

Cours n°01 : Brève introduction sur la géotechnique routière



INTRODUCTION GÉNÉRALE



PROJET ROUTIER

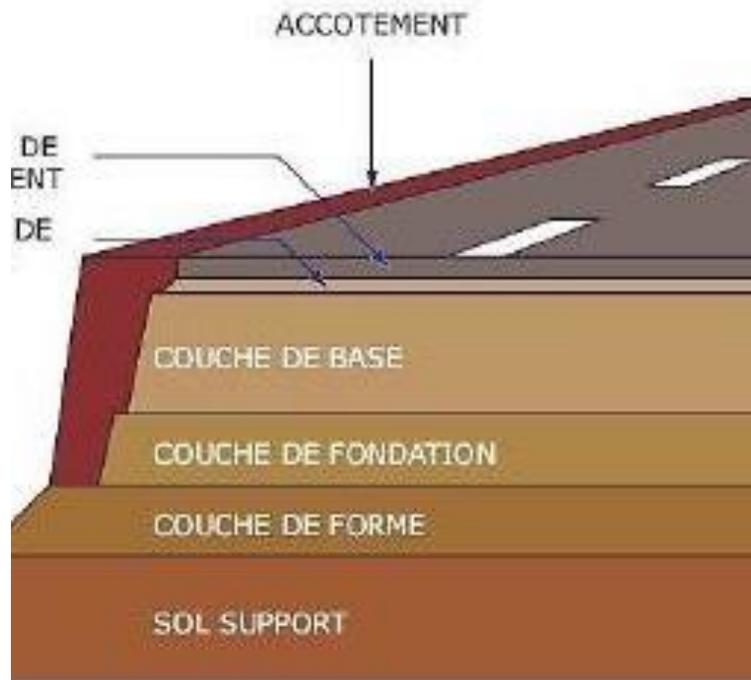


INTRODUCTION GÉNÉRALE

OBJECTIFS DU MODULE GEOTECHNIQUE ROUTIERE.

Donner une formation de base pour pouvoir:

- ✓ Dimensionner une superstructure routière en tenant compte des différents modes de rupture des matériaux de chaussées ;
- ✓ Choisir les matériaux et leurs modes de mise en œuvre appropriés pour chaque type de chaussée
- ✓ Effectuer les essais normalisés de contrôle de la qualité des matériaux routiers ;
- ✓ Etablir le projet d'équipement et de protection d'une route.



DÉFINITION DE LA GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE

La **géotechnique routière** est définie comme étant une science qui étudie d'une part , les sols sur lesquels reposent les chaussées , et d'autre part , les matériaux qui constituent les différentes couches de ces chaussées sans autant oublier la fiabilité des ouvrages construits . Elle représente 95% de la réussite d'un projet de génie civil ou de travaux publique.



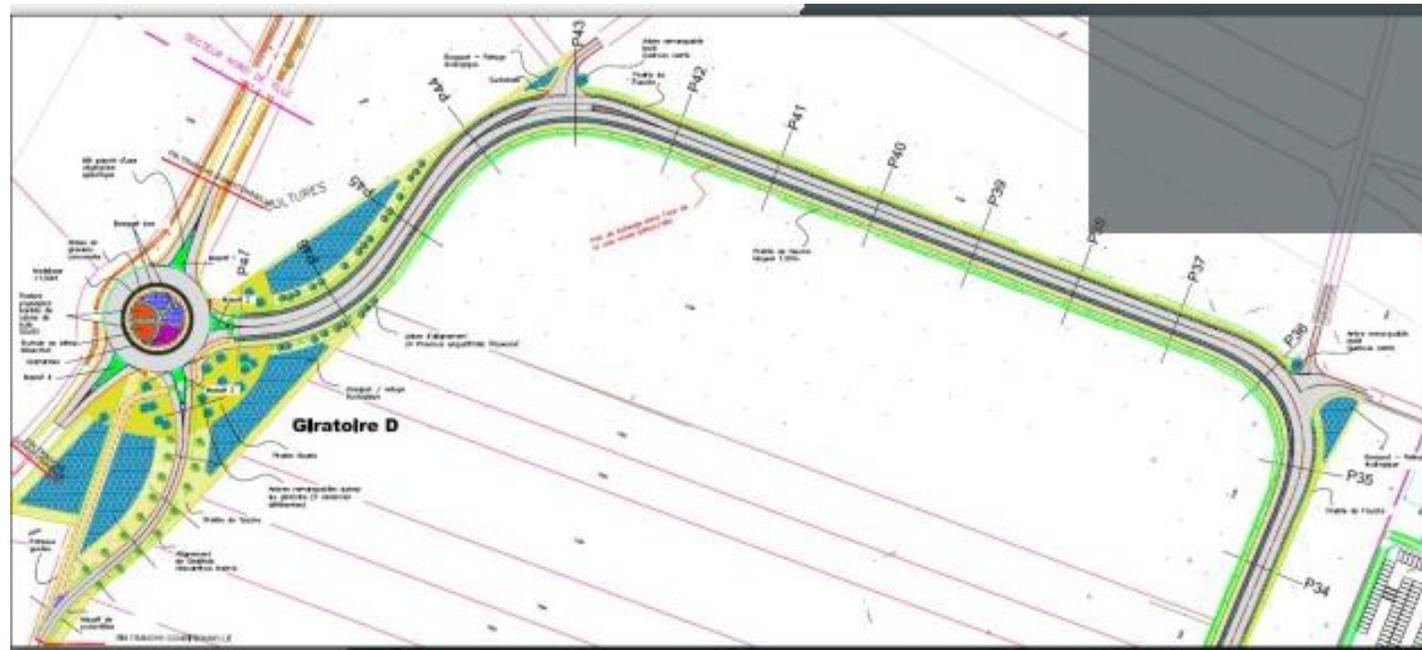
UTILITÉ DE LA GÉOTECHNIQUE ROUTIÈRE DANS LA PHASE DE TERRASSEMENT

Le terrassement est la phase primordiale lors d'exécution d'un projet routier et sa réalisation devra être bien étudié .



L'objectif de l'étude géotechnique est de minimiser les coûts de terrassement par un choix judicieux du tracé et de la ligne rouge qui prend en compte la nature et l'état des sols à terrasser ainsi que leur emplacement.

Cours n°02 : Le tracé routier



Le tracé routier

Introduction

Terminologie

Les représentations du tracé routier

Informations des différents plans

Principes géométriques des tracés routiers

Les carrefours giratoires

Introduction



Documents de référence :

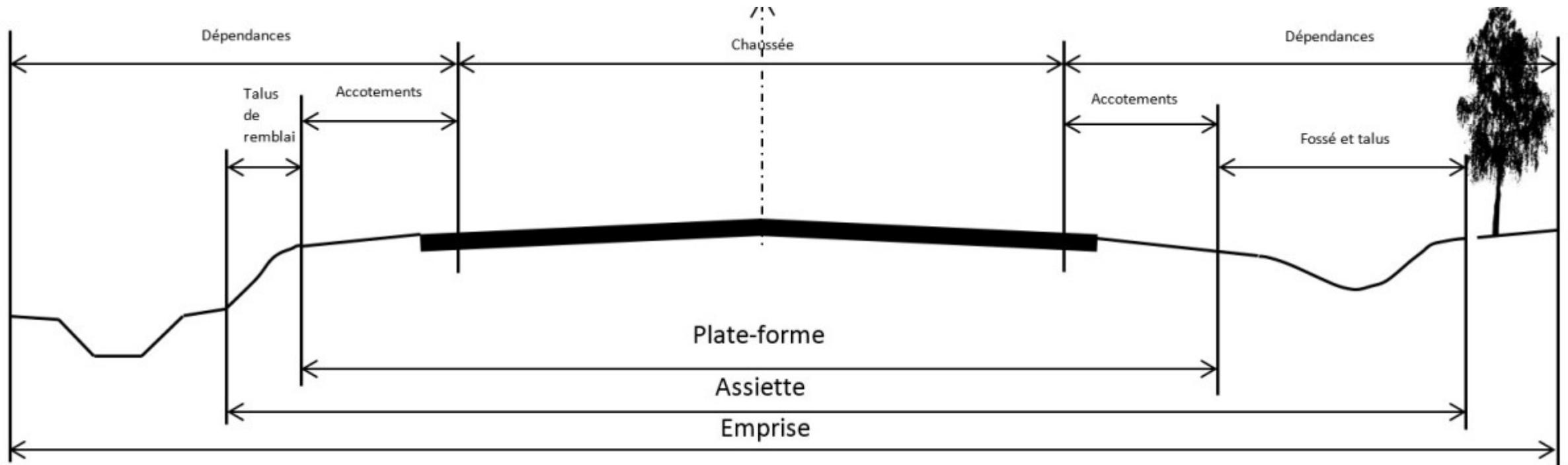
- Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison - Circulaire du 12 décembre 2000
- Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines - CERTU Mars 2009
- Recommandations Techniques pour la Conception Générale et la Géométrie de la Route - Aménagement des routes principales - Guide technique Août 1994 - SETRA
- Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes - Collection les fondamentaux - SETRA
- Aménagement des carrefours interurbains sur les routes principales - Carrefours plans - Décembre 1998 - SETRA
- Référentiels : voies structurantes d'agglomération

Terminologie

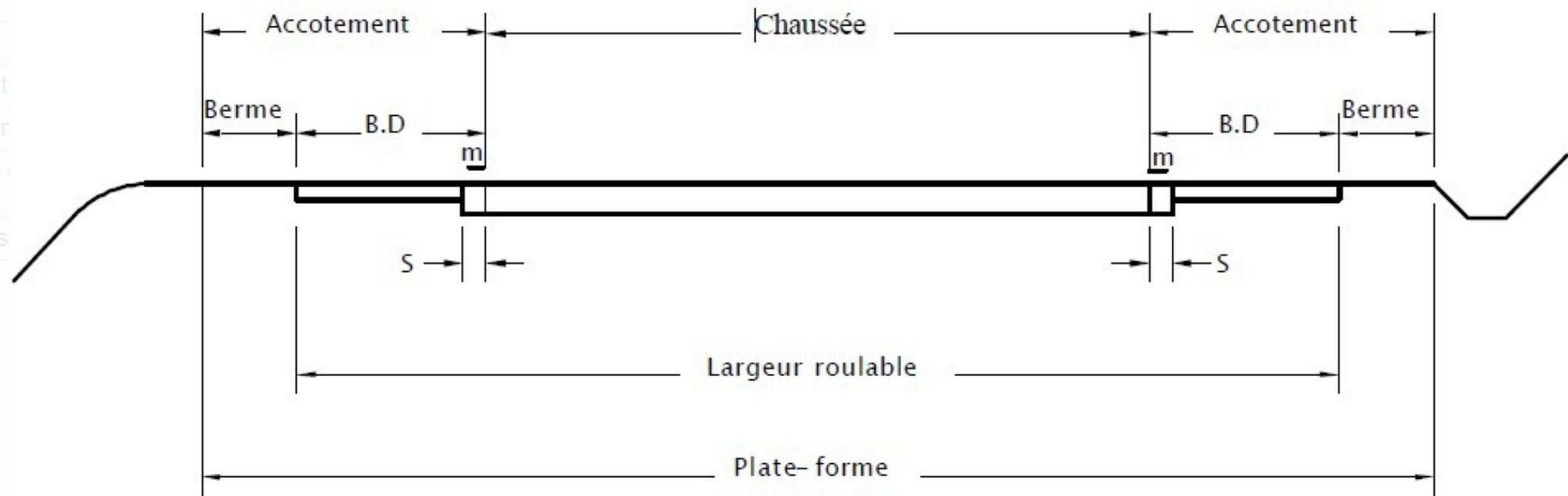


 **Définition**

La terminologie utilisée pour définir la géométrie routière varie selon le type d'infrastructure.



Terminologie



Pour les routes à chaussées séparées, on intègre un terre plein central (T.P.C.) entre les deux chaussées.

Chaussée

Surface revêtue dédiée à la circulation automobile, piétonne ou de véhicules à deux roues.

Bande dérasée

Aussi nommée bande d'arrêt.

constituée d'une sur-largeur de chaussée supportant le marquage de rive et d'une partie stabilisée ou revêtue ;

Ses fonctions principales sont les suivantes :

- permettre la récupération de véhicules déviant de leur trajectoire normale ;
- permettre l'évitement de collisions multi-véhicules en autorisant des manœuvres d'urgence de déport latéral sur l'accotement ;
- permettre l'arrêt d'un véhicule en dehors de la chaussée ;
- faciliter les opérations d'entretien de la chaussée et de ses dépendances.

Berme

zone qui assure la jonction avec le fossé ou le talus non circulaire.

Outre sa fonction normale de transition entre les structures stabilisées et les talus ou cunettes, la berme participe aux dégagements visuels.

Accotement

Zone s'étendant de la limite de chaussée (au sens géométrique) à la limite de plate-forme. Du point de vue structurel, ils peuvent comprendre :

- une bande dérasée ;
- une berme engazonnée jusqu'à la limite de plate-forme.

Dépendances

Surface d'emprise non dédiée à la circulation.

Plate-forme

Surface de la route qui comprend la ou les chaussées, les accotements et éventuellement les terre-pleins centraux.

Assiette

Surface du terrain occupé par la route. Elle comprend la plate-forme et la surface de terrain délimitées par l'intersection des talus de déblai ou de remblai.

Emprise

Surface de terrain appartenant à la collectivité et affectée à la route et ses dépendances.

Les représentations du tracé routier



Les différents plans de représentation

Un tracé routier se caractérise à l'aide de trois types de plan :

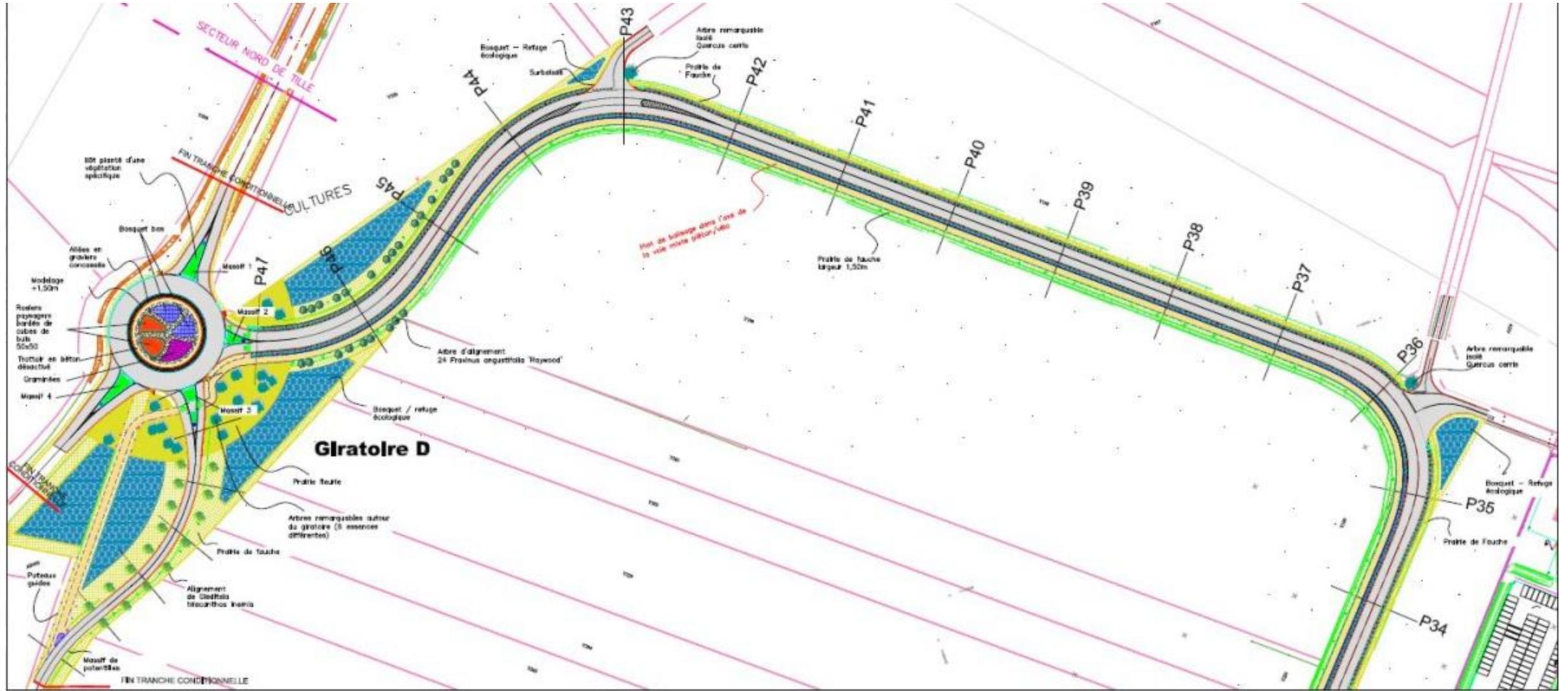
1. Le tracé en plan
2. Le profil en long
3. Les profils en travers

Le tracé en plan est une vue de dessus de la route.

Le tracé en plan d'une route se caractérise par une succession de courbes et d'alignements droits séparés par des raccordements progressifs ou des raccordements circulaires.

Le dimensionnement des rayons du tracé en plan et des dévers correspondant est lié :

- à la dynamique des véhicules
- aux conditions de contact pneu/chaussée
- au confort de l'utilisateur.



Informations des différents plans

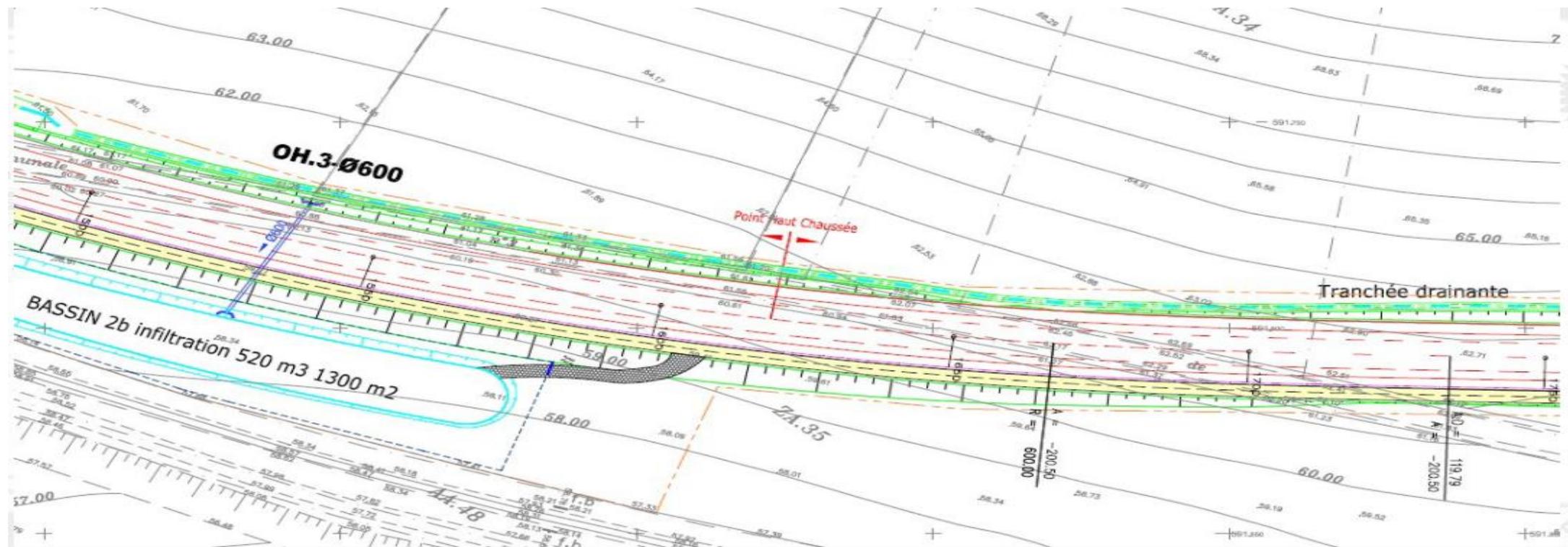


Les différents plans doivent comporter des informations qui serviront :

- à l'implantation de l'ouvrage ;
- à l'établissement des devis quantitatifs ;
- à la préparation du chantier...

Informations du tracé en plan

Le tracé en plan est généralement réalisé sur un fond de relevé topographique.



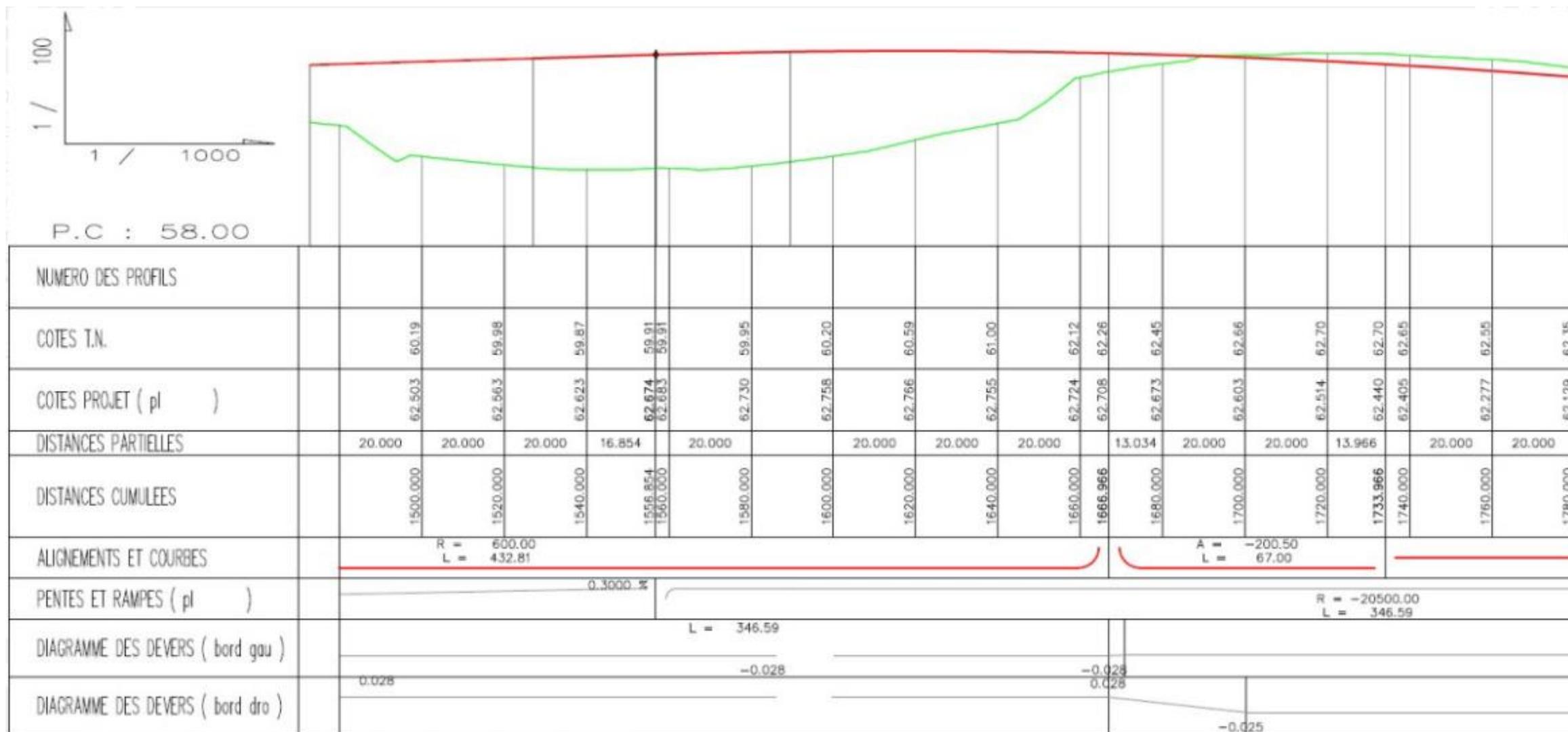
Il permet de visualiser :

- la largeur de la voie ;
- les aménagements de la voie et à son voisinage ;
- les zones en déblais et en remblais ;
- la position des profils en travers.

Les indications de courbes et alignements droits peuvent aussi y figurer.

Informations du profil en long

Les informations portées sur le profil en long doivent permettre de contrôler la bonne coordination avec le tracé en plan, afin d'assurer de bonnes conditions de visibilité et une bonne lisibilité de la chaussée à l'utilisateur.



Variation d'échelles en X et en Z :

Les variations de hauteur sont de quelques mètres voire dizaines de mètres, tandis que les distances représentées peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres. Le rapport d'échelles prend en compte cet écart de grandeurs.

Plan de comparaison :

Il est souvent noté P.C.

Il s'agit d'un décalage d'origine par rapport au N.G.F. afin de rendre lisible les déclivités du terrain et du tracé projeté.

Points singuliers

Il existe deux types de points singuliers :

1. Points singuliers du tracé en plan : extrémités de courbes et d'alignements droits.
2. Points singuliers du profil en long : les extrémités de pentes ou rampes.

Repérage des altitudes et des distances

Les altitudes et distances sont repérées par rapport à la position des profils en travers et des points singuliers du profil en long ou du tracé en plan.

Informations à fournir

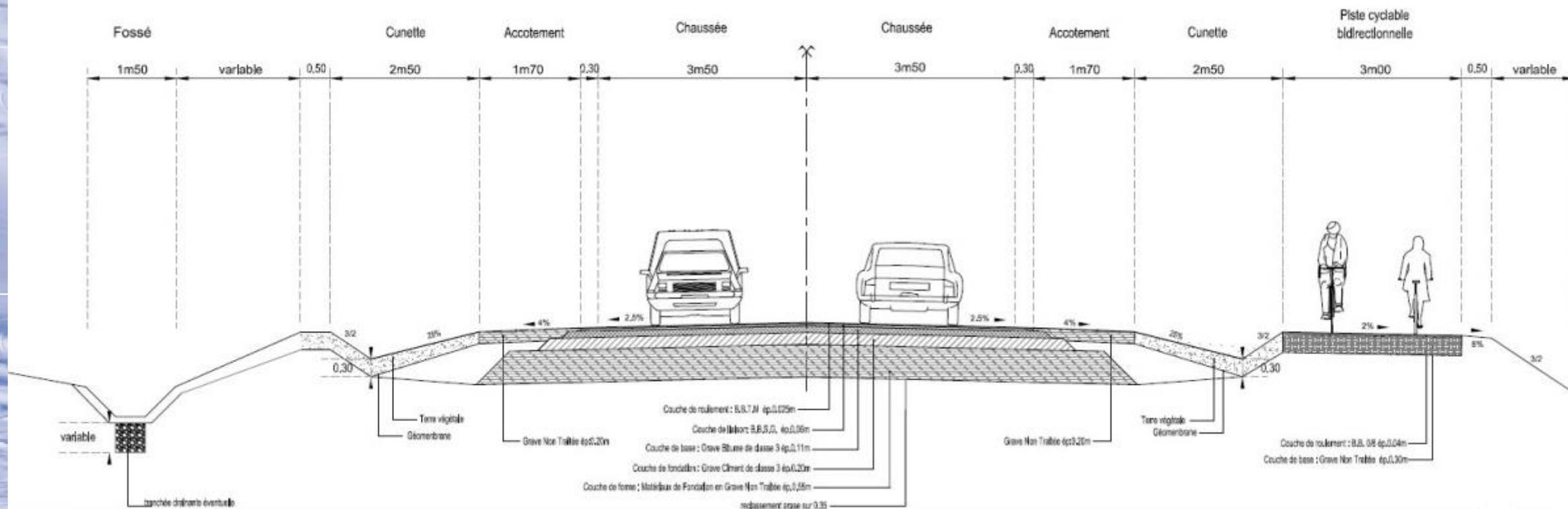
En complément des points singuliers il convient d'indiquer :

- les caractéristiques des courbes en plan (longueur, rayon, coefficient de la clothoïde) ainsi que des alignements droits.
- La longueur des déclivités (pentes et rampes), leur pourcentage ainsi que les caractéristiques des courbes de raccordement (longueur et rayon)

Devers droits et gauches

Lorsque les devers varient en fonction des virages, il convient d'indiquer leur variations sur le profil en long.

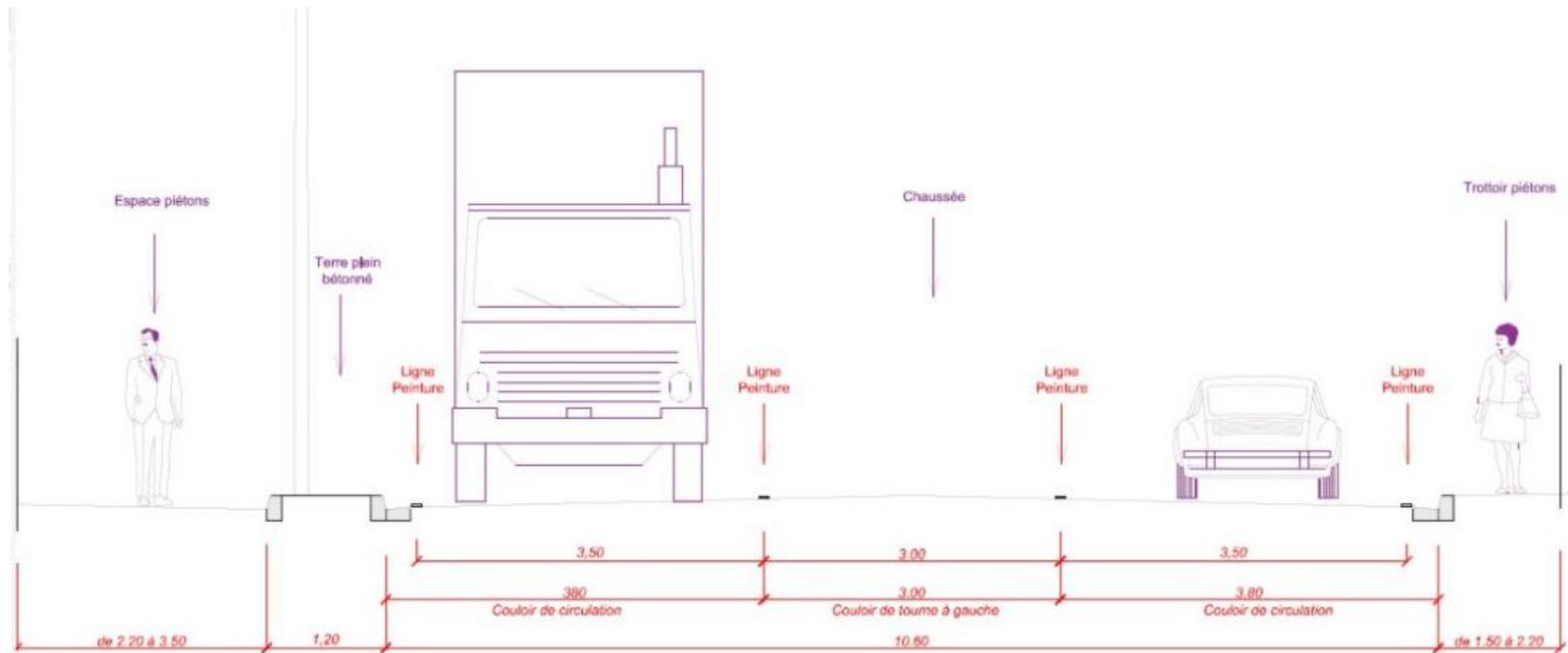
RD.234 section courante en remblai



Les profils en travers type sont généralement établis pour chaque type de structures retenues et au droit :

- des zones en déblai ;
- des zones en remblai ;
- des zones en remblai - déblai.

En cas de méconnaissance de la structure de chaussée, le profil en travers type peut être limité à la géométrie de la chaussée.



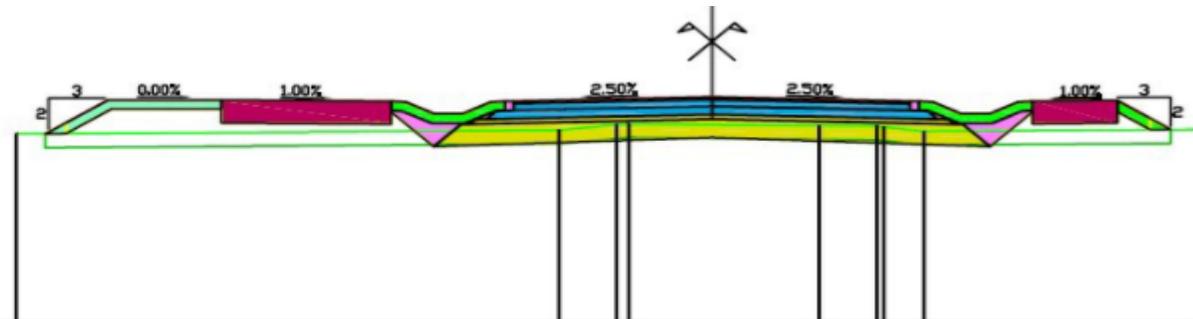
Coupe type

1/5^e

Informations des profils en travers par axe

Ces profils doivent permettre de :

- connaître la structure de la chaussée ;
- connaître la position de cette structure par rapport au terrain naturel afin d'effectuer les calculs de cubatures ;
- connaître les dévers de la chaussée.



PC : 110.00 m

Altitudes TN	114.07				114.16		114.29		114.25		114.24		114.13		114.17																					
Distances à l'axe TN	-12.25				-2.70		-1.47		1.90		2.92		3.74		8.59																					
Distances partielles TN			9.55		1.23		3.37		1.02		0.83		4.84																							
Altitudes Projet	114.07		114.81		114.81		114.76		114.51		114.51		114.76		114.78																					
Distances à l'axe Projet	-11.75		-10.65		-8.65		-5.40		-4.90		-4.40		-3.90		-3.50		0.00		114.87		3.50		3.90		4.40		4.90		5.40		7.15		114.79		114.17	
Distances partielles Projet	1.10		2.00		3.25		0.50		0.50		0.50		0.40		3.50		3.50		0.40		0.50		0.50		0.50		1.75		0.94							

Repérage des altitudes et des distances

Les distances sont repérées par rapport l'axe de la route généralement situé au milieu de la chaussée.

Les altitudes repérées correspondent aux points singulier du T.N. et de la structure de chaussée.

Dévers droits et gauches

Les dévers de chaque partie de la chaussée doivent être renseignés.

Un dévers est une pente transversale de la chaussée. Une route bidirectionnelle comporte en alignement droit un profil en travers en toit.

Le dévers ou pente transversale permet de favoriser l'évacuation des eaux de surface.

Dans les rayons de courbure faible, il contribue à l'équilibre dynamique des véhicules. Toutefois, cette contribution reste limitée et sa valeur est donc plafonnée (généralement à 7%).

Principes géométriques des tracés routiers



La conception géométrique des routes doit permettre d'assurer des conditions de visibilité satisfaisantes tant au droit des points singuliers (virages, sommets...) qu'en section courante.

Le tracé des voies doit être un équilibre entre les besoins en visibilité et les contraintes spécifiques au projet.

Les besoins en visibilité étant fonction de la vitesse des véhicules, les caractéristiques géométriques des routes dépendent principalement de la vocation de la voie.

On se référera utilement, pour une première approche au document : " Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes [pdf] ↴" du SETRA.

Pour une étude plus précise on se référera aux documents techniques relatifs aux types de voie étudiés.

Les profils en travers

Le profil en travers doit mettre en évidence :

- les largeurs des voies, des accotements, des fossés, et de l'emprise ;
- les pentes transversales de la chaussée et des accotements, indispensables pour un bon écoulement des eaux ;
- les pentes de talus qui en conditionnent la stabilité.

Caractéristiques des voies nouvelles

Les dévers

Le dévers ou pente transversale permet de favoriser l'évacuation des eaux de surface[4].

Dans les rayons de courbure faible, il contribue à l'équilibre dynamique des véhicules. Toutefois, cette contribution reste limitée et sa valeur est donc plafonnée (généralement à 7%). Au-delà de cette valeur plafond, d'autres problèmes surviennent et notamment des difficultés constructives.

Ce maximum doit être réduit dans certains cas comme par exemple les zones enneigées ou soumises à verglas fréquent ainsi que les zones où la pente en profil en long est déjà forte.

Les virages

Le dimensionnement des rayons du tracé en plan et des dévers correspondant est lié:

- à la dynamique des véhicules
- aux conditions de contact pneu/chaussée
- au confort de l'usager.

Les paramètres purement dynamiques permettent de définir une valeur minimale de rayon en fonction de la vitesse pratiquée et du dévers et la définition d'un seuil de sécurité. L'étude du comportement des usagers en virage a permis d'identifier une marge supplémentaire " de confort".

Les rampes et pentes

Le code de la voirie routière a imposé que les profils en long et en travers des routes soient établis de manière à permettre l'écoulement des eaux pluviales et l'assainissement de la plate-forme. En conséquence, s'il n'existe généralement pas de valeur minimale pour les déclivités, on s'attachera à assurer un minimum de :

- 0,5 à 1% pour les zones où le dévers est nul afin d'assurer l'évacuation des eaux de surface.
- 0,2 % dans les longues sections en déblai afin d'éviter des sur-profondeurs pour le dispositif longitudinal d'évacuation des eaux pluviales.

Les carrefours giratoires

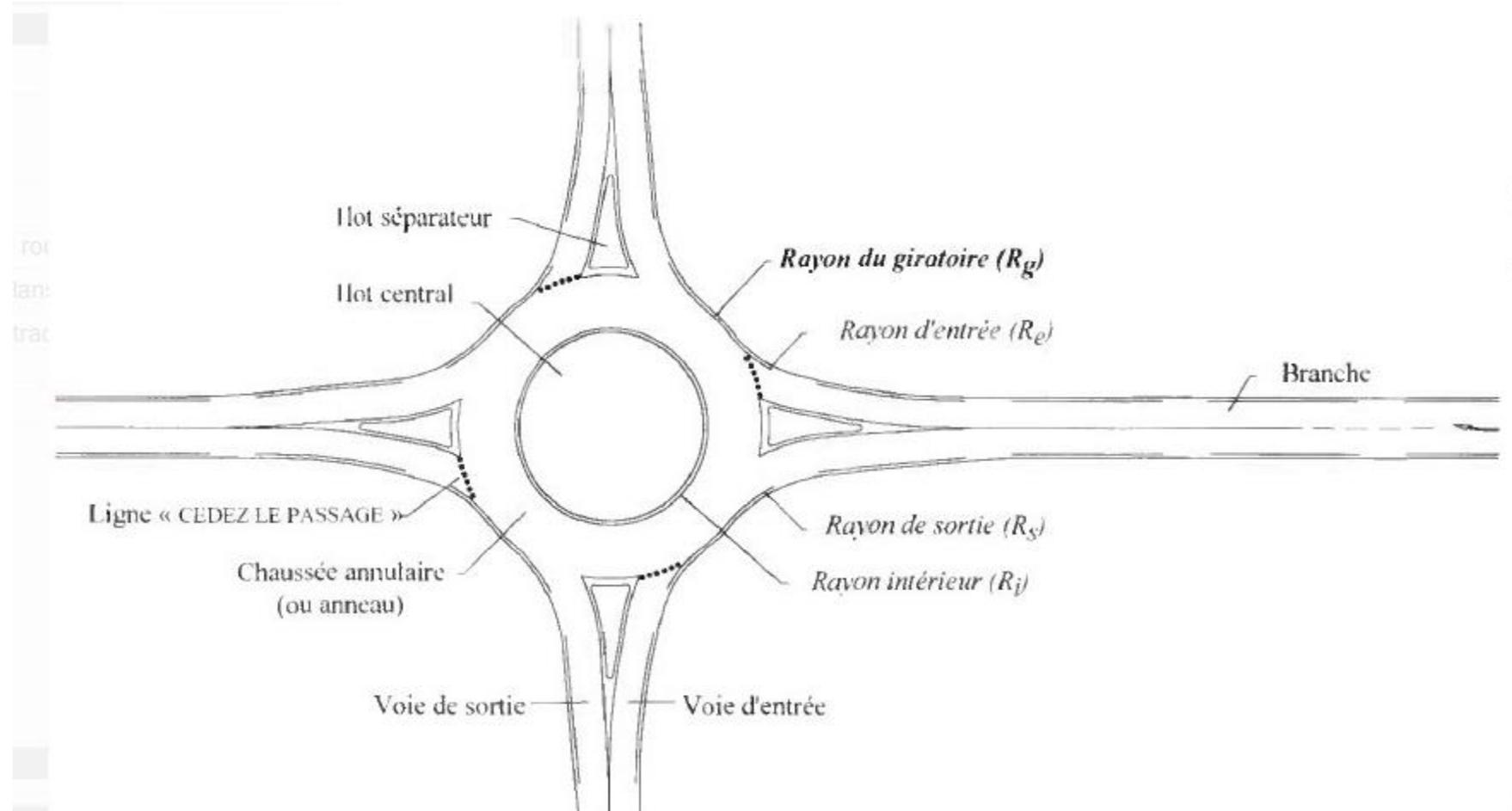


Terminologie

 **Définition**

Un carrefour giratoire comporte un îlot central en principe circulaire, de dimensions suffisantes pour permettre la giration des poids lourds.

Principaux éléments et paramètres d'un carrefour giratoire



Caractéristiques dimensionnelles

Rayon de l'îlot central : R_g

Il n'y a pas de valeur maximale recommandable pour le rayon de l'îlot central, mais le prévoir trop grand est inutile.

Pendant, un îlot central d'une dizaine de mètres de rayon interne est généralement souhaitable en présence d'un trafic de semi-remorques significatif.

On peut recommander les dimensions suivantes :

- Sur une route à une seule chaussée :
 - un rayon extérieur d'anneau (R_g) compris entre 15 et 25 m est généralement conseillé ; un rayon (R_g) supérieur ou égal à 15 m offre des conditions de giration suffisantes aux poids lourds,
 - sur des voiries secondaires dont le trafic lourd est négligeable, un rayon (R_g) compris entre 12 et 15 m est envisageable ; un rayon extérieur d'anneau (R_g) inférieur à 12 m est toujours déconseillé en raison des difficultés de franchissement que rencontrent alors les poids lourds ;
 - sur les routes d'une certaine importance (a fortiori sur les routes à trois voies), lorsque les contraintes du projet le permettent, une valeur de 20 m environ est à rechercher ;
 - un nombre élevé de branches (> 4) peut éventuellement conduire à prévoir des rayons de 20 à 25 m.
- Sur une route à deux chaussées :
un rayon (R_g) de 25 m (guère plus) est généralement à conseiller.

Largeur de la chaussée annulaire

Dans tous les cas, la largeur de la chaussée annulaire ne peut être inférieure à 6 m.

Dévers de la chaussée

La chaussée annulaire doit présenter un dévers uniforme de 1,5 à 2%. Sa pente est dirigée vers l'extérieur du carrefour pour trois raisons principales ; améliorer la perception de la chaussée annulaire, éviter la rupture de pentes sur les voies d'entrée et de sortie (facteur d'inconfort, voire d'instabilité pour certains véhicules), faciliter la gestion de l'écoulement des eaux de surface.

Ces dispositions ne s'appliquent pas au cas particulier d'un giratoire implanté sur une route de forte déclivité — situation par ailleurs à éviter. Toutefois, en

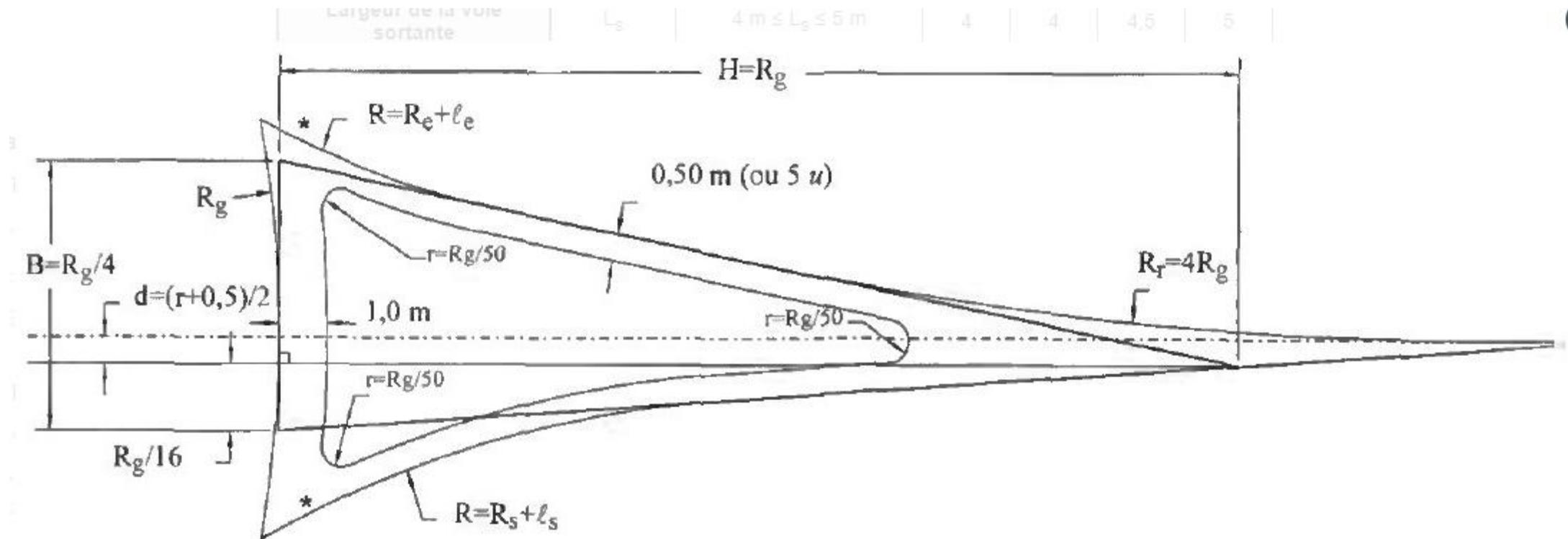
aucun point de l'anneau, la pente transversale ne doit excéder 3%.

Tableau synoptique des caractéristiques géométrique d'un giratoire

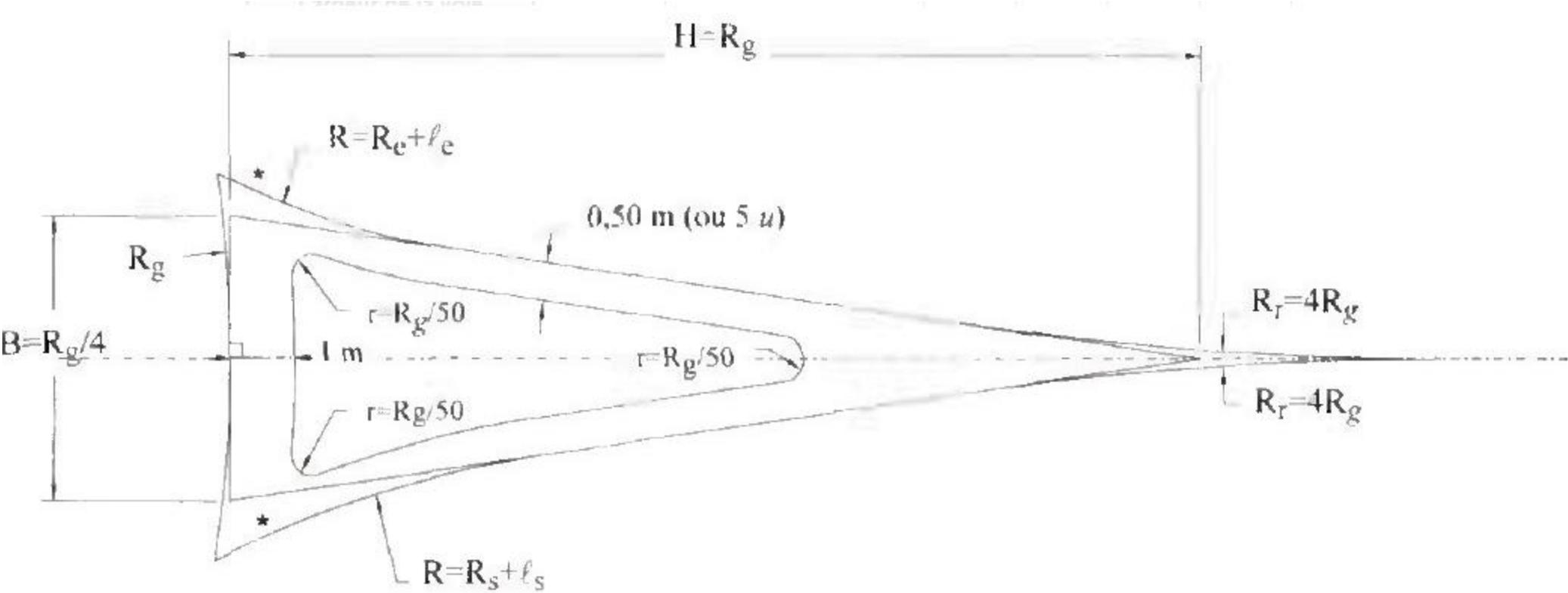
	Notations	Paramétrage	Valeurs courantes (en m)			
Rayon du giratoire	R_g	$12 \text{ m} \leq R_g \leq 25 \text{ m}$	$R_g = 12$	$R_g = 15$	$R_g = 20$	$R_g = 25$
Largeur de l'anneau	L_a	$6 \text{ m} \leq L_a \leq 9 \text{ m}$	7	7	7	8
Sur-largeur franchissable	sL_f	1,5 m si $R \leq 15 \text{ m}$	1,5	1,5		
Rayon intérieur	R_i	$R_g - L_a - sL_f$	3,5	6,5	13	18
Rayon d'entrée*	R_e	$10 \text{ m} \leq R_g \leq 15 \text{ m}$ et $\leq R_g$	12	15	15	15
Largeur de la voie entrante	L_e	$L_e = 4 \text{ m}$	4	4	4	4
Rayon de sortie*	R_s	$15 \text{ m} \leq R_s \leq 30 \text{ m}$ et $> R_i$	15	20	20	20
Largeur de la voie sortante	L_s	$4 \text{ m} \leq L_s \leq 5 \text{ m}$	4	4	4,5	5
Rayon de raccordement	R_r	$R_r = 4 R_g$	48	60	80	100

Les îlots séparateurs

Construction des îlots séparateurs sur les branches des giratoires de rayon $R_g \geq 5$ m

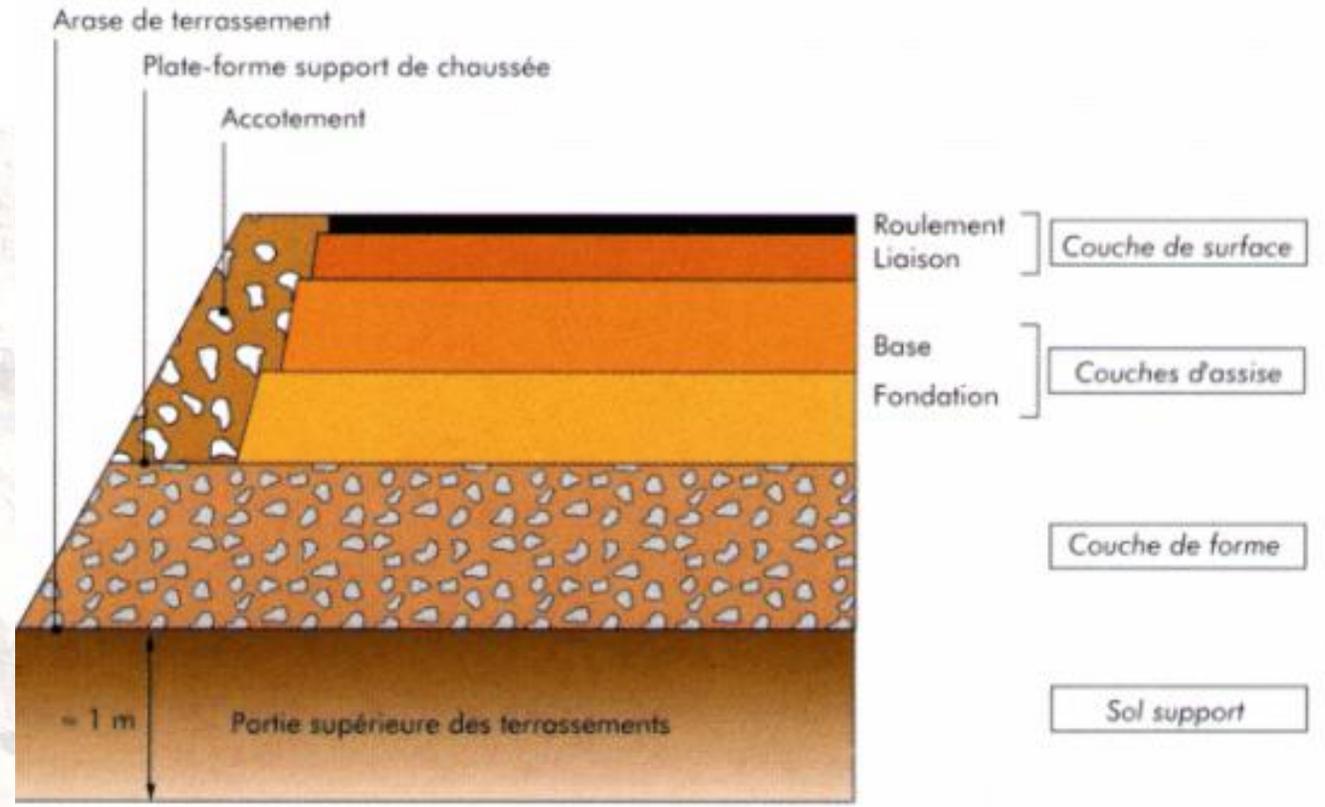


Construction des îlots séparateurs sur les branches des giratoires de rayon $R_g < 15\text{ m}$



Cours n°03 : Comprendre les structures de chaussée

Section des terrassements



Objectifs

Ce module doit permettre de :

- comprendre les principes de fonctionnement mécanique des structures routières ;
- connaître les principes de dimensionnement français des structures routières ;
- justifier un choix de structure routière.

En se limitant aux structures définies au catalogue des structures 1998, sans détailler les calculs d'optimisation des structures.

Introduction

Connaissances	Limites de connaissances
Corps de chaussées (assise) <ul style="list-style-type: none">● Constituants et fonctions● Type de voie (V.R.S., V.R.N.S...)● Dimensionnement des structures (classe de trafic, classe d'arase, classe de plateforme,...)● Catalogues de structures● Vérification au gel-dégel	Justifier le type de voie. Choisir une ou plusieurs structures de chaussée. Définir graphiquement les profils en travers type.
Couches de surface <ul style="list-style-type: none">● Couche de liaison● Couche de roulement	Comparer et analyser différentes couches de roulement (bruit, adhérence, orniéage,...) et de liaison (étanchéité, cisaillement transversal,...) Choisir un type de couche de surface en fonction de critères techniques et économiques donnés

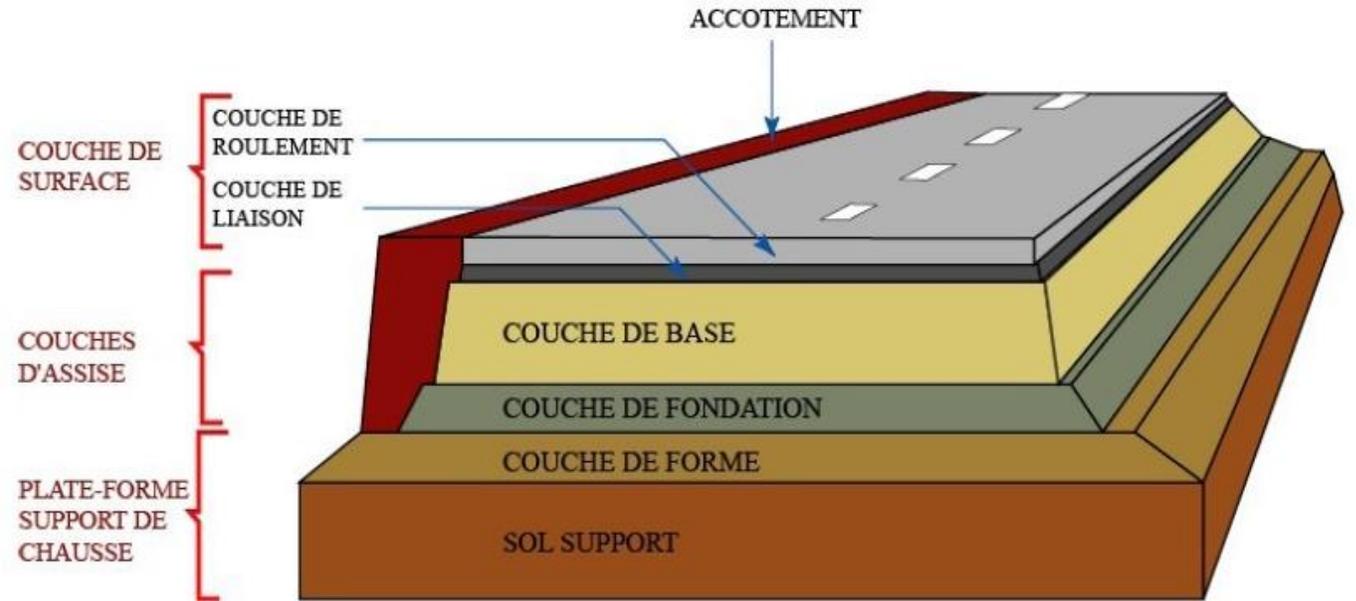
Éléments du référentiel BTS TP

Ce module a pour but de dimensionner les structures routières.

Principe des structures routières

Une structure routière se décompose en trois couches :

- 1) La plate-forme support de chaussée
- 2) Les couches d'assise
- 3) La couche de surface



Particularité française

Dans de nombreux pays, la notion de structure routière est limitée aux couches d'assise et de surface. La France a introduit en plus la notion de couche de forme.

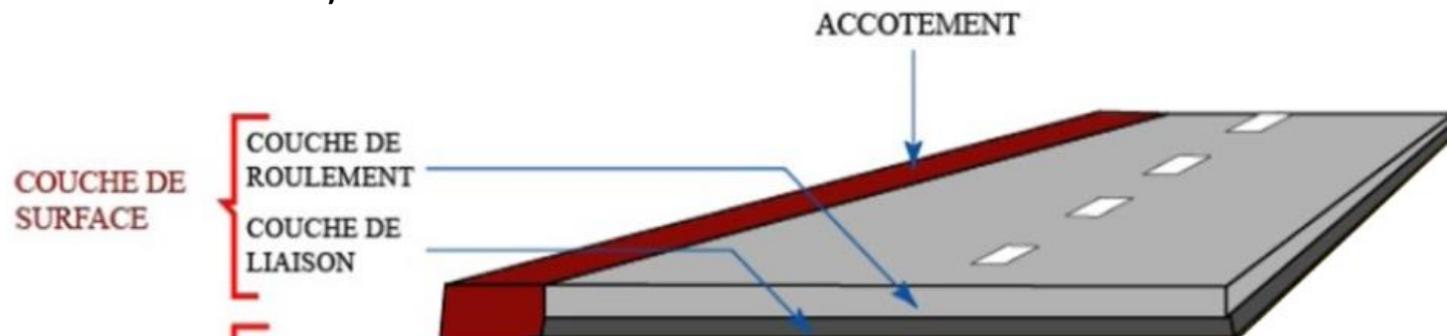
Il existe donc parfois une ambiguïté, dans la littérature, sur le sens à donner à "structure de chaussée".

Fonctions d'une couche de surface

La couche de surface est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat.

Elle peut être composée de :

- une couche de liaison aux couches d'assise ;
- la couche de roulement.



Pour répondre aux besoins des usagers et du voisinage, elle doit avoir les qualités suivantes :

- une forte adhérence,
- une bonne drainabilité,
- un bon niveau d'uni,
- une réduction du bruit de roulement des véhicules.

Selon les besoins, on utilise soit la technique des enrobés épais, soit celle des enrobés minces ou bien celle des enrobés très minces voire ultra minces.

Pendant longtemps on a utilisé pour cette couche de surface la technique des enduits superficiels. Cette technique continue à être utilisée pour les routes à faible trafic.

Fonctions d'une couche d'assise

La couche d'assise doit permettre "d'asseoir" le couche de surface à court et à long terme.



A court terme, lors de la construction de la chaussée :

- en constituant un support bien nivelé,
- de portance suffisante,
- en servant de couche de roulement provisoire.

A long terme, lorsque la chaussée est construite :

- en assurant la protection thermique de la plate forme,
- en donnant à la chaussée une résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic.

Fonctions d'une plate-forme

Une plate-forme support de chaussée est composée de :

- un sol support (d'origine ou issu d'un remblai) ;
- une couche de forme éventuelle.



Les plates-formes ont des fonctions différentes à court et à long terme :

Fonctions à court terme (lors de la réalisation du chantier)

Les plates-formes doivent permettre :

- un niveau de traficabilité qui permette la circulation des engins,
- un compactage efficace de la couche de fondation,
- de satisfaire aux exigences de nivellement de la plate-forme elle-même,
- d'assurer la protection de l'arase supérieure des terrassement vis à vis des agents climatiques en attente de la réalisation de la chaussée.

Fonctions à long terme (lors de l'exploitation de la chaussée)

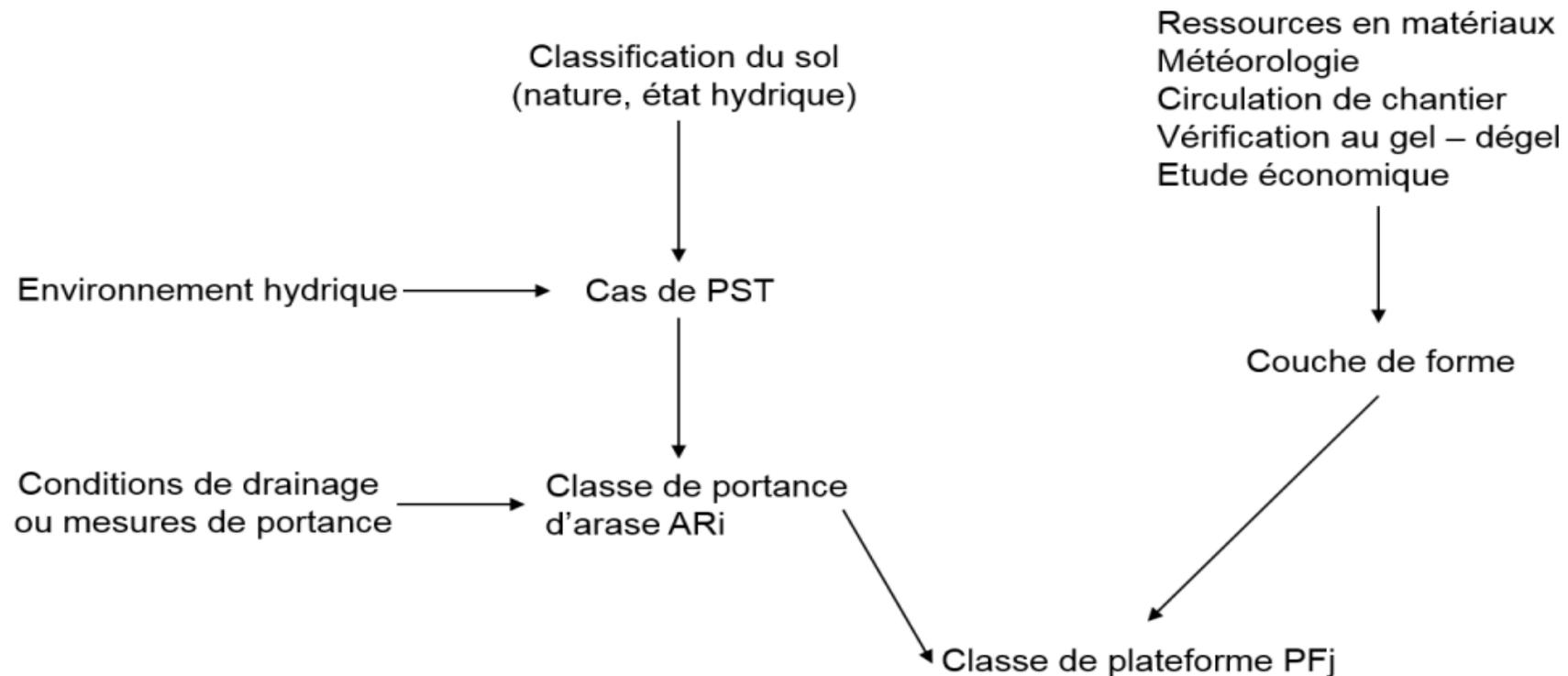
Les plates-formes doivent permettre :

- l'homogénéisation de la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante,
- le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols supports sensibles à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée,
- une amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme - structure de chaussée,
- la protection thermique des sols supports gélifs, une contribution éventuelle au drainage de la chaussée...

Principe de classification des plates-formes

La classification des plates-formes est basée sur deux critères :

- A court terme : la classification du sol support ainsi que son état hydrique ;
- A long terme : la capacité portante ou, à défaut de mesure, les conditions de drainage de ce sol.



Les classes de plate-forme

Classe de PST et d'arase

Le classement suivant le *GTR* du sol constituant la plate-forme et la connaissance de son état hydrique au moment des travaux permettent de définir 7 cas de *PST* : PST0 à PST6.

La mesure de portance du sol ou les conditions de drainage permettent de définir 5 classes d'arase : AR0 à AR 7

Cas de PST	Schema	Description	Classe de l'arase	Commentaires
P.S.T. n°0		Sols A, U, S, S, S, C, C, se trouvent dans un état hydrique (H). Contexte Zonage tourbeuses, marécageuses ou inondables. PST dans la partie supérieure d'une couche ou au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.	AR0	La solution de franchissement de ces zones est de renforcer par une opération de tassement (grange, substitutum) et/ou de drainage (tranchées profondes, radouboirs de la nappe...) de manière à pouvoir réaliser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1		Sols Matériau des classes A, U, S, S, S, C, C, R ₁ , R ₂ , R ₃ , certains matériaux C ₁ , R ₁ , R ₂ , R ₃ dans un état hydrique (H). Contexte PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'améliorer à long terme (B).	AR1	Dans ce cas de PST, il convient : - soit de procéder à une granulation de manière jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique adaptée. On est retenu au cas de PST 2, si ce n'est la contrainte ; - soit d'installer une couche de forme en matériaux granulaires mesurée à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction et l'incorporation de granulés anticorrosion) à l'interface PST - couche de forme.
P.S.T. n°2		Sols Matériau des classes A, U, S, S, S, C, C, R ₁ , R ₂ , R ₃ dans un état hydrique (H). Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une renouveau de la nappe (B).	AR1	Si l'on peut réaliser un radouboir de la nappe à une profondeur suffisante, on se ramène au cas de PST 2.
P.S.T. n°3		Sols Même matériau que dans le cas de PST 2. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).	AR1 AR2	En l'absence de mesure de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase, même situation que celle décrite dans le cas PST 2.
P.S.T. n°4		Sols Même matériau qu'en PST 1 sous réserve que la granulation permette leur traitement. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau (sensible ou rapportés en bord de défilé hors nappe) améliorés à l'heure de la mise en œuvre hydraulique selon une technique "ombé" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 m. L'action du traitement est cependant durable.	AR2	La portance de l'arase peut être localement élevée mais la dispersion s'explique par un classement inférieur. Le dispositif de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arase mesurées à court terme (après prise de terre).
P.S.T. n°5		Sols S, U, C, et certains matériaux restants de la classe R ₁ . Contexte PST en matériaux solides fins incompressibles à l'eau, fins nappe, pour des problèmes de subsidence.	AR2 AR3	La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de l'humidité du matériau. Classement en AR2 si l'humidité (V) de l'arase est supérieure à 100 MPa. Les valeurs de portance à long terme sont élevées, assimilées aux valeurs mesurées à court terme.
P.S.T. n°6		Sols Matériau des classes U, R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ , R ₅ , R ₆ , R ₇ , R ₈ , R ₉ ainsi que certains matériaux C ₁ , R ₁ , R ₂ , R ₃ et R ₄ . Contexte PST en matériaux granuleux ou rocheux incompressibles/insensibles aux problèmes de ruissellement et/ou de subsidence.	AR3 AR4	Classement en AR3 si V < 100 MPa et en AR4 si V > 100 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme ne s'explique que par les exigences à court terme (inondation et subsidence) et peut être évitée à une couche de fin réglage.

(A) Comportement de la PST à la mise en œuvre de la couche de forme
(B) Situation pendant la "phase de construction" de la chaussée.

Module MPa	en	20	50	120	200	
Classe d'arase		AR0	AR1	AR2	AR3	AR4

Classe de portance à long terme

La méthode française de dimensionnement

R.G.R.A. : Revue générale des routes et de l'aménagement

Principe général

(d'après [R.G.R.A.](#) N°823 décembre 2003)

La méthode française est une méthode rationnelle en deux étapes.

Étape 1

La première étape, de type mécanique, consiste à vérifier par le calcul qu'une structure choisie a priori suffit à supporter le trafic qui devra circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie sur un sol donné.

Étape 2

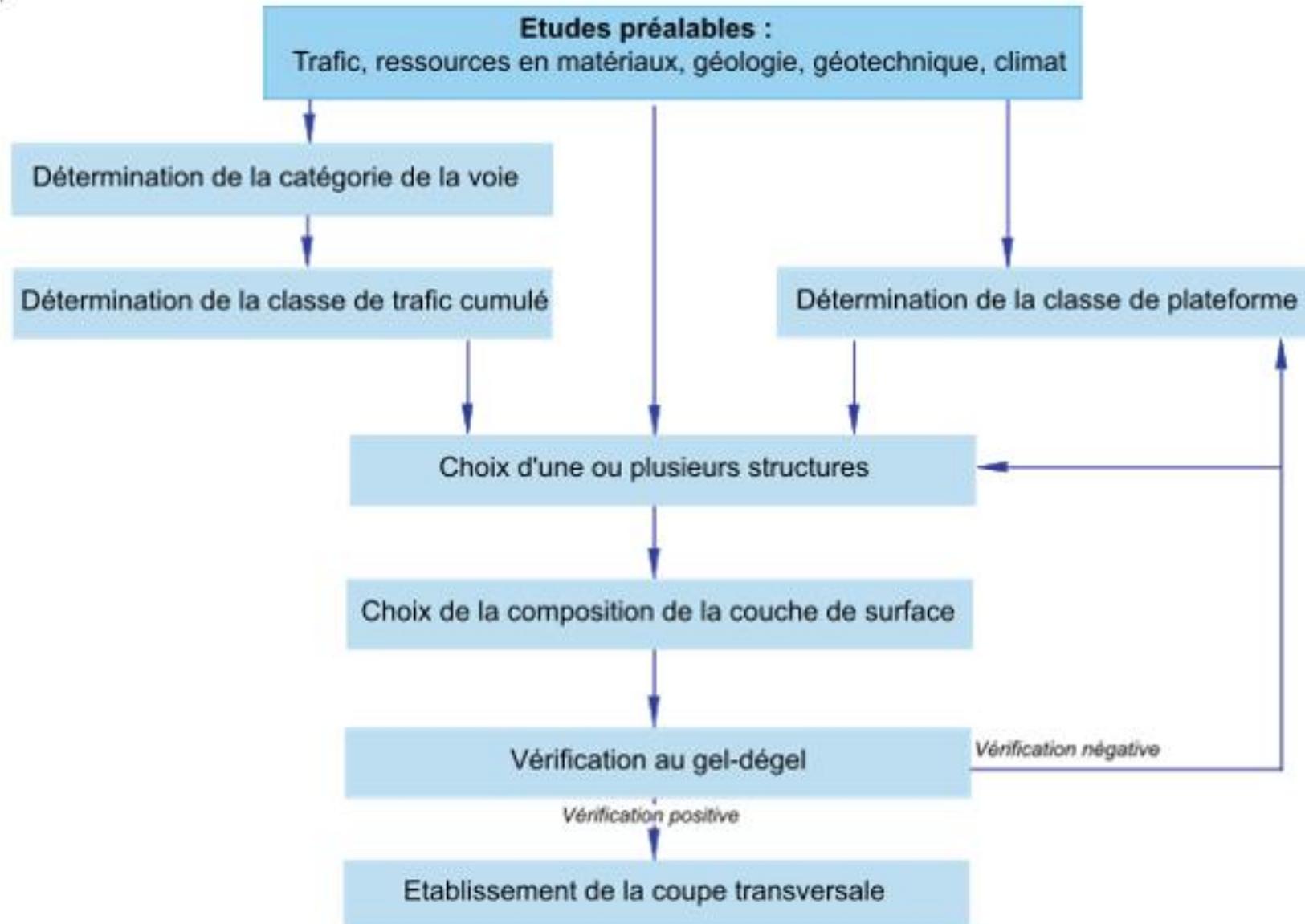
La seconde étape consiste à vérifier que cette structure issue du calcul mécanique peut supporter sans désordre majeur un cycle de gel/dégel.

Critères de dimensionnement

La méthode de dimensionnement prend donc en considération les facteurs suivants :

- la vocation de la voie,
- le trafic,
- la durée de service,
- l'environnement (données climatiques),
- la plate-forme support de chaussée,
- les matériaux de chaussée,
- la qualité de la réalisation.

Organigramme de dimensionnement des structures routières



La classification du trafic routier



Relation entre trafic et nombre de voies



Classes de trafic routier



Exemple de calcul de classe de trafic (D'après catalogue des structures 98)



Calcul de classe de trafic

Relation entre trafic et nombre de voies

Il n'existe pas de relation directe entre le nombre de voies d'une chaussée et le trafic. pour autant les études statistiques ont permis de dégager les valeurs suivantes :

pour le trafic journalier

Type de voie	Seuil de gêne	Seuil de saturation
2 voies	8 500	15 000
3 voies	12 000	20 000
2 x 2 voies	25 000	45 000
2 x 3 voies	40 000	65 000

pour le trafic horaire

Seuil	Trafic en UVP / H pour les 2 sens
Seuil de gêne	750
Seuil de circulation dense	1 100
Seuil de risque de congestion	2 000

La concentration au maximum de débit, proche de 2000 U.V.P. / heure est d'environ 30 véhicules par km et la vitesse moyenne de l'ordre de 60 km / h.

Classes de trafic routier

Principe de classes

Le classement routier tient compte de deux facteurs :

- Le nombre total d'essieux de 13 T ayant circulé sur la voie durant sa durée de vie estimée ;
- Le type de voirie concernée qui détermine la durée de vie de la voie :
 - ➔ V.R.S. voirie du réseau structurant → durée de vie de 30 ans
 - ➔ V.R.N.S. voirie du réseau non structurant → durée de vie de 20 ans

Ce type de classement est valable pour le réseau national, mais le principe peut être étendue à d'autres types de voirie avec d'autres durées de vie prises en compte.

VRS	TC1 ₃₀	TC2 ₃₀	TC3 ₃₀	TC4 ₃₀	TC5 ₃₀	TC6 ₃₀	TC7 ₃₀	TC8 ₃₀
	0.5	1	3	6	14	38	94	
VRNS	TC1 ₂₀	TC2 ₂₀	TC3 ₂₀	TC4 ₂₀	TC5 ₂₀	TC6 ₂₀	TC7 ₂₀	TC8 ₂₀
	0.2	0.5	1.5	2.5	6.5	17.5	43.5	

Tableau des classes de trafics cumulés en millions de poids lourds

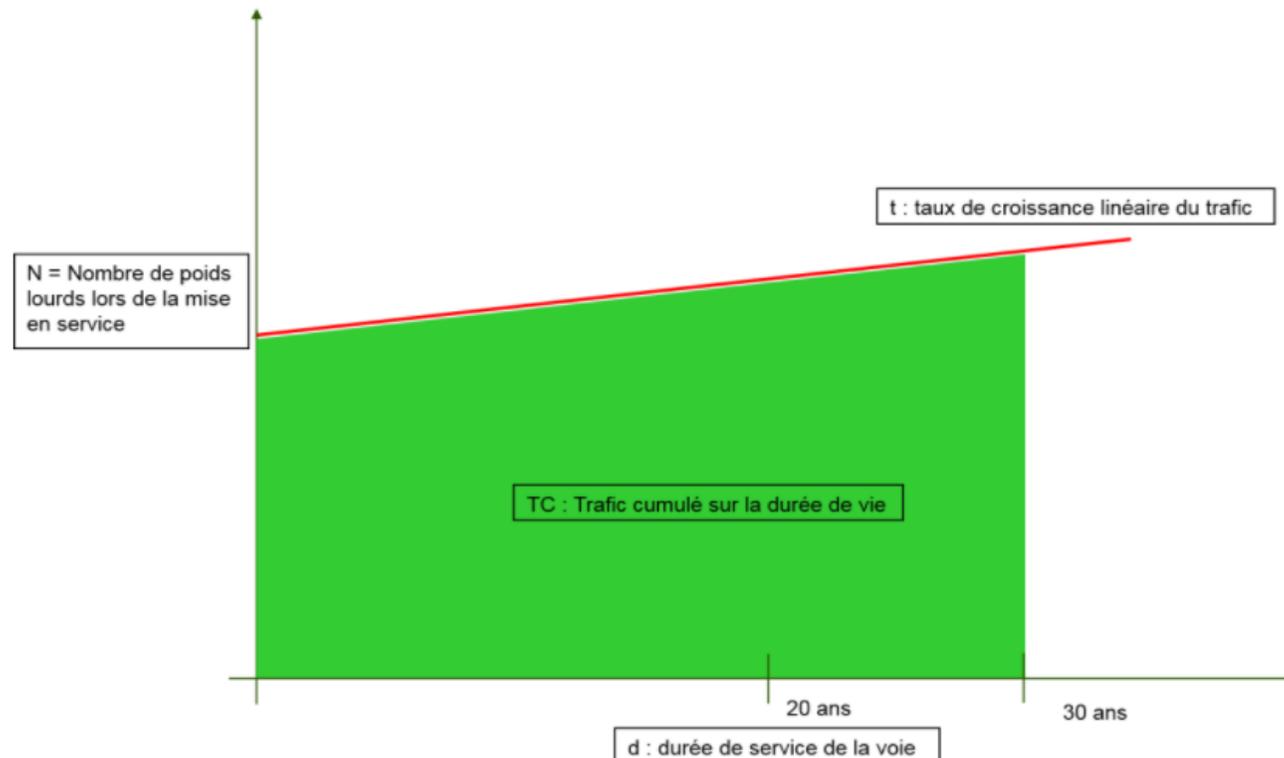
Principe de calcul de la classe de trafic

Le Trafic cumulé est calculé à partir de la formule suivante :

$$TC = 365 * TMJA * \left[d + \frac{t * d * (d - 1)}{2} \right]$$

TMJA : Trafic moyen journalier annualisé

On suppose que le trafic croît linéairement dans le temps comme représenté dans le schéma suivant.



Calcul du TMJA

Le trafic moyen journalier annualisé est déterminé en fonction de plusieurs facteurs :

- le comptage des véhicules circulant sur la voie → N : nombre de poids lourds ;
- le type de voie → coefficient de répartition transversal de la circulation r ;
- le type de structure routière prévisible → coefficient d'agressivité moyen CAM.

Coefficient de répartition r

Type de chaussée	r
2 fois 3 voies	0,8
2 fois 2 voies	0,9
Route unidirectionnelle	1
Route bidirectionnelle de largeur ≥ 6 m	1
Route bidirectionnelle de largeur 5 à 6 m	1,5
Route bidirectionnelle de largeur < 5 m	2

Coefficient de répartition transversal r

Coefficient d'agressivité moyen CAM

A défaut d'information on pourra prendre un coefficient CAM de 1

Type de structure	Catégorie de voie	
	VRS	VRNS
Bitumineuse épaisse*	0,8	0,5
GNT/GNT	sans objet	1
Mixtes	1,2	0,75
Semi-rigides et béton	1,3	0,8

Classe de TMJA

Il existe aussi un classement du trafic journalier qui permet faute de comptage d'effectuer le calcul e trafic cumulé.

Classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0		T5		T Exp
	T5-	T5+	T4-	T4+	T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	T5-	T5+	
M.J.A.	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	7000	

Cas des voiries à faibles trafic

Pour les TMJA faibles et donc pour des classes de trafic de type TC1, certains proposent d'appliquer aussi un coefficient CAM :

Chaussée à Faible Trafic				
Classe	T5	T4	T3-	T3+
CAM	0,4	0,5	0,7	0,8

Exemple de calcul de classe de trafic (D'après catalogue des structures 98)

Données d'étude

Trafic total : 15000 véhicules/jour avec un taux de 10% de poids lourds

Taux de croissance linéaire du trafic : 3%

Type de voirie : VRS

Type de chaussée : 2 x 2 voies

Coefficient d'agressivité CAM : 0,8

Calcul de la classe de trafic

Calcul du TMJA

N : nombre de poids lourds : $15000 * 0,1 / 2 = 750$ (il convient de faire le calcul pour un sens de circulation

r : 0,9

CAM : 0,8

TMJA = $750 * 0,9 * 0,8 = 540$

Soit une classe T1

Classe de trafic cumulé

TC = $365 * 540 * (30 + (0,03 * 30 * 29 / 2)) = 8485155$ PL

Soit une classe TC5₃₀

Calcul de classe de trafic

Le projet concerne la construction d'une voirie de type VRS

Le trafic routier est estimé à 10000 UVP/j en 2010

Le trafic poids lourds est de 200 PL/J en 2010 et par sens

Le taux de croissance du trafic est supposé de 1% par an.

La voirie est une 2x2 voies

Coefficient de répartition



Déterminer le coefficient de répartition r

Coefficient d'agressivité moyen



Donner le coefficient CAM

Calcul du TMJA TMJA



Calculer le TMJA de la voie

Classe de TMJA



Donner la classe de trafic journalier de la voie

Calcul du trafic cumulé



Donner la valeur du trafic cumulé de la voie

Classe de trafic de la voie



Donner la classe de trafic de la voie

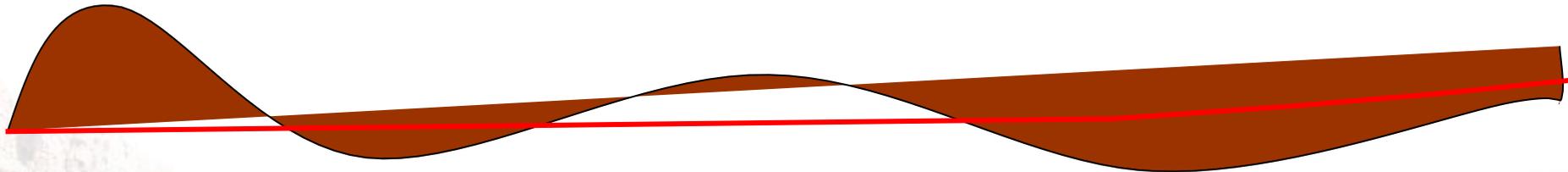
Cours n°04 : Les terrassements

- L'objectif de ce cours est de présenter les terrassements sous leurs diverses facettes, en partant des questions que pose l'élaboration des projets :
 - la gestion des déblais et remblais,
 - les principaux types de terrains existants,
 - la structure des terrains et ses conséquences,
 - l'évolution géologique des sites et ses conséquences.
- L'application de ces connaissances générales à l'échelle d'un projet est le sujet de l'exercice d'application de ce cours.

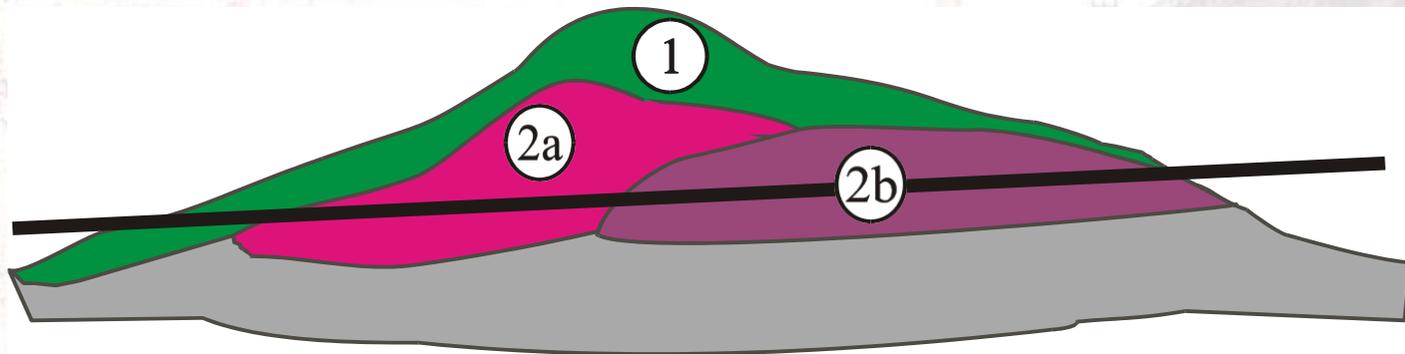


- Les terrassements modifient la topographie du terrain et lui donnent une forme et des caractéristiques déterminées, correspondant à la finalité des travaux (route, voie ferrée, barrage, plateforme industrielle, etc.).
- Les travaux de terrassements consistent à extraire, transporter et mettre en œuvre des sols et des matériaux variés.
- Les déblais sont taillés dans les terrains en place. Les remblais sont édifiés en répandant des couches successives de roches et de sols.
- Le résultat final est la réalisation d'une plate-forme (partie supérieure des remblais ou des déblais) à la cote prévue par le projet. En construction routière, cette plate-forme, appelée « arase de terrassement », sert d'appui à une couche de forme et aux couches de chaussées.
- Les terrassements produisent aussi des talus : dans les déblais, ce sont des talus dans le terrain naturel. Pour les remblais, ce sont des talus en matériaux compactés. Ces talus doivent être protégés contre les instabilités et contre l'érosion superficielle.

Le projet de terrassements - 1



- Un chantier de terrassements est une succession de déblais et de remblais dont le volume dépend de la position de la ligne de référence.



- Chaque déblai est constitué de matériaux dont l'extraction et la réutilisation dépendent de la nature et de l'état naturel de la roche ou du sol, ainsi que des conditions climatiques de leur mise en œuvre en remblai.

- L'étude de terrassements a pour objectifs :
 - de déterminer la nature des terrains dans les déblais concernés par le projet ;
 - de déterminer les conditions d'extraction puis de réemploi de ces terrains en remblai et en couche de forme ;
 - de prévoir le destin de chaque mètre cube de matériaux dès son extraction et jusqu'à sa mise en œuvre dans l'un des remblais du tracé, ou bien dans un dépôt temporaire ou définitif.
- Le géotechnicien est responsable de la fourniture des données nécessaires
 - en organisant la reconnaissance géotechnique du tracé,
 - en faisant exécuter les essais normalisés d'identification et de compactage sur chaque nature de matériau,
 - en analysant les conditions d'emploi de tous les matériaux de déblai d'après leurs caractéristiques et des hypothèses sur les conditions climatiques lors des travaux,
 - en combinant toutes ces informations pour établir le « mouvement des terres ».

- L'élaboration des projets de terrassements demande des connaissances étendues, qui couvrent :
 - la nature et l'état des terrains naturels dans les futurs déblais,
 - l'interprétation des résultats d'essais à des fins de terrassements,
 - les capacités des engins d'extraction, de transport et de régalage et de compactage des matériaux issus des déblais ;
 - les méthodes d'élaboration du mouvement des terres,
 - les méthodes de contrôle du compactage des remblais en cours de chantier,
 - les méthodes de protection des talus des remblais et des déblais contre l'érosion, qui peut-être très active.
- Nous allons passer en revue dans ce cours ces différents aspects de la géotechnique des terrassements.

Les sols (rappel)

Matériaux formés de particules

Sols fins et sols grenus. Les sols sont souvent des mélanges.

Fraction grossière ($>80\mu\text{m}$) : La densité du sol est liée à la distribution des tailles des particules. On la mesure par granulométrie.

Fraction fine ($<80\mu\text{m}$) : le comportement est lié à l'interaction avec l'eau. On le caractérise par les limites de consistance (Atterberg) ou l'essai de bleu. La teneur en eau (et S_r) est importante.

On considère que le comportement d'un sol est contrôlé par la fraction fine dès qu'elle représente 35% en masse du sol.

Les roches

Matériaux continus fracturés

Les fragments sont-ils durables ?
Essais de fragmentabilité, de dégradabilité, de friabilité (usure).

Schéma de fracturation du massif

Altérabilité.



Courbe granulométrique



*Tamisage
Fraction $80\ \mu\text{m} - D_{\text{max}}$*



*Sédimentométrie (loi de Stokes)
Fraction $0-80\ \mu\text{m}$*

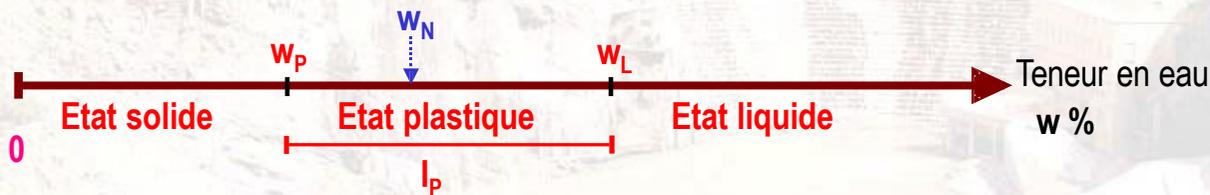
Limites de consistance (NF P 94 051)



Limite de liquidité w_L à la coupelle de Casagrande



Limite de plasticité w_p par la méthode au rouleau



Indice de consistance

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_p}$$

- Caractérise l'«argilosité» des sols fins ($C_{80\mu m} > 35 \%$)
- Essai réalisé sur la fraction 0-400 μm
- w_L peut aussi être déterminée au cône de pénétration (NF P 94 052-1)



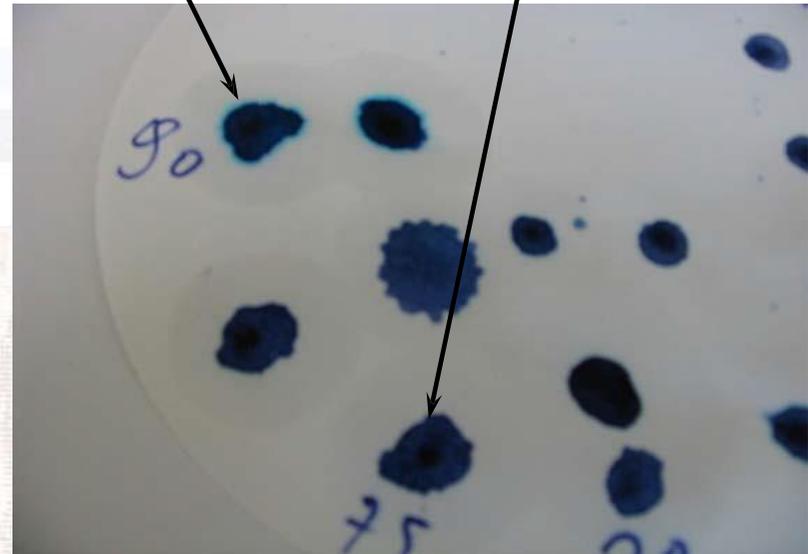
*Solution eau + sol
+ bleu de méthylène*



Prélèvement

Valeur de bleu de méthylène d'un sol Détermination (NF P 94 068)

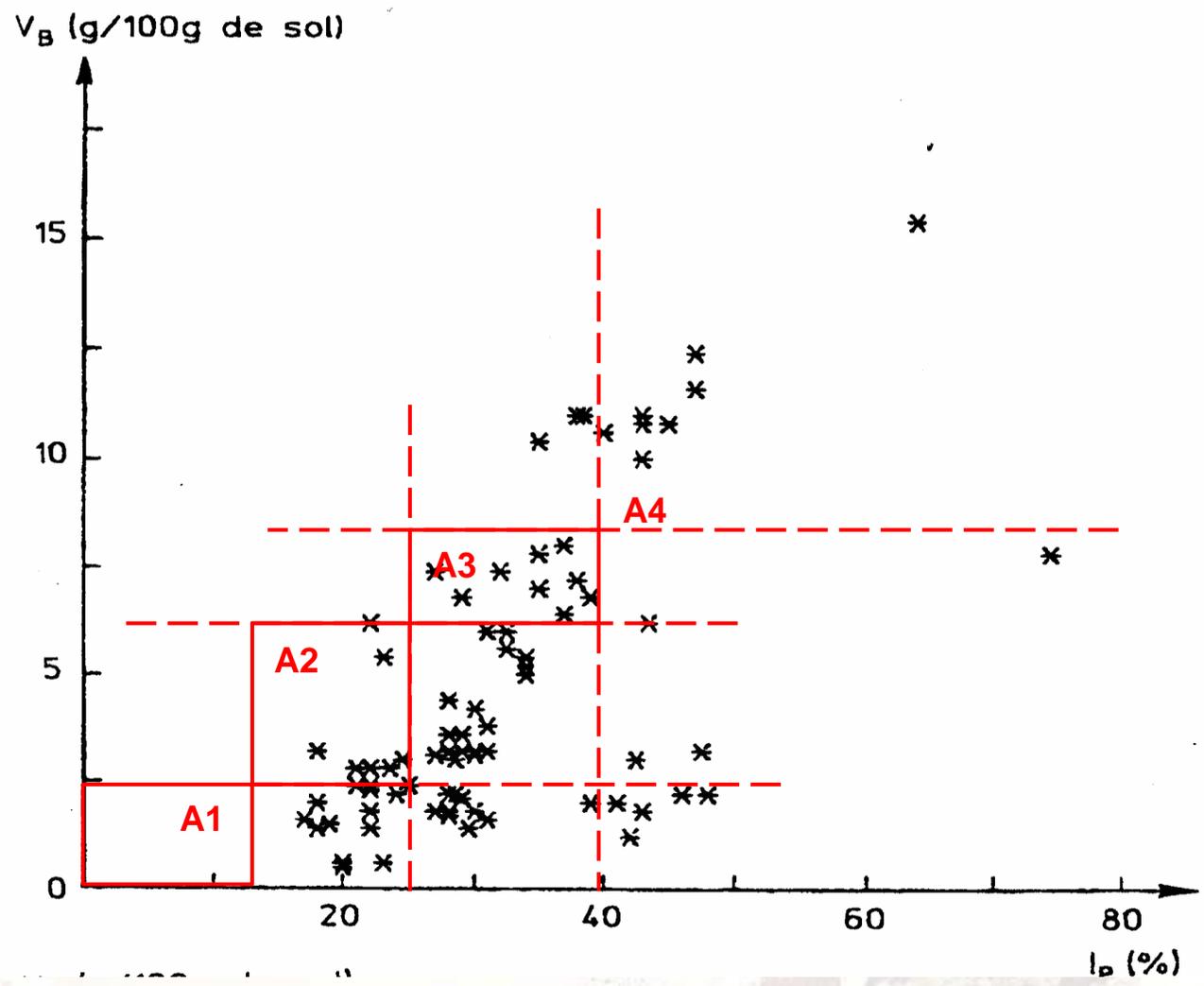
Auréole ou pas auréole ?



- *Essai réalisé sur la fraction 0-5 mm*
- *V_{bs} exprimée en g de bleu par 100 g de sol*

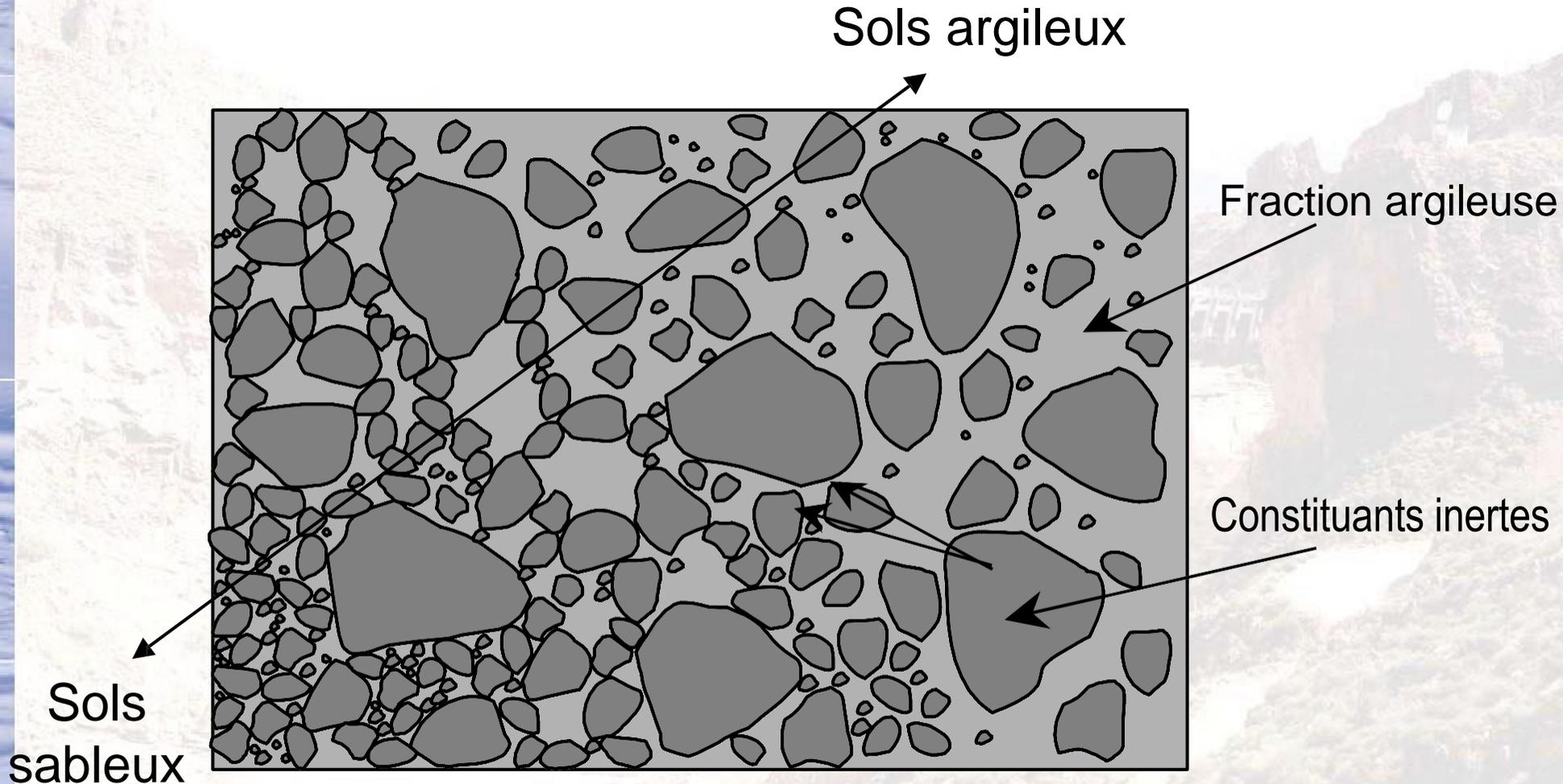
Relation entre valeur de bleu et indice de plasticité

Séance 5 : Les terrassements



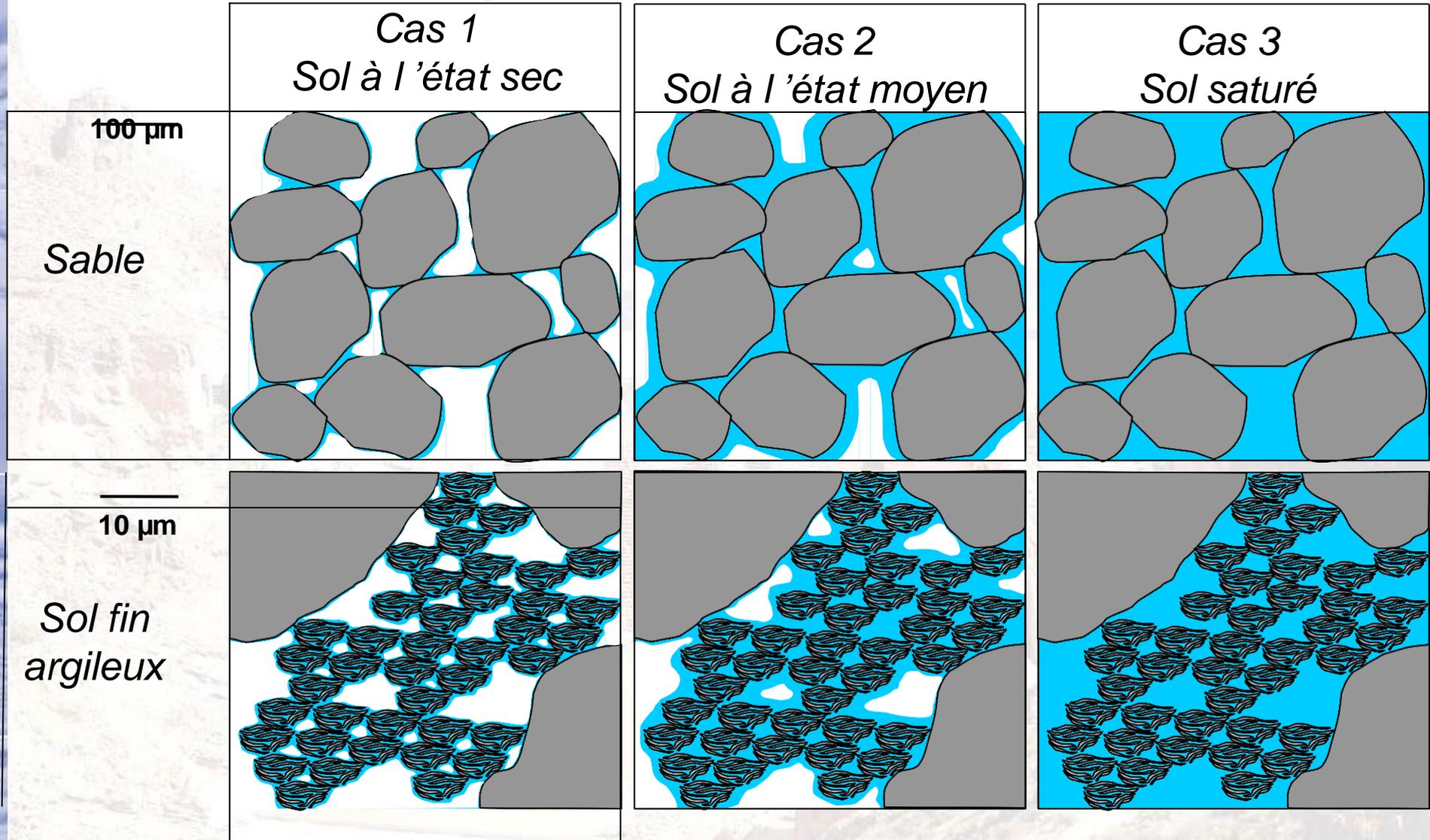
Connaître les matériaux – Proportion des mélanges

a. Les dimensions des particules

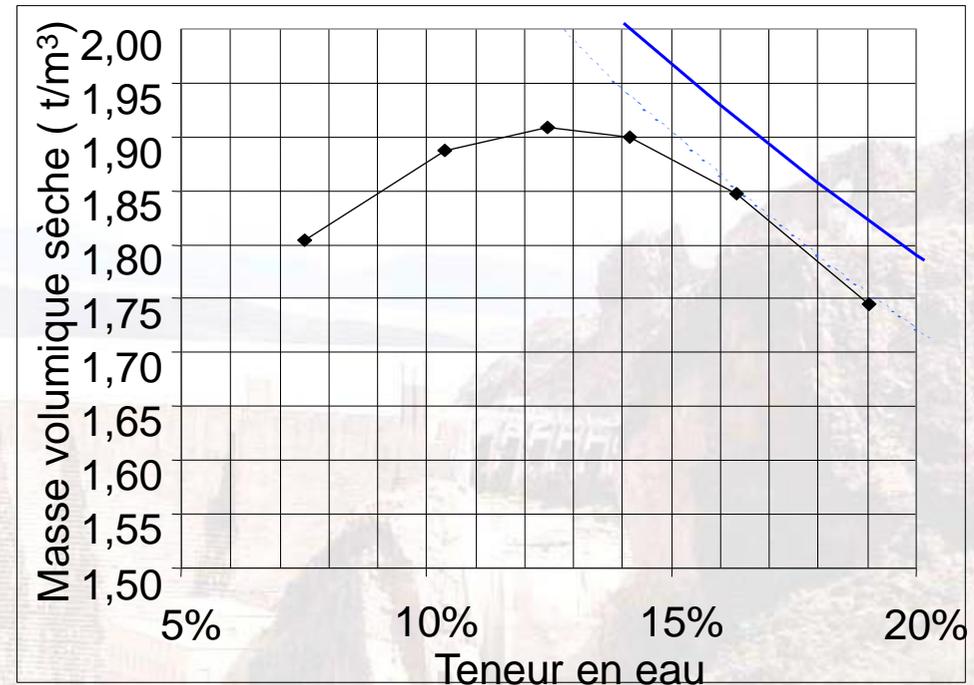


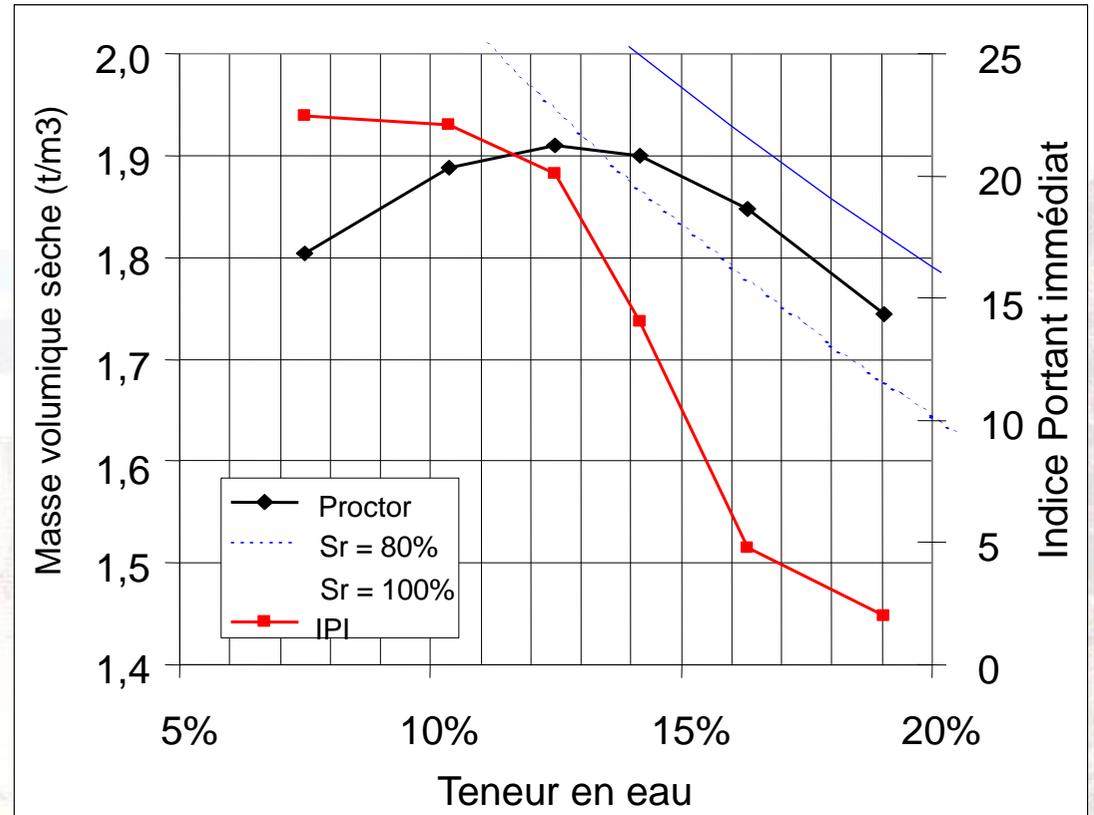
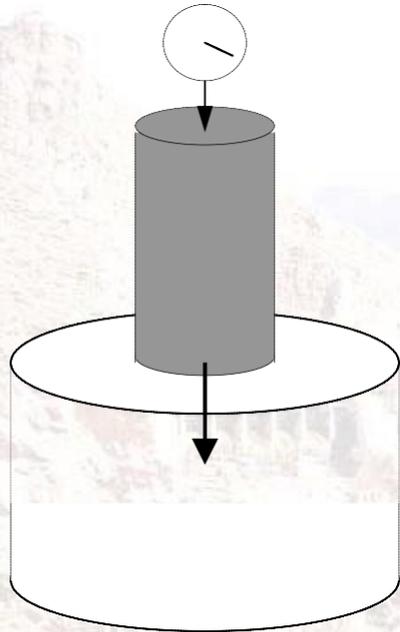
Connaître les matériaux – Proportion des mélanges

b. Teneur en eau et degré de saturation



- Côté sec
 - dans la fraction argileuse : manque d'eau = succion
- Côté humide
 - la courbe suit la courbe à ~90 % de degré de saturation car l'eau est incompressible
- L'optimum
 - un compromis sous une énergie donnée
 - varie avec l'énergie pour un même sol
 - dans les sols insensibles : signification réduite





Max de :

- $\frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement } t \text{ (kN)}}{13,35} \times 100$
- $\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement } t \text{ (kN)}}{19,93} \times 100$

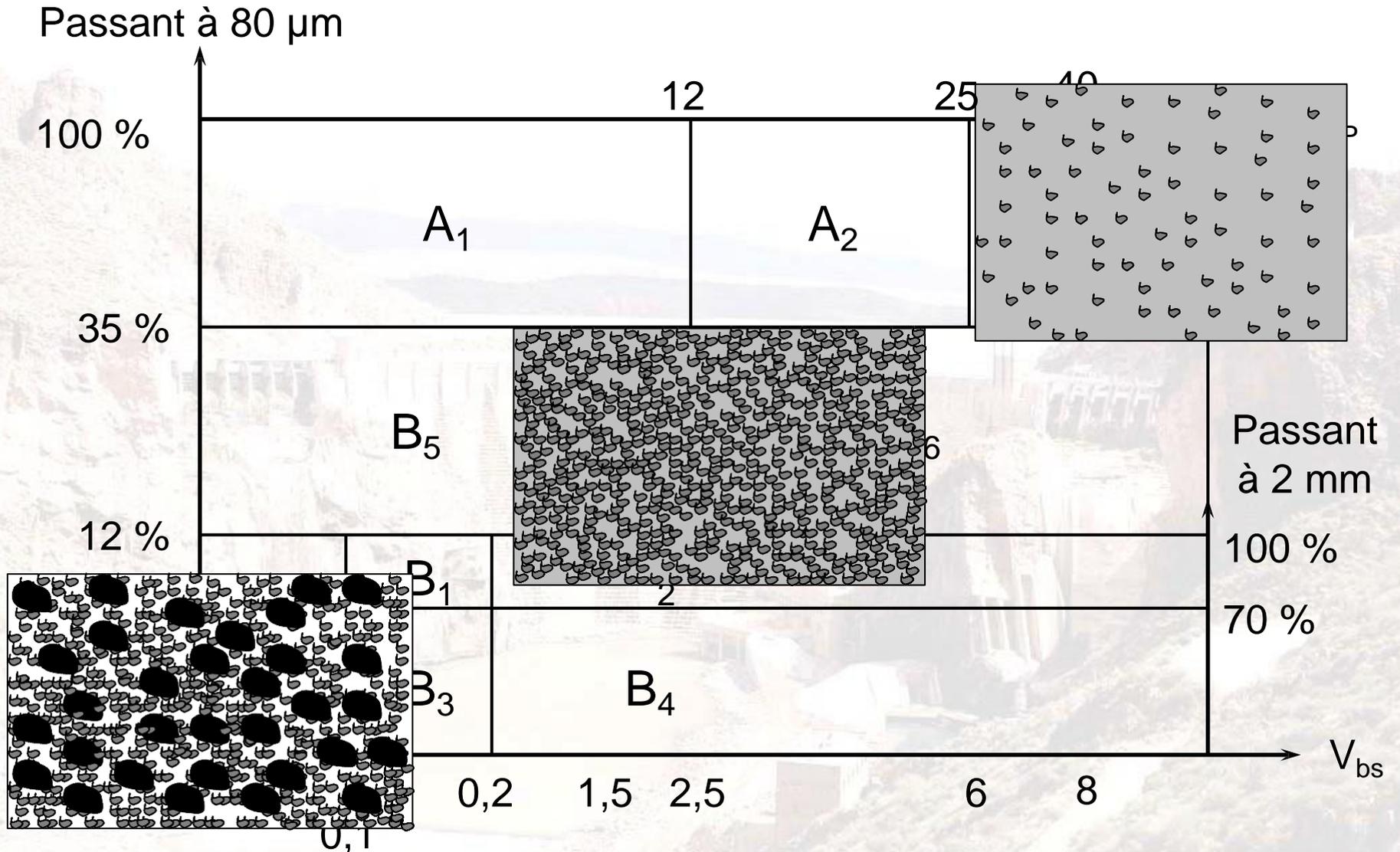
Classification des sols et roches pour les terrassements NF P 11 300 (GTR)

- Trois grandes familles :
 - Sols : classes A, B, C (sols grossiers), D
 - Matériaux rocheux : classe R
 - Matériaux particuliers : classe F
- 2 niveaux de classification :
 - 1^{er} niveau : nature du sol
 - 2^{ème} niveau : état hydrique (w_N/w_{OPN})
- Points communs dans une sous-classe : extraction, compactage, performances



Classification des sols ($D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$)

Séance 5 : Les terrassements



Classification des sols - État hydrique

- Critères de classement des matériaux
 - w_N / w_{OPN}
 - I_{PI} : Indice portant immédiat
 - I_c : Indice de consistance = $(w_L - w_N) / I_P$
- Exemple d'un sol A2 très humide
 - $w_N \geq 1,3 w_{OPN}$ ou $I_{PI} \leq 2$ ou $I_c \leq 0,9$  état th



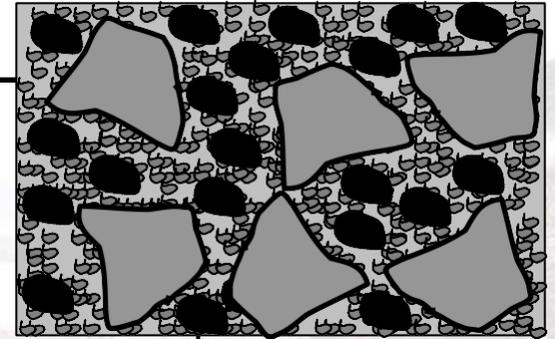
Classification des sols - ($D_{\max} > 50 \text{ mm}$)

Le cas des sols à éléments grossiers.

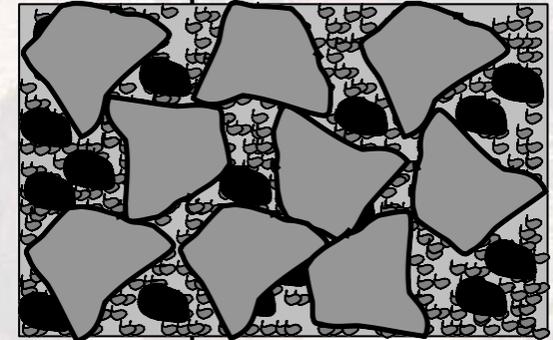
Passant à $80 \mu\text{m}$

100 %
Séance 5 : Les terrassements

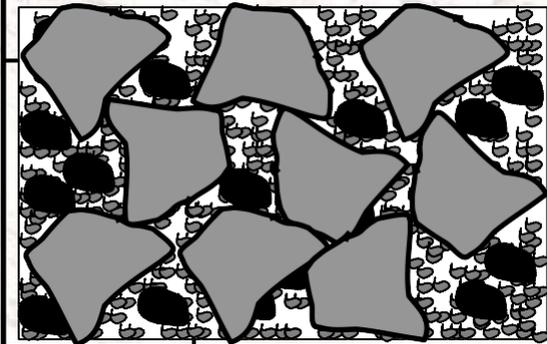
C_1 : fraction $0/50 > 60-80 \%$
sols grossiers peu charpentés



35 %
 C_2 : fraction $0/50 \leq 60-80 \%$
sols grossiers très charpentés



12 %



0,1

V_{bs}

Classification des roches - Principes

- Critères
 - Classification génétique (carbonatées, ...)
 - Résistance (LA, MDE)
 - Fragmentabilité (FR) et Dégradabilité (DG)
 - Masse volumique
 - État hydrique

Sujet non traité, faute de temps.

Pour la classification RTR :

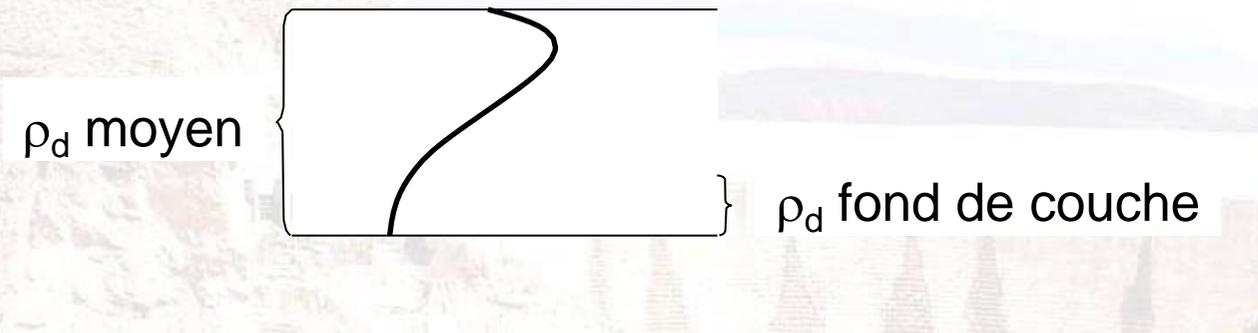
- ☒ On regroupe les matériaux par famille homogènes (géologie + géotechnique).
- ☒ On quantifie les paramètres du matériau qui concernent les enjeux en terrassements (extraction, compactage, sensibilité à l'eau, au trafic de chantier...).
- ☒ Ces paramètres sont utilisés pour classer le matériau.
- ☒ La classification permet de déterminer les conditions d'utilisation en remblai et couche de forme.

Compactage des sols - Objectifs

On densifie les sols pour

- éviter les risques de tassement (chargement ou évolution de l'état hydrique)
- améliorer les performances mécaniques (module, résistance),
- réduire la perméabilité.

Le compactage par couche n'est pas homogène :



Exemples d'objectifs du compactage :

q4 : objectif en corps de remblai de moins de 15 mètres

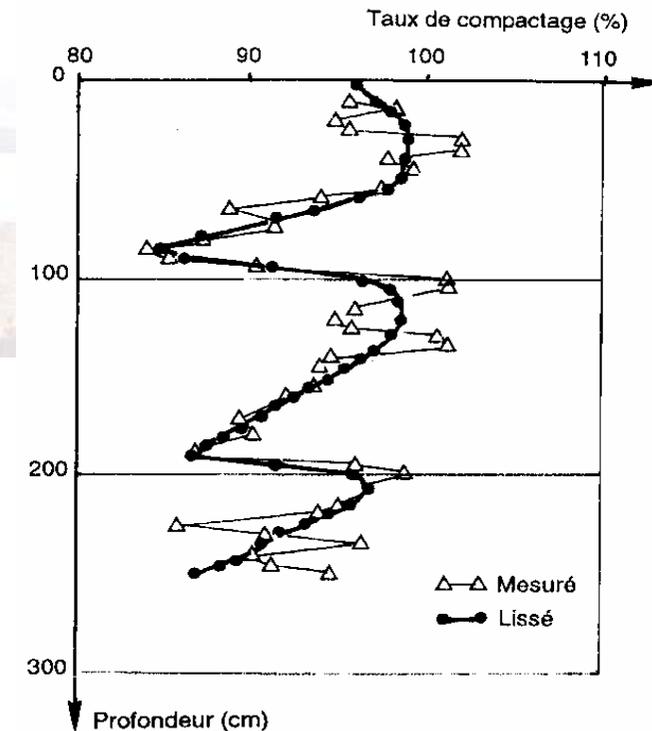
95 % de ρ_{dOPN} en moyenne

92 % de ρ_{dOPN} en fond de couche

q3 : objectif en couche de forme

98,5 % de ρ_{dOPN} en moyenne

96 % de ρ_{dOPN} en fond de couche



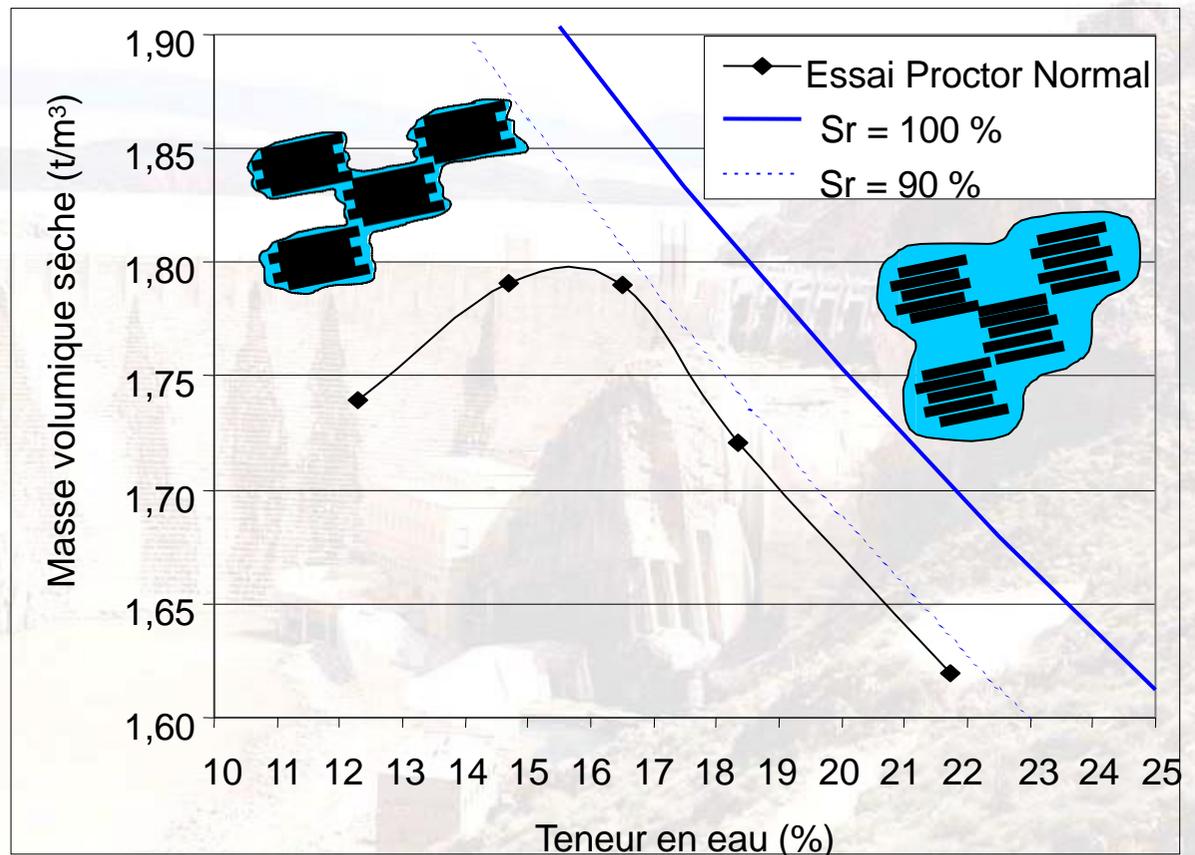
Il faut maîtriser les épaisseurs des couches à compacter

État hydrique et compactage

La masse volumique sèche obtenue après compactage dans des conditions imposées (énergie = nombre de chocs par une masse tombant d'une hauteur fixe) dépend de la teneur en eau. On observe que la courbe $\rho_d(w)$ passe par un maximum, que l'on va chercher à atteindre par le compactage, en choisissant une bonne teneur en eau.

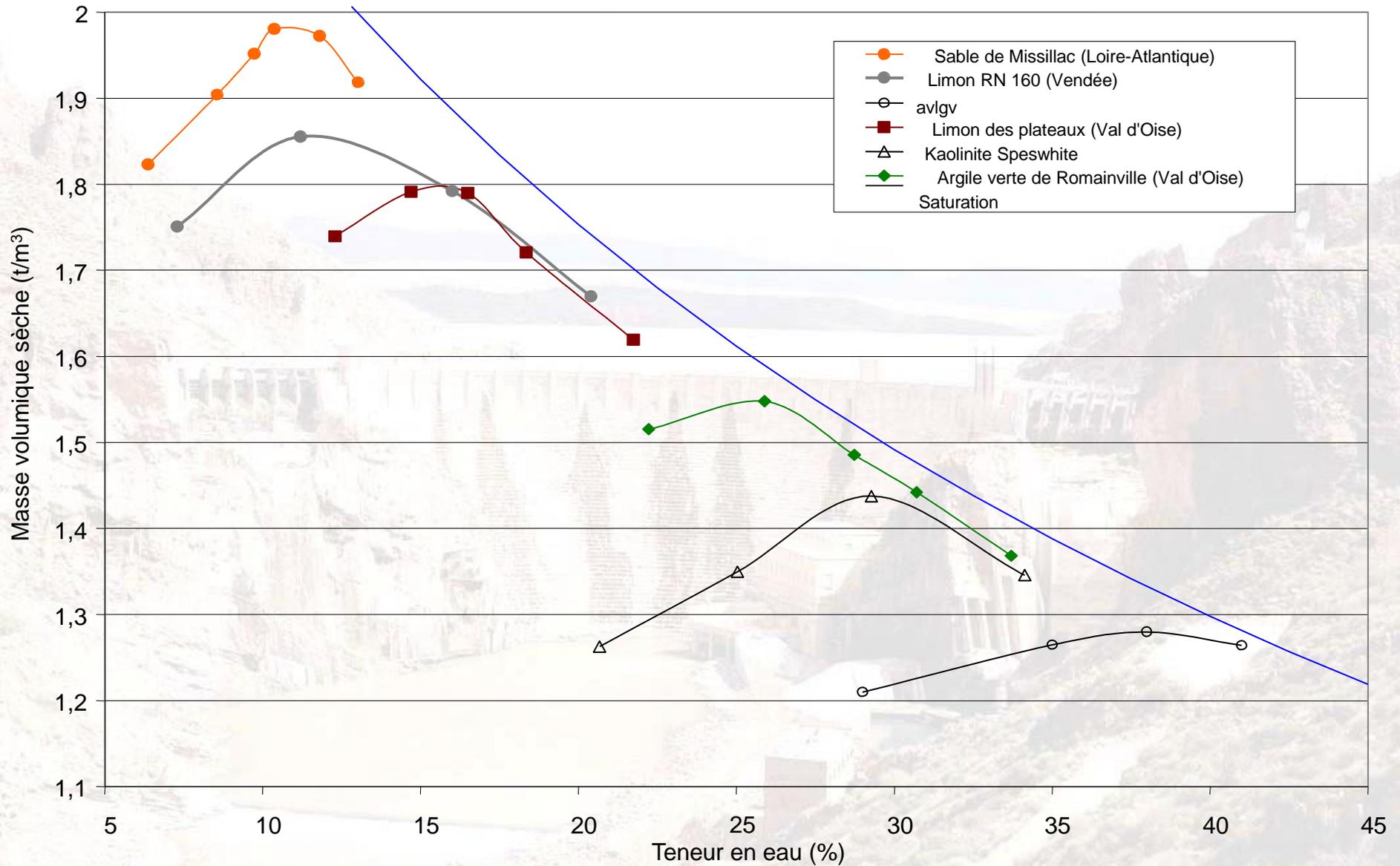
Du côté sec, le compactage est gêné par la succion, qui agrège les particules fines en agrégats plus difficiles à compacter.

Du côté humide, la présence de l'eau dans les pores du sol s'oppose aux variations de volume, donc au compactage.

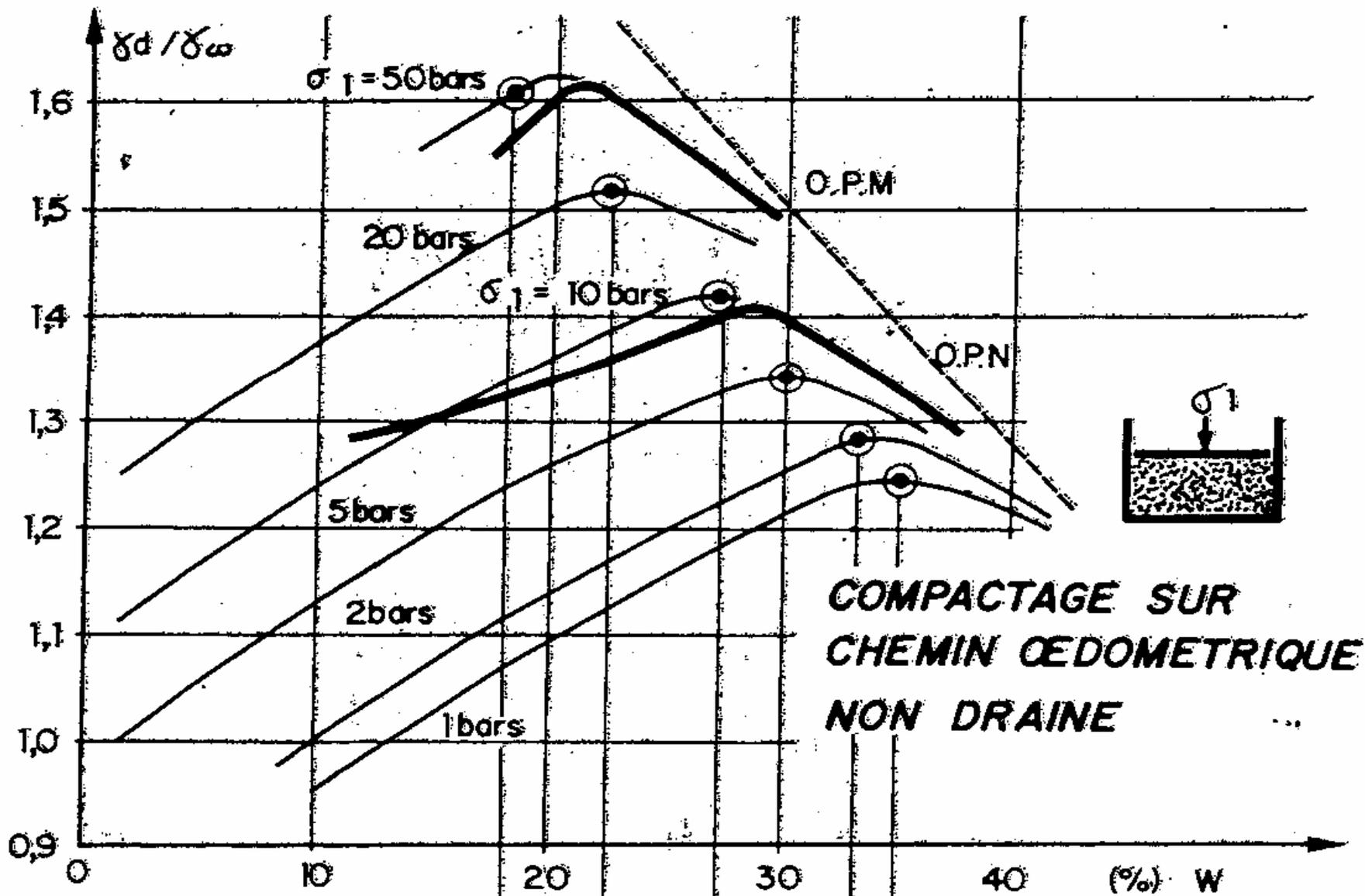


Influence de la nature du sol

Séance 5 : Les terrassements

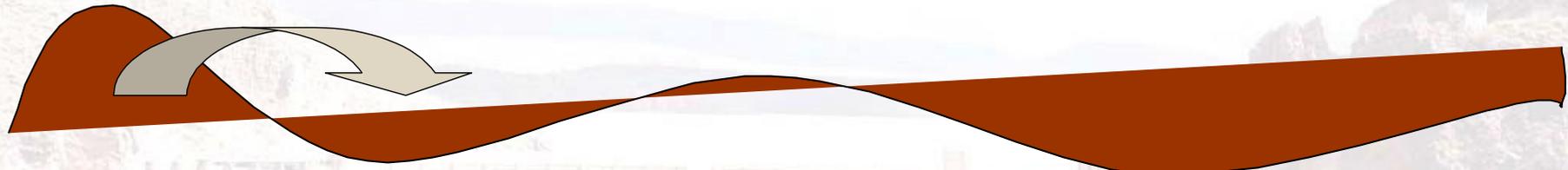


Courbes de compactage à différentes énergies



Réemploi des matériaux en remblais et couche de forme

Rappel : une problématique d'apparence simple



Mettre les « bosses » dans les « creux »

mais il faut obtenir

- la portance attendue pour la chaussée (**court terme**)
- un ouvrage pérenne (**long terme**)

On a besoin de règles de réemploi des matériaux

car si l'on met

n'importe quel matériau

dans n'importe quel état

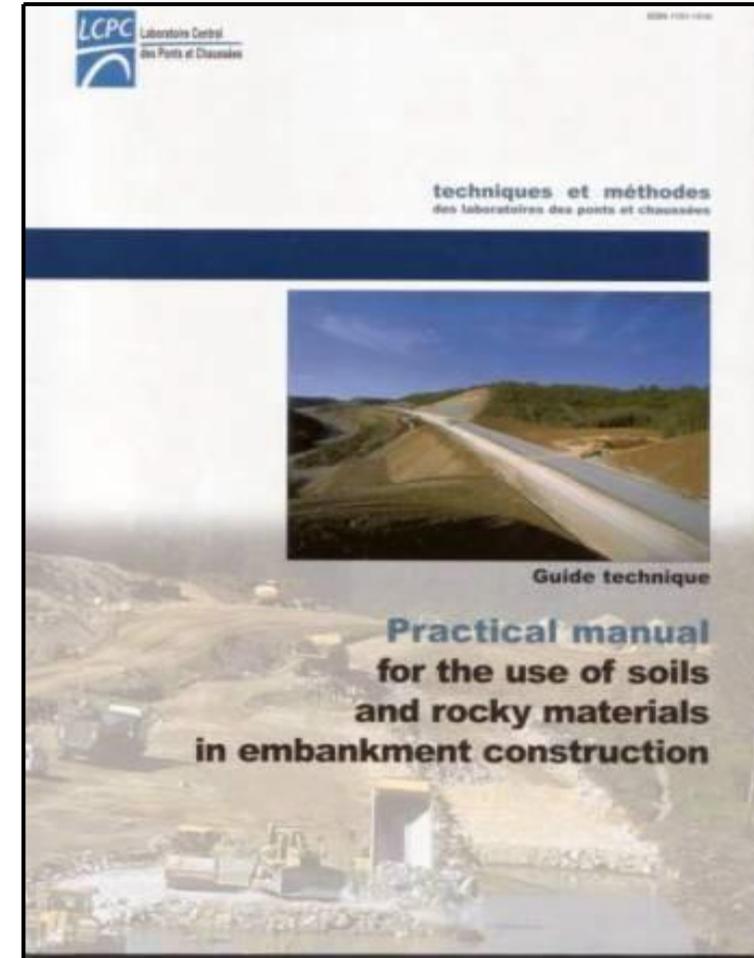
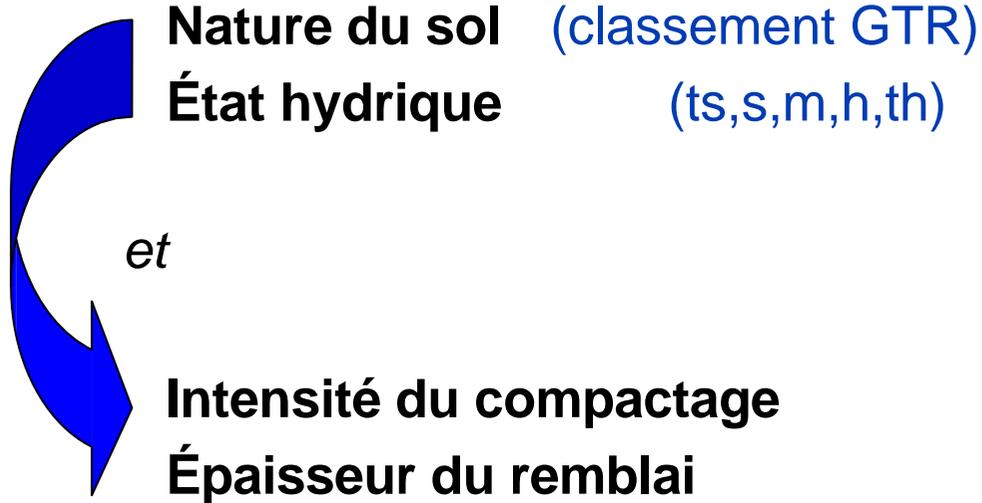
peu ou pas compacté



on n'atteint l'objectif ni à court terme, ni à long terme

En France, ces règles sont définies dans le Guide technique pour les terrassements routiers (GTR).

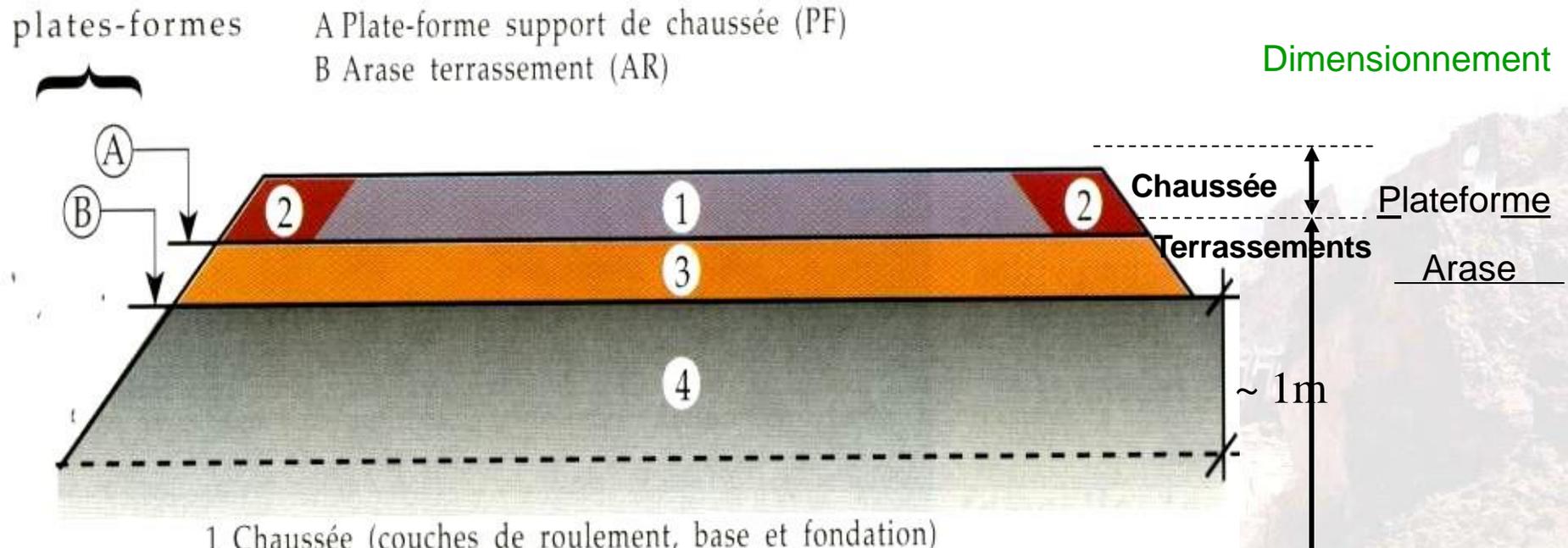
Elles sont issues de retours de chantiers et d'expérimentations (CER) et relient



Remblai – Partie Supérieure des Terrassements (PST) – Couche de forme

Définitions

Séance 5 : Les terrassements



- 1 Chaussée (couches de roulement, base et fondation)
- 2 Accotements
- 3 Couche de forme
- 4 Partie supérieure des terrassements PST : épaisseur d'environ 1m de sol naturel (section en déblai) ou de matériau rapporté (section en remblai) située sous la couche de forme.

Dimensionnement : principes PST (Arase)

Cas de P.S.T	Schéma	Description	Classe de l'arase	Commentaires
P.S.T. n°0		<p>Sols A, B₂, B₃, B₅, B₆, C₁ se trouvant dans un état hydrique (th).</p> <p>Contexte Zones tourbeuses, marécageuses ou inondables. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.</p>	AR0	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (purge, substitution) et/ou de drainage (fossés profonds, rabattement de la nappe...) de manière à pouvoir reclasser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1		<p>Sols Matériaux des classes A, B₂, B₄, B₅, B₆, C₁, R₁₂, R₁₃, R₃₄ et certains matériaux C₂, R₄₃ et R₆₃ dans un état hydrique (h).</p> <p>Contexte. PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).</p>	AR1	Dans ce cas de PST, il convient : - soit de procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique remblai. On est ramené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte - soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction si l'on intercale un géotextile anticontaminant à l'interface PST - couche de forme).
P.S.T. n°2		<p>Sols Matériaux des classes A, B₂, B₄, B₅, B₆, C₁, R₁₂, R₁₃, R₃₄ et certains matériaux C₂, R₄₃ et R₆₃ dans un état hydrique (m).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).</p>	AR1	Si l'on peut réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 3. Bien que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support puissent être momentanément obtenues au niveau de l'arase, il est cependant quasiment toujours nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme.
P.S.T. n°3		<p>Sols Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2.</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau, de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).</p>	AR1 AR2	Mêmes commentaires qu'en PST 2 sur la nécessité de réalisation d'une couche de forme. Sans mesure de drainage. Classement en AR2 si des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration.

Dimensionnement : principes pour couche de forme

nature
des
matériaux

EPAISSEUR DE LA COUCHE DE FORME (C.D.F)

CLASSIFICATION DES
MATERIAUX DE LA PST

CLASSE D'ARASE
(AR_i)

CLASSIFICATION DES
MATERIAUX DE CDF

EPAISSEUR DE CDF
PRECONISEE

CLASSE DE PLATEFORME
(PF_j avec $j > 2$)

AR1	AR2	AR3	AR4
20 MPa	50	120	200

PF1	PF2	PF3	PF4
20 MPa	50	120	200

LONG TERME

- On attend du remblai :
 - l'homogénéité de l'ouvrage,
 - un bon déroulement du chantier,
 - la stabilité à long terme.
- Les principales préoccupations sont :
 - l'état hydrique du matériau,
 - l'homogénéité du matériau (nature, état),
 - la traficabilité,
 - l'aptitude au traitement (D_{max}),
 - la qualité du compactage (corps et bordures),
 - l'absence d'évolutions granulométrique à long terme.

La partie supérieure des terrassements (PST)

On attend :

- une plate-forme correcte pour la mise en œuvre de la couche de forme,
- un début d'homogénéisation de portance,
- un effet d'enclume pour la couche de forme (support pour le compactage),
- la stabilité à long terme.

- On attend de la couche de forme à court terme :
 - qu'elle soit nivelée,
 - qu'elle permette le compactage de la chaussée,
 - qu'elle protège le remblai de l'eau,
 - qu'elle ait une bonne traficabilité.
- On attend de la couche de forme à long terme :
 - qu'elle rende la portance du remblai homogène,
 - que cette portance soit pérenne,
 - une protection thermique,
 - une contribution au drainage de la chaussée.
- Les principales préoccupations sont :
 - la traficabilité,
 - l'homogénéité du matériau (nature, état),
 - l'aptitude au traitement (D_{max}),
 - le maintien des performances mécaniques à long terme,
 - la résistance au gel.

Recommandations pour l'utilisation des matériaux en corps de remblai

Il n'existe pas de théorie mécanique de la transformation des matériaux naturels en remblai compacté.

Les règles de compactage (épaisseur des couches, type et puissance des engins de compactage, nombre de passes, contraintes sur l'état des matériaux à compacter) sont pour cette raison déduites d'études expérimentales.

L'expérience est transcrite de façon différente selon les pays, en fonction des essais retenus pour la caractérisation des sols, des sols et conditions climatiques le plus fréquemment rencontrés, et de la pratique passée. Ainsi, il existe une pratique d'origine américaine, une pratique liée aux travaux du TRL au Royaume Uni, une pratique issue des travaux du CEBTP (France) en Afrique, une pratique issue des travaux du LCPC (France) en France, et sans doute d'autres...

Nous allons examiner la pratique française issue des travaux du réseau technique de l'équipement, principalement du LCPC et des LRPC.

Recommandations pour l'utilisation des matériaux en corps de remblai (GTR)

Exemple : sol A2 m

L'expérience et des études systématiques en vraie grandeur ont été synthétisées pour définir les règles de mise en œuvre des matériaux de la classification GTR pour obtenir un résultat correct en fonction du climat.

Sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code							
					E	G	W	T	R	C	H	
A ₂ m	Ces sols ne posent pas de problème de réutilisation en remblai sauf par pluie forte ou moyenne	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON							
		+	pluie faible	E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	2	0	0	0	0	2	2	
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen	0	0	0	0	0	2	0	
		-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage superficiel W : arrosage superficiel pour maintien de l'état C : compactage moyen		0	0	3	0	0	2	0
				Solution 2 : emploi en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)		0	0	0	0	0	1	2
				Solution 3 : extraction frontale E : extraction frontale C : compactage intense		2	0	0	0	0	1	0

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm pour traitement
	3	Fragmentation complémentaire après extraction
Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un réactif ou un additif adaptés
	2	Traitement à la chaux seule
Régilage	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
Compactage	1	Compactage intense
	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Remblai de hauteur faible ($\leq 5m$)
	2	Remblai de hauteur moyenne ($\leq 10m$)



Photo V. Ferber



Photo J. Bimbard - LR Lyon

- Modalités prévues :
 - en couches minces
 - frontale (sur toute la hauteur du déblai)
- Objectifs possibles
 - recherche d'homogénéité,
 - prévention des effets des conditions climatiques,
 - faciliter la circulation sur le chantier.

G = Action sur la granularité



Photo V. Ferber

- Modalités prévues
 - élimination des éléments $> 800\text{mm}$
 - élimination des éléments $> 250\text{mm}$
 - fragmentation
- **Objectifs possibles**
 - compactage
 - aptitude au traitement
 - prévention de l'évolution granulométrique

W = Action sur la teneur en eau



- Modalités prévues
 - Maintien de l'état hydrique
 - Changement d'état hydrique (arrosage)
- **Objectifs possibles**
 - Traficabilité
 - Compactage vers l'optimum



- Modalités prévues
 - à la chaux en général
 - autre réactif (liants hydrauliques, ...)
- **Objectifs possibles**
 - faire diminuer la teneur en eau et la plasticité,
 - améliorer les propriétés mécaniques pour le comportement à long terme.

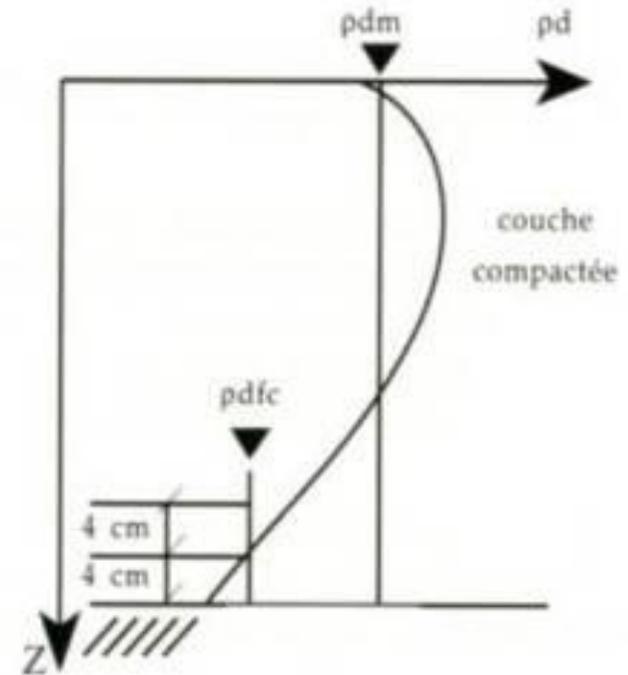
Note: Il existe un guide LCPC spécifique sur le traitement des sols



R = Régalage - Épaisseur des couches de compactage



- Modalités prévues
 - couches minces (20-30 cm)
 - couches moyennes (30-50 cm)
 - couches épaisses (50-130 cm, V5-B1)



Effet du compactage dans une couche

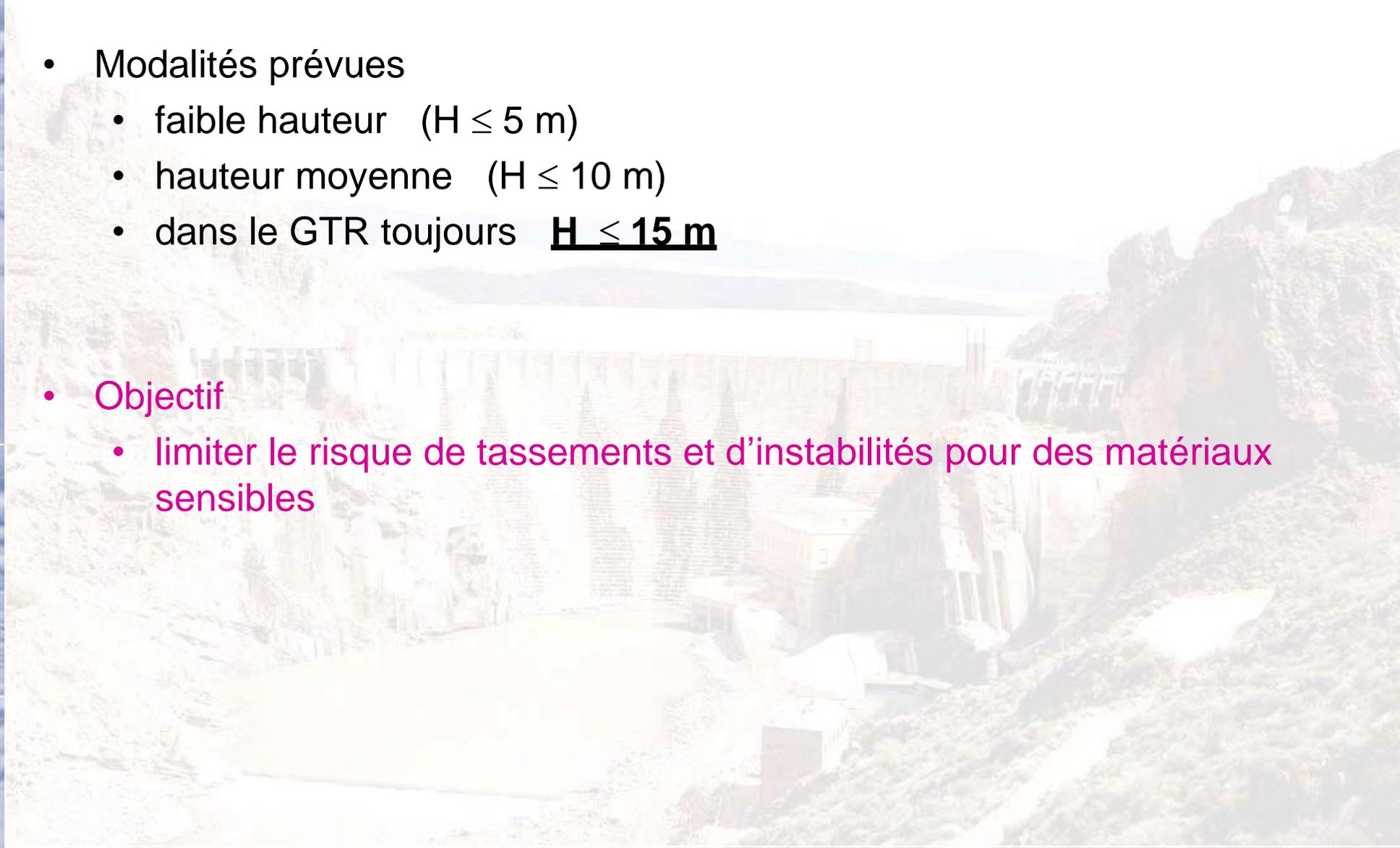
C = Énergie de compactage



- Modalités prévues
 - compactage faible
 - compactage moyen
 - compactage intense
- Objectifs possibles
 - augmenter l'énergie pour compacter plus (matériaux secs)
 - limiter l'énergie pour éviter le matelassage (matériaux humides)



- Modalités prévues
 - faible hauteur ($H \leq 5$ m)
 - hauteur moyenne ($H \leq 10$ m)
 - dans le GTR toujours **$H \leq 15$ m**
- Objectif
 - limiter le risque de tassements et d'instabilités pour des matériaux sensibles

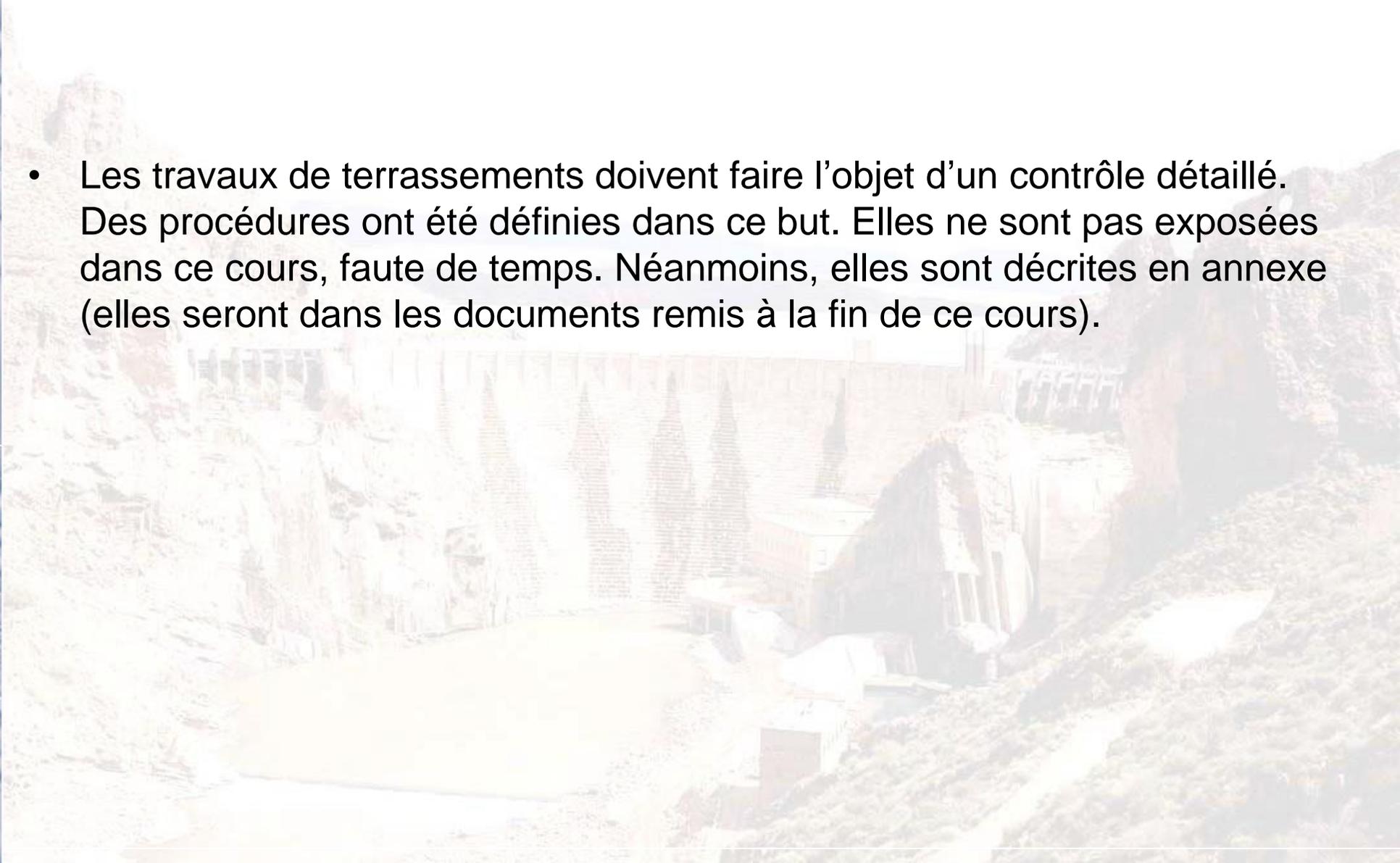


Recommandations pour l'utilisation des matériaux en couches de forme

Ne sera pas traité



- Les travaux de terrassements doivent faire l'objet d'un contrôle détaillé. Des procédures ont été définies dans ce but. Elles ne sont pas exposées dans ce cours, faute de temps. Néanmoins, elles sont décrites en annexe (elles seront dans les documents remis à la fin de ce cours).



Revenons au projet de terrassements

Nous avons maintenant tous les éléments pour continuer la présentation du projet de terrassements, qui va définir :

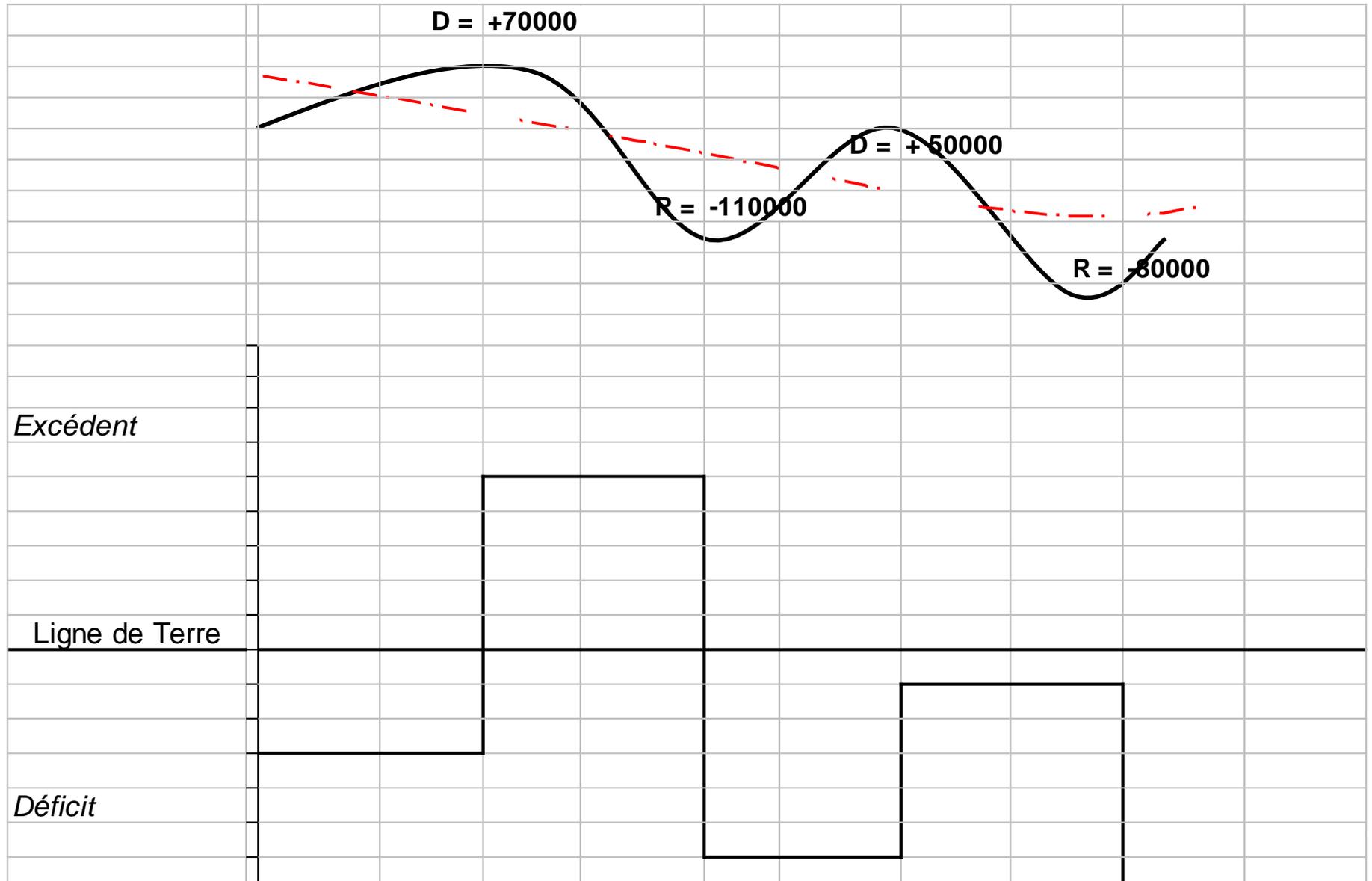
- les quantités de matériaux disponibles dans les déblais pour un réemploi en remblai ;
- les conditions de mise en œuvre et de stockage intermédiaire en cas de besoin.

La démarche est décrite brièvement dans ce qui suit.



Principe de l'épure de LALANNE

Analyse des volumes et des « moments des transports » $M_i = V_i * d_i$

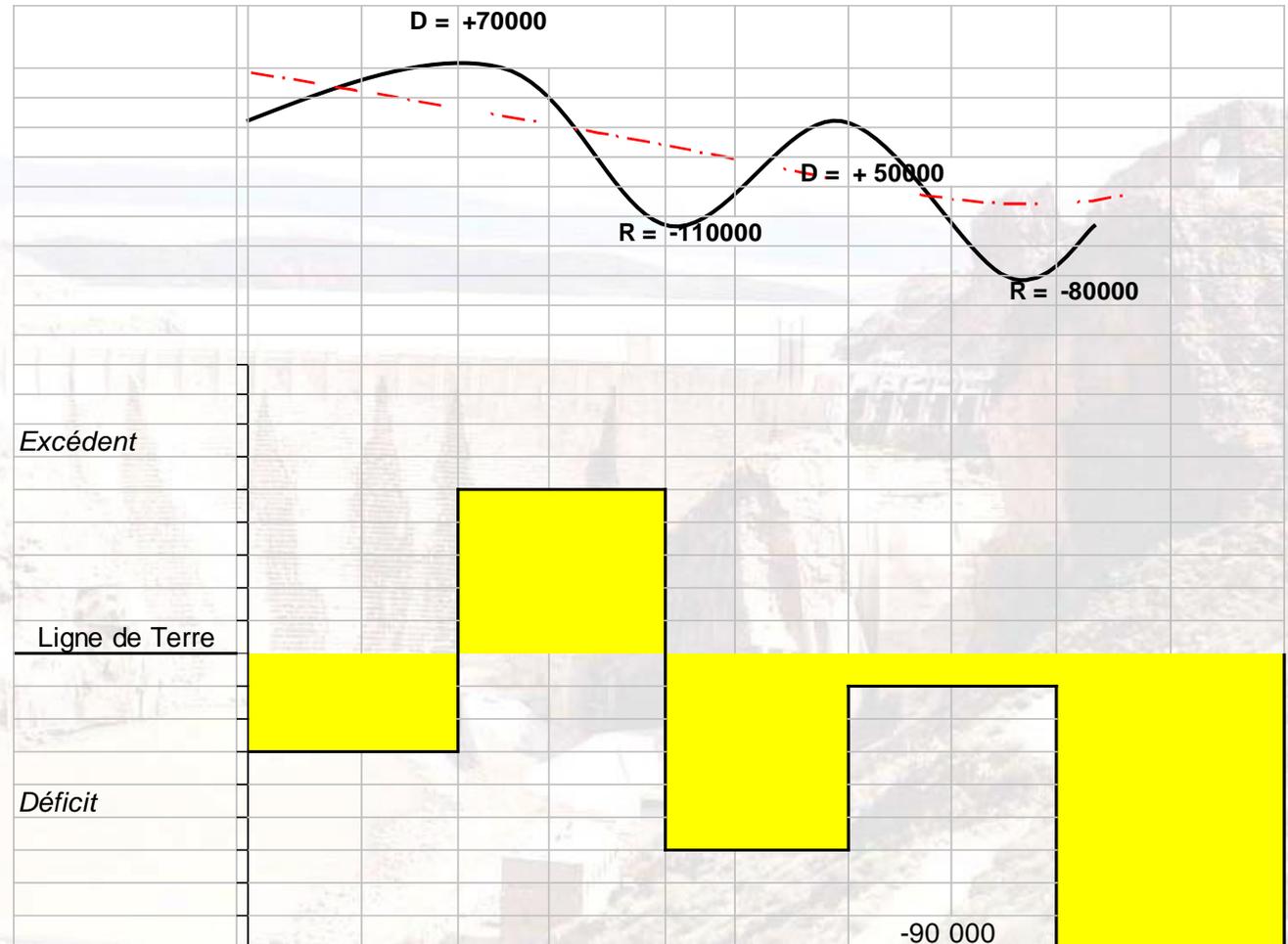


Permet d'optimiser le projet en bougeant la ligne rouge et en introduisant les emprunts et dépôts.

Permet d'optimiser les transports :

en minimisant les transports de surface :
Emprunts / Dépôts

et en élargissant les déblais



Permet de mettre en lumière les points de flux nuis : Viaducs, zones archéologiques ...

Exemple d'analyse « déblais - remblais »

