

Travaux pratiques de CARTOGRAPHIE (L1ST – GEOSCIENCES 1)

Université Claude Bernard Lyon 1

Coordonnateurs : G. Suan & C. Maréchal - Observatoire des Sciences de l'Univers

DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE A LA CARTE GEOLOGIQUE SIMPLE

Une carte est une image plane, réduite et symbolique (les symboles sont conventionnels), de données au moins partiellement spatiales. La plupart des cartes sont établies sur un fond figurant une portion de la surface de la Terre ; ce fond est dit topographique. Parfois, ce fond est autre (imagerie médicale). Ici, nos objectifs seront :

- la lecture des cartes topographiques en général ;
- la compréhension des rapports entre les symboles de la carte, qui est à deux dimensions, et des structures géologiques qu'elle représente, qui sont généralement à trois dimensions. Il s'agit d'une initiation à l'utilisation de cartes géologiques plus complexes.

I) LOCALISATION SUR UNE CARTE TOPOGRAPHIQUE

1. Notion d'échelle

L'**échelle** d'une carte est le rapport entre la longueur d'un objet sur la carte et sa longueur réelle.

L'échelle s'exprime sous la forme d'une fraction simple ; par exemple une carte est dite « au 1/50 000 » lorsqu'1 cm sur la carte correspond à 50 000 cm sur le terrain, soit 500 m. Le choix d'une échelle est guidé par le type d'utilisation.

2. Systèmes de projection

La carte, plane, représente une portion d'un objet « globalement » sphérique, la Terre. Pour simplifier, en une première étape, on assimilera la Terre au « **géoïde** » : surface du niveau moyen des océans (sur les zones émergées, elle est théorique et calculée), forme très proche d'un ellipsoïde de révolution aux dimensions suivantes :

Rayon équatorial $a = 6378,14$ km Rayon polaire $b = 6356,755$ km

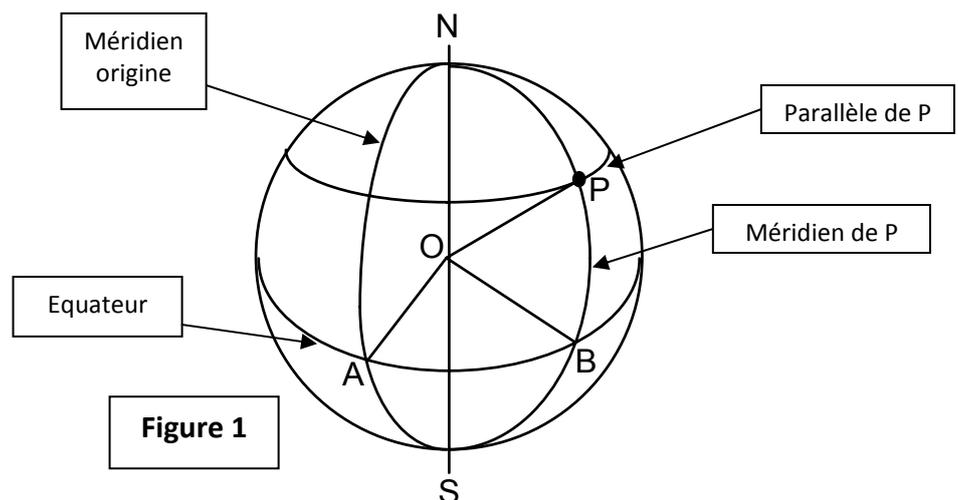
Aplatissement $f = (a-b)/a = 1/298,257$

Le géoïde tourne autour d'un axe dont les traces définissent les **pôles**. Le plan orthogonal à l'axe des pôles et passant par le centre du géoïde recoupe la surface de la Terre selon l'**équateur (figure 1)**.

Pour repérer un point à la surface de la Terre, on se réfère à un système de méridiens et parallèles :

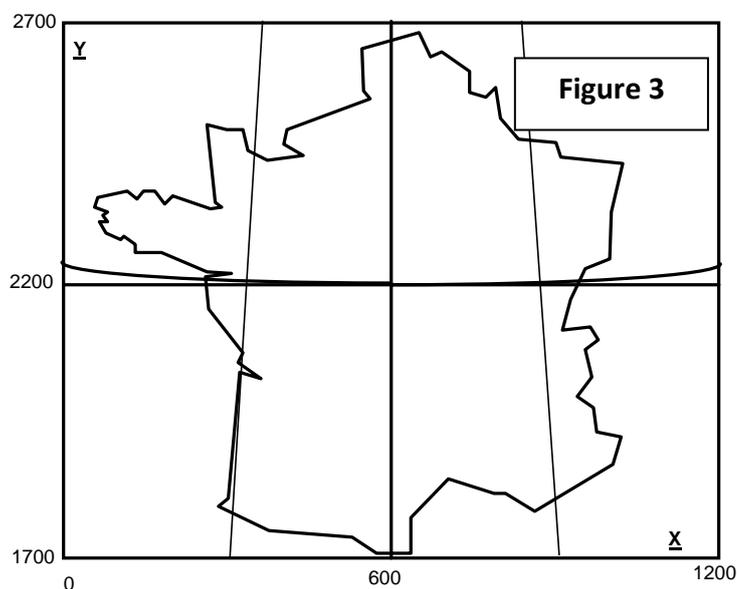
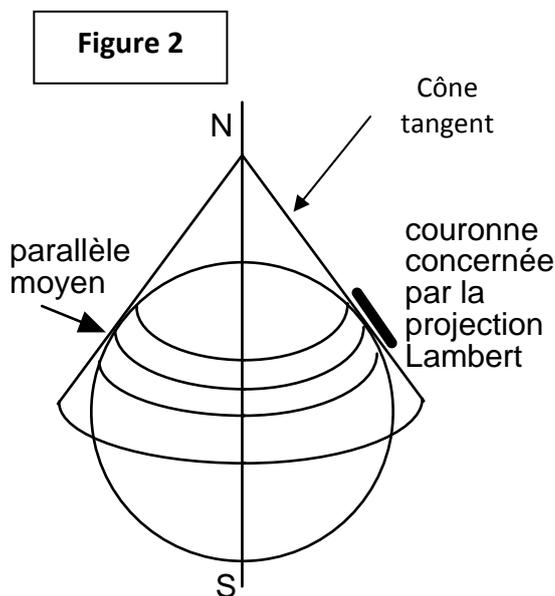
Méridien = ligne marquant l'intersection entre un plan passant par les 2 pôles et le géoïde. On définit un méridien origine (passant par Greenwich à Londres ; arc NAS). On peut aussi définir le méridien d'un point P quelconque du géoïde : il passe par les pôles et par P.

Parallèle = ligne marquant l'intersection entre un plan parallèle au plan équatorial et le géoïde. Ce parallèle sera celui du point P s'il passe par P.



Pour tout point P, on peut définir sa **longitude** (angle AOB) et sa **latitude** (angle BOP). La longitude est mesurée de 0° à 180°, en précisant « vers l'Est » ou « vers l'Ouest ». La latitude est mesurée de 0 à 90°, en précisant « Nord » ou « Sud ».

On appelle **projection** la transformation, nécessaire à la construction d'une carte, du réseau de méridiens et parallèles du géoïde en réseau plan à coordonnées cartésiennes. Il existe de multiples systèmes de projection. Ici, on parlera de la **projection Lambert** adoptée par l'Institut Géographique National (IGN) en France. Elle est « **conforme** » (les surfaces y gardent leur forme, mais pas leurs dimensions), et **conique**. Elle est assimilable à la projection géométrique d'une portion du géoïde sur un cône dont le sommet est situé sur l'axe des pôles et qui est tangent à l'ellipsoïde le long d'un parallèle dit « **parallèle moyen de contact** » (figure 2).



Traits fins : quelques méridiens et parallèles. Traits gras : quadrillage du système Lambert, avec x et y en km.

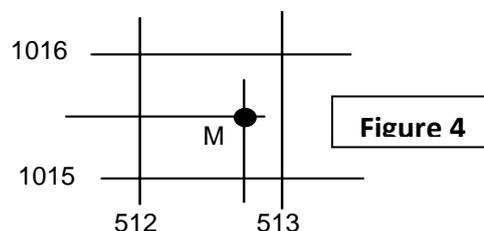
La **figure 3** est un croquis de principe du résultat pour la France. Le croquis se limite à la projection « Lambert 2 étendue » qui couvre tout le territoire. Les régions éloignées du centre de la France montrent un écart excessif entre le quadrillage Lambert et le système parallèles-méridiens. Il existe donc d'autres projections Lambert adaptées aux régions frontalières (projection « Lambert 3 » pour le SE; « Lambert 4 » pour la Corse; etc).

3. Coordonnées Lambert d'un point

La projection Lambert se traduit sur la carte par un **quadrillage «approximativement» orienté N-S et W-E**, plus souvent esquissé que complet (repéré par des graduations en marge de la carte, dont les numéros sont espacés de 1km sur le terrain ou par des croix discrètes à l'intersection des axes du quadrillage qui correspondent à des chiffres ronds de la numérotation en marge de la carte).

Autour du point dont on veut mesurer les « coordonnées Lambert », repérer les 4 croix « encadrantes ». On en déduit dans quel carreau kilométrique il est situé.

Ici (**figure 4**), les coordonnées Lambert de M sont :
 $x=512,75 \text{ km}$; $y=1015,50 \text{ km}$



4. Lecture de la carte topographique

La surface de la Terre étant maintenant « remise à plat », on distingue deux grands types de cartes : topographiques et thématiques.

Sur la carte topographique, on trouve des **éléments naturels** (relief, cours d'eau, végétation, ...) et **artificiels** (bâtiments, voies de communication, ...). Tout est symbolisé par des **signes conventionnels**.

Signes conventionnels – ils sont des symboles évocateurs des détails du terrain (qu'ils soient naturels ou artificiels), qu'on appelle la **planimétrie**. La **légende** de la carte indique tous les symboles utilisés. Sur les cartes polychromes, le bleu représente le réseau hydrographique, le vert la végétation, le noir les éléments anthropiques, la toponymie, les limites administratives, le rouge et le blanc le réseau routier. Le brun et le gris sont réservés à l'**altimétrie**, c'est-à-dire la représentation du relief.

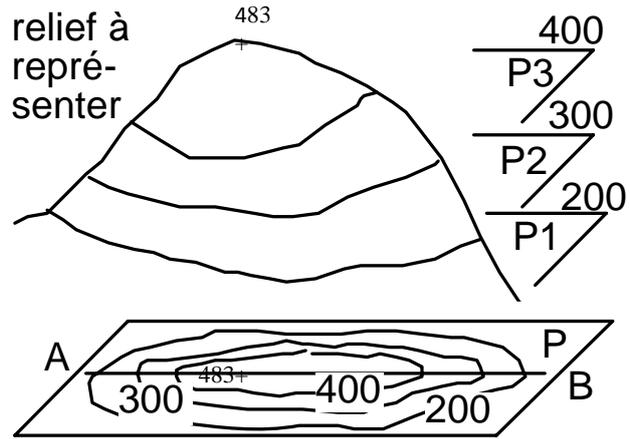
Représentation du relief – elle se fait par l'intermédiaire des **courbes de niveau** et des **points cotés**.

Une courbe de niveau est l'intersection de la surface topographique avec un plan horizontal d'une altitude donnée. Elle forme une ligne d'égale altitude et portera le nom de cette altitude. Les courbes correspondent à des altitudes régulièrement espacées et à chiffres ronds. Cet espacement vertical est l'**équidistance** e. L'écartement des courbes de niveau donne une mesure qualitative de la pente. Les courbes sont d'autant plus serrées que la pente est importante. Pour faciliter la lecture, certaines courbes de niveau sont renforcées. Elles représentent les **courbes maîtresses** (au 1/50 000, dans les régions non montagneuses, e = 50 m entre deux courbes maîtresses). Les autres courbes (4 entre 2 courbes maîtresses) sont dites **intercalaires**. Les points cotés, sur la carte, sont figurés par des points noirs, chacun étant associé à une altitude en m.

Mesures d'une distance et d'une pente – si on ne tient pas compte du relief, la mesure d'une distance découle directement de la définition de l'échelle (= **distance apparente**, à « vol d'oiseau »). La **distance réelle** est > à la distance apparente si on tient compte du relief. Elle est égale à la distance apparente / cos de la pente.

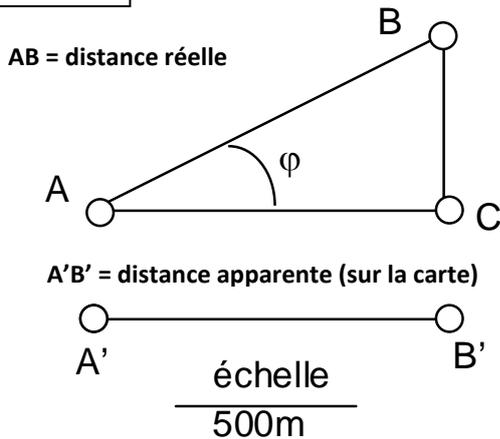
Pente = inclinaison de la surface topographique par rapport à l'horizontale. Elle est à peu près égale au rapport entre la différence d'altitude de 2 points et la distance de leurs images sur un plan horizontal.

Figure 5



Le travail sur carte demande de projeter les courbes de niveau et le point coté sur le plan horizontal de la carte

Figure 6



Sur une carte, soient A' et B' , 2 points d'un relief d'altitudes connues. Sur la carte, le segment $A'B'$ représente, dans l'espace, à la fois le segment AC , distance horizontale, séparant les 2 points et le segment AB situé sur la pente topographique entre les points A et B d'altitudes différentes.

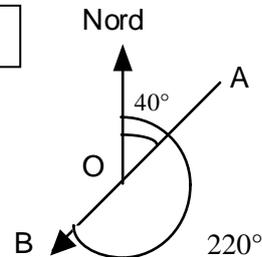
$tg \varphi = BC/AC$, angle de la pente
Distance réelle, sur la pente topographique, entre A et B :
 $cos \varphi = AC/AB$
 $AB = \text{distance réelle} = AC/cos \varphi$

Mesure d'une direction – la direction d'une droite sur une carte est l'angle compté en partant du Nord, dans le sens horaire, jusqu'à la première rencontre avec cette droite.

Si la droite a un sens (direction de marche par exemple), l'angle est compté dans un intervalle de 360° (on parle d'**azimut** ici). Dans le cas d'une droite de sens indifférent, on réduit l'intervalle de mesure à 180° et on parle de **direction**.

Figure 7

Direction de AB : N40
Azimut de AB : N220



5. Exercices

Carte de LYON

- Quelle est l'échelle de la carte ?
- Quelles sont les coordonnées Lambert du point A, coté 373, situé le long de la départementale 42 au sud de Limonest ?
- Placez sur la carte le point B de coordonnées Lambert $x = 791,775$; $y = 2096,875$.
- Calculez la distance apparente (à vol d'oiseau) entre les points A et B.
- Quelle est l'équidistance des courbes de niveau ?
- En considérant une pente moyenne entre le Mont Thou et le point B, calculez la « distance réelle » qui sépare ces deux points.
- Quelle est la direction de la droite qui joint les points A et B ?

II) CONSTRUCTION D'UN PROFIL TOPOGRAPHIQUE

Un profil topographique est l'intersection de la surface du sol par un plan vertical de direction donnée.

1. La procédure

Le profil est construit sur un diagramme rectangulaire, en reportant le point d'intersection de chaque courbe de niveau avec la trace du plan vertical de direction donnée, ainsi que d'éventuels points cotés. Le report fait intervenir les coordonnées X (distance à l'origine) et Y (altitude) de chaque point repère. Ensuite, il faut relier ces points « en souplesse » pour donner une vision réaliste du relief. Cette opération doit s'effectuer en respectant l'échelle de la carte.

Exemple : profil topographique le long de AB.
 Le long de AB, cochez sur une bande de papier millimétré les intersections avec les courbes de niveau, notez leurs altitudes, et les points cotés s'il y en a, les vallées, les sommets.

Reportez ces données sur un trait horizontal de longueur AB. Dessinez à l'aplomb de A et B une échelle verticale correspondant à la succession des altitudes des courbes. Pour l'équidistance, adopter la même valeur que sur la carte. Construisez point par point le profil du relief. Reliez-les ensuite en tenant compte du style de paysage de la région là où manquent des points.

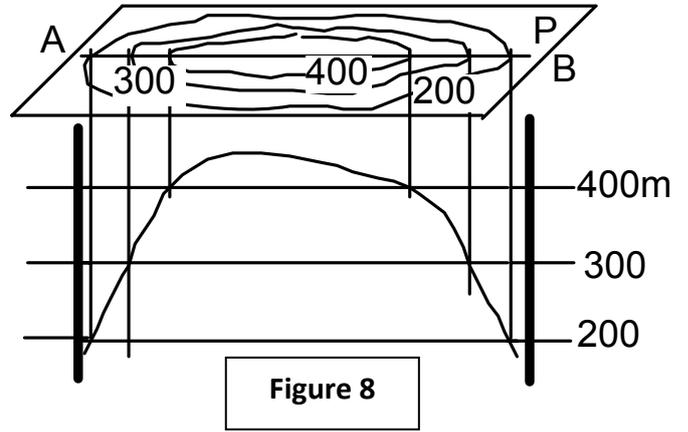
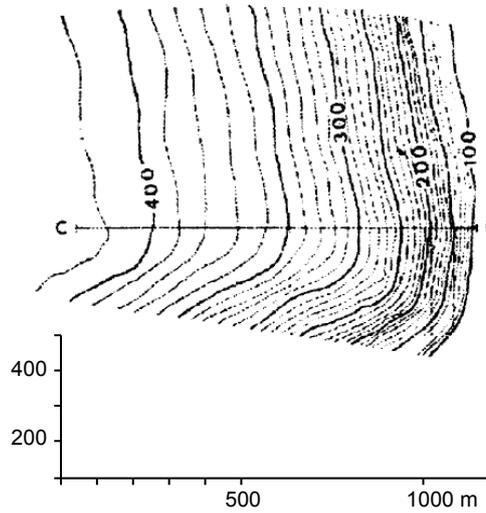
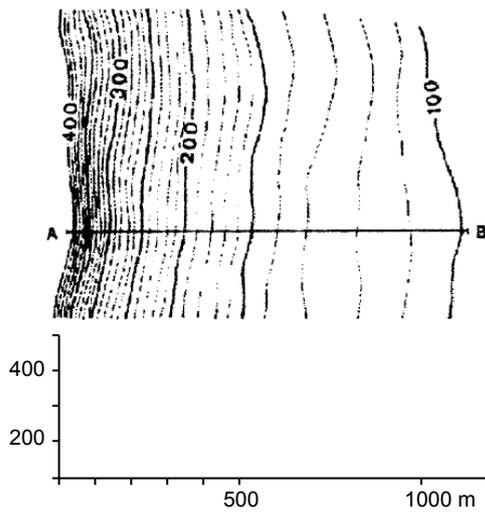


Figure 8

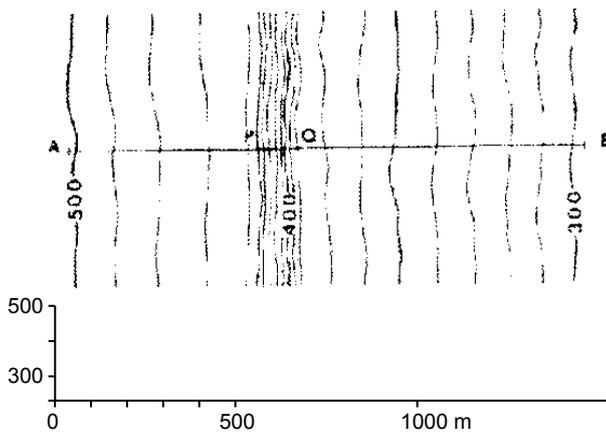
2. Exercices

- Tracez les profils topographiques AB et CD correspondant à différentes formes de relief (pentes régulières, ruptures de pentes, falaises, talwegs).

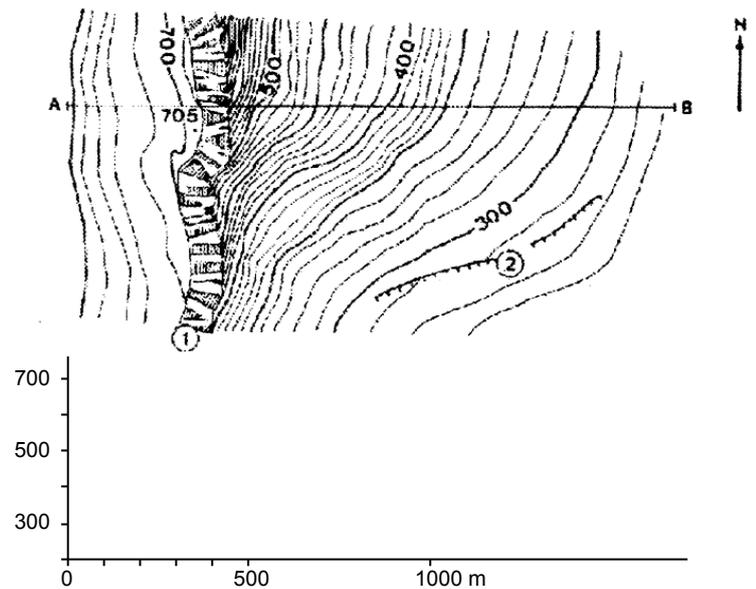
Pentes régulièrement variables



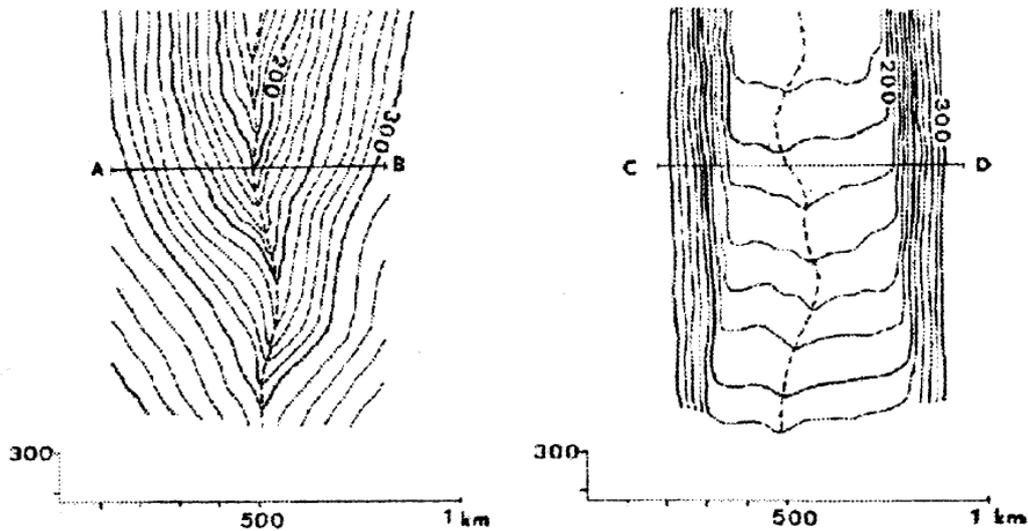
Rupture de pente



Falaise



Vallées



- Sur la carte de Lyon, et sur papier millimétré, tracez le profil topographique entre les points A et B

III) GEOMETRIE DU PLAN

Les objectifs sont ici de savoir orienter un plan dans l'espace, et de comprendre comment on peut représenter des structures géologiques (en 3D) sur une carte (en 2D).

1. Les cartes géologiques

Carte géologique = représentation, sur un fond topographique, des formations géologiques qui affleurent à la surface, où qui sont masquées par un mince recouvrement superficiel (le sol).

Cartes les plus fréquemment utilisées en France :

- 1/50 000, établie à partir de levées sur le terrain effectuées sur un fond topographique au 1/25 000
- Cartes de synthèse au 1/250 000 (régionale), 1/1 000 000 et 1/1 500 000 (nationale).

La carte géologique au 1/50 000 représente la **nature lithologique** et la **disposition géométrique** des formations à l'aide d'un symbolisme. C'est l'image des observations faites sur les affleurements (carte d'affleurement sur fond topographique), et le fruit d'une interpolation entre ces mêmes affleurements.

Toutes les cartes géologiques sont accompagnées, en marge, d'une **légende** (unités géologiques et leur chronologie, symboles conventionnels, signes d'orientation des couches...) et d'une **notice** détaillée (histoire géologique, inventaire des ressources naturelles...).

La difficulté de la lecture des cartes géologiques réside dans la détermination de la géométrie tridimensionnelle des formations géologiques d'après l'image plane de leur intersection avec la surface topographique. Si on sait déterminer **l'orientation d'un plan incliné dans l'espace**, la reconnaissance, sur la carte géologique, de nombreuses structures géologiques (**tabulaires, monoclinales**) sera facilitée. En effet, celles-ci peuvent être considérées, en première approximation, comme faites de divers plans inclinés.

C'est le cas pour les structures monoclinales (les **limites de couches sont planes et parallèles, mais présentent un PENDAGE**). Ici, orienter les couches géologiques, c'est **orienter des plans dans l'espace**.

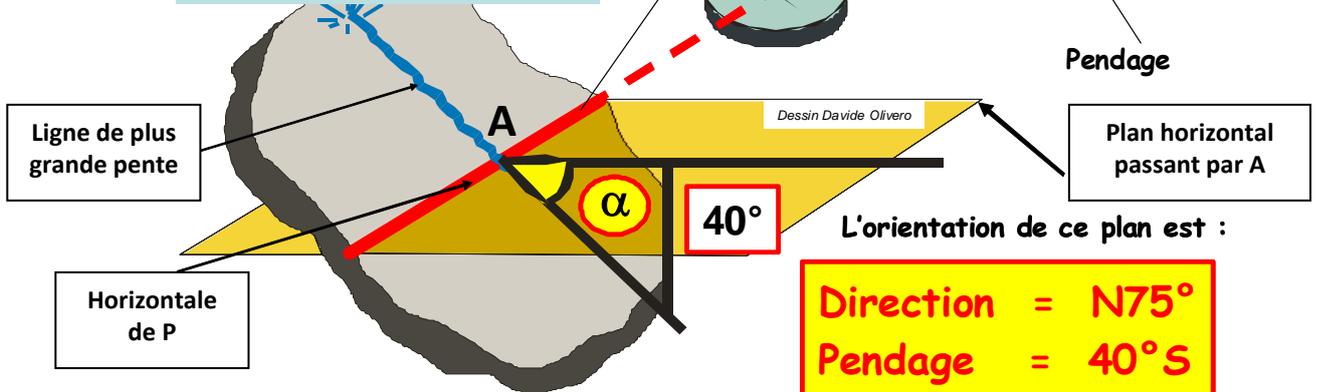
2. Orientation d'un plan dans l'espace

L'orientation d'un plan dans l'espace nécessite la définition de deux droites remarquables :

- **L'horizontale du plan** : matérialise, sur un plan P, la trace d'un plan horizontal passant par A.
- **La ligne de plus grande pente** : visualise la direction d'écoulement d'un filet d'eau sur P. Cette ligne est **orthogonale à l'horizontale du plan**. C'est un axe puisqu'on la polarise selon son plongement.

Figure 9

Représentation de l'orientation d'une couche sur une carte :

On mesure, à l'aide d'un BOUSSOLE :

1. **La direction de l'horizontale du plan** (direction = droite correspondant à l'intersection d'une couche inclinée avec un plan horizontal; mesurée / au Nord, sens horaire).
 2. **L'intensité α du plongement** de la ligne de plus grande pente (angle entre une couche et un plan horizontal ; mesuré avec le clinomètre de la boussole)
 3. **Le secteur géographique du plongement** de la ligne de plus grande pente.
- L'angle du pendage (compris entre 0 et 90°) est l'angle de la couche avec un plan horizontal.

3. D'un plan incliné à sa trace sur la carte

Soit un plan incliné P (figure 10). Imaginons des plans horizontaux P1, P2, P3. Par commodité, on les espacera régulièrement en altitude (cet espacement est l'équidistance ; 50 m dans cet exemple), et on choisira des chiffres ronds pour ces altitudes.

Figure 10

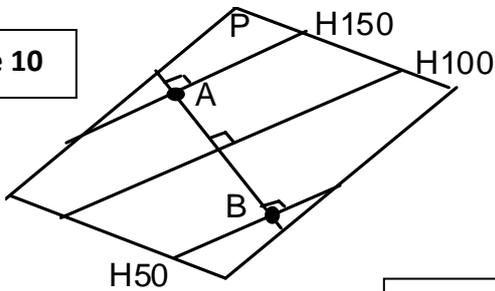
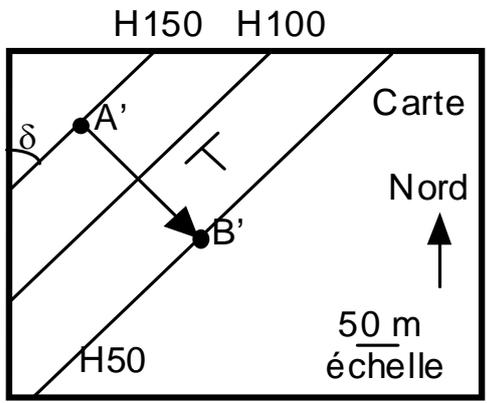


Figure 11



- P1, P2, P3 recouperont P selon les horizontales H50, H100, H150 de P, parallèles entre elles.
- Soit un point A dans P, par exemple sur une horizontale. Traçons un vecteur partant de A et suivant la ligne de plus grande pente. La géométrie dans l'espace démontre que cette ligne recoupera perpendiculairement les horizontales de P, par exemple en B.
- Le plan P sera désormais défini par au moins deux horizontales, et une ligne de plus grande pente, du point de vue de leur inclinaison.
- Nous pouvons maintenant ne plus considérer le plan P. Nous nous intéressons seulement à son système d'horizontales (2 sont nécessaires et suffisantes) et une ligne de plus grande pente.
- La figure 11 représente la projection de ces éléments sur le plan horizontal d'une carte. Il y a parallélisme et équidistance des projections des horizontales entre elles. Il y a une perpendicularité entre la projection de la ligne de plus grande pente A'B' et celles des horizontales.

Lorsqu'elles sont projetées sur une carte, les horizontales peuvent être appelées **isohypses**, chacune correspondant à une altitude donnée (i50, i100, 150).

L'angle δ entre une des isohypses et le Nord est la **direction** de cette isohypse (figure 11). C'est également la direction du plan. Elle est mesurée en partant du Nord et en allant dans le sens horaire.

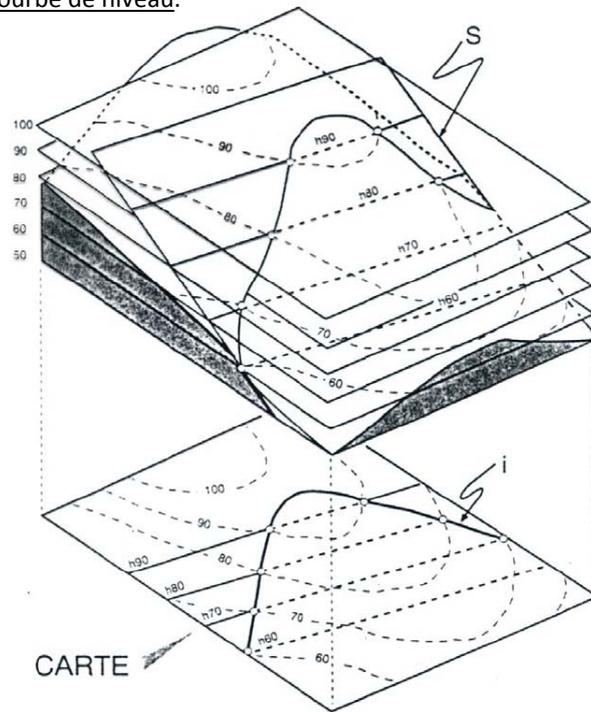
Le signe « **T** » placé à côté des isohypses (**figure 11**) est facultatif sur les cartes. Le long trait est parallèle aux isohypses. Le petit trait, perpendiculaire aux isohypses, est le sens du plongement du plan. Parfois, un chiffre y est joint. C'est un signe de pendage (en degrés).

Construction des isohypses d'un plan : considérations

- Courbe de niveau = ensemble des points de la surface topographique qui sont à la même altitude.
- La trace cartographique d'un plan géologique (S ; **figure 12**) incliné représente l'ensemble des points de ce plan situés sur la surface topographique. C'est donc l'intersection de ce plan avec les courbes de niveau
- La droite joignant 2 points au moins déterminés le long d'une même courbe de niveau est l'isohypse d'altitude correspondant à celle de la courbe de niveau.

Figure 12

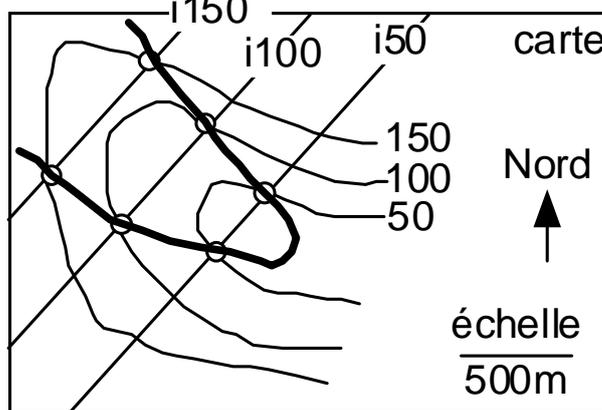
Réseau d'horizontales du plan S, vues dans l'espace et en carte



Exemple simple : soit la trace cartographique d'un plan (**figure 13**), donner la géométrie (direction et pendage) de ce plan

Figure 13

L'obtention de l'intensité de l'angle du pendage se fait à l'aide d'un rapport trigonométrique simple $tg\varphi$



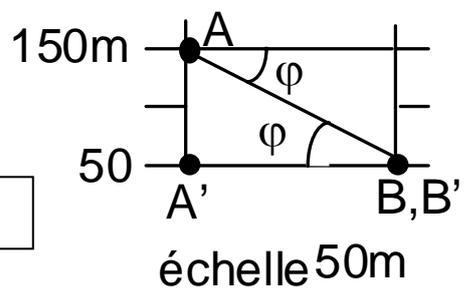
Direction : angle entre le Nord géographique et la direction d'une des isohypses du plan
Pendage : rapport trigonométrique établi dans un plan de coupe vertical perpendiculaire à la direction des isohypses (passant par la ligne de plus grande pente)

$tg\varphi = \text{différence d'altitude entre 2 isohypses} / \text{distance apparente}^*$

(calcul qui fait abstraction de la topographie : $tg\varphi = AA'/A'B$)

*distance apparente = écartement (sur carte) entre ces 2 isohypses

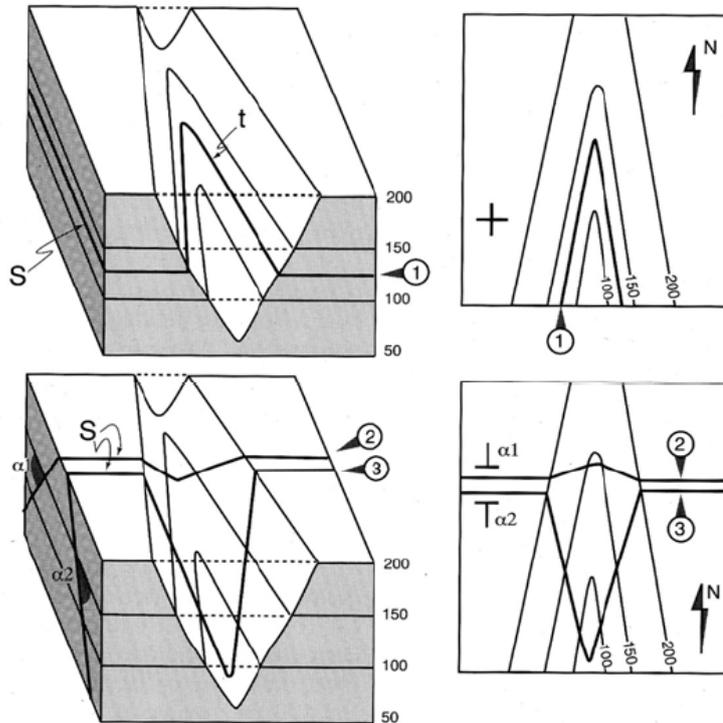
Figure 14



Détermination du sens des pentages : « règle des V ; du chevron » (figure 15)

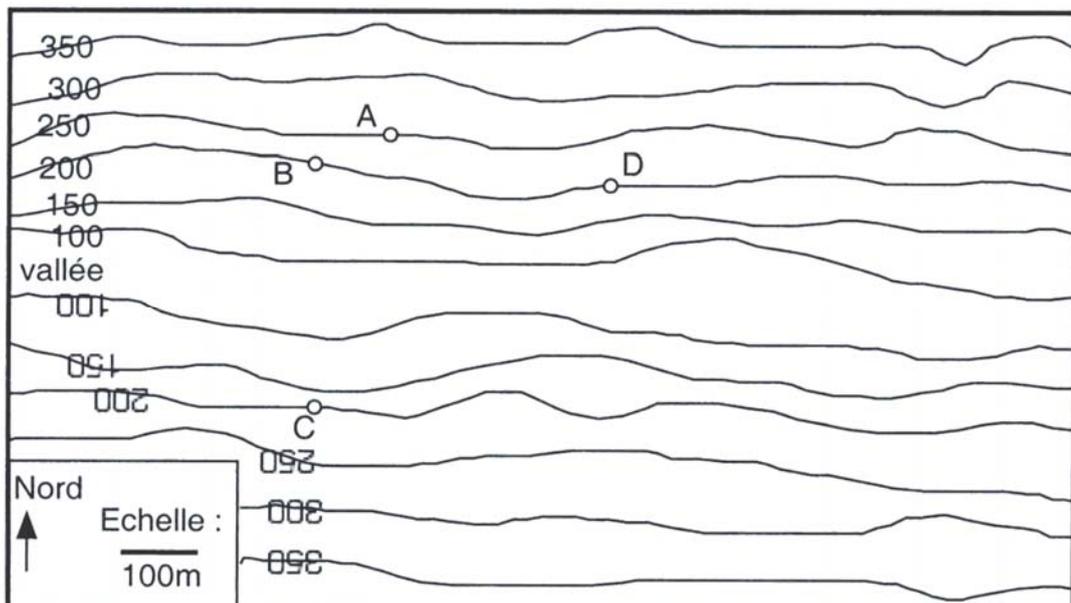
Le contour dessine, dans les vallées, un « V » dont la pointe est dirigée selon la direction de plongement des surfaces (sauf quand pendage < pente). C'est l'inverse sur les lignes de crêtes (ouverture du V dirigée dans le sens du pendage).

Figure 15



4. Exercice

- A l'ouest : la trace cartographique d'un plan P1 affleure au sol en 3 points A, B et C. Par construction des isohypses de ce plan, trouver la direction et le pendage du plan, et dessiner sa trace complète sur la carte (rappel : cartographier la trace d'un plan, c'est repérer les intersections entre les isohypses de ce plan et les courbes de niveau de même altitude, et relier ces points d'intersection en souplesse)
- A l'est : la trace d'un plan P2 touche le sol au point D. Sa direction est N135. Quant au pendage, le plan plonge de 50 m pour une distance de 100m, vers le NE. Par construction des isohypses, dessiner la trace du plan sur la carte.



IV) DE LA CARTE A LA COUPE GEOLOGIQUE EN SYSTEME MONOCOUCHE

L'objectif est de construire une coupe géologique sous un profil topographique, en ne considérant ici qu'une seule couche.

1. De la trace cartographique d'un plan à sa géométrie

Il est fréquent, en particulier dans le cas des couches sédimentaires, qu'elles puissent être définies comme une succession de plans limites de couches (joints de stratification) parallèles.

A partir de la trace cartographique de deux de ces plans limites, on peut déterminer l'épaisseur e de la couche qu'ils délimitent.

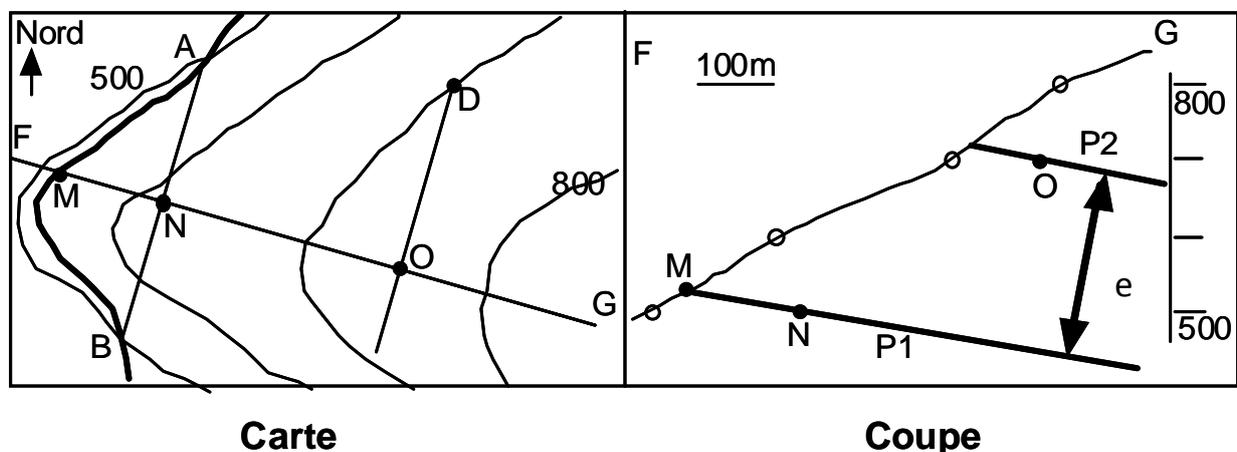
$$e = d \times \sin \varphi, \text{ d étant la distance apparente (sur la carte) entre 2 isohypses de même altitude, situées aux limites inférieure et supérieure de la couche}$$

Associée au pendage φ , cette donnée permet de reconstituer la succession des couches sous un profil topographique, c'est-à-dire de construire une **COUPE GEOLOGIQUE**.

Soit un itinéraire FG (**figure 16**) sur la carte géologique (à gauche) : la représentation en coupe (à droite) de la structure monoclinale cartographiée passe par le tracé, dans un plan vertical à FG :

- 1) du profil topographique
- 2) des divers plans géologiques, en profondeur sous le profil et arrivant jusqu'à la surface topographique

Figure 16



Comment passer de la carte géologique à la coupe géologique ?

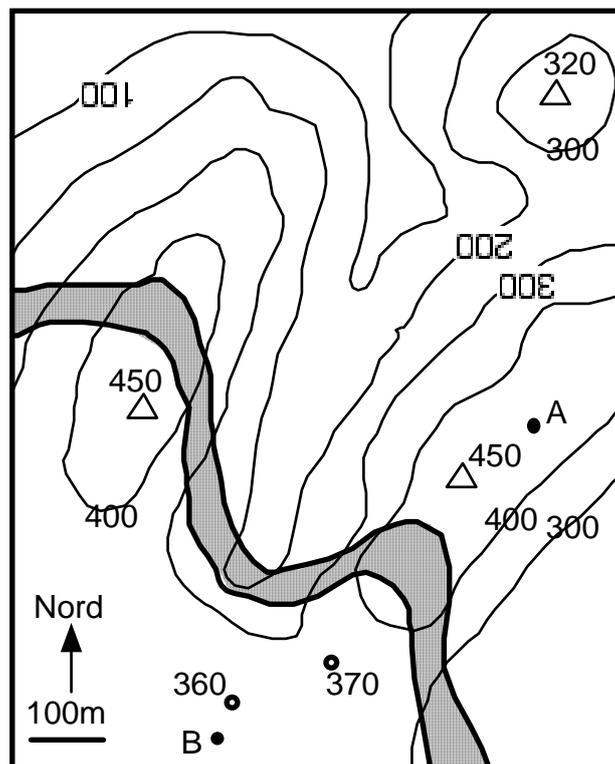
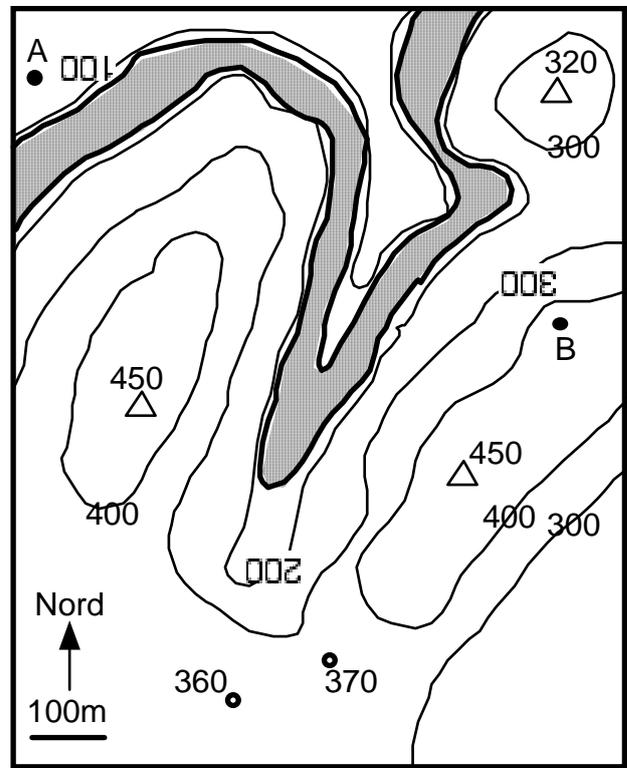
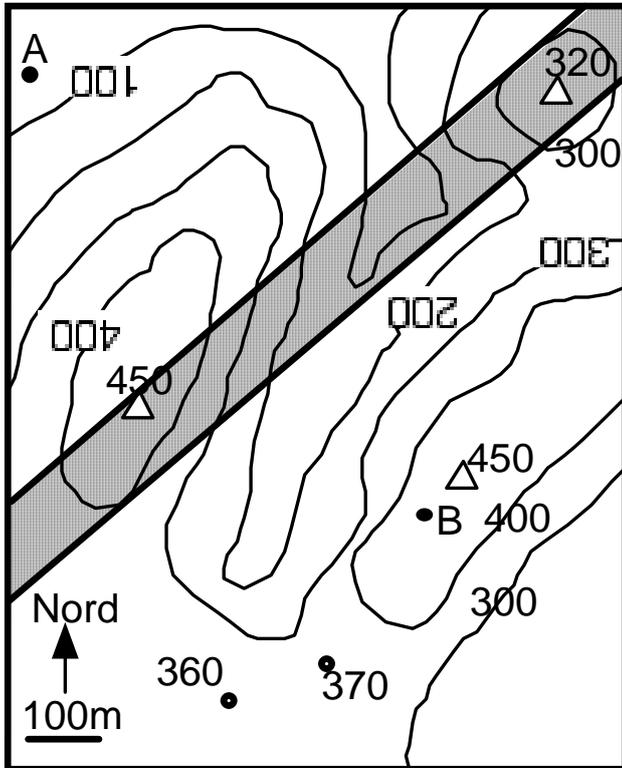
La méthode est la suivante :

- Faire le profil topographique selon FG
- Chercher une trace d'un plan géologique P1 qui recoupe 2 fois une même courbe de niveau. Joindre les deux points d'intersection (A et B) : = isohypse de P1, perpendiculaire à FG.
- Soit M l'intersection entre la trace du plan géologique et FG (M est à l'affleurement), et N l'intersection entre FG et AB. N est à l'altitude de l'isohypse AB, et sa distance horizontale FN est mesurable (donc N peut être placé sur le profil topographique). M et N appartiennent tous deux à P1 : leur jonction permet de tracer ce plan sur le profil, et de mesurer directement son pendage.
- Soit sur la carte un point D où un plan P2 parallèle à P1 est à l'affleurement : on peut tracer une seconde isohypse, parallèle à la première = DO.
- L'altitude de O est connue (= celle de la courbe de niveau passant par D), et la distance horizontale FO est mesurable. On peut donc placer O sur le profil topographique.
- On obtient ainsi une coupe géologique des couches cartographiées, et l'épaisseur de la couche géologique comprise entre P1 et P2 est mesurable (toujours perpendiculairement aux plans).

2. Exercices

Chacune des figures ci-dessous présente les traces cartographiques de deux plans parallèles (trais gras) encadrant une couche sédimentaire dont l'affleurement à la surface du sol est grisé. Les courbes en traits fins sont les courbes de niveau. Sur chaque carte, deux points A et B sont indiqués.

- Dans chacun des trois cas, déterminez la direction, le pendage, et l'épaisseur de la couche qui affleure en grisé
- Dans chacun des trois cas, faites un profil topographique entre les points A et B et placez les plans limites de couche.



V) DE LA CARTE A LA COUPE GEOLOGIQUE EN SYSTEME MULTICOUCHE

On s'adresse maintenant à des superpositions de couches géologiques. On prendra ici des couches aux limites planes et parallèles les unes aux autres (structures **tabulaires** et **monoclinales**) – du moins tant qu'on ne franchit pas de faille.

1. Construction des coupes géologiques tabulaires

Nous avons vu que si les limites de couches sont parallèles aux courbes de niveau, alors c'est qu'elles sont horizontales, et que la structure géologique est tabulaire. Dans ce cas, en suivant la méthode vue précédemment dans le cas de structures monocouches, et sous le profil topographique :

- on commence par construire les couches les plus superficielles, car situées près du sol, elles sont plus faciles à mettre en place.
- on construit les couches plus profondes (en s'aidant si c'est possible des données de sondage)
- on orne chaque couche de figurés, qui sont des dessins symbolisant la nature lithologique de chaque couche.

2. Construction de coupes géologiques monoclinales

Si les couches ne sont pas horizontales, il faut construire la géométrie des plans limites de couches selon les règles vues auparavant dans le cadre des structures monocouches.

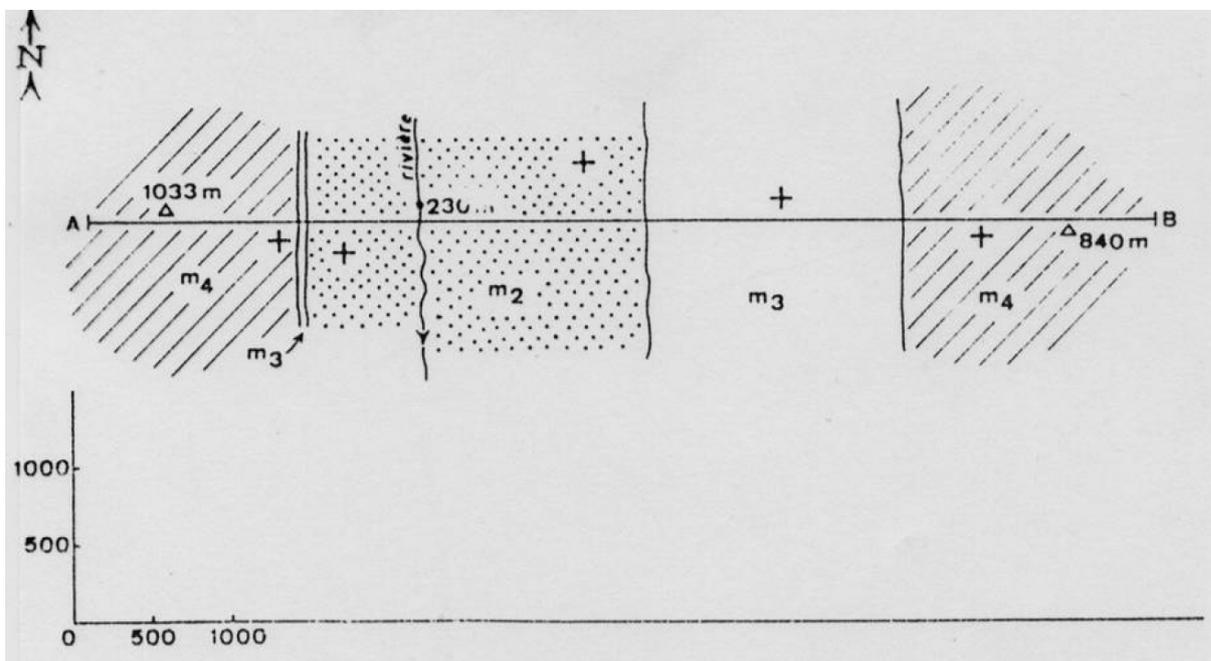
La procédure générale est la suivante :

- On trace le profil topographique.
- On trace les plans de failles s'il y en a. Ils sont indiqués sur les cartes par des traits gras. Ils se construisent comme les plans limites de couches des exercices précédents.
- On construit les accumulations de couches situées entre les failles. Chacune s'appelle un **compartiment**. Le pendage dans un compartiment est constant, compte tenu des suppositions que l'on a faites (pas de structures plissées). On construit les couches les plus superficielles d'abord, puis les couches plus profondes, enfin on orne chaque couche des figurés symbolisant la nature de chaque couche.

Attention, chaque compartiment peut avoir son propre pendage de couches.

3. Exercices

- Sachant que les couches sont toutes horizontales, que la couche $m_4 = 400$ m d'épaisseur (à l'aplomb de la cote 1033) et que $m_3 = 250$ m (couche résistante à l'érosion), donner l'allure du profil topographique et de la coupe géologique transversaux à la vallée.



- Sur la carte géologique ci-dessous, reconstituez la coupe géologique le long du plan vertical défini entre les points cotés 140 (Ouest) et 120 (Est).
Après le tracé du profil topographique, vous commencerez par la coupe du compartiment Ouest, puis celle du compartiment Est, puis enfin, si vous avez le temps, celle du compartiment central.

Courbes de niveau en tiretés
 équidistance 10 m

Echelle : 1/5000

- J 3 calcaire
- J 2 argiles
- J 1 calcaire argileux (15 m)
- L 5 grès fin
- L 4 grès grossier
- L 3 calcaire
- L 2 marnes
- L 1 argiles

