

Publication Septembre 2023

Responsable de publication :

CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique)

Tél. : +33 (0)1 41 96 90 80

Fax : +33(0) 1 41 96 91 05

Courriel : cfms.secretariat@geotechnique.org

Site internet : www.cfms-sols.org

Correspondance :

INSAVALOR/CFMS

66 boulevard Niels Bohr - CS52132

69603 VILLEURBANNE Cedex

Siège social :

Ecole des Ponts ParisTech

6 - 8 avenue Blaise Pascal

Cité Descartes

Champs sur Marne

77455 Marne-La-Vallée Cedex 2

Copyright :

© CFMS, Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique. En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Editeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

Le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique, ses membres, ses administrateurs ou ses représentants déclinent toute responsabilité découlant d'omissions ou d'erreurs dans les documents qu'il émet et ne peuvent être tenus responsables de quelconque dommage lié à l'utilisation des informations contenues dans ces documents, en ce compris les informations fournies par des tiers, ou à l'impossibilité d'accès au site web ou à son contenu et ses documents, sauf en cas de faute grave ou délibérée de leur part.

La responsabilité du CFMS ne saurait davantage être engagée vis-à-vis des tiers, notamment dans le cas où les œuvres agréées par le Conseil après avis de la Commission Scientifique et Technique, donneraient lieu à des poursuites judiciaires sur le fondement de la loi du 11 Mars 1957 et de tous les autres textes protégeant les œuvres de l'esprit.

Conception graphique / mise en page :

Valérie SCOTTO DI CESARE - Studio Graphique VSDCom

TABLE DES MATIÈRES

5	■	Les membres du Groupe de Travail
6		Le comité de relecture de la Commission Scientifique et Technique du CFMS
7		Avant-propos
8		Références bibliographiques et normatives
9		Termes et définitions
11	■	Chapitre 1 - Etat des lieux de la technique des voiles par passes
15	■	Chapitre 2 - Domaine et limites d'utilisation de la technique - Démarche de conception
16		Chapitre 2.1 - Investigations spécifiques
		Chapitre 2.1.1 - Reconnaissances géologique, hydrogéologique et géotechnique
		Chapitre 2.1.2 - Caractérisation des sols
		Chapitre 2.1.3 - Reconnaissance des avoisinants de la zone d'influence géotechnique (ZIG)
18		Chapitre

35	■	Chapitre 4 - Mode opératoire et dispositions constructives pour les voiles par passes
36		Chapitre 4.1 - Finalisation des études d'exécution et attendus au niveau des plans d'exécution
36		Chapitre 4.2 - Mode opératoire au niveau d'une passe
37		Chapitre 4.3 - Mode opératoire au niveau d'une ceinture
38		Chapitre 4.4 - Mode opératoire du terrassement associé aux voiles par passes
		Chapitre 4.4.1 - Banquettes normales et banquettes inversées
		Chapitre 4.4.2 - Préterrassement
		Chapitre 4.4.3 - Phasage des terrassements
		Chapitre 4.4.4 - Cas d'un arrêt prolongé des travaux
39		Chapitre 4.5 - Dispositions constructives pour les voiles par passes
		Chapitre 4.5.1 - Système de butonnage (bouton + semelle)
		Chapitre 4.5.2 - Système de drainage
		Chapitre 4.5.3 - Cas de la mise en œuvre d'un cuvelage
		Chapitre 4.5.4 - Formulation du béton projeté
		Chapitre 4.5.5 - Systèmes isolants contre les voiles par passes
45	■	Chapitre 5 - Suivi, contrôle et réception des voiles par passes
46		Chapitre 5.1 - Principes fondamentaux d'une procédure de suivi
46		Chapitre 5.2 - Périmètre de la surveillance des voiles par passes et de leur environnement (ZIG)
48		Chapitre 5.3 - Surveillance des voiles par passes et de leur environnement (ZIG)
51	■	Annexes
52		Annexe Chapitre 2-A - Caractérisation de c_{trav} et φ_{trav} à partir d'essais de tenue des terrains
54		Annexe Chapitre 2-B - Sensibilité des avoisinants
		Annexe Chapitre 2-B-1 - Pourquoi une étude de sensibilité ?
		Annexe Chapitre 2-B-2 - Caractérisation des désordres
		Annexe Chapitre 2-B-3 - Définition de la sensibilité
		Annexe Chapitre 2-B-4 - Contenu de l'étude de sensibilité
56		Annexe Chapitre 3-A - Détermination de la contrainte q_{net} des semelles de boutons
58		Annexe Chapitre 4-A - Exemple d'éléments graphiques pour limiter les problèmes de superposition entre les boutons et les éléments de l'infrastructure
60		Annexe Chapitre 4-B - Exemple d'éléments graphiques pour éviter les problèmes de superposition et d'interactions entre les semelles de fondation des boutons des voiles par passes et les fondations de l'ouvrage
62		Annexe Chapitre 4-C - Exemple de phasage avec 2 ceintures
69		Annexe Chapitre 4-D - Exemple de phasage avec 4 ceintures
78		Annexe Chapitre 4-E - Principales mesures de prévention en lien avec les travaux de voiles par passes
80		Annexe Chapitre 5-A - Exemple de plan de contrôle de l'entreprise de voiles par passes
82		Annexe Chapitre 5-B - Exemple de fiche d'autocontrôle de l'entreprise de voiles par passes

LES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

M.</

M.	ROSA Bruno	INFRANEO
M.	SCHMITT Laurent	GEOTECHNIQUE APPLIQUEE ILE DE FRANCE
M.	SIMONNOT Thomas	ACCOTEC
M.	VETROFF Pierre	FRANKI FONDATION
Mme	VIGNEY Anne Marie	Anne Marie VIGNEY
M.	WRIGHT Hervé	TECHNOSOL
M.	ZIDOUH Karim	ARCADIS

LE COMITÉ DE RELECTURE DE LA COMMISSION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU CFMS

M.	CAHN Martin	TERRASOL
Mme	PAVEL Laetitia	ARCADIS
Mme	PERLO Sabrina	CEREMA

AVANT-PROPOS

Lorsque j'ai fait de l'analyse de sinistres géotechniques mon métier à plein temps, il y a plus de trente ans, les dossiers en rapport avec la conception et la réalisation de voiles par passes ont rapidement, et très significativement, alimenté mon fonds de commerce.

C'étaient des passes trop larges ou trop hautes, voire cumulant les deux inconvénients ; des ouvertures de panneaux le vendredi après-midi, que l'on s'étonnait de retrouver éboulés le lundi matin ; des bétonnages attendant l'arrivée de la toupie de béton qui n'avait pas été commandée ; des boutons fichés sans semelles dans la gadoue, ou calés sans matage ; une absence de suivi géotechnique en cours de travaux, qui faisait rater les transitions lenticulaires de sols pulvérulents au sein d'une matrice cohérente.

C'étaient aussi une maîtrise aléatoire de la nappe et de ses variations, avec de frustes moyens de suivi piézométrique ; des moyens de rabattement non moins sommaires, dans des souilles de fonds de fouilles, sans considération pour le comportement des avoisinants ; ou encore le recours à un procédé d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques (GSB) très en vogue, qui, du fait même de la multiplicité des points singuliers que sont les appuis de boutons, se trouvait exposé à un risque accru de dysfonctionnement futur.

C'étaient enfin des désordres dans l'environnement immédiat du chantier, avec des analyses structurelles des avoisinants inexistantes, ou réduites à quelques observations visuelles de façade depuis la rue ; des définitions forfaitaires de déplacement admissible du bâti voisin, le plus souvent calées à 10 mm, valeur totémique dans le système décimal, mais souvent inadmissible pour des structures anciennes, à planchers de bois, surtout quand les engravures de poutres se pratiquaient dans le pignon le plus exposé aux mouvements.

Néanmoins, avec la professionnalisation croissante des entreprises spécialisées et l'exploitation de leur retour d'expérience, j'ai progressivement observé une légère tendance à la diminution de la sinistralité s'attachant à cette technique.

Il demeure qu'un besoin pressant s'est manifesté en matière de règles de l'art, afin de substituer à l'empirisme sinistrogène d'origine, des recommandations d'autant plus complètes qu'elles s'adressent à une technique davantage complexe dans sa conception géotechnique que l'on pourrait le penser de prime abord.

En ce sens, les recommandations qui suivent, par leurs précision et caractère exhaustif, constituent un progrès remarquable. Qu'elles soient édictées par le CFMS ne fait que confirmer le rôle de géotechnicienne fidèlement assumé par le comité.

Daniel FAISANTIEU

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET NORMATIVES

• NF P94-500	Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications
• NF EN 206+A2/CN	Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national
• Fascicule 4	Formulation des bétons projetés du comité technique de l'ASQUAPRO
• NF EN 1992-1-1	Calcul des structures en béton
• NF EN 1993-1-1	Calcul des structures en acier
• NF EN 1995-1-1	Calcul des structures en bois
• NF EN 1997-1	Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales
• NF P94-261	Justification des Fondations superficielles
• NF P94-282	Justification des Ecrans de soutènement
• NF EN 1997-2	Calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais
• NF EN ISO 22475-1	Reconnaissance et essais géotechniques - Méthodes de prélèvement et mesurages piézométriques
• NF EN ISO 22476-1 à 15	Reconnaissance et essais géotechniques
• NF EN 14487	Norme d'exécution du béton projeté
• NF DTU 14.1	Travaux de cuvelage
• GT16R2F1	Recommandations AFTES sur la prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains
• XP CEN/TS 17440/NA	Évaluation et rénovation des structures existantes
• Recommandations du CFMS et du SFEG pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes	
• « Drainage vertical du sol au contact d'un mur banché en d'un mur en béton projeté » - K Sardain, P Gendrin - 10 ^{ème} rencontre géosynthétiques - 24/26 mars 2015 - La Rochelle	

TERMES ET DÉFINITIONS

Avoisinants selon la norme NF P94-500 : Bâtiments, ouvrages, aménagements de terrains ou biens, situés dans la zone d'influence géotechnique de l'opération de construction.

Barbacanes (voir Figure 4-8) : Orifices ménagés dans les ouvrages de soutènement disposés de façon régulière pour annuler la pression hydrostatique derrière l'ouvrage jusqu'à la cote de la rangée de barbacanes. Cette poussée hydrostatique peut être due à des nappes perchées, des nappes peu productives ou des eaux pluviales piégées accidentellement derrière l'ouvrage.

Bêche (voir Chapitre 3.3.5) : Semelle en béton armé enterrée à la base du mur de soutènement sous le fond de fouille, destinée à mobiliser la butée et la portance provisoire ou définitive du voile. Elle contribue à stabiliser le pied du voile.

Blindage : Ouvrage provisoire ou définitif destiné à éviter les éboulements et effondrements du front de taille.

Passe : Panneau de terrassement, caractérisé par sa largeur et sa hauteur.

Phase définitive chantier ou phase fond de fouille : Phase qui correspond à la fin des travaux de l'entreprise de voile par passes.

Semelle d'un bouton : Fondation superficielle en béton armé mobilisant la réaction du sol usuellement sur un plan incliné. Pour cette raison, elle est préfabriquée ou elle est façonnée en place par un béton projeté. Elle peut également être coulée en place (dans ce cas le béton remplit l'intégralité de la fouille). Dans tous les cas, les fouilles de semelles sont remblayées jusqu'au niveau du fond de fouille général.

Voile par passes alternées selon le §3.1.31 de la norme NF P94-282 :

« Ouvrage de soutènement sans ou avec très peu de fiche, exécuté par passes hors nappe par plots de faible surface. La stabilité de chacun des plots en chacune des phases provisoires est assurée par l'un des mécanismes ou systèmes suivants : par l'effet de voûte du terrain qui doit permettre de reporter les efforts de poussée sur les plots adjacents (qui doivent prendre en compte les poussées complémentaires correspondantes) ou sur le fond de fouille, par des appuis, par des risbermes, par des banquettes, etc. Pendant chacune de ces phases, il convient de vérifier que les efforts induits par les effets de voûte sont équilibrés en termes de résistance et de déformation (Sections B.2.6 et B.3.6) par les éléments (boutons et leur massif d'appui, risbermes, etc.) assurant la stabilité du voile. La stabilité en phase finale est justifiée par des appuis répartis sur plusieurs niveaux. Les actions qui s'appliquent sur ces ouvrages doivent être calculées selon les principes du présent document. »

Le groupe de travail complète/précise cette définition :

- Par « voile », on entend un ouvrage en béton armé, **réalisé en descendant par ceintures horizontales successives**, mis en œuvre le plus souvent par la technique du béton projeté. Les présentes recommandations ne traitent notamment pas les cas des parois en puits ou tranchées blindées ;
- Par « fiche », on entend la bêche. Mécaniquement, la bêche peut permettre le développement d'un terme de butée ;
- Par « hors nappe », on entend l'absence de nappe naturelle ou le recours en phase exécution à un dispositif de rabattement provisoire ;
- Par « appuis », on entend les boutons inclinés et/ou horizontaux. En tant qu'appuis, les présentes recommandations ne traitent pas le cas des tirants d'ancrage et des clous ;
- Par « effet de voûte », on entend un report des charges entre ceintures (reports verticaux) voire entre passes adjacentes (reports horizontaux). Ces effets voûte se développent sur de courtes périodes (dans la journée) ;
- **Les passes sont réputées alternées par recouplement de talus et/ou banquettes inversées.** Cependant, elles pourront être successives. Dans ce cas, les présentes recommandations s'appliquent, dès lors que le phasage est suffisamment décrit pour identifier les mécanismes de report des charges.

Zone d'Influence Géotechnique selon le §3.1.21 de la norme NF P94-500 : Volume de terrain au sein duquel il y a interaction entre d'une part l'ouvrage ou l'aménagement de terrain (du fait de sa réalisation et de son exploitation) et d'autre part, l'environnement (sols, ouvrages, aménagements de terrains ou biens environnants). La forme et l'extension de cette ZIG sont spécifiques à chaque site et à chaque ouvrage ou aménagement de terrain.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES LIEUX DE LA TECHNIQUE DES VOILES PAR PASSES

Les cercles de type C1 et C2 sont définis au Chapitre 3.3.2 (voir Figure 3-3).

Au niveau de la Figure 2-2, les deux calculs sont menés avec une approche dite « traditionnelle » où tous les facteurs partiels valent 1,0.

La stabilité générale n'est ainsi pas justifiée :
 $\Gamma_{min} = 1,21 (< 1,3)$

Par ailleurs, dans le cadre de cette illustration, le facteur de sécurité est plus faible pour les cercles de type C1 que pour les cercles de type C2.

2.4.3 DIMENSIONS LIMITES DES PASSES

Il appartient au géotechnicien intervenant en phase conception de définir les dimensions limites des passes (hauteur H et largeur B).

Ces valeurs sont confirmées après la réalisation d'essais de tenue de la paroi.

Néanmoins, pour permettre le recépage ultérieur des passes dans des conditions ergonomiques acceptables et pour réduire voire supprimer le risque de chute avec dénivellation, la hauteur H de toutes les ouvertures frontales des passes est limitée à 1,5 m¹⁰.

Afin de prévenir les risques de troubles musculo-squelettiques pour les intervenants, la largeur B de toutes les ouvertures frontales des passes est limitée à 4 m.

2.4.4 DÉPLACEMENTS

La méthodologie du voile par passes s'accompagne de déplacements qu'il est difficile d'évaluer par le calcul en raison de la multiplicité et de la complexité des phases.

Les déplacements horizontaux régulièrement observés au niveau des voiles par passes sont de l'ordre de 2 à 4 cm.

En parallèle, l'étude de sensibilité des avoisinants a pour objectif de définir leurs déplacements admissibles. Si les déplacements admissibles sont compatibles avec la technique des voiles par passes, ces déplacements doivent être contractualisés.

À partir de ces valeurs de déplacements, il convient de définir les seuils suivants au niveau des voiles de soutènement **et** au niveau des avoisinants :

- Seuils d'alerte dont l'atteinte implique *a minima* :
 - > Une augmentation de la fréquence des mesures ;
 - > Un approvisionnement en butons complémentaires ;
 - > La conservation (voire la constitution) d'un stock de terre en vue d'un éventuel remblayage ;
 - > L'adaptation de la méthodologie de mise en œuvre des voiles par passes (réduction des dimensions des passes et/ou compléments de butonnage) ;
- Seuils d'arrêt des travaux de voiles par passes prévus **et** de mise en sécurité (butonnage et remblayage).

Si les conditions géotechniques et/ou la sensibilité des avoisinants requièrent une maîtrise plus contraignante des déplacements, il sera nécessaire de recourir à d'autres techniques de soutènement appropriées.

¹⁰ La réalisation d'une passe sous une section achevée d'un voile contre terre nécessite de recéper ce dernier à sa base pour assurer une jointure propre et une reprise de ferrailage. Cette opération se fait manuellement au moyen d'un marteau piqueur après avoir terrassé. Afin de prévenir les TMS et d'améliorer les conditions de travail des salariés, la hauteur de terrassement des passes doit permettre cette intervention dans des postures non contraignantes. De ce fait, il convient de la limiter à 1,50 m. La mise

4.5.3 CAS DE LA MISE EN ŒUVRE D'UN CUVELAGE

La mise en place d'un revêtement d'étanchéité par l'extérieur n'est pas recommandée pour les raisons suivantes :

- Endommagements liés à la projection du béton ;
- Justification de l'équilibre vertical du voile.

Les voiles peuvent servir de support au revêtement d'imperméabilisation côté intérieur (avec retours nécessaires) qui est mis en œuvre après la construction de l'infrastructure et la dépose complète du système de butonnage. Les dispositions associées sont détaillées au §5.5.3 de la partie CCT de la norme NF DTU 14.1 (version 2020). Dans ce cas, les reprises de bétonnage des voiles par passes sont considérées comme des liaisons nécessitant un traitement particulier (LMTP) au sens de la norme NF DTU 14.1. Il en est de même en cas de cuvelage à structure relativement étanche.

4.5.4 FORMULATION DU BÉTON PROJETÉ

Le principe de la projection de béton par voie sèche implique un ajout d'eau à la lance.

Le paragraphe NA 7.5 de la norme NF EN 206+A2/CN précise qu'en France tout ajout d'eau sur le chantier est interdit.

Par conséquent, il n'est pas possible d'appliquer strictement la norme NF EN 206+A2/CN, en particulier pour ce qui concerne les classes d'exposition du béton.

Par référence au Fascicule 4 du comité technique ASQUAPRO (Association pour la QUALité de la PROjection des bétons), la formulation proposée par l'entreprise de voiles par passes doit prendre en compte les points suivants :

- Nature, dosage et classe de résistance du ciment utilisé ;
- Diamètre maximal et fuseau granulométrique des granulats utilisés ;
- Maîtrise de l'apport en eau à la lance.

Pour déterminer la formule du béton, il est également possible de prendre en compte les préconisations du Fascicule FD P18-480 (Béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle).

En classe d'exposition XA, il peut également être utile d'augmenter l'enrobage des armatures côté terre.

4.5.5 SYSTÈMES ISOLANTS CONTRE LES VOILES PAR PASSES

Pour être efficaces, les systèmes isolants (thermique et/ou acoustique) contre terre doivent être posés de façon continue sur tout ou partie de la hauteur du voile par passes.

Cependant, leur mise en œuvre n'est pas recommandée pour les raisons suivantes :

- Endommagements liés à la projection du béton ;
- Équilibre vertical du voile ;
- Non-comblement des hors profils lors du terrassement.

