

Guide pour la réalisation des terrassements des plateformes de bâtiments et d'aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l'eau



Copyright : Menard-Eiffage

Décembre 2009

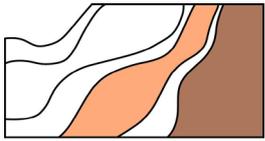


TERRASSIERS
DE FRANCE ■

Ils ouvrent la voie

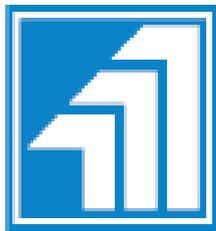
Guide pour la réalisation des terrassements des plateformes de bâtiments et d'aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l'eau

Décembre 2009



**TERRASSIERS
DE FRANCE** ■

Ils ouvrent la voie



**ENTREPRISES
GÉNÉRALES DE
FRANCE + BTP**



FFB SOLS INDUSTRIELS
FÉDÉRATION FRANÇAISE DU BATIMENT



FFB FÉDÉRATION FRANÇAISE DU BATIMENT



SYNTEC-INGENIERIE



FFB MAÇONNERIE GROS ŒUVRE
FÉDÉRATION FRANÇAISE DU BATIMENT

Ce guide technique a été rédigé dans le cadre des activités de la commission technique du Syndicat Professionnel des Terrassiers de France (SPTF) par :

- Maurice BUFALO - Valérian
- Daniel GANDILLE - Guintoli
- Pierre VEZOLE - Eiffage Construction

Les personnes suivantes ont également participé activement à la rédaction du contenu du présent guide,

- Benjamin DAUBILLY - Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)
- Jean-Pierre CATELIN - Union Nationale des Entrepreneurs de Sols Industriels (UNESI)
- Luis CARPINTEIRO - SOCOTEC / Bureaux de contrôle
- François GAUDIN - EGF-BTP
- Yann JUILLE - BE ACCOTEC / Comité Géotechnique Syntec-Ingénierie
- Wilfried PILLARD - Union des Métiers du Gros Œuvre (UMGO)
- Ghislain PINCON - Fédération Française du Bâtiment (FFB)

ainsi que l'ensemble des membres de la commission technique du SPTF :

- Christian JACQUES - Roger Martin
- Frédéric ABAUZIT - Forézienne d'entreprise
- Claude AIME - DTP Terrassement
- Patrice CHARDARD - Fougerolle-Ballot
- Jean-Marc DESSERT - Vinci Construction Terrassement
- Valéry FERBER - Charier TP
- Ignace MISTRETTA - Bec Frères
- Bernard de RONNE - SGTN
- Pierre ROSSI - Razel
- Jean-Paul VIGAUD - membre honoraire de la Commission technique



I. PRÉSENTATION

I.1. Préambule	7
I.2. Documents de référence	8
I.2.1. Normes	8
I.2.2. Autres documents.....	8
I.2.2.1. Guides techniques « SETRA – LCPC ».....	9
I.2.2.2. Fascicule du CCTG - Travaux.....	9
I.3. Définitions	9
I.3.1. Partie supérieure des terrassements (PST).....	10
I.3.2. Couche de forme	10
I.4. Domaine d'application.....	10
I.4.1. Sols de la PST.....	11
I.4.1.1. Sols concernés	11
I.4.1.2. Sols non concernés.....	11
I.4.2. ouvrages.....	11

II. RÉALISATION

II.1. Classification et définition des sols concernés.....	12
II.1.1. Classification	12
II.1.2. Sols sensibles à l'eau	12
II.1.3. Sols évolutifs ou fragmentables	12
II.2. Réutilisation des sols concernés.....	13
II.2.1. Généralités	13
II.2.2. Remblais ordinaires.....	13
II.2.3. Partie supérieure des terrassements (PST).....	13
II.2.3.1. Classes d'arase	13
II.2.3.2. Amélioration de l'arase.....	14
II.2.4. Couche de forme	15
II.2.4.1. Fonctions	15
II.2.4.2. Caractéristiques des matériaux constitutifs	15
II.2.4.3. Dimensionnement de la couche de forme.....	15
II.3. Conception du complexe « PST / couche de forme »	16
II.3.1. Drainage	16
II.3.2. Cas de la couche de forme granulaire	16
II.3.2.1. Plateforme horizontale sur une arase horizontale.....	17
II.3.2.2. Plateforme horizontale sur une arase pentée	17
II.3.2.3. Plateforme et arase à pente unique	18
II.3.3. Cas de la couche de forme traitée	18
II.3.3.1. Plateforme horizontale.....	19
II.3.3.2. Plateforme pentée	19
II.4. Cas particuliers.....	20
II.4.1. Fouilles des fondations	20
II.4.2. Remblais « techniques » contre ouvrage.....	20
II.4.3. Substitution dans le cas d'un sol sujet au « gonflement / retrait »	20
II.4.4. Prévention des remontées capillaires.....	21
II.5. Critères de performance requis sur la plateforme.....	22
II.5.1. Compacité de la couche de forme.....	22
II.5.2. Déformabilité de la plateforme	22
II.5.3. Tolérances géométriques.....	23
II.6. Plan d'assurance qualité	24

ANNEXES

1 - Classification des sols : principaux paramètres.....	26
2 - Plan de contrôle	27
3 - Effets de l'eau sur un sol fin : description qualitative	28
4 - Effets de l'eau sur un sol fin : éléments quantitatifs	33

I. PRESENTATION

I.1. Préambule

Les bâtiments et les aires industrielles sont souvent fondés, pour des raisons environnementales et économiques, sur le terrain naturel, simplement décapé et aplani. Lorsqu'il est constitué de matériaux appropriés, correctement mis en œuvre et compactés, il donne des plateformes supports de qualité.

En revanche, surtout en présence de matériaux médiocres, notamment les sols fins argilo-limoneux sensibles à l'eau, les plateformes peuvent être l'objet de désordres, généralement dus à une évolution défavorable des conditions hydriques, liés à la sensibilité à l'eau de ces matériaux.

Les sinistres sont coûteux, et sources de conflits souvent insolubles, du fait d'un manque de formalisation des règles de l'art spécifiques à ce sujet.

Le présent guide a pour objectif de proposer ou rappeler quelques règles de l'art simples et suffisantes pour traiter des cas les plus courants, mais il ne se substitue pas aux différentes études géotechniques préliminaires ou d'avant-projet, ni évidemment aux études géotechniques de projet.

Ces dispositions utilisables tant au niveau de l'étude que de la réalisation, ont pour ambition de vous aider à réduire voire à supprimer les risques les plus fréquents, mais elles ne prétendent pas être adaptées à tous les cas.

Le choix de la solution technique doit être fait ou, au moins, validé par une Ingénierie géotechnique. Si cette solution n'est pas décrite dans un référentiel technique reconnu, elle doit faire l'objet d'une étude spécifique ou par une planche de convenance.



I.2. Documents de référence

I.2.1. Normes

- NF EN 1997-1 et -2, « Eurocode 7 – calcul géotechnique ».
- NF P11-300 : « classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme ».
- NF P 11-213-1, -2 et -3 (DTU 13.3) : dallages.
- NF P 94-500 : missions géotechniques.
- NF P 98-331 : tranchées – ouverture, remblayage, réfection.
- NF P 15-108 : liants hydrauliques routiers.
- NF EN 459 : chaux.
- NF P 94-050 / 049-1 et -2 : détermination de la teneur en eau.
- NF P 94-056 : analyse granulométrique par tamisage.
- NF P 94-051 : limites d'Atterberg.
- NF P 94-068 : valeur au bleu de méthylène du sol (VBS).
- NF P 94-093 : essais Proctor normal (OPN) et modifié (OPM).
- NF P 94-078 : Californian Bearing Ratio (CBR) après immersion et Indice Portant Immédiat (IPI).
- NF P 94-063 / 105 / 101 : contrôle de qualité du compactage (pénétrètres dynamiques).
- NF P 94-117-1 : module de déformation (essai de plaque).
- NF P 94-117-2 : module de chargement dynamique à la plaque (dynaplaque).
- NF P 94-117-3 : essai de Westergaard.
- NF P 98-200-1 à -7 : mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante.
- NF P 94-090 : oedomètre.

Ces documents sont disponibles auprès de l'Association Française de Normalisation (AFNOR).

I.2.2. Autres documents

Les documents proposés sont utilisés dans le domaine des terrassements (routier, ferroviaire, etc.).

En effet il n'existe que peu de différence, au niveau des conditions de mise en œuvre, entre une plateforme support de dallage ou de bâtiment et une plateforme support de chaussée ou de voie ferrée.

Ils définissent les règles de l'art et les conditions de réemploi et de mise en œuvre des sols naturels.

I.2.2.1. Guides techniques « SETRA – LCPC »

- « Réalisation des remblais et des couches de forme » – GTR (2000).
- « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme » - GTS (2000).
- « Conception et réalisation des terrassements » (2007).
- « Remblayage des tranchées » (1994 - 1999).
- « Caractéristiques des matériaux de remblais supports de fondations - Recommandations » (1980).

Ces guides sont disponibles auprès du Service d'Etudes sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA) – 46 avenue Aristide Briand – 92223 Bagneux et du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) – 58 bd Lefebvre – 75732 Paris cedex 15.

I.2.2.2. Fascicule du CCTG - Travaux

- « Cahier des Clauses Techniques Générales (CCTG) - fascicule 2 - Terrassements généraux » (2003).

Ce document est disponible auprès du Journal Officiel et sur le site internet du Ministère de l'Énergie, de l'Écologie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) <http://www.btp.equipement.gouv.fr/>.

NB : Ces documents renvoient eux-mêmes à des guides spécifiques (organisation de la qualité, terrassements à l'explosif, météorologie et terrassements, géotextiles, etc.).

I.3. Définitions

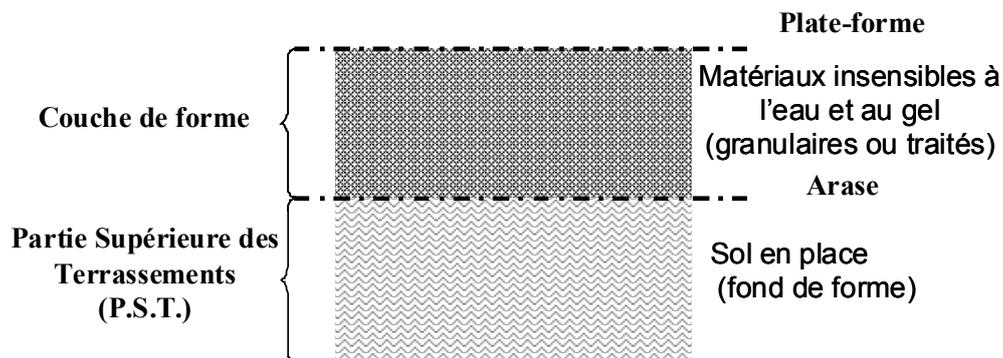


Figure1.3.a - Plateforme au-dessus d'une arase de déblai

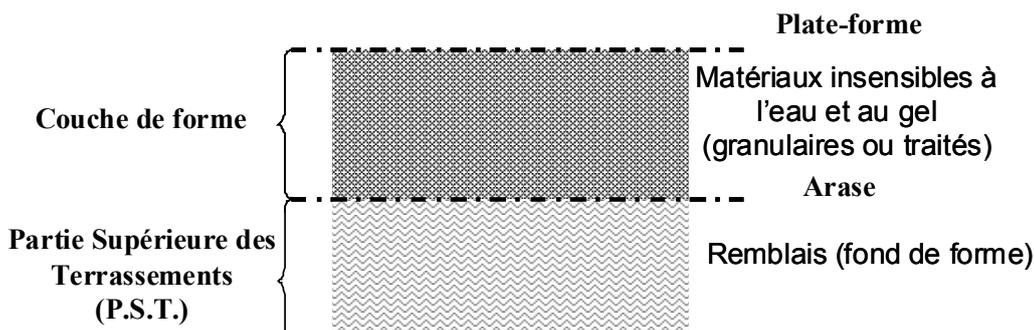


Figure 1.3.b - Plateforme au-dessus d'une arase de remblai

I.3.1. Partie Supérieure des Terrassements (PST)

Elle désigne conventionnellement le mètre supérieur des terrains rapportés (cas des remblais) ou en place (cas des déblais). La surface de la PST est dénommée « **arase** » (AR).

I.3.2. Couche de forme

Positionnée sur l'arase, elle est constituée de matériaux granulaires ou traités, insensibles à l'eau et au gel, sur une épaisseur usuelle de 0,20 à 0,80 m.

La surface de la couche de forme est dénommée « **plateforme** » (PF).

I.4. Domaine d'application

Le présent document s'applique aux plateformes de bâtiments (à usage industriel, d'habitation, de bureau...) et aux aires industrielles, y compris leurs aménagements périphériques (voies routières, ferroviaires... et parkings), lorsque la PST est constituée de sols sensibles à l'eau.

Il s'intéresse principalement aux conditions d'utilisation et de mise en œuvre des sols à la fois à court terme (pendant les travaux) et à long terme (en service pendant la durée de vie de l'ouvrage), avec pour objectif de garantir la pérennité des performances mécaniques et la stabilité dimensionnelle de la plateforme.

Il ne traite :

- ▼ ni des moyens d'obtenir un niveau de performance mécanique (à ce sujet voir le GTR ou le GTS), ni de la couche de réglage fin sous dallage.
- ▼ ni des sols situés au-dessous de la PST, identifiés et caractérisés par les études géotechniques.

I.4.1. Sols de la PST

I.4.1.1. Sols concernés

Ce sont principalement les matériaux dits “ sensibles à l'eau ” (*voir § II.1.2*) c'est à dire ceux dont la consistance et le comportement changent notablement avec la teneur en eau et donc avec les conditions météorologiques. Ces changements peuvent se produire soit à très court terme soit à beaucoup plus long terme.

I.4.1.2. Sols non concernés

■ Sols insensibles à l'eau ($VBS < 0,1$ selon GTR) : ces sols ne posent pas de problèmes particuliers de réutilisation et de mise en œuvre (*voir GTR*). Il s'agit principalement de sols sablo-graveleux propres (classe D) ou de matériaux rocheux concassés (classes R2, R4 et R6).

■ Sols posant des problèmes spécifiques, susceptibles notamment d'être le siège de variations volumétriques préjudiciables : le GTR donne des indications sur la façon de les aborder, mais dans le cas où l'utilisation de tels sols est envisagée, des études particulières sont indispensables.

Il s'agit principalement :

- ▼ des sols très plastiques ou à caractère gonflant : A4, voire A3 (NB : Dans le cas où ces sols ne sont pas réutilisés, ils doivent être purgés et substitués - *voir § II.4.3*).
- ▼ des sols solubles :
 - sous emprise de bâtiment, sols dont la teneur en sels solubles est supérieure à 1 % ;
 - hors emprise de bâtiment, sols dont la teneur en sels solubles est supérieure à 5 % (R5 ou F4).
- ▼ des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %) : classes F11 et F12.
- ▼ des sous-produits industriels : classes F2, F3, F5, F6, F7, F8 et F9.
- ▼ des sols pollués.
- ▼ des sols à risques : matériaux effondrables.

I.4.2. Ouvrages

Le présent document traite des ouvrages « courants », c'est-à-dire de catégorie géotechnique 2 au sens de la norme NF EN 1997-1 (Eurocode 7).

NB : En fonction de leur nature et du contexte certains ouvrages nécessitent des études géotechniques spécifiques réalisées dans le cadre de la norme NF P 94-500, comme par exemple :

- talus et pentes;
- assise compressible;
- nappe sub-affleurante;
- zone inondable;
- zone à risques de cavités ou de galeries;
- compactage des matériaux;
- couche de forme traitée
(étude de formulation en laboratoire - voir GTS).

II. REALISATION

II.1. Classification et définition des sols concernés

II.1.1. Classification

Elle est définie dans la norme NF P 11-300, reprise et détaillée dans le GTR (*voir annexe 1*).

Ces documents permettent de déterminer les caractéristiques et le comportement des sols, notamment en fonction des conditions hydriques et météorologiques, ainsi que les conditions de mise en œuvre.

II.1.2. Sols sensibles à l'eau

Ce sont des sols dont l'état varie en fonction de leur teneur en eau (état solide, plastique, liquide).

Une teneur en eau excessive se traduit par :

- ▼ une portance et une traficabilité médiocres;
- ▼ des caractéristiques mécaniques dégradées;
- ▼ une sensibilité au gel importante.

Une description qualitative et plus complète des effets de l'eau sur de tels sols est proposée en *annexe 3*.

NB : Le GTR considère qu'un sol est sensible à l'eau lorsque sa VBS est :

- supérieure à 0,1 : il s'agit essentiellement des sols fins argilo-limoneux - classes A1, A2 et A3, ou des sols sablo-graveleux à matrice argilo-limoneuse - classes B2, B4, B5 et B6.
- comprise entre 0,1 et 0,2, mais avec CBR inférieur à IPI : classes B3 (et B1).

Pour les matériaux graveleux (C) c'est la classe de la matrice (Ai et Bi) qui est à prendre en compte.

II.1.3. Sols évolutifs ou fragmentables

Ce sont des sols « rocheux » compacts à l'état naturel, susceptibles de se fragmenter ou de se dégrader sous l'effet de sollicitations :

- ▼ soit à court terme au cours de la mise en œuvre (extraction, transport, compactage).
- ▼ soit à long terme, après leur mise en place, notamment sous l'action de contraintes mécaniques (trafic, etc.) ou sous l'action de l'eau ou du gel.

Ils « produisent » une proportion importante d'éléments fins qui changent leur comportement et les rendent généralement sensibles à l'eau (voir § II.1.2). Il s'agit notamment :

- ▼ des craies : classe R1 ;
- ▼ des « roches argileuses » (schistes sédimentaires – marnes) : classe R3 ;
- ▼ des roches « altérées » fragmentables : classes R23 (calcaire), R43 (grès, etc.), R63 (granit, basaltes, gneiss, schistes métamorphiques, etc.).

II.2. Réutilisation des sols concernés

II.2.1. Généralités

Le présent document traite des cas courants, référencés dans les documents cités au § I.2.

Cependant il faut signaler que dans certains cas de figure les remblais, PST, arase ou couche de forme peuvent nécessiter des caractéristiques géomécaniques particulières (compacité, portance, épaisseurs, etc.) notamment dans les cas suivants :

- ▼ plateforme support de voiries et parkings pour des charges lourdes particulières.
- ▼ plateforme support de dallage (bâtiments).
- ▼ interception des remontées capillaires.
- ▼ plateforme de circulation des engins de chantier.

En l'absence de critères ou de spécifications précises, les documents cités en référence doivent être appliqués (GTR, GTS, etc.).

II.2.2. Remblais ordinaires

Le GTR définit :

- ▼ les classes et les conditions de réutilisation des sols ;
- ▼ les modalités de compactage (Q/S) pour obtenir le seuil requis : niveau q4, soit compacité $\geq 95\%$ de l'OPN.

II.2.3. Partie supérieure des terrassements (PST)

II.2.3.1. Classes d'arase

L'arase sert de support à la couche de forme et participe au dimensionnement de la plate forme. Les différentes classes d'arase doivent être définies conformément au tableau IX du GTR.

Le tableau II.2.3.1 suivant présente leurs principales caractéristiques.

Classe d'arase	AR0	AR1	AR2	AR3	AR4
Compacité (si D ≤ 20 mm)		≥ 95% de l'Optimum Proctor Normal			
Portance minimum requis «EV2» (MPa)	< 20	≥ 20	≥ 50	≥ 120	≥ 200
Commentaires	Caractéristiques insuffisantes : matériaux impropres nécessitant une substitution ou une amélioration avec, si nécessaire, un drainage	Matériau sensible à l'eau	- Matériau insensible à l'eau soit naturellement (VBS < 0,1) soit par traitement avec un réactif adapté (CBR > IPI)	Matériau insensible à l'eau graveleux ou rocheux mais posant des problèmes de réglage ou de traficabilité	
			- Matériau sensible à l'eau mais convenablement drainé		

Tableau II.2.3.1 - classes d'arase

II.2.3.2. Amélioration de l'arase

Dans le cas où les caractéristiques de l'arase naturelle sont insuffisantes, plusieurs techniques d'amélioration sont envisageables :

- Purge et substitution des matériaux impropres par des matériaux adaptés (granulaires ou traités);
- Traitement pour les matériaux humides (les objectifs à atteindre sont décrits dans le GTS) :
 - ▼ traitement par aération : scarification pour abaisser leur teneur en eau par évaporation ; cette méthode nécessite des conditions météorologiques favorables (soleil, vent, etc.), des surfaces disponibles et des délais suffisants,
 - ▼ traitement à la chaux vive (ou éventuellement avec un liant hydraulique adapté).
- Traitement avec un réactif adapté (chaux, liant hydraulique routier...) : les objectifs à atteindre sont décrits dans le GTS;
- Interposition d'un géosynthétique :
 - ▼ soit de séparation - fonction anti-contaminante, notamment en fond de purge,
 - ▼ soit de renforcement - positionné sur l'arase il permet de réduire, dans certains cas, l'épaisseur de la couche de forme granulaire (voir GTR).

La solution retenue et son dimensionnement doivent prendre en compte :

- ▼ les objectifs à atteindre (classe d'arase et éventuellement son caractère « non gélif »).
- ▼ la qualité du sol support.
- ▼ l'environnement hydraulique.
- ▼ les aspects économiques.

II.2.4. Couche de forme

II.2.4.1. Fonctions

Son rôle est essentiel pour garantir la bonne exécution et la pérennité des ouvrages qui la surmontent (dallages, assises de chaussées ou assises ferroviaires, etc.).

Elle a pour objectifs de :

- ▼ conférer à la plateforme les caractéristiques requises;
- ▼ homogénéiser les caractéristiques de la plate forme et garantir à long terme sa portance;
- ▼ protéger la PST contre les effets des intempéries (eau, gel, etc.);
- ▼ permettre un nivellement plus fin et d'atténuer les irrégularités altimétriques de l'arase;
- ▼ assurer, le cas échéant, une fonction de drainage (couche de forme granulaire);
- ▼ permettre la circulation de chantier.

II.2.4.2. Caractéristiques des matériaux constitutifs

■ Couche de forme en matériaux granulaires (voir GTR) :

- ▼ insensibles à l'eau : $VBS < 0,1$;
- ▼ dureté - gélivité (voir § 3.2.1 du GTR) : LA et / ou MDE < 45 ;
- ▼ $D \leq 100$ mm (à déterminer en fonction de l'épaisseur de la couche et des tolérances de réglage).

■ Couche de forme en matériaux traités à la chaux et/ou au liant hydraulique (voir GTS) :

- ▼ circulation possible si $R_c > 1$ MPa ;
- ▼ insensibles à l'eau (R_c immersion / $R_c > 0,8$ ou $0,6$ selon VBS) et au gel ($R_{tB} > 0,25$ MPa) ;
- ▼ caractéristiques mécaniques : au moins classe 5 ;
- ▼ $D \leq 100$ mm (critère dépendant des tolérances de réglage de la plateforme et des caractéristiques du malaxeur).

II.2.4.3. Dimensionnement de la couche de forme

Le dimensionnement doit permettre de satisfaire aux critères de performances requis dans le marché.

En l'absence de critères ou de spécifications précises (à ce sujet voir § II.2.1), les documents cités en référence (GTR, GTS,...) doivent être appliqués.

Le tableau II.2.4.3 présente les principales caractéristiques associées aux différentes classes de plateforme.

Caractéristiques	Nature de la couche de forme	Classe de plateforme		
		PF2	PF3	PF4 *
Compacité (si $D \leq 20$ mm)		$\geq 98,5\%$ de l'Optimum Proctor Normal		
Portance minimale «EV2» (MPa)		≥ 50	≥ 120	$\geq 200^*$
Valeur maximale de déflexion «d» (en mm)	couche de forme granulaire	$\leq 200 / 100$	$\leq 90 / 100$	$\leq 60 / 100$
	couche de forme traitée à la chaux et/ou au liant hydraulique	$\leq 80 / 100$	$\leq 60 / 100$	$\leq 50 / 100$

* : un matériau granulaire ne permet que rarement d'atteindre ce niveau de performance qui doit être validé par une planche de convenance.

Tableau II.2.4.3 - Classes de plateformes

II.3. Conception du complexe « PST /Couche de forme »

II.3.1. Drainage

La pérennité des caractéristiques d'une plateforme reposant sur un sol sensible à l'eau nécessite un drainage efficace à toutes les étapes de la construction et de la vie de l'ouvrage :

- ▼ création de pentes et d'exutoires afin d'éviter les stagnations des eaux superficielles;
- ▼ mise en place de tranchées, épis et couches drainants, pour rabattre la nappe sous la plateforme ou, si nécessaire, l'arase, pour les eaux internes.

NB : Pendant les travaux, l'entreprise doit prévoir un assainissement provisoire visant à limiter les effets des intempéries (pentes, fossés, etc.).

Pour la phase définitive, le concepteur doit prévoir, si nécessaire après une étude hydraulique spécifique, un assainissement de la structure « PST - couche de forme » avec :

- ▼ des dispositions constructives adaptées au contexte hydrogéologique, à la nature et à la géométrie de la plateforme;
- ▼ des dispositifs de visite du système de drainage.

Les dispositions décrites ci-après ne concernent que le drainage des eaux superficielles.

II.3.2. Cas de la couche de forme granulaire

Elle est considérée comme perméable, la collecte des eaux se fait donc au niveau de l'arase. Les épaisseurs de couche de forme conseillées ci-après concernent uniquement les plates formes sous-bâtimements ou sous dallages mais le dimensionnement mécanique (surcharges particulières) peut nécessiter une épaisseur plus importante.

Par ailleurs les zones de circulation (plate formes utilisées comme pistes de chantier, voiries, parkings, etc.) doivent être dimensionnées conformément au GTR.

II.3.2.1. Plateforme horizontale sur une arase horizontale

En l'absence d'exutoire gravitaire naturel, la mise en place d'une couche de forme granulaire d'environ 0,50 m d'épaisseur est nécessaire, avec, éventuellement, à sa base un géosynthétique de séparation.

II.3.2.2. Plateforme horizontale sur une arase pentée

Pour prévenir toute stagnation d'eau, on crée, au niveau de l'arase, des pentes « en toit ». L'horizontalité de la plate forme est rétablie par une épaisseur variable de la couche de forme granulaire : 0,20 m sur les lignes de faîtage est généralement suffisant pour maîtriser les effets des eaux météoriques.

La pente visée est en principe de 1,5 % le long des « toits » et de 0,5 % pour le fil d'eau des « fossés » le long des noues (Figures n° II.3.2.2.a et b).

En fonction des distances entre les lignes de faîtage, il peut être nécessaire de placer des drains crépinés (agricoles ou routiers) dans les « fossés ». Une nappe de géotextile de séparation, positionnée sur l'arase, peut être utile (voir § II.2.3.2)

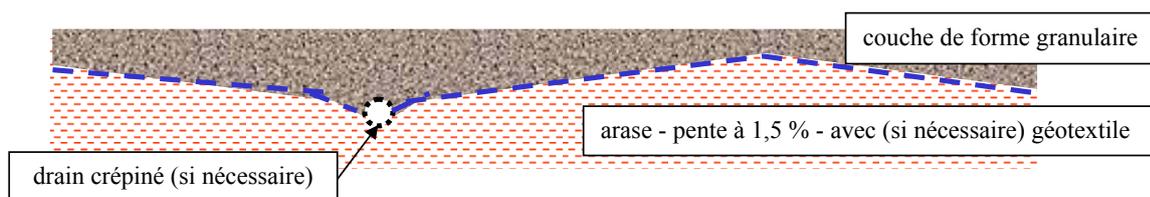


Figure n° II.3.2.2.a – schéma de l'arase avec pentes en toit

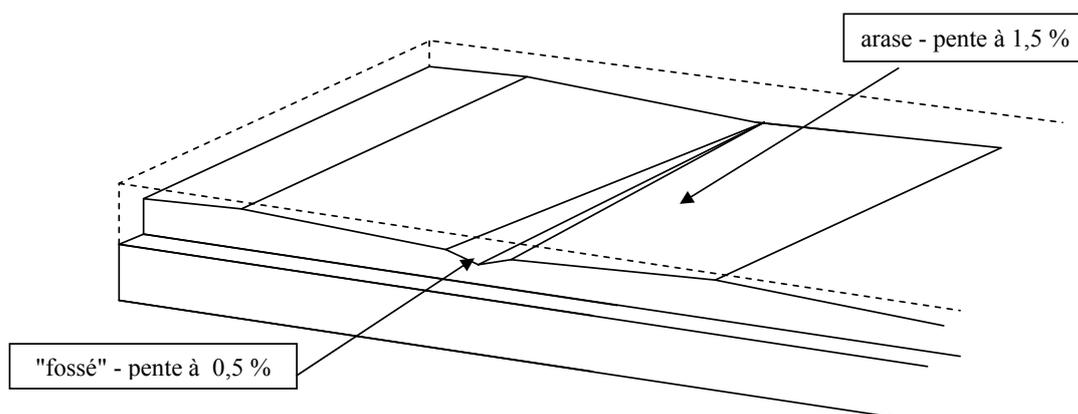


Figure n° II.3.2.2.b – schéma de l'arase avec pentes en toit

Cette méthodologie de principe nécessite une définition détaillée, préalable à l'exécution, pour éviter que des « détails » n'en compromettent l'efficacité :

- ▼ la géométrie de la plate forme doit être déterminée en fonction des fondations qui ne doivent pas constituer ultérieurement des zones de barrage ou de stockage vis-à-vis de l'eau.
- ▼ les tranchées des réseaux enterrés pénétrant dans l'arase doivent présenter un fil d'eau penté vers un exutoire.
- ▼ l'exécution des travaux doit être conduite à partir de l'exutoire, en progressant de l'aval vers l'amont.
- ▼ l'arase doit être compactée et « fermée » par passage d'un cylindre lisse ou d'un rouleau à pneus, puis recouverte le plus rapidement possible par la couche de forme de manière à prévenir toute action néfaste des précipitations.

II.3.2.3. Plateforme et arase à pente unique

Dans ce cas l'eau ne stagne pas dans la couche de forme. La couche de forme peut alors être relativement plus mince : son épaisseur minimale pour protéger l'arase doit être de l'ordre de 0,30 m pour une pente de 1%.

Si la longueur du trajet parcouru par l'eau avant d'atteindre un exutoire est importante, il est souhaitable de positionner à la base de la couche de forme des drains crépinés (agricoles ou routiers), ou une sous-couche de forme différenciée en matériau de plus forte perméabilité que la couche de forme.

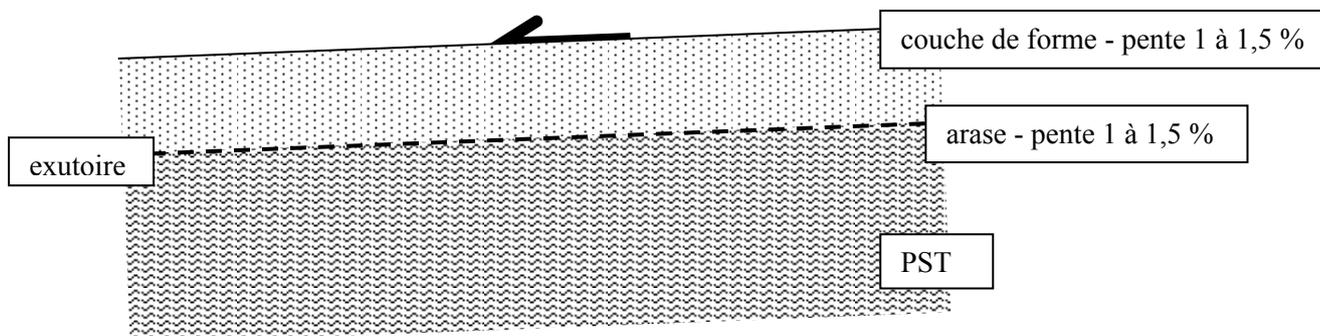


Figure n° II.3.2.3 – cas d'une arase de plateforme avec pente unique

II.3.3. Cas de la couche de forme traitée

La plateforme doit être protégée, dès la fin du traitement, contre l'évaporation ou les infiltrations par un enduit de cure, éventuellement gravillonné dans le cas où une circulation est envisagée (mono, bi ou tri-couche en fonction de l'intensité du trafic – voir GTS).

L'enduit de cure ne constitue pas une étanchéité mais une protection.

La couche de forme traitée est considérée comme peu perméable au bout de quelques jours : en conséquence la circulation des eaux superficielles se fera donc essentiellement sur la plate forme, et l'arase se trouvera protégée des eaux superficielles.

Elle ne participe donc pratiquement pas au système de drainage, et son épaisseur ne dépendra que de son dimensionnement mécanique.

II.3.3.1. Plateforme horizontale

Dans ce cas de figure, le plus fréquent sous bâtiment, il est impératif de protéger ou de recouvrir la plateforme dans les meilleurs délais : en effet si la couche de forme traitée reste exposée pendant plusieurs mois aux intempéries, l'eau peut imbiber progressivement la PST et avoir des effets néfastes.

II.3.3.2. Plateforme pentée

Il est préférable de concevoir une telle structure, surtout dans le cas de plates formes de grande surface :

- ▼ soit une pente unique.
- ▼ soit des pentes en « toit », identiques à celles réalisées sur l'arase dans le cas de la couche de forme granulaire (voir § II.3.2.2), avec des pentes qui peuvent être réduites.

Si nécessaire, l'horizontalité de la plateforme peut être restaurée par la mise en place d'une couche de réglage en grave de granulométrie adaptée (0 / 20,0 / 31,5, etc.).

La couche granulaire de réglage assure également une protection de la couche traitée.

II.4. Cas particuliers

II.4.1. Fouilles des fondations

Elles doivent recevoir le béton le plus rapidement possible, après leur ouverture, pour éviter la « pollution » ou l'altération du fond de fouille.

Cependant pour éviter l'arrivée et l'accumulation d'eau dans les fouilles il est utile de mettre en œuvre des mesures préventives telles que :

- ▼ cordons périphériques.
- ▼ remblaiement de la fouille avec un matériau de perméabilité comparable à celle du terrain environnant si le béton a été mis en place.

II.4.2. Remblais « techniques » contre ouvrage

Les matériaux doivent être également méthodiquement compactés en maîtrisant la teneur en eau, comme pour un remblai courant :

- ▼ si la fouille est suffisamment large (> 2,00 m environ), conformément au GTR.
- ▼ si la fouille est étroite, conformément aux prescriptions du guide « Remblayage des tranchées ».

Le type de compacteur doit être compatible avec les zones d'évolution : respect des ouvrages (murs, complexes de drainage, etc.), épaisseur des couches, etc.

II.4.3. Substitution dans le cas d'un sol sujet au « gonflement / retrait »

Ces sols présentent une variation de volume significative en fonction des conditions météorologiques et hydrologiques : un retrait lorsqu'ils sont soumis à une dessiccation intense (période de sécheresse), puis un gonflement au retour de conditions humides.

Sous une plateforme support de fondations ou de dallage, ces matériaux doivent être purgés (voir § II.4.2.2). L'épaisseur de la purge doit être dimensionnée dans le cadre d'une étude spécifique.

Les figures n° II.3.2.2.a et b proposent des dispositions permettant de garantir la pérennité de l'ouvrage, notamment pour des ouvrages « courants » :

- La profondeur minimale de la purge doit garantir un « matelas » de matériaux de substitution, sous semelles, d'au moins 0,30 m, voire plus en fonction des conditions géotechniques particulières.
- Les matériaux de substitution sont conformes à ceux décrits précédemment - matériaux insensibles à l'eau (naturellement ou traités) - et doivent permettre d'atteindre les critères contractuels requis.
- Un débord de la substitution d'au moins 3,00 m au-delà des fondations extérieures est nécessaire pour mettre toute la structure en dehors de la zone de gradient de « gonflement-retrait » ; ce débord peut être utilement recouvert d'un revêtement limitant les infiltrations.
- le fond de forme (sol sujet au « gonflement / retrait ») doit être :
 - ▼ compacté et « fermé » à l'aide d'un compacteur à bille lisse ;
 - ▼ penté vers un exutoire (si nécessaire avec des drains crépinés) ;
 - ▼ protégé par une géomembrane étanche qui l'isole des phénomènes de « sécheresse / humidification » et des fuites accidentelles de réseaux ; un géotextile de type aiguilleté est généralement nécessaire pour protéger la géomembrane.

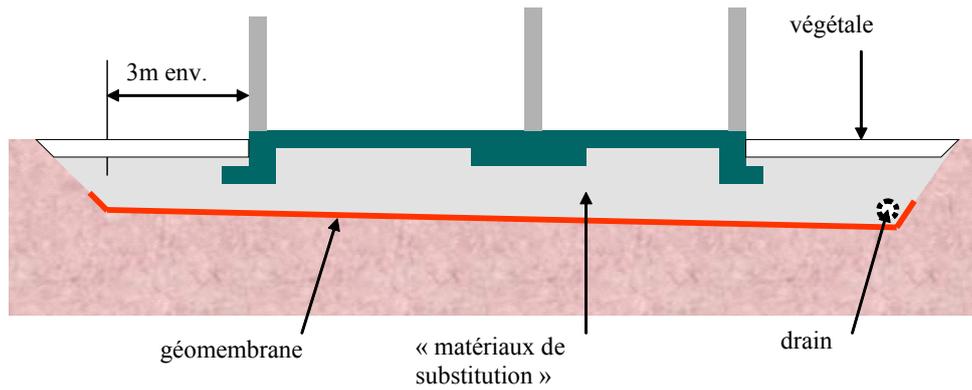


Figure n° II.4.3

II.4.4. Prévention des remontées capillaires

Dans les zones où la cote de l'arase est proche du niveau de la nappe phréatique ou d'une zone humide, des remontées capillaires peuvent se produire et être la cause de dégradations des performances des remblais ou de la plateforme.

Pour éviter les remontées capillaires, une solution qui ne compromet pas la traficabilité est schématisée sur la figure n° II.4.4 :

- ▼ sur l'arase est placé un géosynthétique de séparation, recouvert par une couche de gravier dont le diamètre d_{10} (diamètre correspondant à 10% de passant) est supérieur à 5mm ; cette couche est d'épaisseur décimétrique ; elle est recouverte par un deuxième géosynthétique de séparation.
- ▼ sur ce deuxième géosynthétique est rapportée une couche insensible à l'eau (GNT, sol traité, etc.) dont l'épaisseur est fonction des objectifs de performances mécaniques et de la nature des sols constitutifs de la PST.

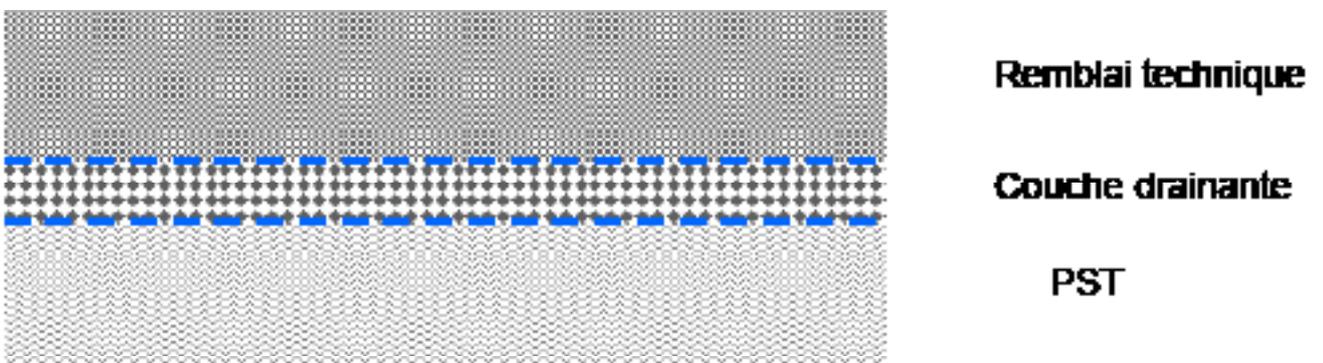


Figure n° II.4.4

II.5. CRITÈRES DE PERFORMANCE REQUIS SUR LA PLATEFORME

Les documents de référence (voir § 1.2) définissent les caractéristiques à atteindre, les essais normalisés à utiliser, ainsi que les seuils requis et, pour certains, décrivent les moyens de les obtenir.

II.5.1. Compacité de la couche de forme

Seuil requis (GTR) : niveau de compacité « q3 », soit :

- ▼ 98,5 % de l'OPN : moyenne sur l'épaisseur de la couche de forme.
- ▼ 96 % de l'OPN en fond de couche.

La teneur en eau à la mise en œuvre doit être proche de la teneur en eau de l'OPN.

L'appareil le plus couramment utilisé pour mesurer la teneur en eau et la densité sèche en place, est le « gamma densimètre » (de marque Troxler, Humbolt, Campbell, etc.).

En fonction des objectifs fixés par le marché, des seuils plus sévères peuvent être requis, notamment, par exemple, en fonction des tassements admissibles au niveau de la couche de forme.

II.5.2. Déformabilité de la plateforme

Plusieurs essais de caractérisation sont disponibles :

- ▼ mesure du module de déformation EV2 :
 - essai à la plaque de 600 mm ;
 - dynaplaque
 - portancemètre ;
 - plaque dynamique légère (pour des zones inaccessibles aux autres moyens).

NB : Dans le cas d'une couche de forme granulaire sous dallage, la norme NF P 11-213, ou DTU 13.3, exige l'essai à la plaque.

- ▼ mesure du coefficient de réaction de Westergaard : plaque de 600 mm ou de 750 mm.
- ▼ mesure de la déflexion : poutre Benkelman - déflectographe – curviamètre.

NB : Dans le cas de couches traitées aux liants hydrauliques, la mesure de la déflexion est plus pertinente que l'essai à la plaque.

Seuils minimaux requis (ils correspondent à une plate forme de niveau PF2) :

Essais		Normes	Valeurs	Référence
Chargement statique	Plaque	NF P 94-117.1	EV2 ≥ 50 MPa	GTR
Chargement dynamique	Dynaplaque	NF P 94-117.2		
	Portancemètre			
Chargement statique	Westergaard	NF P 94-117.3	Kw ≥ 50 MPa / mètre	DTU 13.3
Déflexion sous un essieu de 13 tonnes	Poutre Benkelman ou Défectographe	NF P 98-200	d ≤ 200 / 100 mm (couche de forme granulaire)	Catalogue des structures de chaussées
			d ≤ 80 / 100 mm (couche de forme traitée)	

II.5.3. Tolérance géométrique

Sur une surface donnée, elles sont fonction, et donc déterminées par :

- ▼ le type de couche sous-jacente (couche de forme pour l'arase - couche de chaussées ou dallage pour la couche de forme).
- ▼ la largeur et la pente de la surface transversale à régler.
- ▼ le type d'engin ou d'équipements utilisés pour le réglage de cette surface.

Par exemple une tolérance altimétrique inférieure ou égale au centimètre ne pourra pas être obtenue avec une niveleuse mais seulement avec une raboteuse, notamment si la surface transversale est importante.

A titre indicatif :

Niveau	Epaisseur de la couche	Nivellement altimétrique	Engin conseillé
Arase (PST)	Selon spécifications (GTR - GTS) ou critères du marché	± 5 cm	Niveleuse
Plateforme (couche de forme)	0 à + 1 ou 2 cm / épaisseur nominale	± 3 cm (GTR)	Niveleuse asservie (avec équipements laser - GPS...)
		± 1 cm (DTU 13.3)	Raboteuse asservie (avec équipements laser - GPS...)

II.6. PLAN D'ASSURANCE QUALITÉ

Pour la réalisation des travaux de terrassements et de couche de forme (et d'assainissements s'ils font partie de son marché), l'entreprise doit élaborer, pendant la période de préparation, un PAQ (voir le guide SETRA / LCPC « *Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassements* »)

Ce PAQ, doit tenir compte du Schéma Directeur de la Qualité, établi par le Maître d'œuvre et des pièces du marché. Il doit décrire principalement :

- ▼ l'organisation de l'entreprise.
- ▼ les méthodes et les moyens utilisés pour réaliser les travaux.
- ▼ le contrôle intérieur (interne et externe) : organisation et fonctionnement.
- ▼ un plan de contrôle : nature et nombre des mesures à réaliser.

Un exemple de plan de contrôle, rappelant les principaux contrôles et essais, est présenté en *annexe 2*.



ANNEXES

- 1 - Classification des sols : principaux paramètres**
- 2 – Plan de contrôle**
- 3 - Effets de l'eau sur un sol fin : description qualitative**
- 4 - Effets de l'eau sur un sol fin : éléments quantitatifs**

ANNEXE 1 - CLASSIFICATION : PARAMETRES PRINCIPAUX

■ Paramètres de nature :

Critères	Influences
D (mm) : la dimension du plus gros élément	Mise en œuvre - compactage - traitement
Proportion d'éléments inférieurs à 0,08 mm	Propreté - sensibilité à l'eau
Proportion d'éléments supérieurs à 50 mm	Séparation sols fins - sableux - graveleux
Proportion d'éléments supérieurs à 2 mm	Séparation sables - graves
Valeur de bleu ou indice de plasticité	Argilosité - sensibilité à l'eau

■ Paramètres de comportement mécanique de la fraction granulaire (> 6,3 mm) :

Critères	Influences
Coefficient Los Angelès LA	Résistance aux chocs
Coefficient micro Deval humide MDE	Résistance à l'usure

■ Paramètres d'état (essentiellement pour les sols sensibles à l'eau) : on distingue 5 états d'humidité :

Etats	Réutilisations possibles (conditions technico-économiques " normales ")
Très sec " ts "	Non
Sec " s "	Oui avec dispositions particulières : soit humidification, soit compactage intense, soit utilisation en remblai de faible hauteur...
Moyen " m "	Oui
Humide " h "	Oui avec dispositions particulières : soit traitement, soit utilisation en remblai de faible hauteur, soit aération...
Très humide " th "	Non sauf dispositions spécifiques adaptées (traitement, essorage...) permettant d'obtenir au moins l'état «h»

■ Les paramètres permettant de les différencier sont :

Paramètres	Application conseillée (GTR)
Teneur en eau naturelle : position par rapport à la teneur en eau de l'Optimum Proctor Normal (OPN)	Etats " ts ", " s ", " m "
Indice de consistance	Sols fins très argileux (80 % d'éléments < 400 µm)
IPI (Indice Portant Immédiat)	Etats " m ", " h ", " th " exprime la portance d'un sol c'est à dire son aptitude à plus ou moins bien supporter la circulation des engins

ANNEXE 2 - PLAN DE CONTROLE

Aide à la définition du contenu

Période	Contrôles	Essais	Commentaires
Préparation du chantier	Hypothèses géotechniques du marché	Examen critique des pièces du marché	Le programme de la reconnaissance complémentaire sera fonction du contexte du chantier.
	Reconnaissance géotechnique complémentaire par sondages	Identification des sols (GTR) ▼ Courbes Proctor / IPI Insensibilité à l'eau : - VBS - ou IPI / CBRi Test d'aptitude au traitement (NF P 94-100) Etudes de traitement (GTS) Réutilisation des matériaux en fonction de leur destination : grilles de décision	Selon les prescriptions du marché, il pourra prévoir : - soit une simple reconnaissance de surface, - soit des sondages à la pelle, - soit, si nécessaires, des essais géotechniques in situ tels que sondages pénétrométriques, pressiométriques ou autres.
Réalisation du chantier	Qualité des matériaux	Vérification des identifications (GTR) sur échantillon de terrain selon la destination : - teneurs en eau - VBS - courbe granulométrique - etc	La nature et la fréquence sont : - soit précisés dans le Marché - soit définies dans le PAQ pendant la période de préparation en accord avec le Maître d'œuvre.
	Qualité de la mise en œuvre des remblais	Compacités : - contrôle continu : Q / S - contrôles aléatoires : . nucléo-densimètre (si D ≤ 20 à 31,5 mm) . pénétromètre (si épaisseur testée > 0,50 m) Portances : EV2	
	Qualité du traitement	Conformité des liants livrés : - autocontrôles transmis par le fabricant - test de réactivité de la chaux Contrôles des teneurs avant traitement Contrôles du dosage de liants par pesée à la bêche Contrôles visuels du malaxage: - finesse de la mouture - épaisseur de la couche traitée IPI / CBR sur échantillon traité prélevé sur le terrain	
Réception du chantier (points d'arrêt)	Qualité des plateformes	Compacités : - nucléodensimètre (si essai Proctor réalisable : D ≤ 20 à 31,5 mm) - pénétromètre dynamique (si épaisseur testée > 0,50 m) Essais à la plaque, Mesures de déflexions, Essais Westergaard	La nature et la fréquence sont : - soit précisés dans le marché - soit définies dans le PAQ pendant la période de préparation en accord avec le Maître d'œuvre. Si le marché le précise, l'entreprise rédigera un dossier de récolement qui comprendra un état des contrôles et essais réalisés
	Géométrie des ouvrages	Levés et contrôles topographiques	

NB : l'entreprise réalisera elle-même ces contrôles et essais ou mandatera un bureau d'études spécialisé pour en réaliser tout ou partie.

ANNEXE 3 - EFFETS DE L'EAU SUR UN SOL FIN : DESCRIPTION QUALITATIVE

Nous mettrons de côté certaines argiles, dont les particules présentent la propriété de pouvoir absorber de l'eau, en changeant alors d'épaisseur, pour n'aborder que des sols dont les grains constitutifs ne présentent pas de variations dimensionnelles notables. Sont évidemment exclus aussi les sols évolutifs.

Un sol fin parfaitement sec présente l'aspect pulvérulent d'une farine

Si les vides entre les grains sont essentiellement occupés par de l'air, mais avec présence d'eau, cette eau est le plus souvent localisée au voisinage des points de contact entre les grains, sous forme de ménisques ; au sein des ménisques, l'eau est en état de succion (pression négative) et exerce une force d'attraction entre grains voisins, donc un collage qui conditionne le comportement mécanique ; on parle de cohésion capillaire, d'autant plus importante que le sol est riche en grains de petite taille.

Si le sol est saturé, le comportement mécanique est directement conditionné par la pression interstitielle. Une notion importante est la distinction entre la contrainte totale et la contrainte effective : la *contrainte totale* subie par un échantillon de sol saturé est répartie entre la *contrainte effective* subie par le squelette granulaire et la *pression interstitielle* subie par l'eau ; la perméabilité d'un sol fin étant très faible, et l'eau pouvant être considérée comme incompressible par rapport au squelette granulaire, une variation « rapide » de la contrainte totale se traduit avant tout par une variation de la pression interstitielle ; pour une contrainte totale donnée, plus la pression interstitielle positive est importante et plus la contrainte effective est réduite, donc moins le sol présente de résistance au cisaillement ; inversement, plus la pression interstitielle négative (succion) est importante, plus la contrainte effective est élevée, et plus le sol est résistant au cisaillement.

Reste le cas d'un sol dont le degré de saturation est élevé ; l'eau constitue un fluide continu emprisonnant des bulles d'air, et se comporte alors comme un fluide compressible ; on reviendra sur ce point à propos des remblais.

Dessiccation progressive d'une boue

Prenons une couche mince de boue constituée de grains de sol fin en suspension dans l'eau, et examinons l'effet d'une dessiccation progressive par évaporation ; la consistance liquide laisse progressivement la place à celle d'une pâte à modeler (comportement « plastique ») ; puis on constate que le matériau se craquelle en morceaux dont le volume diminue, et qui deviennent de plus en plus « durs ».

La couche étant de très faible épaisseur, les contraintes totales sont négligeables. Les phénomènes constatés de retrait et de durcissement s'expliquent par l'évolution de la pression interstitielle résultant du départ d'eau et un effet de membrane à l'interface eau-air (connu sous le nom de tension superficielle).

Le squelette granulaire se trouve dans des conditions comparables à celles de grains de café dans un emballage au sein duquel on crée le vide ; les grains de café sont de plus en plus serrés au fur et à mesure du pompage de l'air, le serrage réduit le volume du paquet qui, simultanément, présente une fermeté de plus en plus importante. La comparaison trouve ses limites dans le fait que le vide ne peut pas créer de différence de pression supérieure à 0,1MPa, alors que la succion peut atteindre des valeurs considérables, d'autant plus importantes que les pores sont de petits diamètres (dans un silt argileux, on peut rencontrer des succions de plusieurs MPa).

Comme la contrainte totale est négligeable, la contrainte effective est égale et opposée à la succion (si la succion atteint -1MPa, la contrainte effective de compression du squelette granulaire atteint donc 1MPa) ; sous cette contrainte, le squelette granulaire se contracte, c'est le phénomène de retrait, et gagne une forte résistance au cisaillement, donc un comportement mécanique de matériau « raide » (une succion égale à -1MPa génère une résistance en compression simple de l'ordre de 2MPa !).

Si on met un terme à la dessiccation, et qu'on met l'échantillon en contact avec de l'eau, la succion se dissipe, donc le matériau « gonfle » et perd sa consistance.

Si au contraire on poursuit la dessiccation, à partir d'une valeur de succion qui dépend de la taille des pores, l'air pénètre dans les plus gros pores du réseau capillaire, et on n'a plus affaire à un matériau saturé ; le retrait évolue bien plus lentement avec la diminution de teneur en eau ; la transition est qualifiée de limite de retrait.

Incidence de la profondeur

Si, au lieu de considérer le matériau tout à fait en surface, comme nous venons de le faire, nous nous penchons sur le cas du matériau saturé situé à quelques décimètres au-dessous, en l'absence de tout développement de succion, la contrainte effective subie par le squelette granulaire résulte du poids déjaugé des sols qui le recouvrent.

A partir d'un état initial de succion, l'imbibition qui dissipe la succion provoquera un gonflement et une chute de consistance, qui resteront limités par le confinement (contrainte effective issue du poids du sol de recouvrement). Un lagunage appliqué à une couche superficielle de sol fin, initialement compact car bénéficiant d'une succion, génèrera ainsi :

- ▼ un état de boue au voisinage immédiat de la surface ;
- ▼ un état pâteux sur un ou plusieurs décimètres ;
- ▼ une chute des caractéristiques mécaniques de moins en moins importante au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface.

L'évolution des matériaux ne dépend pas de l'épaisseur de la lame d'eau du lagunage.

Cas d'un déblai dans un sol fin

La détente d'un squelette granulaire s'accompagne d'une augmentation de volume. L'eau peut être considérée comme incompressible par rapport au squelette granulaire d'un sol.

Lorsque des terrassements diminuent la charge supportée par un sol fin, donc lorsqu'il y a une diminution de la contrainte totale, le squelette granulaire ne peut se détendre qu'avec une augmentation du volume des vides entre les grains, donc avec un apport d'eau. Ainsi, en l'absence de tout échange hydrique, la diminution de la contrainte totale se traduit par une succion, et la contrainte effective ne change guère ; le matériau présente la même consistance que celle qui découlerait, en l'absence de toute pression interstitielle, du serrage par le poids des matériaux qui le recouvraient initialement.

Le plus souvent, en conditions météo favorables, les fonds de fouille de terrassements généraux sur quelques mètres de profondeur dans des sols fins exhibent un comportement mécanique satisfaisant ; mais comme cette consistance est associée à un état de succion, on comprend aisément que toute eau stagnant en surface, en dissipant la succion, conduira à une chute notable des performances (ramollissement) et à un soulèvement progressif du fond de fouille.

Dans certains contextes, la succion naturelle peut être considérable, donc le sol fin de consistance très ferme ; ce sol fin étant de très faible perméabilité, on pourrait naïvement penser qu'une pluie ne peut pas en affecter le comportement au-dessous des premiers millimètres à partir de la surface ... mais ce serait oublier que les transferts d'eau sont de débits proportionnels à la différence de pression et que la succion est à l'origine de « pompes » très efficaces (les « gradients » sont considérables) et il faut peu de temps pour que la pluie modifie significativement le comportement mécanique sur plusieurs décimètres.

Cas d'un remblai en sol fin

On a cette fois affaire à un matériau non saturé :

■ Si le degré de saturation est petit à la mise en œuvre, l'eau est organisée en ménisques assurant un collage des grains entre eux ; ces collages s'opposent au réarrangement des grains lors du compactage, et favorisent l'organisation d'équilibres locaux qui peuvent être compromis à tout moment par un apport d'eau dissipateur des collages ; on parle alors « d'effondrement de structure sous imbibition », l'apport d'eau a pour effets d'une part une réduction de volume donc des tassements, et d'autre part une perte de consistance ;

■ Si le degré de saturation est élevé à la mise en œuvre, l'air est organisé en bulles et tout se passe comme si l'eau était devenue compressible ; on constate le phénomène de « matelassage » lors du compactage : la contrainte appliquée réduit le volume en comprimant l'air (donc en augmentant la pression interstitielle) et dès après le passage du compacteur, le matériau se détend (on a affaire à une sorte de « suspension hydropneumatique ») ; lorsqu'on rapporte d'autres couches de remblai, leur poids se répartit entre une augmentation de contrainte effective et une augmentation de pression interstitielle dont la dissipation est ralentie par la présence de bulles d'air qui réduisent la perméabilité comme autant d'obstacles dans le réseau des pores entre les grains de sol (avec en corollaire d'éventuels problèmes de stabilité des talus).

Si la surface d'un remblai en sol fin présente de bonnes performances mécaniques, c'est généralement le résultat du collage des grains dans un contexte de faible degré de saturation ; une imbibition ultérieure ne peut que faire chuter considérablement ces performances.

Critères de performance d'une plateforme ?

On se réfère usuellement à des essais de plaque, traduits soit en coefficient de Westergaard, soit en module EV2. Mais les résultats de ces essais, mis en œuvre sur un sol fin, ne sont représentatifs que pour l'essai de teneur en eau des couches superficielles existant au moment des essais.

Ainsi, si l'on teste une plateforme en remblai silteux mis en œuvre par beau temps avec une teneur en eau très faible, les résultats des essais de plaque sont bons tant qu'il n'y a pas d'épisode pluvieux; mais si on réalise de nouveaux essais après une semaine de pluie, on déplore une division par quatre ou cinq des résultats ... et il est fort probable que, de plus, le matériau soit effondrable sous imbibition. De même, une plateforme en déblai, après dépose de plusieurs mètres de couverture, exhibera des résultats plus ou moins satisfaisants ... tant que durera le beau temps.

Autrement dit, les essais à la plaque ne fournissent pas des caractéristiques intrinsèques à long terme sur des sols fins - sauf s'ils ont été rendus insensibles à l'eau par un traitement adapté ; même en supposant que la surface soit étanchée par la réalisation du projet sans qu'ait eu lieu la moindre pluie entre le moment des essais de plaque et l'achèvement de la construction, l'équilibre hydrique à long terme sera différent de celui qui existait au moment des essais, au gré de transferts d'eau depuis des couches profondes (en phase vapeur comme en phase liquide) et des fuites des réseaux enterrés. On ne pourrait se fier à des essais de plaque pour caractériser à long terme la surface d'une plateforme en sols sensibles à l'eau que si l'on savait créer une fourchette d'états de teneur en eau enveloppe des teneurs en eau susceptibles d'exister pendant le service de l'ouvrage, et la même contrainte de confinement !

En fait, si les essais de plaque ne sont pas pertinents pour caractériser les sols fins à long terme, c'est qu'ils ne sont pas un matériau adéquat pour constituer une plateforme, du fait de leur sensibilité à l'eau. Les plateformes proposées dans ce document sont composées de matériaux insensibles à l'eau (naturellement ou par traitement adapté) : les essais à la plaque peuvent alors devenir pertinents (sous certaines conditions).

A propos du rôle des pentes

Une plateforme de bâtiment est le plus souvent horizontale, peut être encaissée sous le niveau du TN, et peut être de grande largeur. A l'opposé, une plateforme routière est étroite et présente une pente transversale vers des fossés et un exutoire.

Dans le premier cas, l'eau de pluie stagne sur la surface si l'on n'adopte pas des dispositions constructives spécifiques, tandis que dans le deuxième cas, il n'y a d'eau en surface que pendant qu'il pleut.

Or l'imbibition d'un sol fin n'est pas instantanée, puisqu'il est peu perméable (rappelons toutefois qu'une succion élevée génère des gradients importants, donc de véritables pompes ...). De ce fait, une plateforme routière en sol fin sera le siège d'une perte de consistance sur quelques centimètres après une pluie, et retrouvera des performances de surface « correctes » après quelques heures d'ensoleillement, alors qu'une plateforme de bâtiment sera plus gravement et plus durablement affectée.

Il existe toutefois un cas de figure préjudiciable aussi pour les plateformes routières : la fonte d'un manteau neigeux, qui assure une présence d'eau en continu sur une durée bien plus importante que la pluie. Les terrassiers adoptent d'ailleurs généralement des dispositions de protection de ces plateformes si elles sont appelées à subir une période hivernale (ou bien sont conduits à déposer quelques décimètres pour une remise en état après l'hiver). A noter aussi que le gel peut être lourd de conséquences sur des silts « gélifs » (au sein desquels peut se développer une cryosuccion).

ANNEXE 4 - EFFETS DE L'EAU SUR UN SOL FIN : ELEMENTS QUANTITATIFS

Si les essais in situ sont incontestablement très utiles, il ne faut surtout pas perdre de vue qu'ils ne fournissent généralement qu'une indication de comportement mécanique d'un sol dans les conditions qui existent au moment de l'essai, et sont pour la plupart des essais de faible durée. Dans les cas de sols fins, ils nécessitent toujours une interprétation avisée, et au moins quelques essais d'identification pour apprécier la représentativité des résultats in situ et la variabilité dans le temps des paramètres mesurés (dans la négative, il sera indispensable d'investiguer plus avant, en général au moyen d'essais de laboratoire).

Risques liés aux sols fins non traités

Les sols fins non traités ne sont pas tous acceptables sous des plateformes. En particulier, il convient de distinguer ceux pour lesquels les variations de volume découlent des effets de la pression interstitielle et ceux qui présentent un réel caractère gonflant ; ces derniers sont évidemment proscrits, les dispositions constructives présentées ci-dessus étant inefficaces dans leur cas, sachant que, quelles que soient les dispositions adoptées pour prévenir une alimentation en eau, on doit s'attendre à ce que ces dispositions ne fassent que limiter ou retarder une alimentation aux conséquences inéluctables.

Les critères de $VBS < 6$ et $I_p < 25$ suffisent dans les cas courants pour apprécier la dangerosité résultant de l'argilosité, mais pour des projets sensibles, il peut être utile de quantifier les variations dimensionnelles qui peuvent être préjudiciables à l'ouvrage, et l'évolution des performances mécaniques avec les variations de teneur en eau.

On rappellera ici que les dispositions constructives présentées au chapitre 6 ont d'abord pour objet de limiter les conséquences de conditions météo défavorables sur des sols fins, pas d'obtenir de ces sols des performances compatibles avec les exigences de n'importe quel projet.

Par ailleurs, il arrive que des sols, bien que caractérisés par des valeurs de VBS ou d' I_p beaucoup plus petites que les seuils cités ci-dessus, rencontrés après un déblai conséquent, présentent un comportement gonflant suffisant pour générer des déboires.

Effondrement sous imbibition

Qu'il s'agisse d'un remblai ou d'un sol en place, il convient tout d'abord de ne pas construire sur un matériau susceptible d'être effondrable sous imbibition. Ce phénomène est assez rare dans les sols en place, mais existe par exemple dans des lœss. Dans les remblais, il est malheureusement courant.

Dans le cas d'un remblai, en première approximation, on peut se référer au schéma des essais Proctor (voir figure n° A4-1.a). Les essais Proctor Normal et Modifié fournissent deux points d'optima, et on peut imaginer des essais complémentaires à plus petite et plus grande énergie ; on pourrait tracer la « ligne des optima » ; à gauche de la ligne des optima, le couple densité sèche / teneur en eau est dit « côté sec », et à droite il est dit « côté humide ». Un matériau est d'autant plus effondrable sous imbibition qu'il est du côté sec et éloigné de la ligne des optima (et aussi de moindre compacité) ; le matelassage correspond au côté humide.

Au risque d'insister lourdement, il ne suffit pas de se préoccuper de performances mécaniques pour être à l'abri de l'effondrement sous imbibition, il faut aussi maîtriser la teneur en eau.

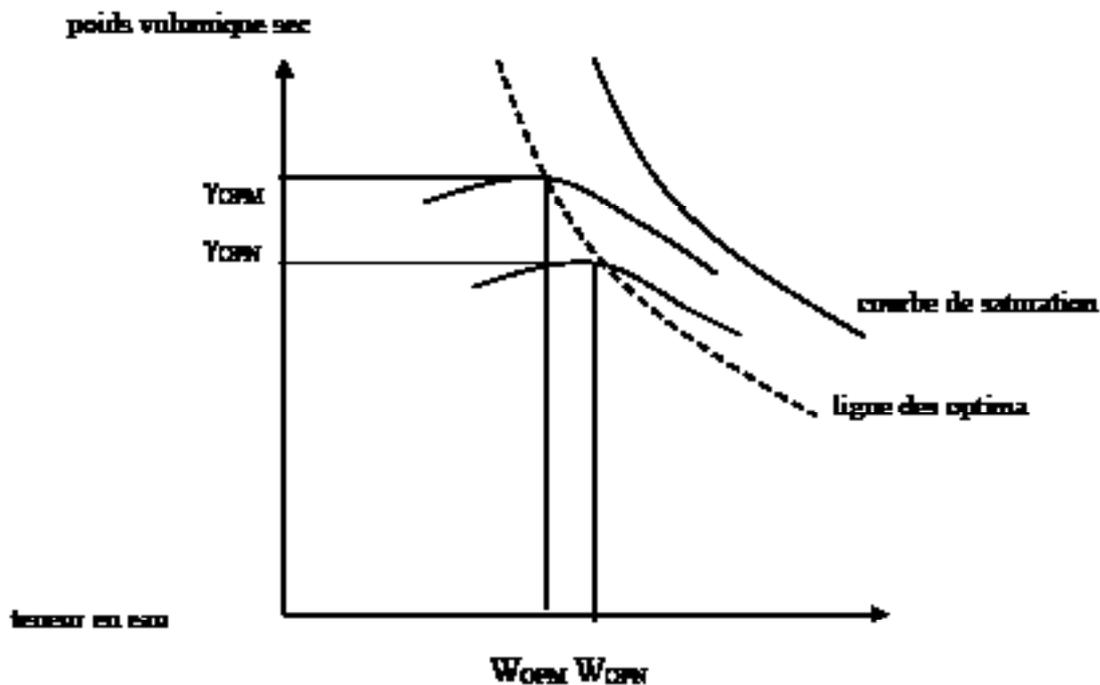


Figure A4-1.a - référence aux essais PROCTOR

Nota : les remblais de tranchées, notamment dans le volume d'enrobage des canalisations, ne peuvent matériellement pas être soumis à un compactage intense ; pour qu'ils ne soient pas sujets à un effondrement sous une imbibition inéluctable (aux conséquences détestables sous un dallage), des solutions recommandables sont :

- ▼ remblai stabilisé par un liant ;
- ▼ matériau insensible à l'eau : gravette emballée dans un géotextile ;
- ▼ sable « hydraulique » (ne pas oublier de réaliser des diaphragmes en géotextile ou en sable stabilisé par un liant pour prévenir toute érosion régressive que pourrait provoquer une circulation d'eau).

L'essai œdométrique permet une approche quantitative des variations dimensionnelles découlant, sous contrainte constante, d'une variation de la teneur en eau d'un sol initialement non saturé ; on compare deux courbes établies l'une à la teneur en eau naturelle pour un serrage représentatif de l'état en place, et l'autre avec saturation et annulation de la pression interstitielle ;

dans la gamme des contraintes pour lesquelles la courbe obtenue à teneur en eau naturelle est au-dessus de la courbe en état saturé, on connaît ainsi l'amplitude de l'effondrement qui découlerait d'une imbibition (l'amplitude n'est pas la même sous la plateforme nue que lorsqu'elle supporte un dallage plus ou moins chargé ...).

Dans le domaine des faibles contraintes, la courbe correspondant à l'état saturé peut être au-dessus de celle correspondant à la teneur en eau naturelle ; l'exploitation de ces courbes permet de prévoir l'amplitude du gonflement possible en fonction de la charge appliquée en surface.

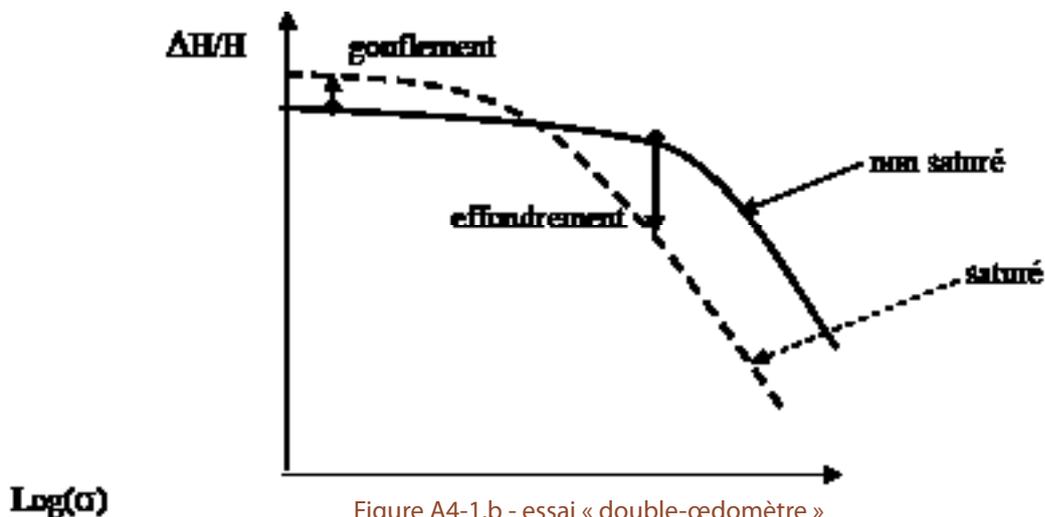


Figure A4-1.b - essai « double-œdomètre »

En pratique, la teneur en eau présente évidemment une certaine variabilité, et la nature et la compacité des matériaux aussi ; une bonne évaluation de l'amplitude des variations dimensionnelles possibles, pour un projet sensible, passe donc par plusieurs essais portant sur des échantillons saturés, et des essais à plusieurs teneurs en eau et plusieurs densités sèches.

Le programme des essais doit être adapté à la sensibilité du projet, et à l'épaisseur des couches dont le comportement conditionne celui de l'ouvrage. Il va sans dire que l'exécution doit ensuite respecter les limites de teneur en eau et de compactage issues de l'étude des matériaux, et que le contrôle doit être adapté aux objectifs.

Il est instructif de rapprocher, pour un matériau fin donné, la courbe d'IPI et la courbe Proctor ; l'IPI diminue au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, et on dispose donc de meilleures performances apparentes de la part d'un matériau trop sec et effondrable sous imbibition que de la part d'un matériau compacté avec une teneur en eau optimale, peu susceptible de variations dimensionnelles intempestives et préjudiciables. D'où la nécessité de se référer à des essais pertinents et de ne pas s'en remettre exclusivement à des essais de plaque, de pénétration dynamique ... (ils ne sont utiles qu'associés à la connaissance de la densité sèche et de la teneur en eau).

Une pratique fréquente dans certains pays, mais exceptionnelle en France, est de procéder à l'imbibition de matériaux après leur compactage ; c'est très efficace sur des matériaux de perméabilité suffisante et de faible sensibilité à l'eau.

Comportement d'un sol fin saturé

Le chapitre 6 propose des solutions d'organisation de la couche de forme en indiquant des ordres de grandeur des épaisseurs de matériau d'arase insensible à l'eau. Si ces ordres de grandeur peuvent dans bien des cas être appliqués sous la seule réserve que les sols fins du site ne sont pas dangereux, certains projets sensibles nécessitent une appréciation quantitative des performances et variations dimensionnelles en fonction de l'épaisseur de matériau insensible à l'eau ; inversement, si l'on souhaite recourir à un confinement de moindre épaisseur, il faut s'assurer que les conséquences restent acceptables.

Le principal outil de laboratoire à la disposition du géotechnicien est l'œdomètre.

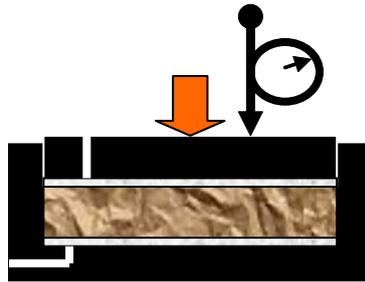


Figure A4-2.a - schéma d'un œdomètre

Envisageons d'abord le cas d'un déblai dans un sol fin :

La *figure A4-2.b* schématise les résultats d'un classique essai « de compressibilité » mis en œuvre sur un échantillon saturé.

La partie de courbe qui nous intéresse ici au premier chef est la branche de détente, BC : l'essai doit représenter le plus fidèlement possible le comportement du matériau « intact » ; lors du décaissement, s'il est saturé, la diminution de contrainte verticale ne se traduit pas en place par un changement de volume significatif (c'est le développement d'une succion qui équilibre la variation de la contrainte totale) ; l'essai a pour objet de mettre en évidence les variations dimensionnelles et les variations de module résultant d'un apport d'eau progressif ; on soumet donc un échantillon « intact » à une contrainte totale aussi voisine que possible de sa contrainte effective initiale en place, et on l'alimente en eau ; puis on procède à des paliers de détente, jusqu'à une valeur de contrainte inférieure à celle du confinement envisagé.

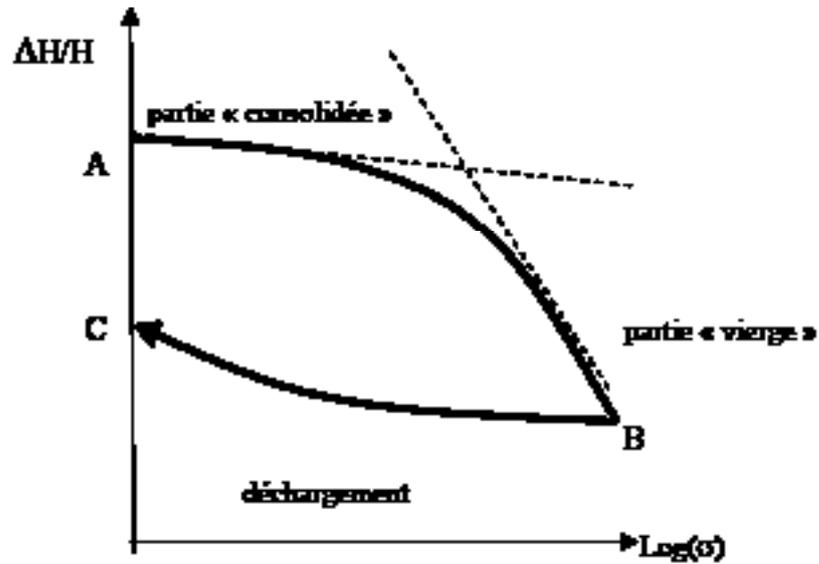


Figure A4-2.b - essai de compressibilité

Un sol fin dans l'état correspondant au point B de la figure A4-2.c, en l'absence d'alimentation en eau, passe dans l'état correspondant au point C1 lorsqu'on réduit la contrainte totale ; son volume ne change pas, le développement d'une succion compensant la diminution de contrainte totale ; une alimentation en eau dissipe la succion, et on passe à l'état correspondant au point C2, avec gonflement et évolution de consistance.

Plus le sol est proche de la surface, plus la contrainte totale est petite, et plus le point C1 est à gauche sur la figure, donc plus le gonflement est important (ne pas perdre de vue que l'axe des abscisses représente le logarithme de la contrainte, et que l'amplitude est donc bien plus importante au voisinage immédiat de la surface, d'où le bénéfice apporté par le confinement).

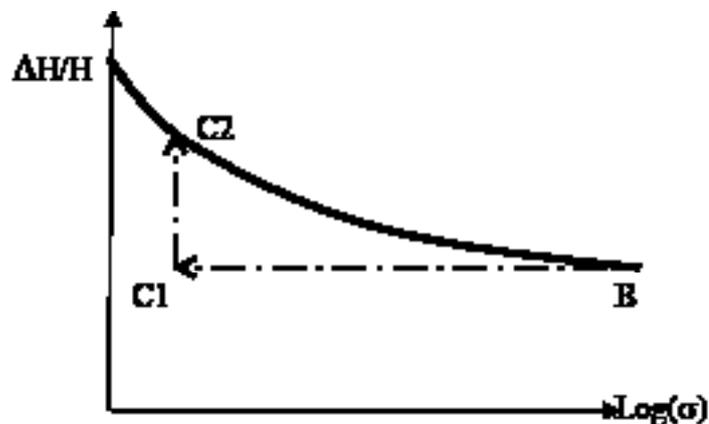


Figure A4-2.c - chemin de détente

Si on est dans le cas de la couche de forme épaisse rapportée sur une arase horizontale du sol fin, on sait, à partir de ces résultats expérimentaux, prévoir les effets du stockage d'eau de pluie à la base du matériau insensible à l'eau, aussi bien en termes de variations dimensionnelles de détente qu'en termes d'influence sur la portance en surface (aux inévitables approximations près des modèles numériques).

Un critère utile est l'indice de plasticité WP : sur la branche de détente de la courbe déterminée au moyen de l'œdomètre, les points correspondant à une teneur en eau supérieure à WP peuvent être associés à une consistance trop médiocre pour être acceptable ; on dispose donc d'un critère simple de détermination du poids nécessaire de la couche de forme.

Si on est dans le cas d'une arase en pente avec confinement mince, la prévision quantitative pendant la phase travaux est plus aléatoire, puisque la mise en contact du sol fin et de l'eau de pluie est passagère, donc que l'évolution reste partielle et limitée en profondeur.

Cas d'un sol fin en remblai

L'essai de « double-œdomètre » permet de caractériser les variations dimensionnelles sous imbibition sur une large gamme de contrainte.

Planche d'essai

Lorsque les dimensions de l'ouvrage le permettent, ou que les enjeux le justifient, il peut être opportun de réaliser une planche d'essais, qui permet de s'assurer en vraie grandeur de l'obtention du comportement recherché, et le cas échéant de définir des dispositions correctives adéquates. La planche d'essais doit en principe comporter une première série d'essais dans l'état après mise en œuvre des matériaux, puis une deuxième série après simulation des effets de la pluie ; cette simulation est réalisable pour un fond de forme horizontal en organisant la géométrie de la planche d'essai de telle sorte que l'exutoire des eaux qu'elle reçoit soit positionné 0,05 à 0,1 m au-dessus du niveau du fond de forme, un apport d'eau périodique assure l'imbibition avec confinement ; dans le cas d'une forme mince sur arase en pente, c'est un arrosage soutenu qui doit être envisagé.

La planche d'essais sera d'autant plus riche d'enseignements que les matériaux auront été caractérisés au laboratoire (notamment, calage des modèles pour extrapolation des résultats de la planche à des configurations plus ou moins différentes).

Les choix des moyens de contrôle et des critères à respecter sont déterminés à partir des conclusions de la planche d'essai, de même que les paramètres pris en compte pour la justification d'ouvrages tels que les dallages qui seront supportés par les plateformes.

Des essais tels que chargement statique (plaque) ou dynamique (dynaplaque) peuvent être pertinents, même si l'on a dit plus avant que leurs résultats doivent être interprétés avec circonspection dans le cas des sols fins sensibles à l'eau: on tient bien compte des effets de l'eau dans cette approche, et, pour les essais de surface, on n'est pas en contact direct avec le sol fin.

