

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT, DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

CENTRE D'ÉTUDES TECHNIQUES MARITIMES ET FLUVIALES

**Recommandations
pour le
CALCUL AUX ETATS-LIMITES
DES OUVRAGES EN SITE AQUATIQUE**

Série : ACTIONS

ACTIONS DU TERRAIN

Sommaire : pages 2 et 3

Chapitre 7 : pages 44 à 51

**RECOMMANDATIONS
POUR LE CALCUL AUX ETATS-LIMITES
DES OUVRAGES EN SITE AQUATIQUE**

ACTIONS DU TERRAIN


TABLE DES MATIERES

1. OBJET	4
2. GENERALITES	5
2.1 PRESENTATION	5
2.2 CLASSIFICATION	6
2.3 CARACTERES GENERAUX	6
2.4 SITUATIONS DE PROJET	7
2.5 SOURCES D'INCERTITUDE	7
3. PRESSIONS EXERCEES PAR LE SOL	8
3.1 INTRODUCTION	8
3.2 PRESSION DU SOL AU REPOS	9
3.3 PRESSIONS LIMITES DU SOL EN POUSSEE ET EN BUTEE (SOLS NON CHARGES)	9
3.3.1 NOTATIONS	9
3.3.2 DEPLACEMENTS NECESSAIRES A LA MOBILISATION DES EQUILIBRES LIMITES	11
3.3.3 THEORIES DES POUSSEES ET BUTEES LIMITES POUR LES MASSIFS SEMI-INFINIS	11
3.3.3.1 Théorie basée sur le calcul à la rupture (sol homogène, talus plan)	11
3.3.3.2 Théorie basée sur le calcul à la rupture (sol hétérogène et talus quelconques)	13
3.3.3.3 Théorie basée sur la plasticité (sol homogène, talus plan)	15
3.3.3.4 Théorie basée sur la plasticité (sol hétérogène, talus quelconque)	18
3.3.3.5 Cas des sols purement cohérents	19
3.3.4 EFFET DE CHAISE	19
3.3.5 PAREMENT FICTIF	20
3.3.6 MASSIFS CONFINES	20
3.3.6.1 Principes d'étude	20
3.3.6.2 Adaptation des théories classiques de la poussée	20
3.3.6.3 Théorie des silos	22
3.3.6.4 Pression passive	24
3.3.7 EFFETS DU COMPACTAGE	24
3.3.7.1 Compactage artificiel	24
3.3.7.2 Compactage naturel	25
3.3.8 POIDS VOLUMIQUES DU SOL A CONSIDERER	25
3.4 POUSSEES TRANSMISES PAR LE SOL CHARGE	25
3.4.1 INTRODUCTION	25
3.4.2 METHODES BASEES SUR LA THEORIE DE L'ELASTICITE	27
3.4.2.1 Charge ponctuelle	27
3.4.2.2 Charge linéique	30
3.4.2.3 Charge-bande et charge répartie partielle	30
3.4.2.4 Charge semi-infinie (contiguë ou non à l'écran)	31
3.4.3 METHODES BASEES SUR LES EQUILIBRES LIMITES	31
3.4.3.1 Principe	31
3.4.3.2 Charge ponctuelle	31
3.4.3.3 Charge-bande et charge répartie partielle	32
3.4.3.4 Charge semi-infinie (non contiguë à l'écran)	34
3.4.3.5 Charge semi-infinie (contiguë à l'écran)	34
3.4.4 CHARGES MIXTES ET COMPOSEES	35

3.4.5	<i>DIFFUSION DES CHARGES VERTICALES</i>	35
3.5	PRESSIONS DU SOL PAR UNE ANALYSE ELASTO-PLASTIQUE	36
3.6	CHOIX D'UN MODELE DE CALCUL	36
4.	ACTION DE L'EAU DANS LES SOLS	37
4.1	CONTRAINTES TOTALES ET CONTRAINTES EFFECTIVES	37
4.1.1	<i>RELATION ENTRE LES CONTRAINTES DU SOL ET LA PRESSION DE L'EAU</i>	37
4.1.2	<i>CALCULS EN CONTRAINTES TOTALES</i>	37
4.1.3	<i>CALCULS EN CONTRAINTES EFFECTIVES</i>	38
4.2	DETERMINATION DES FORCES D'ECOULEMENT	39
4.2.1	<i>PRINCIPE</i>	39
4.2.2	<i>EQUILIBRE GLOBAL (FORCES DE SURFACE)</i>	39
4.2.3	<i>EQUILIBRE LOCAL (FORCES DE VOLUME)</i>	40
4.3	APPLICATION	41
5.	ACTIONS LIEES A UN DEPLACEMENT D'ENSEMBLE DU SOL	42
5.1	GENERALITES	42
5.2	POUSSEES LATERALES	42
5.3	FROTTEMENTS NEGATIFS	43
6.	ACTIONS PONDERALES	43
7.	DETERMINATION DES VALEURS REPRESENTATIVES	44
7.1	PRINCIPES	44
7.2	VALEURS CARACTERISTIQUES	45
7.3	VALEURS DE CALCUL	46
7.3.1	<i>REMARQUES METHODOLOGIQUES</i>	46
7.3.2	<i>PRESSIONS LIMITES EN POUSSEE ET BUTEE</i>	46
7.3.2.1	Trois approches pour la détermination de valeurs de calcul	46
7.3.2.2	Recommandations pour le choix d'une des approches	47
7.3.2.3	La butée du sol comme une résistance	49
7.3.3	<i>PRESSIONS OBTENUES PAR LES METHODES ELASTO-PLASTIQUES</i>	49
7.3.4	<i>PRESSIONS DANS LES MASSIFS CONFINES</i>	49
7.3.5	<i>ACTION PONDERALE</i>	50
7.3.6	<i>DEPLACEMENT D'ENSEMBLE</i>	50
7.3.7	<i>ACTIONS TRANSMISES PAR LE SOL CHARGE</i>	50
7.3.8	<i>ACTIONS DE L'EAU DANS LES SOLS</i>	51
8.	TEXTES DE REFERENCE	52

La nature de l'action du terrain dépend de l'état-limite en cause et du modèle utilisé. Par exemple, le massif de sol interne d'un caisson sera supposé agir en pondéral pour l'étude de la stabilité externe, et en poussée/butée pour l'étude de la stabilité interne.

7. DETERMINATION DES VALEURS REPRESENTATIVES

 Voir aussi quelques exemples d'application :

- ◆ pour la rédaction d'un CCTP
- ◆ à un quai sur pieux
- ◆ à un duc d'Albe
- ◆ à un rideau de soutènement
- ◆ à un quai en blocs

7.1 PRINCIPES

Les actions dues au terrain étant de natures variées, plusieurs modèles concurrents sont souvent disponibles, de sorte que les méthodes de prise en compte de la sécurité doivent être adaptées à chaque cas de figure.

S'agissant des actions du sol en pression, une difficulté conceptuelle pour la détermination des valeurs représentatives tient à ce que les propriétés des sols interviennent à la fois du côté des actions et des résistances.

- ◆ La prise en compte de valeurs « exceptionnelles » des actions pour la combinaison fondamentale des ELU ne peut plus s'accompagner de valeurs favorables pour les résistances (principe de cohérence, voir aussi le fascicule *Présentation d'ensemble*), de même que la prise en compte de valeurs sécuritaires pour les résistances avec les combinaisons types des ELS ne peut non plus s'accompagner de valeurs moins sévères pour les actions.
- ◆ En analysant l'interaction sol-structure, il vient qu'à valeur représentative identique dans les calculs, c'est en condition de service que les efforts exercés par le sol sont les plus importants, les déplacements ultimes tolérés (ELU) en réduisant en effet l'intensité.

Pour résoudre ces difficultés, il a été convenu dans les *Recommandations* :

- ◆ de considérer que la différence entre les conditions d'ELU-fondamental et d'ELS tiendrait avant tout dans le traitement des incertitudes afférentes aux propriétés du sol, de sorte que l'ELU corresponde à des valeurs sécuritaires tant du côté des actions que des résistances, et que l'ELS corresponde à des valeurs moins sévères ; toutefois, quand le sol intervient en résistance en butée, on définit aussi un taux de mobilisation en conditions d'ELS (voir le fascicule *Valeurs représentatives des résistances*),
- ◆ de choisir des modèles de comportement du sol et des ouvrages cohérents avec les notions d'ELU et d'ELS, c'est-à-dire adaptés aux larges déplacements des ouvrages en conditions d'ELU (modèles à la rupture) ou aux plus faibles déplacements en conditions d'ELS (modèles élasto-plastiques),

- ◆ de laisser une liberté d'appréciation au géotechnicien dans la procédure de détermination directe des **valeurs caractéristiques** (conditions d'ELS) et de calcul (conditions d'ELU),
- ◆ de favoriser la recherche systématique du caractère globalement **favorable** ou **défavorable** des paramètres de base.

La détermination des **valeurs caractéristiques** et des **valeurs de calcul** des actions dues au terrain est effectuée pour le projet en tenant compte des incertitudes afférentes aux comportements de l'ouvrage et du sol environnant. Selon la nature de l'action, il est défini **plusieurs méthodes** de détermination de la valeur de calcul, parmi lesquelles un choix spécifique au projet doit être fait.

7.2 VALEURS CARACTERISTIQUES

Les **valeurs caractéristiques** des actions dues au terrain sont déterminées selon le cas :

- ◆ à partir des valeurs caractéristiques des paramètres de base (voir le fascicule *Valeurs représentatives des propriétés de base des matériaux*), et des paramètres d'interaction sol-structure (voir le fascicule *Paramètres d'interaction sol-structure*),
- ◆ dans le cas des actions liées à un déplacement d'ensemble du sol, selon les règles qui leur sont propres (fascicule 62 titre V),
- ◆ ou directement par le géotechnicien (voir les *Recommandations pour assurer la qualité de l'étude géotechnique*).

Les règles de prudence pour le choix de la **valeur caractéristique** de la cohésion sont rappelées.

La **valeur caractéristique** du **poids volumique du sol** est identique pour l'évaluation des actions pondérales et pour l'évaluation des actions de poussée/butée. Suivant les cas, on lui attribue une valeur caractéristique maximale seule, ou un couple de valeurs caractéristiques, respectivement maximale et minimale.

Une détermination en fourchette peut être recommandée dans certains cas, par exemple pour le **coefficient de pression des terres au repos** K_0 et le **coefficient de réaction** k_H .

7.3 VALEURS DE CALCUL

☞ La détermination et la pondération de l'inclinaison des pressions exercées par le sol sont traitées dans le fascicule *Paramètres d'interaction sol-structure*.

7.3.1 REMARQUES METHODOLOGIQUES

Le mode de détermination des **valeurs de calcul** est du ressort du **géotechnicien**. Plusieurs approches sont indiquées ci-après, parmi lesquelles il y a lieu de choisir la plus appropriée : des recommandations sont faites ici en ce sens. Des valeurs de calcul plus sévères doivent être prises en compte dans les cas de risques anormalement grands ou de conditions de terrain ou de charges inhabituelles, ou exceptionnellement difficiles.

Les principes de pondération posés dans le fascicule *Présentation d'ensemble* doivent s'appliquer dans le cas des sols. En particulier en cas de sol multi-couches (rappel), lorsque les propriétés de chaque couche peuvent se révéler tantôt **favorables** et **défavorables** vis-à-vis des **états-limites** étudiés, on peut, dans une approche simplifiée de la sécurité, considérer le sol stratifié comme une seule et unique entité à pondérer globalement dans le sens favorable ou défavorable. Il y a lieu toutefois de s'assurer que cette approche ne conduit pas à des résultats manifestement insécuritaires.

Les **valeurs de calcul** des poids volumiques du sol et de l'eau sont identiques aux **valeurs caractéristiques**. En d'autres termes, elles ne sont pas pondérées, ou encore, on leur applique un **coefficient partiel** de 1,00 (voir le fascicule *Poids propre*).

☞ Voir l'application à un CCTP pour ce qui concerne les **masses volumiques** et les **forces d'écoulement**.

7.3.2 PRESSIONS LIMITES EN POUSSEE ET BUTEE

☞ Voir l'application à un CCTP.

7.3.2.1 Trois approches pour la détermination de valeurs de calcul

Pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement)

Lorsque le modèle d'action fait intervenir en entrée les **paramètres de résistance au cisaillement des sols**, cohésion et angle de frottement interne, la **valeur de calcul** peut être déterminée par la pondération « à la source » de la **valeur caractéristique** de ces paramètres par les **coefficients partiels** γ_M donnés dans le fascicule *Valeurs représentatives des propriétés de base des matériaux*. La pondération à la source permet dans ce cas de prendre en compte la sécurité simultanément et de façon cohérente sur l'action de poussée et sur la résistance de butée. Dans ce mode de pondération, l'inclinaison des pressions δ est modifiée par le **coefficient partiel** sur l'angle φ du sol.

Pondération n°2 (coefficients de pression limite)

La **valeur de calcul** peut aussi être déterminée par la pondération directe de la **valeur caractéristique** des **coefficients de pression limite du sol** par un **coefficient partiel** approprié. Il faut dans ce cas veiller à introduire de la cohérence dans la prise en compte de la sécurité sur la poussée et sur la butée. Pour cela il est recommandé d'employer un coefficient γ_k qui, simultanément, multiplie le coefficient de poussée et divise le coefficient de butée :

- ◆ Poussée **défavorable** et butée **favorable** : $\gamma_k = 1,20$
- ◆ Poussée **favorable** et butée **défavorable** : $\gamma_k = 0,83$

Les composantes horizontales et verticales des pressions exercées par le terrain sont **simultanément** affectées par la pondération du coefficient de pression K par γ_k . Dans ce mode de pondération, l'inclinaison des pressions δ n'est pas modifiée par le **coefficient partiel**. On considère en effet, pour l'application du **principe de cohérence**, que la **valeur de calcul** de l'angle φ' est identique à la **valeur caractéristique**.

Pondération n°3 (détermination directe)

La **valeur de calcul** peut aussi être **déterminée directement** (par conséquent ce n'est plus une « pondération » à proprement parler) :

- ◆ pour les ouvrages rigides et non déplaçables (soutènements rigides, encastrés profondément et fortement ancrés), on considère souvent que la pression des terres est égale à la pression au repos ;
- ◆ pour les ouvrages peu encastrés ou mis en place dans des terrains saturés de mauvaises caractéristiques (**caissons havés**), on considère souvent que la butée effectivement mobilisable est limitée par la « butée hydrostatique » correspondant à $K_p = 1$.

7.3.2.2 Recommandations pour le choix d'une des approches

La simplicité du mode de pondération est un élément **favorable** à l'établissement des notes de calcul. Dans cet esprit on pourra retenir :

- ◆ la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement) pour l'évaluation des coefficients de poussée et de butée sur les **soutènements-plan**,
- ◆ la pondération n°2 (coefficients de pression limite) pour l'évaluation de l'action de poussée sur les **soutènements-poids** (caissons, quais en blocs).

Il est toujours possible de mettre en œuvre la pondération n°3.

On propose ci-après quelques éléments de réflexion supplémentaire lorsque le choix se pose entre les deux premiers modes de pondération, établis à partir de calculs comparatifs basés sur la **formule de Poncelet**.

Terre-plein horizontal

Pour les **faibles angles de frottement interne** ($\varphi'_k < 25^\circ$), les deux modes de pondération sont voisins en ce qui concerne la composante horizontale de la pression ($< 10\%$). La différence est plus significative en revanche pour la composante verticale, la pondération n°2 (coefficients de pression limite) donnant des efforts verticaux pouvant être supérieurs de 20 % à la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement). On pourra choisir, pour les cas courants, la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement) ; il est toutefois recommandé de choisir la pondération n°2 (coefficients de pression limite) :

- ◆ si l'on veut accroître le niveau de sécurité,
- ◆ si, pour l'état-limite ultime dimensionnant, les charges verticales sont défavorables et importantes.

Pour les **angles de frottement interne élevés** ($\varphi'_k > 35^\circ$), la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement) donne des composantes verticales et horizontales des pressions pouvant être supérieures à la pondération n°2 de 20 % à 30 %. Afin d'éviter une sécurité qui pourrait paraître excessive, on pourra choisir, pour les cas courants, la pondération n°2 (coefficients de pression limite) ; il est toutefois recommandé de choisir la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement) :

- ◆ si l'on veut accroître le niveau de sécurité,
- ◆ si, pour l'état-limite ultime dimensionnant, les charges verticales sont défavorables et importantes.

Pour les **angles de frottement interne intermédiaires**, les deux modes de pondération sont voisins pour la composante verticale des pressions, la différence étant limitée à 12 %. S'agissant de la composante horizontale, les deux modes de pondération restent voisins, tant que le rapport δ/φ' reste inférieur ou égal à 2/3.

- ◆ Si le rapport δ/φ' est inférieur ou égal à 2/3, on pourra choisir indifféremment n'importe lequel des deux premiers modes de pondération.
- ◆ Si le rapport δ/φ' est supérieur à 2/3, on pourra choisir, pour les cas courants et par souci de simplification, la pondération n°2 (coefficients de pression limite) ; il est toutefois recommandé de choisir la pondération n°1 (paramètres de résistance au cisaillement) :
 - si l'on veut accroître le niveau de sécurité,
 - si, pour l'état-limite ultime dimensionnant, les charges verticales sont défavorables et importantes.

Terre-plein incliné

La **valeur caractéristique** de l'angle de frottement interne qui assure l'équivalence pratique entre les deux modes de pondération décroît avec l'inclinaison du terre-plein.

Par simplification, on pourra considérer que les recommandations ci-dessus restent valables lorsque l'inclinaison du terre-plein reste inférieur à 15°.

Pour des terre-pleins davantage inclinés, on pourra choisir, dans une première approche de la sécurité, la pondération n°2 (coefficients de pression limite).

7.3.2.3 La butée du sol comme une résistance

Le fascicule *Valeurs représentatives des résistances* expose l'application des méthodes ci-dessus lorsque la butée du sol est considérée comme une résistance géotechnique.

7.3.3 PRESSIONS OBTENUES PAR LES METHODES ELASTO-PLASTIQUES

 Voir l'application à un CCTP.

Avec l'utilisation des *méthodes élasto-plastiques*, le diagramme contrainte-déplacement à prendre en compte pour les calculs des *états-limites ultimes* est déterminé en appliquant les dispositions suivantes :

- ◆ le coefficient de pression des terres au repos et le coefficient de réaction ne sont pas pondérés (ie leur *valeur de calcul* est identique à leur *valeur caractéristique* : voir le fascicule *Paramètres d'interaction sol-structure*) ;
- ◆ la sécurité est prise en compte au niveau des pressions limites de poussée et de butée, selon l'une des *méthodes indiquées ci-dessus*.

Pour les ouvrages qui nécessitent une attention plus particulière, on attribuera au coefficient de pression des terres au repos et au coefficient de réaction un couple de *valeurs caractéristiques* maximale et minimale.

7.3.4 PRESSIONS DANS LES MASSIFS CONFINES

 Voir l'application à un CCTP.

La *valeur de calcul* du coefficient *K* des poussées latérales dans les *massifs confinés* est déterminée directement (on ne définit pas de *coefficient partiel* pour le coefficient *K*) :

- ◆ la *valeur de calcul* est différente de la *valeur caractéristique* si l'on dispose de modèles valides pour évaluer les différences de comportement des massifs confinés dans le domaine des faibles déformations (associé aux *états-limites* relevant de la catégorie des *ELS*) et dans le domaine des plus grandes déformations (associé aux états-limites relevant de la catégorie des *ELU*) ;
- ◆ la *valeur de calcul* est le plus souvent prise égale à la *valeur caractéristique*, sous réserve que cette dernière soit estimée de façon sécuritaire.

7.3.5 ACTION PONDERALE

 Voir l'application à un CCTP.

La **valeur de calcul** des actions du terrain qui se traduisent par des **effets pondéraux** ou gravitaires est déterminée par la pondération de la force ou de la pression résultante par des coefficients identiques à ceux qui sont valables pour les **actions permanentes** :

- ◆ **1,20** si l'action est **défavorable**,
- ◆ **0,90** si l'action est **favorable**.

7.3.6 DEPLACEMENT D'ENSEMBLE

 Voir l'application à un CCTP.

La **valeur de calcul** des actions du terrain qui se traduisent par un déplacement d'ensemble du sol sont déterminées :

- ◆ pour les **frottements négatifs**, par la pondération de la contrainte de frottement négatif par le coefficient **1,20** (action **défavorable**) ou **1,00** (action **favorable**),
- ◆ pour les **poussées latérales**, par la pondération de la courbe de déplacement imposé $g(z)$ par le coefficient **1,20** (action **défavorable**) ou **0,60** (action **favorable**).

7.3.7 ACTIONS TRANSMISES PAR LE SOL CHARGE

 Voir l'application à un CCTP.

La **valeur de calcul** des actions **transmises par le sol** est déterminée :

- ◆ par l'application du **coefficient partiel** applicable au paramètre de base de l'action,
- ◆ au niveau de la transmission par le sol (coefficient de poussée), par l'application des méthodes spécifiées ci-après.

Dans la mesure où les incertitudes afférentes à chaque source auront été correctement estimées, il n'y a pas lieu d'attendre de cette méthode de pondération des résultats excessivement sécuritaires.

Des constructions géométriques basées sur l'angle de frottement interne φ' sont souvent mises en œuvre.

S'agissant de la contribution propre de la charge de terre-plein, on constate que l'introduction de constructions géométriques liées à l'angle φ' provoque une différenciation importante des deux premiers **modes de pondération**, la différence entre les deux pouvant aller du simple au double.

En revanche, lorsque l'on considère l'ensemble [sol pesant + sol chargé], la variation totale est plus faible et dépend de l'importance relative de la contribution de la charge.

Il y a lieu dans tous les cas d'appliquer le **principe de cohérence** pour la **valeur de calcul** de l'angle φ' .

Dans le cas général, il est recommandé de choisir la pondération la plus *immédiate*, c'est à dire soit celle qui résulte de l'étude du sol pesant (voir ci-dessus), soit celle qui est la plus simple à mettre en œuvre (souvent la **pondération n°2** - coefficients de pression limite).

Cette règle peut être modifiée pour :

- ◆ les angles de frottement internes élevés ($\varphi'_k > 35^\circ$),
- ◆ une contribution de la charge élevée, quand la poussée caractéristique qui lui est due est supérieure à la moitié de la poussée globale [sol pesant + sol chargé],
- ◆ une charge non contiguë à l'ouvrage de soutènement.

Dans ce cas, on recommande de choisir la **pondération n°1** (paramètres de résistance au cisaillement) si l'on veut obtenir un niveau de sécurité plus élevé, la pondération n°2 (coefficients de pression limite) dans le cas contraire.

 Voir également les **valeurs représentatives** des autres types d'actions :

- ◆ Poids propre
- ◆ Actions quasi-statiques des niveaux d'eau
- ◆ Courant
- ◆ Houle
- ◆ Écoulement des eaux
- ◆ Accostage
- ◆ Amarrage
- ◆ Charges routières
- ◆ Stockage sur les terre-pleins
- ◆ Outillage fixe ou sur rails
- ◆ Efforts de manœuvre

7.3.8 ACTIONS DE L'EAU DANS LES SOLS

La **valeur de calcul** de l'action de l'eau dans les sols est obtenue à partir de la valeur de calcul des gradients hydrauliques (voir le fascicule *Actions quasi-statiques des niveaux d'eau*) eux-mêmes définis à partir des **valeurs de calcul** des niveaux d'eau et des perméabilités, charges hydrauliques... qui interviennent dans le calcul des réseaux d'écoulement souterrains.