



MANUEL DE SOUTÈNEMENTS

Draft du 13 juin 2013



Table des matières

Table des matières	2
Préambule.....	4
Introduction	5
1 Parties impliquées	6
2 Informations nécessaires	7
2.1 Composition et propriétés du sous-sol.....	7
2.2 Niveau de la nappe phréatique au repos	9
2.3 Constructions existantes	10
2.4 Canalisations sensibles aux tassements	12
2.5 Charges aux alentours de la fouille.....	12
2.6 Impact des fouilles archéologiques.....	13
2.6.1 Situation en Flandres	13
2.6.2 Situation en Wallonie et Bruxelles.....	14
2.7 Phasage des travaux.....	14
3 Travaux préparatoires.....	15
3.1 Etançonnage des bâtiments adjacents.....	15
3.2 Excavation du sol le long de fondations existantes peu profondes	15
4 Rabattement de la nappe	17
4.1 Dimensionnement du rabattement	17
4.2 Influence du rabattement de la nappe sur l'environnement.....	17
4.3 Mesures de remédiation.....	18
4.3.1 Murs écrans	18
4.3.2 Réinjection de l'eau pompée	19
4.3.3 Couche horizontale injectée	20
4.4 Eléments de rabattement à l'intérieur ou à l'extérieur de la fouille	22
4.4.1 Eléments de rabattement à l'intérieur de la fouille	23
4.4.2 Eléments de rabattement à l'extérieur de la fouille.....	24
4.5 Claquage/Soulèvement du fond de la fouille.....	25
5 Soutènements - Généralités.....	27
5.1 Introduction.....	27
5.2 Parois autostables	27
5.3 Tolérances d'exécution.....	28
5.4 Déformations / déplacements autorisés	29
5.5 Poutres de guidage.....	31
5.6 Plateforme de travail et préparation du terrain	31
5.7 Aspects sécuritaires	31
6 Fiches d'exécution.....	33
6.1 Introduction	33
6.2 Parois berlinoises.....	33
6.3 Parois de pieux.....	34
6.4 Murs de soutènement en soil mix	35
6.5 Rideaux de palplanches	36
6.6 Murs emboués.....	36
7 Support horizontal du soutènement.....	38
7.1 Généralités	38
7.2 Etançons.....	38
7.2.1 Etançons horizontaux	38
7.2.2 Etançons obliques.....	38

7.3	Tirants d’ancrage / micropieux chargés en traction.....	39
7.4	Une risberme.....	40
7.5	La construction proprement dite.....	41
8	Pieux de fondation.....	42
8.1	Points d’attention lors de la réalisation de pieux exécutés avant le creusement de la fouille42	
8.1.1	Hauteur de bétonnage des pieux.....	42
8.1.2	Exécution de pieux le long de fondations existantes et de murs de cave.....	43
8.1.3	Extraction de la terre située entre les pieux.....	43
8.2	Points d’attention lors de la réalisation de pieux exécutés après le creusement de la fouille44	
8.2.1	Praticabilité du sol de la fouille.....	44
8.2.2	Installation de pieux jusqu’aux couches où le niveau de charge hydraulique se trouve au-dessus de la surface de travail.....	44
8.2.3	Exécution de pieux le long de murs de soutènement.....	45
8.2.4	Perçage de fondations et murs de cave abandonnés.....	46
9	Coordination.....	47
10	Analyse des risques.....	49
11	Monitoring.....	50
	Références.....	51
	Annexe A.....	52
	CSTC - Infiches 56.1 à 56.6.....	52

Préambule

Ce document a été rédigé dans le cadre des soirées à thème "Soutènements et tirants d'ancrage" organisées par le Groupement Belge de Mécanique des Sols et de la Géotechnique (GBMS) en collaboration avec l'Association Belge des Entrepreneurs de Fondation (ABEF) et le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC).

Cet exercice peut être considéré comme la première étape d'une tentative de mettre à disposition, à relativement court terme, un ensemble de documents de référence géotechniques portés par le secteur.

Ces documents pourront ensuite servir de base pour rédiger des documents plus prescriptifs et normatifs (par ex. Notes d'informations techniques, normes NBN, etc.) qui, outre l'Annexe Nationale de l'Eurocode 7, pourront être exploités par le secteur.

Ce texte repose sur une note du *Prof. Em. Ir. Jan Maertens* "Comment éviter les problèmes dû aux fouilles?", qui a été révisé pour l'occasion, afin d'en faire un "Manuel des soutènements".

Par ailleurs, ont également contribué à ce texte :

- *Maurice Bottiau, ABEF & Franki Foundations Belgium*
- *Bart Lameire, ABEF & Lameire Funderingstechnieken*
- *Noël Huybrechts, CSTC & KU Leuven*
- *Christian Treve, CFE*
- *Gauthier Van Alboom, MOW-VO, Département géotechnique*

Ce document est une version provisoire et ne peut donc pas être considéré comme définitif.

Dans la mesure du possible, nous vous invitons à transmettre vos commentaires sur le document jusqu'au 30 novembre 2013.

Seuls les commentaires envoyés via le modèle disponible sur le site de BGGG-GBMS (www.bggg-gbms.be) seront acceptés.

Nous espérons que cette initiative sera accueillie positivement dans le secteur de la construction et entraînera une amélioration globale de l'approche des projets géotechniques.

*Ir. Maurice Bottiau,
Président du GBMS*

Introduction

Contrairement à beaucoup d'autres activités de la construction, la réalisation des fouilles génère souvent une situation particulière parce qu'elle implique beaucoup de parties.

C'est pourquoi il n'est généralement pas possible de déterminer de manière univoque qui est responsable de quoi et, en cas de sinistre, qui est responsable des dommages causés. Très fréquemment, les responsabilités engendrent des discussions interminables qui doivent parfois être tranchées par le tribunal.

Les problèmes récurrents sont :

- dommages aux bâtiments, constructions ou voiries attenantes ;
- notes de calcul incorrectes ou incomplètes ;
- terrain instable ;
- problèmes d'exécution en raison d'obstacles souterrains, de massifs et/ou de canalisations ;
- travaux supplémentaires ;
- absence de permis pour la réalisation de tirants d'ancrage sous les bâtiments attenants.

La cause de ces problèmes est souvent à attribuer à :

- une information incomplète ou incorrecte ;
- des erreurs de projet ;
- une exécution fautive ;
- l'absence d'un cadre légal.

Les paragraphes suivants traitent des différents aspects du projet et de l'exécution d'un soutènement.

Cela concerne :

- la collecte des informations concernant la composition et les propriétés du sous-sol, le niveau de la nappe phréatique au repos et les constructions présentes aux alentours ;
- les travaux de démolition et préparatifs ;
- le rabattement de la nappe phréatique et les mesures éventuellement nécessaires pour y remédier ;
- les soutènements et leur support horizontal ;
- les travaux de terrassement ;
- l'exécution des pieux chargés en compression ou en traction ;
- la coordination ;
- l'analyse de risque ;
- le monitoring.

1 Parties impliquées

Nous l'avons dit plus haut, la conception et l'exécution d'un soutènement impliquent presque toujours beaucoup de parties, comme :

- le maître de l'ouvrage ou le donneur d'ordre ;
- l'architecte ou le service d'étude en cas de travaux publics ;
- un bureau d'étude ;
- un entrepreneur principal ;
- des sous-traitants spécialisés pour :
 - les travaux de démolition et éventuellement d'étaïonnement ;
 - le rabattement de la nappe phréatique ;
 - les travaux de terrassement ;
 - les soutènements ;
 - les fondations.
- Un bureau de contrôle

Du fait du trop grand nombre de parties impliquées, il n'est pas toujours facile de savoir qui porte la responsabilité.

A cela s'ajoute encore le fait que le rôle de l'assureur ABR n'est pas toujours univoque, surtout en ce qui concerne son intervention lors de la conception et du choix et/ou de l'acceptation des systèmes de soutènement appliqués.

2 Informations nécessaires

Lors de la conception et de l'exécution des soutènements, il est important que les informations suivantes soient disponibles :

- composition et propriétés du sous-sol, y compris la présence éventuelle de pétrifications/matériau induré;
- niveau de la nappe phréatique au repos ;
- type et dimensions des fondations des constructions présentes dans l'environnement et des charges appliquées sur ces fondations ;
- la position des canalisations sensibles au tassement ;
- les charges aux alentours de la fouille du fait de la présence de grues ou de stockages ;
- l'impact éventuel de fouilles archéologiques ;
- le phasage des travaux.

2.1 Composition et propriétés du sous-sol

Pour le type et le nombre d'essais à effectuer, il est fait référence aux "Procédures standard de la reconnaissance géotechnique" (GBMS, 2012) et aux "Directives pour le rabattement de la nappe" (Van Calster e.a., 2009). Ces deux documents sont disponibles sur www.bggq-gbms.be.

Une étude de l'environnement doit être effectuée comme indiqué dans le paragraphe 1 des "Directives pour le rabattement de la nappe".

L'exécution d'essais de pénétration uniquement n'est acceptable que pour les fouilles de certaines dimensions et jusqu'à une profondeur ($\leq 3\text{m}$) et si l'étude de l'environnement fait apparaître que le niveau de la nappe phréatique se trouve au moins à 0,5 m sous le niveau d'excavation.

Le type et la classe d'application des essais de pénétration sont fixés conformément aux "Procédures standard de la reconnaissance géotechnique : essais de pénétration" (GBMS, 2012).

Lorsque des fouilles sont réalisées jusqu'au niveau de la nappe phréatique, un piézomètre doit toujours être placé. Ce piézomètre doit mesurer le niveau d'eau de manière régulière et suffisamment longtemps. Il est inacceptable de déduire le niveau de la nappe phréatique de mesures dans le trou de sondage pour ce type de fouille.

Pour la conception et l'exécution des fouilles, les essais de pénétration doivent être effectués jusqu'à :

- minimum 10 m de profondeur
- 2 x la profondeur d'excavation à réaliser (voir figure 1)
- le bas des éléments de rabattement à placer (= filtres ou pompes immergées) ; voir figure 2.

Lorsque des barrières ralentissant l'eau ou barrières étanches sont prévues, un nombre d'essais de pénétration jusqu'à une profondeur suffisante dans la couche de sol étanche suffit (min. 2 m).

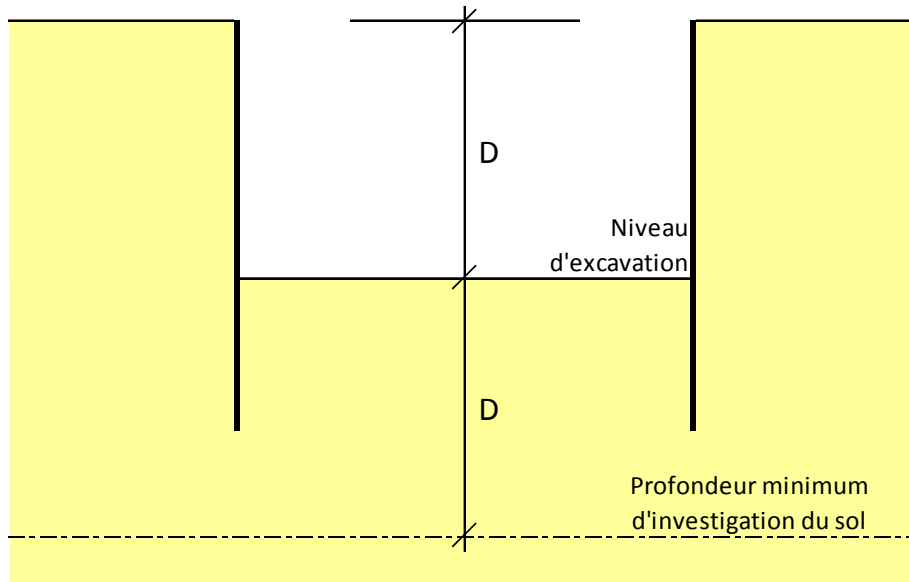


Figure 1

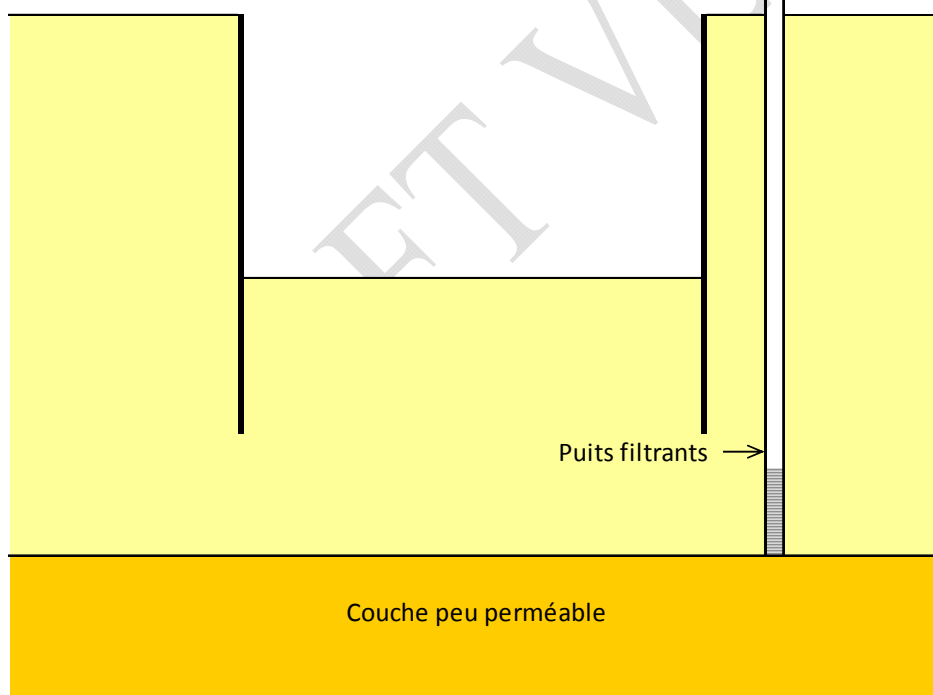


Figure 2

Pour les soutènements, on prévoit 1 essai de pénétration par 300 m², avec un minimum de 3. Pour les sols fortement hétérogènes (par ex. dépôts du quaternaire de très grande profondeur), il est recommandé d'augmenter la densité de sondage jusqu'à 1 par 150 m².

Pour les sols très homogènes (par ex. couches tertiaires documentées sans anomalies, discontinuités), la densité de sondage peut être ramenée à 1 par 1000 m² moyennant justification motivée, mais toujours avec un minimum de 3 essais de pénétration.

Pour les structures linéaires, des essais de pénétration standard sont prévus tous les 50 m. Pour les sols très hétérogènes, il est recommandé de limiter la distance entre les essais de pénétration à 25 m. Pour les sols très homogènes (par ex. couches tertiaires documentées sans anomalies, discontinuités), la densité de sondage peut être ramenée à 1 tous les 100 m moyennant justification motivée.

Si les résultats des essais de pénétration font apparaître des anomalies, il est toujours nécessaire d'effectuer des essais de pénétration supplémentaires afin de pouvoir déterminer les limites de ces anomalies.

2.2 Niveau de la nappe phréatique au repos

La manière de déterminer le niveau de la nappe phréatique au repos est clairement décrite dans les "Directives pour le rabattement de la nappe".

Il est très important que le niveau de la nappe phréatique au repos (ou le niveau de charge hydraulique) soit mesuré dans toutes les nappes qui sont influencées par l'exécution de la fouille, c.-à-d. à une profondeur au moins égale à 2 x la profondeur d'excavation.

Cela veut donc dire qu'il faut placer des piézomètres distincts dans chaque nappe de manière à pouvoir effectuer des mesures suffisamment longtemps à l'avance (voir figure 3).

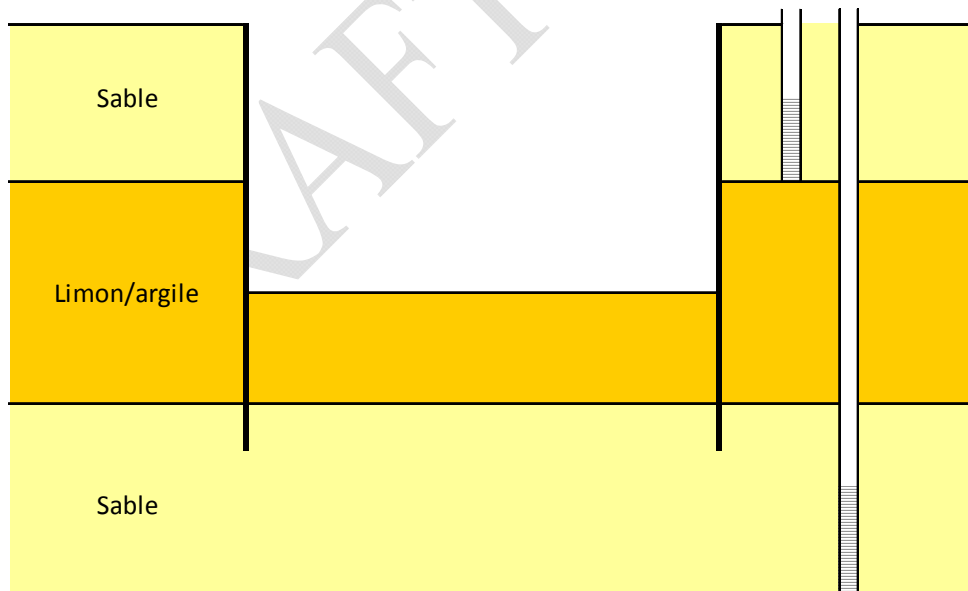


Figure 3

Il n'est pas toujours possible de délimiter les nappes présentes dans le sous-sol de manière univoque. En cas de doute, il convient de placer des piézomètres dans toutes les nappes qui peuvent éventuellement être aquifères.

Le niveau de la nappe à prendre en compte dépend dans ce cas de la situation et des informations disponibles (voir tableau 1).

Situation	Niveau de la nappe à prendre en compte
Dans le cas d'un niveau d'eau libre, situations provisoires du soutènement	-sans mesure : $N_{H_2O,car} = \text{niveau du sol}$ -suivi de la mesure ¹ pendant l'excavation : $N_{H_2O,car} = N_{H_2O,max} + 0,5 \text{ m}$
Dans le cas d'un niveau d'eau libre, situation définitive du soutènement	-pour 1 niveau d'eau mesuré ¹ : $N_{H_2O,car} = N_{H_2O} + 1,0 \text{ m}$ -pour une série de mesures ¹ de 6 mois : $N_{H_2O,car} = N_{H_2O,max} + 0,75 \text{ m}$ -pour une série de mesures ¹ > 1 an : $N_{H_2O,car} = N_{H_2O,max} + 0,25 \text{ m}$ -pour une série de mesures ¹ = durée de vie : $N_{H_2O,car} = P_{H_2O,max} + 0,0 \text{ m}$
Dans le cas d'un niveau d'eau sous pression	le niveau d'eau est déterminé dans le cadre d'une étude hydro-géologique autonome
Dans le cas d'un niveau d'eau pendant le rabattement	le niveau d'eau est déterminé dans le cadre d'une étude de rabattement autonome

¹ La mesure doit être effectuée dans un piézomètre (tube-sonde) installé dans le terrain

Tableau 1 – Niveau de la nappe à prendre en compte

2.3 Constructions existantes

S'il y a des bâtiments à moins d'une distance par rapport au bord de la fouille égale à la profondeur d'excavation, comme le montre la figure 4, les dimensions et la profondeur d'assise des fondations doivent être déterminées ainsi que les charges exercées sur ces fondations.

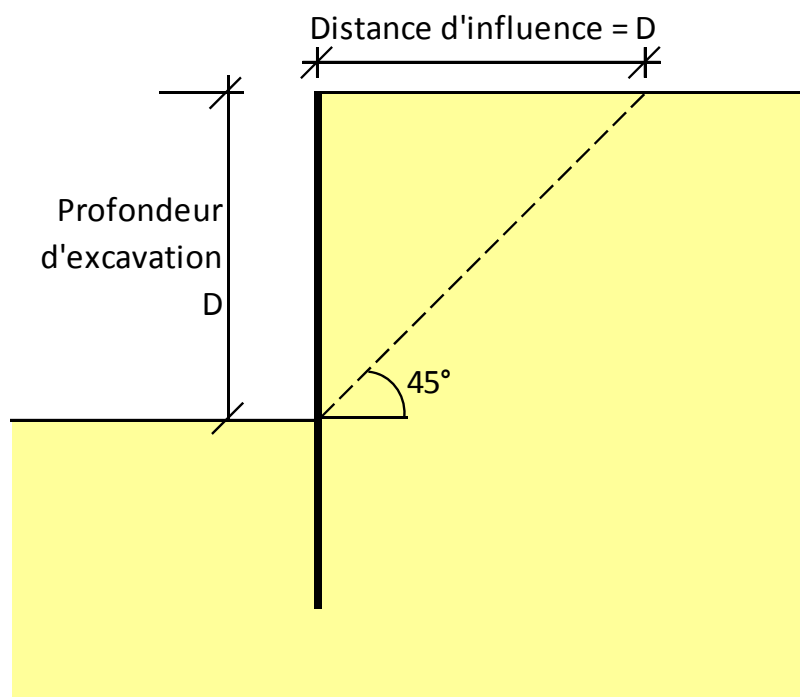


Figure 4

La détermination des dimensions et de la profondeur d'assise des fondations des bâtiments existants est souvent ignorée, surtout lorsque les plans de ces fondations sont disponibles. A cet égard, il convient de noter que :

- la plupart des plans qui sont disponibles sont des plans d'étude et non des plans *as-built* ;
- il est pratiquement toujours impossible de savoir à partir des plans existants si d'autres travaux ont été effectués aux fondations ou sous ces fondations après la construction du bâtiment.

La méthode la plus indiquée pour déterminer les dimensions et la composition des fondations des constructions existantes consiste à pratiquer des trous de sondage/d'exploration le long de ces fondations. Cette méthode permet de contrôler les dimensions et la composition des fondations. Pour pratiquer des trous de sondage, il est par contre nécessaire que le niveau de la nappe souterraine se trouve sous le niveau d'assise des fondations ou puisse être abaissé aisément jusqu'à ce niveau.

S'il n'est pas possible, pour une quelconque raison, de pratiquer des trous de sondage jusqu'au niveau d'assise des fondations, ces fondations doivent être carottées comme indiqué dans la figure 5 ci-dessous.

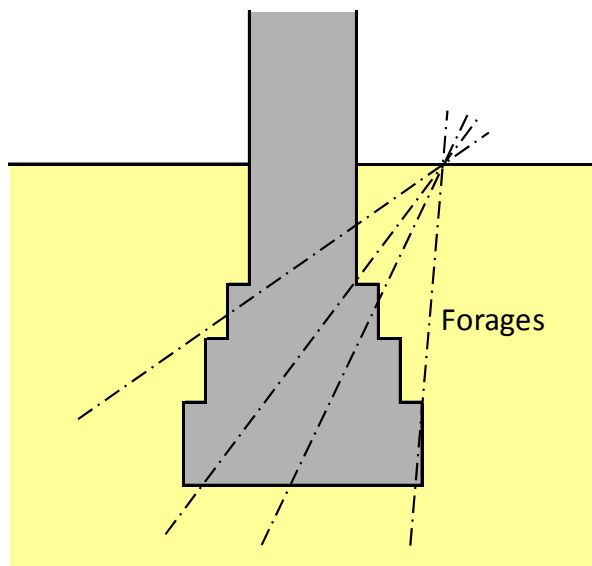


Figure 5

Lors de la réalisation des trous de sondage, il est également important de vérifier s'il y a déjà eu des modifications antérieures à ces fondations, par ex. des rempiètements ou des reprises en sous-œuvre. Lors de la détermination des tassements ou déplacements horizontaux qui sont tolérés en creusant la fouille, il faut alors tenir compte du fait que le bâtiment ou la construction a déjà subi certains tassements suite à la réalisation de ces rempiètements ou reprises en sous-œuvre.

L'examen des fondations existantes et la détermination des charges exercées sur ces fondations fait partie de la tâche de coordination de l'architecte ou du service d'étude lors de travaux publics. L'architecte ou le service d'étude peut très bien transmettre cette tâche de manière formelle au bureau d'étude, à l'entrepreneur ou à un sous-traitant spécialisé. Un sous-traitant spécialisé ne pourra d'ailleurs effectuer cet examen que si la demande lui en est faite formellement. L'exécution de cet examen fera alors l'objet d'un poste spécial dans le métré.

2.4 Canalisations sensibles aux tassements

Lorsque des canalisations sensibles aux tassements (par ex. canalisations d'eau et conduites de gaz haute pression) se trouvent à moins d'une distance par rapport au bord de la fouille égale à la profondeur d'excavation, la position exacte (en surface et en profondeur) de ces canalisations doit être déterminée.

2.5 Charges aux alentours de la fouille

Les charges aux alentours de la fouille provenant des grues et de stockages doivent être renseignées le plus tôt possible pour pouvoir être prises en compte dans le projet de soutènement.

2.6 Impact des fouilles archéologiques

2.6.1 Situation en Flandres

La nécessité éventuelle de fouilles archéologiques est réglementée comme suit.

a) Pour personnes non morales de droit privé

Le "Décret du 30 juin 1993 visant la protection du patrimoine archéologique, modifié par les décrets des 18 mai 1999, 28 février 2003, 10 mars 2006 et 27 mars 2009" est d'application. Le texte complet est disponible sous le lien suivant : <http://www.rwo.be/NL/RWOnieuwsbrief/Hoofdmenu/Regelgeving/OnroerendErfgoed/Dehuidigewetdecreetenregelgeving/Decreetvan30juni1993>

Ce décret indique que pour les demandes de permis qui peuvent avoir une influence sur le sous-sol, l'autorité délivrant le permis est tenue de demander l'avis de l'agence du patrimoine immobilier (OE) dans les trente jours suivant la réception du dossier. L'OE dispose à son tour de 30 jours pour émettre un avis.

b) Pour les personnes morales de droit privé :

Le Codex flamand Aménagement du territoire Art.4.7.16 est d'application.

La demande de permis se fait via la commune. Ici aussi, l'OE dispose de 30 jours pour émettre un avis.

Si une étude archéologique s'avère nécessaire, l'OE rédige un document "Prescriptions particulières à l'autorisation d'une demande archéologique". L'avis de l'OE (en cas de demande de construire) y fait toujours référence.

Ces prescriptions sont contraignantes du fait de leur interaction avec le permis d'excavation. Elles peuvent également être utilisées par le maître de l'ouvrage pour demander des devis ou propositions de prix auprès des services susceptibles d'effectuer cette étude.

L'étude archéologique peut être effectuée avant l'adjudication proprement dite ou peut être reprise dans le contrat de l'entreprise.

La durée de l'étude est estimée dans l'offre.

Une communication préalable entre le maître de l'ouvrage/l'entrepreneur et l'OE est fortement recommandée étant donné que certaines exigences liées au calendrier et au planning du projet de construction peuvent être reprises dans les Prescriptions particulières susmentionnées.

L'OE s'emploiera à agir promptement pour ne pas entraver inutilement le bon avancement des travaux : au terme de l'étude archéologique sur le terrain, l'OE donnera son accord pour les travaux.

Pour les grands projets, cette autorisation des travaux peut être accordée par phase d'exécution du projet.

2.6.2 Situation en Wallonie et Bruxelles

A compléter.

2.7 Phasage des travaux

L'évaluation correcte des conséquences du phasage des travaux représente un point important de l'exécution des fouilles.

En effet, l'exécution des fouilles consiste en une succession de différentes phases : préparation du terrain, soutènement, phases d'excavation, rabattement de la nappe, installation de pieux dans la fouille,...

Pendant ces différentes phases d'exécution, des situations et cas de charges non prévus lors de la phase de dimensionnement de la fouille peuvent survenir et avoir des conséquences parfois graves, comme par ex. :

- phases d'excavation provisoires, telles que des zones plus profondes pour la construction d'ascenseur ou l'installation de semelles de fondation contre les murs de soutènement ;
- risbermes provisoires avec charges ponctuelles sur les pieux ;
- charges indirectes (grues de manutention,...) ;
- fouilles près des pieux fraîchement exécutés ;
- ...

3 Travaux préparatoires

Quand une fouille doit être réalisée à la place d'un bâtiment existant, il convient d'indiquer clairement :

- si les bâtiments à proximité doivent être étançonnés et si oui, comment et par qui ;
- jusqu'à quel niveau le sol peut être excavé le long des fondations existantes.

3.1 Etançonnage des bâtiments adjacents

La décision d'étançonner ou non et du choix de l'exécutant fait partie de la tâche de coordination de l'architecte ou du service d'étude en cas de travaux publics. L'architecte ou le service d'étude peut très bien transmettre cette tâche de manière formelle au bureau d'étude, à l'entrepreneur ou à un sous-traitant spécialisé. Un démolisseur ne pourra d'ailleurs effectuer cette tâche que si la demande lui en est faite formellement. L'exécution de cette tâche fera alors l'objet d'un poste spécial dans le métré.

Lors de la décision du type d'étançonnement, il convient de tenir compte du phasage des travaux afin d'éviter toute interférence avec d'autres activités ultérieures.

3.2 Excavation du sol le long de fondations existantes peu profondes

L'excavation en excès de terre le long de fondations existantes peu profondes réduit considérablement leur capacité portante et provoque des tassements.

Pour des bâtiments de max. 3 étages, on peut considérer en général qu'il doit rester en permanence 0,50 m de terre près de fondations, cf. figure 6 ci-dessous.

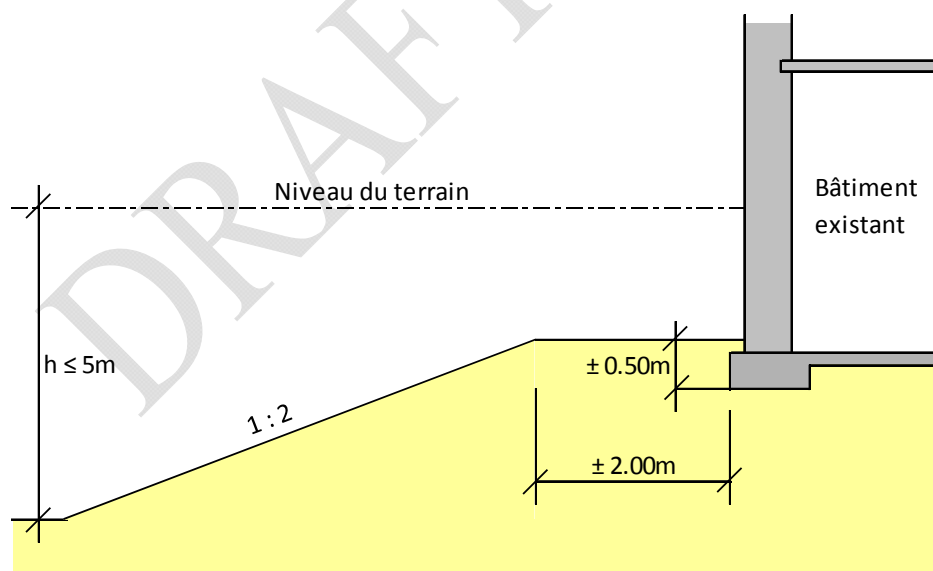


Figure 6

Il n'est permis de continuer à creuser que si des calculs de stabilité démontrent que la capacité portante des fondations est assurée selon l'exigence de sécurité normale. Cette règle ne vaut par ailleurs pas pour les bâtiments qui ont des pieux pour fondations.

Pour des immeubles plus élevés, il faut systématiquement vérifier le niveau du sol jusqu'auquel il est permis de creuser le long des fondations existantes.

Le contrat de l'entreprise de terrassement doit clairement indiquer le niveau jusqu'auquel il est permis de creuser le long des fondations existantes.

Remarque importante :

Lorsque des poutres de guidage sont apposées pour la réalisation du soutènement (voir figure 7), la règle mentionnée ci-dessus doit être respectée au moment de creuser le sol pour la pose de ces poutres.

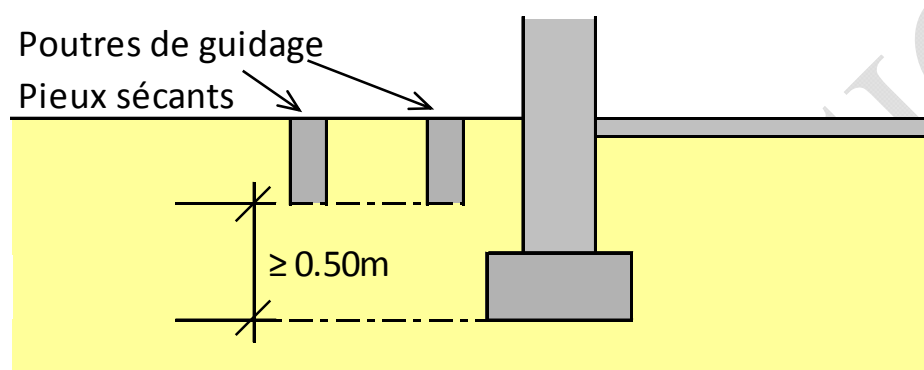


Figure 7

La décision du niveau du sol jusqu'auquel l'excavation peut se faire le long des fondations existantes fait partie de la tâche de coordination de l'architecte ou du service d'étude en cas de travaux publics. L'architecte ou le service d'étude peut très bien transmettre cette tâche de manière formelle au bureau d'étude, à l'entrepreneur ou à un sous-traitant spécialisé. L'entreprise de terrassement ne pourra d'ailleurs effectuer cette tâche que si la demande lui en est faite formellement.

4 Rabattement de la nappe

4.1 Dimensionnement du rabattement

Les "Directives pour le rabattement de la nappe" indiquent clairement que le projet de rabattement de la nappe doit être élaboré par l'architecte ou par quelqu'un qui a été désigné préalablement et de manière formelle par l'architecte. Cette règle suit le raisonnement ci-après : en général, c'est l'architecte qui – de concert avec le maître de l'ouvrage – décide de construire sous le niveau de la nappe. Il incombe donc à l'architecte de veiller à ce que le rabattement de la nappe nécessaire à cet effet soit étudié convenablement.

Le projet de rabattement de la nappe ne comprend pas uniquement le dimensionnement des éléments de rabattement nécessaires, mais aussi :

- la détermination du type de rabattement qui sera pratiqué ;
- la planification du rabattement dans le temps ; le début du rabattement, le rabattement complet ou le rabattement en fonction de l'excavation, le rabattement de la nappe après exécution de la dalle ;
- l'étude d'une éventuelle influence du rabattement de la nappe sur l'environnement ;
- la détermination des éventuelles mesures nécessaires pour y remédier ;
- préciser s'il y a lieu de prévoir des éléments de rabattement à l'intérieur comme à l'extérieur de la fouille ;
- vérifier si le fond de la fouille peut s'affaisser.

Comme la présence ou non de mesures de remédiation exerce un impact important sur le prix coûtant, ceci ne peut être laissé tout simplement à l'entrepreneur et/ou au sous-traitant.

4.2 Influence du rabattement de la nappe sur l'environnement

Afin de pouvoir évaluer l'influence du rabattement de la nappe sur l'environnement, il est nécessaire de connaître la composition du sol dans le rayon d'influence du rabattement de la nappe. Pour cette raison, les "Directives pour le rabattement de la nappe" indiquent clairement qu'il faut toujours une étude globale préalable à l'étude du sol proprement dite pour connaître la composition et les propriétés du sol.

Pour pouvoir estimer l'influence du rabattement de la nappe sur l'environnement, il est d'usage d'effectuer des calculs de tassement à l'endroit des essais de pénétration disponibles. Ces calculs de tassement sont toujours effectués pour le niveau du sol sans charge parce qu'on considère qu'en cas de rabattement de la nappe souterraine, le tassement du niveau du sol sans charge est toujours plus élevé que celui des constructions existantes. Il n'y a que pour les constructions de cave soumises à de grands efforts que ce n'est pas le cas.

Les tassements générés par un rabattement de la nappe sont très largement déterminés par le fait que le niveau de la nappe sur place ait déjà été abaissé antérieurement. Si le niveau de la nappe a déjà été abaissé antérieurement, le calcul doit se faire avec la

constante de gonflement (remise en charge du sol) (obtenues par les essais de compression) plutôt qu'avec la constante de compressibilité. Les tassements observés auront alors généralement un facteur 3 à 5 x inférieur à celui obtenu sur base des calculs de tassement standard.

S'il est impossible de déterminer clairement les tassements prévus, il est préférable de passer à un essai de rabattement, comme indiqué dans les "Directives pour le rabattement de la nappe".

L'Annexe D des "Directives pour le rabattement de la nappe" indique comment la constante de compressibilité utilisée pour calculer les tassements à prévoir peut être obtenue à partir des résultats des essais de pénétration.

4.3 Mesures de remédiation

L'influence du rabattement de la nappe peut être limitée par :

- la pose de murs écrans ;
- une réinjection de l'eau pompée ;
- la pose d'une couche horizontale réalisée par injection.

4.3.1 Murs écrans

Des murs écrans (appelés aussi écrans ou parois étanches) sont placés pour isoler hydrauliquement la fouille de l'environnement. Les murs écrans sont dès lors uniquement efficaces quand ils sont réalisés sur tout le pourtour de la fouille et partout jusqu'à une couche ayant une perméabilité suffisamment faible.

Cela veut dire que :

- des mesures complémentaires sont toujours nécessaires quand un mur écran est interrompu localement, par ex. à hauteur de canalisations ou d'obstacles dans le sol ;
- il faut tenir compte précisément des différences de niveau éventuelles (du front supérieur) de la couche peu perméable. Pour limiter au maximum les risques à ce niveau, il faut toujours effectuer suffisamment d'essais (essais de pénétration et/ou carottages) pour déterminer le niveau supérieur de la couche peu perméable et donc aussi la profondeur à laquelle le mur écran doit être installé.

Les "Directives pour le rabattement de la nappe" indiquent qu'un mur écran doit être ancré jusqu'à minimum 1,5 m dans la couche peu perméable, à augmenter éventuellement en fonction de la perméabilité de la couche, de la pente présente et de la variation du niveau supérieur de la couche peu perméable.

Dans la pratique, on ancre couramment des murs écrans jusqu'à 2 m dans la couche peu perméable. On part du principe qu'une hauteur de fiche de 1 m est nécessaire pour obtenir une bonne étanchéité et que le niveau supérieur de la couche peu perméable peut afficher une variation de 1 m. Lorsque les résultats de l'étude du sol font apparaître que le niveau supérieur de la couche peu perméable affiche de grandes différences, il peut être

utile d'ancrer les murs écrans à une plus grande profondeur dans la couche peu perméable.

Si la couche étanche n'a qu'une épaisseur limitée, il est absolument nécessaire de vérifier que le fond de fouille ne puisse pas être soulevé par la pression de l'eau (poussée d'Archimède) exercée sur le niveau inférieur de la couche peu perméable.

Remarque :

Dans le cas de parois de pieux sécants échelonnés (installés en touches de piano), la profondeur du mur écran est déterminé par la profondeur d'assise des pieux primaires (=les plus courts).

4.3.2 Réinjection de l'eau pompée

En renvoyant entièrement ou partiellement dans le sol l'eau pompée, il est possible de limiter l'influence du rabattement de la nappe dans l'environnement. A cet égard, il convient de faire une distinction claire entre les situations suivantes :

- Le pompage et la réinjection se font dans la même couche aquifère
 - sans mur écran
 - avec mur écran
- Le pompage et la réinjection se font dans différentes nappes aquifères.

Lorsque le pompage et la réinjection se font dans la même nappe, il y a lieu de respecter une distance entre la source d'extraction et la source de réinjection d'au moins 10 fois la profondeur de rabattement.

Lorsque la réinjection se fait directement derrière le mur écran, il faut se mettre d'accord sur le niveau de la nappe qui doit être pris en compte pour le dimensionnement de ce mur écran (voir figure 8).

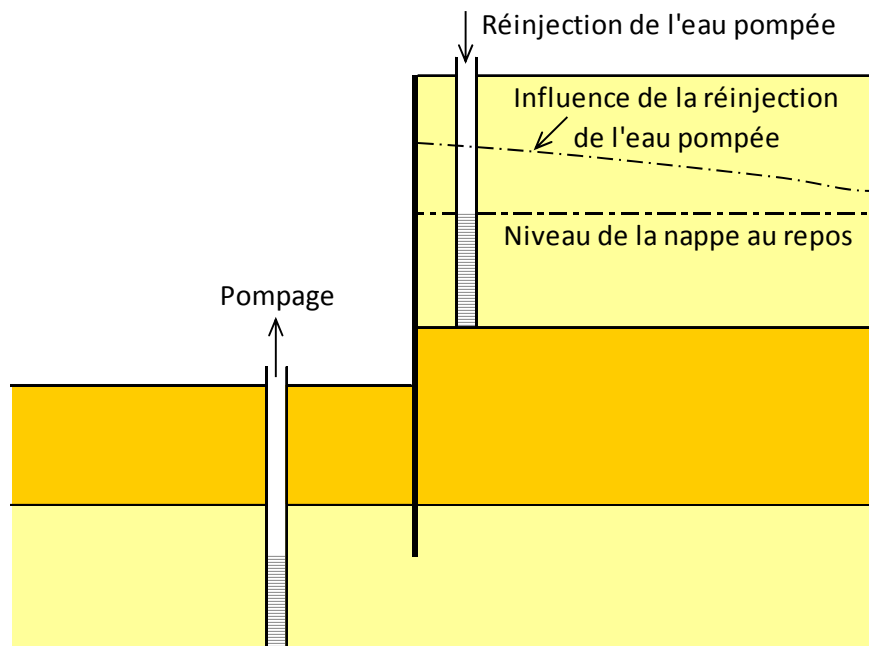


Figure 8

Une réinjection exige toujours une étude détaillée où :

- la profondeur et l'arrangement des puits d'extraction et de réinjection sont déterminés ;
- l'aptitude de l'eau pompée à être réinjectée est étudiée ;
- l'influence sur l'environnement est vérifiée.

Les informations en la matière sont reprises dans le par. 5.3.2 des "Directives pour le rabattement de la nappe".

4.3.3 Couche horizontale injectée

Lorsqu'il n'y a pas de couche peu perméable à une profondeur raisonnable, l'influence du rabattement de la nappe peut être limitée en réalisant une couche horizontale « étanche » par injection à hauteur du bord inférieur des murs de soutènement. Il convient alors de faire une distinction claire entre les couches injectées inférieures et supérieures.

a) Couches injectées inférieures

Les couches injectées inférieures (situées en profondeur) sont placées à une telle profondeur que le massif de terre posé au-dessus de la couche injectée ne peut pas être soulevé. Pour cela, la pression d'eau (la poussée d'Archimède) sur le bas de la couche injectée doit toujours être inférieure à $0,9 \times$ le poids de la terre au-dessus (= contrainte totale σ_v), comme indiqué sur la figure 9 ci-dessous.

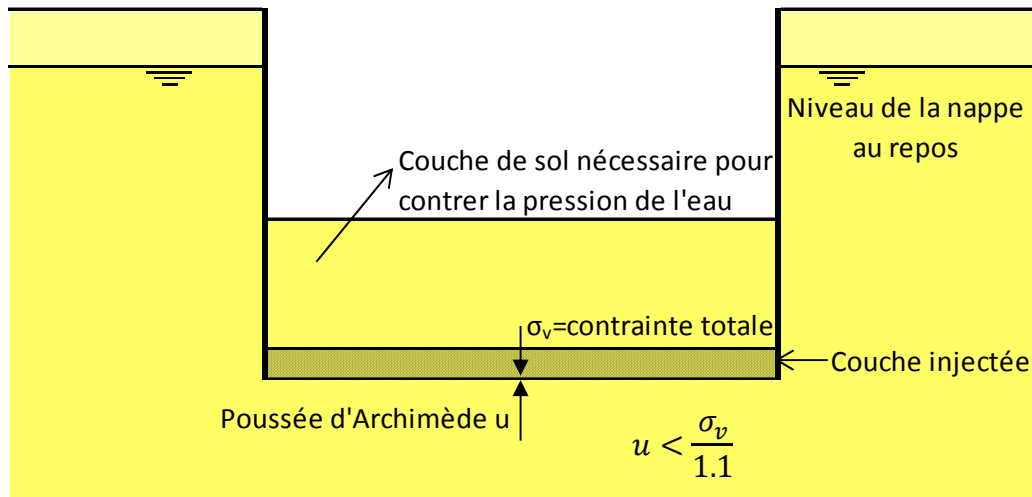


Figure 9

Pour l'abaissement du niveau d'eau dans la fouille, il faut toujours installer un rabattement limité. Afin d'éviter autant que possible les discussions, l'exécution de ce rabattement doit être très bien synchronisée avec l'exécution de la couche horizontale injectée.

b) Couches injectées supérieures

En ce qui concerne les couches injectées supérieures, une couche injectée rigide est réalisée à une certaine profondeur sous le fond de fouille, laquelle est ancrée au moyen d'éléments de traction. La couche injectée doit être suffisamment robuste pour pouvoir transférer la pression d'eau (poussée d'Archimède) vers les éléments travaillant en traction.

Une couche de terre d'une épaisseur suffisante doit être maintenue au-dessus de la couche injectée pour qu'il n'y ait pas d'infiltration si la couche d'injection affiche certaines fuites (voir figure 10).

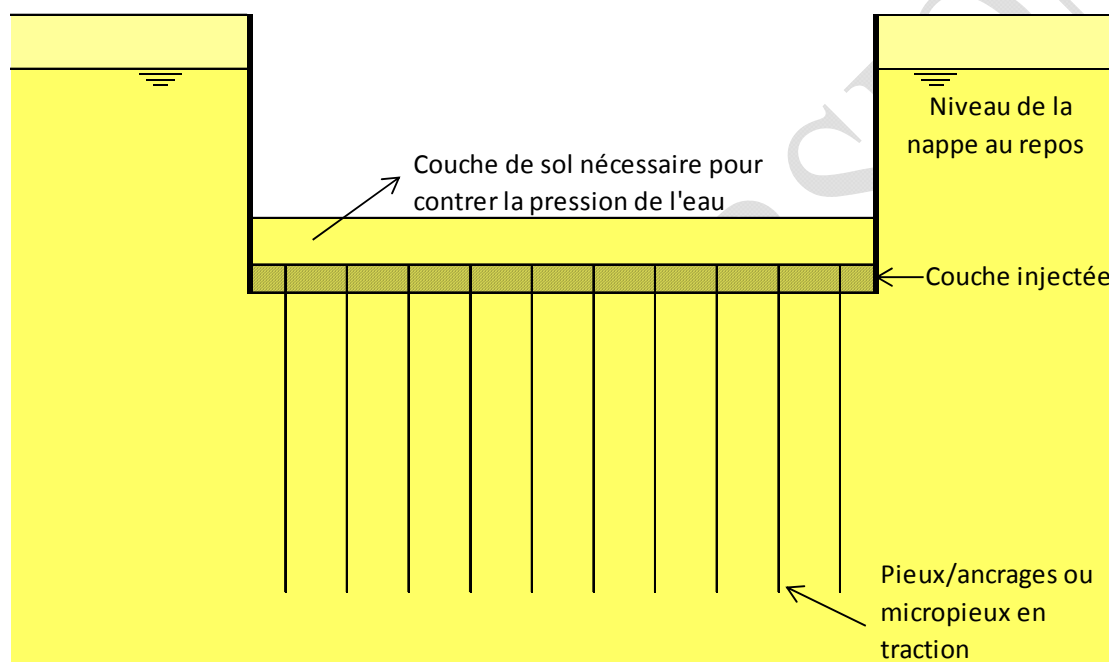


Figure 10

4.4 Eléments de rabattement à l'intérieur ou à l'extérieur de la fouille

Lors d'un rabattement de la nappe, il faut toujours déterminer clairement si les éléments de rabattement doivent être placés à l'intérieur ou à l'extérieur de la fouille.

Il est important de se concerter à ce propos pour pouvoir :

- vérifier si le soutènement et le rabattement sont compatibles ;
- déterminer la pression d'eau qui devra être prise en compte lors du dimensionnement du soutènement.

4.4.1 Éléments de rabattement à l'intérieur de la fouille

La pose d'éléments de rabattement à l'intérieur de la fouille a pour avantage de :

- limiter au minimum l'encombrement ;
- pouvoir placer l'installation de rabattement après qu'une fouille préalable ait été effectuée, par ex. jusqu'à 0,50 m au-dessus de la nappe ;
- pouvoir limiter l'influence du rabattement de la nappe en ne mettant des éléments de rabattement que jusqu'à une certaine hauteur au-dessus du niveau inférieur du soutènement.

Si des éléments de rabattement sont placés à l'intérieur de la fouille, il faut toujours convenir clairement du niveau d'eau qui doit être pris en compte dans le dimensionnement du soutènement le long du bord extérieur de la fouille.

En effet, c'est surtout dans le cas de strates et de couches de sable où apparaissent des couches perturbatrices (lentilles de sols de caractéristiques différentes : lentilles d'argile, de limon,...) qu'il n'y a aucune certitude que le niveau d'eau derrière le soutènement soit suffisamment rabaissé partout lorsque les éléments de rabattement sont mis à l'intérieur de la fouille (voir figure 11).

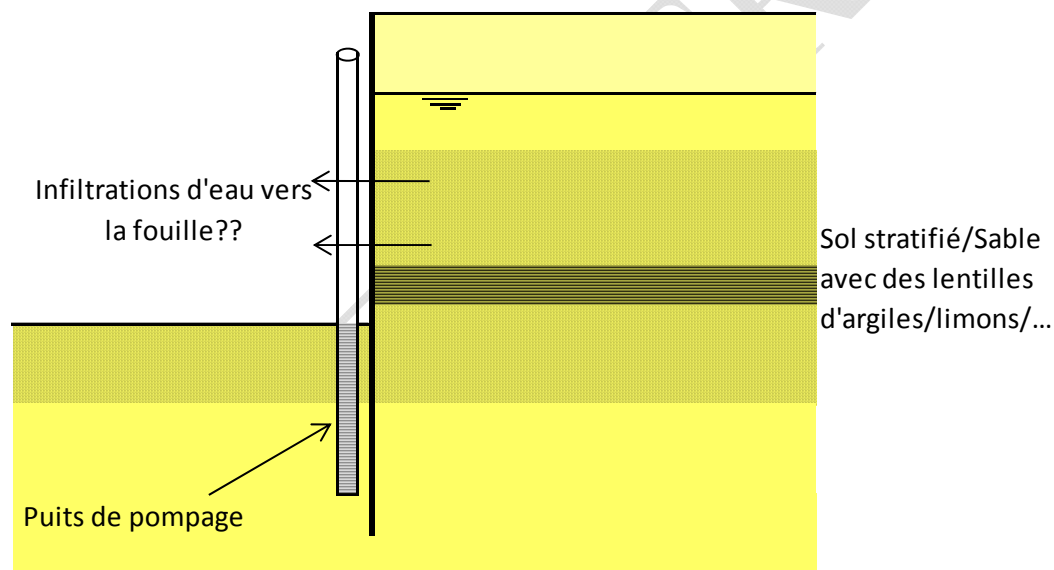


Figure 11

La pose des éléments de rabattement le long du côté intérieur de la fouille n'est pas autorisée dans le cas des parois berlinoises et de parois de pieux (tangents) qui ne peuvent pas remplir de fonction étanche à l'eau.

Les parois berlinoises peuvent poser des problèmes si :

- une pression d'eau apparaît derrière une paroi autostable et que celle-ci subit du coup un trop grand déplacement horizontal ;
- une pression d'eau apparaît derrière les plaques métalliques et que celles-ci subissent dès lors une trop grande déformation ;
- une pression d'eau apparaît derrière une paroi et que, par conséquent, la terre et l'eau s'écoulent dans la fouille par les fentes présentes.

Dans le cas de pieux sécants, il ne faut jamais considérer que le niveau d'eau le long du côté extérieur de la fouille baissera de la même façon qu'à l'intérieur de celle-ci. Il convient de se concerter clairement à ce propos.

4.4.2 Eléments de rabattement à l'extérieur de la fouille

Lorsque les éléments de rabattement sont placés à l'extérieur de la fouille, il faut clairement identifier le niveau d'eau souterraine qui doit entrer en ligne de compte dans le dimensionnement du soutènement le long du côté extérieur de la fouille.

Pour un rabattement réalisé à l'aide de filtres, il faut également tenir compte du fait que le niveau d'eau ne peut être abaissé qu'au max. de 4,5 m si aucune excavation préalable n'a été effectuée. Si le niveau d'eau doit être abaissé à une plus grande profondeur, il est donc nécessaire d'effectuer une pré-excavation ou de réaliser le rabattement de la nappe à l'aide de pompes immergées.

Une situation particulière apparaît quand le soutènement doit être placé juste à côté des fondations de constructions existantes. En général, il y a alors trop peu de place pour placer les éléments de rabattement entre le soutènement et les fondations des constructions existantes. Dans cette situation, les éléments de rabattement sont parfois placés de biais à travers les fondations ou le soutènement (voir figure 12). Comme cette méthode d'exécution présente toujours le risque de provoquer des tassements lors du placement des éléments de rabattement, il convient de décider à priori et de manière limpide qui assumera quels risques.

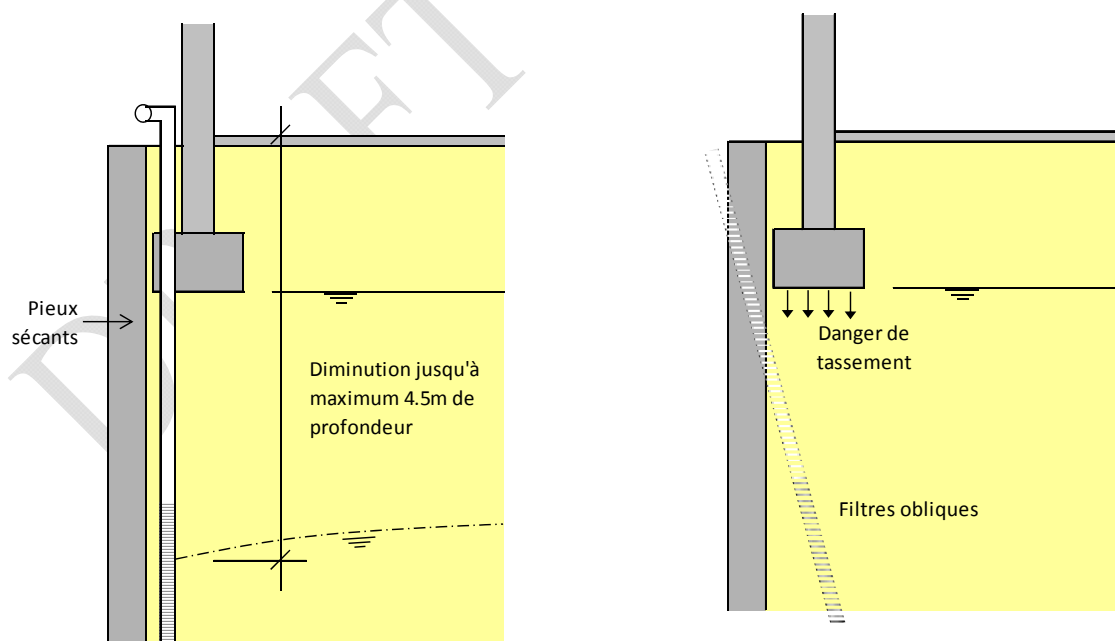


Figure 12

4.5 Claquage/Soulèvement du fond de la fouille

Lorsqu'il y a une couche aquifère sous le fond de la fouille, il faut toujours vérifier que le fond de la fouille ne puisse se soulever et par conséquent, entraîner un claquage du fond de fouille (avec un affaissement consécutif et une perte de portance). Pour pouvoir se prononcer de manière fiable sur la question, il est absolument nécessaire de connaître le niveau de charge hydraulique de cette couche aquifère ou en d'autres termes, de placer un piézomètre dans cette couche aquifère afin de mesurer le niveau d'eau pendant une période suffisamment longue.

Sur la base du niveau d'eau mesuré, il faut ensuite vérifier que la pression d'eau exercée sur le bas de la couche étanche soit toujours inférieure à 0,9 x le poids de la terre au-dessus (contrainte totale σ_v), cf. la figure 13 ci-dessous. Pour déterminer le poids de la terre, on tient compte :

- du poids sec au-dessus de la nappe phréatique ;
- du poids saturé sous la nappe phréatique.

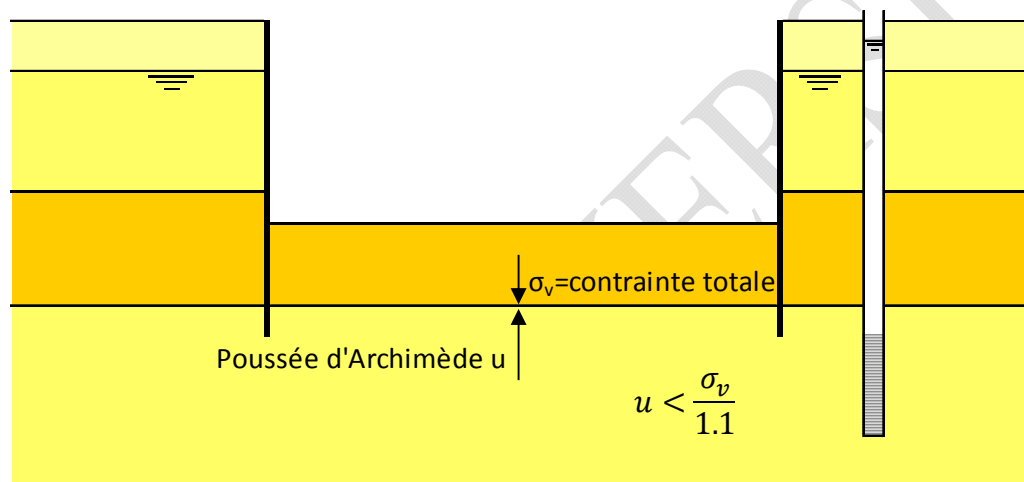


Figure 13

Comme le poids volumique de la terre saturée est toujours supérieur au poids sec, la nappe à l'intérieur de la fouille ne peut pas être abaissée plus que ce qui est strictement nécessaire à l'exécution. La figure 14 l'illustre clairement. La contrainte totale à hauteur du bas de la couche peu perméable étant inférieure dans la situation 2 par rapport à la situation 1, la sécurité du point de vue du soulèvement de la fouille sera toujours plus avantageuse avec la nappe au niveau 1 qu'avec la nappe au niveau 2.

Si la condition concernant le soulèvement du fond de la fouille n'est pas satisfaite, il faut :

- soit exécuter un rabattement dans la couche aquifère située sous la couche peu perméable. Il faut alors vérifier que l'influence de ce rabattement soit acceptable pour l'environnement ;
- soit augmenter la profondeur des murs écrans, éventuellement en combinaison avec la réalisation d'une couche horizontale injectée.

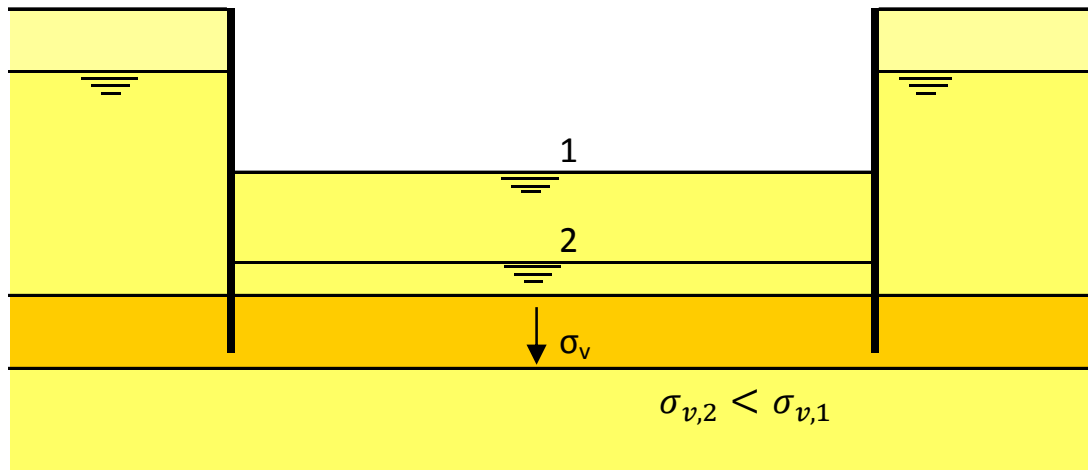


Figure 14

5 Soutènements - Généralités

5.1 Introduction.

Il existe actuellement un grand nombre de techniques permettant de réaliser un soutènement vertical. Toutes ces techniques ont autant d'avantages que d'inconvénients et ont donc leurs propres champs d'application.

Les techniques les plus fréquentes sont :

- les parois berlinoises
- les parois de pieux sécants
- les murs en "soil mix"
- les rideaux de palplanches
- les murs emboués

Pour renforcer des fondations existantes, on utilise aussi régulièrement des techniques permettant de réaliser un soutènement, à savoir :

- rempiètement
- reprise en sous-œuvre
- jet-grouting.

Ces techniques ne seront cependant pas traitées dans la suite de ce document.

Etant donné que chaque technique présente ses avantages et inconvénients ainsi que ses limitations, il convient toujours de choisir la technique la plus adaptée à chaque application.

Quant au choix de la technique à utiliser, il faut tenir compte :

- du champ d'application spécifique des parois autostables ;
- des tolérances d'exécution ;
- des déformations / déplacements autorisés ;
- des circonstances particulières telles que les soutènements le long des murs de jardin, garages, ...

5.2 Parois autostables

Les parois autostables sont des parois dont l'appui horizontal n'est assuré que par la pression passive de la terre. Par conséquent, ces parois – quelles que soient leur robustesse et leur longueur – subissent toujours un déplacement horizontal considérable. Ce déplacement est en effet nécessaire pour mobiliser la pression passive de la terre.

Comme le déplacement horizontal nécessaire à la mobilisation de la pression passive de la terre ne peut pas être estimé avec précision, en aucun cas il n'est permis d'utiliser des parois autostables au sein de la zone d'influence de fondations peu profondes ou de canalisations sensibles aux tassements, comme l'illustre la figure 15.

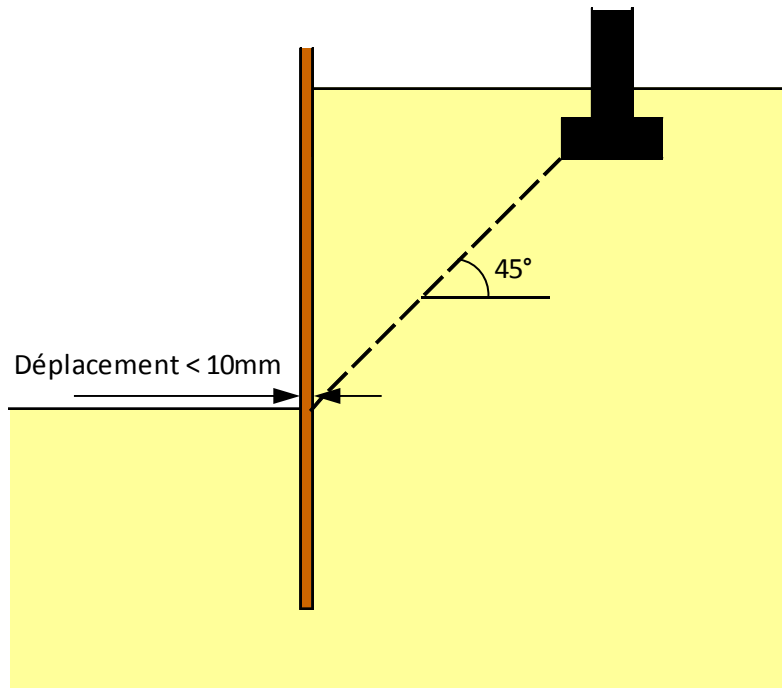


Figure 15

Remarque importante :

Lors de la conception et de l'exécution de parois autostables, il faut tenir compte du fait que les parois autostables représentent des risques considérablement plus grands que les parois ancrées ou étançonnées. Dans le cas de parois autostables, les faibles écarts par rapport aux valeurs acceptées lors de la conception conduiront rapidement à de très grands déplacements, parfois inacceptables. Dans le cas de parois ancrées ou étançonnées, des écarts similaires entraînent une baisse de la sécurité globale, mais moins rapidement de grands déplacements.

Quand des parois autostables sont utilisées, il faut toujours aussi clairement déterminer :

- qui décide si les éléments de rabattement doivent être placés à l'intérieur ou à l'extérieur de la fouille ;
- qui est responsable en cas de déplacements excessifs de la paroi autostable, par ex. suite à la défaillance de l'installation de rabattement.

A l'exception de conditions très favorables, les parois autostables ne peuvent assumer aucune fonction d'étanchéité à l'eau.

5.3 Tolérances d'exécution

Lors de la conception d'un soutènement, il faut tenir compte des tolérances d'exécution.

Les normes d'exécution européennes déjà disponibles (voir liste de référence) reprennent déjà des valeurs de consigne concernant les tolérances d'exécution à respecter. Ces tolérances d'exécution sont reprises dans les fiches d'exécution qui ont été rédigées par le CSTC pour les techniques de soutènement courantes.

Un autre aspect auquel il convient de prêter également attention lors de la phase de conception est l'impact de certains écarts sur les quantités à traiter. Si par ex. un soutènement est placé en moyenne 0,10 m trop en arrière, cela veut dire qu'il faudra 0,10 m³ de béton en plus par m² de mur lors de la réalisation du mur en béton coulé contre le soutènement si les dimensions de la partie avant du mur sont respectées.

Les écarts tolérés doivent figurer dans le cahier des charges et dans le contrat avec l'entrepreneur spécialisé. Il faut définir à priori qui prendra en charge les coûts supplémentaires consécutifs à un dépassement des écarts normaux.

5.4 Déformations / déplacements autorisés

Il n'y a aucune règle acceptée de manière générale pour déterminer les déformations/ déplacements tolérés.

La littérature comprend beaucoup de graphiques et/ou tableaux reprenant des valeurs de consigne des déformations/ déplacements autorisés.

Lors de la détermination des déformations et déplacement autorisés, il faut tenir compte des :

- constructions et canalisations sensibles aux tassements au sein de la zone d'influence ;
- des dimensions de la construction à ériger dans la fouille.

La valeur des déformations et déplacements autorisés doit être reprise dans le cahier des charges. La figure 16 contient les définitions du déplacement des fondations de l'Annexe H de l'Eurocode 7 (NBN EN 1997-1, 2005).

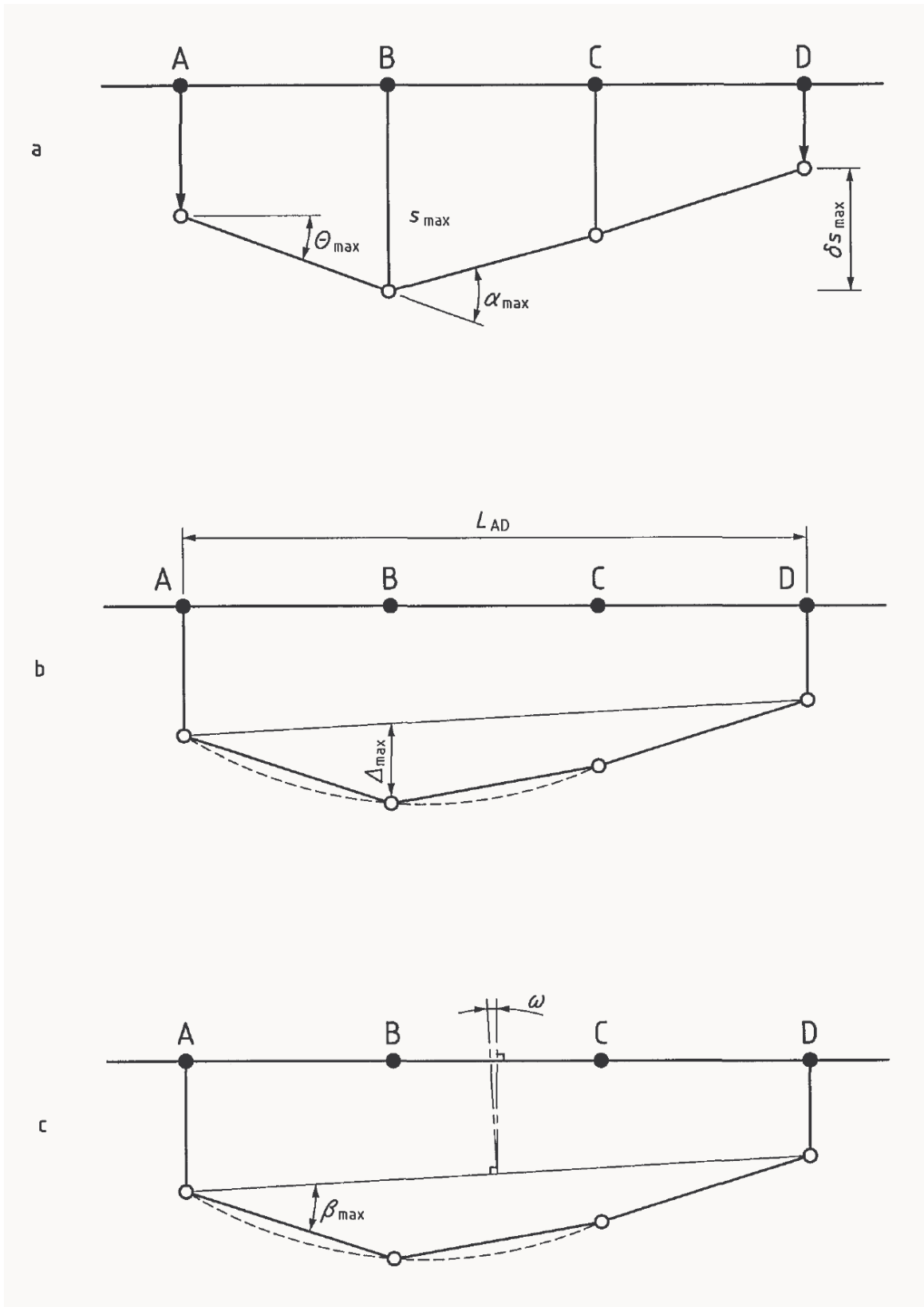


Figure 16

- a : définitions du tassement s , différence de tassement δs , rotation θ et déflexion angulaire α
- b : définitions du tassement relatif Δ et du ratio de tassement ΔL
- c : définitions de l'obliquité ω et de la rotation relative (déflexion angulaire) β

5.5 Poutres de guidage

Avant d'entamer les travaux de soutènement, il faut réaliser des poutres de guidage. Le type de poutres de guidage à appliquer dépend de la technique de soutènement utilisée.

Les poutres de guidage ont plusieurs fonctions :

- dimensionnement du travail ;
- guidage des grappins / outils de forage ;
- suspension de l'armature et des tubes de bétonnage ;
- ...

Elles sont réalisées en béton armé léger, coulées sur place contre le sol avec un coffrage intérieur ou coffrées des deux côtés avec un remblaiement stable (sable stabilisé).

Il est extrêmement important que ces murs de guidage soient fixés/bloqués dans le sol pour pouvoir assumer leur fonction.

5.6 Plateforme de travail et préparation du terrain

Afin de pouvoir assurer un travail qualitatif, la plateforme doit être placée correctement. Elle doit être plane, plate et stable.

Généralement, cela exige le placement d'un géotextile et un minimum de 30 cm de pierrailles ou de déchets de démolition calibrés.

Il est essentiel que le calibre des déchets et/ou des pierrailles soit compatible avec la technique utilisée.

5.7 Aspects sécuritaires

Si des soutènements doivent être placés le long de murs de jardin ou garages, on optera plutôt pour un soutènement le meilleur marché possible. On part dès lors du principe que le mur de jardin ou le garage peut être reconstruit ou réparé rapidement en cas de dégâts.

Indépendamment du fait qu'une telle approche soit correcte juridiquement ou non, il faut toujours veiller à ce que la sécurité des personnes qui travaillent dans la fouille soit assurée en permanence. Cela veut donc dire qu'il faut veiller à ce qu'aucun morceau ne puisse tomber dans la fouille en cas d'instabilité du mur de jardin ou du mur du garage.

Les mesures possibles à cet égard sont :

- la nécessité de prolonger les profilés des parois berlinoises et des parois de pieux sécants jusqu'à une certaine hauteur ;

- la pose de filets ancrés qui doivent empêcher que le mur ou des parties du mur puissent tomber dans la fouille. Ce type de filets ancrés est régulièrement utilisé pour se prémunir des massifs rocheux ;
- le cloutage des fondations et/ou des murs de jardin proprement dits.

DRAFT VERSION

6 Fiches d'exécution.

6.1 Introduction

Le CSTC (2012) a rédigé des fiches d'exécution pour les techniques de soutènement appliquées régulièrement en Belgique. Ces fiches sont reprises sous forme d'annexe à ce manuel et contiennent chaque fois :

- a. Type du système
- b. Exécution – considération générale
- c. Matériaux
- d. Dimensions caractéristiques
- e. Capacité portante
- f. Déplacement horizontal
- g. Champ d'application
- h. Points d'attention particuliers
- i. Variantes
- j. Contrôle qualité

Quelques considérations générales sont encore reprises dans les paragraphes qui suivent.

6.2 Parois berlinoises.

En ce qui concerne les parois berlinoises, il y a une distinction nette entre :

- Type 1 : plaques placées durant l'excavation ;
- Type 2 : plaques placées avant l'excavation.

Comme les parois berlinoises subissent presque toujours des déplacements relativement grands, elles ne peuvent être utilisées en aucun cas au sein de la zone d'influence des fondations peu profondes et des canalisations sensibles aux tassements, même lorsqu'elles sont ancrées (voir figure 17).

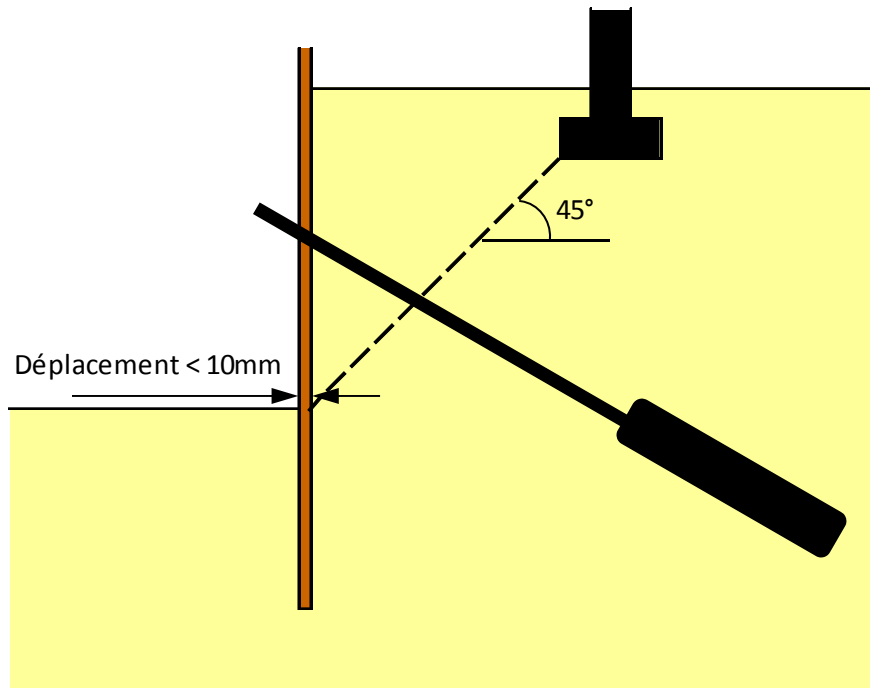


Figure 17

Les murs de jardin et les garages tombent aussi sous le coup de cette règle en principe. Si une paroi berlinoise est malgré tout placée le long du mur de jardin ou du garage pour des raisons économiques, il est absolument nécessaire de prolonger les profilés à une hauteur suffisante et d'étaçonner le mur sur ces profilés pour qu'aucun morceau ne puisse tomber dans la fouille en cas d'instabilité.

Les parois berlinoises ne peuvent être utilisées que quand il n'y a pas ou ne peut y avoir d'eau souterraine dans la terre située derrière la paroi. Dans les sols fortement stratifiés, l'utilisation de parois berlinoises est déconseillée parce qu'il n'est jamais certain que le niveau d'eau souterraine derrière le mur puisse être abaissé partout jusque sous le niveau d'excavation.

Avec les parois berlinoises, les éléments de rabattement doivent toujours être placés le long du côté extérieur de la fouille.

Les problèmes survenant régulièrement avec les parois berlinoises sont :

- déplacements exagérés des parois autostables ;
- pénétration de terre et venue d'eau dans le puits de fondation ;
- déformation excessive des plaques métalliques du fait des pressions de l'eau souterraine.

6.3 Parois de pieux

En ce qui concerne les parois de pieux, il y a une distinction nette entre :

- Type 1 : pieux placés l'un dans l'autre (paroi de pieux sécants) ;
- Type 2 : pieux placés l'un contre l'autre (parois de pieux tangents).

Lors de la conception et de l'exécution des parois de pieux, une distinction nette doit être faite entre les parois de pieux qui :

- ont uniquement une fonction de soutènement du sol ;
- ont une fonction de soutènement du sol et d'étanchéité à l'eau.

a) Parois de pieux avec une fonction de soutènement du sol uniquement.

Les parois de pieux tangents peuvent seulement avoir une fonction de soutènement du sol et sont généralement utilisées quand la nappe se trouve sous le niveau d'excavation à réaliser. Si la nappe se trouve au-dessus du niveau d'excavation à réaliser, les éléments de rabattement doivent toujours être placés le long du côté extérieur de la fouille et il faut convenir clairement de la personne responsable des conséquences de la défaillance du rabattement.

Les pieux sécants avec fonction de soutènement du sol uniquement sont généralement échelonnés (pieux en touche de piano).

Dans le cas des parois de pieux sécants qui n'ont qu'une fonction de soutènement du sol, les éléments de rabattement peuvent seulement être placés le long du côté intérieur de la fouille si le sous-sol jusqu'à une certaine profondeur, sous le niveau d'excavation à réaliser, consiste intégralement en du sable bien perméable où n'apparaît aucune couche (perturbatrice) moins perméable (lentilles d'argile ou de limon par exemple). Si le sous-sol affiche une certaine stratification, les éléments de rabattement doivent être placés le long du côté extérieur de la fouille.

b) Parois de pieux sécants avec fonction de soutènement du sol et d'étanchéité à l'eau.

Lors de la conception et de l'exécution de parois de pieux sécants ayant une fonction de soutènement du sol et d'étanchéité à l'eau, il convient de s'accorder clairement sur les responsabilités.

L'influence de la tolérance d'exécution courante sur le chevauchement des pieux avec la profondeur constitue un aspect important à cet égard.

L'infocarte 56.3 du CSTC indique par ex. que la tolérance d'inclinaison des pieux s'élève généralement à 1,3% et qu'une paroi de pieux sécants utilisée comme structure de silo et/ou avec une fonction d'étanchéité à l'eau exige une précision d'inclinaison de 0,5%.

Si l'on part du principe que l'écart par rapport à un pieu sécant correctement réalisé s'élève donc à max. 1/200, le risque est donc réel qu'à partir d'une profondeur égale à $d \times 100$, où d est le chevauchement entre les pieux, il n'y ait plus de chevauchement entre 2 pieux placés l'un à côté de l'autre. Partant du recoupement normalement appliqué de 7 cm, on peut donc affirmer qu'à partir d'une profondeur de 7 m, il n'y a plus aucune certitude que le chevauchement sera présent partout.

6.4 Murs de soutènement en soil mix

En ce qui concerne les murs en soil mix, il y a une distinction nette entre :

- Type 1 : les murs constitués de colonnes soil mix;
- Type 2 : les murs constitués de panneaux soil mix.

La réalisation de murs soil mix dans des sols pollués comporte toujours des risques parce que les pollutions font en sorte que la prise et le durcissement du liant ralentissent, voire ne se fassent pas.

La réalisation d'un mur soil mix devrait donc toujours être précédée d'une recherche détaillée d'éventuelles pollutions.

Lors de la réalisation de murs soil mix le long de constructions existantes, il faut clairement se concerter par rapport aux aspects suivants:

- les tassements éventuels pendant l'exécution du mur ;
- les tassements éventuels suite à la déformation/au déplacement du mur ;
- la durabilité du mur.

Si des murs soil mix sont fraisés ou creusés à l'endroit de renflements ou afin de réduire l'épaisseur de ceux-ci, il faut s'accorder clairement sur :

- les moyens à mettre en œuvre,
- les dégradations éventuelles du mur.

6.5 Rideaux de palplanches

Des palplanches peuvent être utilisées pour le soutènement des fouilles si les précautions suivantes sont observées :

- lors de l'insertion des palplanches à moins de 20 mètres de constructions existantes, des mesures vibratoires doivent être pratiquées sur ces constructions. Le concepteur du soutènement doit alors déterminer quel niveau de vibrations est acceptable. Les valeurs de consigne des niveaux vibratoires autorisés sont notamment reprises dans les normes DIN 4150-2 et DIN 4150-3 et dans les directives de mesure et d'évaluation SBR pour les vibrations ;
- les palplanches ne peuvent être retirées que si la quantité de terre qui colle aux palplanches est tellement faible qu'aucun tassement non autorisé ne puisse apparaître.

6.6 Murs emboués

Malgré le fait que la technique de mur emboué soit déjà utilisée depuis plusieurs décennies, il subsiste plusieurs questions non résolues à l'heure actuelle, notamment en ce qui concerne :

- l'influence possible du type de bentonite utilisé. Cela semble surtout être important pour les sols tourbeux et les sols pollués ;
- l'utilisation d'adjuvants dans le béton. Ceux qui utilisent des retardateurs de prise et des plastifiants sont généralement peu au fait de l'influence qu'ils peuvent avoir après une certaine période sur l'ouvrabilité du béton.

Comme l'exécution des murs emboués à travers des sols peu compacté ou des remblais comporte toujours des risques, il faut s'accorder clairement en matière de coûts éventuels pour :

- le surplus de béton utilisé ;
- l'élimination des renflements dans le mur.

Puisque dans le cas des murs emboués, il existe toujours un risque réel d'apparition d'anomalies qui entraînent des fuites, il convient de s'accorder clairement par rapport :

- aux annonces (transfert d'information) qui doivent être faites pendant l'excavation (quoi et à qui?) ;
- aux mesures qui doivent être prises quand des anomalies sont constatées.

A cet égard, il importe que l'entrepreneur du mur emboué transmette des instructions claires, de préférence écrites, à l'entrepreneur des travaux de terrassement, à l'entrepreneur principal et au donneur d'ordre.

L'idéal est de le faire au moyen d'une analyse des risques détaillée.

Pour les murs emboués ayant une fonction d'étanchéité à l'eau, il est recommandé de limiter les déformations du mur. Par ailleurs, il faut veiller lors de l'excavation à ce qu'il ne puisse pas y avoir de talus verticaux trop hauts parce que cela peut donner lieu à des différences dans la déformation des panneaux situés côte à côte.

DRAFT VERSION

7 Support horizontal du soutènement

7.1 Généralités

Le support horizontal du soutènement peut être assuré au moyen :

- d'éтанçons
- de tirants d'ancrage
- d'une risberme
- de la construction proprement dite.

7.2 Etançons

Dans le cas d'éтанçons, on peut faire une distinction entre :

- les éтанçons horizontaux
- les éтанçons obliques.

7.2.1 Etançons horizontaux

En présence d'éтанçons horizontaux, le déplacement horizontal du soutènement doit être contrôlé. Il faut tenir compte de :

- la déformation élastique des éтанçons
- l'influence des variations de température prévisibles.

Afin de limiter le déplacement horizontal prévisible des soutènements à la valeur autorisée, il peut être nécessaire :

- de précontraindre les éтанçons lors de leur pose
- d'isoler les éтанçons ou de prendre des mesures afin de limiter l'influence de la température.

Pour le dimensionnement des éтанçons horizontaux, le flambage/flambement sera déterminant dans la plupart des cas.

7.2.2 Etançons obliques

Quand des éтанçons obliques sont utilisés, il faut toujours veiller à ce que la stabilité des massifs sur lesquels reposent ces éтанçons soit assurée avec une sécurité suffisante.

Étançonner sur des massifs à l'assise peu profonde n'est en général pas possible parce que la charge fortement oblique exercée sur les éтанçons ne peut pas être transmise au sol. La mesure recommandée consiste donc à relier entre eux les massifs sur lesquels reposent les éтанçons au moyen de poutres ou d'une partie de la dalle pour que les composantes horizontales des forces des éтанçons s'annulent mutuellement.

Même lorsque l'on étançonne sur des massifs qui reposent sur des pieux, il faut toujours vérifier que la composante horizontale de la force d'étauçon puisse être reprise par les pieux et que les déplacements horizontaux prévisibles soient acceptables. Si ce n'est pas le cas, la mesure recommandée consiste donc aussi à relier entre eux les massifs sur lesquels reposent les étaçons au moyen de poutres ou d'une partie de la dalle pour que les composantes horizontales des forces des étaçons s'annulent mutuellement.

7.3 Tirants d'ancrage / micropieux chargés en traction

Si des tirants d'ancrage / pieux (ou micropieux) de traction sont placés sous des propriétés voisines, le maître de l'ouvrage / donneur d'ordre ou l'architecte doit demander une autorisation formelle.

Les tirants d'ancrage sont des éléments de traction qui sont fixés dans le sol par injection de ciment et qui consistent en une longueur de scellement et une longueur libre. Chaque tirant d'ancrage doit être soumis à un essai de chargement avant d'être mis en traction.

Les micropieux mis en charge sont des éléments de traction qui sont fixés par injection de ciment, mais qui ne sont pas pourvus d'une longueur libre et/ou qui ne sont pas soumis à un essai de chargement.

Il est important d'indiquer clairement :

- le type d'ancrage utilisé ;
- la force maximale des essais de chargement effectués sur les tirants d'ancrage ;
- le nombre et le type d'essais de chargement effectués sur les micropieux en traction. Ces essais de chargement ne peuvent être effectués que sur des micropieux qui sont spécialement pourvus d'une longueur libre à cet effet.

Lors du dimensionnement des tirants d'ancrage et des micropieux chargés en traction, il faut tenir compte :

- des forces à reprendre, telles que déterminées au moment de dimensionner le soutènement ;
- du déplacement autorisé.

Si les tirants d'ancrage sont réalisés avec des barres autoforantes, il faut indiquer clairement comment sera exécutée et contrôlée la longueur libre.

Si les déplacements horizontaux doivent être limités, il est généralement nécessaire de prévoir des tirants d'ancrage. En appliquant la précontrainte nécessaire, il est alors possible de limiter les déplacements.

7.4 Une risberme

Des risbermes peuvent être utilisées dans plusieurs situations, comme le montrent par exemple les schémas ci-dessous (figures 18, 19 et 20).

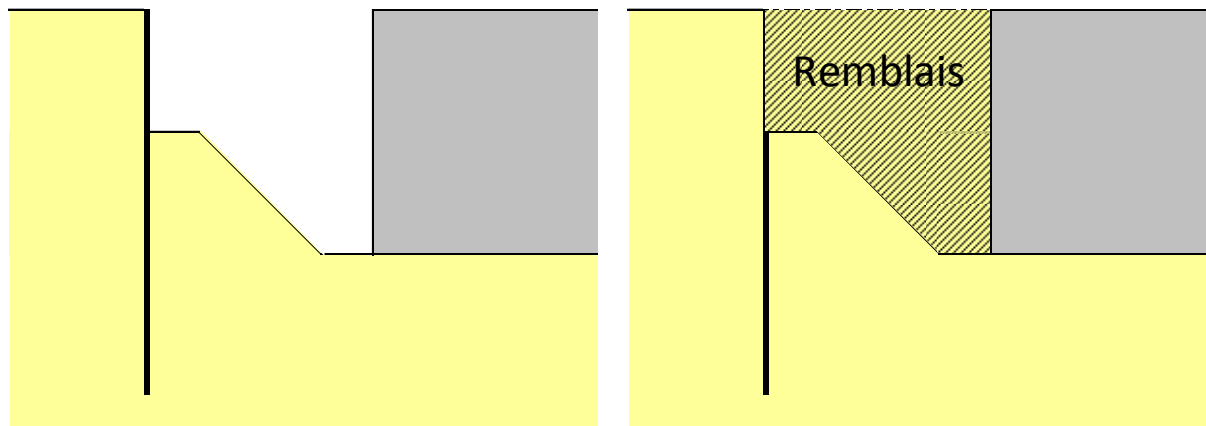


Figure 18 – Paroi autostable avec risberme

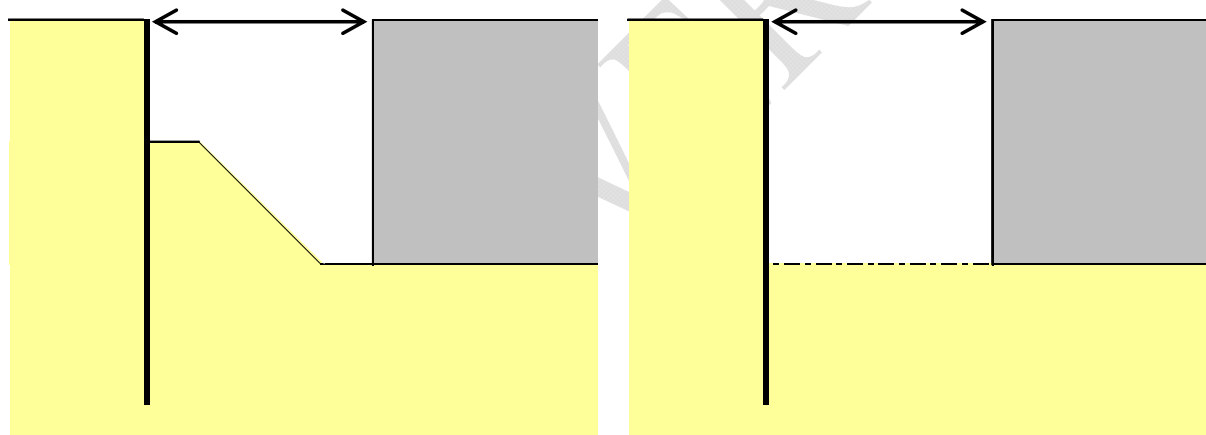


Figure 19 – Risberme combinée à un étançonnement

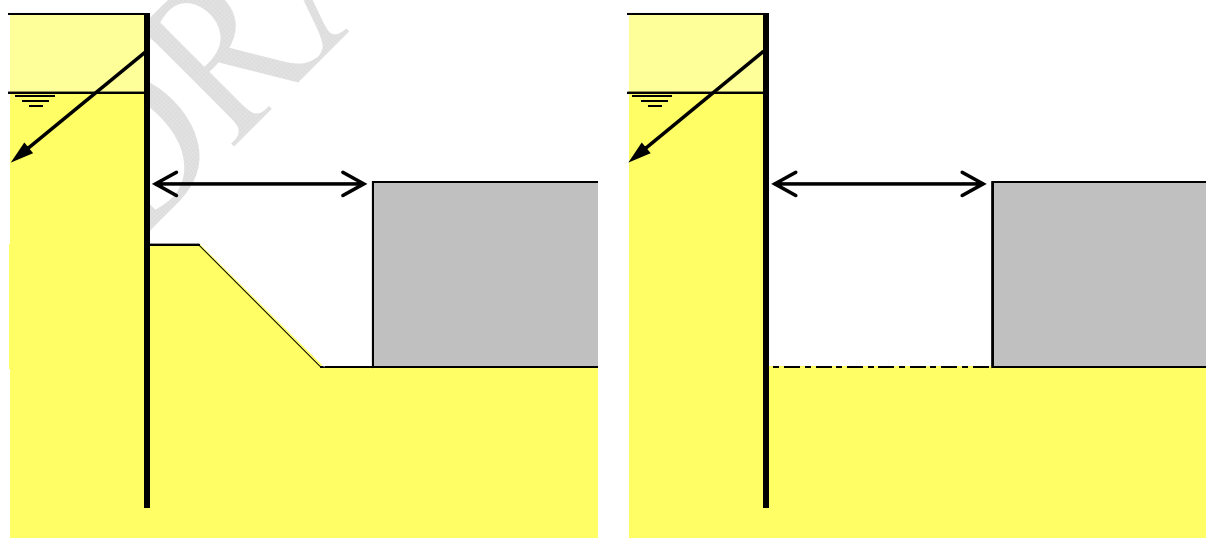


Figure 20 – Risberme combinée à des tirants d'ancrage et un étançonnement

7.5 La construction proprement dite

Un appui au moyen de la construction proprement dite n'est en principe utilisé que s'il n'est pas possible de placer des tirants d'ancrage ou dans des cas de fouilles très complexes et/ou très profondes.

Généralement, on place d'abord des éléments verticaux afin de limiter le déplacement vertical des dalles qui doivent assurer le support horizontal. Ce qui importe ici, c'est :

- que les charges soient reprises par ces éléments verticaux en situations provisoire et définitive ;
- les tassements autorisés de ces éléments verticaux ;
- les écarts autorisés de ces éléments verticaux par rapport à leur position théorique.

Si l'appui horizontal est assuré par la construction elle-même, le sol situé sous la dalle placée précédemment doit être creusé (excavation stress). Il importe de s'accorder clairement sur les points suivants :

- les ouvertures qui doivent être prévues dans le radier pour l'évacuation des terres excavées ;
- les mesures nécessaires lorsque le sol au niveau de l'excavation n'est pas ou est difficilement praticable.

8 Pieux de fondation

Si des pieux doivent être placés sous la construction à réaliser dans la fouille, il convient de décider dès la phase de dimensionnement du projet si les pieux seront placés avant ou après l'excavation de la fouille.

8.1 Points d'attention lors de la réalisation de pieux exécutés avant le creusement de la fouille

8.1.1 Hauteur de bétonnage des pieux

Il est courant de ne bétonner les pieux, réalisés à partir d'une surface de travail plus haute, que jusqu'à une certaine hauteur au-dessus du niveau d'excavation à réaliser.

Dans les sols meubles, il se peut qu'à hauteur du niveau d'excavation, ou un peu plus bas, la pression horizontale de la terre soit supérieure à la pression du béton fraîchement coulé et que par conséquent, le béton soit partiellement refoulé après l'enlèvement du tubage. La section du pieu peut dès lors diminuer fortement par endroits et des contraintes inadmissibles peuvent par conséquent apparaître dans le béton (voir figure 21).



Figure 21

Lorsque les pieux ne sont bétonnés que jusqu'à une certaine hauteur, il est donc toujours nécessaire de vérifier, après avoir creusé la fouille, que tous les pieux affichent la section exigée.

8.1.2 Exécution de pieux le long de fondations existantes et de murs de cave

La pose de pieux à une faible distance de fondations existantes peu profondes et de murs de cave représente toujours un risque.

Avec des pieux à refoulement, il y a toujours un risque de comprimer latéralement les fondations peu profondes (figure 22). Le problème dans ce cas, c'est que le déplacement horizontal théorique est très difficile à prévoir. Préforer le sol, pour le rendre plus meuble, contribue parfois à limiter le refoulement, mais pas toujours.

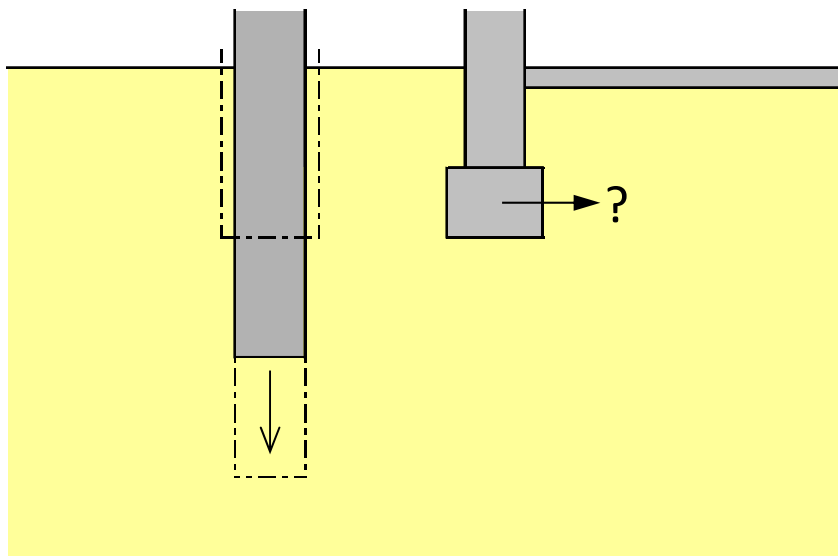


Figure 22

La solution recommandée consiste à introduire des tubages et à installer les pieux à l'intérieur de ces tubages.

Dans le cas de pieux avec enlèvement du sol, pieux forés (à la tarière), le sol sous les fondations peut se relâcher. Ce qui peut donner lieu à des tassements. La mesure recommandée consiste alors à forer les pieux avec un tubage.

8.1.3 Extraction de la terre située entre les pieux

Lors de l'extraction de la terre située entre les pieux, il y a lieu de veiller à ne pas endommager les pieux. Dans tous les cas, il est recommandé, après avoir creusé entièrement la fouille, de dégager quelques pieux à concurrence de 0,5 à 1,0 m sous le fond de fouille afin de vérifier qu'ils ne sont pas fissurés dans cette zone. Les pieux qui affichent des fissures doivent être démolis jusqu'en dessous des fissures et être rebétonnés ensuite.

Il arrive souvent que les pieux qui sont réalisés à partir d'un niveau plus élevé tombent dans des risbermes provisoires pendant les travaux de terrassement ; ils sont alors soumis à des charges horizontales provisoires pour lesquelles ils ne sont pas conçus. Cela peut donner lieu à des déformations ou des fissures.

8.2 Points d'attention lors de la réalisation de pieux exécutés après le creusement de la fouille

8.2.1 Praticabilité du sol de la fouille

S'il y a peu de couches offrant suffisamment de résistance au niveau de l'excavation, il faudra toujours clairement désigner qui concevra, réalisera et paiera les plateformes de travail nécessaires.

De nombreux problèmes lors de l'exécution des pieux à partir du fond de fouille sont la conséquence de l'indisponibilité d'une plateforme de travail bien praticable et suffisamment stable, voir par ex. figure 23.

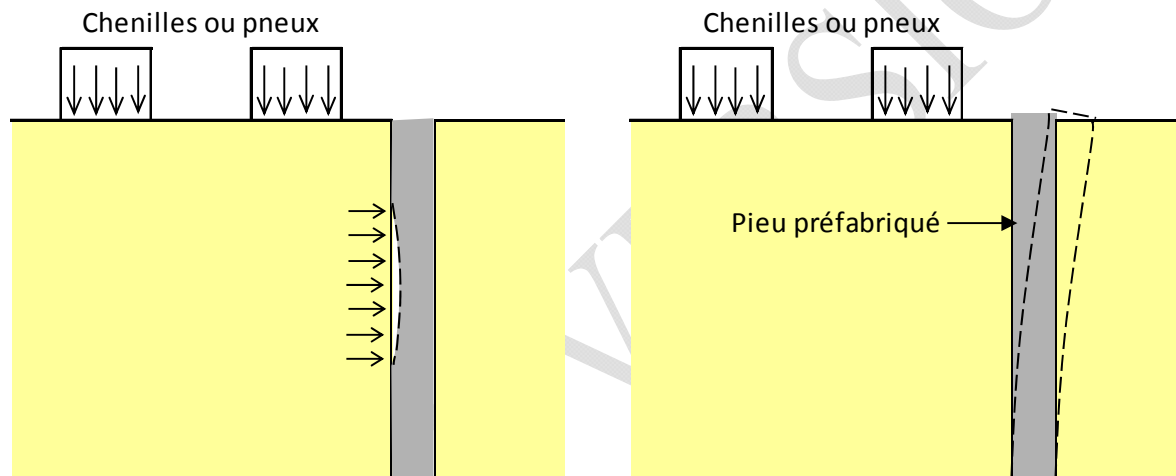


Figure 23 – Exécution de pieux à partir du fond de la fouille en l'absence d'une bonne plateforme de travail : risque de compression du béton frais des pieux (gauche) ou origine de moments trop élevés dans les pieux préfabriqués (droite)

8.2.2 Installation de pieux jusqu'aux couches où le niveau de charge hydraulique se trouve au-dessus de la surface de travail

Lorsque des pieux sont installés jusqu'à une couche où le niveau de charge hydraulique dépasse la surface de travail, il y a toujours un réel danger que de l'eau s'écoule verticalement le long des pieux vers la surface de travail (figure 24).

Concernant les pieux moulés dans le sol, on part du principe que l'eau ne peut pas s'écouler le long du pieu si la pression du béton liquide est partout supérieure à la pression de l'eau. On relate cependant des cas où l'on a quand même observé un écoulement d'eau le long du pieu. L'explication possible est qu'un chemin préférentiel se crée le long du pieu lors du retrait du béton (voir figure 24).

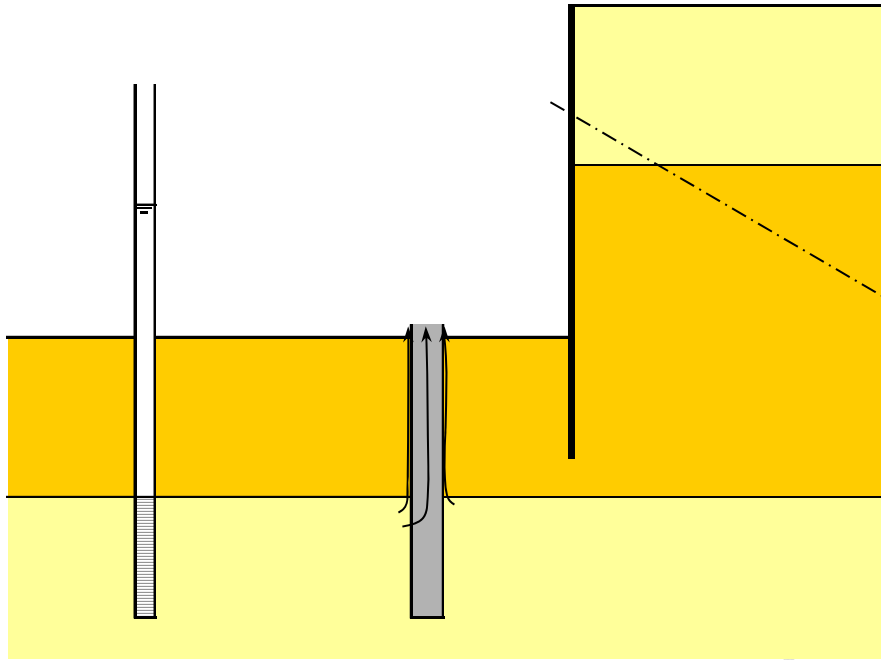


Figure 24

Si, dans pareille situation, on décide tout de même d'installer des pieux, il convient de s'accorder clairement sur les responsabilités et les coûts en cas de fuite.

8.2.3 Exécution de pieux le long de murs de soutènement

Lors de l'exécution de pieux le long de murs de soutènement, il faut veiller à modifier le moins possible la situation des contraintes dans le sol au niveau de la fiche du mur. Les modifications des contraintes existantes donnent en effet toujours lieu à des déplacements horizontaux (voir par ex. figure 25).

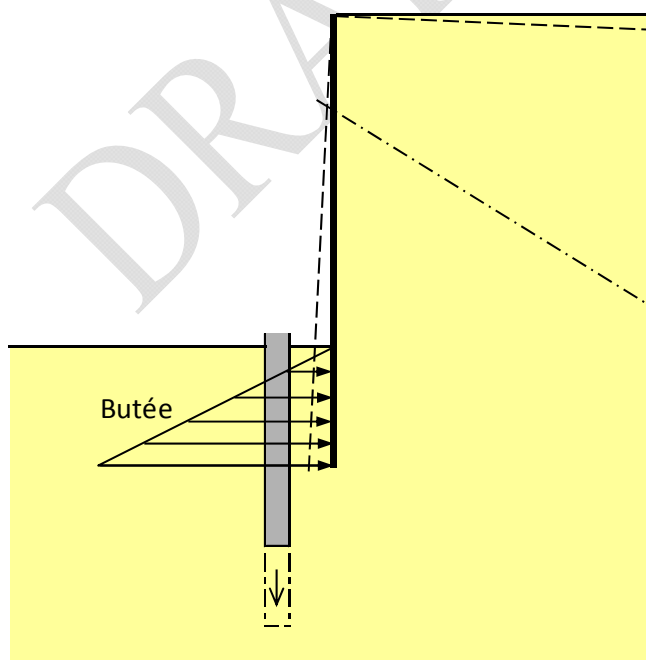


Figure 25

Afin de limiter autant que possible les déplacements horizontaux du mur, il faut veiller à :

- limiter autant que possible les vibrations
- réaliser les pieux le plus loin possible l'un de l'autre
- toujours bétonner les pieux jusqu'à la surface de travail.

Si les pieux sont réalisés le long de parois autostables, il faut toujours veiller à ce que la surface de travail à partir de laquelle sont enfoncés les pieux se trouve min. 1 m plus haut que le niveau d'excavation à réaliser. Il n'y a que de cette manière que l'on pourra éviter des déplacements indésirables pendant l'enfoncement des pieux.

8.2.4 Perçage de fondations et murs de cave abandonnés

Lors de la démolition de bâtiments existants, il arrive parfois qu'on laisse dans le sol les murs de cave et les anciennes fondations.

La force verticale nécessaire pour percer ces murs ou fondations peut entraîner des tassements de ces fondations ou murs et aussi d'un bâtiment voisin si celui-ci est encore relié à ces fondations ou murs (voir figure 26).

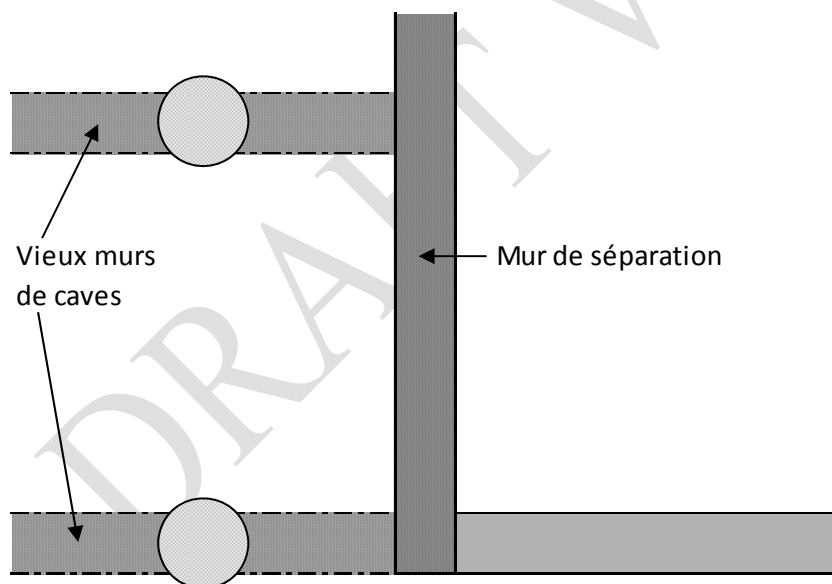


Figure 26

Les précautions nécessaires sont :

- limiter autant que possible la force verticale appliquée sur le tubage ;
- être toujours prudent ;
- détacher du bâtiment voisin les murs de cave et fondations restés dans le sol.

9 Coordination

Une difficulté spécifique au dimensionnement et à l'exécution des soutènements est qu'ils impliquent en général beaucoup de personnes / parties comme :

- le maître de l'ouvrage / donneur d'ordre
- l'architecte
- le coordinateur du chantier
- le bureau d'étude
- le bureau de contrôle
- l'entrepreneur principal
- les entrepreneurs spécialisés en travaux de démolition et d'étaçonnement, soutènement, terrassement, rabattement, tirants d'ancrage, pieux de fondation / pieux de traction.

En principe, il incombe à l'architecte de coordonner toutes les activités relatives à la conception et à l'exécution de la fouille ou de confier cette coordination à quelqu'un d'autre de manière formelle. L'architecte est en effet la partie la mieux au courant de ce qu'il y a à faire et est toujours impliqué dès le départ dans le projet.

Les éléments exigeant une coordination sont :

- la détermination du lien entre le niveau de référence de l'étude de sol et le niveau de référence du projet à réaliser ;
- l'exécution d'une étude de l'environnement (voir "Procédures standard pour la reconnaissance géotechnique" et "Directives pour le rabattement de la nappe") ;
- reconnaissance des fondations à proximité ;
- étude archéologique éventuelle ;
- choix du type de soutènement ;
- la pose d'étaçons ou d'étais pendant les travaux de démolition ;
- le creusement du sol le long de fondations peu profondes ;
- le rabattement de la nappe à l'intérieur et à l'extérieur de la fouille ;
- le niveau d'eau à prendre en compte hors de la fouille ;
- les déplacements horizontaux autorisés ;
- la phase d'exécution des pieux de fondation / pieux de traction ;
- l'approbation des notes de calcul ;
- le soulèvement possible du fond de fouille.

Il convient de s'accorder clairement sur la coordination nécessaire entre les différents projets partiels, les activités et les parties.

Pour chaque projet, il doit y avoir au moins un plan reprenant toutes les activités à effectuer ainsi que les différentes phases à respecter. Ce plan doit être présenté à toutes les parties concernées. En tout état de cause, ce plan doit comporter les éléments suivants :

- le lien entre le niveau de référence de l'étude du sol et le niveau de référence du projet à réaliser ;
- la situation existante (fondations des bâtiments proches, position des canalisations sensibles aux tassements) ;
- la composition globale du sous-sol ;
- la succession de nappes aquifères et de couches peu perméables ;
- le morcellement des travaux de terrassement, y compris les travaux de terrassement nécessaires pour poser les poutres de guidage des rideaux de pieux sécants et autres ;

- la position des éléments de rabattement dans le plan et en coupe ;
- les différentes phases du rabattement de la nappe phréatique ;
- la réalisation de tirants d'ancrage, d'étaçons, ... ;
- la position des points de mesure des contrôles à effectuer (niveau d'eau souterraine, tassements, déplacements horizontaux).

Ce plan comprendra aussi de préférence les valeurs limites des :

- niveaux des nappes / niveaux de charge hydraulique hors de la fouille ;
- tassements autorisés et déplacements horizontaux.

DRAFT VERSION

10 Analyse des risques

Un moyen important permettant de limiter les risques de conception et d'exécution d'un soutènement consiste à exécuter une analyse des risques.

Une analyse des risques a pour but d'aborder de manière claire et transparente tous les éléments qui permettront au maître d'ouvrage/donneur d'ordre de peser les économies qu'entraînent certaines méthodes d'exécution et les risques qui y sont liés.

Les éléments à prendre en compte sont les conséquences possibles :

- d'anomalies dans le sous-sol ;
- d'écarts du niveau de la nappe phréatique au repos ;
- d'un dépassement des tolérances d'exécution normales ;
- d'une fonction de soutènement du sol insuffisante ;
- d'une fonction d'étanchéité à l'eau insuffisante ;
- de trop grands déplacements des constructions voisines ;
- de trop grands tassements dans l'environnement de la fouille.

Il faut indiquer les conséquences fâcheuses que ces éléments peuvent entraîner, les mesures possibles permettant de contrer ces conséquences et l'impact que ces conséquences peuvent avoir sur le planning et le coût de revient.

11 Monitoring

Un plan de monitoring détaillé doit toujours faire partie du projet d'une fouille. Ce plan de monitoring doit prendre en compte :

- les tassements / déplacements horizontaux des constructions voisines
- le déplacement horizontal des soutènements
- la force dans les tirants d'ancrage / étançons
- le niveau des nappes.

Le concepteur spécifie le monitoring à effectuer par l'exécutant, à savoir :

- quelles mesures doivent être effectuées, le lieu et le nombre de points de mesure (indiquer éventuellement la zone sur le plan)
- quand les mesures doivent être effectuées (pendant quelle période et à quelle fréquence)
- quelles valeurs d'alarme et valeurs seuils doivent être respectées.

L'étendue du monitoring dépendra des risques liés aux travaux.

Les principes généraux du suivi du monitoring sont les suivants :

- lorsqu'un dépassement de la valeur d'alarme ou de la valeur seuil d'un paramètre observé est constaté lors d'un monitoring, l'exécutant avertira le concepteur et le donneur d'ordre.
- La valeur seuil (FEU ORANGE) est égale aux $2/3$ de la valeur limite, comme définie dans les exigences du projet et ce, par type de construction.
- La valeur d'alarme (FEU ROUGE) est égale à la valeur limite, comme définie dans les exigences du projet et ce, par type de construction.

En cas de dépassement de la valeur seuil (FEU ORANGE), le concepteur prend les mesures suivantes :

- il détermine une nouvelle fréquence de mesures du paramètre observé,
- il évalue la valeur d'alarme et l'adapte éventuellement en fonction de la construction spécifique ;
- il définit en concertation avec l'exécutant les mesures à prendre si la valeur d'alarme (FEU ROUGE) est dépassée et les présente au donneur d'ordre.

En cas de dépassement de la valeur d'alarme (FEU ROUGE), le concepteur prend les mesures suivantes :

- il évalue le problème en fonction de la construction ;
- il demande à l'exécutant d'exécuter les mesures qui ont été définies, en cas de dépassement de la valeur seuil, et approuvées par le donneur d'ordre.

Pour des projets importants, il est également possible d'opter pour le monitoring actif, auquel cas le projet peut être corrigé en fonction des résultats de mesure obtenus. Le monitoring actif exige cependant une approche très spécifique qui doit également être décrite clairement dans le cahier des charges.

Références

- GBMS, 2012. Procédures standard pour la reconnaissance géotechnique : Essais de pénétration – Partie 1 : planification, exécution et consignation des résultats. Document disponible sur www.bggg-gbms.be
- DIN 4150-2, 1999. Erschütterungen im Bauwesen. Teil 2 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden.
- DIN 4150-3, 1999. Erschütterungen im Bauwesen. Teil 3 Einwirkungen auf baulche Anlagen
- DIN 4150-1, 2001. Erschütterungen im Bauwesen. Teil 1 : Vorermittlung von Schwingungsgrößen
- NBN EN 12063, 1999. Execution of special geotechnical work – Sheet pile walls
- NBN EN 1537, 2000. Execution of special geotechnical work – Ground anchors
- NBN EN 12716, 2001. Execution of special geotechnical work – jet grouting
- NBN EN 14679, 2005. Execution of special geotechnical work – Deep mixing
- NBN EN 1536, 2010. Execution of special geotechnical work – Bored piles
- NBN EN 1538, 2010. Execution of special geotechnical work – Diaphragm walls
- SBR, 2006. Trillingen : meet- en beoordelingsrichtlijn. Deel B – Hinder voor personen in gebouwen ;
- SBR, 2006. Trillingen : meet- en beoordelingsrichtlijn. Deel C – storing aan apparatuur.
- SBR, 2010. Trillingen : meet- en beoordelingsrichtlijn. Deel A – Schade aan gebouwen
- Van Calster,P., De Cock, F., De Vos, M., Maertens, J. & Van Alboom, G. 2009. Directives pour le rabattement de la nappe Document disponible sur www.bggg-gbms.be
- CSTC, 2012. Infofiche 56.1 – Parois berlinoises. Type 1 : blindage mis en place en cours d’excavation
- CSTC, 2012. Infofiche 56.2 – Parois berlinoises. Type 2 : blindage mis en place avant l’excavation
- CSTC, 2012. Infofiche 56.3 – Rideaux de pieux. Type 1 : pieux s’emboîtant les uns dans les autres (paroi de pieux sécants)
- CSTC, 2012. Infofiche 56.4 – Rideaux de pieux. Type 2 : pieux placés l’un à côté de l’autre (parois de pieux tangents)
- CSTC, 2012. Infofiche 56.5 – Murs ‘Soil mix’. Type 1 : parois faites de colonnes
- CSTC, 2012. Infofiche 56.6 – Murs ‘Soil mix’. Type 2 : parois faites de panneaux

Annexe A

CSTC - Infiches 56.1 à 56.6

DRAFT VERSION

Infofiche 56.1

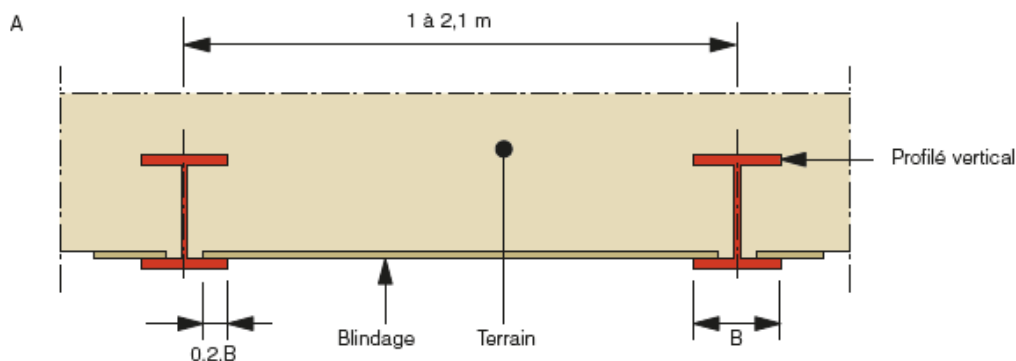
Parois berlinoises de type 1 : blindage mis en place en cours d'excavation

Publication : juillet 2012

L'Infofiche sur les parois berlinoises de type 1 constituées d'éléments de blindage mis en œuvre en cours d'excavation est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les matériaux et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Une paroi berlinoise de type 1 est un soutènement composé de profilés verticaux (cf. figure 1) mis en œuvre avant le début de l'excavation. Des éléments de blindage (plaques, poutres, béton projeté, ...) sont mis en place entre les profilés verticaux à mesure que progresse l'excavation. Celle-ci se fait de manière locale et chaque fois sur une hauteur limitée. La pression des terres, transférée aux profilés verticaux par l'intermédiaire des éléments de blindage, est équilibrée par les efforts de butée exercés par le massif de sol situé sous le niveau du fond de fouille et par les systèmes de support horizontaux complémentaires éventuellement mis en œuvre (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...).



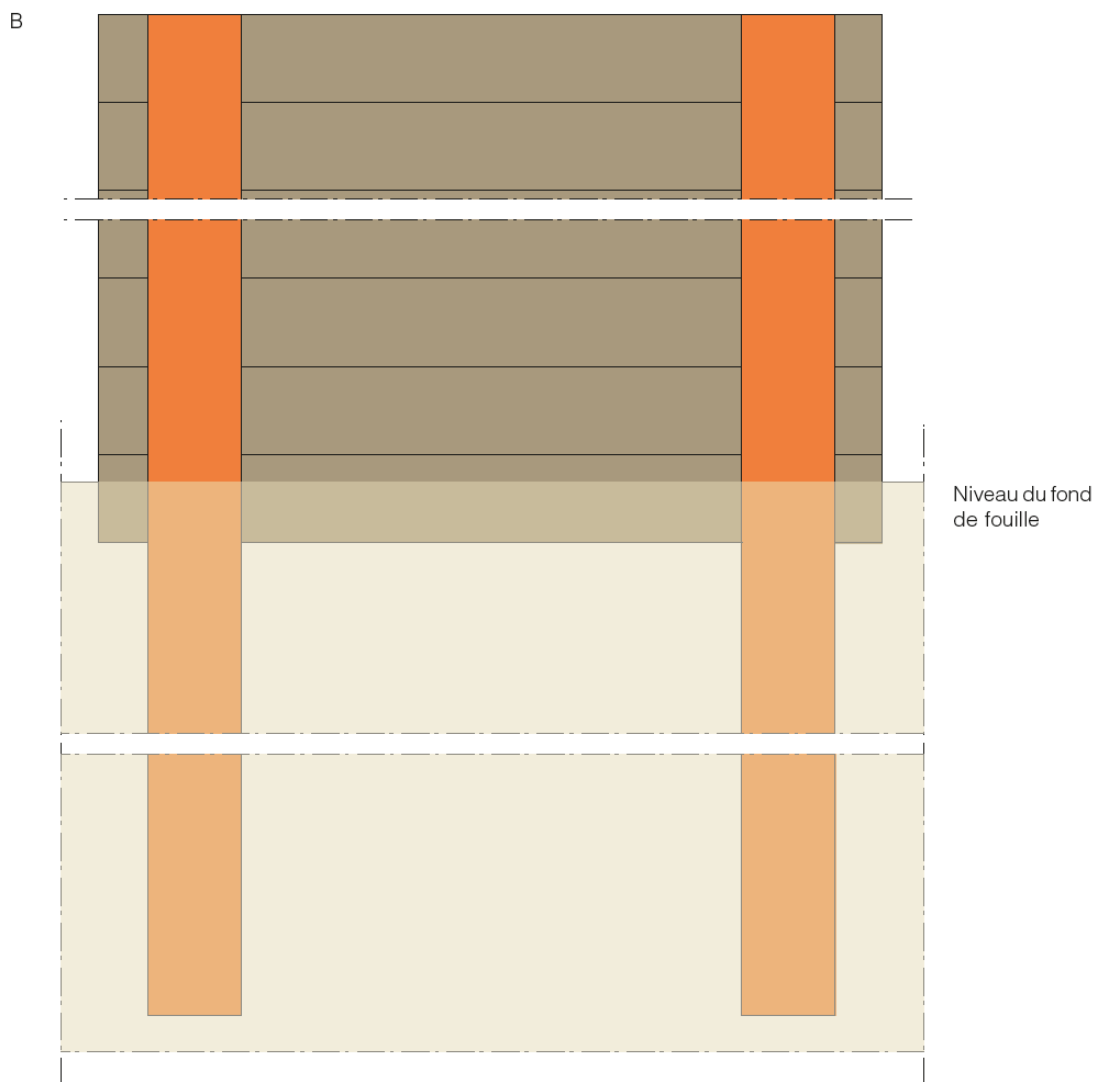


Fig. 1 Vue en plan (A) et vue de face (B) d'une paroi berlinoise constituée d'un blindage posé durant l'excavation.

2. Exécution : description générale

L'exécution se déroule en plusieurs étapes (cf. figure 2) :

1. les profilés verticaux sont vibrofoncés dans le sol ou placés dans un forage exécuté au préalable. Cette dernière technique s'applique principalement en présence d'un sol très dur ou d'obstacles souterrains. Après la mise en œuvre du profilé, il convient de combler le forage au moyen de béton (jusqu'au niveau du fond de fouille), de coulis de ciment, de sable (stabilisé) et/ou de gravier (cf. figure 3), les éléments de blindage sont placés à mesure que progresse l'excavation locale. Cette dernière se déroule par couches horizontales successives (0,2 à 1 m) jusqu'au niveau d'installation des éventuels supports horizontaux. Les éléments de blindage sont placés entre les profilés verticaux, perpendiculairement à ceux-ci, et directement après chaque phase d'excavation

2. la fouille est excavée sur tout son périmètre jusqu'au niveau d'installation des éventuels supports horizontaux
3. si nécessaire, les supports horizontaux sont mis en place (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...)
4. la mise en place du blindage se poursuit sous le niveau d'installation des éventuels supports horizontaux, à mesure qu'on réalise — d'abord localement — une nouvelle phase d'excavation. Celle-ci est menée jusqu'au niveau d'installation d'éventuels supports horizontaux supplémentaires, ou jusqu'au niveau du fond de fouille final. Le blindage doit au moins atteindre le niveau du fond de fouille le plus profond
5. la fouille est à nouveau excavée sur tout son périmètre jusqu'au niveau d'installation des éléments de support horizontaux éventuels ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

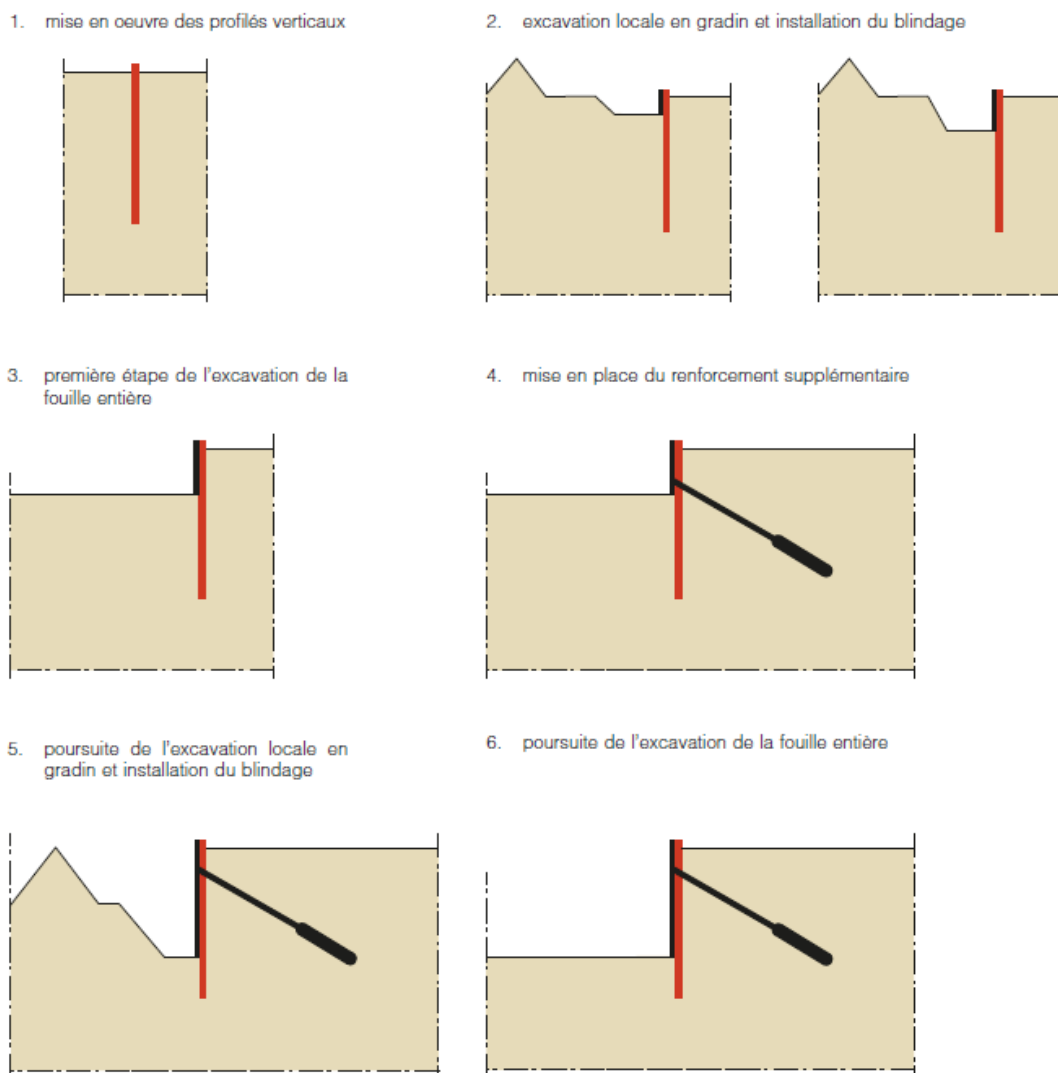


Fig. 2 Etapes du processus d'exécution d'une paroi berlinoise constituée d'éléments de blindage mis en place en cours d'excavation.

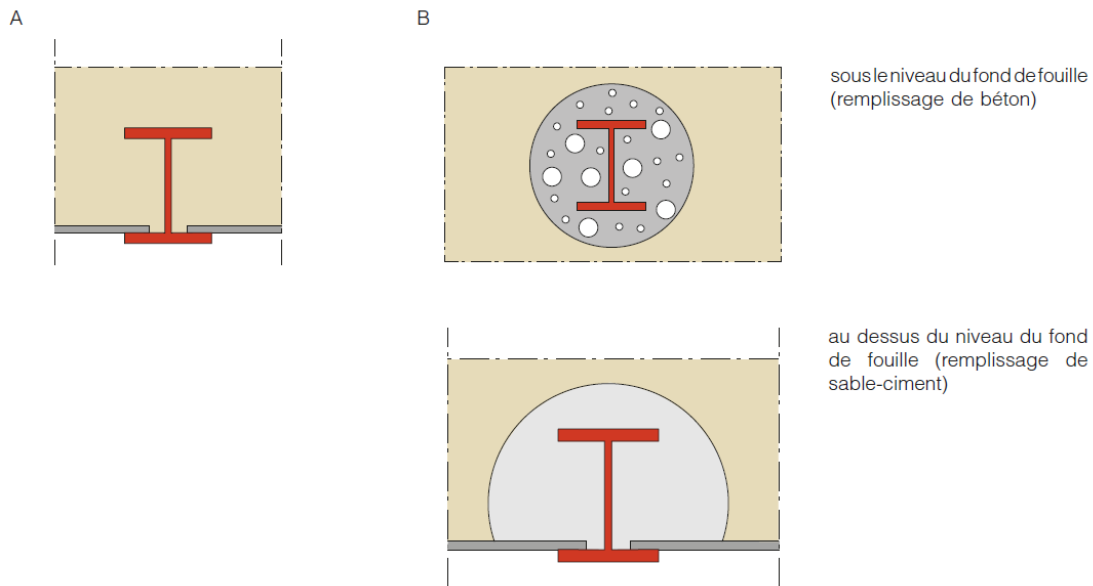


Fig. 3 Profilé vertical : (A) vibrofoncé et (B) placé dans un forage exécuté au préalable.

3. Matériaux

Les profilés verticaux peuvent être des profilés métalliques, souvent des poutres à larges ailes (largeur des ailes : 180 à 300 mm), tels que les profilés IPE, HEA, HEB ou les doubles profilés UPN (cf. figure 4).

Les éléments de blindage sont des planches en bois (cf. également § 8) ou des plaques en béton préfabriqué (prédalles). Pour plus d'informations concernant les éléments de blindage constitués de plaques en acier, consultez [l'Infofiche 56.2 Parois berlinoises de type 2](#).

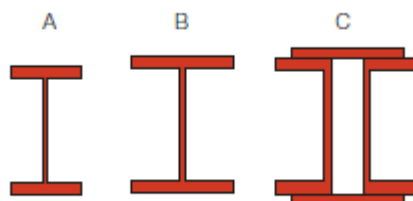


Fig. 4 Profilés verticaux : (A) profilé IPE, (B) profilé HEA et (C) double profilé UPN.

4. Dimensions

Les dimensions caractéristiques des parois berlinoises sont les suivantes :

- l'espace entre les profilés verticaux varie de 1 à 2,1 m et peut aller jusqu'à 2,6 m dans des cas exceptionnels (cf. figure 1)
- la profondeur de l'excavation sans système de support horizontal complémentaire est généralement de 3 m maximum, tandis que celle d'une excavation avec support horizontal complémentaire est de 8 m maximum

- les dimensions des éléments de blindage dépendent des matériaux utilisés. Les planches en bois ont une épaisseur qui varie de 5 à 15 cm et une hauteur entre 13 et 18 cm. Les plaques en béton préfabriqué ont une épaisseur de 4 à 6 cm et une hauteur pouvant aller jusqu'à 1,1 m. La largeur des éléments de blindage doit être choisie de telle sorte que le chevauchement avec les profilés verticaux représente au moins 20 % de la largeur des ailes avec un minimum de 4 cm, compte tenu des tolérances au niveau du sol de surface (cf. figure 1).

5. Capacité portante

Une paroi berlinoise n'est pas conçue pour reprendre des charges de compression ou traction verticales, à l'exception de celles induites par la composante verticale de la force exercée par la pression du sol, et par les éventuels tirants d'ancrage obliques ou pieux de traction.

6. Déplacement horizontal

Des déplacements assez importants sont souvent à prévoir (> 20 mm dans la partie supérieure de la paroi berlinoise au niveau du sol de surface) et ce, même lorsque des systèmes de support horizontaux complémentaires sont mis en œuvre.

7. Domaine d'application

Les parois berlinoises (type 1) n'ont qu'une fonction de soutènement des terres, et non d'étanchéité à l'eau. Elles peuvent être appliquées dans les situations suivantes :

- la technique est souvent utilisée pour des excavations temporaires et peu profondes (3 à 8 m)
- la technique ne s'applique que lorsque le sol possède une certaine cohésion (éventuellement temporaire). Cette dernière doit assurer la stabilité de l'excavation verticale sur une hauteur minimale (0,2 à 1 m) et dans un court laps de temps afin de permettre la mise en place du blindage
- la technique n'est pas applicable à proximité de fondations superficielles ou de constructions sensibles en raison des grandes déformations à prévoir avec ce type de soutènement. La distance minimale est généralement définie en considérant une pente de 45° jusqu'au niveau du fond de fouille (cf. figure 5). Cette règle ne s'applique que si le déplacement de la paroi à hauteur du niveau du fond de fouille est limité à 10 mm
- la nappe phréatique doit se trouver au moins 0,5 m sous le niveau du fond de fouille. Pour un sol constitué de plusieurs couches de natures différentes (stratifié), les mesures nécessaires doivent être prises pour éviter la présence de nappes perchées
- la paroi peut éventuellement être utilisée comme coffrage extérieur d'un mur de cave
- les parois berlinoises dépourvues de supports horizontaux (tirants d'ancrage, étaçons, pieux de traction, ...) ne sont utilisées que si aucune exigence critique n'a été formulée par rapport au déplacement horizontal de la paroi.



Fig. 5 Calcul de la distance minimale entre une paroi berlinoise et une fondation.

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- lors du calcul des pressions de terre active et passive, il convient de tenir compte du caractère discontinu de la paroi sous le niveau du fond de fouille
- la stabilité structurelle des éléments de blindage est également contrôlée. On peut tenir compte de l'influence positive de l'effet de voûte dans le sol qui permet de transférer une partie des pressions de terre vers les profilés verticaux.

8.2 Lors de la mise en œuvre

- si les profilés sont vibrofoncés ou battus dans un rayon de 20 m autour de bâtiments, installations ou conduites sensibles aux vibrations, le cahier des charges doit mentionner les mesures de vibrations éventuellement requises (NBN B 03-003 ⁽¹⁾)
- l'exécutant doit s'assurer du bon contact entre le système de blindage et le sol retenu. Si nécessaire, des cales peuvent être utilisées pour forcer ce contact (cf. figure 6). Les cavités éventuelles doivent être colmatées à l'aide de sable stabilisé ou de coulis de ciment
- les parois berlinoises sont typiquement des constructions de soutènement temporaires. Toutefois, il convient de tenir compte des conséquences à long terme de l'oubli d'un blindage en bois
- après récupération éventuelle des profilés et des éléments de blindage, il convient de combler les cavités. La récupération des profilés se fait par la mise en œuvre de vibrations à haute fréquence
- les forces de réaction des systèmes de support horizontaux (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...) sont transmises aux profilés par le biais de poutres de répartition de profilé à profilé, ou via une plaque d'ancrage placée sur deux profilés proches ou sur un double profilé
- la fonction de soutènement de la paroi berlinoise doit être la plus brève possible

- l'exécution de l'excavation locale (voir schémas 2 et 5 à la figure 2) doit correspondre aux consignes de sécurité (RGPT).

⁽¹⁾ NBN B 03-003 Déformation des structures. Valeurs limites de déformation. Bâtiments. Bruxelles, Bureau de Normalisation, 2003.

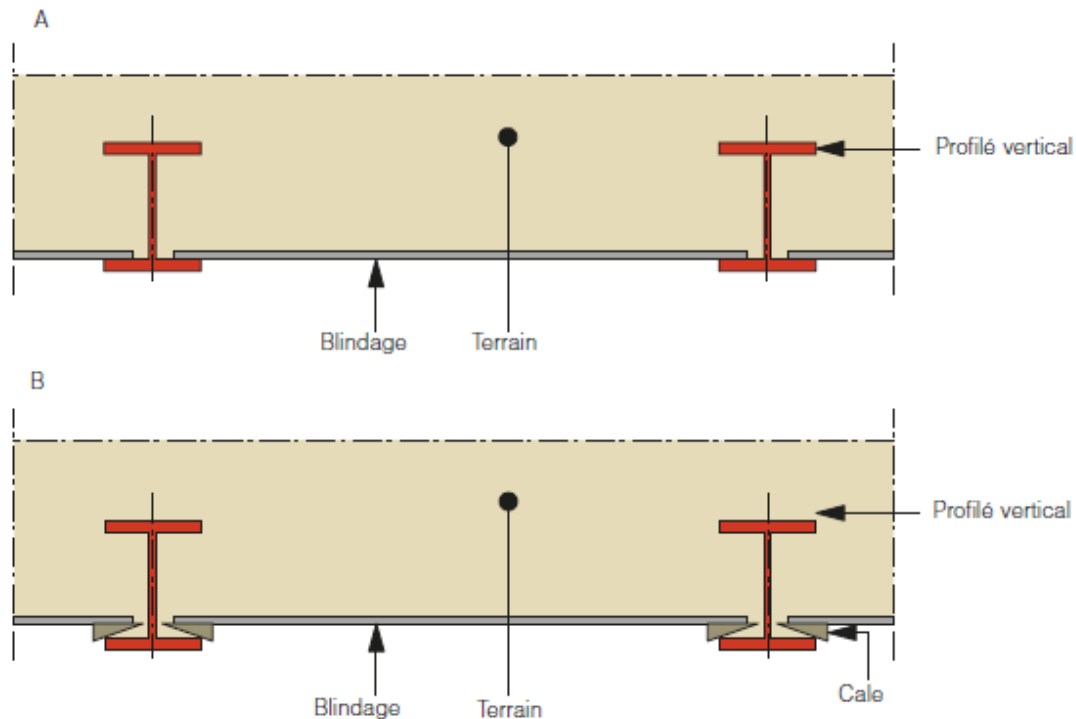


Fig. 6 Vue en plan des parois berlinoises constituées d'éléments de blindage mis en place en cours d'excavation : (A) sans cale et (B) avec cale.

9. Variantes

Le blindage peut être inséré entre les profilés et le terrain par souci de gain de place pour les constructions souterraines.

10. Gestion de la qualité

Tolérances de positionnement (cf. figure 7) :

- la précision de la position horizontale des profilés verticaux est de 50 mm (au niveau du sol de surface)
- la précision de la position verticale des profilés verticaux est de ± 100 mm (niveau de la partie inférieure des profilés)
- la précision de l'inclinaison des profilés verticaux est de 1,3 %
- la précision du positionnement des profilés verticaux est suffisante pour garantir une pose correcte des éléments de blindage
- des tolérances plus strictes peuvent être reprises dans le cahier des charges (pour des raisons esthétiques ou de gain de place, p. ex.). L'exécutant devra par conséquent porter une attention accrue à la précision des installations

- le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les éventuels coûts supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces tolérances (surconsommation de béton, p. ex.).

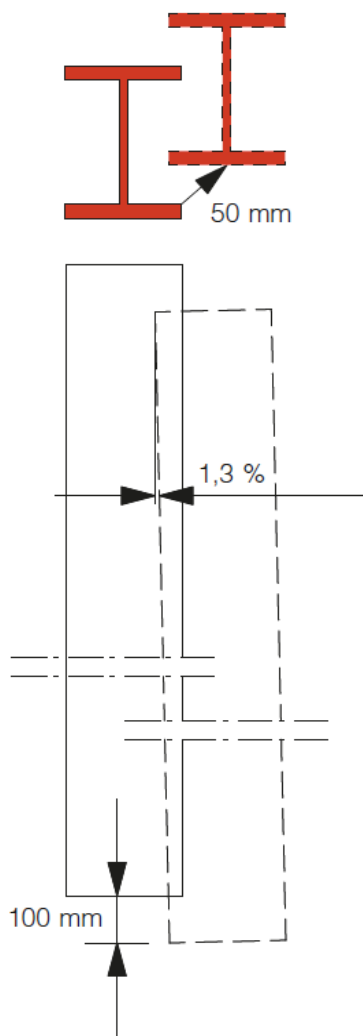


Fig. 7 Tolérances de positionnement des profilés verticaux d'une paroi berlinoise.

11. Lien vers la base de données [TechCom](#)

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC
 P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

Infofiche 56.2

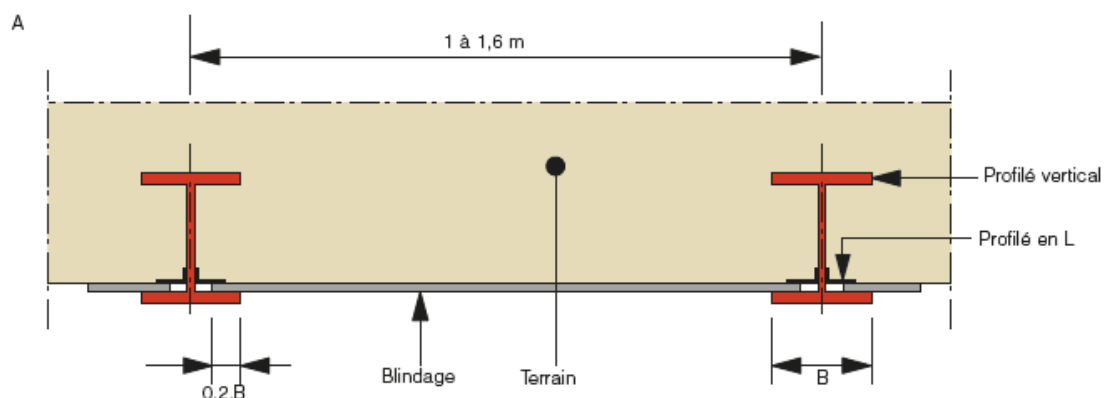
Parois berlinoises de type 2 : blindage mis en place avant l'excavation

Publication : juillet 2012

L'Infofiche sur les parois berlinoises de type 2 constituées d'éléments de blindage mis en place avant l'excavation est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les matériaux et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Une paroi berlinoise de type 2 est un soutènement composé de profilés verticaux (cf. figure 1) et d'un système de blindage mis en œuvre avant le début de l'excavation. La pression des terres, transférée aux profilés verticaux par l'intermédiaire des éléments de blindage, est équilibrée par les efforts de butée exercés par le massif de sol situé sous le niveau du fond de fouille, et par les systèmes de support horizontaux complémentaires, éventuellement mis en œuvre (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...).



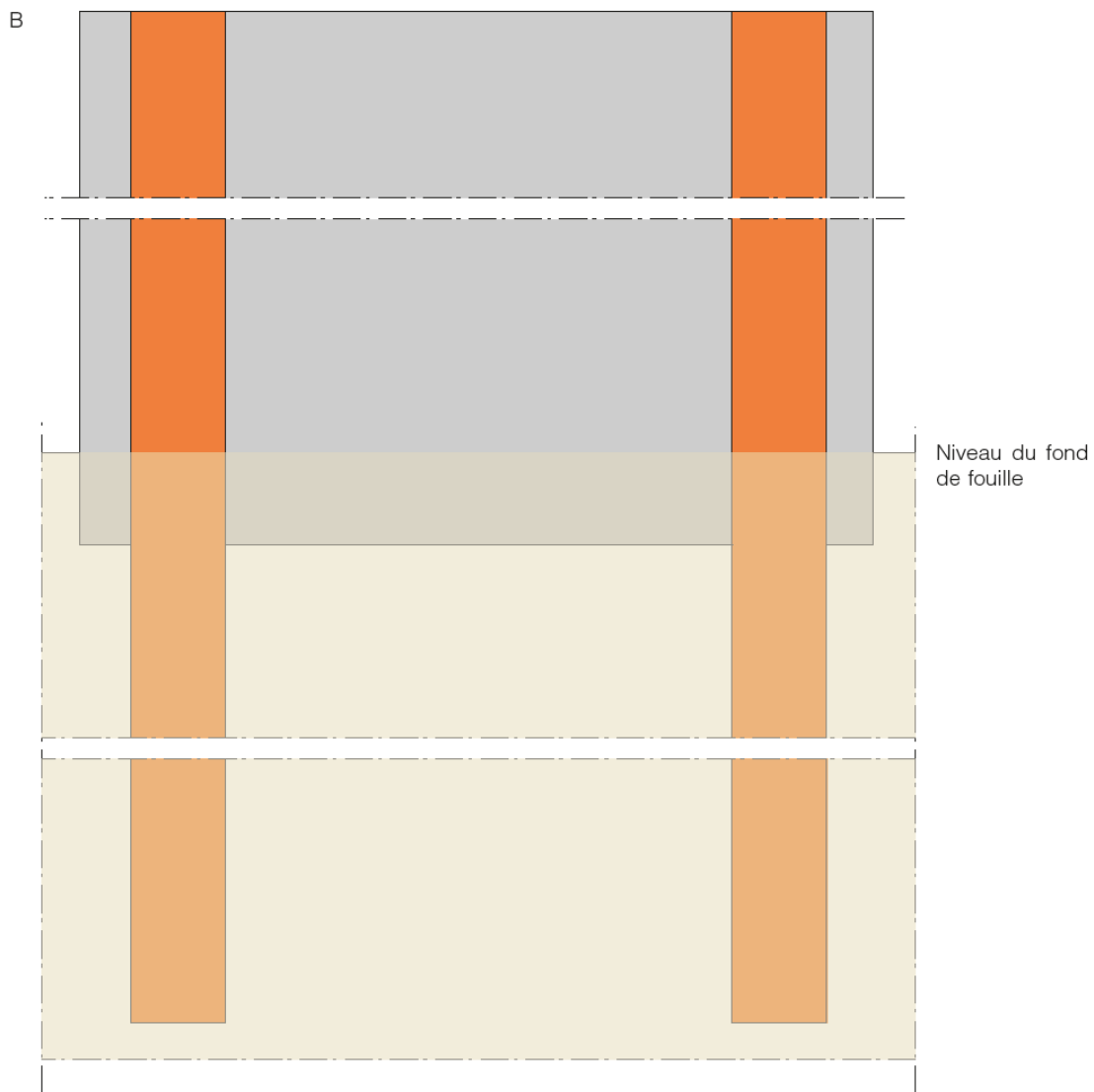


Fig. 1 Vue en plan (A) et vue de face (B) d'une paroi berlinoise constituée d'un système de blindage mis en place avant l'excavation.

2. Exécution : description générale

L'exécution se déroule en plusieurs étapes (cf. figure 2) :

1. les profilés verticaux sont vibrofoncés dans le sol ou placés dans un forage exécuté au préalable
2. les plaques d'acier constituant le système de blindage sont vibrofoncées à une profondeur minimale de 20 cm sous le niveau du fond de fouille, contre l'aile située du côté intérieur ou extérieur de la fouille (cf. figure 3)
3. la fouille est par la suite excavée sur tout son périmètre jusqu'au niveau d'installation d'éventuels supports horizontaux
4. si nécessaire, les supports horizontaux sont mis en place (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...)
5. enfin, la fouille est excavée sur tout son périmètre jusqu'au niveau d'installation des supports horizontaux supplémentaires éventuels ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

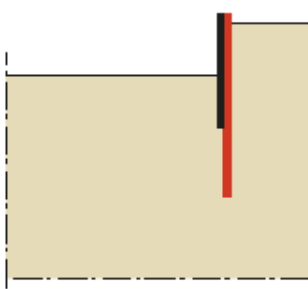
1. mise en oeuvre des profilés verticaux



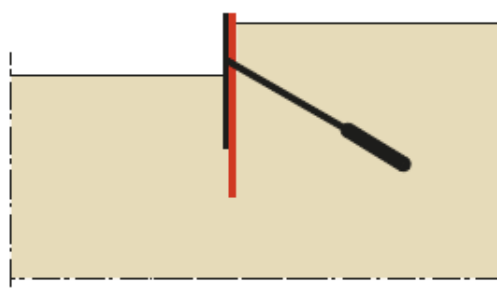
2. mise en oeuvre du blindage



3. première étape de l'excavation de la fouille entière



4. mise en place d'un renforcement horizontal supplémentaire



5. poursuite de l'excavation de la fouille entière

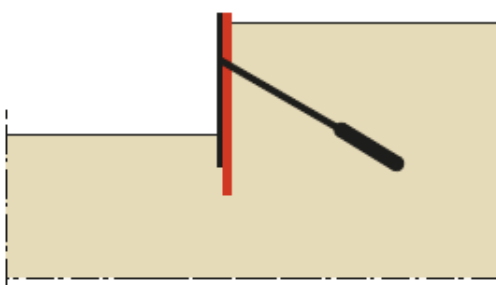


Fig. 2 Etapes du processus d'exécution d'une paroi berlinoise constituée d'un système de blindage mis en place avant l'excavation.

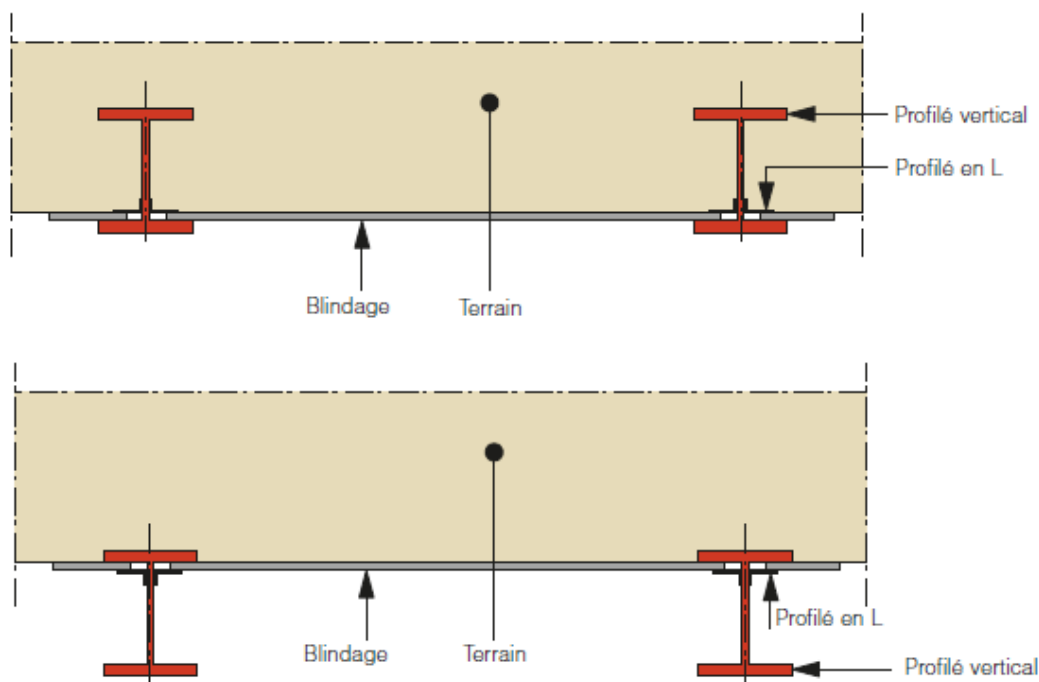


Fig. 3 Vue en plan de deux méthodes d'exécution d'une paroi berlinoise composée d'un système de blindage mis en place avant l'excavation.

3. Matériaux

Les profilés verticaux peuvent être des profilés métalliques, souvent des poutres à larges ailes (largeur des ailes : 180 à 300 mm), tels que les profilés IPE, HEA, HEB ou les doubles profilés UPN. Ils sont pourvus d'un profilé en L pour guider les plaques d'acier durant le vibrofonçage.

Les éléments de blindage sont composés de plaques d'acier.

4. Dimensions

Les dimensions caractéristiques des parois berlinoises sont les suivantes :

- l'espacement entre les profilés verticaux varie de 1 à 1,6 m (cf. figure 1)
- la profondeur de l'excavation sans système de support horizontal complémentaire est généralement de 3 m maximum, tandis que celle d'une excavation avec support horizontal complémentaire est de 6 m maximum. Les plaques en acier constituant le blindage ont une épaisseur pouvant aller jusqu'à 15 mm et une hauteur pouvant atteindre 6 m. La largeur des éléments de blindage doit être choisie de telle sorte que le chevauchement avec les profilés verticaux représente au moins 20 % de la largeur des ailes avec un minimum de 4 cm, compte tenu des tolérances au niveau du sol de surface (cf. figure 1).

5. Capacité portante

Une paroi berlinoise n'est pas conçue pour reprendre des charges de compression ou traction verticales, à l'exception de celles induites par la composante verticale de la force exercée par la pression du sol, et par les éventuels tirants d'ancrage obliques ou pieux de traction.

6. Déplacement horizontal

Des déplacements assez importants sont souvent à prévoir (> 20 mm dans la partie supérieure de la paroi berlinoise au niveau du sol de surface) et ce, même lorsque des systèmes de supports horizontaux complémentaires sont mis en œuvre.

7. Domaine d'application

Les parois berlinoises (type 2) n'ont qu'une fonction de soutènement des terres, et non d'étanchéité à l'eau. Elles peuvent être appliquées dans les situations suivantes :

- la technique est souvent utilisée pour des excavations temporaires et peu profondes (3 à 6 m)
- la technique n'est pas applicable à proximité de fondations superficielles ou de constructions sensibles en raison des grandes déformations à prévoir avec ce type de soutènement. La distance minimale est généralement définie en considérant une pente de 45° jusqu'au niveau du fond de fouille (cf. figure 4). Cette règle ne s'applique que si le déplacement de la paroi à hauteur du niveau du fond de fouille est limité à 10 mm
- la nappe phréatique doit se trouver au moins 0,5 m sous le niveau du fond de fouille. Pour un sol constitué de plusieurs couches de natures différentes (stratifié), les mesures nécessaires doivent être prises pour éviter la présence de nappes perchées
- la paroi peut éventuellement être utilisée comme coffrage extérieur d'un mur de cave
- les parois berlinoises dépourvues de supports horizontaux (tirants d'ancrage, étaçons, pieux de traction, ...) ne sont utilisées que si aucune exigence critique n'a été formulée par rapport au déplacement horizontal de la paroi.



Fig. 4 Calcul de la distance minimale entre une paroi berlinoise et une fondation.

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- lors du calcul des pressions de terre active et passive, il convient de tenir compte du caractère discontinu de la paroi sous le niveau du fond de fouille
- la stabilité structurelle des éléments de blindage est également contrôlée. On peut tenir compte de l'influence positive de l'effet de voûte dans le sol qui permet de transférer une partie des pressions de terre vers les profilés verticaux.

8.2 Lors de la mise en œuvre

- si les profilés et les plaques en acier sont vibrofoncés dans un rayon de 20 m autour de bâtiments, installations ou conduites sensibles aux vibrations, le cahier des charges doit mentionner les mesures de vibrations éventuellement requises (NBN B 03-003)
- après récupération éventuelle des profilés et des éléments de blindage, il convient de combler les cavités. La récupération se fait par la mise en œuvre de vibrations à haute fréquence
- les forces de réaction des systèmes de support horizontaux (étançons, tirants d'ancrage, pieux de traction, ...) sont transmises aux profilés par le biais de poutres de répartition de profilé à profilés, ou via une plaque d'ancrage placée sur deux profilés proches ou sur un double profilé
- la fonction de soutènement de la paroi berlinoise doit être la plus brève possible.

9. Variantes

Le blindage peut également être composé de plaques de béton préfabriquées. Dans ce cas, l'exécution se fera généralement en combinaison avec le lançage d'eau ou d'air sous pression.

10. Gestion de la qualité

Tolérances de positionnement (cf. figure 5) :

- la précision de la position horizontale des profilés verticaux est de 50 mm (au niveau du sol de surface)
- la précision de la position verticale des profilés verticaux est de ± 100 mm (niveau de la partie inférieure des profilés)
- la précision de l'inclinaison des profilés est de 1,3 %
- la précision du positionnement des profilés verticaux est suffisante pour garantir une pose correcte des éléments de blindage des tolérances plus strictes peuvent être reprises dans le cahier des charges (pour des raisons esthétiques)

ou de gain place, p. ex.). L'exécutant devra par conséquent porter une attention accrue à la précision des installations

- le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les coûts éventuels supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces tolérances (surconsommation de béton, p. ex.).

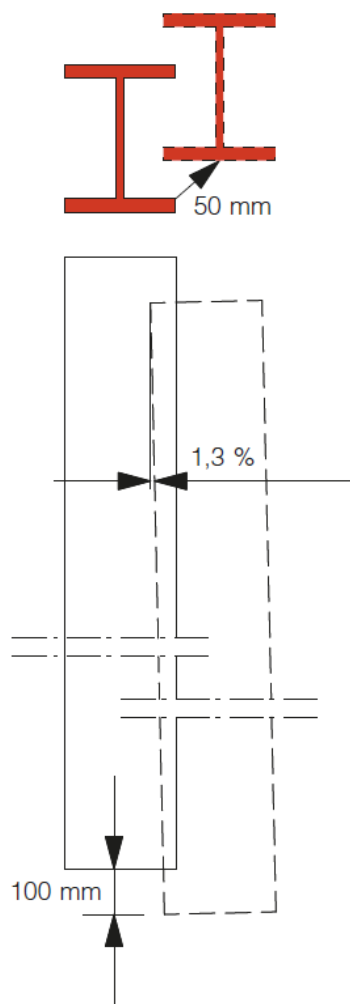


Fig. 5 Tolérances de positionnement des profilés verticaux d'une paroi berlinoise.

11. Lien vers la base de données [TechCom](#)

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC
P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

Infofiche 56.3

Parois de pieux de type 1 : pieux s'emboîtant les uns dans les autres (paroi de pieux sécants)

Parution : juillet 2012

L'Infofiche sur les parois de pieux de type 1, également appelées parois de pieux sécants et constituées de pieux s'emboîtant les uns dans les autres est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les techniques et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Le soutènement formé par des pieux primaires et secondaires intersectés est appelé paroi de pieux sécants (cf. figure 1). Les pieux primaires peuvent être exécutés moins profondément que les pieux secondaires (rideau de pieux en touches de piano).

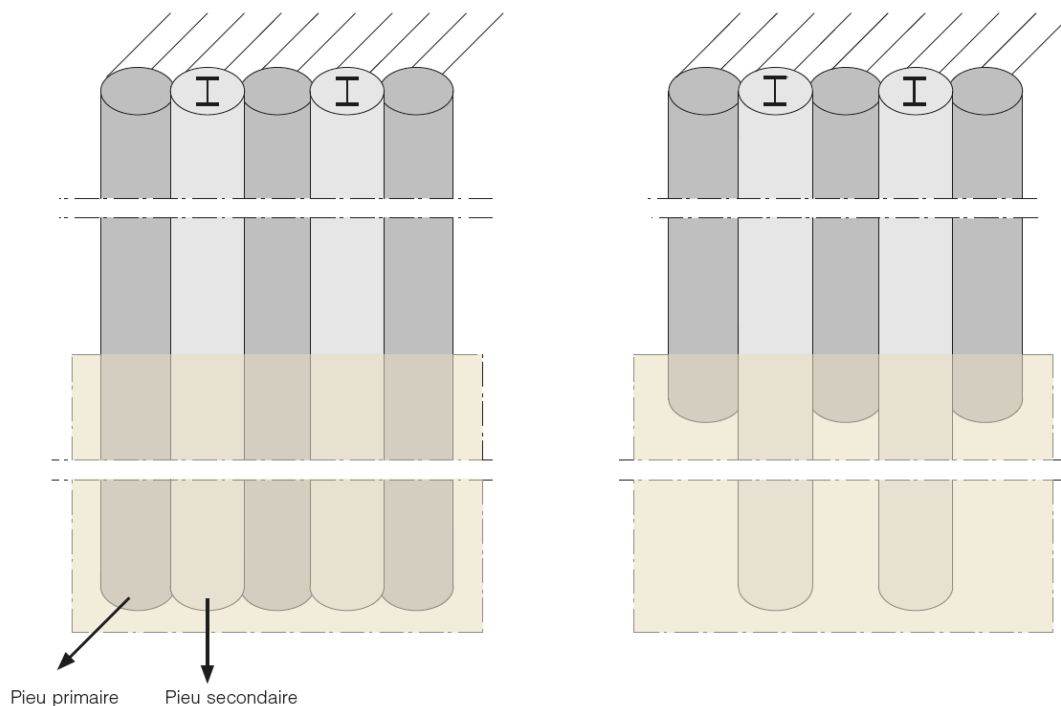


Fig. 1 Mur de pieux sécants classique (gauche) et en touches de piano (droite).

2. Exécution : description générale

On commence toujours par installer une poutre de guidage pour indiquer les positions des pieux et assurer le guidage durant le forage.

L'exécution se déroule en plusieurs étapes :

- première étape : une première série de pieux primaires non armés est réalisée suivant la séquence 1 – 5 – 9 – 13 – ...
- deuxième étape : une deuxième série de pieux primaires non armés est réalisée suivant la séquence 3 – 7 – 11 – ...
- troisième étape : les pieux secondaires en béton armé sont exécutés suivant la séquence 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – ... Les pieux primaires sont partiellement fraisés (cf. figure 2). Si le rideau de pieux est installé à proximité de constructions susceptibles de tasser, les pieux secondaires sont exécutés en deux étapes suivant les séquences 2 – 6 – 10 – ... et 4 – 8 – 12 – ...
- la fouille est ensuite excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal
- si nécessaire, le support horizontal est mis en place (tirants d'ancrage, pieux de traction, étançons, ...). Les tirants d'ancrage ou les pieux de traction sont placés à hauteur de l'intersection entre un pieu primaire et secondaire
- la fouille est à nouveau excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal supplémentaire ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

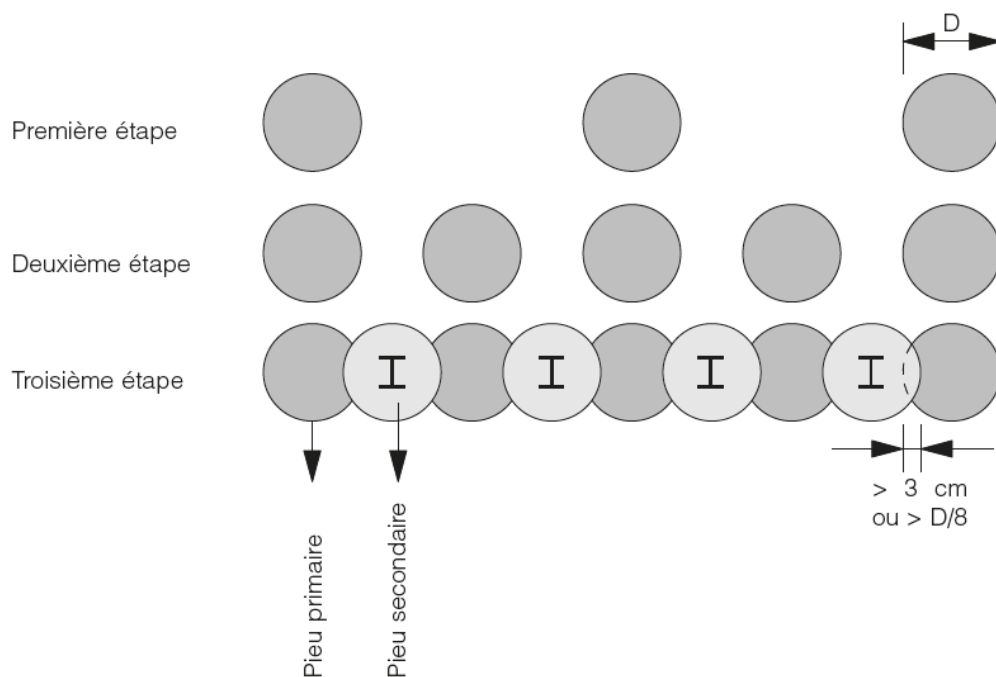


Fig. 2 Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi de pieux sécants.

3. Techniques

Différentes techniques d'exécution des pieux peuvent être utilisées en Belgique :

- exécution à la tarière continue avec tubage provisoire
- exécution de pieux forés avec tubage provisoire
- exécution de pieux forés à la boue bentonitique (uniquement pour les pieux primaires).

Les pieux sont toujours constitués de béton coulé *in situ* et un pieu sur deux est armé d'un profilé ou d'une cage d'armature.

4. Dimensions

Les pieux constituant ces parois ont les mêmes dimensions que les pieux isolés exécutés suivant la même technique (NBN EN 1536 [2]). Le diamètre caractéristique des pieux à tarière continue varie entre 0,4 et 0,7 m et celui des pieux forés entre 0,6 et 1,5 m.

Le chevauchement des pieux constituant une paroi de pieux sécants est d'au moins 3 cm au niveau du sol de surface. Si le rideau de pieux constitue un silo et/ou revêt une fonction d'étanchéité à l'eau, le chevauchement ne peut être inférieur à 1/8 du diamètre des pieux (cf. figure 2). Dans ce cas, il convient de tenir compte des tolérances de positionnement.

5. Capacité portante

Un rideau de pieux a une capacité portante verticale importante (cf. [Rapport du CSTC n° 12, Directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique. Partie 1 : Dimensionnement géotechnique à l'état limite ultime de pieux sous charge axiale de compression](#) [5]). Lors du calcul de cette dernière, il convient de tenir compte du facteur de forme (mur de pieux sécants), de l'effet de groupe (rideau de pieux en touches de piano) et de l'influence de l'excavation.

6. Déplacement horizontal

Dans des conditions similaires, la déformation d'un rideau de pieux sera plus faible que celle d'une paroi berlinoise (cf. Infofiches [56.1](#) et [56.2](#)) ou d'un rideau de palplanches et ce, grâce à la rigidité d'un tel soutènement.

7. Domaine d'application

Les parois de pieux sécants peuvent avoir les fonctions suivantes :

- une fonction portante et de retenue des terres tant temporaire que permanente
- une fonction de retenue d'eau temporaire. Une fonction permanente nécessite des dispositifs complémentaires. Il convient d'évaluer au préalable les risques d'écarts lors de l'installation des pieux pour l'étanchéité à l'eau du rideau de pieux. Les fuites éventuelles doivent être colmatées directement.

Lors de l'exécution de parois de pieux sécants, il convient de tenir compte des recommandations suivantes :

- cette technique est souvent appliquée pour des soutènements plus profonds (jusqu'à 14 m) et très proches des bâtiments existants
- l'exécution d'une paroi de pieux sécants n'entraîne pas de vibration

- les éventuels obstacles souterrains ne posent généralement pas de problème mais peuvent être défavorables pour les tolérances de la paroi
- l'installation d'un rideau de pieux en présence d'eau souterraine est possible sans rabattement préalable du niveau de la nappe phréatique. En présence d'écoulements d'eau importants, le risque de délavage du béton doit être étudié.

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- le principe de calcul géotechnique correspond à celui des parois moulées
- si des profilés sont utilisés comme armature, l'interaction de l'acier avec le béton peut être considérée dans le calcul du moment maximal à la rupture (NBN EN 1994-1-1 [4])
- il convient de tenir compte d'une section réduite du rideau de pieux pour en déterminer la rigidité flexionnelle. En présence d'un mur de pieux sécants en touches de piano, le caractère discontinu sous le niveau du fond de fouille doit également être pris en compte.
- en cas d'applications permanentes, il convient de tenir compte de la durabilité des parois (NBN EN 206-1 [1] et NBN EN 1536 [2], NBN EN 1992-1-1 [3])
- les tassements des constructions environnantes faisant suite à l'exécution (décompression du sol, poids des machines, ...) doivent être contrôlés
- si le rideau de pieux forme un silo, un fonctionnement en anneau peut être calculé jusqu'à une profondeur maximale de 100 fois le chevauchement des pieux.

8.2 Lors de la mise en œuvre

- la deuxième série de pieux primaires (étape 2) est réalisée au moins 4 heures après la première (étape 1) (cf. figure 1)
- lors de l'installation d'une paroi de pieux sécants, les pieux secondaires sont réalisés très rapidement après les pieux primaires, tout en respectant un délai minimum de 8 heures. Une trop longue attente (3 ou 4 jours) implique un risque d'une installation plus difficile. Le type de sol peut nécessiter un autre phasage
- l'attente entre l'exécution des pieux et l'excavation doit être suffisamment longue pour que le béton atteigne la résistance à la compression et la rigidité minimale requises ⁽¹⁾
- le transfert des forces du support supplémentaire sur la paroi s'effectue à l'aide de poutres de répartition. Un transfert de forces au moyen, par exemple, d'une plaque d'ancrage est, dans certain cas, possible si la stabilité structurelle de la paroi est garantie
- sauf si les pieux ne subissent aucune traction, l'armature doit être installée sur toute leur hauteur (NBN EN 1536 [2])
- un gabarit peut être utilisé pour améliorer la précision de la position des éventuels profilés utilisés comme armature dans les pieux secondaires.

(¹) La pratique démontre qu'il est souvent nécessaire de prévoir au moins 10 jours entre l'exécution du rideau de pieux et l'excavation.

9. Variantes

Exécuter plusieurs pieux à une moindre profondeur entre deux pieux secondaires constitue parfois une variante au rideau de pieux en touches de piano. Il convient alors de les considérer comme des parois berlinoises en ce qui concerne le domaine d'application et du calcul (cf. figure 3).

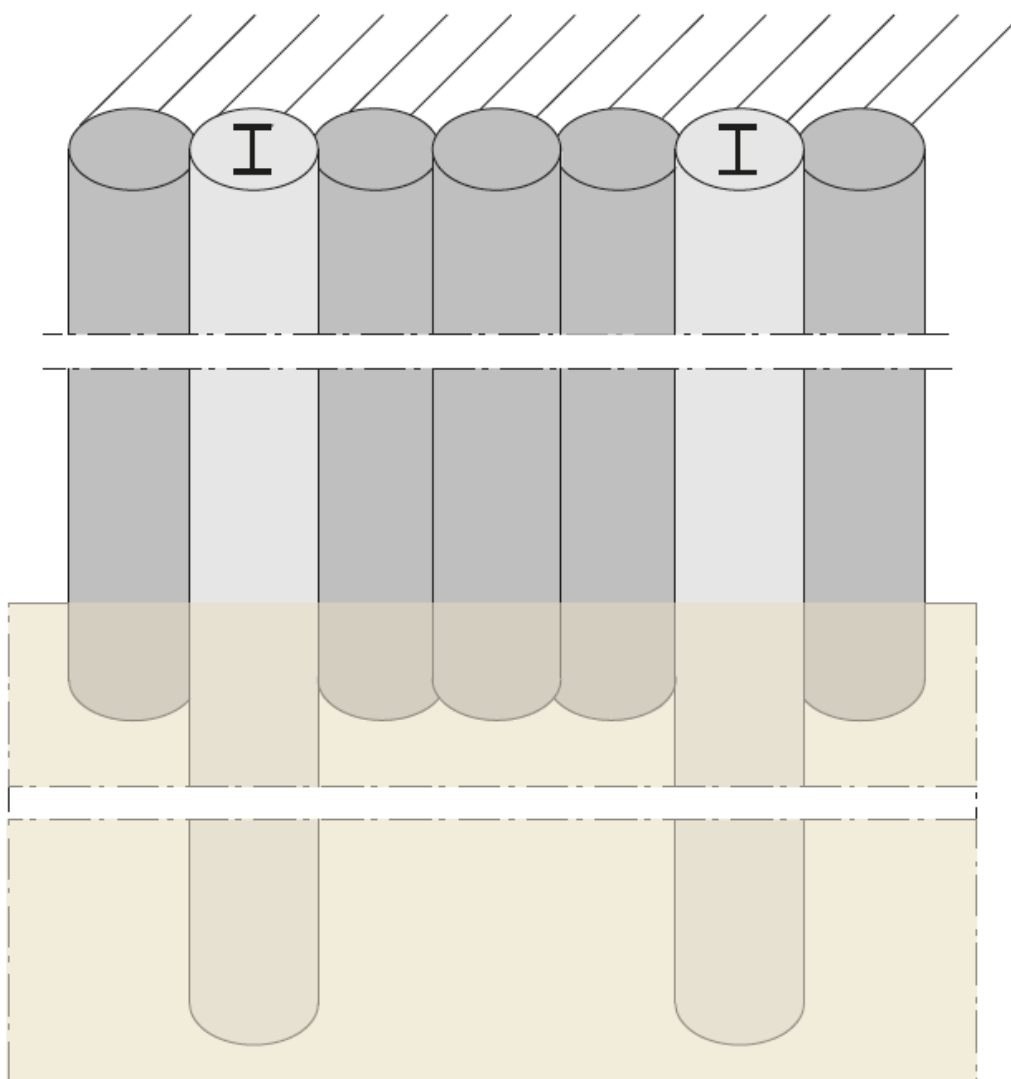


Fig. 3 Exécution d'un mur de pieux sécants en touches de piano composé de plusieurs pieux exécutés moins profondément entre deux pieux secondaires.

10. Gestion de la qualité

Tolérances de positionnement d'une paroi de pieux sécants (cf. figure 4) :

- la précision de la position horizontale des pieux est de 25 mm (niveau du sol de surface)
- la précision de la position verticale des pieux est de ± 100 mm (niveau de base des pieux)
- la précision sur l'inclinaison des pieux est de 1,3 %.

Une tolérance supplémentaire de 100 mm est autorisée pour les proéminences des pieux. Dans certains cas (en présence de cavités locales, de grosses pierres dures dans le sol ou dans les couches meubles, p. ex.), les proéminences plus grandes sont inévitables.

Le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les éventuels coûts supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces tolérances (décapage des pieux, p. ex.).

Si nécessaire, le cahier des charges peut reprendre des tolérances plus strictes. Ainsi une précision sur l'inclinaison de 0,5 % est souvent exigée en présence d'une paroi de pieux sécants constituant un silo et/ou ayant une fonction de retenue d'eau.

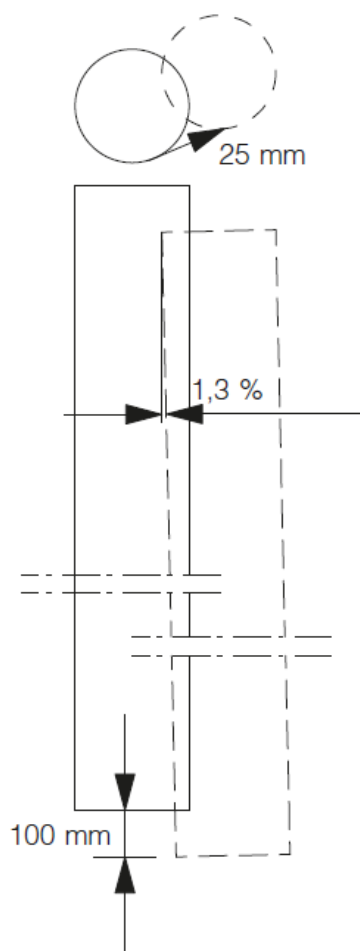


Fig. 4 Tolérances de positionnement des pieux sécants.

11. Lien vers la base de données [TechCom](#)

Bibliographie

1. Bureau de Normalisation
NBN EN 206-1 Béton. Partie 1 : Spécifications, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2001.
2. Bureau de Normalisation
NBN EN 1536 Exécution des travaux géotechniques spéciaux. Pieux forés. Bruxelles, NBN, 2010.
3. Bureau de Normalisation
NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Bruxelles, NBN, 2005.
4. Bureau de Normalisation
NBN EN 1994-1-1 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton. Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Bruxelles, NBN, 2001.
5. De Vos M. et Huybrechts N.
Directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique. Partie 1 : dimensionnement géotechnique à l'état limite ultime de pieux sous charge axiale de compression. Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Rapport du CSTC, n° 12, 2009.

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC
P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

Infofiche 56.4

Parois de pieux de type 2 : pieux placés l'un à côté de l'autre (paroi de pieux tangents)

Parution : juillet 2012

L'Infofiche sur les parois de pieux de type 2, également appelées parois de pieux tangents et constituées de pieux placés l'un à côté de l'autre est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les techniques et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Il est possible de former une paroi de soutènement en plaçant les pieux les uns à côté des autres (cf. figure 1).

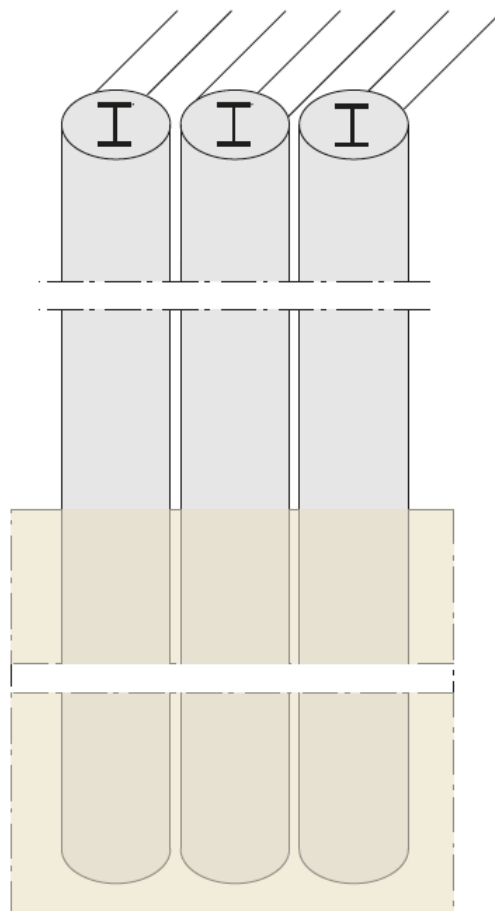


Fig. 1 Paroi de pieux tangents.

2. Exécution : description générale

On commence généralement par installer une poutre de guidage en béton pour indiquer les positions des pieux et assurer le guidage durant le forage.

L'exécution se déroule en plusieurs étapes :

- première étape : une première série de pieux armés est réalisée suivant la séquence 1 – 5 – 9 – 13 – ...
- deuxième étape : une deuxième série de pieux armés est réalisée suivant la séquence 3 – 7 – 11 – ...
- troisième étape : la dernière série de pieux armés est réalisée suivant la séquence 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – ... Si le rideau de pieux est installé à proximité de constructions susceptibles de tasser, les pieux secondaires sont exécutés en deux étapes suivant les séquences 2 – 6 – 10 et 4 – 8 – 12
- la fouille est ensuite excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal
- si nécessaire, le support horizontal est installé (tirants d'ancrage, pieux de traction, étançons, ...). Les tirants d'ancrage ou pieux de traction sont mis en place à l'aide de poutres de répartition
- la fouille est à nouveau excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal supplémentaire ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

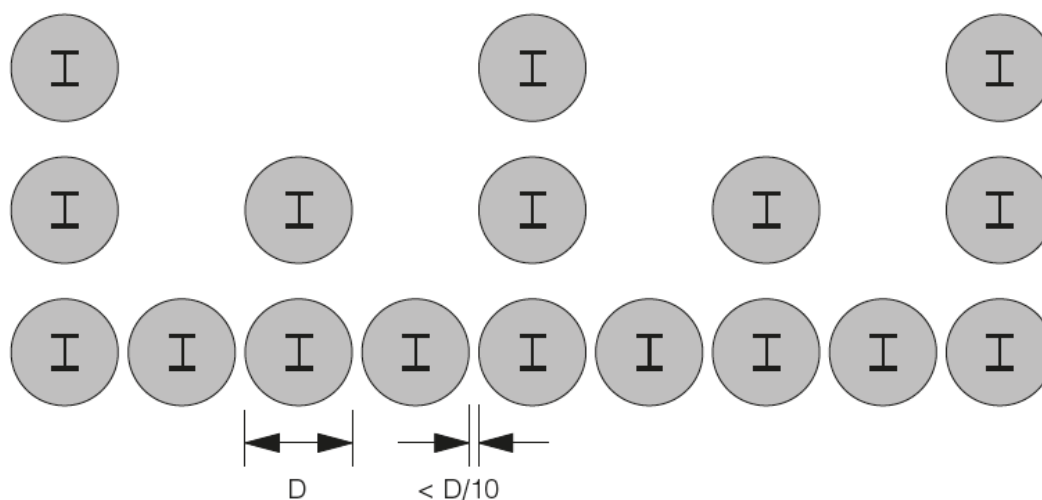


Fig. 2 Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi de pieux tangents.

3. Techniques

Différentes techniques d'exécution des pieux peuvent être utilisées en Belgique :

- exécution à la tarière continue avec tubage provisoire
- exécution de pieux forés avec tubage provisoire ou à la boue bentonitique
- exécution à la tarière continue munie d'un tube central de grand diamètre et de petites hélices.

Les pieux sont toujours constitués de béton coulé *in situ* et sont armés d'un profilé ou d'une cage d'armature.

4. Dimensions caractéristiques

Les pieux constituant ces parois ont les mêmes dimensions que les pieux isolés exécutés suivant la même technique (NBN EN 1536 [2]). Le diamètre caractéristique des pieux à tarière varie entre 0,4 à 0,7 m et celui des pieux forés entre 0,6 à 1,5 m. La distance entre les pieux est inférieure à 1/10 du diamètre des pieux (cf. figure 2).

5. Capacité portante

Un rideau de pieux a une capacité portante verticale importante (cf. [Rapport du CSTC n° 12, Directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique. Partie 1 : Dimensionnement géotechnique à l'état limite ultime de pieux sous charge axiale de compression](#) [5]). Lors du calcul de cette dernière, il convient de tenir compte du facteur de forme et de l'influence de l'excavation.

6. Déplacement horizontal

Dans des conditions similaires, la déformation d'un rideau de pieux est plus faible que celle d'une paroi berlinoise (cf. [Infofiches 56.1 et 56.2](#)) ou d'un rideau de palplanches et ce, grâce à la rigidité d'un tel soutènement.

7. Domaine d'application

Les parois de pieux tangents peuvent avoir les fonctions suivantes :

- une fonction portante et de retenue de sol tant temporaire que permanente. En présence de parois de pieux tangents avec une fonction de soutènement de sol permanente, il convient de prendre des mesures pour éviter l'érosion du sol
- cette technique n'a pas de fonction de retenue d'eau. En outre, la nappe phréatique doit toujours se trouver 0,5 m sous le niveau du fond de fouille. Il convient de prendre les mesures nécessaires en présence de nappes perchées dans un sous-sol stratifié.

Lors de l'exécution des parois de pieux tangents, il convient de tenir compte des recommandations suivantes :

- les parois de pieux tangents sont typiquement utilisées pour des soutènements de plus grande profondeur (jusqu'à 14 m). Elles peuvent en outre être appliquées à côté de bâtiments existants à condition que les pieux soient exécutés avec un tubage ou à l'aide de boue bentonitique et que les ouvertures entre les pieux soient colmatées après l'excavation afin d'éviter l'érosion
- l'exécution des parois de pieux tangents n'entraîne pas de vibration

- les éventuels obstacles souterrains ne posent généralement pas de gros problèmes mais peuvent être défavorables pour les tolérances de la paroi
- l'installation d'un rideau de pieux en présence d'eau souterraine est possible sans rabattement préalable du niveau de la nappe phréatique. En présence d'écoulements d'eau importants, le risque de délavage du béton doit être étudié.

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- le principe du calcul géotechnique correspond à celui des parois moulées
- si des profilés sont utilisés comme armature, l'interaction de l'acier avec le béton peut être considérée dans le calcul du moment maximal à la rupture (NBN EN 1994-1-1 [4])
- il convient de tenir compte du caractère discontinu du rideau de pieux afin de déterminer la rigidité flexionnelle de la paroi
- la stabilité du sol entre les pieux doit être contrôlée
- en cas d'application permanente, il y a lieu de tenir compte de la durabilité de la paroi (NBN EN 206-1 [1] en NBN EN 1536 [2], NBN EN 1992-1-1 [3])
- les tassements des constructions environnantes faisant suite à l'exécution (décompression du sol, poids des machines, ...) doivent être contrôlés

8.2 Lors de la mise en œuvre

- la deuxième série de pieux (étape 2) est réalisée au moins 4 heures après la première (étape 1). La troisième série de pieux (étape 3) est réalisée au moins 8 heures après la deuxième. Le type de terrain peut nécessiter un autre phasage
- l'attente entre l'exécution des pieux et l'excavation doit être suffisamment longue pour que le béton atteigne la résistance à la compression et la rigidité minimale requise ⁽¹⁾
- le transfert des forces du support horizontal sur la paroi s'effectue toujours à l'aide de poutres de répartition
- la qualité des pieux à tarière continue dépend souvent de l'exécution
- sauf si les pieux ne subissent aucune traction, l'armature doit être installée sur toute leur hauteur (NBN EN 1536 [2])
- un gabarit peut être utilisé pour améliorer la précision de la position des éventuels profilés utilisés comme armature dans les pieux
- les parois qui ne sont pas autostables sont liaisonnées afin de garantir une collaboration entre les pieux.

⁽¹⁾ La pratique montre qu'il est souvent nécessaire de prévoir au moins 10 jours entre l'exécution du rideau de pieux et l'excavation.

9. Variantes

Il n'existe pas de variante pour cette technique.

10. Gestion de la qualité

Tolérances de positionnement des pieux tangents (cf. figure 3) :

- la précision de la position horizontale des pieux (au niveau du sol de surface) est de 25 mm (s'ils sont exécutés avec une poutre de guidage) et de 75 mm (s'ils sont exécutés sans poutre de guidage)
- la précision de la position verticale des pieux est de ± 100 mm (niveau de base des pieux)
- la précision sur l'inclinaison des pieux est de 1,3 %.

Une tolérance supplémentaire de 100 mm est autorisée pour les proéminences des pieux. Dans certains cas (en présence de cavités locales, de grosses pierres dures dans le sol ou dans les couches meubles, p. ex.), les proéminences plus grandes sont inévitables.

Le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les éventuels coûts supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces tolérances (recépage des pieux, p. ex.). Si nécessaire, le cahier des charges peut reprendre des tolérances plus strictes.

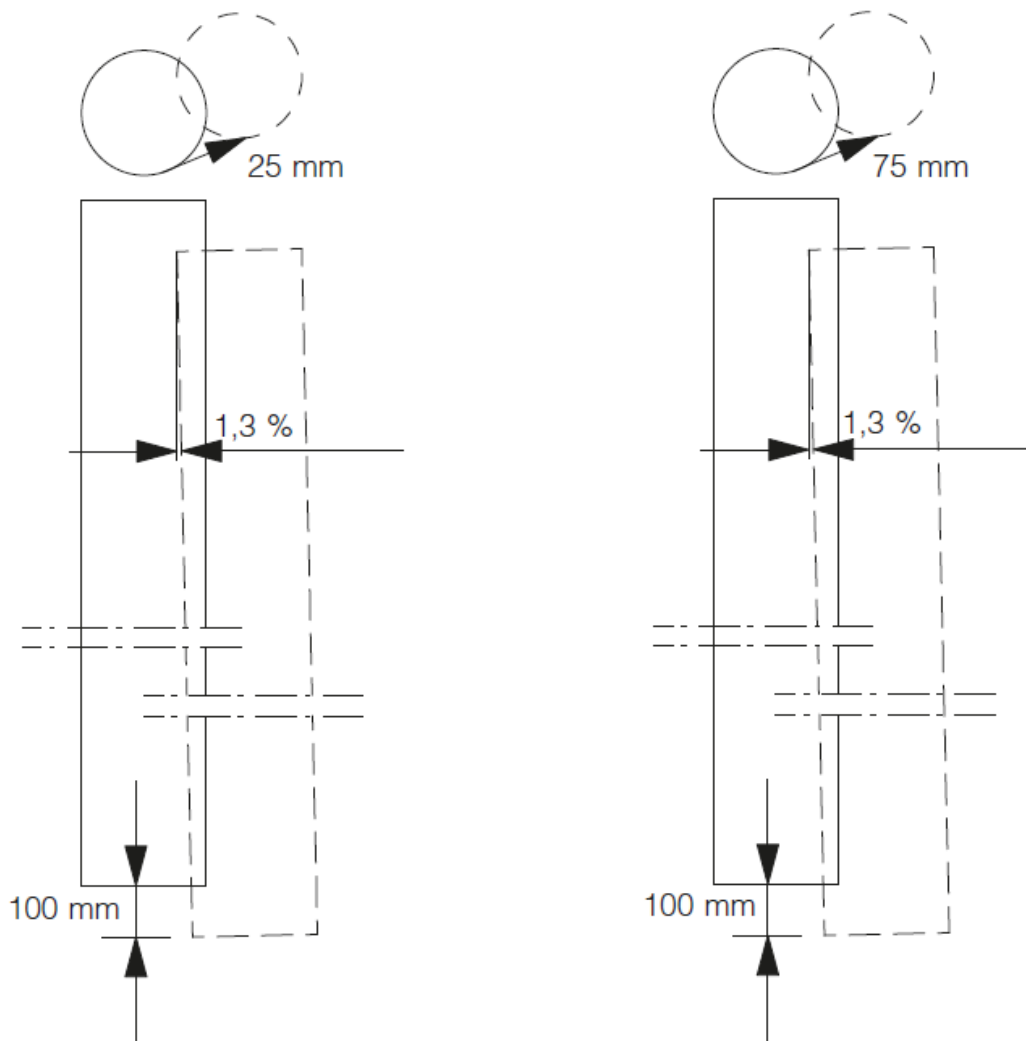


Fig. 3 Tolérances de positionnement des pieux tangents : avec (gauche) et sans poutre de guidage (droite).

11. Liens vers la base de données [TechCom](#)

Bibliographie

1. Bureau de Normalisation
NBN EN 206-1 Béton. Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité. Bruxelles, NBN, 2001.
2. Bureau de Normalisation
NBN EN 1536 Exécution des travaux géotechniques spéciaux. PIEUX FORÉS. Bruxelles, NBN, 2010.
3. Bureau de Normalisation

NBN EN 1992-1-1 Eurocode 2. Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Bruxelles, NBN, 2010.

4. Bureau de Normalisation

NBN EN 1994-1-1 Eurocode 4. Calcul des structures mixtes acier-béton. Partie 1-1 : Règle générale et règles pour les bâtiments - Annexe nationale. Bruxelles, NBN, 2010.

5. De Vos M. et Huybrechts N.

Directives pour l'application de l'Eurocode 7 en Belgique. Partie 1 : Dimensionnement géotechnique à l'état limite ultime de pieux sous charge axiale de compression. Bruxelles, Centre scientifique et technique de la construction, Rapport du CSTC, n°12, 2009.

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC

P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

Infofiche 56.5

Parois de type 'soil mix' de type 1 : parois faites de colonnes

Parution : juillet 2012

L'Infofiche sur les parois de type 'soil mix' constituées de colonnes est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les matériaux et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Le sol en place est mélangé à un liant, mécaniquement et in situ, au moyen d'un malaxeur spécial. Ce procédé permet de constituer des colonnes de type 'soil mix' intersectées de manière à former un mur de soutènement continu (cf. figure 1). Ce système permet également de choisir d'exécuter les colonnes primaires moins profondément que les secondaires (exécution en touches de piano).

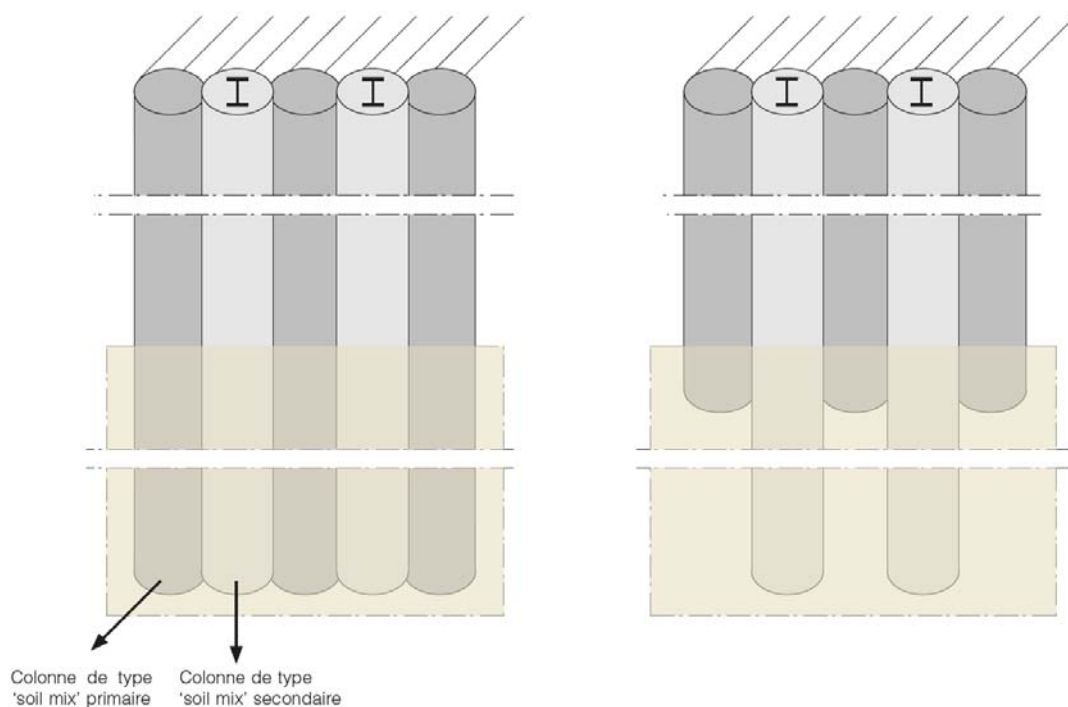


Fig. 1 Parois constituées de colonnes de type 'soil mix' : exécution classique (gauche) et en touches de piano (droite).

2. Exécution : description générale

On commence souvent par installer une poutre de guidage pour indiquer la position des colonnes et guider le malaxeur.

L'exécution se déroule en plusieurs étapes :

- première étape : une première série de colonnes primaires non armées est exécutée suivant la séquence 1 – 5 – 9 – 13 – ...
- une deuxième étape : une deuxième série de colonnes primaires non armées est exécutée suivant la séquence 3 – 7 – 11 – ...
- une troisième étape : les colonnes secondaires armées sont exécutées suivant la séquence 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – ... Les côtés droits et gauches des colonnes primaires sont forés (cf. figure 2). Si la paroi de type 'soil mix' est installée à proximité de constructions sensibles, les colonnes secondaires seront exécutées en deux étapes suivant les séquences 2 – 6 – 10 – ... et 4 – 8 – 12 – ...
- la fouille est ensuite excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal
- si nécessaire, le support horizontal est mis en place (tirants d'ancrage, pieux de traction, ...). Les tirants d'ancrage ou pieux de traction sont placés à hauteur de l'intersection entre une colonne primaire et secondaire
- la fouille est à nouveau excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal supplémentaire ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

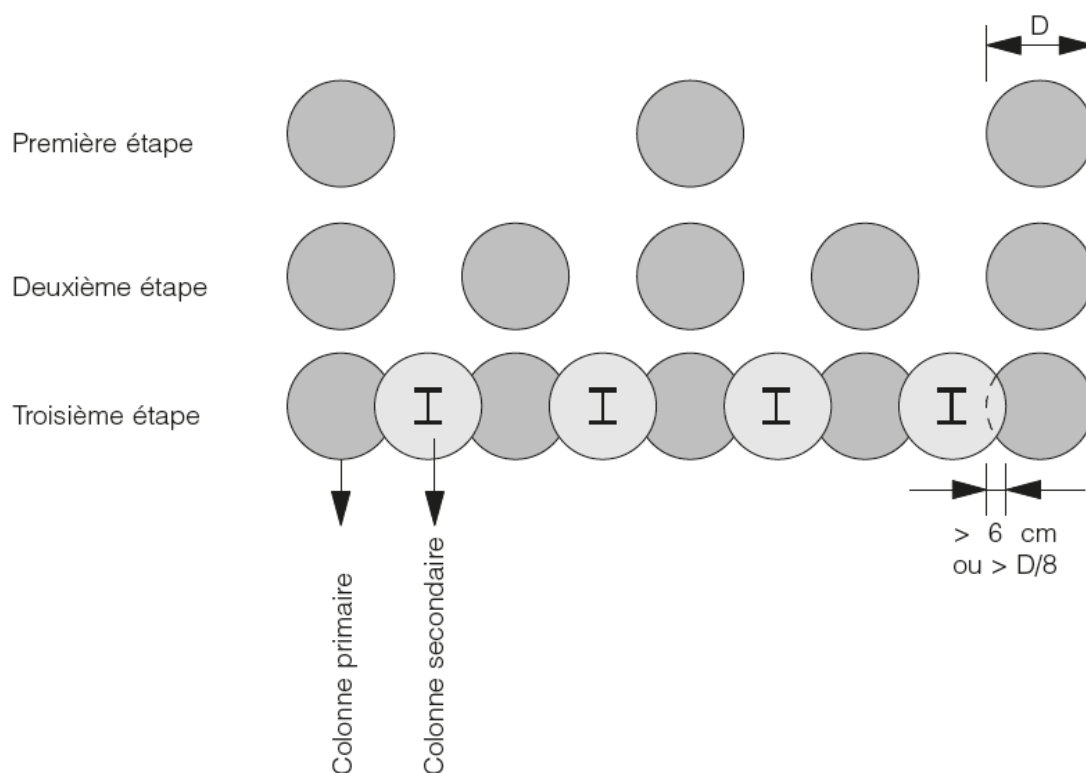


Fig. 2 Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi de type 'soil mix' constituée de colonnes.

3. Matériaux

Le sol est mélangé à un coulis réalisé à base de liant et d'eau (dans une proportion de 0,6 et 1,2). Le liant est composé de ciment (ciment + adjuvants) et éventuellement d'autres adjuvants. La quantité de liant varie généralement entre 250 et 500 kg par m³ de colonne.

Une colonne sur deux est armée de profilés métalliques. En présence de cages d'armature, il convient d'effectuer des essais supplémentaires.

4. Dimensions

Les dimensions caractéristiques des parois de type 'soil mix' sont les suivantes :

- le diamètre d'une colonne varie généralement entre 0,4 et 0,6 m (1,2 m dans certains cas)
- le chevauchement des colonnes doit être supérieur à 6 cm. Si la paroi de type 'soil mix' constitue un silo et/ou revêt une fonction d'étanchéité à l'eau, le chevauchement ne peut être inférieur à 1/8 du diamètre de la colonne (cf. figure 2). Pour ce faire, il convient de tenir compte des tolérances de positionnement
- la profondeur d'exécution est généralement inférieure à 20 m.

5. Capacité portante

En cas de fonction portante, il convient de tenir compte de l'influence du sol en place, de la teneur en liant, des paramètres d'exécution sur la résistance et des paramètres de déformation des matériaux mixés.

Lors du calcul de la portance géotechnique d'une paroi de type 'soil mix', il convient de prendre en compte le facteur de forme, l'effet de groupe et l'influence de l'excavation.

6. Déplacement horizontal

La déformation est un paramètre important. Le terrain en place, la teneur en liant et les paramètres d'exécution influencent en effet la rigidité d'une paroi de type 'soil mix'.

7. Domaine d'application

Les parois de type 'soil mix' peuvent avoir les fonctions suivantes :

- une fonction de retenue de sol temporaire
- une fonction portante verticale. Cette possibilité d'application dépend du type de terrain et/ou de l'armature

- une fonction de retenue d'eau. Ainsi, il convient d'évaluer au préalable les risques liés aux déviations lors de l'installation des colonnes sur cette retenue d'eau. Les fuites éventuelles doivent être colmatées directement
- en cas de fonction permanente, des mesures supplémentaires sont nécessaires.

Lors de l'exécution des parois de type 'soil mix', il convient de tenir compte des recommandations suivantes :

- les possibilités d'application de cette technique dépendent du type de sol en place (cf. tableau)
- l'exécution de parois de type 'soil mix' n'entraîne pas de vibration
- les éventuels obstacles souterrains peuvent poser de gros problèmes. Une évaluation préalable est par conséquent nécessaire
- un rabattement préalable de la nappe phréatique n'est pas requis. En présence d'écoulements d'eau importants, le risque de délavage du matériau mixé doit être étudié.

Tableau Possibilités d'application de la technique du 'soil mixing' selon le type de sol en place (V : applicable dans certains cas, VV : presque toujours applicable et VVV : toujours applicable).

Sable	Limon	Argile molle	Argile raide
VVV	VV	VV	V
Remarque : attention particulière pour l'exécution de la technique du 'soil mixing' dans les couches de gros graviers et les terrains tourbeux.			

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- le principe du calcul géotechnique correspond à celui des parois moulées
- il convient de tenir compte d'une section réduite de la paroi de type 'soil mix' et, en présence d'un mur en touches de piano, du caractère discontinu sous le niveau du fond de fouille, pour en déterminer la rigidité flexionnelle
- le moment maximal à la rupture de la paroi est déterminé par rapport à l'armature présente (généralement des profilés)
- il convient de toujours vérifier que le matériau mixé ait suffisamment de résistance à la compression pour transférer les pressions du sol et éventuellement de l'eau sur les profilés (effet de voûte)
- les tassements des constructions environnantes faisant suite à l'exécution (détente du sol, poids des machines, ...) doivent être contrôlés
- si la paroi de type 'soil mix' forme un silo, un fonctionnement en anneau peut être calculé jusqu'à une profondeur maximale de 100 fois le chevauchement des colonnes.

8.2 Lors de la mise en œuvre

- la qualité du matériau mixé dépend du type de sol en place, de la teneur en liant et des paramètres d'exécution
- au cours de l'exécution, il convient d'appliquer le liant de manière régulière sur la profondeur
- la deuxième série de colonnes primaires (étape 2) est réalisée au moins 6 heures après la première (étape 1)
- lors de l'installation d'une paroi de type 'soil mix', les colonnes secondaires sont réalisées très rapidement après les colonnes primaires. Toutefois, il est nécessaire de patienter au moins 8 heures avant de commencer l'exécution des pieux secondaires. Un autre phasage peut être nécessaire selon le type de terrain
- l'attente entre l'exécution des colonnes et l'excavation doit être suffisamment longue pour que le matériau mixé atteigne la résistance à la compression et la rigidité minimale requise
- le transfert des forces du support horizontal sur la paroi s'effectue à l'aide de poutres de répartition. Un transfert local des forces au moyen, par exemple, d'une plaque d'ancrage est, dans certains cas, possible si la stabilité structurelle de la paroi est garantie
- un gabarit peut être utilisé pour améliorer la précision de la position des profilés lors de la pose de l'armature des colonnes secondaires

9. Variantes

Des machines de forage spécialement adaptées peuvent réaliser deux ou trois colonnes en même temps. Les trois étapes de réalisation sont les mêmes que pour un système de colonnes isolées (cf. figure 3).

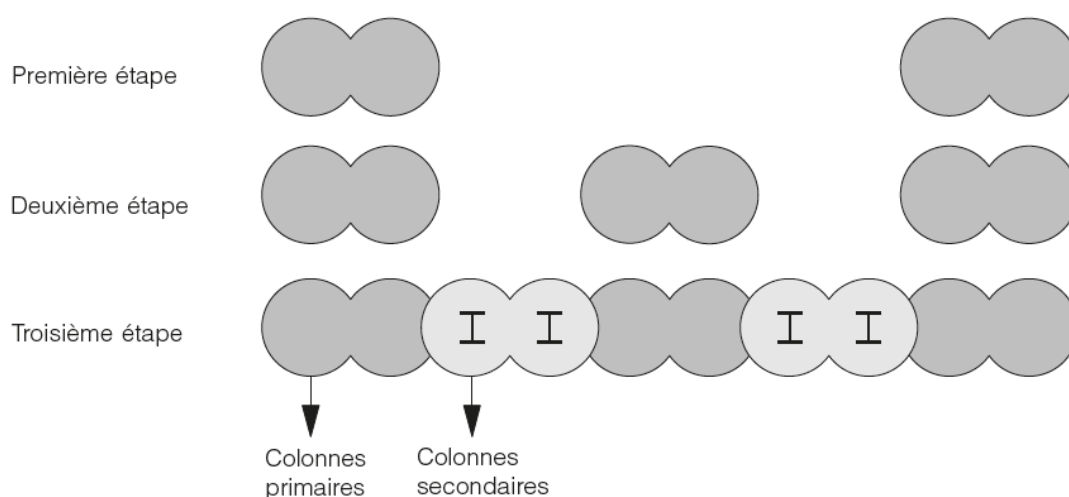


Fig. 3 Vue en plan de l'exécution d'une paroi de type 'soil mix' à l'aide d'un engin de forage pouvant réaliser deux colonnes en même temps.

10. Gestion de la qualité

10.1 Selon la fonction

Le contrôle de la qualité du matériau mixé dépend de la fonction de la paroi de type 'soil mix'.

Paroi de type 'soil mix' en tant qu'ouvrage de retenue de sol temporaire (rigidité paroi = rigidité profilés d'armature) :

Si le matériau mixé n'est utilisé que pour transférer les pressions du sol sur les profilés (rigidité paroi = rigidité armature), il convient de réaliser un carottage/150 m³ de matériau mixé avec un minimum de 6 carottages. Les spécifications pour ces prélèvements sont décrites dans le cahier des charges.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression uniaxiale
- estimations des inclusions < 20 vol %.

Si l'exécutant dispose des résultats des essais effectués sur au moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires, il n'est pas nécessaire de suivre le programme d'essais.

Paroi de type 'soil mix' en tant qu'ouvrage de retenue de sol temporaire (rigidité paroi > rigidité profilés d'armature) :

Si le matériau mixé est utilisé pour transférer les pressions du sol sur les profilés, mais aussi pour contribuer avec les profilés à une plus grande résistance de la paroi, il convient de prélever au moins 1 carotte/150 m³ de matériau mixé avec un minimum de 6 carottes. Les spécifications pour ces prélèvements sont décrites dans le cahier des charges.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression uniaxiale
- module d'élasticité
- estimations des inclusions < 20 vol %.

Si l'exécutant dispose des résultats des essais effectués sur au moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires, il n'est pas nécessaire de suivre le programme d'essais.

Paroi de type 'soil mix' avec une fonction portante et/ou de retenue d'eau temporaire ou permanente :

Il convient de prélever au moins 1 échantillon/75 m³ de matériau mixé avec un minimum de 12 prélèvements. Ces derniers sont décrits dans le cahier des charges.

Le programme d'essais peut être limité à 1 carotte/200 m³ de matériau mixé (minimum 6 carottes), si l'exécutant dispose des résultats des essais effectués sur au

moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression uniaxiale
- module d'élasticité
- estimations des inclusions < 20 vol %.

En présence d'inclusions éventuelles > 1/3 de la largeur de la paroi, l'auteur de projet doit indiquer s'il y a lieu de les traiter immédiatement.

10.2 Selon les tolérances

Tolérances de positionnement d'une paroi de type 'soil mix' (cf. figure 4) :

- la précision de la position horizontale des colonnes (au niveau du sol de surface) est de 25 mm (si elles sont exécutées avec une poutre de guidage) et de 75 mm (si elles ont été exécutées sans poutre de guidage)
- la précision de la position verticale des colonnes est de ± 100 mm (niveau de base des colonnes)
- La précision du niveau supérieur dépend des caractéristiques du terrain et de l'utilisation éventuelle d'une poutre de guidage
- la précision sur l'inclinaison des colonnes est de 1,3 %
- une tolérance supplémentaire de 100 mm est autorisée pour les proéminences locales des colonnes. Dans certains cas (en présence de cavités locales, de grosses pierres dures dans le terrain ou dans les couches meubles, p. ex.), les proéminences plus importantes sont inévitables.

Le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les éventuels coûts supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces dernières (recépage des colonnes, p. ex.).

Si nécessaire, le cahier des charges peut reprendre des tolérances plus strictes. Ainsi, une précision sur l'inclinaison de 0,5 % est souvent exigée en présence d'une paroi de type 'soil mix' constituant un silo et/ou ayant une fonction de retenue d'eau.

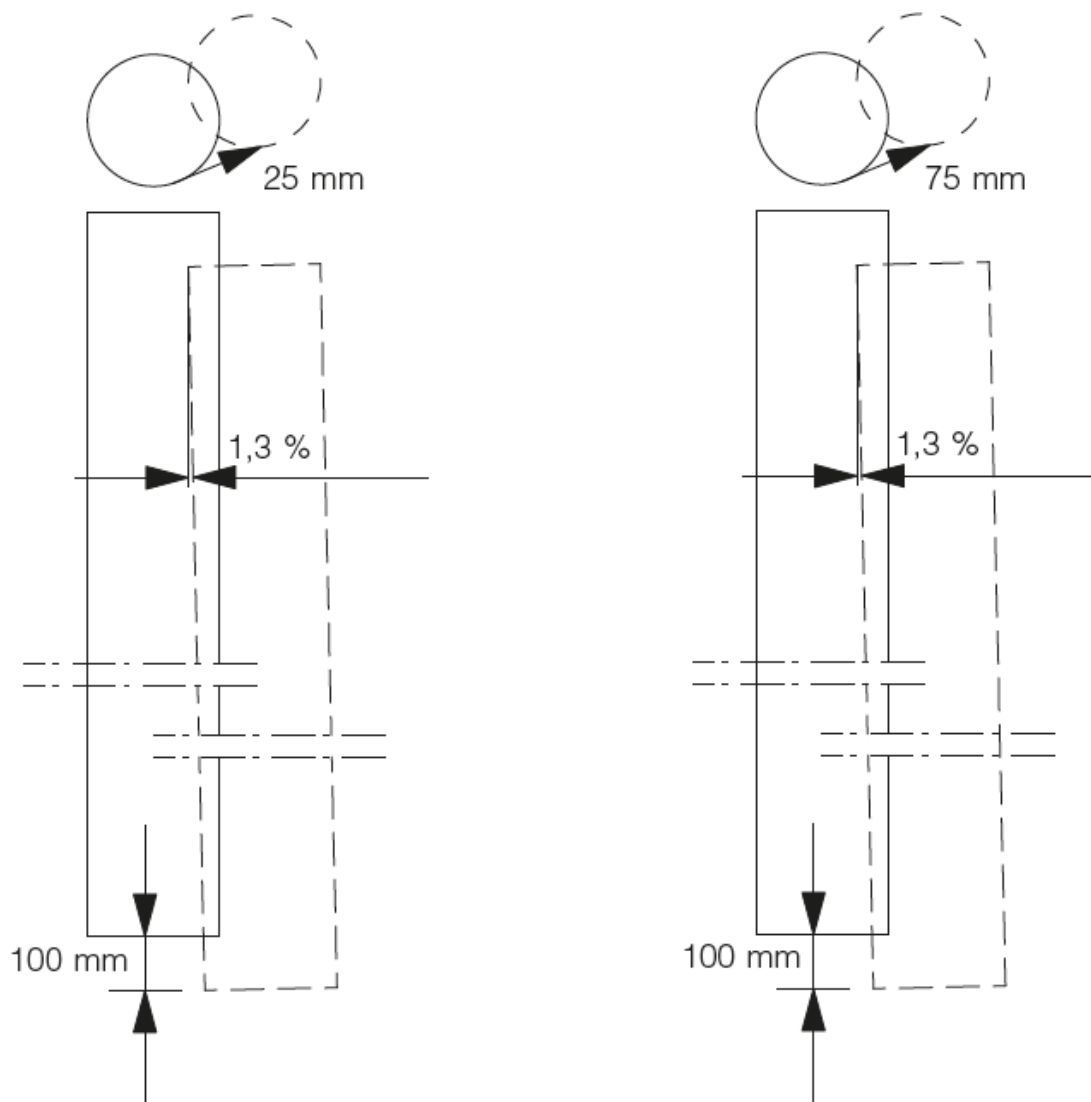


Fig. 4 Tolérances de positionnement des colonnes d'une paroi de type 'soil mix' : avec (gauche) et sans poutre de guidage (droite).

11. Lien vers la base de données [TechCom](#)

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC
P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

L'Infofiche sur les parois de type 'soil mix' constituées de panneaux est essentielle si l'on opte pour ce type de soutènement. Elle s'attarde notamment sur les aspects d'exécution, les matériaux et les dimensions d'application dans ce cadre.

1. Description du système

Le sol en place est mélangé à un liant, mécaniquement et in situ, au moyen d'une fraiseuse. Ce procédé permet de constituer des panneaux de type 'soil mix' intersectés de manière à former un mur de soutènement continu (cf. figure 1).

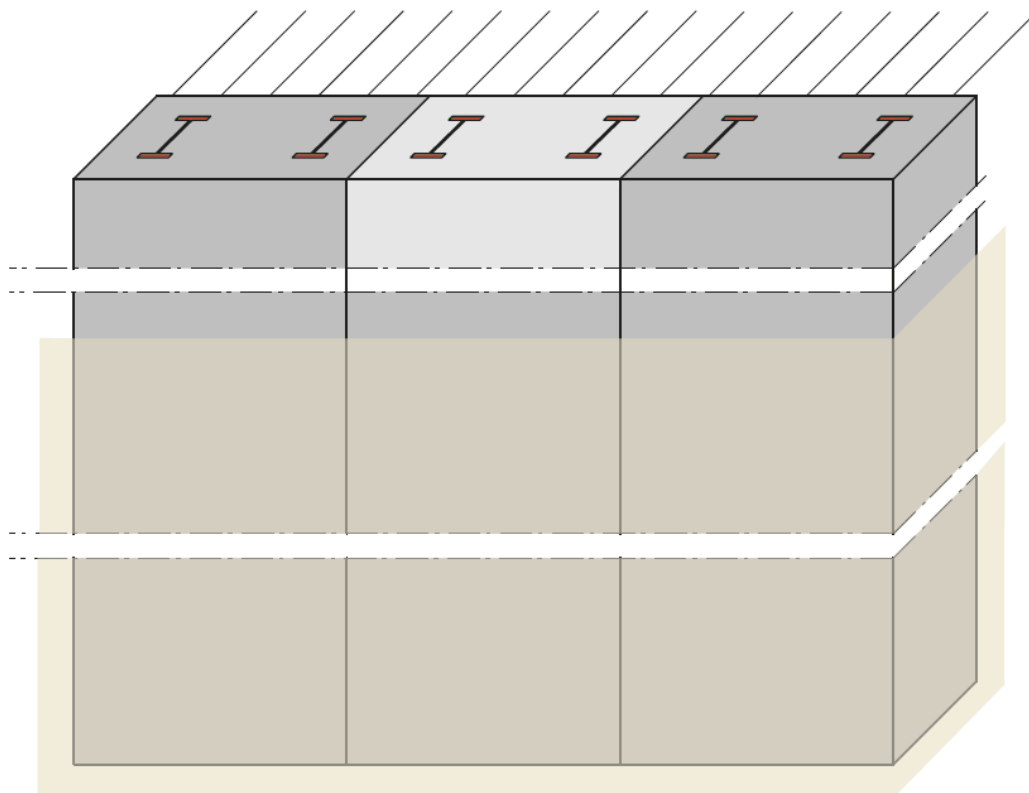


Fig. 1 Paroi constituée de panneaux de type 'soil mix'.

2. Exécution : description générale

On commence éventuellement par installer une poutre de guidage pour indiquer la position des panneaux et guider la fraiseuse.

L'exécution se déroule en plusieurs étapes :

- première étape : les panneaux primaires sont exécutés suivant la séquence 1 – 3 – 5 – 7 – 9 – 11 – ...
- seconde étape : les panneaux secondaires sont exécutés suivant la séquence 2 – 4 – 6 – 8 – 10 – 12 – ... Les côtés droits et gauches des panneaux primaires sont fraisés (cf. figure 2) ⁽¹⁾
- la fouille est ensuite excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal
- si nécessaire, le support horizontal est mis en place (tirants d'ancrage, pieux de traction, étançons, ...)
- la fouille est à nouveau excavée jusqu'au niveau d'installation d'un éventuel support horizontal supplémentaire ou jusqu'au niveau du fond de fouille final.

⁽¹⁾ D'autres phasages peuvent être adoptés selon les charges à reprendre et la situation d'exécution.

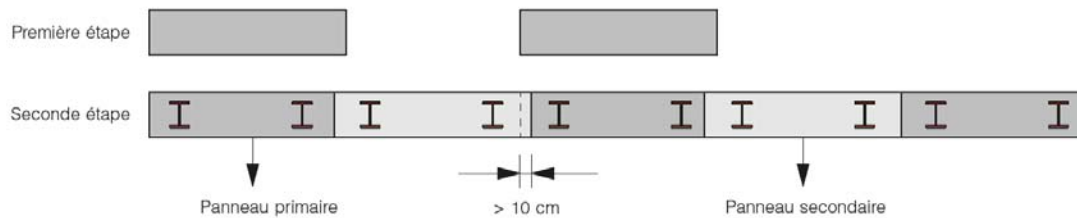


Fig. 2 Vue en plan du processus d'exécution d'une paroi de type 'soil mix' constituée de panneaux.

3. Matériaux

Le sol est mélangé à un coulis réalisé à base de liant et d'eau (dans une proportion de 0,6 et 1,2). Le liant est composé de ciment (ciment + adjuvants) et éventuellement d'autres adjuvants. La quantité de liant varie généralement entre 250 à 500 kg par m³ de panneau.

Chaque panneau est armé d'un, deux ou trois profilés métalliques. En présence de cages d'armature, il convient d'effectuer des essais supplémentaires.

4. Dimensions

Les dimensions caractéristiques des parois de type 'soil mix' sont les suivantes :

- la longueur caractéristique des panneaux varie entre 2,2 et 2,8 m
- le chevauchement des panneaux ne peut être inférieur à 10 cm (cf. figure 2). Pour ce faire, il convient de tenir compte des tolérances de positionnement
- l'épaisseur d'un panneau est généralement de 0,55 m. D'autres épaisseurs sont également possibles
- la profondeur d'exécution est généralement inférieure à 20 m.

5. Capacité portante

En cas de fonction portante, il convient de tenir compte de l'influence du sol en place, de la teneur en liant, des paramètres d'exécution sur la résistance et des paramètres de déformation des matériaux mixés.

Lors du calcul de la portance géotechnique d'une paroi de type 'soil mix', il convient de prendre en compte le facteur de forme et l'influence de l'excavation.

6. Déplacement horizontal

La déformation est un paramètre important. Le terrain en place, la teneur en liant et les paramètres d'exécution influencent en effet la rigidité d'une paroi de type 'soil mix'.

7. Domaine d'application

Les parois de type 'soil mix' peuvent avoir les fonctions suivantes :

- une fonction de retenue de sol temporaire
- une fonction portante verticale. La possibilité de cette application dépend du type de sol et/ou de l'armature
- une fonction de retenue d'eau. Ainsi, il convient d'évaluer préalablement les risques de déviation lors de l'installation des panneaux. Les fuites éventuelles doivent être colmatées directement
- en cas de fonction permanente, des mesures supplémentaires sont nécessaires.

Lors de l'exécution des parois de type 'soil mix', il convient de tenir compte des recommandations suivantes :

- les possibilités d'application de la technique dépendent du type de sol en place (cf. tableau)
- l'exécution de parois de type 'soil mix' n'entraîne pas de vibration
- les éventuels obstacles souterrains peuvent poser de gros problèmes. Une évaluation préalable est par conséquent nécessaire
- un rabattement préalable de la nappe phréatique n'est pas requis. En présence d'écoulements d'eau importants, le risque de délavage du matériau mixé doit d'abord être étudié.

Tableau Possibilités d'application de la technique du 'soil mixing' selon le type de sol en place (V : applicable dans certains cas, VV : presque toujours applicable et VVV : toujours applicable).

Sable	Limon	Argile molle	Argile raide
VVV	VV	VV	V
Remarque : attention particulière pour l'exécution de la technique du 'soil mixing' dans les couches de gros graviers et les terrains tourbeux.			

8. Spécifications

8.1 Lors du calcul

- le principe du calcul géotechnique correspond à celui des parois moulées
- le moment maximal à la rupture de la paroi est déterminé par rapport à l'armature présente (généralement des profilés)
- il convient de toujours vérifier que le matériau mixé ait suffisamment de résistance à la compression pour transférer les pressions du sol et éventuellement de l'eau sur les profilés (effet de voûte)
- les tassements des constructions environnantes faisant suite à l'exécution (détente du sol, poids des machines, ...) doivent être contrôlés
- si la paroi de type 'soil mix' forme un silo, un fonctionnement en anneau peut être calculé jusqu'à une profondeur maximale de 100 fois le chevauchement des panneaux.

8.2 Lors de la mise en œuvre

- la qualité du matériau mixé dépend du type de sol en place, de la teneur en liant et des paramètres d'exécution
- au cours de l'exécution, il convient d'appliquer le liant de manière régulière sur la profondeur
- lors de l'installation d'une paroi de type 'soil mix', les panneaux secondaires sont réalisés très rapidement après les panneaux primaires. Toutefois, il est nécessaire de patienter au moins 8 heures avant de commencer l'exécution des panneaux secondaires. Un autre phasage peut être nécessaire selon le type de terrain
- l'attente entre l'exécution des panneaux et l'excavation doit être suffisamment longue pour que le matériau mixé atteigne la résistance à la compression et la rigidité minimale requise
- le transfert des forces du support horizontal sur la paroi s'effectue à l'aide de poutres de répartition. Un transfert local des forces au moyen, par exemple, d'une plaque d'ancrage est, dans certains cas, possible si la stabilité structurelle de la paroi est garantie
- un gabarit peut être utilisé pour améliorer la précision de la position des profilés lors de la pose de l'armature.

9. Variantes

Il n'existe pas de variante pour cette technique.

10. Gestion de la qualité

10.1 Selon la fonction

Le contrôle de la qualité du matériau mixé dépend de la fonction de la paroi de type 'soil mix'.

Paroi de type 'soil mix' en tant qu'ouvrage de retenue de sol temporaire (rigidité paroi = rigidité profilés d'armature) :

Si le matériau mixé est utilisé exclusivement pour transférer les pressions du sol sur les profilés, il convient de prélever au moins 1 carotte/150 m³ de matériau mixé avec un minimum de 6 carottes. Les spécifications de ces prélèvements sont décrites dans le cahier des charges.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression uniaxiale
- évaluation des inclusions < 20 vol %.

Si l'exécutant dispose déjà des résultats des essais effectués sur au moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires, il n'est pas nécessaire de suivre le programme d'essais.

Paroi de type 'soil mix' en tant qu'ouvrage de retenue de sol temporaire (rigidité paroi > rigidité profilés d'armature) :

Si le matériau mixé est utilisé pour transférer les pressions du sol sur les profilés, mais également pour contribuer avec les profilés à une rigidité plus grande de la paroi, il convient de prélever au moins 1 carotte/150 m³ de matériau mixé avec un minimum de 6 carottes. Les spécifications de ces prélèvements sont décrites dans le cahier des charges.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression uniaxiale
- module d'élasticité
- évaluations des inclusions < 20 vol %.

Si l'exécutant dispose des résultats des essais effectués sur au moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires, il n'est pas nécessaire de suivre le programme d'essais.

Paroi de type 'soil mix' avec une fonction portante et/ou de retenue d'eau temporaire ou permanente :

Il convient de prélever au moins 1 carotte/75 m³ de matériau mixé avec un minimum de 12 carottes. Les spécifications de ces prélèvements sont décrites dans le cahier des charges.

Le programme d'essais peut être limité à 1 carotte/200 m³ de matériau mixé (au moins 6 carottes), si l'exécutant dispose déjà des résultats des essais effectués sur au moins deux sites appliquant le même procédé de 'soil mixing' dans des situations similaires.

Les éléments suivants sont testés :

- résistance en compression
- module d'élasticité
- évaluations des inclusions < 20 vol %.

En présence d'inclusion > 1/3 de la largeur de la paroi, l'auteur de projet doit indiquer s'il y a lieu de les traiter immédiatement.

10.2 Selon les tolérances

Tolérances de positionnement d'une paroi de type 'soil mix' (cf. figure 3) :

- la précision de la position horizontale des panneaux (au niveau du sol de surface) est de 50 mm
- la précision de la position verticale des panneaux est de ± 100 mm (niveau de base des panneaux)
- la précision du niveau supérieur dépend du type de terrain et de l'utilisation éventuelle d'une poutre de guidage
- la précision sur l'inclinaison des panneaux est de 1,3 %
- une tolérance supplémentaire de 100 mm est autorisée pour les proéminences locales des panneaux. Dans certains cas (en présence de cavités locales, de grosses pierres dures dans le sol ou dans les couches meubles, p. ex.), les proéminences plus importantes sont inévitables.

Le cahier des charges doit prendre en compte les tolérances lors de l'implantation des constructions souterraines, ainsi que les éventuels coûts supplémentaires engendrés par un positionnement respectant ces tolérances (recépage de panneaux, p. ex.).

Si nécessaire, le cahier des charges peut reprendre des tolérances plus strictes. Ainsi, une précision sur l'inclinaison de 0,5 % est souvent exigée en présence d'une paroi de type 'soil mix' constituant un silo et/ou ayant une fonction de retenue d'eau.

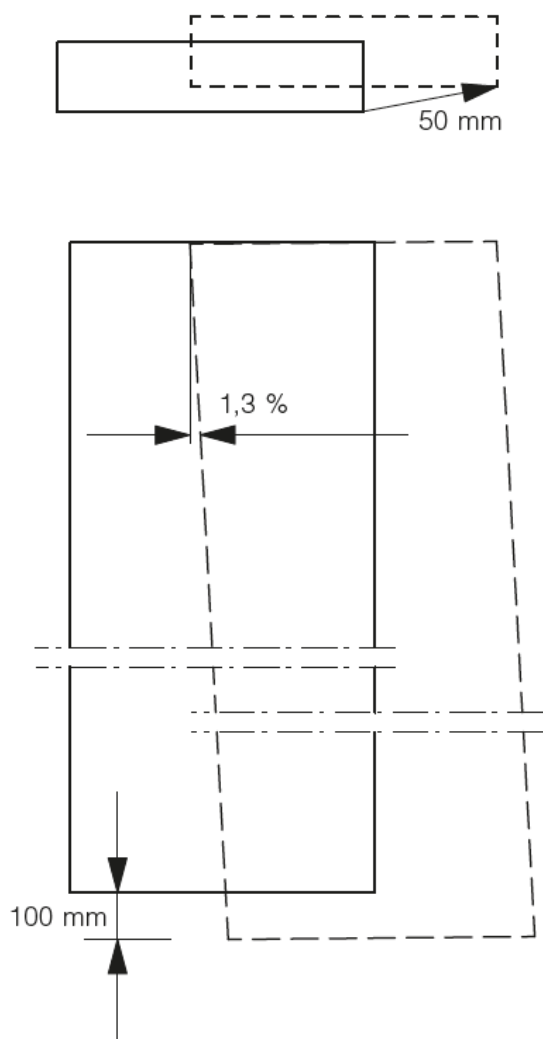


Fig. 3 Tolérances de positionnement des panneaux d'une paroi de type 'soil mix'.

11. Lien vers la base de données [TechCom](#)

N. Huybrechts, ir., chef de la division 'Géotechnique', CSTC
P. Ganne, dr. ir. (ex-CSTC)

La présente Infofiche a été réalisée en étroite collaboration avec l'ABEF (Association belge des entrepreneurs de fondation) et les groupes de travail du CSTC 'Soutènements' et 'Groupe de coordination TIS-SFT' (TIS = Thematische Innovatiestimulering (Stimulation thématique à l'innovation) / SFT = Speciale FunderingsTechnieken (Techniques spéciales de fondation)).

