans toutes les directions ou bien des surfaces (mesure sur papier au planimètre ou sur informatique, par exemple à l'aide de la commande *AIRE* d'AutoCAD). L'abscisse de chaque point du terrain naturel (ou du projet) est repérée par rapport à l'axe du profil en travers (donc négative à gauche et positive à droite), l'ordonnée est toujours l'altitude du point. Cette représentation logique introduit un repère (x, y, z) non direct (fig. 10.10.).

On y superpose ensuite le gabarit type du projet (largeur de chaussée, accotements, fossés et pentes de talus) à partir du point d'axe dont l'altitude a été déterminée sur le profil en long. Sur informatique, ce gabarit est un dessin type (sous forme de bloc) mis en place à chaque profil. En dessin manuel, on utilise un fond de plan.

Cela permet de calculer la position des **points d'entrée en terre** (voir chap. 9, § 7).

Les conventions de couleur et d'écriture doivent être les mêmes que pour le profil en long.

Les fossés ne sont pas repérés comme les autres points caractéristiques puisque, de manière à simplifier le calcul, ils n'interviennent pas dans la décomposition de la surface en triangles et trapèzes. Ils sont calculés séparément.



Une flèche verticale dans l'axe du fossé indique si l'eau s'écoule vers le profil suivant (flèche vers le bas) ou vers le profil précédent (flèche vers le haut) dans le sens du profil en long.

On porte sur chaque profil la surface de remblais et de déblais (voir § 2.5).

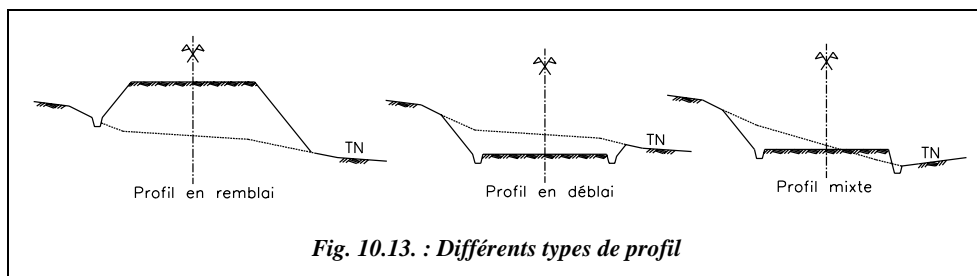
Le numéro du profil et sa position (P.K. ou point kilométrique) dans le projet doivent figurer sur le graphique.

Les surfaces en déblai et en remblai sont calculées et portées sur le graphique ainsi que la distance d'application du profil (voir § 2.5).

On indique aussi l'abscisse curviligne à l'axe du projet (distance suivant l'axe depuis l'origine du projet).

Les calculs nécessaires à la détermination des points d'entrée en terre, s'ils sont effectués manuellement, peuvent être obtenus par l'intersection de droites dans le plan du graphique. De même, les surfaces peuvent être calculées manuellement en utilisant les coordonnées (x et z) des sommets ou au moyen d'un planimètre. Le moyen le plus efficace reste le dessin à échelle réelle sur ordinateur et la lecture directe des coordonnées et surfaces (voir exercice du paragraphe 2.4).

Il existe trois types de profils en travers (fig. 10.13.) : les profils en remblai, en déblai ou bien les profils mixtes.



Notons que la présence du fossé sur ces différents types de profils n'est nécessaire qu'en cas d'impossibilité d'écoulement naturel des eaux. Par exemple, comparez le profil en remblai et le profil mixte.

2.4 Application

La construction graphique sur ordinateur à l'aide d'un logiciel de DAO facilite le travail du projeteur puisque les calculs sont effectués simultanément au dessin : il suffit de relever les positions des points dans un repère associé au profil. De plus, les éléments répétitifs tels les symboles, les cartouches, le profil type de la chaussée peuvent être mis en mémoire sous forme de bloc et rappelés si besoin.

Énoncé : à partir des données du tableau suivant, déterminez le profil en long qui minimisera les cubatures et les mouvements de terre en essayant d'équilibrer les volumes de remblai et de déblai, sachant que la déclivité ne doit pas dépasser 4 %, que tout raccordement dans le sens du profil en long est réalisé par un arc de cercle d'un rayon d'au moins 2 500 m et que la route est horizontale au départ et à la fin de la portion de projet étudiée. La largeur de la chaussée est de 10 m, le dévers du revêtement est de 2 % de part et d'autre de l'axe de la chaussée, la pente des talus de 2/1 (voir chap. 9, § 6.1.1), les fossés ont une largeur de 20 cm en fond pour une profondeur de 30 cm.

Profils	Dh (m)	-10.00 m	-5.00 m	0.00 m	5.00 m	10.00 m
1	0,00	110,95	111,05	110,82	110,76	110,45
2	50,10	110,74	110,45	110,21	110,02	109,74
3	100,30	108,13	107,95	107,78	107,14	106,69
4	150,90	106,05	105,32	104,98	104,32	103,78
5	201,20	105,77	104,37	103,75	103,14	102,31
6	251,50	104,96	104,52	104,12	103,78	103,64
7	301,90	106,84	106,77	106,67	106,54	106,33
8	351,50	109,87	109,79	109,75	109,76	109,84
9	402,00	110,01	110,20	110,25	110,37	110,58
10	450,00	109,87	110,34	110,60	110,94	111,47

Le tableau précédent donne les altitudes relevées à chaque profil en travers : à l'axe, colonne 0,00 m, à - 5,00 m et - 10,00 m à gauche de l'axe et à 5,00 m et 10,00 m à droite de l'axe. *Dh* représente la distance horizontale cumulée à chaque profil depuis l'origine.

Résolution graphique à l'aide d'AutoCAD LT



Commencez par la création des **calques** utiles au dessin : un calque PROJET en rouge, un calque TN en vert. Réglez l'unité de sortie sur papier pour que l'on puisse dessiner directement en mètres : case de dialogue IMPRIMER du menu FICHER, dans l'encadré **Échelles**, entrez les valeurs suivantes :

1000 mm tracés = 1 unité dessin (1 000 mm dans la réalité = 1 unité écran).

2.4.1 Préparation du dessin

Créez un **style de texte** PROJET dont le texte sera en italique et la hauteur des caractères de 2,5 mm sur papier. Commande *STYLE* ↵ nom du style *PROJET* ↵ police *ROMANS.SHX* ↵ hauteur *0.0025* ↵ angle d'inclinaison *15* ↵ (degrés) ; pour toutes les autres questions, répondez par ↵ qui valide les valeurs par défaut.

Créez de même un style TN qui servira à tous les textes relatifs au terrain naturel : commande *STYLE* ↵ nom du style *TN* ↵ police *ROMANS.SHX* ↵ hauteur *0.0025* ↵ angle d'inclinaison *0* ↵. Ceci permettra de dessiner les éléments de mise en page (textes et cartouches) en mètres ; par exemple, un format A4 aura pour dimensions 0,21 m par 0,297 m. Nous utiliserons ensuite les possibilités de l'**espace papier** pour régler l'échelle de sortie des profils.

Remarque

L'espace papier d'AutoCAD, dans lequel on bascule en cochant l'option ESPACE PAPIER du menu VUE, permet de faire de la **mise en page** ; on peut y juxtaposer plusieurs fenêtres qui sont autant de vues différentes des objets dessinés dans l'espace objet. On peut ainsi représenter un seul et même objet vu de plusieurs perspectives différentes. C'est la facilité de la mise à l'échelle grâce à la commande *Zoom* option *XP* spécialement conçue pour préparer la sortie sur papier.

2.4.2 Dessin du profil en long du terrain naturel

Dans le calque TN, dessinez en polyligne le profil du terrain naturel : *POLYLIGNE* ↵ du point *0,110.82* ↵ au point *50.1,110.21* ↵ au point *100.3,107.78* ↵ etc. au point *450,110.6* ↵

Dessinez le plan de comparaison, par exemple à 102 m, et la position des profils en travers : *LIGNE* ↵ du point *0,102* ↵ au point *450,102* ↵ puis *LIGNE* ↵ de l'*EXTrémité* de chaque tronçon de la polyligne à *PERpendiculaire* à la droite figurant le plan de comparaison.

La visibilité du relief doit être accentuée pour la recherche du tracé du profil en long de la route. Multipliez par 10 la hauteur de chaque droite verticale marquant un profil en travers. Commande **ECHELLE**, sélection de l'objet : cliquez sur une droite, point de base : **INTersection** entre la droite et le plan de comparaison, facteur d'échelle **10**.

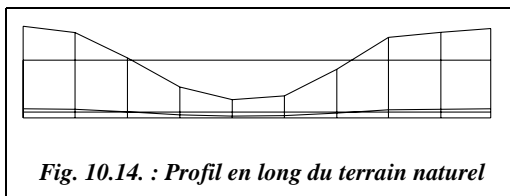


Fig. 10.14. : Profil en long du terrain naturel

Répétez ceci pour chaque profil (voir le résultat fig. 10.14.). Pour cette série de tracé où les accrochages **EXTrémité** et **INTersection** sont très utilisés, passez en accrochage permanent (touche **F3** ou menu **OPTIONS / ACCROCHAGE AUX OBJETS**, cochez les deux cases **Extrémité** et

Intersection). N'oubliez pas de désactiver cet accrochage permanent en fin d'opération, par exemple, en appuyant à nouveau sur la touche **F3**.

2.4.3 Choix du tracé du profil en long du projet



Pour réaliser au mieux l'égalité des remblais et déblais, il faut trouver une droite horizontale qui partage le terrain naturel en deux surfaces égales. Ceci peut se réaliser graphiquement (par calcul : voir le redressement de limite au chapitre 3 du tome 2, § 3). Dans le calque **PROJET**, dessinez à vue une ligne séparant la figure en deux surfaces équivalentes (fig. 10.14.), puis mesurez la surface de remblai et les surfaces de déblai avec la commande **AIRE** : cela peut être très rapide si on est en accrochage permanent **INTersection** et si on utilise l'option **Ajouter** pour obtenir directement la somme des deux surfaces de déblais qui sont séparées. Par approximations successives, en positionnant une ligne à 157,61 m on obtient deux surfaces de l'ordre de 5 190 m². Dessinez la position réelle de cette droite qui est à l'altitude $102 + (157,61 - 102) / 10 = 107,561$ m ; cela peut se faire graphiquement en appliquant la commande **ECHELLE** avec un facteur d'échelle de 0.1.

Il reste à positionner le tracé du profil en long de la route le plus symétriquement possible par rapport à cette droite.

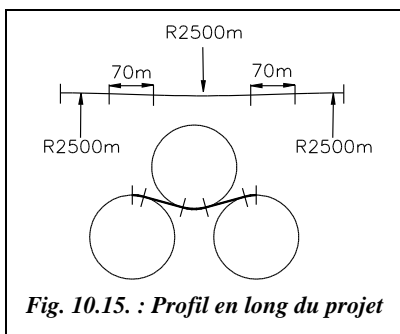


Fig. 10.15. : Profil en long du projet

Le tracé est choisi en fonction de critères de visibilité, de déclivité maximale, du type de route, etc. (voir chap. 9, § 6.1). Nous choisissons pour simplifier un tracé symétrique composé de trois parties circulaires d'un rayon de 2 500 m, raccordées par des alignements droits d'une longueur de l'ordre de 70 m (voir fig. 10.15.).

Dessin du cercle de gauche : commande **CERCLE** de centre l'**EXTrémité** gauche de la ligne de partage et de rayon 2 500.

Dessin du cercle de droite : *COPIER*↵ le cercle précédent (option *Dernier objet dessiné*) de l'*EXTrémité* gauche de la ligne de partage vers l'*EXTrémité* droite.

Demandez un *Zoom Etendu* pour voir l'ensemble du dessin.

Dessin du cercle central : *CERCLE*↵ option *TTR*↵ (tangent, tangent, rayon), tangent aux deux autres cercles en partie supérieure, rayon 2 500↵

Pour obtenir des alignements droits entre les parties circulaires, *DEPLACER*↵ le cercle central de 0.5 m vers le haut puis dessinez deux segments tangents aux deux cercles : *LIGNE*↵ de *Tangent* à *Tangent...* (voir figure 10.15. : l'allure réelle est en haut de la figure, seuls les arcs de cercles de raccordement sont dessinés ; en bas, un schéma permet de mieux visualiser l'allure du raccordement). Pour réduire les cercles aux arcs de cercles, utilisez la commande *COUPURE*↵ (option *P* pour premier point) ; attention au sens positif de rotation, donnez les intersections comme points de coupure.

2.4.4 Positionnement du profil du projet sur le terrain naturel et lecture des points caractéristiques



On cherche à positionner le profil en long du projet (fig. 10.16. et 10.17.) symétriquement sur la droite de partage du terrain naturel (fig. 10.14.). Pour cela, *DEPLACER*↵ l'ensemble du profil du projet depuis le *MILieu* de l'un des deux segments de raccordement de 70 m au point *PERpendiculaire* à la droite de partage (à sa position réelle). Il ne reste plus qu'à lire les altitudes du projet au niveau de chaque profil en travers. Cela donne :

Profils	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z projet (m)	109,84	109,34	107,94	106,38	105,39	105,42	106,46	107,99	109,38	109,84

Il faut aussi connaître l'abscisse des **profils fictifs** : elles sont de 91,29 m, altitude 108,22 m et 292,31 m, altitude 106,18 m. On les ajoute en bleu sur le profil réel.

Pour exagérer le profil en long du projet de manière à améliorer la lisibilité, procédez de même que pour le terrain naturel au paragraphe 2.4.2. On déconnecte ensuite le profil réel du profil agrandi en déplaçant ce dernier en mode *ORTHO* vers le haut de l'écran (voir fig. 10.16.).

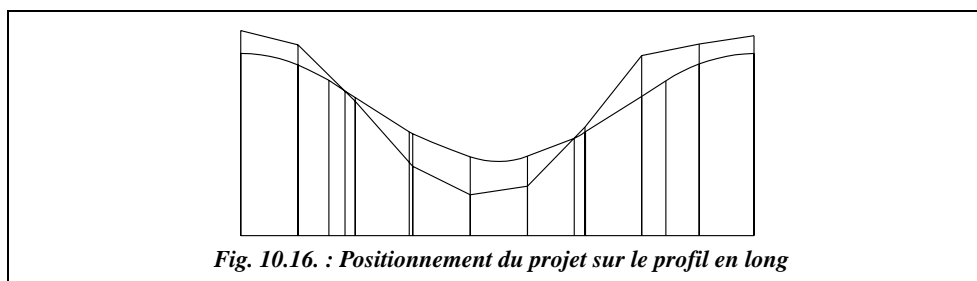


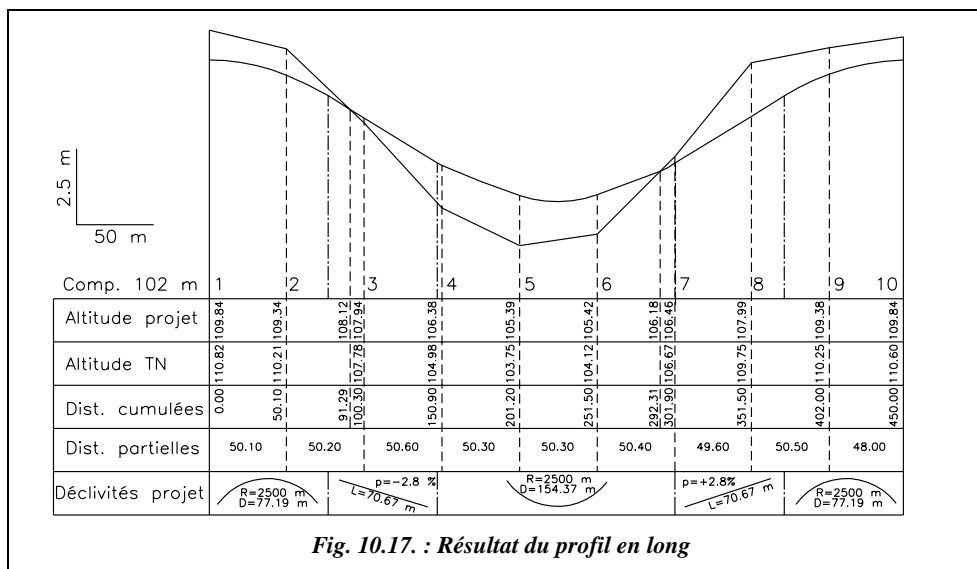
Fig. 10.16. : Positionnement du projet sur le profil en long

2.4.5 Dessin du profil complet en espace papier



Passez en espace papier, menu VUE / ESPACE PAPIER. Pour sortir ce profil sur format A4 horizontal, on dessine dans le calque 0 un **RECTANGLE** du point 0,0 au point @0.297,0.21 (format A4 horizontal 29,7 cm par 21 cm). En espace papier, l'espace objet apparaît à l'intérieur de fenêtres qui sont dessinées avec la commande **FMULT** (ou menu VUE / FENETRE EN MOSAÏQUE / 1 FENETRE). Dessinez cette fenêtre dans le format A4 en laissant une marge de 1 cm. L'espace objet complet apparaît dans cette fenêtre mais les objets à l'intérieur de la fenêtre ne sont pas directement accessibles. Seule la fenêtre globale peut être modifiée. Pour accéder aux objets situés à l'intérieur, il faut passer en **espace objet local** avec le raccourci de commande **EP** ou en cliquant sur le bouton E de la barre d'outils. On peut alors régler l'échelle de sortie grâce à la fonction **Zoom option XP** : le dessin doit être sorti à l'échelle 1/2 000 pour entrer dans le format A4 horizontal ($450 / 2\,000 = 0,225$ m) : donc entrez la commande **Zoom** 0.0005XP. L'espace objet apparaît alors comme il sera sur un format A4. Il reste à centrer les objets dans la fenêtre avec la commande **PANoramique**. Vous obtenez en format A4 l'équivalent de la figure 10.17. après avoir ajouté les lignes du cartouche de légende. Sur cette figure, la taille des textes a été augmentée pour la lisibilité.

Remarquez que la symbolisation des raccordements et des alignements employée dans la rubrique « déclivité projet » est différente de celle proposée à la figure 10.11.



Les textes sont dessinés directement en espace papier dans leurs calques et polices respectives. Pour les textes écrits en vertical, on donne une orientation de 90 degrés.

Il reste à imprimer le graphique : menu FICHIER / IMPRIMER, réglez le format du papier de l'imprimante ou du traceur, son orientation (paysage) et lancez l'impression ; on peut aussi préparer la sortie papier de ce graphique sans utiliser l'espace papier, mais l'espace papier est plus performant et nous vous conseillons de toujours l'utiliser.

2.4.6 Dessin d'un profil en travers



Préparez un profil type de la chaussée qui resservira dans chaque profil en travers. En espace objet dans un nouveau calque *Projet_1* en rouge, dessinez le profil type de la chaussée (fig. 10.18.) : *LIGNE* du point, point quelconque en dehors du profil en long, au point @5,-0.1 au point @0.2,-0.4 au point @0.2,0 au point @0.2,0.4 puis *MIROIR* de ces objets en mode *ORTHO* par rapport au point de départ (*EXTrémité*).

Créez un bloc, ou groupe d'objets, à partir de ce profil type : menu DESSIN / CRÉER UN BLOC ; choisissez les objets puis donnez comme point de base le point d'axe de la chaussée et donnez un nom au bloc, par exemple *Chaussée*.

Vous vous appuyerez sur le profil en long réel pour positionner facilement les profils en travers.

En zoom autour du profil n° 1 (fig. 10.18.), insérez le bloc *Chaussée* au point d'axe de la chaussée en le décomposant ; cochez la case décomposer de la boîte de dialogue INSERER UN BLOC du menu DESSIN.

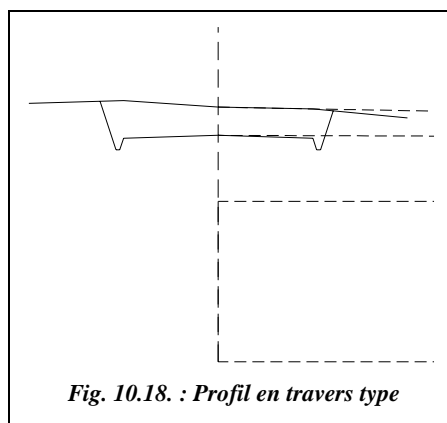
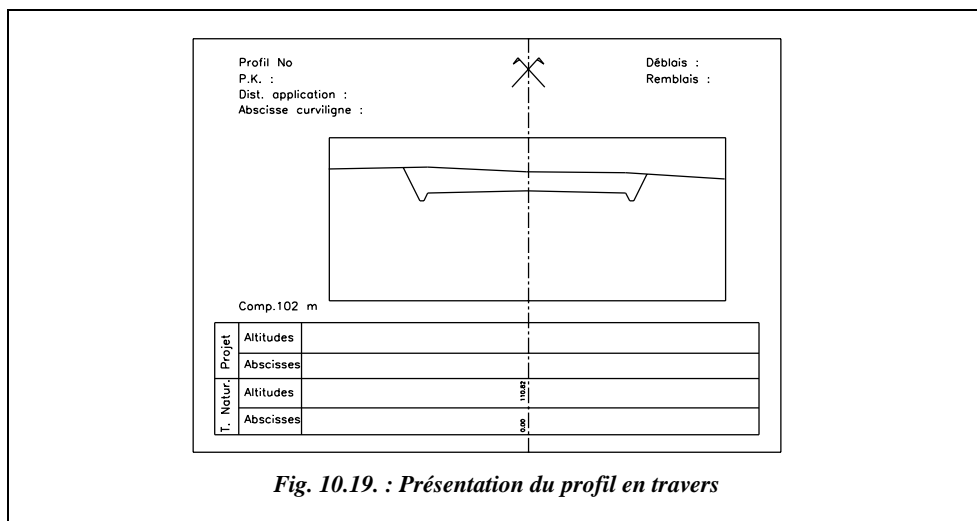


Fig. 10.18. : Profil en travers type

Dans un nouveau calque *TN1* en vert, dessinez le profil en travers du terrain naturel : *LIGNE* du point -10,110.95 au point -5,111.05 au point *INTersection* de... au point 5,110.76 au point 10,110.45. Il reste à construire les points d'entrée en terre et l'emprise du projet au moyen de la commande *PROLONGER* (ou *AJUSTER*).

Le dessin des autres profils peut être fait de la même manière. Notez que pour dessiner facilement au niveau de chaque profil en travers, il faut déplacer l'origine du repère général ainsi : *SCU* *Origine* .X de (donnez un point sur le profil en travers, par exemple avec l'accrochage *EXTrémité* de...) *YZ* demandés 0,0. Retour au *SCU* général avec *SCU*.

Dans l'espace papier et dans le calque 0, *COPIER* le format A4 qui a été dessiné pour le profil en long et positionnez le à un endroit quelconque de l'écran. En zoom autour de ce format, dessinez le cartouche type et ajoutez-y les textes dans les plans *Projet_1* et *TN1* que l'on retrouve à chaque profil (fig. 10.19.).



Dessinez ensuite dans ce format A4 et dans le calques Fenêtres une fenêtre sur l'espace objet (menu VUE / FENETRES MOSAÏQUE / 1 FENETRE). Passez en espace objet local avec la commande EO↵ et réglez à l'intérieur de cette fenêtre le facteur de zoom à 0.01XP (échelle 1/100), puis centrez l'axe du profil sur celui du cartouche (commande DEPLACER↵).

On peut geler certains calques uniquement dans l'espace papier pour faire disparaître le contour de la fenêtre et les éléments du profil en long : dans la case de dialogue PLAN (commande DDPMODES), sélectionnez les calques Fenêtres, TN et Projet puis cliquez sur le bouton F.Cr / GELER (ce qui signifie : geler dans la fenêtre courante). Vous devez obtenir l'équivalent de la figure 10.19. sans le contour de la fenêtre sur l'espace objet laissé volontairement pour l'illustration.

Créez neuf copies de cet original avec la commande RESEAU↵, choix des objets : faites une fenêtre autour du format complet, type de réseau Rectangulaire↵, nombre de rangées 1↵, nombre de colonnes 10↵, espace entre colonnes 0.3↵. Ajustez dans chaque fenêtre d'espace objet la vue sur chaque profil en travers (commande PANoramique). Pour sélectionner une fenêtre, son contour doit être visible.

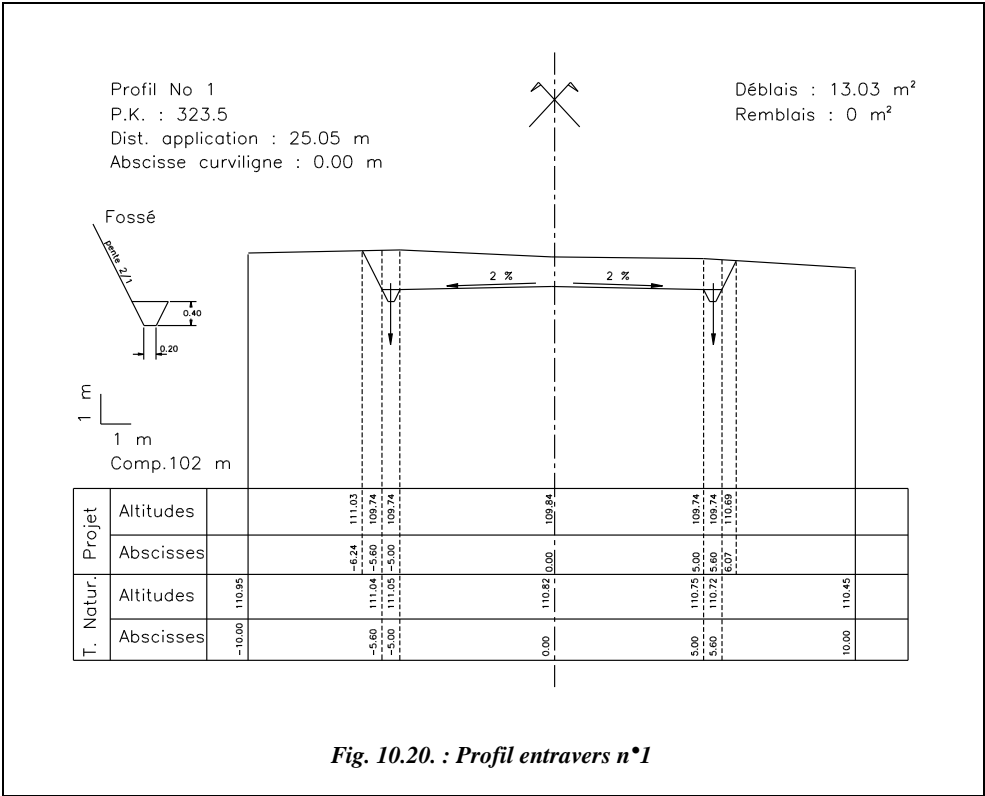
Il reste à calculer la surface de déblai et de remblai dans chaque profil (commande AIRE↵ en accrochage permanent INTERsection) et à coter la position des points d'entrée en terre que l'on relève par Identification en espace objet local et dans un SCU local attaché à l'axe du profil en travers. Les textes sont écrits dans les plans Projet_1 et TN1.

Le résultat pour le profil n° 1 est représenté à la figure 10.20. Les renseignements nécessaires au calcul manuel figurent sur ce profil bien que les calculs des surfaces aient été réalisés directement avec le logiciel de DAO.

Le tableau suivant donne les résultats pour l'ensemble des profils.

Profil	Déblai m²	Remblai m²	E. terre gauche		E. terre droite	
			abscisse	altitude	abscisse	altitude
1	13,03	0,00	-6,24	111,03	6,07	110,69
2	11,36	0,00	-6,24	110,52	5,96	109,97
fictif	0,66	1,80	-5,74	108,31	5,23	107,56
3	0,35	2,50	-5,67	107,97	5,37	107,11
4	0,00	15,49	-5,45	105,39	6,03	104,21
5	0,00	17,34	-5,40	104,48	6,17	102,95
6	0,00	13,09	-5,38	104,55	5,78	103,76
fictif	0,85	0,27	-5,73	106,34	5,05	105,98
7	3,23	0,00	-5,81	106,78	5,68	106,51
8	22,58	0,00	-6,56	109,82	6,55	109,78
9	11,38	0,00	-6,04	110,16	6,17	110,42
10	10,15	0,00	-5,86	110,26	6,26	111,07

La figure 10.20. ci-dessous montre le profil en travers de départ (profil n° 1).



2.5 Calcul de cubatures

Le calcul de cubatures est un calcul d'évaluation des volumes de terres à déplacer pour l'exécution d'un projet. Il existe deux types de calcul suivant la forme générale du projet étudié :

- le calcul des volumes « debouts » pour les projets étendus en surface (stade, aéroports, etc.) ;
- le calcul des volumes « couchés » pour les projets linéaires.

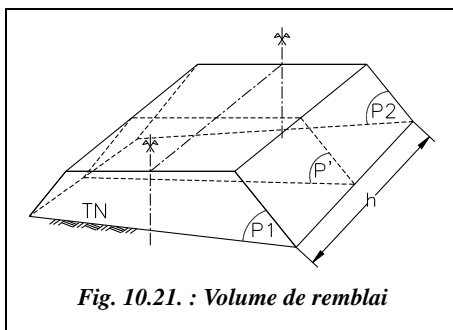
Remarque

- Les calculs suivants ne prennent pas en compte le foisonnement des sols.
- Les calculs de cubature sont très importants dans l'organisation d'un chantier de travaux publics : ils permettent d'aboutir aux épures de Lalanne qui optimisent les mouvements et le choix des engins de chantier sur les chantiers linéaires.

2.5.1 Calcul des volumes couchés

Pour ces calculs, il faut connaître à chaque profil en travers la surface de déblai et de remblai ainsi que la distance entre les profils, y compris les profils dits « fictifs » (voir § 2.2).

2.5.1.1 Calcul approché par moyenne des aires



Le volume V compris entre les profils 1 et 2 (fig. 10.21.) est un polyèdre limité par les facettes planes du terrain naturel et du projet d'une part, et par les surfaces planes verticales des profils en travers d'autre part. On peut lui appliquer la formule des trois niveaux en considérant les profils P1 et P2 parallèles (voir tome 2, chap. 5, § 7.2).

$$V = \frac{h}{6}(S_{P1} + S_{P2} + 4S_{P'})$$

S_{P1} et S_{P2} sont les surfaces des profils 1 et 2. $S_{P'}$ est la surface d'un profil intermédiaire situé à mi-distance entre P1 et P2.

Il est possible de calculer $S_{P'}$ mais la précision obtenue est illusoire puisqu'il ne faut pas oublier que le terrain n'est pas rectiligne entre deux points levés. Les volumes réels sont

donc de toute façon différents. Il faut donc admettre que : $S_{P'} = \frac{S_{P1} + S_{P2}}{2}$

La formule des trois niveaux devient alors : $V = h \left(\frac{S_{P1} + S_{P2}}{2} \right)$

Pour le calcul du volume total de cubature d'un projet linéaire, on peut utiliser une autre forme de cette formule qui fait intervenir la **distance d'application** d'un profil en travers. Considérons un volume discrétisé en $(n+1)$ profils :

$$V_1 = h_1 \cdot (S_0 + S_1) / 2 \quad V_2 = h_2 \cdot (S_1 + S_2) / 2 \quad \dots \text{etc.} \quad V_n = h_n \cdot (S_{n-1} + S_n) / 2.$$

Le volume total est alors le suivant : $V_T = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} h_i (S_{i-1} + S_i)$

En sommant ces volumes et en mettant en facteur les surfaces et non plus les hauteurs, on obtient : $V_T = h_1 \cdot S_0 / 2 + S_1 \cdot (h_1 + h_2) / 2 + \dots \text{etc.} + h_n \cdot S_n / 2.$

Donc :
$$V_T = S_0 \cdot \frac{h_1}{2} + S_n \cdot \frac{h_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} S_i \cdot \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

En appelant « entre-profils » la demi-distance séparant deux profils successifs, on admet que le volume engendré par un profil est le produit de sa surface par la moyenne des entre-profils qui l'encadrent. Cela permet d'associer un volume de cubature à chaque profil en travers et de l'inscrire sur son graphique.

La prise en compte d'un profil fictif peut être faite simplement en rajoutant dans le tableau de calcul un profil de surface nulle. Un calcul plus précis nécessite de déterminer les surfaces de remblai et de déblai au niveau du profil fictif (voir l'exemple ci-après). Un calcul « exact » nécessiterait de calculer la position, en abscisse curviligne, du point de passage de remblai à déblai et de déblai à remblai.

Application

À partir des valeurs de l'exercice du paragraphe 2.4 on trouve :

Déblais	2 923 m ³
Remblais	2 376 m ³
Différence	546 m ³

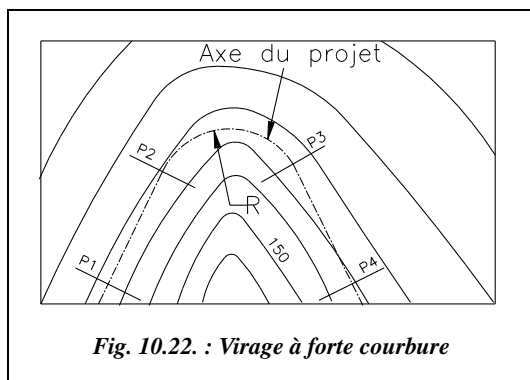
Les remblais et les déblais ne sont pas tout à fait équilibrés car il faut tenir compte du fait que le terrain traversé n'est pas en pente uniforme et constante d'un profil en travers à l'autre.

Profil	Déblai m ²	Remblai m ²	Entre-profils m
1	13,03	0,00	25,05
2	11,36	0,00	45,65
fictif	0,66	1,80	25,10
3	0,35	2,50	29,81
4	0,00	15,49	50,45
5	0,00	17,34	50,30
6	0,00	13,09	45,56
fictif	0,85	0,27	25,20
7	3,23	0,00	29,60
8	22,58	0,00	50,05
9	11,38	0,00	49,25
10	10,15	0,00	24,00

En réalité, le problème n'est pas seulement d'équilibrer remblais et déblais ; on doit aussi tenir compte de la nature des déblais pour une éventuelle utilisation en remblais ainsi que des distances à parcourir pour déplacer les terres.

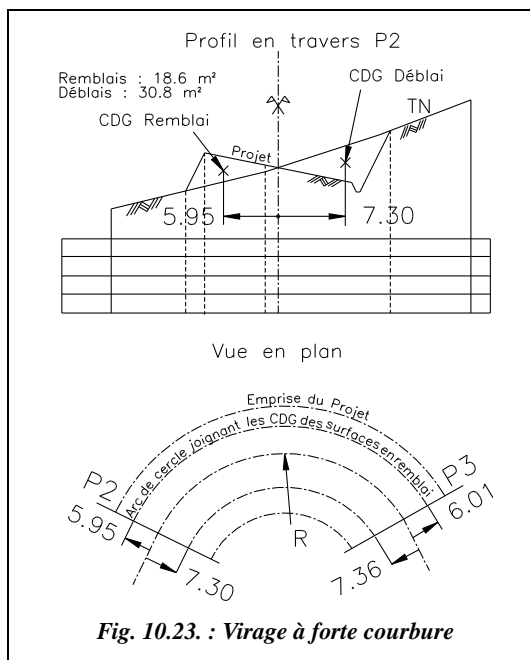
Il faudrait recommencer une étude en remontant la ligne de partage définie graphiquement au paragraphe 2.4. Une série de calculs informatiques (ADTOPO + AutoCAD) indique une égalité à **2 600 m³** pour un point de départ du projet situé à une altitude de 109,9 m.

2.5.1.2 Cas particuliers des virages à forte courbure



Dans la formule des trois niveaux, les profils en travers sont supposés parallèles entre eux. Ce n'est pas le cas dans un virage lorsque le rayon de courbure est faible. Si l'on cherche à améliorer la précision du calcul à cet endroit, il faut utiliser ponctuellement un autre mode de calcul. Deux solutions possibles :

- si le rayon de courbure est suffisamment grand, on rajoute des profils en travers sur la partie courbe ;
- si le rayon de courbure est très petit, les entre-profils ne sont plus calculés suivant l'axe de la chaussée mais entre les centres de gravité (CDG) des surfaces en déblai, d'une part, et en remblai d'autre part (fig. 10.22.).



Par exemple, la position en abscisse du centre de gravité des surfaces de remblai et de déblai sont déterminées sur le profil P2 et sur le profil P3. On trouve au profil P2 une distance de 5,95 m du centre de gravité de la surface de remblai jusqu'à l'axe du projet et 6,01 m au profil P3.

On connaît la longueur développée L_a du raccordement circulaire à l'axe du projet ; on en déduit une longueur

moyenne Lm de l'arc de cercle joignant les centres de gravité des surfaces de remblai (fig.

10.23.) à l'aide de la formule suivante :
$$Lm_{\text{Remblais}} = \frac{La}{R} \left[\frac{5,95 + 6,01}{2} + R \right].$$

Cette longueur est utilisée dans le calcul des entre-profils. Le même calcul est effectué pour les surfaces en déblai.

Si, en pleine courbe, le profil passe de « profil en remblai » ou « profil en déblai » à « profil mixte », il faut déterminer la position du point de changement sur l'arc de cercle.

Application

Évaluez l'erreur commise sur le calcul du volume situé entre ces deux profils (P2 et P3, fig. 10.23.) si l'on admet que les surfaces de remblai et de déblai sont identiques en P2 et en P3 (30,8 m²). Le rayon de courbure est de 50 m à cet endroit, la longueur développée à l'axe est de 62,83 m.

Réponse

Le calcul du volume entre P2 et P3 peut être effectué de deux manières :

- sans tenir compte de la courbure
 $V_{\text{déblai}} = 62,83 \cdot (30,8 + 30,8) / 2 = 1\,935 \text{ m}^3$; $V_{\text{remblai}} = 1\,169 \text{ m}^3$;
- en tenant compte de la courbure
 $V_{\text{déblai}} = 53,62 \cdot 30,8 = 1\,651 \text{ m}^3$; $V_{\text{remblai}} = 70,34 \cdot 18,6 = 1\,308 \text{ m}^3$.

Soit des écarts de l'ordre de 11 à 17 %.

2.5.1.3 Calcul exact

Ce calcul par décomposition en volumes élémentaires est détaillé dans le tome 2, au paragraphe 7.4 du chapitre 5.

2.5.2 Calcul des volumes debouts

2.5.2.1 Plate-forme sans calcul de talus

Le terrain naturel est découpé par un maillage : la maille de base est généralement un carré dont la longueur du côté est fonction de la déclivité du terrain et de la précision cherchée. L'altitude de chaque sommet du maillage est déterminée sur plan par interpolation à partir des courbes de niveau ou sur le terrain par nivellement.

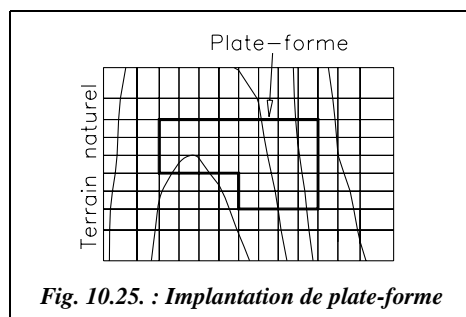
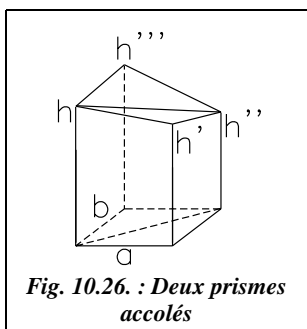


Fig. 10.25. : Implantation de plate-forme

Dans le cas où l'on peut négliger le volume de terrassement dû aux talus (grande surface et faible hauteur de terrassement), le volume total (fig. 10.25.) délimité par la plate-forme, le terrain naturel et les plans verticaux issus du contour du terrain est découpé en volumes élémentaires qui sont des prismes de section rectangulaire (fig. 10.26.).



Le calcul du volume de l'ensemble des deux prismes s'effectue ainsi :

- si l'on admet que les faces inférieures et supérieures des deux prismes sont planes, le volume de l'ensemble des deux prismes peut s'exprimer de deux manières différentes :

$$V_1 = \frac{ab}{2} \left[\frac{(h + h' + h'' + h''')}{3} + \frac{(h + h' + h'')}{3} \right]$$

$$= \frac{ab}{6} (2h + 2h'' + h' + h''')$$

$$V_2 = \frac{ab}{2} \left[\frac{(h''' + h'' + h')}{3} + \frac{(h''' + h + h')}{3} \right] = \frac{ab}{6} (2h' + 2h''' + h + h'')$$

donc, pour une maille : $= \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{ab}{4} (h + h' + h'' + h''') ;$

- le volume de l'ensemble des prismes (pris deux à deux) peut donc s'exprimer ainsi :

$$V_T = \frac{S}{4} \left(1 \cdot \sum h_1 + 2 \sum h_2 + 3 \sum h_3 + 4 \sum h_4 \right)$$

On note h la différence d'altitude (ou hauteur) entre la plate-forme et le terrain naturel. L'indice 1 de h_1 indique une hauteur appartenant à un seul carré du maillage, l'indice 2 de h_2 une hauteur appartenant à deux carrés, etc.

Par exemple, sur la figure 10.25., il y a cinq hauteurs h qui appartiennent à un seul carré, vingt hauteurs appartenant à deux carrés, une hauteur appartenant à trois carrés et vingt hauteurs appartenant à quatre carrés du maillage (trente-quatre, carrés soit quarante-six hauteurs au total). S est la surface totale de la maille de base.

Cette méthode de calcul présente l'avantage de la simplicité et de la rapidité par comparaison avec la méthode des volumes couchés. Le nouveau calcul des volumes de déblai et remblai après modification de la hauteur de la plate-forme est plus rapide qu'avec la méthode profils en long et en travers ; cela permet d'équilibrer en quelques calculs les volumes de terre à déblayer et à remblayer en faisant évoluer l'altitude de la plate-forme.

Le calcul informatique est d'autant plus indiqué dans ce cas qu'il conduit encore plus rapidement au résultat, à condition d'avoir une discrétisation du terrain naturel sous forme de semis de points ou de maillage régulier.

Il faut noter que la formule précédente est aussi valable pour une surface de base en forme de parallélogramme.

2.5.2.2 Plate-forme avec calcul des talus

En fait, dans le cas général, il faut tenir compte des pentes de talus de remblai et de déblai qui engendrent des volumes non négligeables, surtout si le terrain est très accidenté ou en forte pente. Il faut donc déterminer les volumes des terres provenant des talus (comme pour un projet linéaire) et calculer les points d'entrée en terre. Les logiciels de calcul topographiques et certains logiciels adaptés aux projets de travaux publics permettent d'automatiser ces calculs (voir sur la figure 10.30. le résultat du calcul de l'exemple ci-après obtenu avec le logiciel ADTOPO). Le logiciel **Micro-Piste**, du SETRA, ou le logiciel **MOSS** permettent d'effectuer des calculs similaires.

Pour comprendre le principe du calcul, nous allons voir avec un exemple comment on peut construire graphiquement les points d'entrée en terre des talus sur une épure (fig. 10.27.). Le principe est comparable à celui du paragraphe 2.3, à ceci près que l'opérateur construit les profils en travers dans les deux directions du maillage : en effet, il n'y a pas de direction privilégiée comme dans un projet linéaire.

Explication à partir d'un exemple

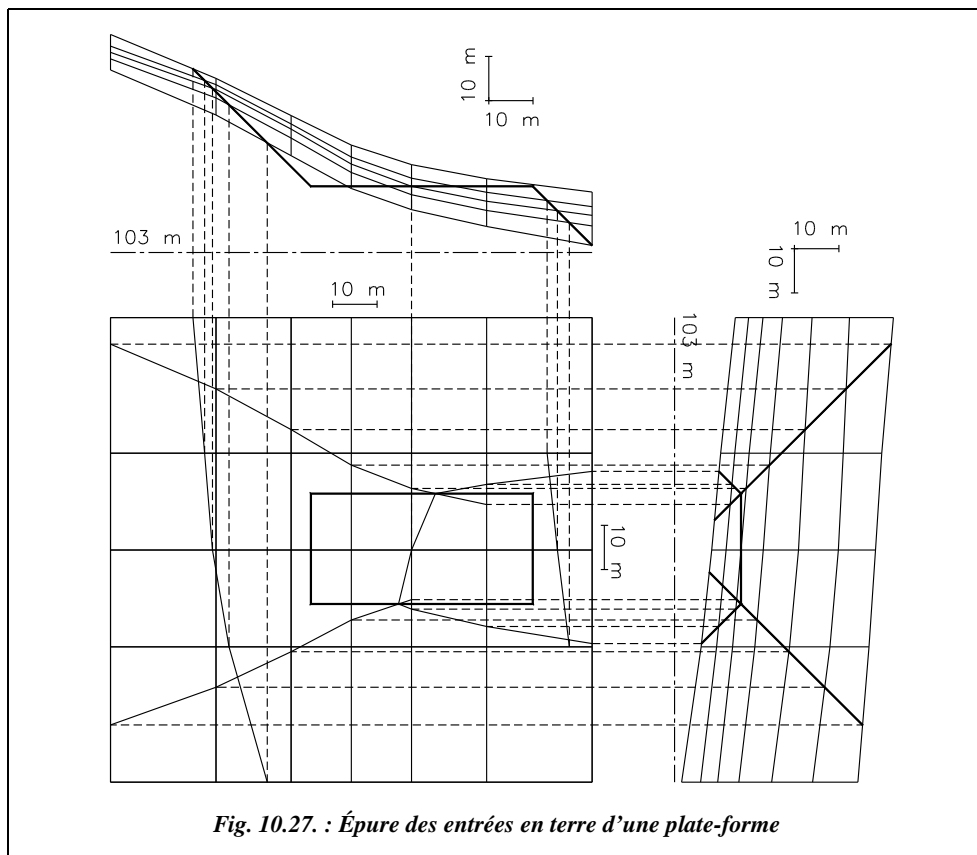
Les données du projet sont les coordonnées locales et altitudes des sommets du maillage du terrain naturel. Elles sont données dans le tableau suivant.

N°	x (m)	y (m)	z (m)	N°	x (m)	y (m)	z (m)	N°	x (m)	y (m)	z (m)
60	96,44	152,41	152,30	72	120,16	121,77	141,00	84	150,66	77,99	121,10
61	120,16	152,41	142,40	73	96,44	121,77	149,70	85	137,11	77,99	128,90
62	137,11	152,41	134,00	74	204,88	99,88	111,40	86	120,16	77,99	138,00
63	150,66	152,41	127,30	75	181,16	99,88	114,60	87	96,44	77,99	146,80
64	164,22	152,41	122,90	76	164,22	99,88	118,00	88	204,88	47,35	104,60
65	181,16	152,41	119,70	77	150,66	99,88	123,00	89	181,16	47,35	108,90
66	204,88	152,41	116,70	78	137,11	99,88	130,90	90	164,22	47,35	112,70
67	204,88	121,77	113,40	79	120,16	99,88	139,90	91	150,66	47,35	117,50
68	181,16	121,77	116,60	80	96,44	99,88	148,30	92	137,11	47,35	124,90
69	164,22	121,77	119,80	81	204,88	77,99	109,00	93	120,16	47,35	134,10
70	150,66	121,77	124,60	82	181,16	77,99	112,50	94	96,44	47,35	144,30
71	137,11	121,77	132,10	83	164,22	77,99	116,10				

La plate-forme à installer est de base rectangulaire et doit se situer à l'altitude 118 m. Ses dimensions sont de 50 m \times 25 m et les coordonnées du point inférieur gauche sont (141,54 ; 87,66). Les pentes des talus de remblai et de déblai sont de 1/1.

La figure 10.27. représente l'épure de construction des lignes d'entrée en terre : ce sont les droites d'intersection entre les plans inclinés du talus et le terrain naturel. En parallèle avec la vue en plan, on construit deux vues en élévation du terrain naturel et de la plate-forme, soit une vue pour chaque direction du maillage. Pour exagérer le relief du terrain naturel, les échelles peuvent être différentes en abscisse et en ordonnée sur chaque graphique en élévation.

Attention : si les échelles en abscisse et en ordonnée sont différentes, veillez à multiplier les pentes de talus par le même facteur d'échelle (rapport de l'échelle en z par l'échelle en x) de manière à conserver la pente réelle des talus par rapport au terrain naturel.



On reporte ensuite sur la vue en plan les points d'intersection du terrain naturel avec les talus de la plate-forme : cela donne les points d'entrée en terre et la ligne de séparation entre remblai et déblai.



Ces constructions peuvent être effectuées sur DAO : on y travaille directement en trois dimensions.

Sur la figure 10.27., toutes les lignes d'entrée en terre sont construites. En fait, certaines sont inutiles puisqu'elles vont trop loin dans le terrain naturel dans les angles de la plate-forme (voir figure 10.28. les lignes d'entrée en terre définitives tracées en considérant que les angles sont définis par des plans inclinés selon la même pente que les autres faces des talus). En pratique, les angles ne sont pas réellement taillés : ils sont une jonction entre les talus des côtés de la plate-forme. Pour le calcul théorique, si l'on veut conserver la pente des talus dans ces zones, on peut construire ces angles comme sur la figure 10.28. On obtient alors dans les angles des volumes de terre qui sont des pyramides dont deux faces sont verticales, une face inclinée suivant la pente de talutage, ici 1/1, et une face supérieure appartenant au terrain naturel, par exemple le volume dont la projection horizontale donne les points 1, 5 et 6.

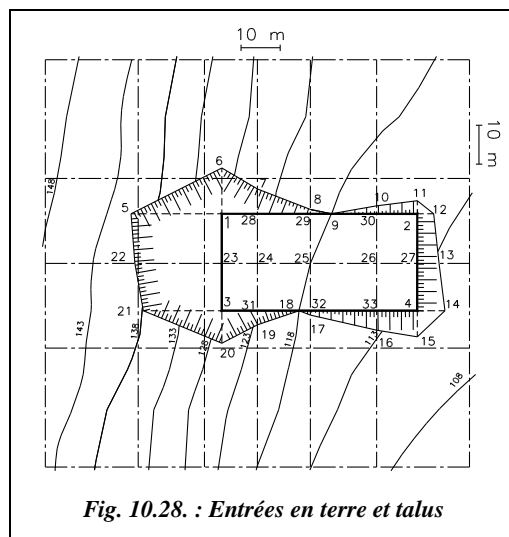


Fig. 10.28. : Entrées en terre et talus

On peut alors relever sur le graphique la position des points d'entrée en terre en planimétrie pour une implantation ultérieure. Leur altitude est calculée par interpolation soit à partir des courbes de niveau, soit directement à partir des sommets du maillage.

Résultats

Le tableau suivant donne les coordonnées des points d'entrée en terre de la plate-forme.

N°	x (m)	y (m)	z (m)	N°	x (m)	y (m)	z (m)	N°	x (m)	y (m)	z (m)
1	141,54	112,66	128,70	12	195,78	112,66	114,60	23	141,54	99,88	128,40
2	191,54	112,66	114,40	13	197,09	99,88	112,50	24	150,66	99,88	123,00
3	141,54	87,66	127,20	14	198,60	87,66	111,20	25	164,22	99,88	118,00
4	191,54	87,66	112,30	15	191,54	80,91	111,40	26	181,16	99,88	114,60
5	118,33	112,66	141,21	16	181,16	82,60	112,90	27	191,54	99,88	113,20
6	141,54	124,47	129,80	17	164,22	86,50	116,80	28	150,66	112,66	124,90
7	150,66	119,06	124,70	18	161,11	87,66	118,00	29	164,22	112,66	119,00
8	164,22	113,81	120,00	19	150,66	84,03	121,60	30	181,16	112,66	115,80
9	169,58	312,66	118,00	20	141,54	79,23	126,40	31	150,66	87,66	121,90
10	181,16	114,71	116,00	21	121,57	87,66	138,00	32	164,22	87,66	118,00
11	191,54	115,99	114,70	22	119,35	99,88	139,10	33	181,16	87,66	113,40

Calcul des cubatures de cette plate-forme

Il y a deux possibilités pour calculer ce volume.

1 - Calcul « exact », en décomposant le volume en volumes élémentaires à partir des coordonnées x , y et z de chaque point d'entrée en terre ainsi que des points du terrain naturel situés à la verticale de la plate-forme (points 1, 2, 3, 4 et 23 à 33 sur la figure 10.28.), les sommets du maillage étant déjà connus. On affecte d'un signe prime (') les points projetés sur la plate-forme, par exemple (1') à la verticale de (1).

Par exemple (fig. 10.28.), le volume qui se projette sur la plate-forme en 23, 24, 3 et 31 est constitué de deux prismes et se calcule comme indiqué au paragraphe 2.5.2.1 :

$$V_{3-23-24-31} = 12,22 \cdot 9,12 \cdot (9,2 + 10,4 + 5 + 3,9) / 4 = 794,1 \text{ m}^3.$$

Le volume qui se projette sur le terrain naturel en 1, 5, 22 et 23 est délimité par deux triangles verticaux dont on peut calculer la surface ainsi :

- triangle 1'-1-5 : surface 124,2 m²
- triangle 23'-23-22 : surface 115,4 m²

Le volume approché est : $V_{1-5-22-23} = 12,78 \cdot (124,2 + 115,4) / 2 = 1\,531 \text{ m}^3$.

Le volume qui se projette sur le terrain naturel en 1, 5 et 6 est une pyramide à base triangulaire (triangle 1'-1-6 de surface 63,2 m²) et de hauteur 23,21 m. Son volume se calcule ainsi :

$$V_{1-6-5} = 63,2 \cdot 23,2 / 3 = 488,7 \text{ m}^3.$$

Et ainsi de suite. Le volume complet peut être calculé en utilisant les trois types de calcul précédents. Vérifiez – la précision obtenue étant inutile étant donnée la modélisation approchée du terrain – que les volumes totaux sont : $V_{\text{déblai}} \approx 7\,045 \text{ m}^3$, $V_{\text{remblai}} \approx 2\,430 \text{ m}^3$.

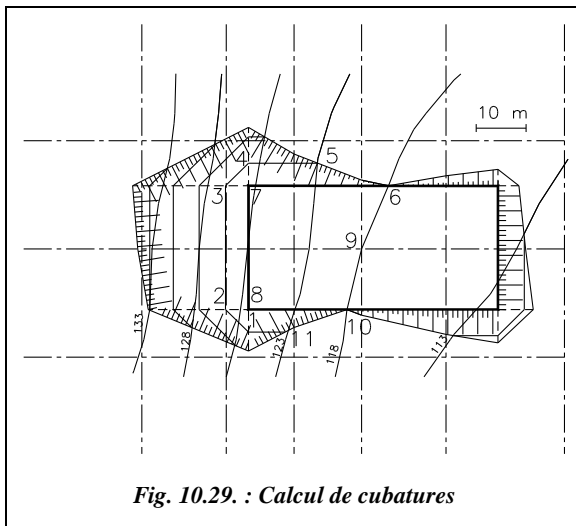


Fig. 10.29. : Calcul de cubatures

2 - Calcul en découpant le volume cherché en tranches horizontales. C'est le mode de calcul de certains logiciels, par exemple ADTOPO : c'est le plus simple et le plus rapide dans le cadre d'un travail manuel. Sur la même épure (fig. 10.27.), construisez les lignes d'intersection entre des plans horizontaux régulièrement espacés et les talus. Cela revient à ajouter des lignes de niveau sur le terrain naturel après excavation des terres.

L'espacement entre ces tranches dépend de la précision désirée. Par exemple, sur la figure 10.29., les tranches sont espacées de 5 m, ce qui correspond aux courbes de niveau du terrain naturel dont on dispose déjà puisqu'elles ont été tracées à partir du maillage.

On calcule ensuite la surface délimitée par ces courbes de niveau ; on peut la mesurer directement sur l'épure avec un planimètre sur papier ou avec la commande *AIRE* d'AutoCAD. En appliquant la formule de la moyenne des aires vue au paragraphe 2.5.1.1, on en déduit le volume total.

Par exemple, calculons le volume de déblais compris entre les deux surfaces suivantes :

- surface de niveau 118 m : 6-7-8-10-9-6 (portion de la plate-forme), $S = 585 \text{ m}^2$
- surface de niveau 123 m : 1-2-3-4-5-11-1, $S = 533 \text{ m}^2$

Remarquez que, sur la ligne 5-11, on suit la courbe de niveau du terrain naturel.

Le volume compris entre ces deux surfaces parallèles distantes de 5 m est :

$$V = 5.(533 + 585) / 2.$$

Le calcul complet demande beaucoup de temps pour arriver à ce résultat sans erreur. Le calcul informatique est donc très indiqué. Le tableau suivant résume les résultats.

Déblais				Remblais			
z (m)	S (m ²)	h (m)	V (m ³)	z (m)	S (m ²)	h (m)	V (m ³)
118	585			118	664		
		5	2 795			5	1 943
123	533			113	113		
		5	2 195			1.8	102
128	345			111,20	0		
		5	1 303				
133	176						
		5	503				
138	25						
		2.3	29				
140,30	0						
			6 825				2 045

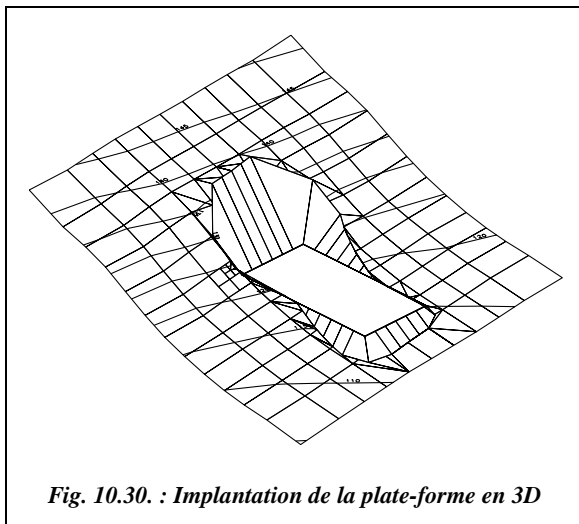
Ci-après (fig. 10.30.) est donné le résultat du même calcul effectué en quelques minutes sur ADTOPO. Le résultat fournit par le logiciel est le suivant :

volume de déblais..... 6 860 m³,
volume de remblais... 2 104 m³.

On constate sur la vue en trois dimensions (fig. 10.30.) que la modélisation des talus dans les angles est légèrement différente de celle choisie dans la résolution manuelle.

L'erreur commise par rapport au calcul « exact » est de l'ordre de 3 % en déblai ce qui est d'autant plus acceptable que le terrain naturel choisi est très défavorable puisqu'en

forte pente. En remblai, l'écart est de 13 % ce qui peut s'expliquer par le fait que la partie en remblai est insuffisamment discrétisée : il n'y a pas assez de courbes de niveau, le calcul est donc moins précis.



Attention ! les résultats fournis par ADTOPO peuvent être très différents suivant la modélisation choisie et le type de terrain naturel. Il convient donc de vérifier les résultats par plusieurs calculs faisant intervenir des modélisations différentes du terrain naturel. On peut aussi jouer sur des paramètres tels que l'élancement des facettes du terrain ou la densité du découpage pour le calcul des volumes de déblai et remblai.

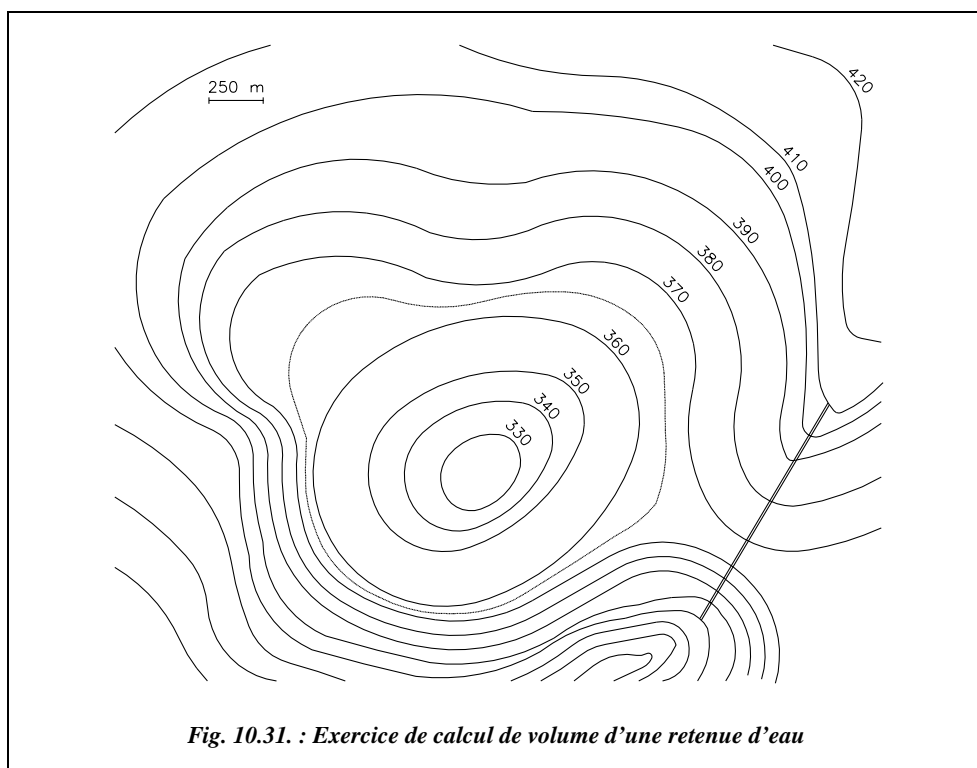
2.5.3 Découpage suivant les courbes de niveau

La méthode de calcul abordée dans l'exercice précédent s'applique aussi directement aux courbes de niveau pour évaluer par exemple la capacité d'un réservoir naturel (fig. 10.31.).

On suppose toujours que le terrain est linéaire entre deux courbes de niveau. Les surfaces délimitées par ces courbes étant horizontales et donc parallèles entre elles, on peut appliquer la formule des trois niveaux (Simpson, voir tome 2, chap. 5, § 7.1) pour obtenir le volume compris entre trois courbes consécutives. Si le terrain est en pente régulière, on l'applique dans sa forme simplifiée, c'est-à-dire que le volume est égal à la moyenne des surfaces qui le délimitent multiplié par la distance entre ces surfaces (c'est le cas du tableau de calcul suivant). La courbe de niveau 365 m a été ajoutée par interpolation à partir des courbes 360 m et 370 m pour tenir compte de l'irrégularité du terrain naturel entre ces deux courbes de niveau.

Application

Calculer le volume de la retenue d'eau créée par le barrage de la figure 10.31. si l'on admet que l'eau ne doit pas dépasser la cote 400 m. Le fond de vallée est estimé à l'altitude 324 m.



Le tableau suivant détaille les calculs de volume.

z (m)	S (m²)	h (m)	V (m³)	z (m)	S (m²)	h (m)	V (m³)
400	6 354 069			365	2 130 215		
		10	56 604 605			5	9 224 678
390	4 966 852			360	1 559 656		
		10	44 242 610			10	10 905 645
380	3 881 670			350	621 473		
		10	33 786 435			10	4 653 175
370	2 875 617			340	309 162		
		5	12 514 580			10	2 044 580
365	2 130 215			330	99 754		
						6	299 262
				Fond de bassin :	0		
						Total :	174 275 570

Réponse

Si l'on ne tient pas compte de l'irrégularité entre les courbes 360 m et 370 m, on obtient un volume de $174\,712\,677\text{ m}^3$, soit 0,2 % d'écart : on peut donc la négliger.

Si on calcule le volume en appliquant la formule de Simpson, on obtient :

$$V_{\text{total}} = \frac{10}{3} [S_{400} + S_{324} + 4(S_{390} + S_{370} + S_{350} + S_{330}) + 2(S_{380} + S_{360} + S_{340})].$$

Résultat : $V_{\text{total}} = 173\,699\,430\text{ m}^3$, soit un écart de 0,3 % par rapport au calcul précédent.

Remarque

On considère dans ce dernier calcul que le fond de vallée est à l'altitude 320 m (erreur négligeable).