

La géotechnique dans la conception et la réalisation des dallages en béton

Syntec-Ingénierie/Unesi/Coprec



SYNTEC-INGÉNIERIE



FEDERATION FRANÇAISE DU BATIMENT

SOLS
INDUSTRIELS



TIERCE PARTIE INDÉPENDANTE

Ce document a été élaboré conjointement par :

- le comité géotechnique de Syntec-Ingénierie;
- la commission technique de l'UNESI/FFB;
- la COPREC.

Toute observation sur ce document sera adressée à :

c.longepierre@syntec-ingenierie.fr
catelinjp@unesi.ffbatiment.fr

1. Introduction

Un dallage sur terre-plein est un ouvrage en béton de grandes dimensions par rapport à son épaisseur, désolidarisé de la structure et éventuellement découpé par des joints. Il repose uniformément sur son support. Il est conçu, calculé et exécuté conformément à la norme NF P 11-213 (DTU 13.3).

C'est un ouvrage complexe dû :

- aux objectifs recherchés :
 - techniques :
 - résistance mécanique,
 - durabilité (résistance à l'usure, résistance aux agressions chimiques...),
 - planéité,
 - limites de déformation absolues et différentielles,
 - sécurité,
 - maintenance;
 - économiques :
 - rapport qualité-prix conduisant au choix d'un dallage non armé dans plus de 90 % des cas;
- aux spécificités géotechniques :
 - il n'est pas possible de dissocier son comportement de celui des sols de fondation. Une étude détaillée de leur interaction s'impose;
 - le dallage mobilise le sol depuis la surface en intégrant la frange de terrain potentiellement non saturée et soumise à des variations saisonnières;
- aux caractéristiques intrinsèques du béton, notamment les phénomènes de prise et de retrait, et à la multitude des paramètres agissant sur ces derniers.

Le dallage doit être considéré comme un outil de production; son adéquation avec la durée de vie du bâtiment dépend de sa conception initiale, de la qualité de sa réalisation, de la conformité des contraintes d'exploitation aux hypothèses du projet et de la régularité des opérations de maintenance.

La complexité de la conception des dallages résultant de ces différents facteurs est insuffisamment reconnue et prise en compte.

Le bon fonctionnement (qualité) de l'ouvrage exige la coordination de l'ensemble des intervenants depuis la conception jusqu'à la réalisation (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, géotechnicien, bureaux d'études, organisme de contrôle et entreprise de sols industriels).

2. Contenu de l'étude géotechnique

Par référence à la norme NF P 94-500 (novembre 2013), les phases d'élaboration du projet de dallage nécessitent l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique suivantes :

- étude géotechnique préalable (G1);
- étude géotechnique de conception (G2);
- études géotechniques de réalisation (G3/G4) :
 - étude et suivi géotechnique d'exécution (phase étude, phase suivi G3),
 - supervision géotechnique d'exécution (phase supervision de l'étude d'exécution, phase du suivi d'exécution G4).

2.1. Étude géotechnique préalable (mission G1)

Cette étude comprend deux phases :

- la phase étude du site (ES), qui permet de définir le modèle géotechnique préliminaire du site, avec ses principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs;
- la phase principes généraux de construction (PGC), qui synthétise les données géotechniques et propose certains principes généraux de construction envisageables pour les ouvrages géotechniques, en examinant notamment la possibilité de réaliser un dallage sur terre-plein.

2.2. Étude géotechnique de conception (mission G2)

Elle comprend trois phases à la charge du maître d'ouvrage : AVP, PRO et DCE/ACT, en lien direct avec l'élaboration du projet par la maîtrise d'œuvre.

- La phase avant-projet (AVP)
Réalisée au stade de l'avant-projet, elle doit permettre de réduire les risques géotechniques majeurs identifiés dans l'étude précédente.

Vis-à-vis de chacun des risques rencontrés, le géotechnicien :

- définit un ou plusieurs modèles géotechniques en fonction de l'homogénéité ou non du site, en précisant, s'il le peut à ce stade, le niveau du substratum réputé indéformable; utilise ces modèles pour examiner les solutions envisageables en fonction des surcharges d'exploitation définies par le maître d'ouvrage ou, à défaut, celles définies dans l'annexe B du DTU 13.3 (NF P 11-213), et estime les tassements obtenus sous chargements uniformes à partir de celles-ci;
- propose des valeurs envisageables pour les modules de déformation E_s ;
- indique, lorsque les tassements obtenus ne respectent pas les critères de service, les types d'amélioration de sol qui peuvent être proposés, en insistant sur les spécificités de chacun d'eux (par exemple, effet « point dur » des inclusions rigides);

- indique la ou les dispositions à prendre ou à envisager, notamment dans le cas de sols sensibles aux phénomènes de retrait-gonflement;
 - définit, si nécessaire, un programme d'investigations géotechniques permettant, notamment, de déterminer un modèle géotechnique intégrant l'hétérogénéité en plan ou une maquette géotechnique plus précise dans le cas de sols au comportement complexe.
- La phase projet (PRO)
Cette étude, à la charge du maître d'ouvrage, est indispensable pour définir la conception de l'ouvrage. Elle est réalisée à partir du cahier des charges du maître d'ouvrage, précisant les cas de charges et les déformations admissibles.

Le ou les modèles géotechniques doivent être définis et rattachés au nivellement général de la France (NGF), en précisant la profondeur à partir de laquelle le sol est considéré comme indéformable vis-à-vis des charges appliquées sur le dallage.

Un calcul de déformations est mené sous les différents cas de charges (ponctuelles et réparties).

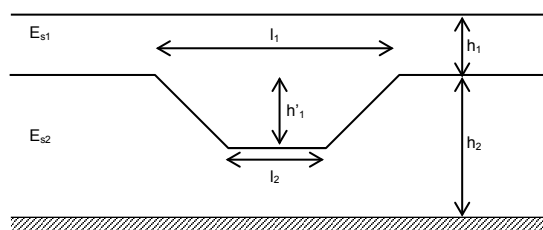
Les valeurs caractéristiques des modules de déformation des sols E_s attribués à chaque couche sont précisées en fonction de :

- la durée d'application des charges comparée à la vitesse de consolidation des sols;
- l'intensité de celles-ci (niveau de déformation du sol);
- la fluctuation de teneur en eau entraînant des modifications de compacité et/ou de succion.

Dans le cas d'une amélioration de sol, le géotechnicien doit :

- effectuer le dimensionnement à l'ELS et à l'ELU (vérifications GEO et STR) des éléments de fondation (hors dallage) et du matelas de répartition;
- à partir de l'estimation du tassement du sol renforcé, définir le profil de sol homogénéisé équivalent;
- indiquer si l'entreprise de sols industriels doit prendre en compte les sollicitations complémentaires éventuelles dues à l'effet « point dur » de l'amélioration de sol en définissant les termes correctifs appropriés pour une épaisseur de dallage validée par le maître d'œuvre.

Enfin, il indique les dispositions constructives à prendre en compte (notamment dans le cas de sols sensibles aux phénomènes de dessiccation), et, dans le cas d'hétérogénéité en plan, il doit donner le modèle les prenant en considération.



Exemple d'hétérogénéité :
zone d'ancien bras mort remblayée

- La phase DCE/ACT
Elle contribue d'abord à l'établissement du dossier de consultation des entreprises pour la partie concernant les ouvrages géotechniques et ensuite à l'assistance pour l'établissement des contrats de travaux avec les entrepreneurs pressentis pour réaliser les ouvrages géotechniques.

2.3. Supervision géotechnique d'exécution (mission G4)

Elle est à la charge du maître d'ouvrage.

Cette mission comporte deux phases :

- la supervision de l'étude géotechnique d'exécution réalisée par les entrepreneurs de chacune des parties d'ouvrage :
 - l'avis sur les études géotechniques d'exécution réalisées dans le cadre d'une mission G3,
 - l'avis sur les fiches produit (par exemple : classification GTR des remblais de la couche de forme),
 - l'avis sur le programme d'auscultation (dégarnissage de colonnes, essais de charge sur des inclusions, essais à la plaque, suivi des tassements du préchargement...) et les valeurs seuils associées;
- la supervision du suivi géotechnique d'exécution réalisé par les différents entrepreneurs :
 - l'intervention ponctuelle sur le chantier,
 - l'avis sur le contexte géotechnique réellement observé et la nécessité d'études d'exécution complémentaires à réaliser dans le cadre d'une mission G3,
 - l'avis sur les éventuelles adaptations proposées par les entrepreneurs,
 - l'avis sur les résultats du programme d'auscultation.

2.4. Étude et suivi géotechnique d'exécution (mission G3)

Cette mission est menée dans le cadre du marché de chaque entrepreneur. Elle couvre les études d'exécution et le suivi des travaux de chaque élément de l'ouvrage (plate-forme, renforcement de sol éventuel, dallage...).

Elle est à la charge de l'entreprise concernée.

2.4.1. Étude géotechnique d'exécution (mission G3)

L'entrepreneur de sols industriels établit le détail du dimensionnement du dallage en tenant compte des études et suivis d'exécution des autres travaux (subs-

titution, drainage, terrassement, amélioration ou renforcement de sol, couche de forme) tels que validés par le maître d'œuvre.

2.4.2. Suivi géotechnique d'exécution (mission G3)

Dans le cadre de la conduite des travaux de dallage, toute anomalie détectable par rapport aux procès-verbaux de réception qui lui ont été communiqués est signalée au maître d'œuvre par l'entreprise de sols industriels.

2.5. Prestation menée dans le cadre du marché de contrôle technique

Au cours de la phase de conception, le contrôleur technique procède à l'examen critique de l'ensemble des dispositions techniques du projet.

Pendant la période d'exécution des travaux, il s'assure notamment que les vérifications techniques qui incombent à chacun des constructeurs énumérés à l'article 1792-1 du Code civil s'effectuent de manière satisfaisante.

3. Chargements

Les documents particuliers du marché (DPM) définissent le plus souvent uniquement des charges uniformément réparties. Ce cas de charge est insuffisant pour dimensionner un dallage, il est rarement représentatif du chargement réel.

D'où la nécessité absolue de définir les actions le plus précisément et le plus tôt possible dans l'acte de construire.

3.1. Définition des actions

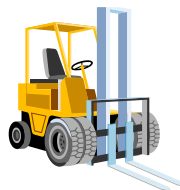
Action : toute cause produisant un état de contrainte dans l'ouvrage.

En premier lieu, il s'agit des actions appliquées directement sur le dallage.

- actions permanentes :
 - poids propre du béton,
 - poids propre des revêtements,
 - actions dues aux déformations différées (retrait et fluage);



- actions variables :
 - charges d'exploitation (charges réparties et ponctuelles, fixes ou mobiles),



- action de la température (gradient).



Ces actions élémentaires sur le dallage sont pondérées et combinées afin d'établir les valeurs de calcul.

En second lieu, il faut tenir compte parfois d'actions qui ne sont pas directement appliquées au dallage :

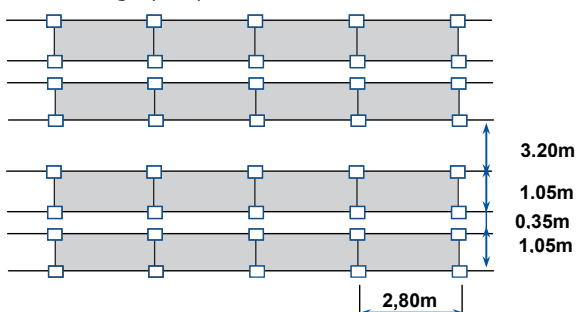
- remblai ou déblai de remodelage du site;
- remblais périphériques;
- charges des massifs de fondation;
- variations du niveau de nappe.

Les dallages non armés et additionnés de fibres métalliques sont dimensionnés uniquement à l'état limite de service (ELS), contrairement aux dallages armés, pour lesquels les états limites de service (ELS) et les états limites ultimes (ELU) doivent être vérifiés.

3.2. Description détaillée des différents cas de charges

- Charges uniformément réparties appliquées avec leur localisation (sur toute la surface, ou sur des zones définies...).
- Charges mobiles :
 - types de véhicules (camion, chargeur, gerbeur, chariot élévateur tridirectionnel ou à mât rétractable...);
 - nombre de roues (chariot à trois ou quatre roues, essieux à roues jumelées...);
 - entraxe des roues, empattement;
 - charge sur chaque roue;
 - pression de contact en fonction du type de roues :
 - pneumatiques (0,3 à 0,7 MPa),
 - bandages souples (1,5 à 2,5 MPa),
 - bandages durs (polyuréthane, Vulkolan de 5 à 7 MPa);
 - trafic (occasionnel, courant ou intense).
- Charges ponctuelles fixes (mezzanine, process, machines-outils, cuves...):
 - charges par appui;

- dimensions des platines;
- plan d'implantation des charges;
- cas particulier des rayonnages (racks):
 - type de racks (racks classiques simples ou dos à dos, racks dynamiques, par accumulation, stockage grande hauteur, transtockeurs, racks mobiles...),
 - implantation des pieds de rack,
 - dimensions utiles des platines,
 - charge par pied de rack.



Exemple de rayonnages classiques dos à dos

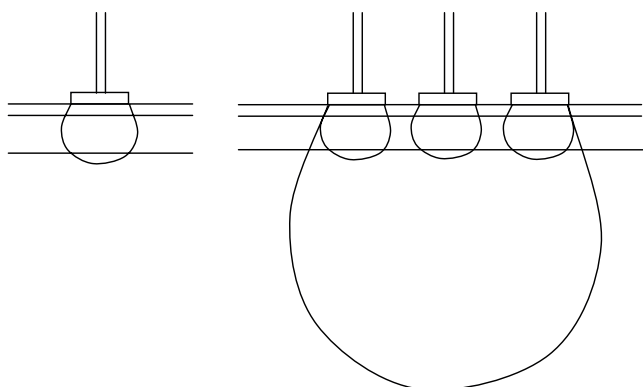
- Charges linéaires (rails, murs...).

3.3. Charges par défaut

L'annexe B du DTU 13-3 est un outil d'aide au maître d'ouvrage pour la définition des actions et des exigences spécifiques. Dans chaque cas où il y a absence d'indication dans les DPM, cette annexe propose les hypothèses à prendre en compte par défaut. Toutes les hypothèses de charges doivent être validées par le maître d'ouvrage.

3.4. Approches géotechniques distinctes pour des charges réparties et des charges ponctuelles

Il faut différencier l'approche géotechnique en fonction du cas de charges ponctuelles ou réparties. La distinction est fonction des bulbes des contraintes respectifs.



Bulbe des contraintes d'une charge ponctuelle isolée

Bulbe des contraintes d'un groupe de charges ponctuelles

Les bulbes sont plus petits sous une charge isolée, mais tendent à se combiner sous des groupes de charges ponctuelles. C'est notamment le cas des rayonnages, qui peuvent être assimilés en profondeur, du point de vue du sol support, à une bande uniformément chargée.

L'amplitude des déformations associées est aussi différente entre les deux cas de charges.

Pour une coupe de sol donnée, il peut donc y avoir plusieurs profils de modules de déformation E_s , chacun adapté à l'un des cas de charge (charge ponctuelle isolée ou groupe de charges ponctuelles).

Dans un cas de charge roulante, les modules de déformations seront également plus élevés que sous charge statique, puisqu'il convient de les estimer dans le domaine des petites déformations.

Lorsque des charges de type statique et de type roulante coexistent, il est sécuritaire d'adopter les valeurs de module des cas de charge statique.

3.5. États limites de déformation du dallage

Les états limites de service, et notamment les états limites de déformation, sont définis dans le paragraphe 6.1 du DTU 13-3 (NF P 11-213).

En règle générale, le critère de déformation verticale différentielle est le plus contraignant.

Ces déformations limites s'ajoutent aux tolérances d'exécution définies au paragraphe 8 du DTU 13-3.

4. Choix du module E_s

4.1. Principes

Les règles actuelles de justification des tassements d'un dallage sous des charges ponctuelles ou uniformément réparties conviennent d'un calcul élastique.

Les sols d'assise sont découpés en couches élémentaires, chaque couche ayant une épaisseur h_i , un module d'Young E_{s_i} et étant soumise à un supplément de contrainte verticale $\Delta\sigma_i$ induite en milieu de couche par le cumul des charges.

Il est suggéré d'arrêter le modèle de calcul géotechnique à la profondeur où la condition suivante est vérifiée : rapport $\Delta\sigma/E_s$ inférieur à 10^{-3} . Cela exige que les reconnaissances aient atteint la profondeur où cette condition est obtenue, augmentée de 2 m. Le

modèle de calcul du dallage est approfondi sous cette limite en introduisant une couche indéformable.

Le calcul élastique se révèle satisfaisant pour les roches et les sols à squelette granulaire dominant, soient les types suivants au sens du GTR (NF P 11-300) définis dans le tableau ci-dessous :

D ₂ B ₃	D ≤ 50 mm	% 2 mm < 70 %	% 80 μ < 12 %	VBS < 0,2
D ₃	D > 50 mm		% 80 μ < 12 %	VBS < 0,1
C ₁ B ₃	peu charpentés	refus à 50 mm < 40 %	0/50 mm = B3	
C ₂	très charpentés	refus à 50 mm ≥ 40 %		

L'interprétation de l'essai de plaque type LCPC en vue d'établir le module E_s du matériau de la couche de forme doit être conduite en intégrant son épaisseur et l'influence du sol support.

On peut attribuer à un matériau granulaire propre bien gradué compacté à q_3 (en respectant $E_{v2}/E_{v1} < 2$) un module minimal $E_s = 50$ MPa. On notera cependant que le choix d'une valeur par défaut de E_s peut ne pas conduire aux sollicitations enveloppes du dallage.

Pour la couche de forme réalisée avec ces matériaux, la valeur E_s peut être prise égale au module E_{v2} de l'essai de plaque LCPC, sous réserve que le rapport E_{v2}/E_{v1} soit inférieur ou égal à 2. Pour des rapports compris entre 2 et 2,2, il est proposé d'adopter $E_s = 0,9 E_{v2}$.

Les autres catégories de sols se présentent soit en situation saturée, soit en situation non saturée.

En situation saturée, la notion de contrainte de préconsolidation (σ'_p) est très importante et doit être comparée à la contrainte verticale effective initiale (σ'_{vo}). La contrainte de préconsolidation est déterminée par des essais œdométriques. À défaut, différentes corrélations ont été proposées pour estimer celle-ci à partir d'essais *in situ* (Mayne, 2009).

Si σ'_p est supérieur à $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma$, $\Delta\sigma$ étant le supplément de contrainte verticale dû au chargement total (ouvrage, charges et remblai éventuel), le sol est surconsolidé au regard des charges appliquées.

L'approche élastique telle qu'exposée ci-dessus reste satisfaisante.

Si σ'_p est inférieur à $\sigma'_{vo} + \Delta\sigma$, le tassement induit est alors plus élevé que celui donné par l'approche élastique. Les résultats de l'étude des tassements selon la méthode œdométrique sont exploités pour définir les valeurs du module E_s équivalent, associées aux tassements à long terme.

En situation désaturée, l'augmentation de la teneur en eau peut se traduire :

- par un gonflement, par diminution de la succion capillaire, si les charges appliquées ne s'y opposent pas ;
- par un tassement, voire un effondrement, si après chargement l'augmentation de teneur en eau diminue la consistance du sol.

On comprend ici que ces situations doivent faire l'objet d'investigations et d'études spécifiques. Il importe notamment de caractériser l'état de succion dans la situation initiale et d'anticiper son évolution sur un cycle annuel.

4.2. Sols particuliers

Le DTU 13.3 exclut l'utilisation de certains sols en couche de forme (paragraphe A2.2.1.3).

Certains sols déjà en place peuvent également présenter des risques spécifiques, par exemple : déchets de fonderie, produits de démolition, stériles de mines de charbon ou schistes houillers, sols indurés ou roches tendres et nappe chargée en sels dissous (gypse, anhydrite), schistes carton...

Pour ces situations, les paramètres pressiométriques ne sont pas suffisants pour appréhender leur comportement. Ils doivent être complétés par :

- leur classification GTR ou leur identification comme sols et roches particuliers ;
- la vérification de la teneur en sulfate ;
- leur état hydrique par rapport à la situation de saturation par le biais du couple teneur en eau/densité sèche, en gardant à l'esprit que la teneur en eau mesurée en laboratoire n'est pas la teneur en eau *in situ*, mais celle que l'échantillon a gardée au travers des manipulations et par rétention ;
- la caractérisation du potentiel de gonflement ;
- une étude hydrogéologique des nappes et de l'évolution de leurs surfaces piézométriques.

5. Renforcement et limites d'utilisation

Il faut distinguer parmi les techniques d'amélioration ou de renforcement de sol, celles conduisant à une amélioration du sol en masse (par exemple, préchargement, compactage dynamique, vibro-compactage) et celles consistant à incorporer au sol à traiter des inclusions souples (colonnes ballastées, plots pilonnés) ou rigides (colonnes réalisées en matériau beaucoup moins déformable que le sol et possédant une cohésion permanente).

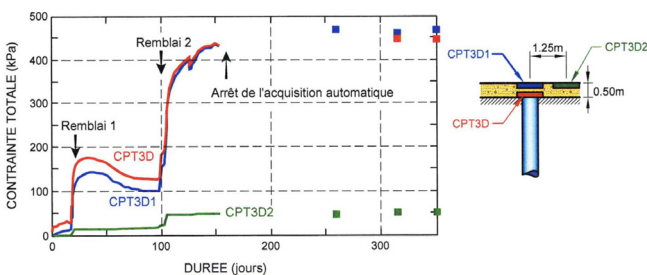
5.1. Amélioration en masse

Lorsqu'une amélioration en masse du sol est visée, celle-ci est contrôlée après travaux par la comparaison des caractéristiques géotechniques mesurées à celles établies avant travaux, ces caractéristiques étant établies avec les mêmes techniques et outils de reconnaissance. Les critères de réception sont définis en référence à des valeurs seuils à obtenir après traitement. La conception du dallage est menée en adoptant des valeurs de calcul dans les différentes couches, compatibles avec les seuils définis dans les documents du marché. Les couches demeurant homogènes, les méthodes de dimensionnement décrites par le DTU 13.3 (norme NF P 11-213) demeurent applicables.

Lorsque l'amélioration en masse est réalisée par un préchargement, il importe que le niveau de surcharge soit adapté au niveau de calage de la plate-forme, à la valeur des surcharges d'exploitation (ponctuelles et réparties) et à l'importance des tassements de fluage estimés sur la durée de vie de l'ouvrage. Le tassement subi pendant le préchargement doit être évalué et suivi afin de pouvoir être anticipé et compensé. Si ces conditions sont respectées, lors du chargement de l'ouvrage, le sol subit uniquement des déformations de recompression, contrôlées par le module de recompression du sol, dont la valeur est définie par le géotechnicien.

5.2. Amélioration par inclusions

Lorsque le sol est renforcé par des inclusions, celles-ci peuvent se manifester par des effets de points durs en sous-face du dallage, qu'il convient de prendre en compte dans le dimensionnement.



Contraintes non uniformes mesurées sous un dallage (plot expérimental 3D du projet national ASIRI, site de Saint-Ouen-l'Aumône).

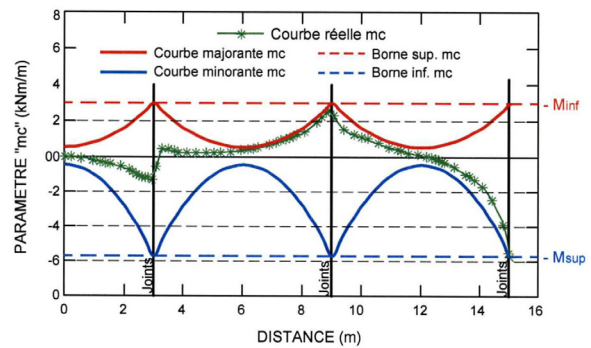
Ces points durs ne peuvent pas être évités lorsque les inclusions sont de type rigide et recouvertes par un matelas d'épaisseur réduite.

Ce phénomène mérite également une attention des concepteurs lorsque des inclusions souples telles que les colonnes ballastées ou plots ballastés sont mises en place. Son intensité dépend alors du diamètre des colonnes rapporté à leur espacement et à l'épaisseur du matelas.

La méthode de dimensionnement simplifié du DTU 13.3 - annexe C (norme NF P 11-213) ne peut être appliquée à un renforcement par inclusions rigides que moyennant la prise en compte de termes correctifs.

Une démarche est explicitée par les recommandations ASIRI (2012). Les termes correctifs, définis sous forme d'enveloppes, sont à ajouter aux sollicitations du dallage (moment fléchissant), calculées par l'annexe C en partie courante, en bordure et en angle de panneaux sur un sol homogénéisé équivalent. Ces termes correctifs, au nombre de deux, sont destinés à représenter :

- l'influence des inclusions rigides sur un dallage continu;
- l'interaction entre les inclusions rigides et les joints.



Terme correctif représentant l'interaction entre les inclusions rigides et les joints du dallage.

Les différents profils du sol homogène équivalent à prendre en compte pour ce dimensionnement ainsi que les termes correctifs associés sont définis par l'étude géotechnique de conception (mission G2) et précisés par l'étude géotechnique de réalisation (mission G3).

L'amplitude des termes correctifs définis sous forme d'enveloppes est fonction du degré de connaissance de la géométrie de l'ouvrage et de l'implantation des charges. Lorsque le dimensionnement tient compte explicitement de la position relative des charges, des joints et des inclusions, ces hypothèses doivent être contractualisées.

La méthode exposée par les recommandations ASIRI permet d'estimer les sollicitations d'origine mécanique (liées aux charges). Les effets du retrait et du gradient thermique seront ajoutés (avec les coefficients de combinaison appropriés) à ces sollicitations.

La conception et la réalisation d'un dallage sur inclusions mobilisent généralement trois entreprises distinctes pour réaliser les inclusions, la couche de forme et le dallage. Beaucoup de déboires résultent du défaut de coordination entre ces intervenants. L'importance du maître d'œuvre pour la conception, le choix des solutions retenues, la coordination, la supervision et la réception de ces ouvrages doit être soulignée.