

## DÉVIATION DE LABÉGUDE

### Avant-Projet Sommaire (APS)

## PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Objectif : construire une coupe géologique à l'échelle d'un ouvrage (ici un tracé routier) et l'habiller à partir de données réelles récoltées sur le terrain et par sondages. Le cours permet aussi de revoir les principaux types de roches.

La solution retenue pour la déviation de Labégude, sur la Route Nationale 102, suit grossièrement l'ancien tracé d'une voie ferrée, actuellement désaffectée. Le projet comprend la construction d'ouvrages de franchissement en tranchée couverte à proximité des habitations. Le franchissement du ruisseau Mercouer s'effectue en grand remblai, ainsi que la liaison avec l'actuelle RN 102 dans sa partie SE. Le reste du tracé passe principalement en déblai.

L'étude géologique et géotechnique d'avant-projet définit les différentes formations géologiques et leur comportement par la visite du site, l'étude de la carte géologique et des campagnes de sondages et d'essais le long du tracé :

- sondages à la pelle mécanique (**PM**) pour déterminer la nature et les caractéristiques des terrains et préparer les travaux de terrassements (excavation et réemploi en remblai ; classification GTR – NF ) ;
- sondages pressiométriques (**SP**) pour évaluer la nature et les caractéristiques mécaniques des sols et préparer le dimensionnement des ouvrages (mur de soutènement, tranchées couvertes) ;
- sondages de sismique-réfraction (**D**) pour déterminer la nature et l'état d'altération du rocher ainsi que sa profondeur et le mode d'extraction pour les remblais.

*Note : les méthodes de reconnaissances géophysiques et mécaniques ne sont pas décrites, car elles font l'objet de prochains cours. Les résultats utilisés ici sont déjà interprétés.*

Le rapport du géologue signale que diverses formations sont rencontrées le long du tracé :

#### *Les formations superficielles*

On constate en surface la présence d'épaisseurs variables de matériaux de nature diverse, plus ou moins limoneuse voire argileuse. Ces matériaux correspondent à des remblais SNCF, des ballasts ou des formations de type éboulis, difficilement identifiables. Ces formations superficielles masquent les altérations de grès et de granites. Leur limite n'est pas facile à déterminer. Elles ont pour vitesse de propagation des ondes des valeurs comprises entre 350 et 500 m/s, d'une part, et entre 600 et 700m/s, d'autre part.

#### *Les formations métamorphiques et magmatiques plutoniques*

Il s'agit essentiellement de migmatites granitiques et gneissiques plus ou moins altérées. Les vitesses sismiques de ce substratum sont comprises entre 2 700m/s et 3 100m/s pour le rocher sain, de l'ordre de 2 250m/s pour le rocher altéré ou fracturé.

### *Les formations sédimentaires*

- Des grès triasiques se présentent sous la forme de gros bancs massifs de 0,20 à 1,20m d'épaisseur orientés N10, 25E. Ces roches peuvent être altérées et friables à la main en surface, mais très compactes en profondeur. Parfois elles peuvent devenir peu consistantes en profondeur et se rencontrent sous forme de sable. La prospection sismique donne des vitesses comprises entre 2 700 et 3 100m/s. pour le rocher sain et 1 200 à 1 900m/s pour les grès altérés
- Les calcaires du Lias inférieur, de couleur sombre, sont gréseux et silicifiés, à débris coquilliers. Ces calcaires durs ont une cassure conchoïdale. La stratigraphie a une orientation générale N62 14W à N40 20W.
- Ces formations sont surmontées de marno-calcaires sur 6m environ, de même orientation. Les bancs de calcaire fin ont une puissance de 5 à 10cm. Les intercalations de marnes de quelques centimètres d'épaisseur ont une couleur sombre.
- Puis on rencontre au dessus les bancs de calcaires noduleux, plus consistants que les précédents dont l'épaisseur atteint une quinzaine de centimètres, séparés par une faille sur le coté W du talus, orientée N36 44W.
- Ces calcaires sont ensuite surmontés par de gros bancs de calcaires siliceux, très durs rencontrés dans les sondages PM4 et SP5. Les vitesses sismiques enregistrées varient de 1 900 à 2 650m/s pour un rocher sain et de 1 100 à 1 800m/s pour le rocher fracturé ou altéré.

### Documents fournis

- Une carte géologique à l'échelle du projet
- Les résultats des sondages à la pelle mécanique
- Les interprétations des sondages pressiométriques
- Les interprétations des sondages sismiques
- Un profil du projet à renseigner.

### Eléments de réponse aux questions

- Définir les diverses roches rencontrées.
- *Granite* : Roche magmatique d'origine plutonique grenue. Elle est constituée essentiellement par les minéraux suivants : quartz, micas et feldspath.

### ***Quelques éléments géologiques relatifs au granite***

*C'est la roche éruptive la plus commune à la surface de la terre. Formée par cristallisation lente, à grande profondeur, en conditions quasi-hydrostatiques, c'est une roche massive, isotrope par constitution, ou faiblement anisotrope. En gisement naturel, le granite couvre souvent d'énormes surfaces sur de très grandes épaisseurs.*

*Dans la nature, un massif granitique présente une anisotropie structurale due à la fracturation. Cette fracturation peut être plus ou moins contemporaine du refroidissement, mais surtout d'origine tectonique. Cette anisotropie peut varier beaucoup. Un cas limite est celui de la prédominance absolue d'une famille de fractures, débitant la roche en lames parallèles ; dans ce cas, on rejoint certains aspects des roches sédimentaires (influence de*

*la position en travers banc ou en direction, création de hors profils pour les travaux souterrains, etc.).*

*Un second facteur très important est l'altération. Celle-ci est surtout sensible au voisinage de la surface ou le long des grandes zones faillées. La présence de minéraux argileux compromet parfois la stabilité de pans entiers de rocher.*

*Sous les climats tropicaux, là où l'altération est profonde, on peut ainsi être amené à suivre, dans la mesure du possible, les crêtes sur lesquelles affleure le granite sain.*

*Dans nos régions l'altération du granite a posé des problèmes pour certains tunnels dans le Massif Central qui, du fait de son faible relief et de son histoire géologique, présente des granites beaucoup plus profondément altérés que ceux du massif alpin.*

*À l'inverse, sous forte couverture, ce qui est souvent le cas dans les Alpes, le granite se révèle très sensible aux fortes pressions régnant dans le terrain et il peut éclater brutalement sur les parois ou en couronne (Tunnel du Mont-Blanc). Le granite peut donc se révéler moins favorable qu'il n'y paraît "a priori" pour les travaux souterrains ; suivant les conditions locales, des soutènements importants pourront être nécessaires, voire même localement la confection rapide d'anneaux bétonnés.*

- **Gneiss** : Roche métamorphique à grain moyen ou grossier à foliation souvent nette, caractérisée par des lits généralement de teinte sombre, riche en minéraux ferromagnésien (micas, amphiboles, ...) alternant avec des lits clairs de quartz et de feldspaths.
- **Micaschistes** :

#### **Quelques éléments géologiques relatifs au gneiss et aux micaschistes**

*Les types de roches métamorphiques sont très nombreux et, pour simplifier, nous distinguerons les roches massives (comme le gneiss) et les roches à forte schistosité ou foliation comme les micaschistes.*

*Pour les gneiss, en dehors d'une anisotropie de constitution plus forte que dans le cas des granites nous retrouverons à peu près les mêmes propriétés.*

*Dans le cas des micaschistes, le clivage schisteux facilite l'altération en fonction de son orientation par rapport à la surface topographique. L'altération argileuse sera plus fréquente le long des plans de discontinuité et, de ce fait, la tenue de la roche sera amoindrie dans de telles zones. La nature minéralogique des métamorphites joue un rôle important et certains types de phyllades (variété de micaschistes) particulièrement compactes, à grain très fin, peu altérables, présenteront comme seul inconvénient éventuel l'anisotropie des discontinuités.*

*Dans l'ensemble, il est par conséquent difficile de porter un jugement global sur le comportement des métamorphites en souterrain. Seule une étude approfondie de chaque cas, ou l'expérience acquise dans des terrains similaires, permettra de déterminer leurs aptitudes et de localiser éventuellement les passages particulièrement délicats (grandes zones fracturées, par exemple).*

- **Migmatique** : ensemble qui à l'échelle de l'affleurement est un mélange de granites et de gneiss. Ces roches sont à la limite des roches métamorphiques et magmatiques. Leur genèse est liée à une fusion partielle (anatexie).

- Grès : roche sédimentaire d'origine détritique. Elle est constituée par des grains de sable (quartz) reliés entre eux par un ciment calcaire ou siliceux.

**Quelques éléments géologiques relatifs aux grès**

*La famille des grès (à laquelle nous incorporeront un équivalent métamorphique, les quartzites) est relativement favorable à l'exécution des travaux souterrains. Les difficultés principales sont dues au réseau de discontinuités et à la dureté de la roche. Dans le cas de certains terrains comme le houiller de Maurienne où les bancs de grès alternent avec des schistes argileux certains problèmes de tenue peuvent se poser même en présence de faibles quantités d'eau. Notons à ce propos que les massifs gréseux fracturés peuvent alimenter des venues d'eau non négligeables..*

*La teneur en silice, maximale dans les quartzites, entraîne des difficultés de perforation, une usure importante des outils et des risques de silicose pour le personnel .*

*Les grès massifs et cohérents constituent un terrain favorable aux travaux souterrains.*

*Un cas particulier est celui des molasses comme celles du sillon périalpin. Ces grès tendres sont remarquablement favorables au percement des tunnels même s'ils doivent parfois être revêtus assez rapidement d'une protection superficielle du type gunite (Tunnel circulaire pour l'accélérateur de particules du CERN à Genève ou galerie destinée à l'assainissement du Lac du Bourget).*

- Calcaire : roche sédimentaire constituée essentiellement de carbonate de calcium.

**Quelques éléments géologiques relatifs aux calcaires**

*Il s'agit surtout du groupe des calcaires et des dolomies (et de leurs intermédiaires). Les calcaires et les dolomies sont des roches fragiles qui présentent fréquemment une forte fracturation.*

*Par ailleurs, les calcaires purs sont très sensibles aux phénomènes de karstification (création de cavités par dissolution de la roche sous l'action des eaux d'infiltration). Les conduits ou cavités karstiques peuvent être vides ou colmatés. Dans le premier cas, ils peuvent être le siège de circulations d'eau temporaires ou permanentes (rivières souterraines).*

*Les principales difficultés que l'ingénieur peut redouter dans les calcaires tiennent essentiellement à ce phénomène. La roche, à l'échelle du souterrain, peut se révéler extrêmement hétérogène avec successions de cavités vides ou colmatées d'argile, de brèches argileuses le long des plans de fractures, avec le risque supplémentaire de venues d'eau. Celles-ci peuvent n'être que temporaires (période pluvieuse ou fonte des neiges si le tunnel est dans "la zone de transfert" du karst : galerie de reconnaissance de l'Épine), ou permanentes si l'ouvrage franchit la zone de saturation au voisinage du niveau de base imperméable.*

*D'autres ennuis peuvent survenir au stade de la perforation par coincement des fleurets dans les zones à fissuration dense. Le soutènement par cintres ou anneaux bétonnés provisoire est à envisager sur toute zone faillée en présence de circulation d'eau.*

*Un cas extrême peut être la rencontre d'une cavité ouverte, de grandes dimensions, obligeant à construire un ouvrage pour le passage du tunnel.*

*Il faut noter que la reconnaissance fine des massifs calcaires est très difficile, et que, l'existence de cavités en particulier, n'est pas aisément détectable (microgravimétrie éventuellement).*

*Par contre, sur le tracé de la galerie de la Sainte Victoire du Canal de Provence, une reconnaissance par prospection électrique a donné des résultats encourageants au sein du massif calcaire karstifié et altéré du Bois de la Gardiole. L'emploi combiné des sondages électriques et du traîné électrique à répétition a permis de dresser une carte des résistivités dans un plan vertical passant par la galerie (couverture jamais supérieure à 300 m). Par le biais de la variation des résistivités, on a pu ainsi mettre en évidence les zones saines, fracturées, argileuses, obtenir des précisions sur la profondeur d'altération, confirmer la présence de grands accidents tectoniques. La résistivité s'est révélée un bon critère de la qualité des terrains traversés.*

- Marne et marno-calcaire : roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'argile. Suivant la proportion de calcaire et d'argile, on peut distinguer des argiles marneuses, des marno-calcaires et des calcaires marneux.

**Quelques éléments géologiques relatifs aux marnes et marno-calcaires**

*Nous regroupons dans cette famille toutes les roches contenant une proportion plus ou moins grande d'argile et s'échelonnant en fait des marnes aux argiles. Nous y ajouterons les schistes argileux ayant déjà subi un début de métamorphisme (exemple : schistes du Lias supérieur du revers oriental de l'axe cristallin Belledonne Grandes-Rousses).*

*L'anisotropie de constitution ou de structure est souvent forte et la direction du tunnel devra, dans la mesure du possible, tenir compte de ce facteur.*

*Il s'agit dans l'ensemble de roches peu perméables, où les venues d'eau sont limitées, voire inexistantes. La dureté n'est jamais très forte et l'ouvrabilité est en général très bonne. Ces roches sont donc très favorables à l'exécution des travaux souterrains moyennant quelques précautions.*

*Il est fréquent que, quelques temps après l'ouverture de l'excavation, des phénomènes de gonflement en paroi se manifestent, déclenchant un écaillage des parements (rien à voir avec la libération des contraintes dans les granites ou gneiss sous forte couverture). Ce phénomène, outre le danger permanent qu'il entraîne pour le personnel, conduit à des hors-profils importants si des mesures adéquates ne sont pas prises à temps (boulonnage, gunitage, voire éventuellement pose de cintres).*

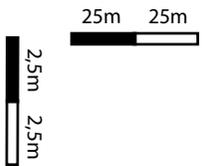
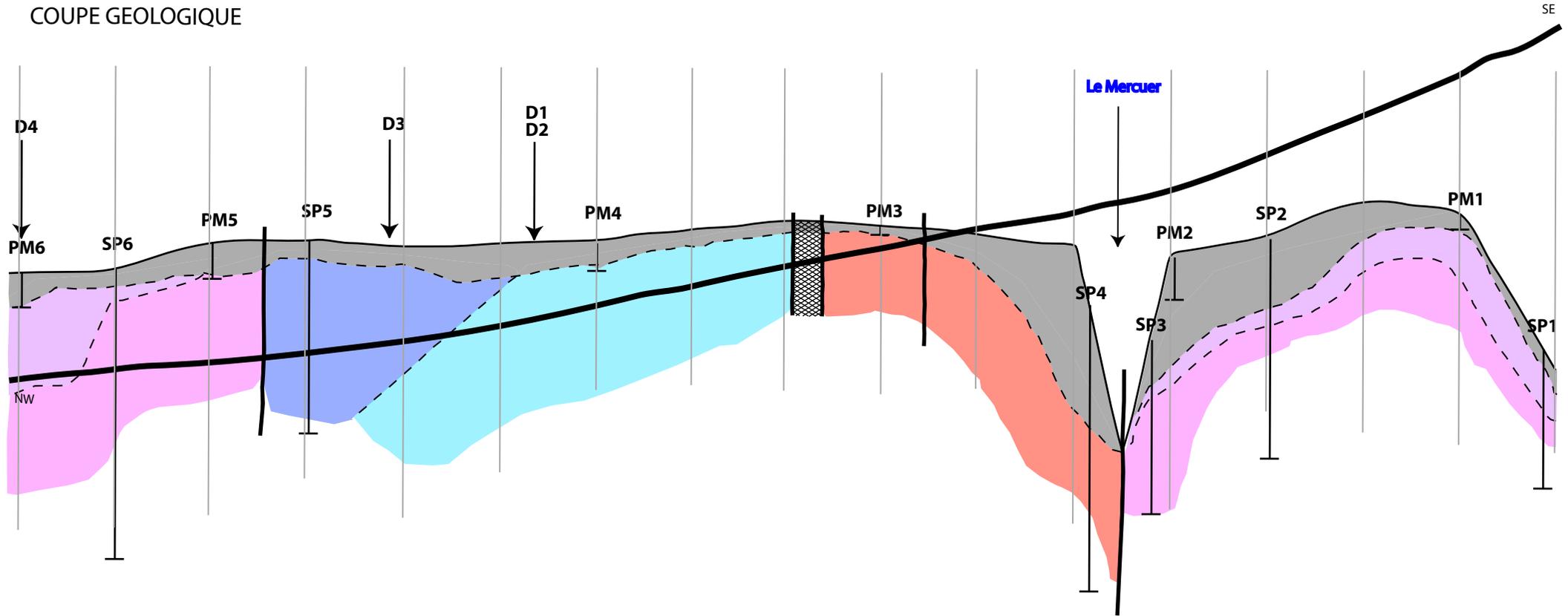
*Dans le cas de schistes argileux soumis à de fortes contraintes internes, on peut observer une tendance à la fermeture de l'excavation avec une déformation considérable des cintres (exemple : adduction amont de l'aménagement de la Coche à l'attaque du Nant Brun, où les schistes triasiques sub-briançonnais ont causé les pires ennuis du point de vue de la tenue).*

*Dans le cas d'argiles pures, plastiques, une technique spéciale de perforation peut être employée, celle du bouclier. Il s'agit en fait d'une trousse coupante, la dimension du souterrain, poussée par des vérins, et en arrière de laquelle on peut réaliser immédiatement un revêtement (emploi de voussoirs préfabriqués, par exemple). Une telle méthode a été fréquemment utilisée dans la construction de tunnels pour chemins de fer métropolitains (Budapest, Londres, New York, Moscou, etc.).*

- Faire la coupe géologique **soignée** du projet sur le fond de coupe en utilisant la carte géologique et le cahier de sondage. Il faut passer par les étapes suivantes :
  - étudier la carte géologique afin de repérer les différentes courbes de niveau, reconnaître les talwegs, etc.,
  - placer sur la coupe les limites des couches,
  - placer sur la coupe les différents points de sondage,
  - représenter les différentes épaisseurs,
  - construire et habiller le profil.

RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE  
 Avant projet sommaire

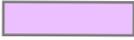
COUPE GEOLOGIQUE



Reconnaitances

- SP** Sondages pressiométriques
- PM** Sondages à la pelle mécanique
- D** Sondages sismiques réfractions

Géologie

-  T : Grès du Trias
-  Ta : Grès altérés recouverts de formations meubles
-  J<sub>2</sub> : Marno-calcaires et calcaires noduleux du Lias
-  J<sub>1</sub> : Calcaires du Lias
-  δ : Roches cristallines (granites migmatiques et gneissiques)
-  F : Failles
-  Zone faillée

## DÉVIATION DE LABÉGUDE

### Avant-Projet Sommaire (APS)

## PROFIL EN LONG GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Objectif : construire une coupe géologique à l'échelle d'un ouvrage (ici un tracé routier) et l'habiller à partir de données réelles récoltées sur le terrain et par sondages. Le cours permet aussi de revoir les principaux types de roches.

La solution retenue pour la déviation de Labégude, sur la Route Nationale 102, suit grossièrement l'ancien tracé d'une voie ferrée, actuellement désaffectée. Le projet comprend la construction d'ouvrages de franchissement en tranchée couverte à proximité des habitations. Le franchissement du ruisseau Mercouer s'effectue en grand remblai, ainsi que la liaison avec l'actuelle RN 102 dans sa partie SE. Le reste du tracé passe principalement en déblai.

L'étude géologique et géotechnique d'avant-projet définit les différentes formations géologiques et leur comportement par la visite du site, l'étude de la carte géologique et des campagnes de sondages et d'essais le long du tracé :

- sondages à la pelle mécanique (**PM**) pour déterminer la nature et les caractéristiques des terrains et préparer les travaux de terrassements (excavation et réemploi en remblai ; classification GTR – NF ) ;
- sondages pressiométriques (**SP**) pour évaluer la nature et les caractéristiques mécaniques des sols et préparer le dimensionnement des ouvrages (mur de soutènement, tranchées couvertes) ;
- sondages de sismique-réfraction (**D**) pour déterminer la nature et l'état d'altération du rocher ainsi que sa profondeur et le mode d'extraction pour les remblais.

*Note : les méthodes de reconnaissances géophysiques et mécaniques ne sont pas décrites, car elles font l'objet de prochains cours. Les résultats utilisés ici sont déjà interprétés.*

Le rapport du géologue signale que diverses formations sont rencontrées le long du tracé :

#### *Les formations superficielles*

On constate en surface la présence d'épaisseurs variables de matériaux de nature diverse, plus ou moins limoneuse voire argileuse. Ces matériaux correspondent à des remblais SNCF, des ballasts ou des formations de type éboulis, difficilement identifiables. Ces formations superficielles masquent les altérations de grès et de granites. Leur limite n'est pas facile à déterminer. Elles ont pour vitesse de propagation des ondes des valeurs comprises entre 350 et 500 m/s, d'une part, et entre 600 et 700m/s, d'autre part.

#### *Les formations métamorphiques et magmatiques plutoniques*

Il s'agit essentiellement de migmatites granitiques et gneissiques plus ou moins altérées. Les vitesses sismiques de ce substratum sont comprises entre 2 700m/s et 3 100m/s pour le rocher sain, de l'ordre de 2 250m/s pour le rocher altéré ou fracturé.

*Les formations sédimentaires*

- Des grès triasiques se présentent sous la forme de gros bancs massifs de 0,20 à 1,20m d'épaisseur orientés N10, 25E. Ces roches peuvent être altérées et friables à la main en surface, mais très compactes en profondeur. Parfois elles peuvent devenir peu consistantes en profondeur et se rencontrent sous forme de sable. La prospection sismique donne des vitesses comprises entre 2 700 et 3 100m/s. pour le rocher sain et 1 200 à 1 900m/s pour les grès altérés
- Les calcaires du Lias inférieur, de couleur sombre, sont gréseux et silicifiés, à débris coquilliers. Ces calcaires durs ont une cassure conchoïdale. La stratigraphie a une orientation générale N62 14W à N40 20W.
- Ces formations sont surmontées de marno-calcaires sur 6m environ, de même orientation. Les bancs de calcaire fin ont une puissance de 5 à 10cm. Les intercalations de marnes de quelques centimètres d'épaisseur ont une couleur sombre.
- Puis on rencontre au dessus les bancs de calcaires noduleux, plus consistants que les précédents dont l'épaisseur atteint une quinzaine de centimètres, séparés par une faille sur le coté W du talus, orientée N36 44W.
- Ces calcaires sont ensuite surmontés par de gros bancs de calcaires siliceux, très durs rencontrés dans les sondages PM4 et SP5. Les vitesses sismiques enregistrées varient de 1 900 à 2 650m/s pour un rocher sain et de 1 100 à 1 800m/s pour le rocher fracturé ou altéré.

Questions

- Définir les diverses roches rencontrées le long du tracé.
- Représenter la coupe géologique du projet sur le document joint (profil du projet) en utilisant la carte géologique et les résultats des sondages.

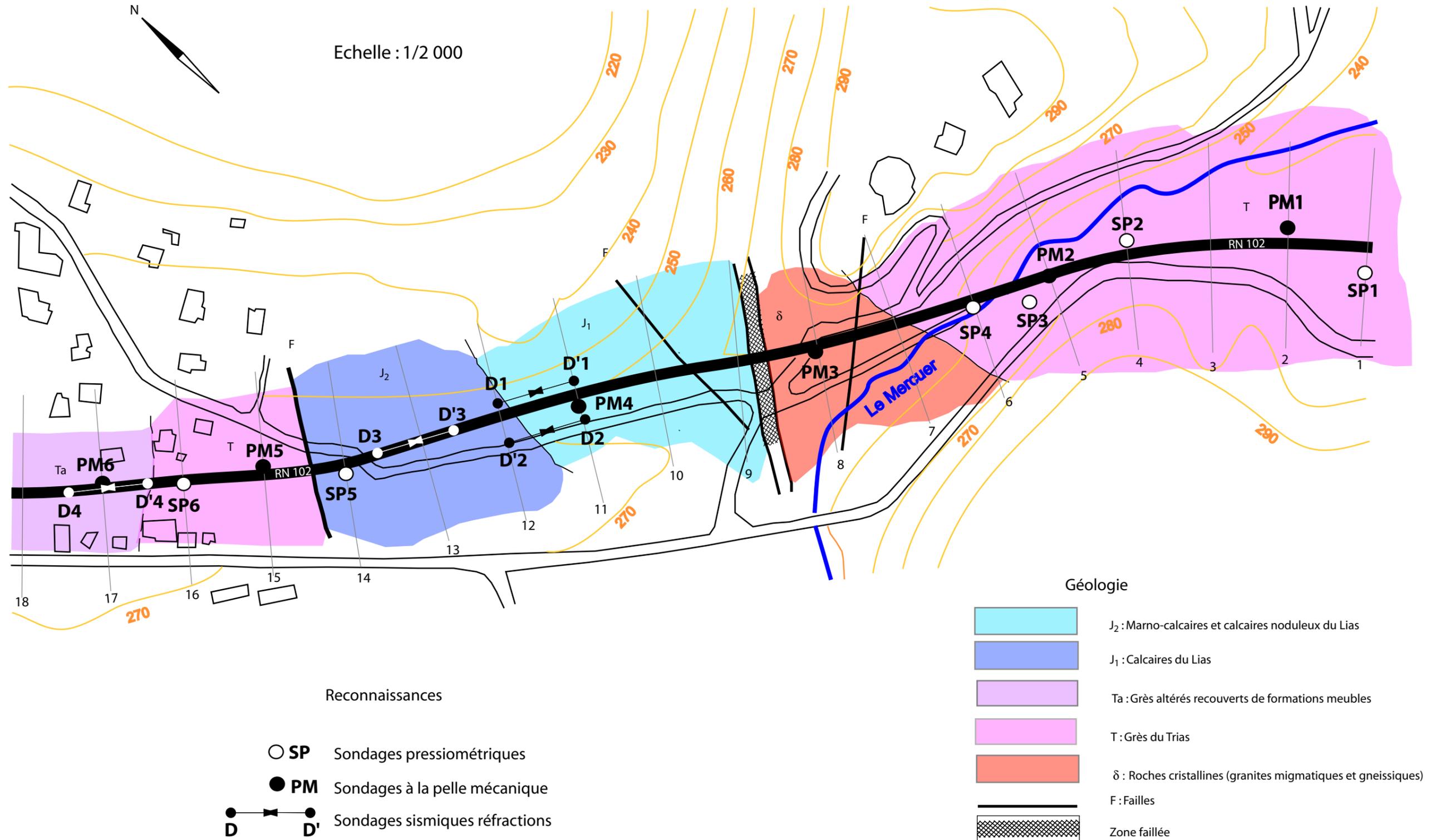
Documents fournis

- Une carte géologique à l'échelle du projet
- Les résultats des sondages à la pelle mécanique
- Les interprétations des sondages pressiométriques
- Les interprétations des sondages sismiques
- Un profil du projet à renseigner.

# RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE

Avant projet sommaire

## CARTE GEOLOGIQUE ET DES SONDAGES DE RECONNAISSANCE



# RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE

## Avant projet sommaire

### SONDAGES A LA PELLE MECANIQUE

**PM1**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai : grave sablo-limoneuse 0-400mm de couleur beige-gris Quelques blocs > 80 mm	C1 B5 m à h
0,2		
0,4		
0,6	Arrêt à 0,85 m sur le rocher (grès du Trias)	
0,8		
1		
1,2		
1,4		
1,6		
1,8		
2		
2,2		
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

**PM2**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai : mélange de ballast et argile	C1 B5 th à B5 th
0,2	Une dalle en béton	
0,4		
0,6		
0,8		
1	Grave sablo-limoneuse 0-80 mm	
1,2		
1,4		
1,6		
1,8		
2	Arrêt à 1,90 m (pour sécurité, canalisation)	
2,2		
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

**PM3**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai SNCF en ballast noir	C1 B5 m
0,2		
0,4	Remblai SNCF : grave sablo argileuse 0-80 mm	
0,6		
0,8	Arrêt à 0,65 m sur le rocher (granite)	
1		
1,2		
1,4		
1,6		
1,8		
2		
2,2		
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

**PM4**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai : grave sablo-limoneuse 0-100 mm de couleur beige-gris.	C1 B5 th
0,2		
0,4	Dalles calcaires gris et gros blocs	
0,6		
0,8		
1	Grave sablo-limoneuse gris beige	
1,2		
1,4		
1,6	Arrêt à 1,40 m sur le rocher (ou dalle ?)	
1,8		
2		
2,2		
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

**PM5**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai SNCF en ballast	A2 sm B5 m
0,2		
0,4		
0,6	Remblai SNCF : argile graveleuse peu plastique	
0,8		
1		
1,2		
1,4		
1,6		
1,8		
2	Grès altéré avec des blocs (rippable)	
2,2	Arrêt à 2 m dans les grès plus durs	
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

**PM6**

Prof. (m)	Nature des terrains Description visuelle	Désignation géotechnique
0	Remblai SNCF : Ballast noir	C1 A3 m
0,2		
0,4		
0,6		
0,8		
1	Argile graveleuse plastique	
1,2		
1,4		
1,6		
1,8		
2	Arrêt à 1,90 m sur le rocher altéré	
2,2		
2,4		
2,6		
2,8		
3		
3,2		
3,4		
3,6		
3,8		
4		

# RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE

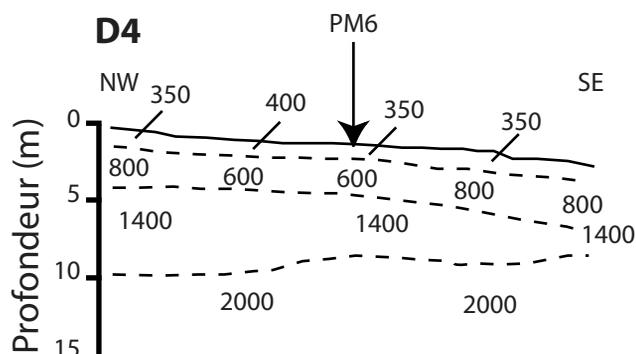
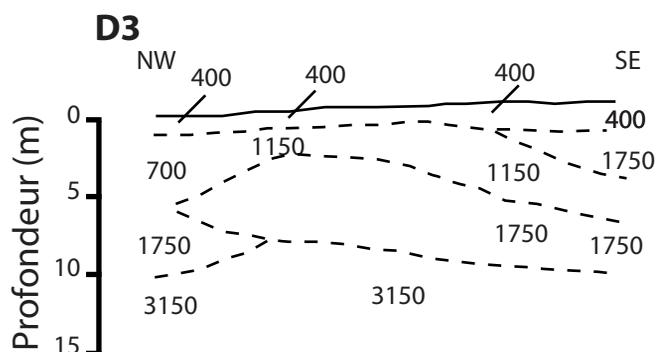
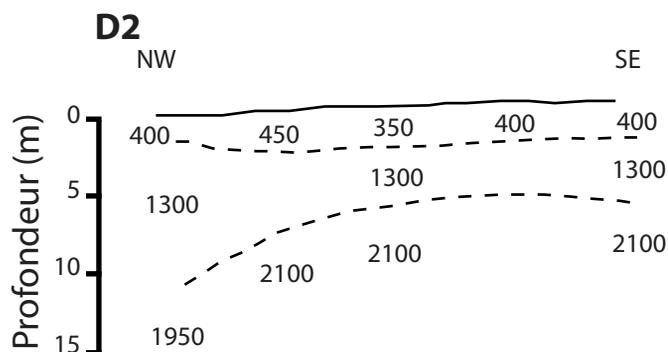
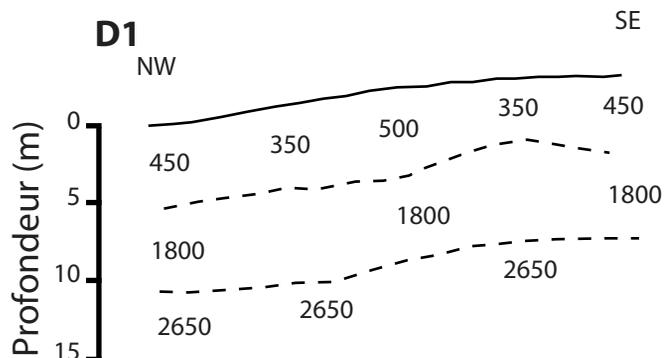
## Avant projet sommaire

### COUPES D'INTERPRETATION DES DISPOSITIFS SISMIQUES

Echelle H : 1/1 000

Echelle V : 1/500

Les vitesses sont exprimées en m/s



# RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE

## Avant projet sommaire

### LOG D'INTERPRETATION DES SONDAGES PRESSIOMETRIQUES

#### SP1

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E* (MPa)	PI** (MPa)
0	Argile sableuse marron à brun à rouille orange peu consistante		
0,95			
	Grès induré orange à rouille-brun avec petits passages plus tendre Consistant	38 96	4,7 7,4
3,10		500	>8,4
	Grès gris crème, très consistant	410 490 490	>8,4 >8,4 >8,4
7,00			

#### SP2

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E (MPa)	PI (MPa)
0			
	Sable avec petits blocs de grès, moyennement consistant Eboulis ou remblai ?	18 6,3 27	1,4 0,88 1,8
3,80	Grès légèrement induré et fracturé, Consistant	160	>8,1
4,30		420	>8,4
	Grès gris-vert claire, consistant	400 310 600 410	>8,4 >8,4 >8,4 >8,4
11,00		290	>8,4

#### SP3

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E (MPa)	PI (MPa)
0	Remblai : sable avec rognon de grès et granite (ou éboulis ?) Peu consistant	1,5	0,26
1,75			
2,50	Grès légèrement induré Consistant	47	4,5
		240	>8,4
		390	>8,4
	Grès gris-vert claire, très consistant	240	>8,4
		580	>8,4
		480	>8,4
8,00		570	>8,4

#### SP4

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E (MPa)	PI (MPa)
0	Remblai : blocs et cailloutis dans une matrice sableuse Peu consistant		
0,90			
		800	>8,4
		800	>8,4
		820	>8,4
	Granite blanc crème, très compact	620	>8,4
		810	>8,4
7,00		800	>8,4

#### SP5

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E (MPa)	PI (MPa)
0	Remblai : blocs et cailloutis dans une matrice sableuse Peu consistant	1,1	0,2
0,90			
1,90	Argile marron brun légèrement sableuse, moyennement consistant	6,5	0,77
	Calcaire avec veines argileuses orange à rouille Légèrement altéré	30	4,3
3,60		60	>8,1
		280	>8,4
		260	>8,4
	Calcaire crème à orange, consistant	280	>8,4
		290	>8,4
		310	>8,4
10,00		190	>8,4

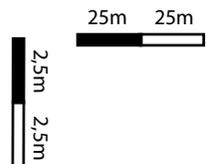
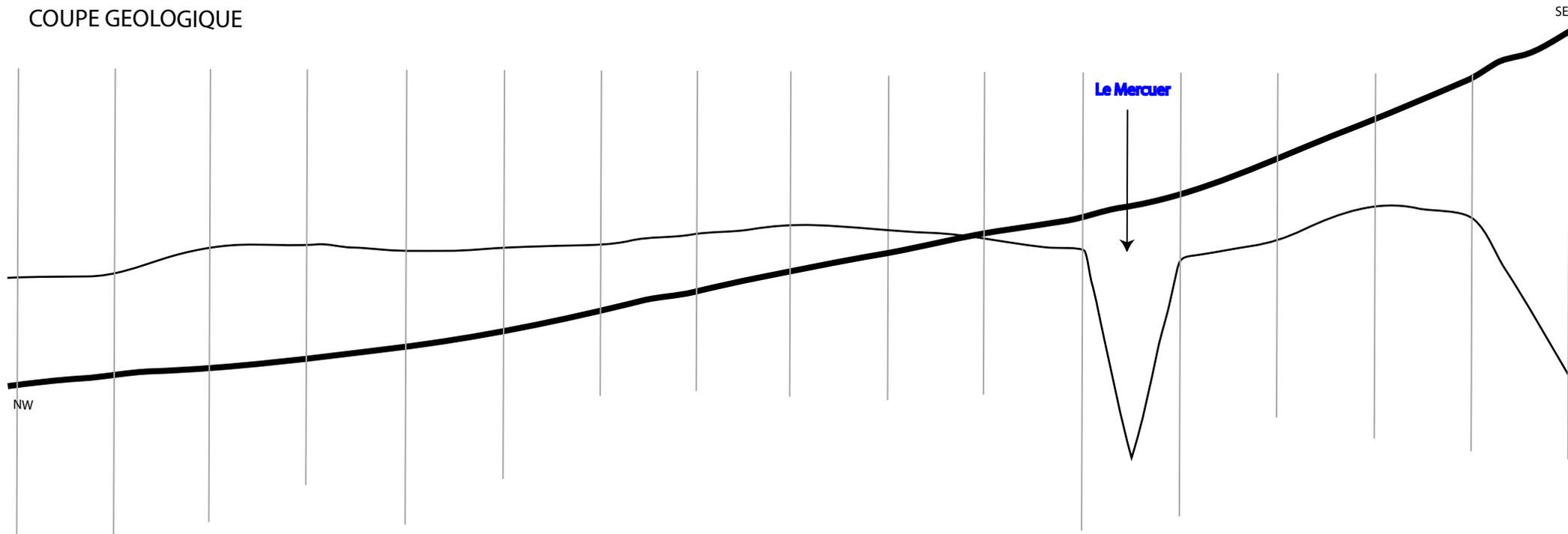
#### SP6

Prof. (m)	Nature des terrains Interprétation	E (MPa)	PI (MPa)
0	Remblai : blocs et cailloutis dans une matrice sableuse Peu consistant		
		14	1,6
1,50			
		200	>8,4
		380	>8,4
	Grès crème verdâtre, consistant	200	>8,4
		98	>8,4
		310	>8,4
7,50		270	>8,4
		460	>8,4
	Grès rouille à niveaux indurés, consistant		
15,00			

\* E : Module pressiométrique ; \*\* PI : pression limite

RN 102 : DEVIATION DE LABEGUDE  
Avant projet sommaire

COUPE GEOLOGIQUE



## ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUE DU SITE D'UN BARRAGE

### 1. Formations susceptibles d'être rencontrées.

Il s'agit essentiellement :

- du sol en surface, dont l'épaisseur est irrégulière,
- des alluvions que l'on rencontre près de la rivière, qui peuvent être plus ou moins consolidées ;
- des autres formations indiquées sur la figure 1 de l'énoncé : marnes, calcaires et grès argileux.

### 2. Analyse des dromochroniques

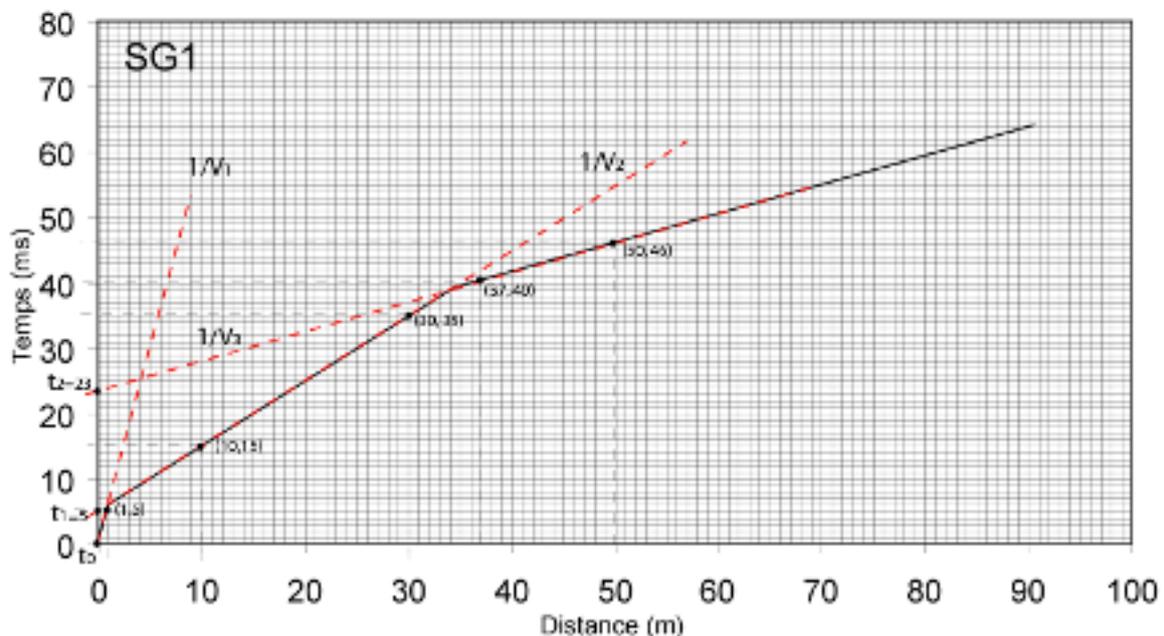


Figure 1. Analyse des dromochroniques du site SG1

#### a. Détermination des vitesses des ondes

Les calculs des vitesses sont simples car les pentes des segments de droites des dromochroniques sont égales à  $1/V$ . Ainsi pour SG1 (figure 1), on obtient :

$$\frac{1}{V_1} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{5 - 1 \text{ (ms)}}{1 - 0 \text{ (m)}} = \frac{0,005 \text{ (s)}}{1 \text{ (m)}} \quad \text{d'où } V_1 = 200 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{V_2} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{35 - 15 \text{ (ms)}}{30 - 10 \text{ (m)}} = \frac{0,020 \text{ (s)}}{20 \text{ (m)}} \quad \text{d'où } V_2 = 1000 \text{ m/s}$$

$$\frac{1}{V_3} = \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{46 - 40 \text{ (ms)}}{50 - 37 \text{ (m)}} = \frac{0,006 \text{ (s)}}{13 \text{ (m)}} \quad \text{d'où } V_3 = 2167 \text{ m/s}$$

#### b. Détermination des épaisseurs des couches

La détermination des épaisseurs est fondée sur la méthode des demi-retards.

Pour l'épaisseur de la première couche  $h_1$ , on calcule :

$$\frac{t_1}{2} = \frac{h_1 \cos i_{12}}{V_1} \quad \text{d'où } h_1 = \frac{t_1 V_1}{2 \cos i_{12}}$$

Exercice du cours 3 – Application des méthodes géophysiques  
Corrigé

et

$$\sin i_{12} = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{d'où} \quad \cos i_{12} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2}$$

Pour  $V_1 = 200$  m/s et  $V_2 = 1000$  m/s, on obtient  $\cos i_{12} = 0,98$ . Cette valeur, combinée avec celles de  $t_1 = 5 \cdot 10^{-3}$  s et  $V_1 = 200$  m/s, permet d'obtenir l'épaisseur de la première couche :

$$h_1 = \frac{t_1 V_1}{2 \cos i_{12}} = 0,51 \text{ m.}$$

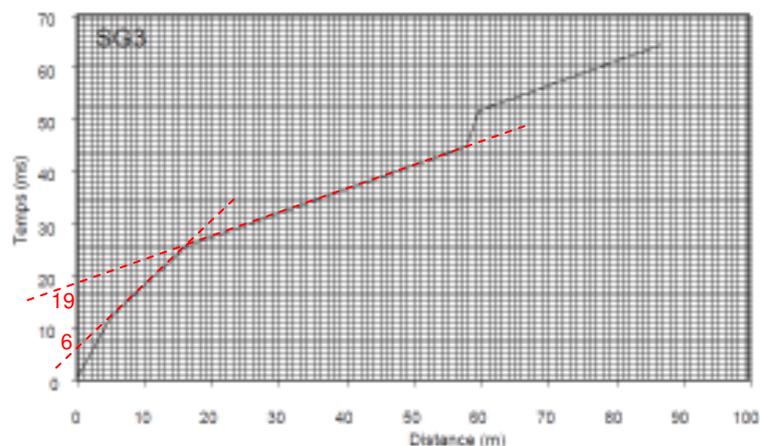
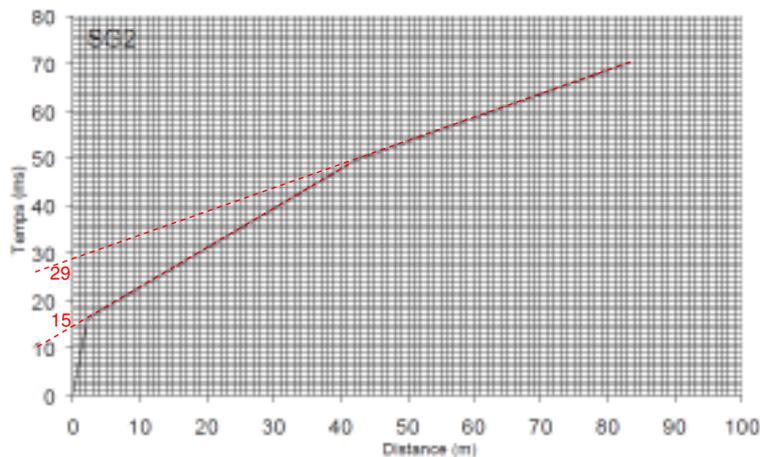
Pour l'épaisseur de la deuxième couche  $h_2$ , on procède de la même façon, en utilisant la formule :

$$\frac{t_2}{2} = \frac{h_1 \cos i_{13}}{V_1} + \frac{h_2 \cos i_{23}}{V_2}.$$

Avec  $V_1 = 200$  m/s,  $V_2 = 1000$  m/s,  $V_3 = 2167$  m/s,  $\cos i_{13} = 0,99$  et  $\cos i_{23} = 0,887$ , on obtient  $h_2 = 10,15$  m.

Pour les dromochroniques SG2 et SG3 on procède de la même manière et l'on obtient les résultats suivants :

	$t_1$ (ms)	$t_2$ (ms)	$h_1$ (m)	$h_2$ (m)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$V_3$ (m/s)
SG1	5	23	0,51	10,15	200	1000	2167
SG2	15	29	0,94	13	125	1250	1800
SG3	6	19	1,46	5	420	830	2140



L'épaisseur de la couche de calcaire peut être simplement mesurée en rive droite puisqu'elle affleure en totalité.

La dromochronique de pente  $1/V_3$  de SG3 présente deux parties parallèles mais déplacées l'une par rapport à l'autre. Ce déplacement peut être utilisé pour calculer le décrochement vertical du réfracteur.

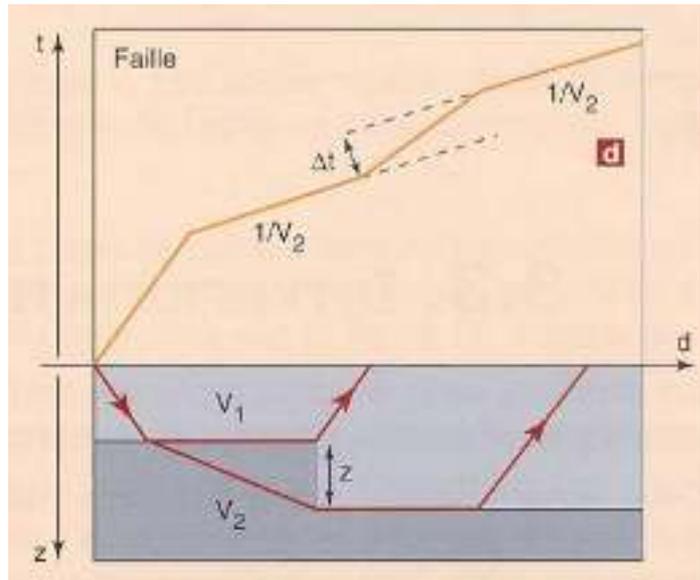


Figure 2. Schéma du parcours des ondes de réfraction en cas de décrochement dans la surface de contact des couches

En utilisant la formule (adaptée pour l'interface entre les couches 2 et 3)

$$Z = \frac{\Delta t V_2 V_3}{\sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

on obtient un décrochement de 4,5 m.

Il faut ensuite reporter les différentes vitesses et épaisseurs au droit des tirs :

- en rive gauche, une épaisseur de quelques dizaines de centimètres a une vitesse faible. On peut supposer qu'il s'agit du sol en place. Sous cette couche on trouve une vitesse supérieure, qui correspond à une couche marneuse (vitesse correspondante et position de la couche de calcaire) ;
- dans la vallée (SG3), on trouve des alluvions que l'on peut interpréter comme deux couches plus ou moins compactées. Dessous, la vitesse correspond à des grès ;
- il faut faire apparaître un décrochement au niveau de SG3 à une dizaine de mètres du centre ;

Il reste à finir l'interprétation en utilisant les données de pendages et les informations sur les affleurements.

### 3. Interprétation géologique du site

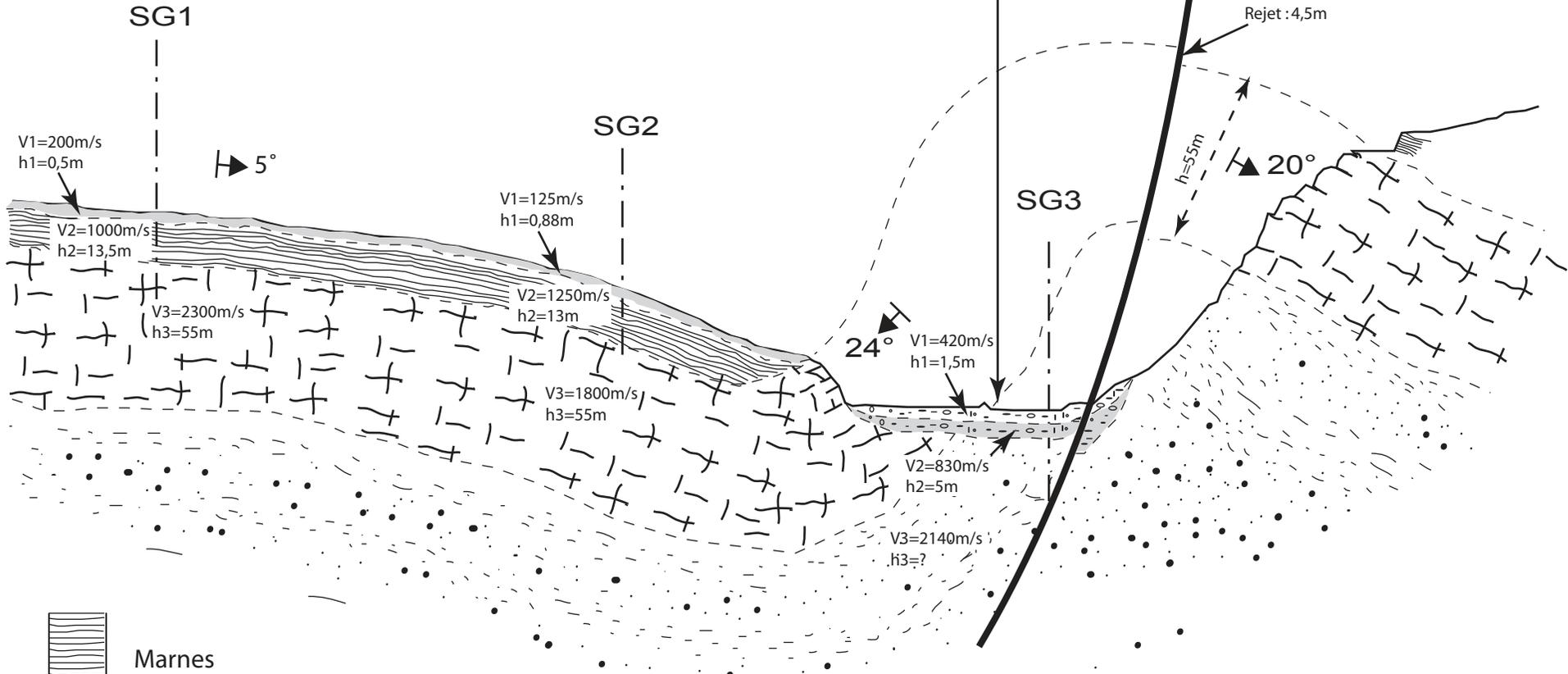
Le résultat de l'analyse est représenté sur la figure 3.

Rive gauche

Rivière

Faille

Rive droite



V1=200m/s  
h1=0,5m

5°

V2=1000m/s  
h2=13,5m

SG2

V1=125m/s  
h1=0,88m

V2=1250m/s  
h2=13m

V3=1800m/s  
h3=55m

24°

V1=420m/s  
h1=1,5m

V2=830m/s  
h2=5m

V3=2140m/s  
h3=?

Rejet : 4,5m

h=55m

20°



Marnes

Calcaires

Grès argileux

Couche de surface

Alluvions modernes

Alluvions anciens/éboulis



## ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOPHYSIQUE DU SITE D'UN BARRAGE

**Objectif : il s'agit d'habiller le profil géologique d'un site à partir de quelques informations de surface et d'essais en sismique réfraction.**

La reconnaissance géologique de surface sur un site de barrage a permis de dresser le profil en travers de la figure 1 où les seuls terrains localisés (outre les alluvions de fond de vallée) sont des calcaires, des marnes, des grès argileux et des terrains de couverture. La série régionale, établie par ailleurs, est représentée sur le petit log de la figure 1.

### Questions

- Définir les diverses formations susceptibles d'être rencontrées.
- À l'aide des dromochroniques, reporter la zonation sismique sur la figure 2 en indiquant les vitesses correspondant à chaque couche. Calculer les épaisseurs des couches. Quelle est la signification possible des irrégularités rencontrées sur SG3 ?
- En examinant les données géologiques fournies et les résultats de la géophysique, proposer une interprétation géologique (en coupe) de ce site de barrage.

### Documents fournis

- Une coupe à l'échelle du projet
- Les résultats des campagnes de sismique réfraction

### Annexe : Calcul des épaisseurs des couches par la méthode des demi-retards

Dans le cas de plusieurs couches parallèles, la dromochronique est formée de plusieurs segments de droite de pente décroissante. Le nombre de ces segments donne le nombre de couches présentes et l'inverse de leur pente donne la valeur des vitesses.

Le calcul des épaisseurs est moins simple. Il est commode d'utiliser la méthode dite des "demi-retards", dont nous allons détailler rapidement le principe.

On appelle retards les ordonnées à l'origine des différents segments de la dromochronique. Ceux-ci forment une suite relativement simple à étudier. Le retard correspondant au premier segment est évidemment nul. Le temps  $t_1$  suivant se déduit de l'équation (1), qui décrit l'égalité des temps de parcours des ondes directe et réfractée à la base de la couche 1 :

$$\frac{x_c}{V_1} = \frac{x_c}{V_2} + \frac{2h_1 \cos i_c}{V_1} \quad (1)$$

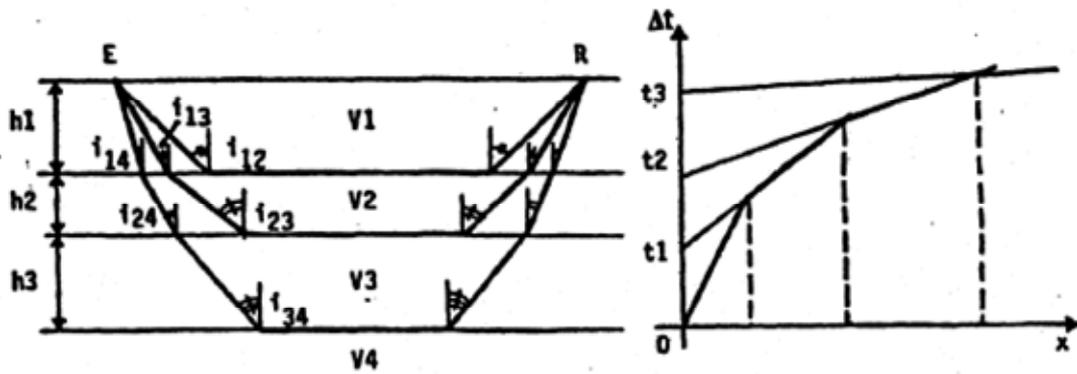


Figure. Propagation des ondes dans un multicouche horizontal : méthode des demi-retards (le schéma présenté correspond à quatre couches)

Le retard  $t_1$  vaut :

$$t_1 = \frac{2h_1 \cos i_{12}}{V_1}.$$

En rappelant par un double indice que l'incidence critique à prendre en compte est celle du milieu 1 avec le milieu 2, on peut noter le demi-retard par l'expression :

$$\frac{t_1}{2} = \frac{h_1 \cos i_c}{V_1}$$

On démontre que les demi-retards suivants valent :

$$\frac{t_2}{2} = \frac{h_1 \cos i_{13}}{V_1} + \frac{h_2 \cos i_{23}}{V_2}$$

$$\frac{t_3}{2} = \frac{h_1 \cos i_{14}}{V_1} + \frac{h_2 \cos i_{24}}{V_2} + \frac{h_3 \cos i_{34}}{V_3}$$

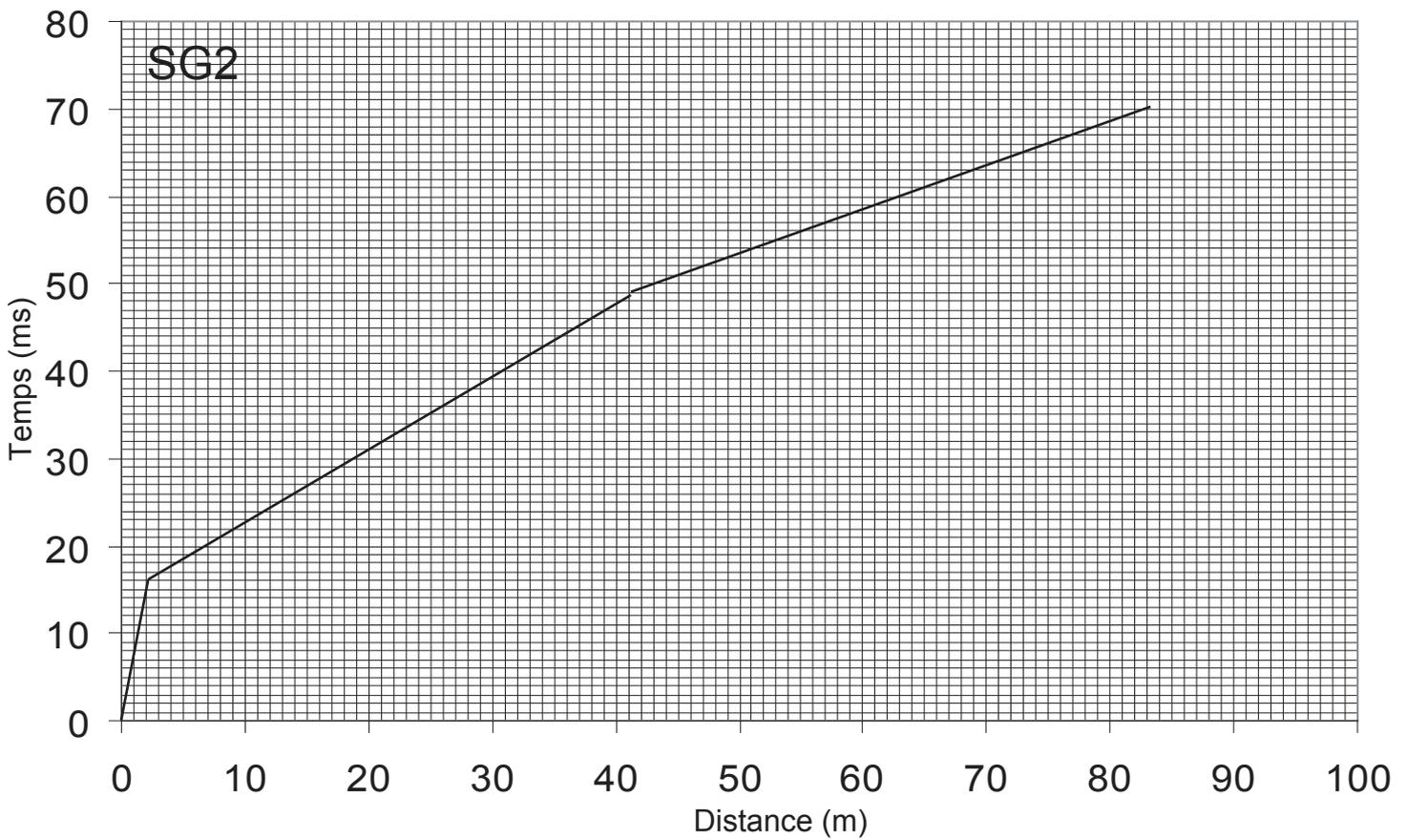
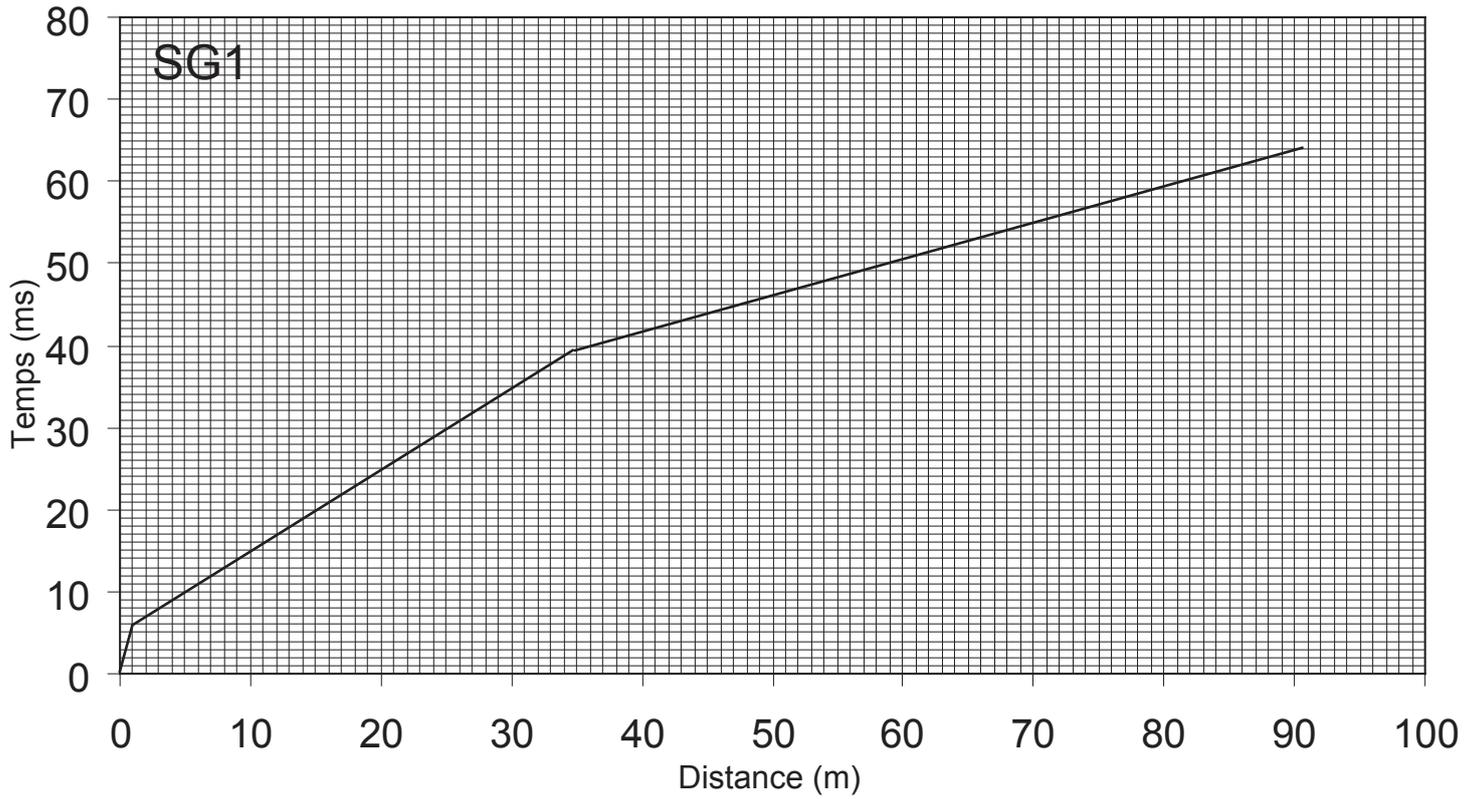
Les angles  $i_{13}$ ,  $i_{23}$ ,  $i_{24}$  et  $i_{34}$  sont représentés sur la figure. L'angle  $i_{24}$ , par exemple, est l'angle d'incidence sur la deuxième interface du rayon sonore qui va se réfracter totalement dans le quatrième terrain. Lorsque les deux indices se suivent l'incidence est une incidence critique. Les valeurs de ces angles se calculent aisément, car leur sinus sont tels que :

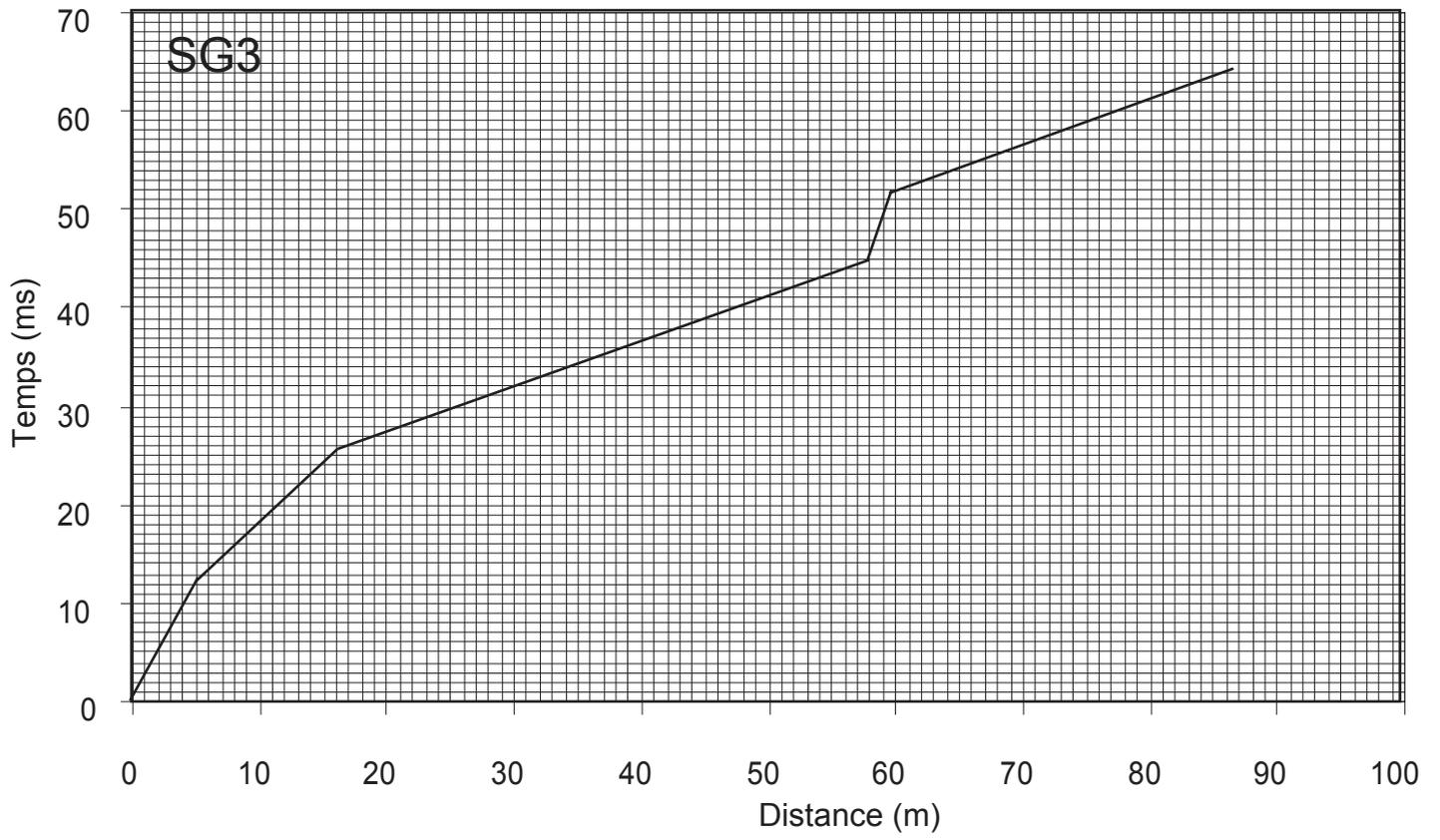
$$\sin i_{12} = \frac{V_1}{V_2}, \quad \sin i_{13} = \frac{V_1}{V_3}, \quad \sin i_{23} = \frac{V_2}{V_3}, \quad \text{etc.}$$

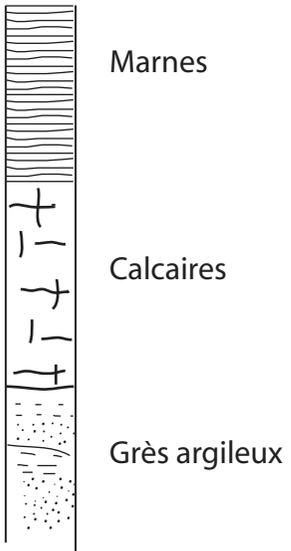
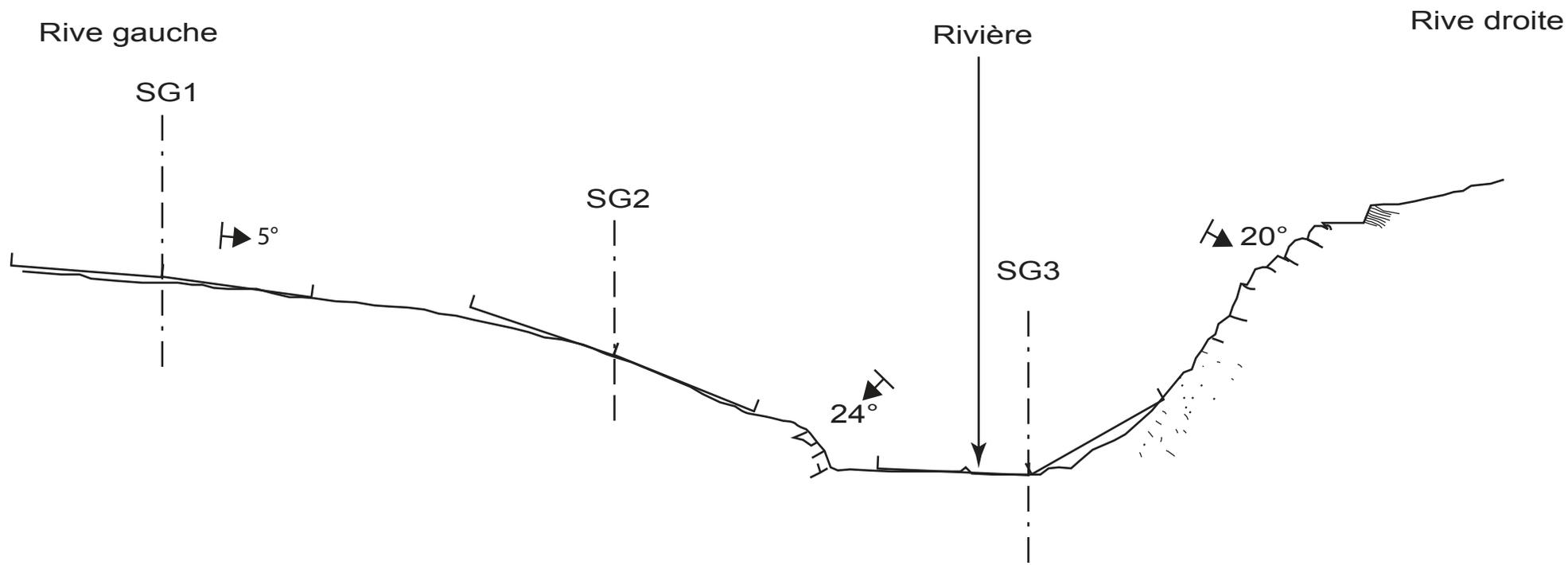
Connaissant les valeurs des vitesses et les demi-retards d'après la dromochronique, on peut calculer l'une après l'autre les différentes épaisseurs à l'aide des formules précédentes.

En pratique, cette méthode pourra être utilisée jusqu'à 4 ou 5 terrains. La longueur usuelle des lignes de tir utilisées en génie civil et la précision des mesures permettent rarement d'aller au-delà.

# Domochroniques des essais de sismique réfraction







## INTERPRÉTATION DE POMPAGES D'ESSAI - DRAINAGE

### 1. Étude de la nappe

#### 1.a. Tracé des courbes isopièzes

Le tracé a été effectué par la *méthode d'interpolation du triangle*, les données sont regroupées par trois aux sommets de triangles (figure 1). Les côtés du triangle sont tracés et divisés en segments proportionnels. L'équidistance retenue est de 0,10 m. Les courbes isopièzes sont obtenues en joignant, par des segments de droite, les points d'égal niveau. Les tracés sont lissés pour obtenir des courbes régulières (figure 1)

#### 1.b. Habillage de la carte

Pour faciliter l'interprétation d'une carte piézométrique il est utile de procéder à deux opérations d'habillage (figure 1):

- Tracé des lignes de courant de la surface piézométrique (lignes de courant superficielles). Ces lignes matérialisent la direction moyenne de l'écoulement. Ce sont des droites de plus grande pente, donc perpendiculaires à chaque courbe isopièze ;
- Fléchage des lignes de courant indiquant le sens de l'écoulement déduit des niveaux piézométriques.

#### 1.c. Coupe A A'

Cette coupe présente l'intersection entre la droite AA' et les courbes de niveau topographique et isopièzes. Le substratum est supposé horizontal et situé à une altitude de 100 m (figure 1).

#### 1.d. Calcul du gradient hydraulique

Le gradient hydraulique moyen sur la coupe AA' peut être déduit simplement du rapport de la différence de charge (différence de hauteur piézométrique) à la distance entre les lignes isopièze. Le gradient hydraulique global de cet aquifère le long de AA', entre le niveau d'eau au point P (104 m) et le point d'intersection de la droite AA' et l'isopièze d'altitude 101 m, est égal à :

$$i = \frac{\Delta h}{l} = \frac{h_1 - h_2}{l} = \frac{104 - 101}{3000}, \text{ soit } i = - 0,001$$

### 2. Interprétation des données du pompage d'essai

#### 2.1 Généralités

Le calcul des paramètres hydrodynamiques se fait à partir de l'expression logarithmique rappelée dans l'énoncé :

$$s = \frac{0,183Q}{T} \lg \frac{2,25Tt}{x^2S}, \quad (1)$$

qui donne l'évolution du rabattement au cours du temps t en fonction de la distance x du piézomètre au forage. Cette relation dépend de la transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S. La forme de la relation permet de déterminer séparément T, puis S.

#### 2.2 Détermination de la transmissivité

La transmissivité T est déduite de la pente c de la partie linéaire de la courbe représentant la relation (1) pour les pompages d'essai (figure 2). On calcule :

$$T = \frac{0,183Q}{c} .$$

Les pentes sont les mêmes pour les piézomètres P1 et P3, avec  $c = 0,22$  m. Pour le piézomètre P2, la pente est légèrement plus faible, avec  $c = 0,20$  m.

Exercice du cours 4 – Étude hydrogéologique  
Corrigé

$$\text{Piézomètres P1 et P3 : } T = \frac{0,183 \times 0,09}{0,22} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s},$$

$$\text{Piézomètre P2 : } T = \frac{0,183 \times 0,09}{0,20} = 8,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}.$$

La concordance des résultats est bonne. La transmissivité moyenne de l'aquifère est de  $T=8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 2.3. Détermination du coefficient d'emmagasinement

Pour déterminer la valeur de S, on utilise l'argument de la fonction logarithmique de l'équation (1). Lorsque le rabattement est nul, l'expression  $(2,25Tt) / (x^2S)$  est égale à 1. Les temps correspondants peuvent être déterminés sur la figure 2. On obtient :

$$\text{Piézomètre P1 : } t_0 = 2,3 \text{ min} = 138 \text{ s},$$

$$\text{Piézomètre P2 : } t_0 = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s},$$

$$\text{Piézomètre P3 : } t_0 = 65 \text{ min} = 3900 \text{ s}.$$

Le coefficient d'emmagasinement S est déduit de  $t_0$  par l'expression :

$$S = \frac{2,25Tt_0}{x^2}.$$

On obtient

$$\text{Piézomètre P1 : } S = \frac{2,25 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 138}{20^2} = 6,2 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Piézomètre P2 : } S = \frac{2,25 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1200}{50^2} = 8,6 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Piézomètre P3 : } S = \frac{2,25 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 3900}{100^2} = 7 \cdot 10^{-2}.$$

Le coefficient d'emmagasinement moyen est de  $7 \cdot 10^{-2}$

### 2.4. Détermination du coefficient de perméabilité k

La transmissivité est égale au produit du coefficient de perméabilité k par l'épaisseur e de la couche où se produit l'écoulement :

$$T = ke,$$

$$\text{d'où } k = \frac{8 \cdot 10^{-2}}{4} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}.$$

Le coefficient de perméabilité global de l'aquifère, à l'état saturé, est d'environ  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$

## 3. Débit vers une tranchée

L'écoulement d'une nappe vers une tranchée à travers un terrain de coefficient de perméabilité k (Figure 3) peut être décrit par une approximation parabolique d'équation :

$$h^2 = -\frac{2q}{K}x + c$$

Cette approximation suppose que les lignes équipotentielles sont verticales autour de la tranchée. Entre le profil  $x=0$  ( $h=H_1$ ) et le profil  $x=L$  ( $h=H_2$ ), le débit est le même, et l'on peut écrire (en éliminant la constante c) :

$$q = \frac{k}{2L} (H_1^2 - H_2^2).$$

Si l'on souhaite rabattre totalement la nappe dans la tranchée, on doit imposer  $H_2 = 0 \text{ m}$ . Avec les données du site étudié ( $k = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$  ; largeur de la zone drainée  $L = 3000 \text{ m}$  ;  $H_1 = 4 \text{ m}$ ), on obtient :

Exercice du cours 4 – Étude hydrogéologique  
Corrigé

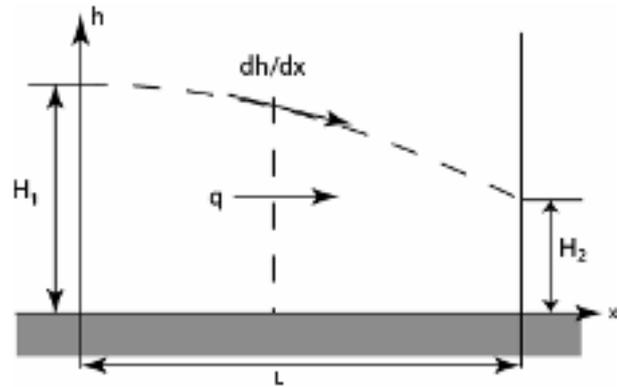


Figure 3. Schéma de l'écoulement vers une tranchée

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3000} (4^2 - 0^2)$$

soit un débit (par unité de longueur le long de la tranchée)  $q = 5,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

La longueur totale de la tranchée est de 1500m. Le débit en sortie de drain est donc égal à :  
 $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ , soit 80 l/s.

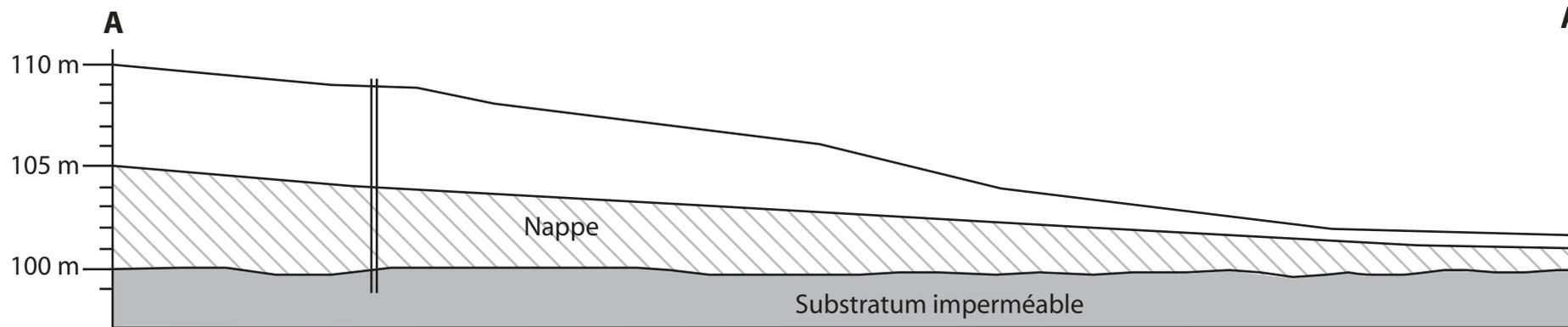
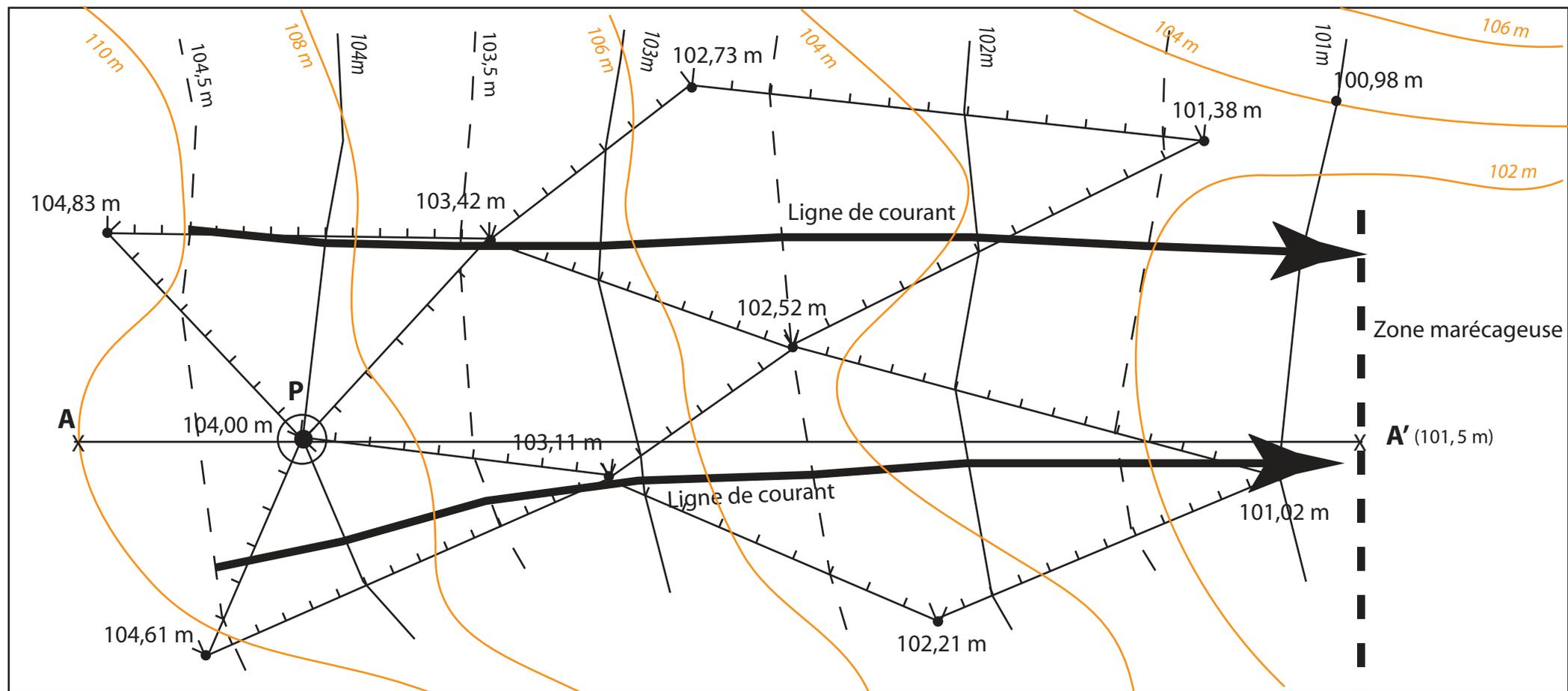
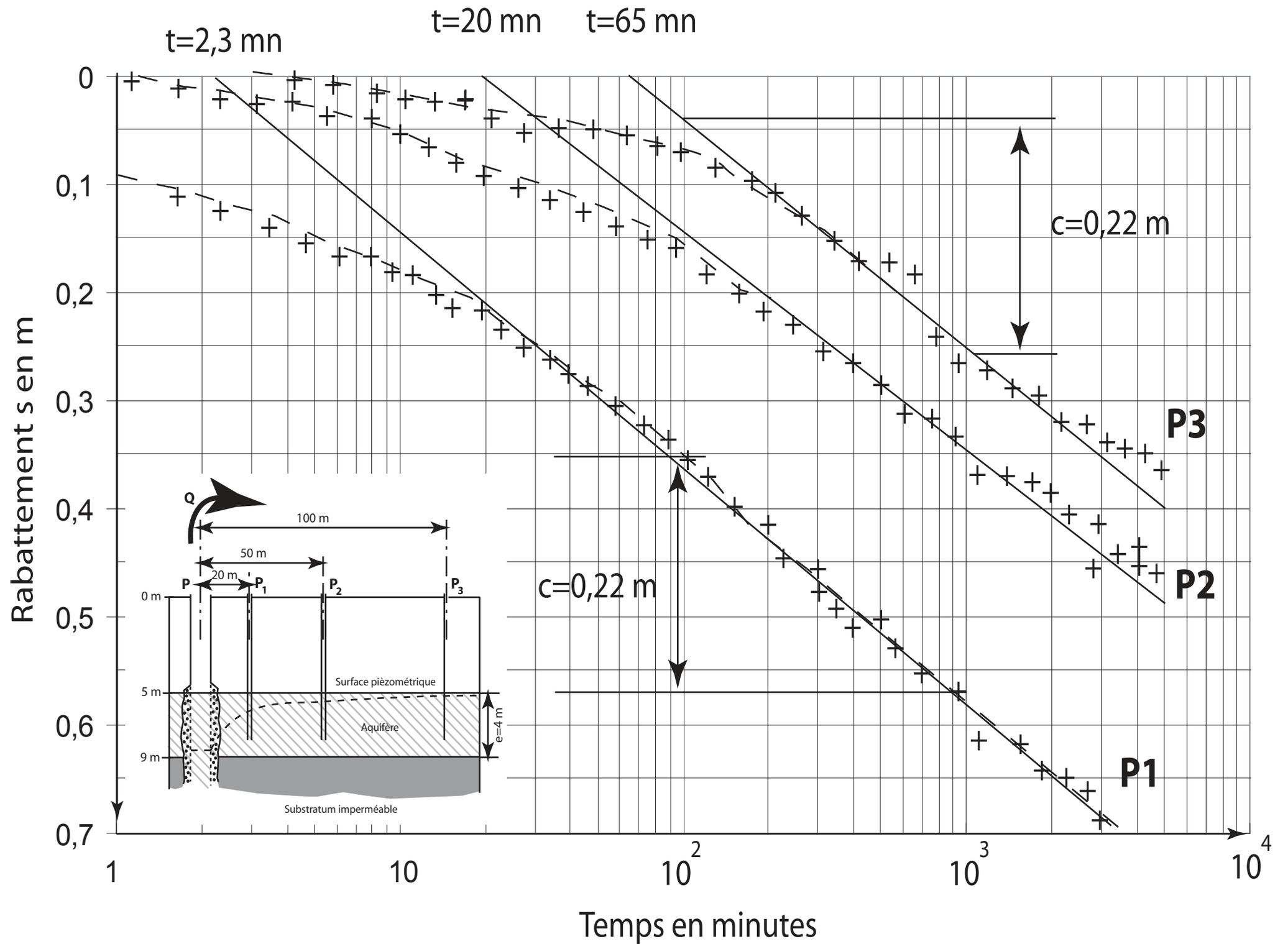


Figure 1 : carte topographique, position et altitudes des piézomètres et puits



# INTERPRÉTATION DE POMPAGES D'ESSAI - DRAINAGE

## Objectifs

- Comment concevoir une carte piézométrique à partir de plusieurs points de mesure ?
- Calculer les paramètres hydrauliques d'un aquifère à partir de pompages d'essai.
- Calculer le débit d'un drain situé dans une nappe.

## 1. Étude de la nappe

Afin de connaître l'écoulement général d'une nappe d'eau souterraine ainsi que ses caractéristiques hydrodynamiques, une étude a été entreprise.

La zone étudiée est constituée par des alluvions quaternaires (graviers et galets enrobés de sable grossier), reposant sur un substratum considéré comme horizontal et imperméable de formation miocène, situé à une altitude de 100 m. Une série de mesures de niveaux piézométriques a été effectuée durant une période où le niveau de la nappe peut être considéré comme stable (figure 1).

Le travail consiste à

- dessiner la carte piézométrique ainsi que les principales lignes de courant ;
- faire une coupe entre le point A et A' en reportant la topographie, le niveau de la nappe et le substratum imperméable ;
- calculer le gradient hydraulique  $i$  de la nappe.

## 2. Interprétation des données du pompage d'essai

Afin d'obtenir des paramètres tels que la transmissivité  $T$ , le coefficient de perméabilité  $k$  et le coefficient d'emmagasinement  $S$ , un pompage d'essai a été effectué au point P. Ce puits d'essai, d'un diamètre de 400 mm, est crépiné avec un massif filtrant, de 6,50 m à 12 m de profondeur. Il est considéré comme parfait (figure 2). L'aquifère peut être considéré comme illimité latéralement, dans les conditions de durée de l'essai. La station de pompage comporte le puits d'essai P et trois piézomètres, disposés sur un rayon à des distances respectives de l'axe du puits de  $P_1=20$  m,  $P_2=50$  m et  $P_3=100$  m (figure 2).

La durée de pompage a été de 48 heures, à débit constant,  $Q=328$  m<sup>3</sup>/h. Le rabattement total a été de 3,54 m dans le puits d'essai et de 0,65 m en  $P_1$ , 0,42 m en  $P_2$  et 0,33 m en  $P_3$ , respectivement. Ces rabattements sont dans la limite de tolérance d'application de l'expression d'approximation logarithmique aux aquifères à nappe libre (conditions de validité  $s \leq 0,1^e$ , avec une tolérance portée à  $s \leq 0,3e$ , où  $e$  est l'épaisseur de la nappe).

Le travail à effectuer consiste à analyser les pompages d'essai pour calculer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère :  $T$ ,  $k$  et  $S$ .

## 3. Calcul du débit vers une tranchée

La construction d'un complexe sportif avec de nombreux terrains de sports engazonnés est projetée dans la zone marécageuse. Afin de mettre hors d'eau le système racinaire du gazon et de stabiliser le terrain, il a été décidé de drainer cette zone au moyen d'une tranchée drainante (figure 1). On considère que le drain est placé selon l'axe de la zone à drainer et que le drainage va concerner une zone de 3km de largeur de chaque côté (c'est-à-dire que le niveau de la nappe à 3000m du drain 'est pas influencé par le drainage).

Le travail à effectuer consiste à estimer le débit en sortie de drain (longueur du drain : 1500 m).

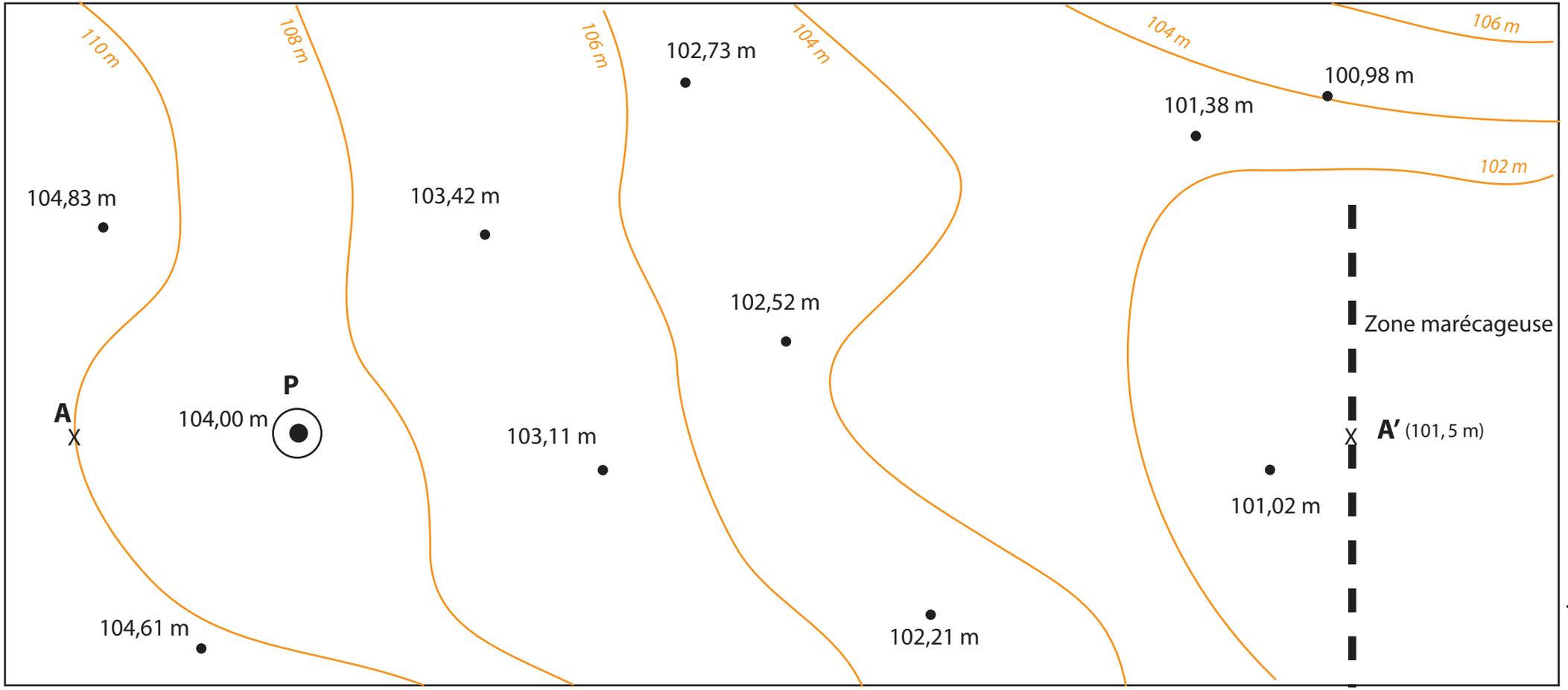


Figure 1 : carte topographique, position et altitudes des piézomètres et puits

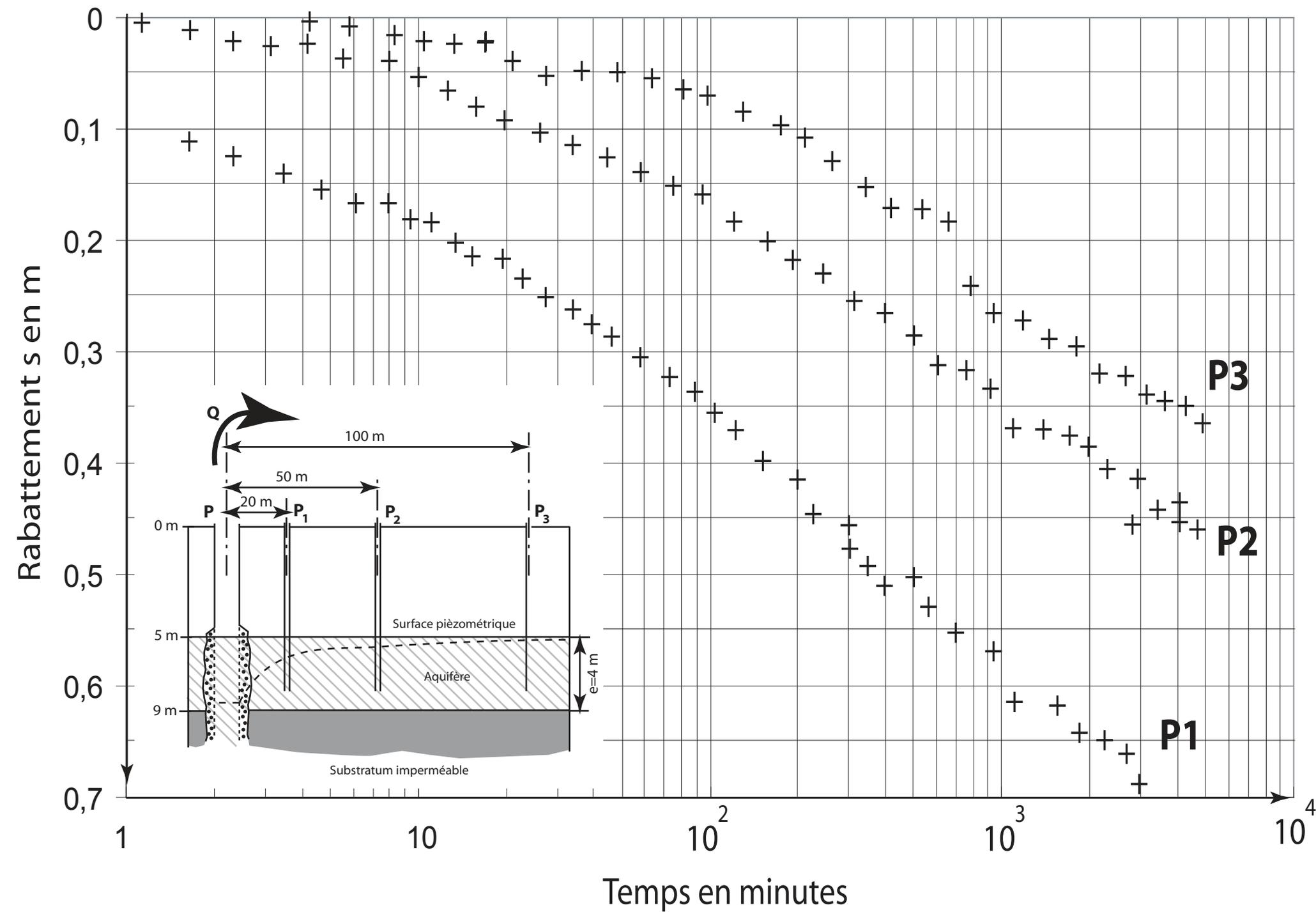


Figure 2 : Pompage d'essai dans l'aquifère à nappe libre

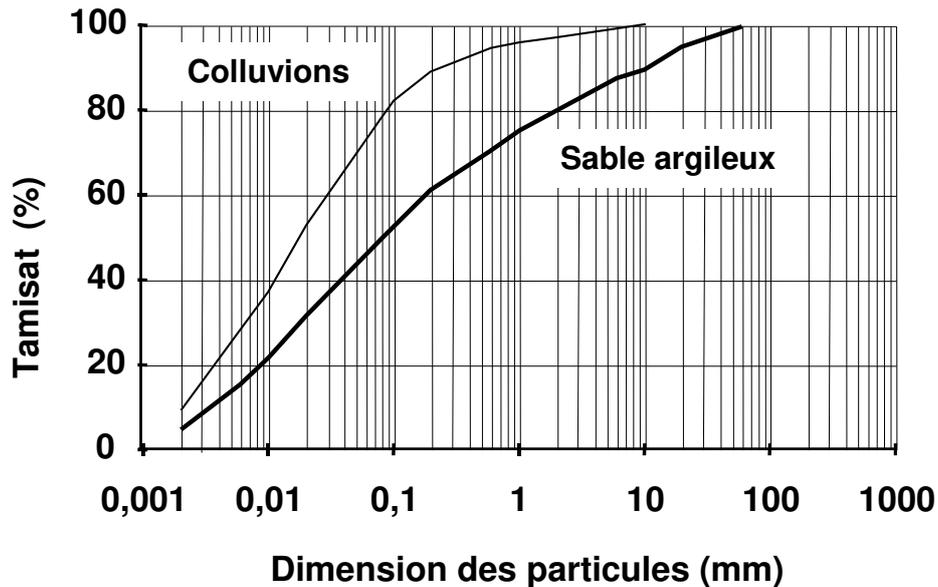
Cours d'analyse géotechnique des sites urbains et naturels  
Cours 5 – Les terrassements

Exercice : Compactage des remblais

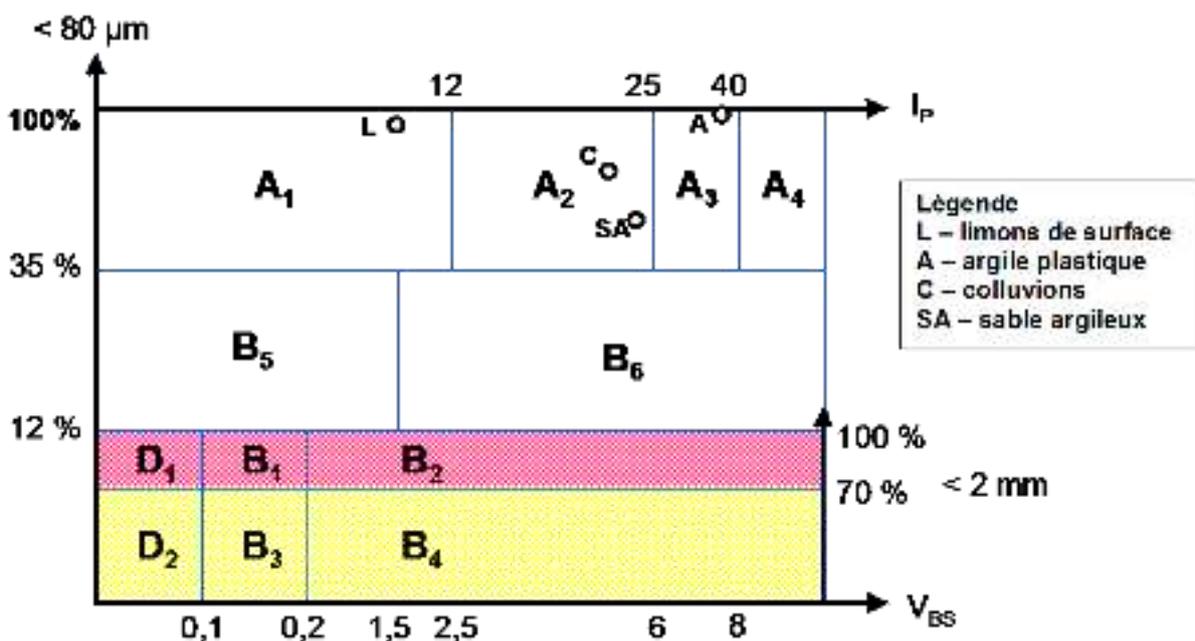
**CORRIGÉ**

**ÉTUDE DES REMBLAIS ET DÉBLAIS DU TRACÉ D'UN PROJET DE DÉVIATION**

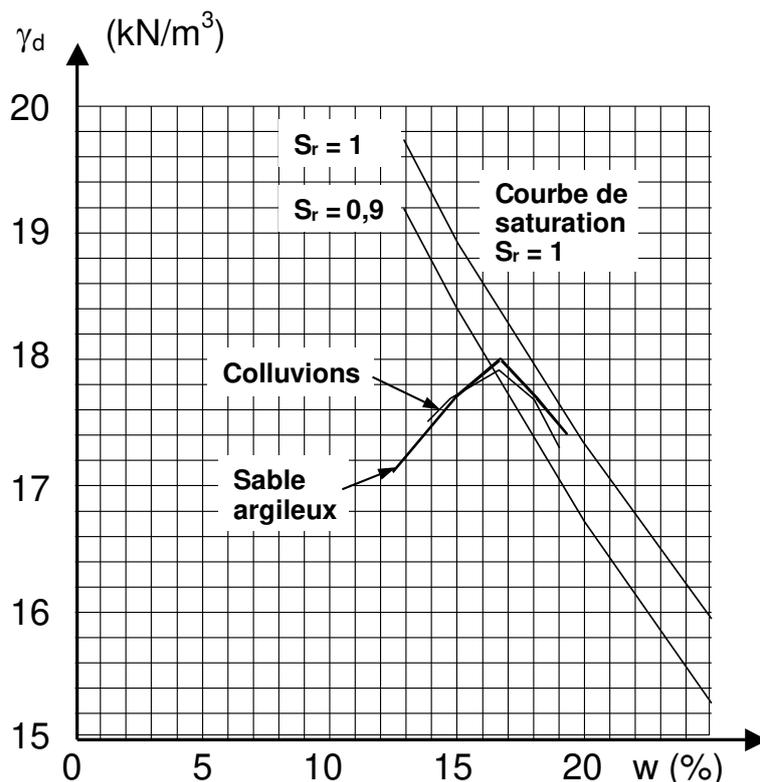
1. Les courbes granulométriques du sable argileux et des colluvions sont représentées sur le diagramme suivant.



2. Les quatre familles de sols se placent dans la classification des terrassements routiers (GTR) comme indiqué sur la figure suivante. Les limons de surface sont des sols A1, l'argile plastique et les colluvions des sols A2 et le sable argileux un sol A3.



3. Les courbes de compactage de l'essai Proctor normal sont représentées sur la figure suivante, avec la courbe de saturation pour  $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$ .



La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche optimale du sable argileux et des colluvions valent respectivement :

- sable argileux :  $w_{OPN} = 16,7\%$      $\gamma_{dOPN} = 18 \text{ kN/m}^3$ ,
- colluvions :         $w_{OPN} = 16,6\%$      $\gamma_{dOPN} = 17,9 \text{ kN/m}^3$ .

4. Pour évaluer l'aptitude des quatre familles de sols à leur utilisation en remblai, il faut caractériser leur état hydrique, ce qui se fait classiquement en utilisant l'indice  $I_{PI}$ . Cet indice portant immédiat se détermine dans des essais d'enfoncement d'un piston à vitesse constante dans un moule CBR rempli du matériau à différentes teneurs en eau.

Les données de l'énoncé permettent de tracer pour le sable argileux et les colluvions les courbes d'enfoncement du piston de l'essai CRB, dont la section vaut  $19,35 \text{ cm}^2$ , en fonction de la charge appliquée. On obtient les résultats indiqués sur les figures a et b.

On observe que le tracé des courbes n'est pas indispensable quand les valeurs numériques de la force pour des enfoncements de 2,5mm et 5mm sont connues.

Ces résultats nous permettent de juger de l'aptitude de ces sols en place, à leur teneur en eau naturelle, à être mis en remblai et compactés.

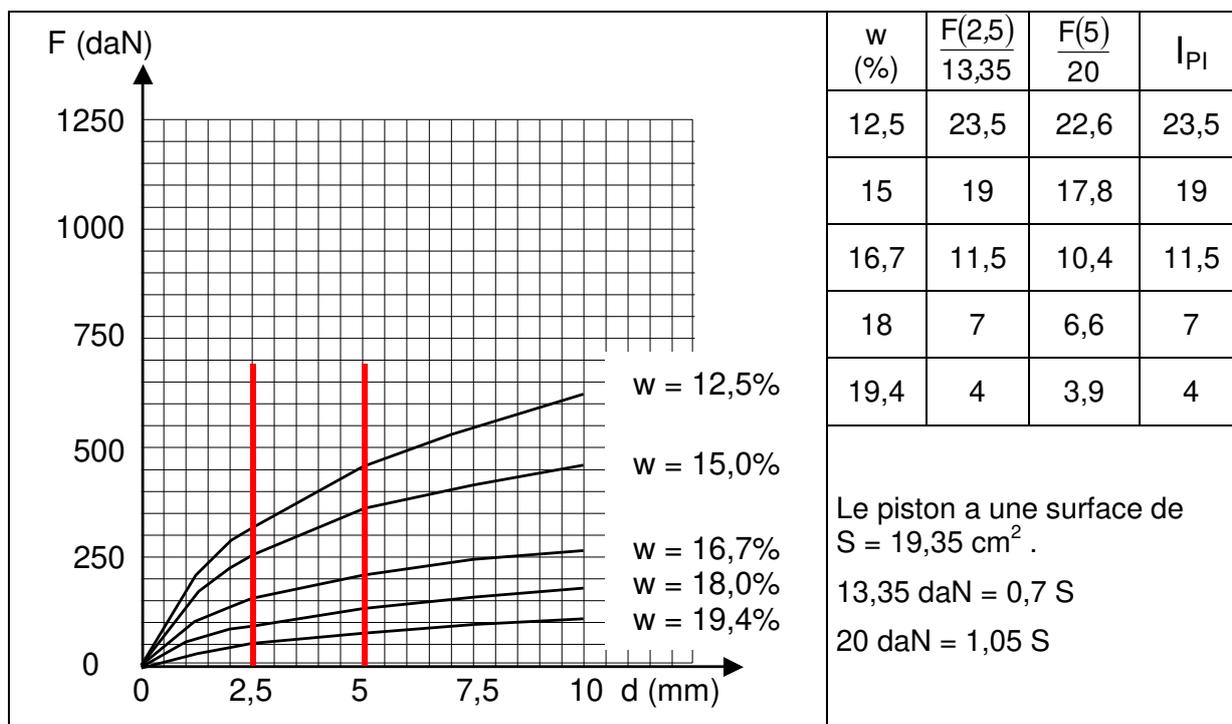


Figure a. Courbes d'enfoncement du piston et valeurs de l'indice  $I_{PI}$  (sable argileux)

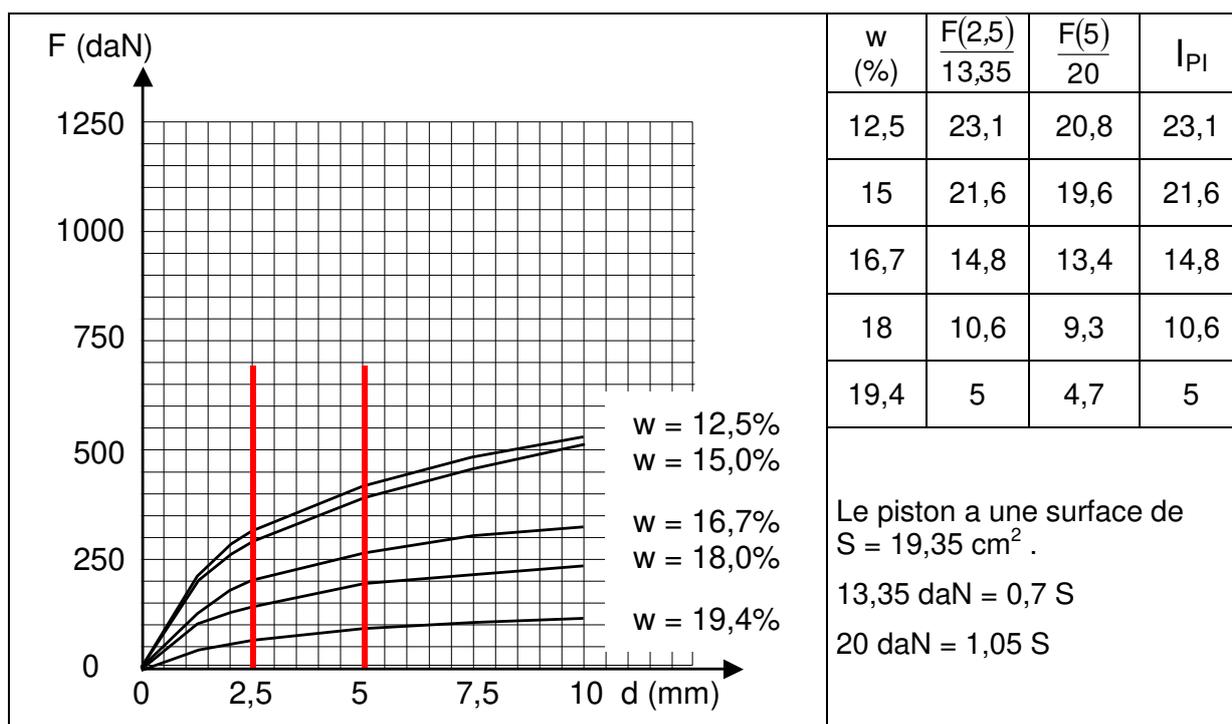


Figure b. Courbes d'enfoncement du piston et valeurs de l'indice  $I_{PI}$  (colluvions)

Quels sont parmi les quatre familles de sols du site celles qui sont réutilisables en remblai et dans quelles conditions ?

Les seuils utilisés pour distinguer les états hydriques des différentes sous-classes de sols de type A sont rappelés dans le tableau suivant.

Type de sol	Essais de référence	Seuils d'état hydrique				
		ts	s	m	h	th
A <sub>1</sub>	I <sub>PI</sub>		25	<b>8</b>	<b>3</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,1	1,25	
A <sub>2</sub>	I <sub>PI</sub>		15	<b>5</b>	<b>2</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,1	1,3	
A <sub>3</sub>	I <sub>c</sub>	1,4	1,2	<b>1,05</b>	<b>0,9</b>	
	I <sub>PI</sub>		10	<b>3</b>	<b>1</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,2	1,4	
A <sub>4</sub>	I <sub>c</sub>	1,3	1,15	<b>1</b>	<b>0,8</b>	
	Étude spéciale nécessaire					

Les seuils recommandés sont donnés en gras et italique.

Les quatre types de sols du site étudiés ont les propriétés suivantes :

Sol	Classe	w <sub>nat</sub> (%)	w <sub>OPN</sub> (%)	w <sub>nat</sub> /w <sub>OPN</sub>	I <sub>PI</sub>	I <sub>c</sub>	État
Limon de surface	A1	15 à 18,2	13	1,15 à 1,4	-	-	h à th
Argile	A3	23,9 à 34	25	0,96 à 1,37	-	-	m
Sable argileux	A2	16 à 20,2	16,7	0,96 à 1,21	<4 à 11,5	1,08 à 1,25	m
Colluvions	A2	15,7 à 22	16,6	0,95 à 1,33	<5 à 15	0,9 à 1,2	m à h

L'indice de consistance I<sub>c</sub> vaut  $I_c = w_L - w / I_p$ .

Pour déterminer les conditions de réemploi des quatre types de sols, on a besoin des trois tableaux correspondant aux classes A1 à A3.

#### Classe A1

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>1</sub> th	tous	non			
A <sub>1</sub> h	humide	non			
	moyen	oui	traitement	modéré	
	sec	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
A <sub>1</sub> m	sec	oui	traitement	modéré	
	très humide	non			
	humide	oui	Protection, h ≤ 10m	modéré	
	moyen	oui		modéré	
A <sub>1</sub> s	sec	oui	arrosage	modéré	
	sec	oui	h ≤ 10m	intense	
	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
A <sub>1</sub> s	moyen	oui	h ≤ 10m	intense	
	sec	oui	arrosage, h ≤ 5m	intense	
A <sub>1</sub> ts	tous	non			

Ce tableau nous indique que les limons de surface ne peuvent être réutilisés quand ils sont à l'état très humide et que, sinon, il faut agir en fonction du climat.

### Classe A2

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>2</sub> th	tous	non			
A <sub>2</sub> h	humide	non			
	moyen	oui	traitement à la chaux	faible	
	moyen	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	traitement à la chaux	modéré	
A <sub>2</sub> m	très humide	non			
	humide	oui	Protection, h ≤ 10m	modéré	
	moyen	oui		modéré	
	sec	oui	arrosage	modéré	
	sec	oui	h ≤ 10m	intense	
A <sub>2</sub> s	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	intense	fines
	moyen	oui	h ≤ 10m	intense	
	sec	oui	arrosage, h ≤ 5m	intense	
A <sub>2</sub> ts	tous	non			

Ce tableau nous indique que les colluvions peuvent être réemployées selon les conditions de A<sub>2</sub>m ou A<sub>2</sub>h, selon leur teneur en eau initiale. Le sable argileux peut être réemployé dans les conditions de A<sub>2</sub>m.

### Classe A3

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>3</sub> th	tous	non			
A <sub>3</sub> h	très humide	non			
	humide	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	moyen	oui	traitement à la chaux	modéré	
	moyen	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	traitement à la chaux	modéré	
A <sub>3</sub> m	très humide	non			
	humide	oui	h ≤ 10m	modéré	
	moyen	oui	h ≤ 10m	modéré	
	sec	oui	arrosage, h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	h ≤ 5m	intense	
A <sub>3</sub> s	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h ≤ 5m	intense	fines
	moyen	oui	arrosage, h ≤ 5m	intense	fines
	sec	oui	protection, arrosage, h ≤ 5m	intense	fines
A <sub>3</sub> ts	tous	non			

L'argile peut être mise en remblai dans les conditions de A<sub>3</sub>m.

La dernière étape de l'étude consiste à déterminer quels modes de compactage et types de compacteurs peuvent être utilisés pour remplir les conditions indiquées dans la colonne « intensité du compactage » des tableaux précédents.

*Note : dans un projet il faudrait aussi élaborer un programme de mouvement des terres, qui tienne compte du planning des travaux d'excavation et de remblaiement, pour décider où doivent être placés les matériaux extraits au fur et à mesure de l'avancement du chantier. Mais nous n'irons pas jusqu'à ce niveau d'études, qui relève d'un cours de terrassements).*

Les prescriptions de compactage sont données dans des tableaux annexés au GTR 2000. Elles s'appuient sur une classification des compacteurs et sur des paramètres de conduite du chantier.

#### a. Classement des compacteurs

On distingue les types de compacteurs suivants :

Compacteurs à pneus : trois classes d'après la charge par roue  $C_R$  :  $P_1, P_2, P_3$

Compacteurs vibrants à cylindre lisse : cinq classes d'après la charge statique totale par unité de longueur de la génératrice vibrante  $M_1/L$ , multipliée par l'amplitude théorique à vide  $A_0$  :  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  ;

Compacteurs vibrants à pieds dameurs : quatre classes d'après le même critère :  $VP_1, VP_2, VP_3, VP_4, VP_5$  ;

Compacteurs statiques à pieds dameurs : deux classes d'après la charge statique totale par unité de largeur du cylindre  $M_1/L$  :  $SP_1, SP_2$  ;

Plaques vibrantes : quatre classes d'après la pression statique sous la semelle (masse totale divisée par la surface) :  $PQ_1, PQ_2, PQ_3, PQ_4$ , dont seules les deux dernières sont prises en compte pour le compactage des remblais (les autres servent au compactage des tranchées).

Chaque compacteur est rattaché à l'une de ces catégories.

#### b. Paramètres du chantier de compactage

L'exécution du chantier est décrite en fonction de six paramètres, qui sont :

Q – le volume du sol compacté (après compactage) ;

S – la surface sur laquelle le volume Q de sol a été compacté,

e – l'épaisseur maximale de la couche (mesurée après compactage),

N – le nombre d'applications de la charge du compacteur,

V – la vitesse moyenne de déplacement du compacteur,

L – la largeur de compactage.

Les valeurs de ces paramètres sont spécifiées dans les tableaux par type de sols.

Les conditions de compactage des quatre types de sols peuvent être définies en utilisant les tableaux de l'énoncé. Nous ne détaillerons pas cet exercice.

Cours d'analyse géotechnique des sites urbains et naturels  
Cours 5 – Les terrassements

Exercice : Compactage des remblais

ÉTUDE DES REMBLAIS ET DÉBLAIS DU TRACÉ D'UN PROJET DE DÉVIATION

Un projet de déviation traverse une vallée dont la géométrie a conduit au choix d'un remblai entouré de deux déblais (Figure 1). Le volume total des déblais est de 80.000 m<sup>3</sup> et celui du remblai de 65.000 m<sup>3</sup>. Nous ne nous occupons pas de l'ouvrage de franchissement de la rivière.

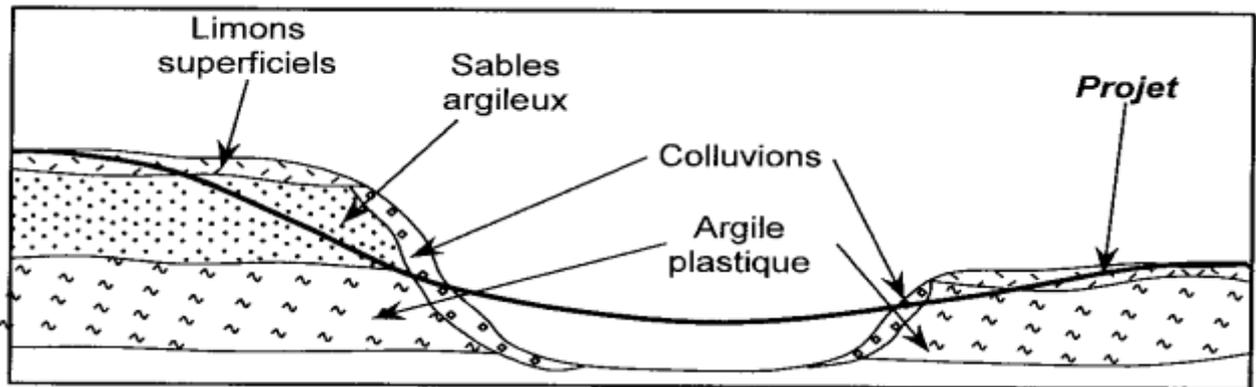


Figure 1. Coupe schématique de la vallée

L'étude géologique a identifié la présence de quatre formations géologiques :

- des limons de surface,
- une couche de sable argileux,
- une couche d'argile plastique,
- des colluvions (dépôts de pente), qui contiennent localement de petites nappes.

Les sondages ont permis de réaliser des essais d'identification de ces différentes familles de sols. Les résultats sont donnés ci-dessous.

Pour les limons de surface, les essais ont fourni les valeurs suivantes :

Teneur massique en particules fines :	$C_{80\mu m} = 90 \%$
Valeur de bleu :	$V_B = 1,9 \text{ g}/100\text{g}$
Indice de plasticité :	$I_P = 10$
Teneur en eau à l'optimum Proctor normal :	$w_{OPN} = 13 \%$
Masse volumique sèche à l'OPN :	$\rho_{d\text{OPN}} = 1,87 \text{ t}/\text{m}^3$
Teneurs en eau naturelles :	15 – 15,2 – 15,5 – 15,7 – 15,9 – 18 – 18,2

Pour l'argile plastique, les essais ont fourni les valeurs suivantes :

Teneur massique en particules fines :	$C_{80\mu m} = 98 \%$
Valeur de bleu :	$V_B = 8,8 \text{ g}/100\text{g}$
Indice de plasticité :	$I_P = 37$
Teneur en eau à l'optimum Proctor normal :	$w_{OPN} = 25 \%$
Masse volumique sèche à l'OPN :	$\rho_{d\text{OPN}} = 1,53 \text{ t}/\text{m}^3$
Teneurs en eau naturelles :	23,9 – 30,2 – 30,9 – 33 – 33,2 – 34

Le sable argileux et les colluvions ont fait l'objet d'essais dont les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Essais d'identification du sable argileux

## a. Courbe granulométrique

d (mm)	0,002	0,006	0,01	0,02	0,08	0,1	0,2	0,6	1	2	6	10	20	60
% < d	5,4	16	22	32	50	53	61	71	75	80	87	90	95	100

## b. Courbe de compactage de l'essai Proctor normal

w (%)	12,5	15	16,7	18	19,4
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,71	1,77	1,80	1,77	1,74

c. Courbes de tassement de l'essai CBR (IPI). Le piston a une surface S = 19,35 cm<sup>2</sup>.

w = 12,5 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	2,05	2,78	3,14	4,53	5,57	6,45
w = 15 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	1,69	2,24	2,54	3,57	4,16	4,59
w = 16,7 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	1,03	1,37	1,54	2,09	2,40	2,60
w = 18 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	0,6	0,83	0,94	1,33	1,59	1,77
w = 19,4 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	0,33	0,47	0,53	0,79	0,94	1,08

## d. Autres essais

Limites de consistance	Limite de plasticité $w_p = 22$	Limite de liquidité $w_L = 46$
Valeur de bleu	$V_B = 3,45$ g/100g	$V_{BS} = 2,96$ g/100g

Teneurs en eau naturelles (%) : 16 – 17 - 17,2 – 18,3 – 19 – 19,2 – 20 – 20,2

Tableau 2. Essais d'identification des colluvions

## a. Courbe granulométrique

d (mm)	0,002	0,006	0,01	0,02	0,08	0,1	0,2	0,6	1	2	6	10	20	60
% < d	9	27	37	53	78	82	89	95	96	97	99	100	100	100

## b. Courbe de compactage de l'essai Proctor normal

w (%)	13,8	14,6	16,6	18	19
$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1,75	1,77	1,79	1,77	1,73

c. Courbes de tassement de l'essai CBR (IPI). Le piston a une surface S = 19,35 cm<sup>2</sup>.

w = 12,5 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	2,19	2,78	3,09	4,16	4,82	5,31
w = 15 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	2,04	2,59	2,88	3,92	4,62	5,20
w = 16,7 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	1,28	1,75	1,98	2,68	3,01	3,20
w = 18 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	1,01	1,28	1,42	1,87	2,14	2,32
w = 19,4 %	Temps (s)	59	95	118	236	354	472
	Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
	Force (kN)	0,44	0,60	0,67	0,94	1,10	1,17

## d. Autres essais

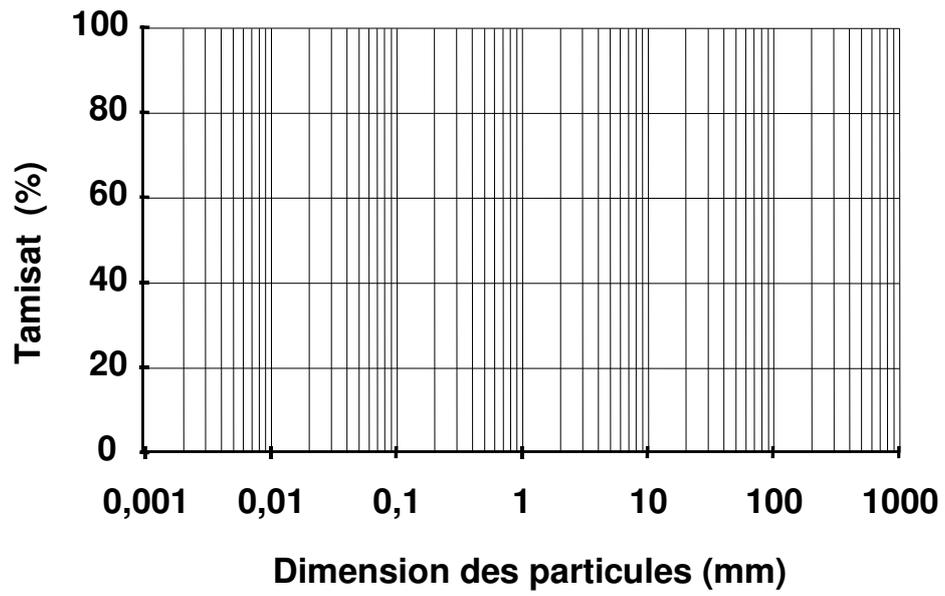
Limites de consistance	Limite de plasticité $w_p = 20$	Limite de liquidité $w_L = 40$
Valeur de bleu	$V_B = 4,40$ g/100g	$V_{BS} = 4,33$ g/100g

Teneurs en eau naturelles (%) : 15,7 – 18,3 - 18,7 – 19,6 – 21,5 – 21,5 – 21,8 – 22

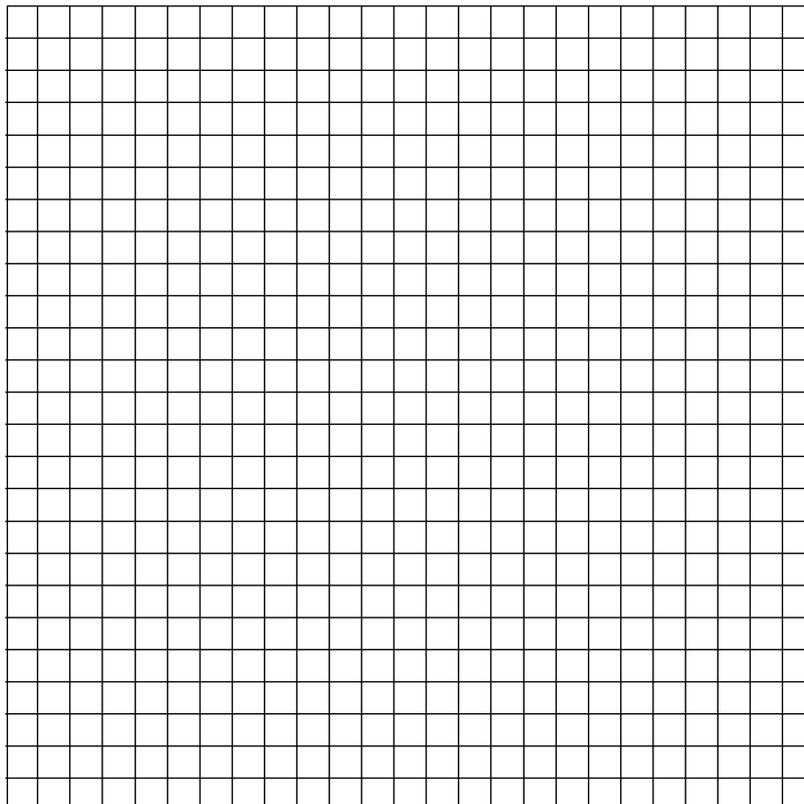
1. Tracer sur le diagramme joint les courbes granulométriques du sable argileux et des colluvions.
2. Déterminer la dénomination des quatre familles de sols dans la classification des terrassements routiers (GTR).
3. Déterminer, dans les conditions de l'essai Proctor normal, la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche optimale du sable argileux et des colluvions. Vous utiliserez les diagrammes joints.
4. Quels sont parmi les quatre familles de sols du site celles qui sont réutilisables en remblai et dans quelles conditions ?

## Diagrammes de travail

### 1. Courbe granulométrique



### 2. Essai Proctor



## ANNEXE – Éléments sur la compactibilité des sols (d'après le GTR 2000).

### Introduction

La classification française pour les terrassements a été élaborée pour diviser les matériaux naturels en sous-classes qui ont les mêmes comportements à l'extraction et au compactage et des comportements comparables à long terme. Les remblais et couches de forme doivent avoir des propriétés spécifiées dans les projets et que l'on mesure par des essais. Des études expérimentales très complètes ont permis de définir les conditions de passage des différents matériaux initiaux possibles à un remblai ou une couche de forme de comportement spécifié :

- possibilité ou non de réemploi,
- nécessité de modifier ou non la teneur en eau,
- nécessité d'un traitement à la chaux,
- épaisseur des couches,
- type de compacteur et intensité du compactage (énergie et nombre de passes),

en fonction des conditions climatiques lors de l'exécution du chantier.

Le système de classification des sols pour les terrassements est défini par la norme NF P 11-300.

### Classification des sols pour les terrassements

La classification distingue trois familles de matériaux :

- les sols (classes A, B, C et D),
- les roches (classe R),
- les matériaux organiques et les produits industriels (classe F).

Trois critères de classification sont utilisés :

- la nature des sols (courbe granulométrique, propriétés des particules fines),
- la résistance (essais Los Angeles, Micro-Deval Humide, fragmentabilité, dégradabilité, ...),
- l'état hydrique (indice portant immédiat  $I_{PI}$ , indice de consistance  $I_c$ , rapport de la teneur en eau naturelle à la teneur en eau optimale proctor  $w_n/w_{OMC}$ ).

Les sols sont classés d'après leur granularité :

- **A = sols fins** (teneur en fines  $C_{80\mu m} > 35\%$ , pas de particules plus grandes que 50 mm :  $D_{max} < 50\text{mm}$ ) Cette classe est subdivisée en quatre sous-classes  $A_1$ - $A_2$ - $A_3$ - $A_4$  sur la base des valeurs de bleu  $V_{BS}$  ou de l'indice de plasticité  $I_P$  ;
- **B = sols sableux et graveleux avec fines** :  $D_{max} < 50$  mm, avec une teneur en fines comprise entre 12% et 35% ou bien avec une teneur en fines  $C_{80\mu m}$  inférieure à 12% mais avec une valeur de bleu  $V_{BS} > 0,1$  g/100g. Cette classe est subdivisée en six sous-classes  $B_1$ - $B_2$ - $B_3$ - $B_4$ - $B_5$ - $B_6$  sur la base de la teneur en particules supérieures à 2 mm et de l'indice de plasticité  $I_P$ , de la valeur de bleu  $V_{BS}$  ou de l'équivalent de sable  $E_s$  ;
- **C = sols comportant des fines et de gros éléments** ( $D_{max} > 50\text{mm}$ ). Cette classe est subdivisée en deux sous-classes  $C_1$  et  $C_2$ . en fonction de critères sur la granularité et la forme des particules ;
- **D = sols insensibles à l'eau** : sols grenus ayant une teneur en fines faible ( $C_{80\mu m} < 12\%$ ), un indice de plasticité  $I_P$  ou une valeur de bleu faible ( $V_{BS} < 0,1$  g/100g) et un  $D_{max} < 50$  mm. Cette classe est subdivisée en deux sous-classes  $D_1$ - $D_2$  sur la base du pourcentage de particules plus grandes que 2 mm (ou de  $C_{2\text{mm}}$ ).

Les limites des classes sont représentées sur la figure 1.

Les sols reçoivent des noms de la forme :

- pour les sols sans particules plus grandes que 50mm :  $A_2$ ,  $B_5$ ,  $D_1$ , ... ;
- pour les sols contenant des particules plus grandes que 50 mm :  $C_1A_3$ ,  $C_2B_2$ ,...

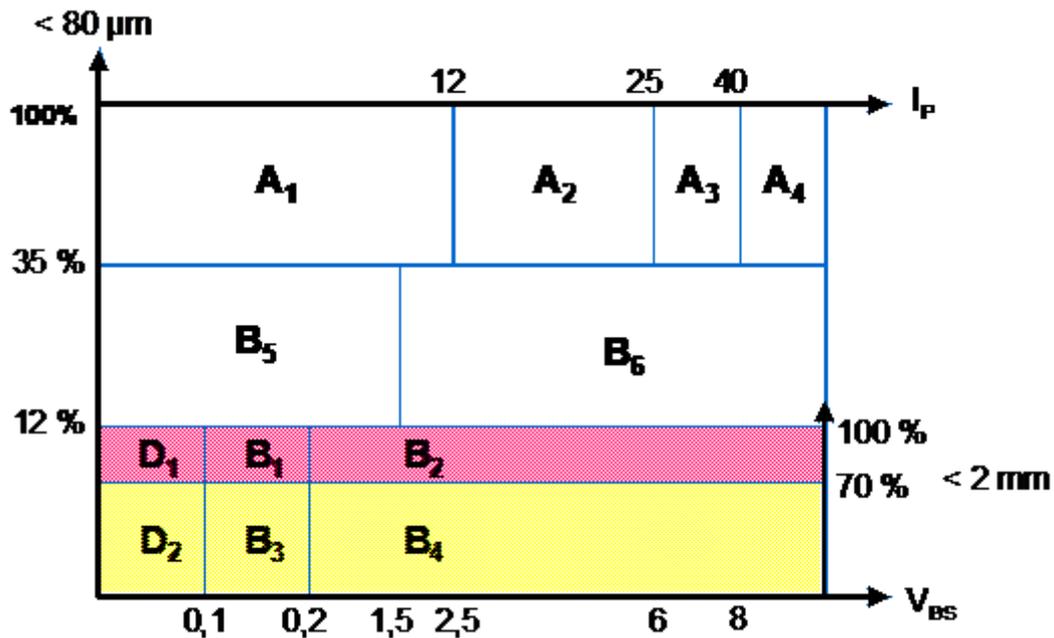


Figure 1. Définition des classes A, B et D de la classification des sols pour les terrassements

Exemples de classement :

**A<sub>2</sub>** : sol fin (plus de 35% de particules fines,  $C_{80\mu m} > 35\%$ ), d'indice de plasticité compris entre 12 et 25.

**C<sub>1</sub>-B<sub>5</sub>** : sol comportant des particules plus grandes que 50 mm mais représentant moins de 20-40% de l'échantillon prélevé et/ou comportant de grandes particules arrondies. La fraction inférieure à 50 mm est un sable ou un gravier d'indice de plasticité inférieur à 12.

**C<sub>2</sub>-D<sub>2</sub>** : sol dont la fraction plus grande que 50 mm représente au moins 20-40% de l'échantillon total, avec des particules anguleuses. La fraction inférieure à 50 mm est une grave propre.

**B<sub>6</sub>** : sol dont la fraction fine est comprise entre 12 et 35% et dont la plus grosse particule a une dimension  $D_{max}$  inférieure à 40 mm. Le choix entre B<sub>5</sub> et B<sub>6</sub> se fait d'après la valeur de bleu (au seuil de 1,5 g/100g).

### Caractérisation de l'état hydrique du sol

L'état hydrique du sol est un paramètre de classification important pour l'emploi des sols dans les remblais.

L'évaluation de la teneur en eau du sol (lorsqu'il est sensible à l'eau) est fondée sur la valeur de son indice portant immédiat  $I_{PI}$  ou sur sa teneur en eau naturelle  $w_n$  rapportée à la teneur en eau optimale déduite d'un essai Proctor standard  $w_{OPN}$  sur la fraction inférieure à 20 mm ( $C_{20mm}$ ) ou bien encore sur la valeur de l'indice de consistance du sol  $I_c$ .

Cinq états hydriques sont définis :

très sec (ts), sec (s), normal (m), humide (h), très humide (th).

L'état normal (m) est le meilleur pour la mise en place du sol en remblai. Il permet en particulier un compactage adéquat du sol.

Les états humide (h) et très humide (th) rendent la circulation et le compactage des sols difficiles (un sol à l'état très humide n'est normalement pas circulable par un atelier de terrassement courant).

Les états sec (s) et très sec (ts) rendent le sol difficile à compacter pour former des massifs de remblai stable (on considère qu'il est impossible de compacter correctement un sol très sec par les méthodes usuelles).

Les seuils utilisés pour distinguer ces états hydriques pour les différentes sous-classes de sols sont donnés rassemblés dans le tableau suivant :

Type de sol	Essais de référence	Seuils d'état hydrique				
		ts	s	m	h	th
A <sub>1</sub>	I <sub>PI</sub>		25	<b>8</b>	<b>3</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,1	1,25	
A <sub>2</sub>	I <sub>PI</sub>		15	<b>5</b>	<b>2</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,1	1,3	
A <sub>3</sub>	I <sub>c</sub>	1,4	1,2	<b>1,05</b>	<b>0,9</b>	
	I <sub>PI</sub>		10	<b>3</b>	<b>1</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,7	0,9	1,2	1,4	
A <sub>4</sub>	I <sub>c</sub>	1,3	1,15	<b>1</b>	<b>0,8</b>	
	Étude spéciale nécessaire					
B <sub>1</sub>		Pas de sensibilité à la teneur en eau				
B <sub>2</sub>	I <sub>PI</sub>			<b>8</b>	<b>4</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,5	0,9	1,1	1,25	
B <sub>3</sub>		Pas de sensibilité à la teneur en eau				
B <sub>4</sub>	I <sub>PI</sub>			<b>15</b>	<b>7</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,6	0,9	1,1	1,25	
B <sub>5</sub>	I <sub>PI</sub>		30	<b>12</b>	<b>5</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	0,6	0,9	1,1	1,25	
B <sub>6</sub>	I <sub>PI</sub>		25	<b>10</b>	<b>4</b>	
	w <sub>n</sub> /w <sub>OPN</sub>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	1,1	1,3	
	I <sub>c</sub>	1,3	1,2	1	0,8	

Les seuils recommandés sont donnés en gras et italique.

#### Classification des sols d'après leur état hydrique

En pratique, les propriétés des sols utilisées pour la classification se correspondent comme indiqué dans le tableau suivant.

<b>2,5 &lt; V<sub>bs</sub> ≤ 6</b> <b>12 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 25</b>	<b>A<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>PI</sub> ≤ 2 or I<sub>c</sub> ≤ 0,9</b> or <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,3 w<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub>th</b>
		<b>2 &lt; I<sub>PI</sub> ≤ 5 or 0,9 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,05</b> or <b>1,1 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,3 w<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub>h</b>
		<b>5 &lt; I<sub>PI</sub> ≤ 15 or 1,05 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,2</b> or <b>0,9 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,1 w<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub>m</b>
		<b>1,2 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,4</b> or <b>0,7 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 w<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub>s</b>
		<b>1,2 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,4</b> or <b>0,7 w<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 w<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub>ts</b>

## Conditions d'utilisation des sols en remblai

Les règles présentées par le GTR 1992 (2000) s'appuient sur deux catégories de paramètres, qui caractérisent :

- les conditions imposées :
  - o classement du sol (d'après sa nature et son état hydrique),
  - o conditions climatiques (pluies, évaporation) ;
- les conditions d'utilisation du sol en remblai, qui peuvent être choisies :
  - o mode d'extraction (frontal ou par couches),
  - o modification de la courbe granulométrique (élimination d'une fraction, fragmentation),
  - o correction de la teneur en eau (maintenir ou modifier la teneur en eau naturelle),
  - o traitement (la chaux),
  - o épaisseur des couches (pour faciliter la fragmentation ou les échanges d'eau),
  - o énergie de compactage (faible, moyenne ou forte),
  - o épaisseur maximale des remblais (<5m, <10m).

Pour chaque classe de sol des recommandations sont données pour le compactage en fonction des conditions climatiques. Pour les sous-classes A1 à A3, les recommandations suivantes sont données.

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>1</sub> th	tous	non			
A <sub>1</sub> h	humide	non			
	normal	oui	traitement	modéré	
	sec	oui	remblai < 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h < 10m	modéré	fines
	sec	oui	traitement	modéré	
A <sub>1</sub> m	très humide	non			
	humide	oui	Protection, h < 10m	modéré	
	normal	oui		modéré	
	sec	oui	arrosage	modéré	
	sec	oui	h < 10m	intense	
A <sub>1</sub> s	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h < 10m	modéré	fines
	normal	oui	h < 10m	intense	
	sec	oui	arrosage, h < 5m	intense	
A <sub>1</sub> ts					

Classe A2

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>2</sub> th	tous	non			
A <sub>2</sub> h	humide	non			
	moyen	oui	traitement à la chaux	faible	
	moyen	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	traitement à la chaux	modéré	
A <sub>2</sub> m	très humide	non			
	humide	oui	Protection, h ≤ 10m	modéré	
	moyen	oui		modéré	
	sec	oui	arrosage	modéré	
	sec	oui	h ≤ 10m	intense	
A <sub>2</sub> s	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	intense	fines
	moyen	oui	h ≤ 10m	intense	
	sec	oui	arrosage, h ≤ 5m	intense	
A <sub>2</sub> ts	tous	non			

Classe A3

Classe	Climat	Utilisation	Conditions	Compactage	Couches
A <sub>3</sub> th	tous	non			
A <sub>3</sub> h	très humide	non			
	humide	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	moyen	oui	traitement à la chaux	modéré	
	moyen	oui	remblai ≤ 5m	faible	
	sec	oui	correction de teneur en eau h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	traitement à la chaux	modéré	
A <sub>3</sub> m	très humide	non			
	humide	oui	h ≤ 10m	modéré	
	moyen	oui	h ≤ 10m	modéré	
	sec	oui	arrosage, h ≤ 10m	modéré	fines
	sec	oui	h ≤ 5m	intense	
A <sub>3</sub> s	très humide	non			
	humide	oui	correction de teneur en eau h ≤ 5m	intense	fines
	moyen	oui	arrosage, h ≤ 5m	intense	fines
	sec	oui	protection, arrosage, h ≤ 5m	intense	fines
A <sub>3</sub> ts	tous	non			

## Prescriptions de compactage

### *Types de compactage*

#### Classement des compacteurs

On distingue les types de compacteurs suivants :

Compacteurs à pneus : trois classes d'après la charge par roue  $C_R$  :  $P_1, P_2, P_3$

Compacteurs vibrants à cylindre lisse : cinq classes d'après la charge statique totale par unité de longueur de la génératrice vibrante  $M_1/L$ , multipliée par l'amplitude théorique à vide  $A_0$  :  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$  ;

Compacteurs vibrants à pieds dameurs : quatre classes d'après le même critère :  $VP_1, VP_2, VP_3, VP_4, VP_5$  ;

Compacteurs statiques à pieds dameurs : deux classes d'après la charge statique totale par unité de largeur du cylindre  $M_1/L$  :  $SP_1, SP_2$  ;

Plaques vibrantes : quatre classes d'après la pression statique sous la semelle (masse totale divisée par la surface) :  $PQ_1, PQ_2, PQ_3, PQ_4$ , dont seules les deux dernières sont prises en compte pour le compactage des remblais (les autres servent au compactage des tranchées).

## Tableaux de compactage pour la réutilisation des sols en remblais – Sols A<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>A<sub>1</sub>

Méthode		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4	
Machine																						
Faible énergie de compactage Code 3	Q/S	0,080	0,120	0,180	0,055	0,085	0,125		0,165		0,205		0,055	0,085	0,165	0,205	0,265	0,070	0,100		0,065	
	e V	0,30 5,0	0.45 (1) 5.0	0.60 (1) 5.0	0.25 2.0	0.35 2.5	0.30 4.0	0.50 2.5	0.35 (1) 5.0	0.65 (1) 2.5	0.40 (1) 5.0	0.80 (1) 2.5	0.25 (2) 2.0	0.30 (2) 3.0	0.30 (2) 4.0	0.35 (2) 5.0	0.40 (2) 5.0	0.25 (2) 8.0	0.40 (2) 8.0	0	0.20 (1) 1.0	
	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	2	4	4		3
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800		65	
Énergie de compactage modérée Code 2	Q/S	0,045	0,065	0,095		0,040	0,065		0,085		0,100			0,040	0,085	0,100	0,130	0,040	0,070			
	e V	0,25 5,0	0,35 5,0	0,45 5,0	0	0,25 2,0	0,30 2,5	0,40 2,0	0,30 3,5	0,50 2,0	0,30 4,0	0,60 2,0	0	0,25 (2) 2,0	0,30 (2) 2,5	0,30 (2) 3,5	0,30 (2) 4,0	0,20 (2) 8,0	0,30 (2) 8,0	0	0	
	N	6	6	5		7	5	7	4	6	3	6		7	4	3	3	5	5			
	Q/L	225	325	475		80	165	130	300	170	400	200		80	215	350	520	320	560			
Énergie de compactage élevée Code 1	Q/S		0,035	0,050		0,025	0,040		0,050		0,065			0,025	0,050	0,065	0,085		0,035			
	e V	0	0,20 5,0	0,30 5,0	0	0,20 2,0		0,30 2,0	0,30 2,5	0,40 2,0	0,30 3,0	0,45 2,0	0	0,20 2,0	0,30 2,0	0,30 2,5	0,30 3,0	0	0,25 8,0	0	0	
	N		6	6		8		8	6	8	5	7		8	6	5	4		8			
	Q/L		175	250		50		80	125	100	195	130		50	100	165	255		280			

Q/S (m) (\*) impose que  $D_{max} < 2/3$  de l'épaisseur de la couche compactée

e (m)

V (km/h)

N -

Q/L (m<sup>3</sup>/h.m)

0 Compacteur ne convenant pas

(1) s'assurer de la traficabilité du compacteur

(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs ou utilisation d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité)

## Tableaux de compactage pour la réutilisation des sols en remblais – Sols A<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>A<sub>2</sub>

Méthode		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Machine																					
Faible énergie de compactage Code 3	Q/S	0.05	0.080	0.120	0.040	0.060	0.090		0.120		0.145		0.040	0.060	0.120	0.145	0.190	0.065	0.100		
	e V	0.25 5.0	0.35 5.0	0.45 5.0	0.20 2.0	0.30 2.0	0.3 3.0	0.35 2.5	0.30 4.0	0.45 2.5	0.30 5.0	0.6 2.5	0.20 (2) 2.0	0.30 (2) 2.0	0.30 (2) 3.0	0.30 (2) 4.0	0.30 (2) 5.0	0.25 (2) 8.0	0.40 (2) 8.0	0	0
	N	5	5	4	5	5	4	4	3	4	3	5	5	5	3	3	2	4	4		
	Q/L	250	400	600	80	120	270	225	480	300	725	365	80	120	360	580	950	520	800		
Énergie de compactage modérée Code 2	Q/S	0.03	0.050	0.070		0.035	0.050		0.065		0.080			0.035	0.065	0.080	0.105	0.035	0.06		
	e V	0.20 5.0	0.25 5.0	0.35 5.0	0	0.20 2.0		0.30 2.0	0.30 2.5	0.4 2.0	0.30 3.0	0.45 2.0	0	0.20 (2) 2.0	0.30 (2) 2.0	0.30 (2) 2.5	0.30 (2) 3.0	0.20 (2) 8.0	0.30 (2) 8.0	0	0
	N	7	5	5		6		6	5	7	4	6		6	5	4	3	6	5		
	Q/L	150	250	350		70		100	165	130	240	160		70	130	200	315	280	480		
Énergie de compactage élevée Code 1	Q/S		0.030	0.040			0.035		0.045		0.055				0.045	0.055	0.070		0.03		
	e V	0	0.20 5.0	0.30 5.0	0	0		0.25 2.0		0.35 2.0	0.30 2.5	0.4 2.0	0	0	0.25 2.0	0.30 2.0	0.30 2.5	0	0.20 8,0	0	0
	N		7	8				8		8	6	8			6	6	5		7		
	Q/L		150	200				70		90	140	110			90	110	175		240		

Q/S (m) (\*) impose que  $D_{max} < 2/3$  de l'épaisseur de la couche compactée

e (m)

V (km/h)

N -

Q/L (m<sup>3</sup>/h.m)

0 Compacteur ne convenant pas

(1) s'assurer de la traficabilité du compacteur

(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs ou utilisation d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité)

### Tableaux de compactage pour la réutilisation des sols en remblais – Sols A<sub>3</sub>, C<sub>1</sub>A<sub>3</sub>

Méthode		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Machine																					
Faible énergie de compactage Code 3	Q/S	0.020	0.040	0.060		0.040	0.055		0.070		0.085			0.04	0.070	0.085	0.110	0.040	0.070		
	e V	0.20 5.0	0.25 5.0	0.35 5.0	0	0.20 2.0		0.25 2.0	0.30 2.5	0.35 2.0	0.3 3.0	0.45 2.0	0	0.20 (2) 2.0	0.25 (2) 2.0	0.30 (2) 2.5	0.30 (2) 3.0	0.25 (2) 8.0	0.35 (2) 8.0	0	0
	N	10	7	6		5		5	5	5	4	6		5	4	4	4	7	5		
	Q/L	100	200	300		80		110	175	140	255	170		80	140	215	330	320	560		
Énergie de compactage modérée Code 2	Q/S		0.030	0.050			0.035		0.045		0.055				0.045	0.055	0.070	0.025	0.045		
	e V	0	0.20 5.0	0.30 5.0	0	0		0.20 2.0		0.25 2.0		0.32 .0	0	0	0.20 2.0	0.25 2.0	0.30 2.0	0.20 8.0	0.25 8.0	0	0
	N		7	6				6		6					5	5	5	8	6		
	Q/L		150	250				70		90		110			90	110	140	200	360		
Énergie de compactage élevée Code 1	Q/S			0.030					0.030		0.035					0.035	0.045		0.025		
	e V	0	0	0.20 5.0	0	0	0	0		0.20 2.0		0.25 2.0	0	0	0	0.20 2.0	0.25 2.0	0	0.20 8.0	0	0
	N			7						7		8				6	6		8		
	Q/L			150						60		70				70	90		200		

Q/S (m) (\*) impose que  $D_{max} < 2/3$  de l'épaisseur de la couche compactée  
e (m)  
V (km/h) (2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque  
N - de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs ou utilisation  
Q/L (m<sup>3</sup>/h.m) d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité)  
0 Compacteur ne convenant pas

[Extrait du GTR 1992, 2<sup>ème</sup> édition 2000]

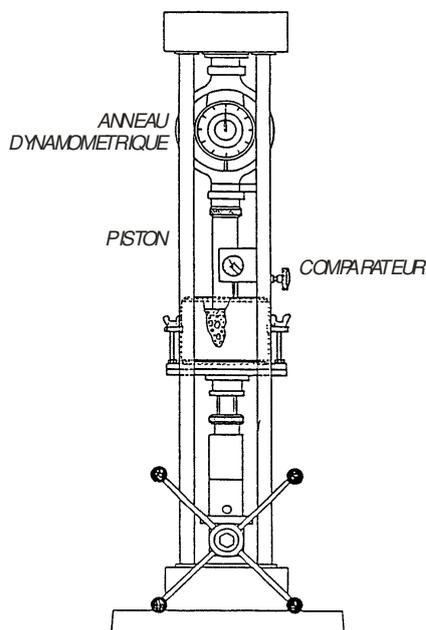
## DÉTERMINATION DE L'INDICE PORTANT IMMÉDIAT $I_{PI}$

### Préambule

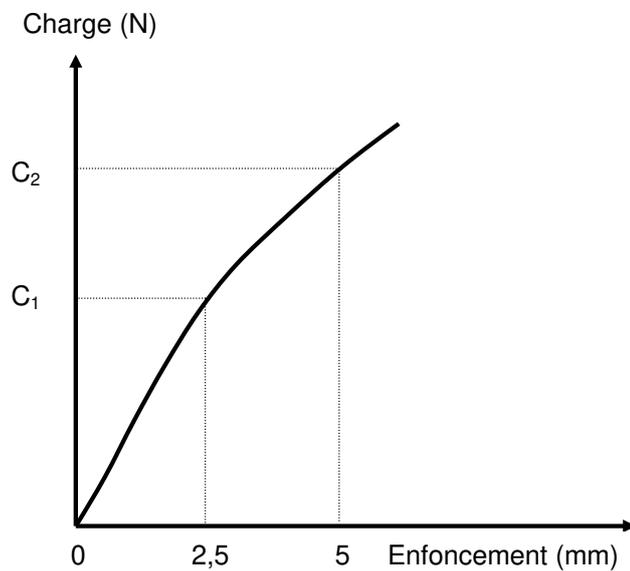
L'indice portant immédiat  $I_{PI}$  est utilisé comme indicateur de l'état hydrique des sols. C'est le paramètre de référence dans la classification GTR pour les sols à l'état moyen, humide et très humide.

### Principe de l'essai

On mesure la force appliquée pour faire pénétrer un piston à vitesse constante dans une éprouvette de sol compactée à l'énergie Proctor normal.



Dispositif d'essai



Courbe d'enfoncement du piston

### Résultat de l'essai

La surface normalisée du piston vaut :  $S = 19,35 \text{ cm}^2$ .

La valeur de l'indice portant immédiat est donnée par la formule :

$$I_{PI} = \max \left\{ \frac{C_1}{7S}, \frac{C_2}{10,5S} \right\}$$

## ÉTUDE DU GLISSEMENT DE CORNY

CORRIGÉ

### Partie 1. Coupe géologique

Il s'agissait de reconstruire la coupe suivante (figure 1).

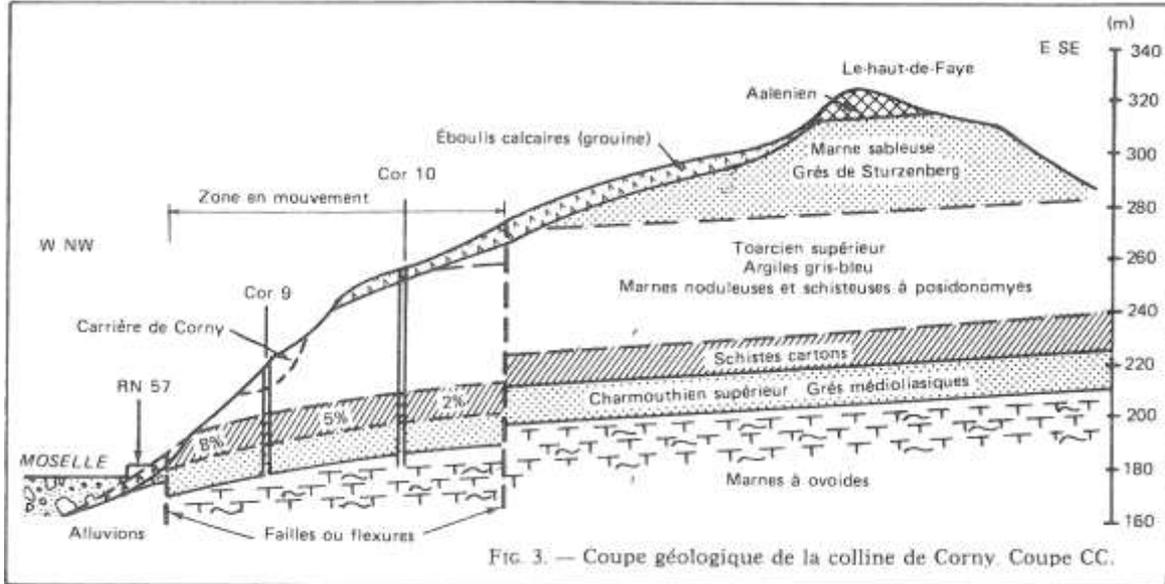


Figure 1. Coupe du site de Corny

Commentaires : le site comporte une faille qui décale les couches. Pour détecter la présence d'une anomalie, qu'on interprète comme une faille, il faut relier les limites des couches des sondages par des lignes droites. Le nombre de sondage permettait d'identifier toutes les couches.

### Partie 2. Détermination des déplacements en profondeur : inclinomètre

La déformation correspondant au diagramme des angles est représentée sur la partie droite de la figure. Pour construire les courbes, il faut partir des valeurs mesurées de  $\alpha$  (tableau 1), et intégrer à partir du bas le produit de  $d$  par la tangente de l'angle  $\alpha$ .

Tableau 1. Valeurs de  $\alpha$  en fonction de la profondeur ( $\times 0,01$  radian)

z (m)	Mesure 0	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8	Mesure 9	Mesure 10
0,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
0,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
1,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
1,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
2,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
2,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
3,3	0	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
3,8	0	-0,1	-0,5	-0,7	-1,0	-1,9	-2,6	-3,0	-4,0	-5,0	-5,0
4,3	0	-0,4	-1,0	-1,4	-2,3	-4,0	-5,4	-6,5	-8,0	-10,0	-10,9
4,8	0	-0,1	-0,5	-0,5	-0,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,9
5,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
à											
11,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'intégration a été faite en attribuant la rotation de l'inclinomètre à une section de tube de 0,5m de longueur et en affectant le déplacement «  $d \tan \alpha$  » calculé au haut de cette section, soit 0,3m plus haut que la cote de mesure. Le résultat des calculs est donné dans le tableau 2 et représenté sur la figure 2.

Tableau 2. Valeurs du déplacement horizontal en fonction de la profondeur (m)

z (m)	Mesure 0	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8	Mesure 9	Mesure 10
0,5	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0595	-0,0671	-0,0796	-0,0947	-0,1012
1	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0575	-0,0651	-0,0776	-0,0927	-0,0992
1,5	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0555	-0,0631	-0,0756	-0,0907	-0,0972
2	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0535	-0,0611	-0,0736	-0,0887	-0,0952
2,5	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0515	-0,0591	-0,0716	-0,0867	-0,0932
3	0	-0,0035	-0,0095	-0,0125	-0,0195	-0,0375	-0,0495	-0,0571	-0,0696	-0,0847	-0,0912
3,5	0	-0,003	-0,0100	-0,0130	-0,0190	-0,0370	-0,0475	-0,0551	-0,0676	-0,0827	-0,0892
4	0	-0,0025	-0,0075	-0,0095	-0,014	-0,0275	-0,0345	-0,0400	-0,0476	-0,0577	-0,064
4,5	0	-0,0005	-0,0025	-0,0025	-0,0025	-0,0075	-0,0075	-0,0075	-0,0075	-0,0075	-0,0095
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
à											
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

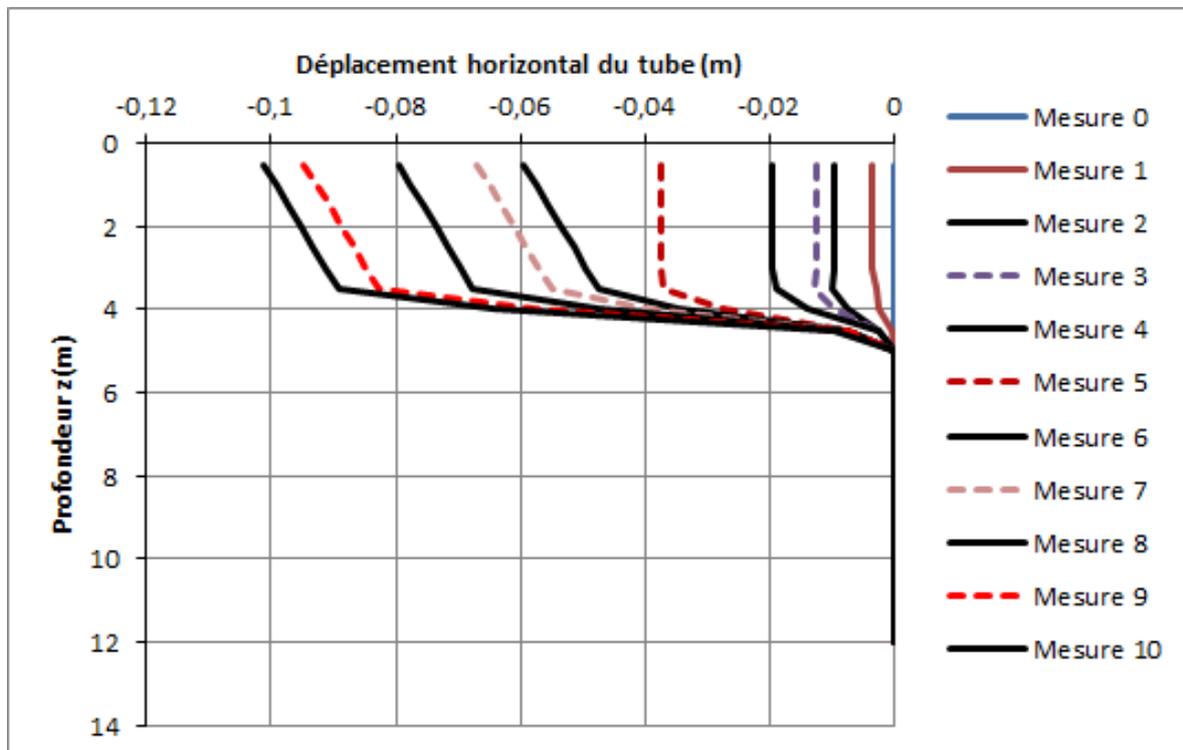


Figure 2. Construction de la déformée du tube à partir des variations angulaires

Ensuite, on peut représenter le déplacement au niveau 4,0m (ou 3,5m) en fonction du temps (figure 3).

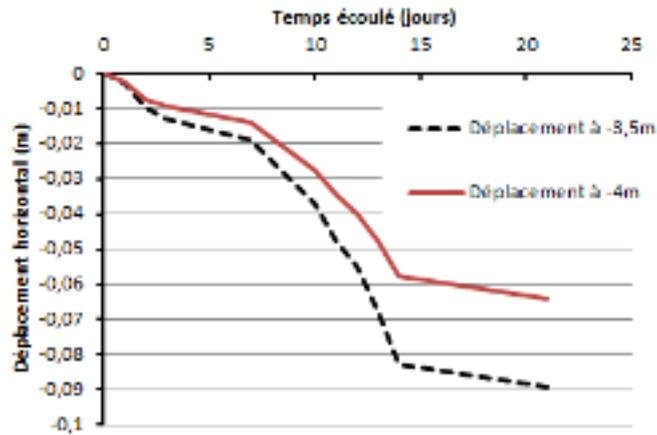


Figure 3. Construction de la déformée du tube à partir des variations angulaires

### Partie 3. Retour sur le site de Corny

La coupe du site de Corny montre la présence de trois surfaces de glissement :

- un glissement qui débouche au niveau du fond d'un ancien lit (bras mort) de la Moselle. Ce glissement se développe à la base des éboulis qui ont rempli progressivement la vallée et déplacé le lit de la Moselle. Les alluvions imperméables sont de nature argileuse. Les variations de la nappe, représentée en traits tiretés sur la figure, sont la cause probable de ce glissement. Sur la surface de glissement, les alluvions argileuses ont certainement atteint leur résistance résiduelle ;
- la partie supérieure du glissement est constituée d'une succession de glissements régressifs dans la couche d'argile et marnes du Toarcien, connue pour son aptitude aux glissements de terrain. La position des surfaces de glissement a été déterminée à partir des fissures et gradins de la surface du sol. La surface de glissement, commune à tous les glissements partiels, a été déterminée au moyen d'inclinomètres. Ces glissements n'ont pas d'interaction avec le glissement du bas de la pente, qui a déplacé la route nationale (RN57) ;
- entre les parties supérieure et inférieure de la pente, on trouve une zone de transition, siège de mouvements indépendants des autres.

## ÉTUDE DU GLISSEMENT DE CORNY

### Introduction

La commune de Corny est située au bord de la Moselle, au nord de Pont-à-Mousson. Le 14 mai 1970, un glissement de terrain a coupé en quelques heures la RN57, qui relie Nancy à Metz. Quatre à cinq millions de mètres cubes ont été mis en mouvement à la suite de pluies exceptionnellement importantes.

À cet endroit, le lit majeur de la Moselle ne fait que 400m de large, à cause de la présence de grès médioliasiques qui constituent un niveau résistant, à la base des versants adjacents. Ceux-ci sont constitués d'argiles et de marnes du Toarcien. Les marnes ont été exploitées de 1936 à 1968 en carrière ouverte, actuellement arrêtée. Les flancs de la Moselle sont notoirement instables et le glissement de 1970 à Corny est la réactivation de mouvements dont les premiers datent du 19<sup>ème</sup> siècle, avec des manifestations récentes en 1937 et 1956.

Une vue générale du glissement est présentée sur la figure 1. On note que la route s'est déplacée de 6m vers la rivière.



Figure 1. Glissement de la RN57 (Nancy-Metz) à Corny.

La visite du site a permis de relever de nombreux indices (bourrelets de pieds, ressauts et fissures) qui ont été reportés sur le plan de la figure 2, avec toutes les manifestations des mouvements antérieurs.

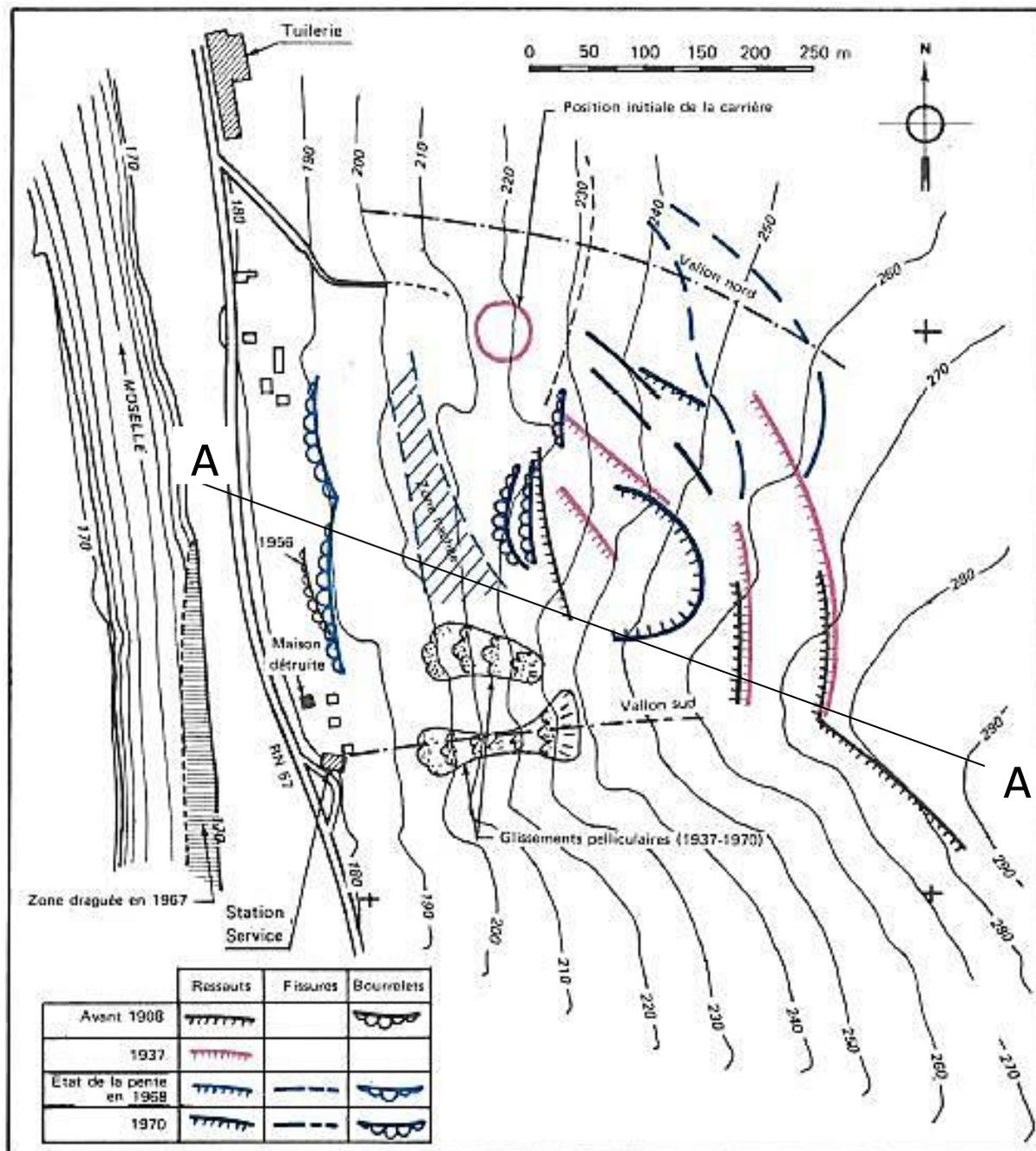


Figure 2. Évolution des zones instables depuis 1908

La géologie du site a été reconnue par 48 sondages à la tarière, 22 sondages destructifs et 15 sondages carottés.

### Partie 1. Coupe géologique

Sur le profil en travers WNW-ESE représenté sur la figure 2 (ligne AA), sept sondages permettent de définir la structure des terrains présents dans la colline. La surface du terrain est représentée sur la figure 3. Les résultats de ces sondages sont donnés sur la figure 4. Les noms des couches rencontrées dans chaque sondage, à partir du haut, sont indiqués dans le tableau 1.

Tracer la coupe géologique correspondant à ces sondages.

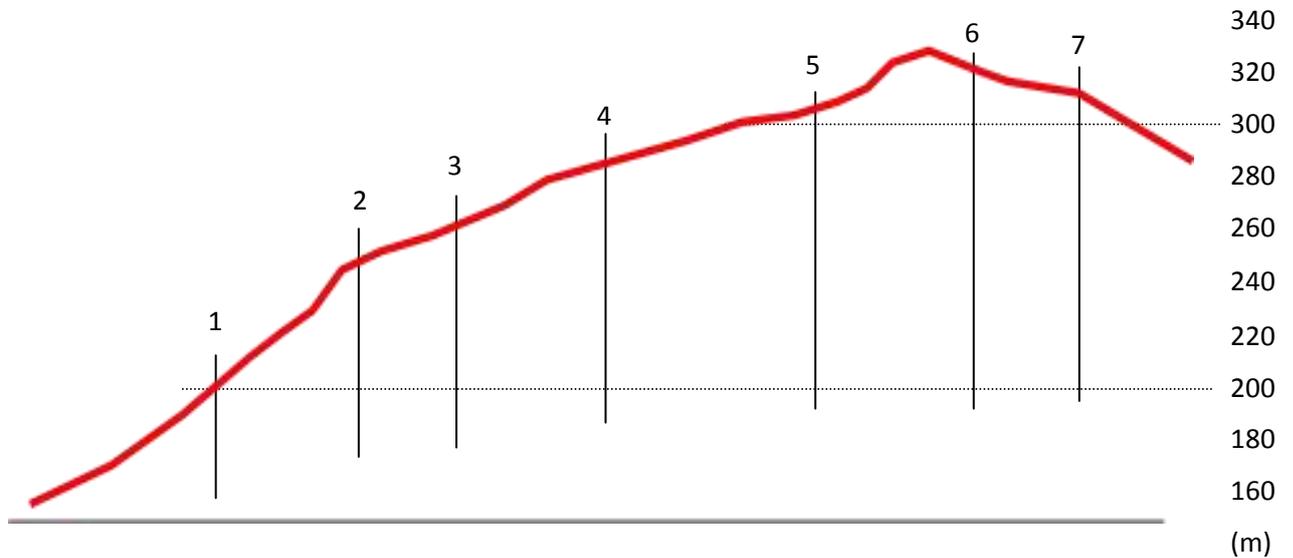


Figure 3. Position des sondages

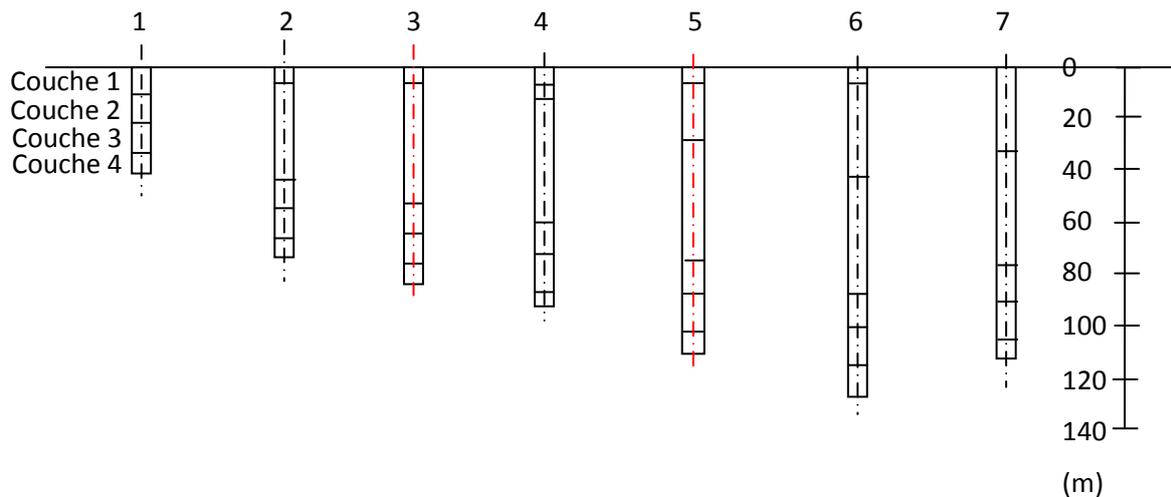


Figure 4. Couches rencontrées dans les sondages

Tableau 1. Couches rencontrées dans les sondages

Sondage	1	2	3	4	5	6	7
Couche 1	Argile	Éboulis	Éboulis	Éboulis	Éboulis	Minerai fer	Marne
Couche 2	Schistes	Argile	Argile	Marne	Marne	Marne	Argile
Couche 3	Grès	Schistes	Schistes	Argile	Argile	Argile	Schistes
Couche 4	Marnes	Grès	Grès	Schistes	Schistes	Schistes	Grès
Couche 5	-	Marnes	Marnes	Grès	Grès	Grès	Marnes
Couche 6	-	-	-	Marnes	Marnes	Marnes	-
Couche 7	-	-	-	-	-	-	-

## Partie 2. Détermination des déplacements en profondeur : inclinomètre

Pour déterminer la position de la surface de glissement, on installe des tubes inclinométriques. La mesure inclinométrique consiste à descendre dans le tube une sonde qui mesure son inclinaison par rapport à la verticale. Cette inclinaison  $\alpha$  s'applique entre les points de contact entre la sonde rigide et le tube, soit une distance constante  $d$ . Connaissant les valeurs de l'angle  $\alpha$  en fonction de la profondeur, pour des mesures distantes de la longueur  $d$ , on peut reconstituer la courbe de déplacement horizontal du sol.

La figure 5 présente les valeurs de  $\alpha$  mesurées le long d'un tube inclinométrique en fonction du temps (sur un site différent de celui de Corny). Ces valeurs de  $\alpha$  sont rassemblées dans le tableau 1. Construire la forme de la courbe de déplacement horizontal du sol et en déduire la position de la surface de glissement ( $d$  vaut 0,5m). Représenter l'évolution du déplacement sur la surface de rupture au cours du temps.

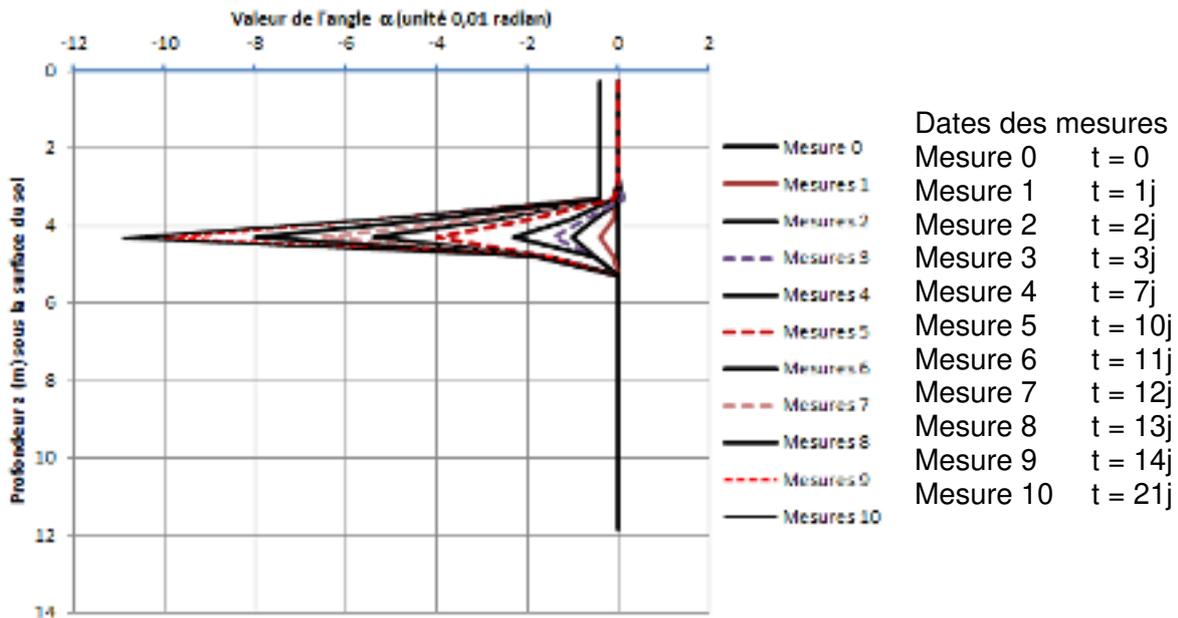


Figure 5. Évolution au cours du temps des valeurs de l'inclinaison  $\alpha$  du tube inclinométrique

Tableau 1. Valeurs de  $\alpha$  en fonction de la profondeur ( $\times 0,01$  radian)

z (m)	Mesure 0	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Mesure 6	Mesure 7	Mesure 8	Mesure 9	Mesure 10
0,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
0,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
1,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
1,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
2,3	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
2,8	0	0	0	0	0	0	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
3,3	0	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
3,8	0	-0,1	-0,5	-0,7	-1,0	-1,9	-2,6	-3,0	-4,0	-5,0	-5,0
4,3	0	-0,4	-1,0	-1,4	-2,3	-4,0	-5,4	-6,5	-8,0	-10,0	-10,9
4,8	0	-0,1	-0,5	-0,5	-0,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,9
5,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

9,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### **Partie 3. Retour sur le site de Corny**

L'ensemble des informations rassemblées sur le site de Corny a permis d'établir le schéma de la figure 6.

Commentez les mouvements associés à cette représentation du glissement.

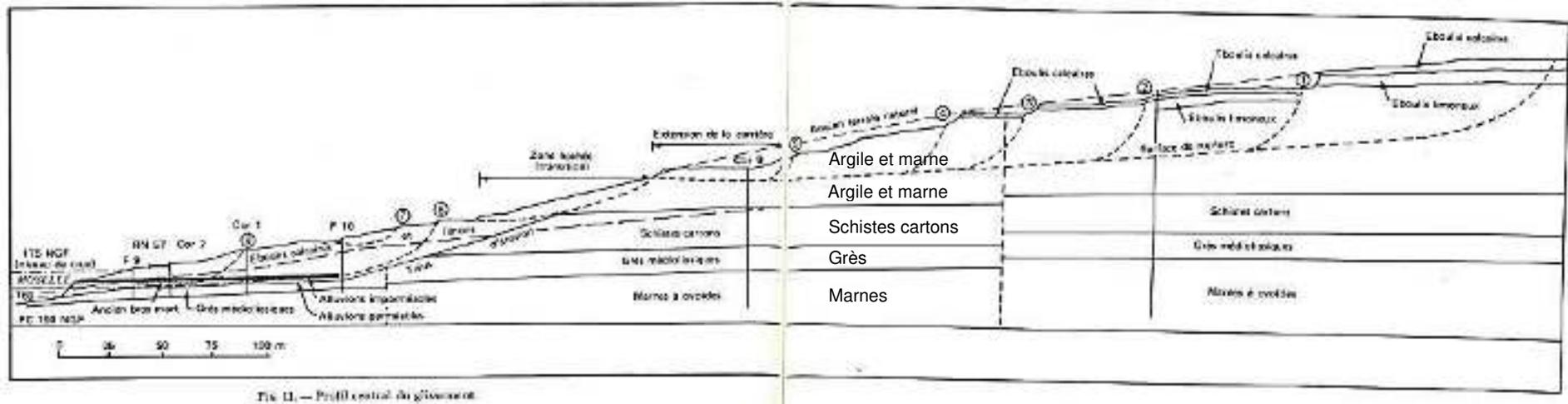


Figure 6. Coupe synthétique du glissement du site de Corny