

RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION, LE DIMENSIONNEMENT, L'EXÉCUTION ET LE CONTRÔLE DE LA TECHNIQUE DES VOILES PAR PASSES



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 2.2 - Analyse des risques spécifiques
		Chapitre 2.2.1 - Présence d'eau impactant le soutènement ou ses appuis
		Chapitre 2.2.2 - Présence de sables
		Chapitre 2.2.3 - Présence d'argiles avec un indice de plasticité élevé ($IP > 20$) sous les fonds de fouille
		Chapitre 2.2.4 - Ouvrages avoisinants (ZIG)
		Chapitre 2.2.5 - Charges liées aux travaux
		Chapitre 2.2.6 - Faisabilité du butonnage provisoire
		Chapitre 2.2.7 - Le voile, les poussées sur le voile & la faisabilité des semelles de butons
		Chapitre 2.2.8 - Synthèse de la revue des risques spécifiques
20		Chapitre 2.3 - Hypothèses géotechniques appropriées à la justification
		Chapitre 2.3.1 - Modèle géotechnique
		Chapitre 2.3.2 - Conditions hydrogéologiques
		Chapitre 2.3.3 - Hypothèses de justifications des semelles de butons
21		Chapitre 2.4 - Dimensionnement en phase projet
		Chapitre 2.4.1 - Evaluation du niveau de sollicitations en phase transitoire et définitive
		Chapitre 2.4.2 - Justification de la stabilité GEO
		Chapitre 2.4.3 - Dimensions limites des passes
		Chapitre 2.4.4 - Déplacements
25	■	Chapitre 3 - Etudes d'exécution des voiles par passes
26		Chapitre 3.1 - Données d'entrées nécessaires / Interfaces entre intervenants
27		Chapitre 3.2 - Méthodes de calcul
28		Chapitre 3.3 - Vérifications
		Chapitre 3.3.1 - Poussée des terres
		Chapitre 3.3.2 - Stabilité externe générale des voiles
		Chapitre 3.3.3 - Soulèvement des voiles
		Chapitre 3.3.4 - Déplacements des voiles
		Chapitre 3.3.5 - Prise en compte de la bêche
		Chapitre 3.3.6 - Calcul des semelles des butons
		Chapitre 3.3.7 - Calcul des butons horizontaux et/ou inclinés
		Chapitre 3.3.8 - Dispositions pour les corbeaux
		Chapitre 3.3.9 - Calcul du voile

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 (buton + 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 butons
58		Annexe Chapitre 4-A - Exemple d'éléments graphiques pour limiter les problèmes de superposition entre les butons 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 butons 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.	AGUADO Pascal	GEOTEC	Président du Groupe de Travail
M.	ANTOINE Frédéric	GEOLIA	
M.	BATS William	GEOLIA	
Mme	BORIE Nathalie	APAVE	
M.	BOUSQUET-JACQ Philippe	CPA EXPERTS	
M.	CAPORALI Pascal	SOLER	
M.	CARPINTEIRO Luis	GINGER CEBTP	
M.	CAYZAC Benoît	BOUYGUES CONSTRUCTION	Animateur du Sous-Groupe 3
M.	COLLIGNON Frédéric †	BTI	
M.	CORLIER Vincent	CRAMIF	
M.	COULOUMIES Philippe	FAYAT BATIMENT	
M.	CUIRA Fahd	TERRASOL	
M.	DA SILVA Georges	VDSTP	
M.	DARRAS Vivien	CPA EXPERTS	Animateur du Sous-Groupe 1
M.	DE BREBISSON Eric	EdB CONSEIL	
M.	DEVANNE Samuel	GINGER CEBTP	
M.	DUCA Valentin	SFB	
M.	FINIASZ Arnaud	FONDASOL	
M.	FOURNIER Jean-Baptiste	AZ BTP	
M.	GARCIA Christian	SOCABAT	
M.	GEISLER Jean	STRUCTURES GEOTECHNICS	Animateur du Sous-Groupe 2
M.	GIRARDI Patrick †	NGE FONDATIONS	
M.	GHIT Youcef	ATLAS GEOTECHNIQUE	
M.	GLENAT Jérôme	BUREAU VERITAS CONSTRUCTION	
M.	GOURRIN Gaël	SOCOTEC CONSTRUCTION	
M.	HUBER Jean-François	CRAMIF	
M.	JORGE David	3C EXPERTISES	
M.	LEBEAUD Régis	SOLETANCHE BACHY FONDATIONS SPECIALES	
M.	LEGE Laurent	CRAMIF	
M.	LI Qinghui	SMTF	
Mme	LUCAS Myriam	SOCABAT	
M.	MOUSSELON Bertrand	CREA	
M.	NAYRAND Nicolas	BUREAU VERITAS CONSTRUCTION	Animateur du Groupe de Travail et du Sous-Groupe 5
M.	NGUYEN Khoa Van	TERRASOL	
M.	NIBEL Dominique	BOTTE FONDATIONS	
Mme	OSMANI Evelyne	EIFFAGE	
Mme	PIUMATTI Silvia	FRANKI FONDATION	
M.	RAKOTONINDRIANA Julio	GEOLIA	
M.	REBOUL Michaël	TECHNOSOL	
M.	RIVAGE Laurent	GINGER	
M.	ROMEO Rocco	SFB	

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 butons 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 butons, 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 vigie 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.

Butonnage « définitif » (voir Figures 4-2, 4-6 et Annexes 4-A à 4-D) : Butonnage laissé en place par l'entreprise de voiles par passes à la fin de ses travaux. C'est le cas du butonnage d'angle, du butonnage traversant et du butonnage fondé sous le niveau du fond de fouille.

Butonnage « provisoire » (voir Figure 4-2 et Annexes 4-C et 4-D) : Butonnage avec semelle de fondation, mis en place par l'entreprise de voiles par passes dans les phases intermédiaires.

Calage : Dispositif permettant de maintenir en place le ferrailage pendant la projection du béton.

Caractère transitoire de la cohésion apparente² : la norme NF P94-282 indique en Note 3 du §J2.1.2 que « pour des sols soumis à des sollicitations monotones croissantes ou décroissantes, et pour des déformations limitées, en général, les paramètres de cisaillement drainé retenus sont ceux du domaine normalement consolidé.

Dans ce cas, lorsqu'on considère une cohésion non nulle il est prudent de borner sa valeur à 5 kPa ou 10 kPa. Il est toutefois admis, pour les situations de projet transitoires, de considérer la cohésion « mesurée » dans les terrains où une cohésion en place élevée existe (due par exemple à une cimentation entre grains). » La cohésion disponible pour le dimensionnement d'un voile par passes, **après justification**, pourra être par exemple tout ou partie de :

- La cohésion drainée c' et l'angle φ' d'un sol surconsolidé mise en évidence par des essais triaxiaux CU + U ou CD ;
- La cohésion c_{u0} à $\sigma'_c = 0$ et $\varphi_u = \text{atan}(\lambda c_u)$ mis en évidence par des essais triaxiaux UU ou CU + U dans les diagrammes en contraintes totales ou non drainées ;
- La cohésion apparente déduite par rétro analyse d'un essai de tenue de terrains (couple c et φ) ou obtenue dans le cadre d'une expérience comparable (voir Chapitre 2.1.2.2 et Annexe 2-A).

Pour recouvrir toutes ces acceptations, il a été retenu les dénominations de c_{trav} et φ_{trav} pour les paramètres de calcul en phases transitoires.

Ceinture : Partie du voile réalisée par une succession de passes horizontales exécutées à un même niveau.

Cohésion apparente³ : Cohésion constatée in-situ.

Cohésion effective (c') : Cohésion inter-granulaire mesurée en laboratoire par des essais normalisés.

Cohésion non drainée (c_u) : Cohésion mesurée en laboratoire par des essais normalisés, en conditions non drainées et en contraintes totales.

Cohésion travaux⁴ (c_{trav}) : Valeur retenue pour le calcul lors des phases travaux.

Ouvrage provisoire : Ouvrages utiles ou nécessaires à la réalisation d'un voile par passes et qui font l'objet d'une conception puis d'un dimensionnement. C'est le cas des butons intermédiaires, des butons « définitifs » au fond de fouille, des corbeaux (voir Chapitre 3.3.8), des barbacanes, des dispositifs d'épuisement ou de rabattement, des semelles de buton, des talus, des bèches.

² Ces notions de paramètres de résistance travaux, telles que définies dans les présentes recommandations, ne doivent pas être directement généralisées à d'autres ouvrages géotechniques.

³ Notion non normalisée.

⁴ Notion non normalisée. Il en est de même pour l'angle de frottement φ_{trav} , associé à c_{trav} .

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 buton : 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 (butons 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 blindés ;
- 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 butons 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

1 ÉTAT DES LIEUX DE LA TECHNIQUE DES VOILES PAR PASSES

Les voiles par passes alternées sont des ouvrages de soutènement dont la technique d'exécution s'est démocratisée au fil des années. Empirique dès le début, la méthodologie de réalisation s'est appuyée sur l'expérience accumulée depuis presque cinquante ans pour connaître son succès actuel. Son développement continu nécessite cependant une harmonisation et une définition de son cadre d'application.

L'origine des voiles par passes est imprécise. Dans le milieu des années soixante-dix, les entreprises de gros œuvre ont commencé à développer cette technique en région parisienne, dans le cadre de projets de bâtiment. Ces derniers comportaient principalement un seul niveau de sous-sol qui se situait généralement au-dessus de la nappe phréatique.

A ses débuts, les voiles étaient réalisés en béton banché. Progressivement, la mise en œuvre de béton projeté par voie sèche s'est développée et s'impose aujourd'hui sur la plupart des chantiers (voir Chapitre 4.5.4).

D'une technique francilienne avec un niveau de sous-sol hors nappe, la technique des voiles par passes alternées est aujourd'hui employée sur un large éventail de terrains et des profondeurs plus importantes. La technique s'utilise à présent dans plusieurs villes et régions de province : Reims, Rennes, Lille, Marseille, Montpellier... On la retrouve la plupart du temps en solution de base des marchés de travaux.

Le marché francilien compte aujourd'hui une vingtaine d'entreprises qui réalise en moyenne une cinquantaine de chantiers et environ 30 000 à 100 000 m² de paroi à l'année. Le domaine d'utilisation des voiles par passes est quasi exclusivement celui du bâtiment. Ces entreprises qui ont entre 5 et 30 ans d'existence sont majoritairement de petite taille et emploient généralement entre 25 et 50 personnes et n'ont pas toujours un bureau d'études au sein de leur structure.

Pour ces dernières, le chantier moyen en région parisienne comporte environ 1 000 m² de paroi sur 2 niveaux de sous-sol, pour un budget moyen hors terrassement, de 200 000 à 250 000 € sur la période 2012-2020. Les chantiers qui comprennent 3 niveaux de sous-sols sont plus rares et exigent une grande maîtrise de la part des entreprises qui les réalisent.

La part des chantiers qui a recours à un rabattement de nappe reste minoritaire. Seul un quart environ des projets est réalisé sous nappe rabattue.

La présence d'avoisinants (bâtiments, réseaux, voiries...) est également une constante des chantiers recensés pour élaborer ces recommandations. Lors de la réalisation de soutènements contre terre, l'absence de déplacement est irréaliste. Cela ne relève d'aucun aléa mais est inhérent à la technique. L'adaptation des méthodologies de réalisation, la caractérisation du comportement et la maîtrise des déformations des voiles par passes sont devenues une nécessité dans un environnement urbain dense.

Cette technique de soutènement n'est pas exempte de tout reproche. Elle fait l'objet d'une sinistralité assez importante au regard d'autres techniques de soutènement plus classiques telles que les parois berlinoises et lutésiennes.

L'analyse de près de 50 sinistres répartis sur la période 2012-2020 nous montre plusieurs enseignements, dont certains sont à l'origine de l'élaboration des présentes recommandations.

Le premier constat est tout d'abord financier : le coût moyen d'un sinistre de voiles par passes avoisine souvent la barre des 500 000 €. Pour les projets avec 3 niveaux de sous-sol, le coût minimal constaté d'un sinistre est de 1 000 000 €.

Ces enjeux sont donc très importants au regard des montants des opérations immobilières, dont la balance financière peut rapidement être compromise par un sinistre de cette ampleur.

Les sinistres qui affectent les voiles par passes peuvent être séparés en deux catégories :

- Les désordres se produisant en cours de construction ;
- Les désordres constatés après réception de l'ouvrage.

Dans la première catégorie, plus de 25 % des sinistres sont la conséquence d'un effondrement lors de la réalisation des voiles par passes ou avant le démarrage du lot gros œuvre. Dans plus de 55 % des cas, les sinistres ont affecté un avoisinant.

Les origines récurrentes des déformations excessives et des effondrements en cours de chantier relèvent généralement d'une combinaison parmi les éléments suivants :

- Ouverture de passes de terrassement trop importantes (≈40 % des sinistres) ;
- Butonnage insuffisant ou manquant (≈ 40 % des sinistres) ;

- Poussée hydrostatique à l'arrière du voile trop importante, soit à cause d'un rabattement de nappe mal ou non réalisé, soit à cause d'événements pluvieux importants et imprévisibles ($\approx 20\%$ des sinistres) ;
- Insuffisance au niveau des semelles des butons : dimensions insuffisantes ($\approx 10\%$ des sinistres) ou altération par l'eau des caractéristiques mécaniques des sols, comme celles des argiles vertes, en fond de fouille sous les fondations ($\approx 10\%$ des sinistres).

Plusieurs sinistres mettent en évidence que la solution des voiles par passes ou la méthodologie de réalisation n'était pas adaptée au contexte géologique et géotechnique (présence de sol boulant sous nappe par exemple), à la fragilité des avoisinants et à la profondeur de la fouille souhaitée (3 niveaux de sous-sol et plus).

La seconde catégorie de désordres est souvent relative à la présence d'infiltrations d'eau dans les niveaux de sous-sol des bâtiments (22 % des sinistres), rendant l'ouvrage impropre à son utilisation normale.

Comme pour tous les soutènements, diverses pathologies en lien avec les effets de l'eau affectent les voiles par passes de manière récurrente :

- Infiltrations au niveau de l'impact des butons, soit dans le voile, soit dans le radier ;
- Infiltrations au niveau des reprises de bétonnage verticales ou horizontales des voiles. Le piochage du béton avant la réalisation de la passe suivante ou la mise en œuvre des recouvrements ou celle des aciers des voiles fait souvent défaut ;
- Infiltration au niveau des joints de dilatation ;
- Mauvaise conception du drainage à l'arrière de la paroi ;
- Insuffisance du ferrailage ou enrobage trop important pour garantir une fissuration limitée du support et donc la pérennité de certaines catégories de cuvelage (voir Chapitre 4.5.3).

Ces sinistres ont d'importantes conséquences humaines (voisins des chantiers et futurs occupants), mais aussi financières pour l'ensemble des acteurs du projet.

Enfin, ce procédé constructif, en apparence simple, requiert un réel savoir-faire. Tout écart aux règles de l'art peut induire des risques d'accident du travail grave pour les intervenants. Il existe d'autres méthodes de construction qui limitent significativement le risque d'ensevelissement.

Dans sa base de données EPICEA⁵, l'Institut National de Recherche et de Sécurité fait état de quelques accidents du travail significatifs graves ou mortels survenus lors de la réalisation de voiles par passes. Ces événements résultent notamment :

- D'un ensevelissement dû à l'effondrement du front de taille ;
- D'un heurt lors de la manutention mécanique des butons ;
- D'un écrasement causé par l'effondrement des ouvrages en construction ou existants (typiquement un mur de clôture).

En complément des risques cités ci-avant, la réalisation de voiles par passes peut exposer les intervenants de l'opération aux risques suivants :

- La chute de hauteur depuis la rive des voiles contre terre ;
- Les troubles musculosquelettiques induits par les manutentions manuelles ;
- L'exposition à des substances chimiques dangereuses lors de la projection de béton.

Sur la base de ces constatations, les présentes recommandations s'adressent aux différents intervenants à l'acte de construire : bureau d'études, Maîtres d'ouvrage, Maîtres d'œuvre, contrôleurs techniques et entreprises.

Le but est de fournir des bases techniques communes, afin d'harmoniser les pratiques aussi bien dans la conception ou le calcul que dans la réalisation et le contrôle des ouvrages en voiles par passes.

L'architecture des présentes recommandations s'articule autour du déroulement d'un projet de construction et traite tour à tour des volets suivants :

- Domaine et limites d'utilisation de la technique - Démarche de conception ;
- Etudes d'exécution des voiles par passes ;
- Mode opératoire et dispositions constructives pour les voiles par passes ;
- Suivi, contrôle et réception des voiles par passes.

⁵ EPICEA est une base de données nationale d'accidents du travail survenus, depuis 1990, à des salariés du régime général de la Sécurité sociale. Ces accidents sont mortels, graves ou significatifs pour la prévention.



CHAPITRE 2

DOMAINE ET LIMITES D'UTILISATION DE LA TECHNIQUE - DÉMARCHE DE CONCEPTION

2.1 INVESTIGATIONS SPÉCIFIQUES

2.2 ANALYSE DES RISQUES SPÉCIFIQUES

2.3 HYPOTHÈSES GÉOTECHNIQUES APPROPRIÉES À LA JUSTIFICATION

2.4 DIMENSIONNEMENT EN PHASE PROJET

2 DOMAINE ET LIMITES D'UTILISATION DE LA TECHNIQUE - DÉMARCHE DE CONCEPTION

La technique de voile par passes est adaptée au contexte réunissant les critères suivants :

- Des terrains ayant une cohésion apparente suffisante (§2.1.2, §2.2.2 & §2.2.3) ;
- Des terrains ayant un angle de frottement et une cohésion travaux permettant de justifier l'ouvrage en phases provisoires (§2.1.2, §2.2.2 & §2.2.3) ;
- La possibilité de gérer l'eau pendant les travaux (§2.1.2 & §2.2.1) ;
- Une absence d'avoisinant sensible aux déplacements (§2.1.3 & §2.2.4).

Comme pour tous les soutènements, la démarche conceptuelle suppose que successivement soient réalisés :

- Des investigations spécifiques ;
- Une analyse des risques propres à cette méthodologie ainsi qu'à l'environnement du projet ;
- La définition d'hypothèses géotechniques appropriées ;
- Le dimensionnement de projet ;
- La définition de l'instrumentation nécessaire au suivi de comportement de l'ouvrage et des avoisinants.

C'est à l'issue de cette démarche que le domaine et la limite d'utilisation de la technique des voiles par passes pourront être précisés. Toutefois, la méthodologie de voiles par passes ne peut pas être mise en œuvre si la catégorie géotechnique du projet de soutènement relève de la catégorie géotechnique 3 (voir Tableau AN.2 (NF EN 1997-1)).

2.1 INVESTIGATIONS SPÉCIFIQUES

D'une manière générale, il convient de disposer de différents types d'investigations sur un même site, afin de caractériser correctement le sous-sol et les avoisinants et pouvoir donner un avis critique sur les mesures. Les sondages et essais pertinents sont présentés ci-après.

2.1.1 RECONNAISSANCES GÉOLOGIQUE, HYDROGÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE

La définition de la campagne d'investigation doit être réalisée par un géotechnicien, et doit être adaptée au site, à la géologie et l'hydrogéologie du secteur⁶.

Le sondage carotté est pertinent pour dresser une coupe géologique et permettre le prélèvement d'échantillons en vue de réaliser des analyses en laboratoire. Il permet de préciser le caractère granulaire ou cohérent des couches lithologiques rencontrées.

La caractérisation des propriétés mécaniques du sol peut être réalisée in-situ par l'intermédiaire de l'essai pressiométrique et/ou de l'essai au pénétromètre statique à pointe électrique (CPT). A noter que le CPT permet une approche qualitative intéressante du comportement prévisionnel des sols :

- Présence de sols granulaires propres, sans cohésion (sables lâches) ou avec une faible cohésion d'enchevêtrement (sables denses surconsolidés) ;
- Présence de sols recelant une cohésion non drainée (mobilisation du rapport de frottement R_f , évaluation de l'indice de classement I_c).

L'installation et le suivi d'un piézomètre sont recommandés.

2.1.2 CARACTÉRISATION DES SOLS

L'ouverture frontale et verticale d'une passe est une phase critique. En effet, le front de taille est soumis à une condition d'autostabilité jusqu'à la montée en résistance du voile en béton projeté et la mise en place du système de butonnage. En absence de blindage, c'est principalement la cohésion apparente du sol qui permet d'assurer la stabilité du front de taille, mais aussi le développement d'un "effet de voûte" au sein du squelette granulaire du sol.

Il convient de rappeler que la cohésion apparente présente un caractère transitoire qui diminue dans le temps. C'est en raison de la brièveté de l'exécution d'une passe (voir Chapitre 4) que la cohésion apparente du sol peut être mobilisée.

Celle-ci est mobilisée de façon répétée lors de l'ouverture des passes successives jusqu'à l'atteinte du fond de fouille. Lorsque les ouvertures frontales sont de dimensions raisonnables, une fraction seulement de la cohésion apparente est généralement suffisante pour assurer la stabilité du front de taille. Ceci est essentiel pour constituer un facteur de sécurité.

⁶ Comme pour tous les soutènements, et en particulier ceux où le terrain soutenu est mis à nu, il est fondamental que le nombre de sondages soit suffisant vis-à-vis de l'importance et de la complexité du site.

Les paramètres de cisaillement ainsi mobilisés seront appelés c_{trav} et φ_{trav} (cohésion et angle de frottement interne en phase travaux). Ces paramètres non normalisés peuvent être déduits d'essais de laboratoire et/ou d'essais de tenue des terrains⁷.

Ces paramètres seront définis pour toutes les couches de sol, y compris les remblais lorsque ceux-ci sont concernés par le soutènement.

2.1.2.1 ESSAIS DE LABORATOIRE

Les recommandations de la partie 2 de l'Eurocode 7 (EN1997-2 : 2007) préconisent de privilégier des essais de type triaxiaux consolidés avec mesure de la pression interstitielle. En effet, les valeurs peuvent être utilisées pour des analyses de stabilité en conditions drainées et pour des analyses de stabilité en conditions non drainées. Il est rappelé que la norme des essais triaxiaux recommande de compléter l'essai par une analyse granulométrique (voire sédimentométrique) et par la détermination des limites d'Atterberg. Un soin particulier doit être apporté à la qualité des prélèvements pour la mesure de la cohésion (échantillons de classe 1 selon la norme NF EN ISO 22475-1).

Pour la détermination des paramètres de cisaillement drainés, la norme NF P94-282 indique en Note 3 du §J2.1.2 que « pour des sols soumis à des sollicitations monotones croissantes ou décroissantes, et pour des déformations limitées, en général, les paramètres de cisaillement drainé retenus sont ceux du domaine normalement consolidé. Dans ce cas, lorsqu'on considère une cohésion non nulle il est prudent de borner sa valeur à 5 kPa ou 10 kPa. Il est toutefois admis, pour les situations de projet transitoires, de considérer la cohésion « mesurée » dans les terrains où une cohésion en place élevée existe (due par exemple à une cimentation entre grains). »

2.1.2.2 ESSAIS DE TENUE DES TERRAINS

En phase conception, outre la caractérisation des sols, ces essais réalisés en nombre suffisant pour être représentatif des conditions géotechniques du site et dès que la parcelle est accessible, sont nécessaires pour :

- Apprécier la tenue à court terme d'un front de taille ;
- Définir les dimensions des passes de largeur B (m) et de hauteur H (m) pour l'ensemble des ceintures ;
- Dédire les paramètres de cisaillement « travaux » (voir Annexe Chapitre 2-A).

Ces essais de tenue des terrains sont poursuivis sous les terrains de surface, par une fouille plus en profondeur, précédée d'un prêtreassement si nécessaire (voir Figure 2-1).

Ces essais ne doivent pas impacter les éventuels avoisinants.

Ces essais doivent être menés dans les mêmes conditions que les travaux ; par exemple s'il est prévu de rabattre la nappe, le rabattement doit être actif.

La présence de passages sableux peut correspondre à une zone d'arrivée d'eau non visible en période « sèche ».

Il est également à noter que les conditions météorologiques peuvent avoir une influence sur ces essais. Il est alors recommandé de les différer.

En vue de justifier les dimensions des passes de largeur B (m) et de hauteur H (m), les exigences minimales de mise en œuvre sont les suivantes :

- Sécurisation de l'accès à la fouille (balisage, protection) ;
- Ouverture d'un front de taille de dimensions $[B + 2 \text{ m}] * [H + 1 \text{ m}]$;
- Maintien sur une durée minimale de 24 heures.

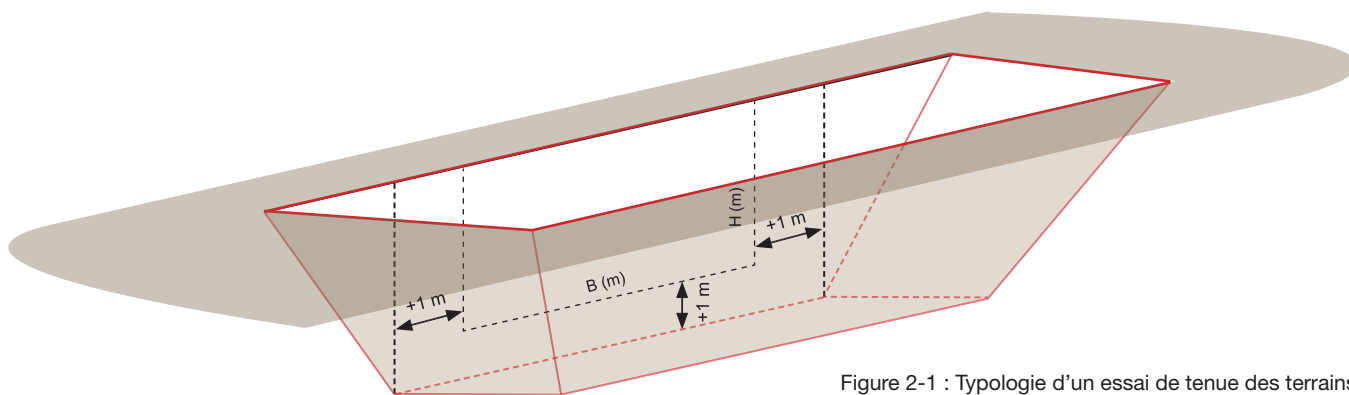


Figure 2-1 : Typologie d'un essai de tenue des terrains

⁷ Pour des sols purement grenus, une cohésion apparente significative mais non mesurable en laboratoire, peut être obtenue par des mécanismes divers : effets de succion, cimentation, enchevêtrement de grains... Il est également utile de rappeler la nature de la cohésion des sols susceptibles d'en développer :

- Dans les sols fins saturés : cohésion due à la surconsolidation ;
- Dans les sols fins ou bien dans les sols intermédiaires frottants et cohérents, non saturés : cohésion due à la surconsolidation par succion ;
- Dans les sols granulaires non saturés : cohésion due à la cimentation des grains ou à la surconsolidation mobilisant la dilatance (enchevêtrement des grains) ;
- Dans les sols granulaires saturés : cohésion due à la cimentation des grains.

2.1.3 RECONNAISSANCE DES AVOISINANTS DE LA ZONE D'INFLUENCE GÉOTECHNIQUE (ZIG)

Comme pour tous les soutènements, à partir des éléments transmis par la maîtrise d'ouvrage, et de sa propre connaissance du site, l'équipe de conception recense et examine les ouvrages avoisinants de la paroi :

- Les bâtiments (infrastructure et superstructure) ;
- Les réseaux ;
- Les voiries ;
- Les ouvrages de génie civil ;
- Les ouvrages naturels (talus par exemple).

Il est rappelé qu'il appartient au Maître d'ouvrage (ou son mandataire) d'apprécier la sensibilité⁸ des avoisinants au projet situés (ou susceptibles de l'être) dans la Zone d'Influence Géotechnique. Pour cela, le plus tôt possible en phase de conception, il est recommandé que le Maître d'ouvrage (ou son mandataire) missionne un bureau d'études spécialisé pour caractériser tous les ouvrages de la ZIG : géométrie (dont un relevé des héberges et des niveaux des sous-sols enterrés), contraintes d'utilisation, date de construction, fonctions, état de vétusté, mode constructif...

L'étude de sensibilité des avoisinants présente une synthèse des données disponibles et les hypothèses retenues pour les études nécessaires au projet, en particulier :

- Les sollicitations verticales et/ou horizontales transmises par les avoisinants au terrain ;
- Les seuils admissibles de déformations (absolues et différentielles) imposés par les exploitants ;
- Les seuils admissibles de déformations (absolues et différentielles) qui préservent les avoisinants des désordres structuraux ou fonctionnels. Néanmoins, et comme pour tous les soutènements, une microfissuration des ouvrages situés dans la ZIG est inévitable. Elle relève du risque résiduel inhérent à l'opération. Ses conséquences (reprises des désordres esthétiques) doivent être prises en compte dans le projet.

Dans le cadre de la production de données d'entrée relatives aux avoisinants, le concepteur doit s'appuyer sur une reconnaissance des fondations des ouvrages avoisinants, mettant en évidence :

- La cote de l'assise (mNGF, NVP, ...) ;
- La géométrie de la fondation (le débord, la hauteur d'ancrage, la hauteur d'encastrement) ;

- La nature de la fondation découverte (semelle isolée ou filante et les éventuels rattrapages en gros béton, radier, puits, pieux) ;
- Les matériaux de fondation (béton, gros béton, béton cyclopéen, mortier à la chaux, sommier de pierres sèches, de briques) ;
- La nature du sol d'assise.

En ce qui concerne spécifiquement les réseaux avoisinants, le concepteur doit s'appuyer sur une reconnaissance mettant en évidence :

- La cote nivelée (mNGF, NVP, ...) de l'assise ;
- La géométrie (implantation, dimensions) ;
- Le type (assainissement, gaz, PTT...) ;
- La nature des matériaux (PEHD, fonte, béton...) ;
- La nature des matériaux de remblais (en lien avec le mode de construction des réseaux) ;
- Leur état de vétusté.

Il est recommandé au Maître d'ouvrage de :

- Solliciter le tribunal pour nommer un Expert en référé préventif ;
- Confier au contrôleur technique une « mission avoisinants » (AV).

2.2 ANALYSE DES RISQUES SPÉCIFIQUES

En vue de pouvoir conclure aux solutions techniques pour un projet de soutènement périmétrique, il convient de passer en revue un certain nombre de conditions de sites, dont l'expérience a montré qu'elles sont de nature à constituer un risque spécifique pour la méthodologie du voile par passes alternées.

Cette analyse des risques doit être réalisée au plus tard en phase PRO de la mission G2 et avant le lancement de la consultation des entreprises.

2.2.1 PRÉSENCE D'EAU IMPACTANT LE SOUTÈNEMENT OU SES APPUIS

Lorsque les excavations interceptent l'eau (nappe libre, nappe perchée, nappe en écoulement), les risques suivants sont susceptibles d'apparaître :

- Difficulté à rabattre la nappe à l'arrière du terrassement ;
- Développement d'une poussée d'eau sur la partie continue du voile en cours de réalisation ;

⁸ La sensibilité est un caractère intrinsèque et essentiel d'une construction, indépendant des facteurs extérieurs, qui décrit sa capacité structurale et fonctionnelle à supporter des sollicitations mécaniques extérieures (statiques ou dynamiques). Voir recommandations AFTES GT16R2F1. Il est également possible de se référer à la XP CEN/TS 17440/NA qui traite de l'évaluation et de la rénovation des structures existantes.

- Développement d'une surface de suintement sur les fronts de taille et des forces d'écoulement associées pouvant conduire à une instabilité ;
- Défaut de portance des semelles de buton et du voile (écoulement ascendant développant un gradient hydraulique pouvant conduire à un défaut de portance et éventuellement à un affouillement) ;
- Difficulté d'adhérence du béton projeté sur le sol support suintant, lessivage du béton au niveau des reprises de bétonnage.

2.2.2 - PRÉSENCE DE SABLES

Lorsque les excavations interceptent des sables, les risques suivants sont susceptibles d'apparaître :

- Risque d'éboulement instantané du front de taille des **sables lâches** impliquant un risque d'enfouissement des intervenants ;
- Risque de déconfinement des **sables denses**, avec perte de la cohésion d'enchevêtrement et éboulement du front de taille impliquant un risque d'enfouissement des intervenants ;
- Risque de hors profil dans le terrain et de surexcavations qui peuvent être à l'origine de fontis ou de décompression à l'arrière de la paroi, aussi bien lors du chantier qu'une fois l'ouvrage achevé.

2.2.3 PRÉSENCE D'ARGILES AVEC UN INDICE DE PLASTICITÉ ÉLEVÉ (IP>20) SOUS LES FONDS DE FOUILLE

En présence d'argiles ayant un indice de plasticité élevé (IP>20) sous les fonds de fouille, le risque d'instabilité générale est important.

Les semelles de fondation des butons sont également concernées.

2.2.4 OUVRAGES AVOISINANTS (ZIG)

Au droit d'ouvrages avoisinants le géotechnicien prend en compte dans son analyse de risques :

- Leur mode de fondation ;
- Leur sensibilité aux déplacements ;
- La capacité à mettre en place des actions correctives pour maîtriser les déplacements.

En raison de la difficulté d'évaluer les déplacements par le calcul, cette analyse de risques est indispensable pour le choix de la méthodologie voiles par passes.

2.2.5 CHARGES LIÉES AUX TRAVAUX

Comme pour tous les soutènements, il est indispensable de recenser l'ensemble des charges, en tête de voile ou à proximité, qui peuvent notamment être :

- Statiques et appliquées pour une durée significative :
 - > Talus provisoires ;
 - > Aires de stockage ;
 - > Cantonnement ;
 - > Grue à tour ;
 - > Centrale à béton de chantier ;
 - > Trémie ou silo de stockage...
- Mobiles et/ou appliquées de façon temporaire :
 - > Circulation (PL, engins de chantier) ;
 - > Grue mobile de manutention ;
 - > Stockage improvisé...

Le Plan d'Installation de Chantier contribue à renseigner sur ces charges.

2.2.6 FAISABILITÉ DU BUTONNAGE PROVISOIRE

Avant d'atteindre le fond de fouille, la stabilité des voiles par passes est assurée par un système de butonnage provisoire.

À l'avancement des terrassements, ces butons sont généralement fondés à des niveaux différents dont il faudra justifier la capacité portante.

Dans les horizons insuffisamment porteurs, il peut alors être nécessaire de fonder directement les butons sous le niveau du fond de fouille ou d'étudier la possibilité de mettre en place un butonnage horizontal (en angles et/ou traversant).

2.2.7 LE VOILE, LES POUSSÉES SUR LE VOILE & LA FAISABILITÉ DES SEMELLES DE BUTONS

L'épaisseur courante des voiles par passes est comprise entre 20 et 30 cm.

La méthodologie en voile par passes alternées est mise en œuvre pour des soutènements avec une poussée des terres qui correspond dans la pratique à des excavations courantes dont la hauteur soutenue n'excède pas en général :

- Deux niveaux de sous-sol ;
- 5 à 7 mètres de hauteur au total ;
- 4 à 5 ceintures.

Toutefois, la multiplication des configurations et des retours d'expériences ont permis au cas par cas d'élargir ces limites d'usage courant.

Etant donné les capacités de levage sur chantier, il convient de limiter les semelles préfabriquées de butons à des dimensions qui n'excèdent pas 1,80 m de côté en règle générale ; ce qui représente une masse de l'ordre de 3 000 à 4 000 kg.

Ce faisant, pour justifier la portance des semelles de fondation des butons, l'intensité maximale de la poussée résultante horizontale, en phase provisoire fond de fouille ne doit généralement pas dépasser 200 kN/ml d'écran (valeur non pondérée).

Cet ordre de grandeur doit être apprécié au regard des caractéristiques mécaniques du sol de fondation.

2.2.8 SYNTHÈSE DE LA REVUE DES RISQUES SPÉCIFIQUES

En raison de la multiplicité des configurations sur un même site, il est nécessaire de procéder à la revue des risques spécifiques pour chaque tronçon de l'ouvrage.

Un ensemble de coupes repérées sur une vue en plan ou une élévation développée du périmètre du voile permettent de lister tous les risques spécifiques liés à la réalisation du voile périmétrique d'infrastructure.

La revue des risques spécifiques permet alors de conclure à la faisabilité ou non par tronçon d'un voile périmétrique réalisé par passes alternées.

2.3 HYPOTHÈSES GÉOTECHNIQUES APPROPRIÉES À LA JUSTIFICATION

2.3.1 MODÈLE GÉOTECHNIQUE

Il appartient au géotechnicien intervenant en phase conception de proposer le modèle géotechnique avec l'ensemble des paramètres adaptés à la justification d'un voile par passes alternées pour chaque couche de sol rencontrée :

- Les poids volumiques non saturés et saturés le cas échéant ;
- Les caractéristiques de cisaillement du sol en phase transitoire (c_{trav} , φ_{trav}), donnés pour une durée limitée ;

- Les caractéristiques de cisaillement du sol drainées (c' , φ') ;
- Les coefficients de poussée et de butée limites et au repos ;
- L'inclinaison des résultantes de poussée et de butée.

2.3.2 CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Compte tenu des risques importants liés à l'interférence de la nappe au cours des excavations, il est nécessaire que le géotechnicien intervenant en phase conception :

- Définisse les niveaux caractéristiques EB, EH et EE à partir d'une étude hydrogéologique ;
- Propose au MOa et au MOe un niveau d'eau d'arrêt de chantier. Ce niveau sera alors contractualisé par le MOa.

Si le niveau d'eau intéresse les travaux d'excavation et de réalisation des appuis de la paroi, la nécessité de mise hors d'eau des différentes phases est identifiée, en particulier lors de l'exécution des semelles de butons.

Les moyens de mise hors d'eau et l'impact sur les ouvrages de la ZIG doivent alors être précisés. A noter qu'un épuisement en fond de fouille ne permet pas de supprimer les charges hydrostatiques à l'arrière des voiles.

La nécessité de mise en œuvre d'un drainage vertical doit également être précisée par le géotechnicien.

Pour des questions d'adhérence entre le voile et le sol, le taux de couverture⁹ ne dépassera en aucun cas 50% de la surface de béton projeté.

Par ailleurs, dans tous les cas de figure pour les phases provisoires, il est nécessaire de prévoir des barbacanes.

En phase définitive, le maintien en fonction des barbacanes n'est pas systématique, notamment en cas de cuvelage.

2.3.3 HYPOTHÈSES DE JUSTIFICATIONS DES SEMELLES DE BUTONS

Pour chaque horizon géotechnique susceptible de constituer un niveau d'assise transitoire, le modèle géotechnique produira les valeurs caractéristiques nécessaires à la justification de la portance :

⁹ Le taux de couverture correspond au rapport entre la surface verticale du géosynthétique de drainage et celle du voile.

- Pression limite équivalente P_{le}^* et/ou résistance de pointe équivalente q_{ce} , à chaque niveau de fond de fouille transitoire ou définitif ;
- Caractéristique de déformabilité associée, soit module pressiométrique Ménard E_M et coefficient rhéologique α , soit le module d'Young E_Y .

Les paramètres de cisaillement c_{trav} , φ_{trav} ne permettent pas de justifier la portance des semelles.

2.4 DIMENSIONNEMENT EN PHASE PROJET

Le dimensionnement en phase projet s'appuie sur un ensemble de plans et de coupes de niveau PRO ou DCE (plan d'implantation et cotes du fond de fouille).

2.4.1 ÉVALUATION DU NIVEAU DE SOLlicitATIONS EN PHASE TRANSITOIRE ET DÉFINITIVE

La méthodologie de réalisation de voile par passes alternées recouvre une grande multiplicité de phasages qui sont adaptables aux contraintes spécifiques du projet.

Dans le cadre du dimensionnement de projet, le géotechnicien intervenant en phase conception établira *a minima*, au niveau d'une ou des coupe(s)/tronçon(s) de calcul qu'il jugera dimensionnante(s) :

- Les diagrammes de poussée des terres jusqu'à la base de la bêche (c_{trav} , φ_{trav} ; c' , φ') et si nécessaire le diagramme de poussée hydrostatique en phase définitive ;
- Le diagramme de poussée des charges d'exploitation et des avoisinants dimensionnantes ;
- Le nombre minimal de lits de butons dits « définitifs » ;
- La valeur de la résultante de la poussée limite $ELS_{Caractéristique}$ en phase fond de fouille avec c_{trav} , φ_{trav} et son niveau d'application ;
- La valeur de la résultante de la poussée limite $ELS_{Caractéristique}$ en phase fond de fouille avec c' , φ' et son niveau d'application ;
- La réaction normale à l'écran et linéarisée, aux $ELS_{Caractéristique}$ au niveau des appuis.

Le bureau d'étude de maîtrise d'œuvre, missionné par le Maître d'ouvrage, restera en charge de la justification structurale (STR) du voile, en phase chantier et en phase définitive de l'ouvrage.

2.4.2 JUSTIFICATION DE LA STABILITÉ GEO

La norme NF P94-282 (voir amendement A1 §3.1.31 et §B.2.6 note2) prévoit la vérification de la stabilité du voile pendant chacune des phases de réalisation (ceintures), incluant les différents dispositifs d'appui (banquettes, butons et leurs semelles).

Dans le cadre des études de dimensionnement de niveau projet, **les semelles des butons installées sous le fond de fouille seront dimensionnées** (voir §3.3.6).

Dans le cadre des études de dimensionnement de niveau projet, **il sera vérifié la stabilité générale du voile** incluant *a minima* :

- La poussée des terres ;
- Les charges externes (exploitation et/ou avoisinants) ;
- Les lignes de butons dits « définitifs » ;
- La géométrie de la bêche ;
- La nappe générale ou la nappe perchée.

La vérification de la stabilité générale est menée en considérant les paramètres drainés (c' , φ').

Un soin particulier sera porté à la recherche du mécanisme de rupture le plus défavorable, englobant le voile (bêche incluse) avec les semelles de butons et les sollicitations associées, y compris le renard solide.

La vérification de la stabilité générale pourra normalement être réalisée selon l'approche 2 et les coefficients partiels associés (NF P94-282 §15.2.1). Dans ce cas, le facteur de sécurité visé est *a minima* $\Gamma = 1,0$.

La stabilité générale pourra également être évaluée selon une approche dite « traditionnelle » où tous les facteurs partiels valent 1,0. Dans ce cas, le facteur de sécurité visé :

- En phase fond de fouille est *a minima*
 $\Gamma = 1,35 * 1,1 * 0,9 = 1,33$, soit $\Gamma = 1,3$ environ ;
- En phase définitive (le cas échéant) est *a minima*
 $\Gamma = 1,35 * 1,1 * 1,0 = 1,48$, soit $\Gamma = 1,5$ environ.

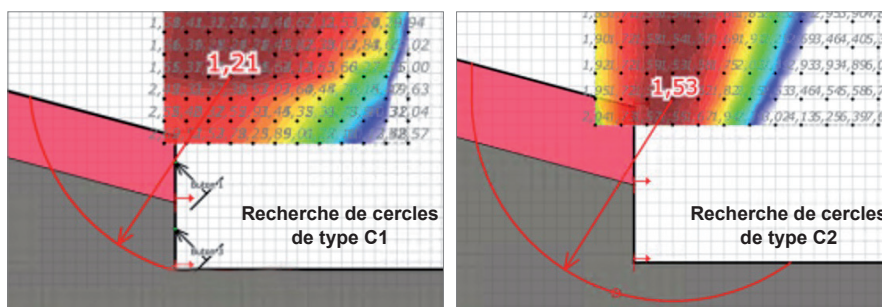


Figure 2-2 : Illustration d'une vérification du coefficient global de sécurité en phase fond de fouille

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 en œuvre des armatures métalliques, une fois le terrassement réalisé, nécessiterait dans le cas d'interventions en hauteur, l'emploi d'équipements de travail sécurisés et conformes de type Plateforme Individuelle Roulante, PIR Légère, échafaudage roulant ou Plateforme Élévatrice Mobile de Personnes. Toutefois, ces matériels s'avèrent généralement inadaptés voire dangereux au regard de la surface du sol, souvent brute et non stabilisée. Par ailleurs, l'utilisation d'échelle comme poste de travail est à proscrire. Aussi, dans le but de prévenir le risque de chute avec dénivellation, cette opération doit être menée depuis le sol et à hauteur d'homme. Le terrassement des passes se trouve de ce fait limité à 1,50 m de haut. L'Annexe 4-C recense les principales mesures de prévention en lien avec les travaux de voiles par passes.



CHAPITRE 3

ÉTUDES D'EXÉCUTION DES VOILES PAR PASSES

- 3.1 DONNÉES D'ENTRÉES NÉCESSAIRES / INTERFACES ENTRE INTERVENANTS
- 3.2 MÉTHODES DE CALCUL
- 3.3 VÉRIFICATIONS

3 ÉTUDES D'EXÉCUTION DES VOILES PAR PASSES

Si la technique de voiles par passes est une solution variante proposée par les entreprises lors de la signature des marchés, le Maître d'ouvrage doit confier au géotechnicien une mission, afin que celui-ci donne un avis technique sur la solution variante. Cet avis technique ne peut être donné sans éléments justificatifs transmis par l'entreprise.

Pour chacun des tronçons définis, les études d'exécution (études géotechniques G3 et études de structure) doivent permettre :

- De définir la méthodologie de suivi des déplacements (voir Chapitres 2 et 5) en fonction de l'analyse de risque du site. Cette analyse donne lieu à un suivi de déplacements sur site, et à la définition d'une procédure en cas de dépassements des seuils ;
- De vérifier la stabilité générale, vis-à-vis du grand glissement ;
- De vérifier l'équilibre horizontal des voiles ;
 - > Évaluer les efforts dans les appuis (butons puis planchers définitifs) pour toutes les phases ;
 - > Dimensionner :
 - Les butons horizontaux et/ou inclinés ;
 - Les semelles de butons ;
 - La bêche (si besoin pour l'équilibre horizontal) ;
- De vérifier l'équilibre vertical des voiles (y compris bêche) ;
- De dimensionner les corbeaux et les voiles en béton armé ;
- D'établir les plans d'exécution (ensemble de coupes repérées sur une vue en plan ou élévation développée).

3.1 DONNÉES D'ENTRÉES NÉCESSAIRES / INTERFACES ENTRE INTERVENANTS

Les études d'exécution des voiles par passes impliquent les interventions :

- Des géotechniciens (G3 en cas de variante et G4) ;
- De l'entreprise de rabattement de nappe pour définir les moyens de mise hors d'eau (le cas échéant) ;
- De l'entreprise de terrassement (qui est généralement l'entreprise de voiles par passes) ;
- De l'entreprise de voiles par passes (qui est généralement l'entreprise de terrassement) ;
- De l'entreprise de gros œuvre ;
- Du bureau d'études structure.

Les interfaces entre intervenants sont gérées lors de la réunion de coordination (voir Chapitre 5).

Les Données/Documents à fournir par le géotechnicien intervenant en phase conception et par le bureau d'études spécialisé pour caractériser tous les ouvrages de la ZIG sont précisés au Chapitre 2.

Ces données peuvent être complétées lors de l'étude d'exécution des voiles par passes par des investigations spécifiques décrites au Chapitre 2.1.

On rappelle que l'étude de sensibilité des avoisinants est fondamentale au même titre que l'éventuelle mise hors d'eau lors des travaux.

Les Données/Documents à fournir par l'entreprise en charge de l'exécution des voiles par passes, accompagnée de son ingénierie géotechnique, et par le bureau d'études structures sont les suivants :

- Méthodologie pour le suivi des déplacements et procédure en cas de dépassements des seuils ;
- Dispositifs de drainage (y compris exutoire) provisoires et définitifs décrits sur les plans ;
- Dimensions des passes précisées sur les plans ou le carnet de méthodologie ;
- Méthodologie de butonnage dit « provisoire » (phasage, type et espacement) ;
- Méthodologie de butonnage dit « définitif » (phasage, type et espacement) ;
- Mise à jour de l'étude de stabilité générale sous la forme d'une note de calcul, le cas échéant ;
- Indication de la résistance du sol sous semelle en fonction de l'inclinaison du buton et de l'inclinaison de la semelle (taux de travail) sur les plans ;
- Indication de la résistance du sol au niveau des fondations (taux de travail) sur les plans ;
- Charges d'exploitation en amont des voiles pour les phases provisoires et la phase définitive précisées sur les plans ;
- Diagrammes de la poussée des terres et des avoisinants pour chaque ceinture en phases provisoires et en phase définitive (avec ou sans poussée hydrostatique en phase définitive avec planchers) sur les plans voire dans une minute ou note de calcul ;
- Note de calcul de dimensionnement des butons horizontaux et/ou inclinés (semelles comprises) ;
- Charges dans les butons précisées sur les plans ;

- Classe d'exposition du béton et résistance caractéristique (précisées sur les plans) ;
- Plan de coffrage (ensemble de coupes repérées sur une vue en plan ou élévation développée) avec indication et prise en compte des fondations du projet, des éléments à réaliser (voiles/poutres/planchers) et du système de butonnage dit « définitif » (butons et semelles) ;
- Plans d'armatures de synthèse (phases provisoires et définitive) en coupe, avec ferrailage des bandes noyées (BN), ferrailage des bèches et attentes éventuelles pour longrines de redressement ;
- Type, sections et recouvrements verticaux et horizontaux des armatures (nécessaires pour les phases provisoires) précisés sur les plans ;
- Équivalence aciers HA/TS (Haute Adhérence / Treillis Soudés) précisée sur les plans ;
- Plans de corbeaux (avec armatures si corbeaux en béton armé) ;
- Plans des semelles (dimension/ferrailage).

3.2 MÉTHODES DE CALCUL

Le calcul doit être établi pour chaque ceinture horizontale.

La poussée à prendre en compte est la poussée active k_a avec $\delta/\varphi = 0^{11}$.

Plusieurs méthodes de calcul peuvent être utilisées pour le calcul des voiles par passes. On peut utiliser :

- Des modèles « simples » d'équilibre statique et de résistance des matériaux ;
- Des modèles géotechniques plus complexes tenant compte du phasage et de ses effets (MISS ou MEF). Dans le cadre d'un calcul 2D en déformations planes, un niveau d'appui est modélisé à chaque phase de terrassement afin d'assurer l'équilibre.

Les modèles « simples » ont tendance à sous évaluer les efforts dans les butons supérieurs. Pour retrouver des efforts cohérents utiles pour le calcul des butons et des semelles, le calculateur prendra en compte un diagramme de poussée active pour les phases provisoires et un diagramme avec palier horizontal à mi-hauteur du voile (bèche incluse) pour la phase de butonnage dit « définitif » (ou phase fond de fouille). Pour cette phase, on retient donc un diagramme de poussée active corrigé uniformisé à la pression maximale calculée entre 0 à H/2 (H = hauteur du voile par passes, bèche incluse). Entre H/2 et H, le diagramme de poussée active reste inchangé.

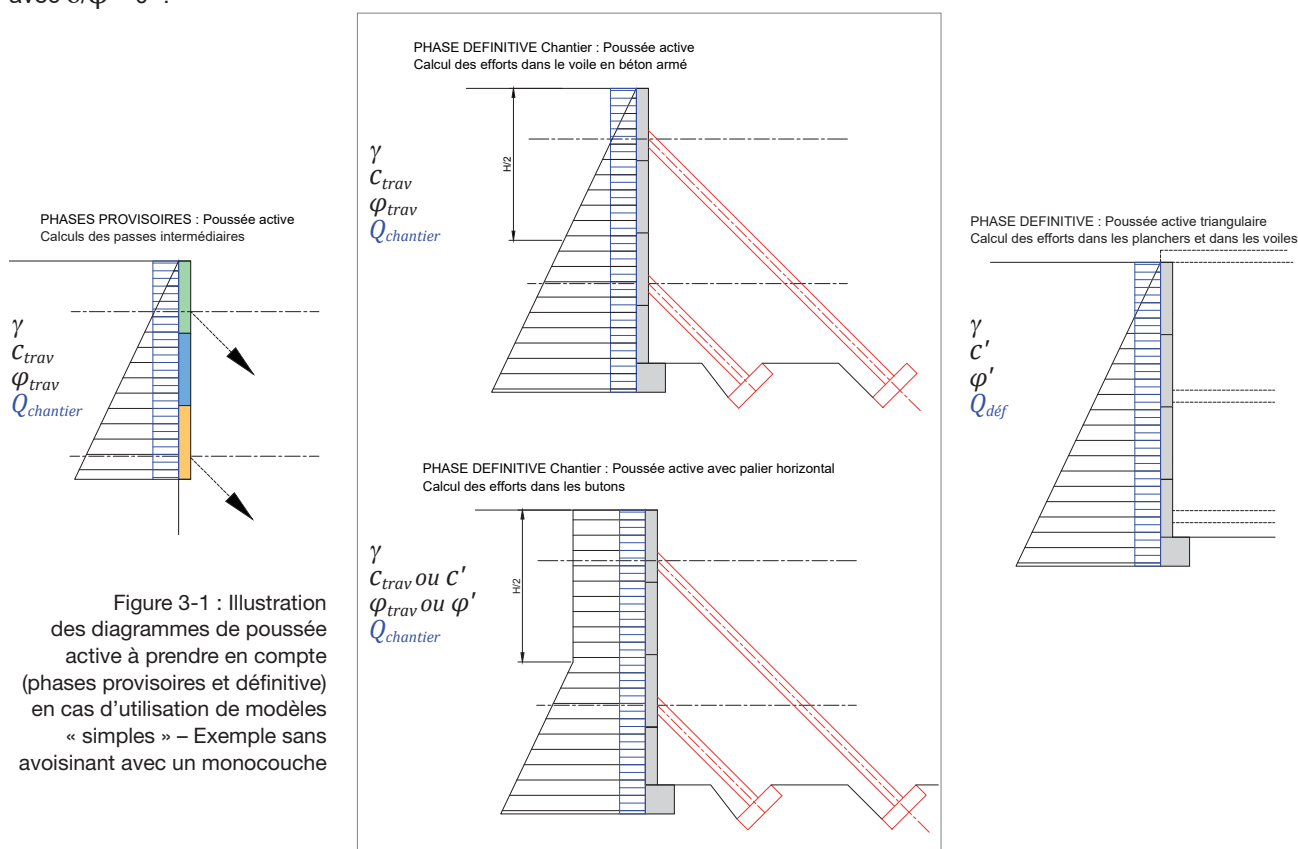


Figure 3-1 : Illustration des diagrammes de poussée active à prendre en compte (phases provisoires et définitive) en cas d'utilisation de modèles « simples » – Exemple sans avoisinant avec un monocouche

¹¹ Compte-tenu des déplacements horizontaux attendus (de 2 à 4 cm), on retient un coefficient de poussée k_a . Compte-tenu de l'éventuelle présence de bandes drainantes, on retient une inclinaison nulle de la poussée.

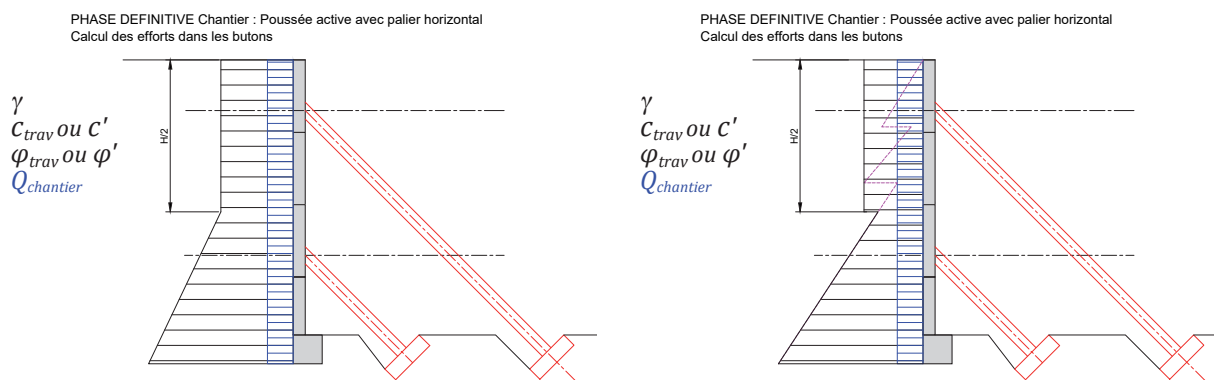


Figure 3-2 : Illustration du diagramme de poussée active à prendre en compte en phase de butonnage dit « définitif » en cas d'utilisation de modèles « simples » – Exemple avec monocouche (à gauche) et multicouche (à droite) sans avoisinant

Pour le calcul des efforts dans les butons en phase définitive chantier, le passage des paramètres de cisaillement « travaux » aux paramètres de cisaillement drainés est à apprécier en fonction de la durée des travaux.

Le palier horizontal est fixé à la valeur maximale de la pression sur la hauteur $H/2$. En présence d'un multicouche, cette pression maximale n'est pas systématiquement à la profondeur $H/2$ (voir partie droite de la Figure 3-2).

Il est recommandé de disposer les semelles des butons sur des plans différents (voir Chapitre 4).

3.3 VÉRIFICATIONS

3.3.1 POUSÉE DES TERRES

La poussée des terres à prendre en compte est la poussée k_a avec $\delta/\varphi = 0$, sur la hauteur du voile par passes, bêche comprise.

Lors de la phase fond de fouille, la justification des butons et des semelles peut être menée à partir du diagramme de poussée active calculé avec c_{trav} et φ_{trav} ¹³.

Le passage des paramètres de cisaillement « travaux » aux paramètres de cisaillement drainés est à apprécier en fonction de la durée des travaux.

3.3.2 STABILITÉ EXTERNE GÉNÉRALE DES VOILES

La vérification de la stabilité externe générale (ou d'ensemble) des voiles, menée en référence au §4.2.8 de la norme NF P94-282, est déjà réalisée par le géotechnicien intervenant en phase conception.

Cette vérification doit être mise à jour en phase études d'exécution pour tenir compte des points suivants :

- Modifications des hypothèses géotechniques (sol, avoisinants) faisant suite à des reconnaissances complémentaires ;
- Modifications du projet (niveau de fond de fouille, emprise du sous-sol, ...) ;
- Adaptations de la méthodologie de terrassement (pré-terrassements, niveau d'arase des voiles, ...) ;
- Modification des hypothèses au niveau du système de butonnage (niveau des corbeaux, position des semelles).

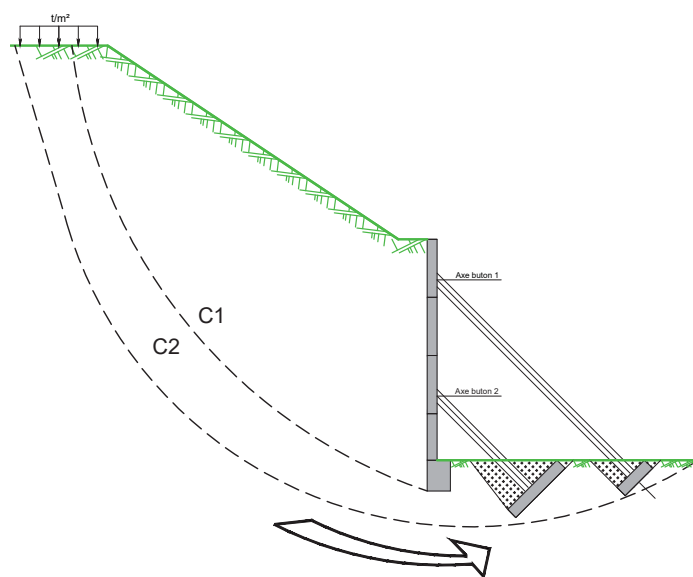


Figure 3-3 : Illustration de mécanismes de rupture monobloc pouvant provoquer une instabilité d'ensemble

¹² En fonction de la méthode de réalisation de la bêche sur chantier, une butée pourra être prise en compte sur la hauteur de la bêche (voir Chapitre 3.3.5).

¹³ On rappelle qu'en phase fond de fouille, le calcul de la stabilité générale est mené avec c' et φ' .

- Familles de cercles C2 (qui passent sous les semelles des butons) : les efforts dans les butons ne doivent pas être modélisés, ni au niveau du corbeau ni au niveau de la semelle, car ce sont des efforts internes du système.
- Familles de cercles C1 (qui émergent à la base du voile par passes et qui passent au-dessus des semelles des butons) : les efforts dans les butons résultent de la poussée des terres, des charges d'exploitation et/ou des charges des avoisinants. Pour chaque lit de butons, il est nécessaire de modéliser une force extérieure au niveau du corbeau. La modélisation d'une force extérieure au niveau de la semelle est inutile (voir Figure 2-2).

3.3.3 SOULÈVEMENT DES VOILES

Le retour d'expérience met en évidence une absence de sinistre lié à ce mécanisme dès lors que l'inclinaison de la résultante ($\alpha_{résultante}$) des efforts dans les butons définitifs (P_d) est proche de 45° par rapport à la verticale.

La vérification de ce mécanisme de rupture n'est pas indispensable si l'inclinaison de la résultante ($\alpha_{résultante}$) des efforts dans les butons définitifs (P_d) est supérieure à 40° par rapport à la verticale.

Dans le cas contraire, la vérification est nécessaire. Pour cela, il est possible de considérer :

- $\delta / \varphi = 2/3$;
- C_{trav} , φ_{trav} ;
- Un diagramme de poussée active non corrigé entre 0 à $H/2$.

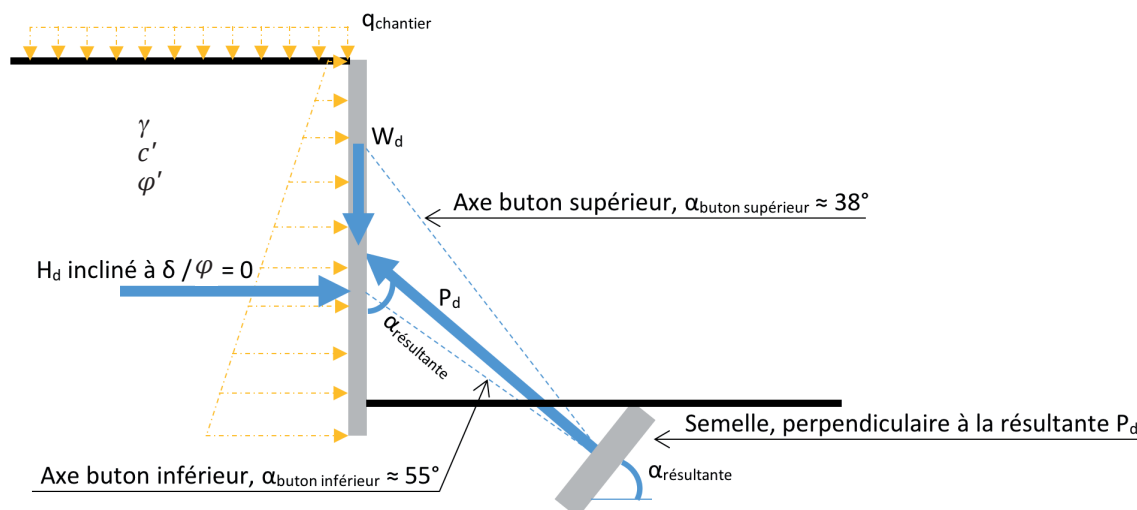


Figure 3-4 : Illustration avec $\alpha_{résultante} \approx 49^\circ > 40^\circ$

La résistance au soulèvement est vérifiée si le rapport Résistances sur Sollicitations est supérieur à 1.

3.3.4 DÉPLACEMENTS DES VOILES

On rappelle que :

- Les déplacements limites du voile et des avoisinants sont définis contractuellement (voir Chapitre 2) ;
- Les déplacements horizontaux régulièrement observés au niveau des voiles par passes sont de l'ordre de 2 à 4 cm ;
- En raison de la multiplicité et de la complexité du phasage pour mettre en œuvre les voiles par passes, il est difficile d'évaluer leurs déplacements avec les outils logiciels actuellement disponibles ;
- Le suivi du comportement des voiles par passes est indispensable (voir Chapitre 5).

3.3.5 PRISE EN COMPTE DE LA BÊCHE

La réalisation d'une bêche est recommandée.

Selon sa méthodologie de mise en œuvre, elle permet de réduire le déplacement du pied des voiles. Elle représente alors un élément de sécurité important pour la stabilité des voiles par passes.

C'est donc en amont du calcul, et en collaboration avec l'entreprise de voiles par passes, que l'on distingue deux types de bêches :

- La bêche avec butée ;
- La bêche sans butée.

3.3.5.1 LA BÊCHE AVEC BUTÉE

Pour être prise en compte dans le calcul, la bêche doit être réalisée de façon stricte¹⁴. En effet, pour mobiliser la butée du terrain :

- Le terrain situé devant la bêche ne doit pas être remanié (voir Figure 3-5) ;
- La bêche ne doit pas être coffrée ;
- La bêche doit être coulée en place.

Pour répondre à ces 3 conditions, la bêche doit être réalisée à l'ouverture de la dernière passe, avant de réaliser le béton projeté (voir Figure 3-5).

Sa hauteur est généralement de l'ordre de 60 à 80 centimètres.

Pour vérifier l'absence de défaut de butée, phase définitive chantier incluse, le facteur de sécurité global à prendre en compte est de 1,485 (pondération des actions par 1,35 et sécurité sur les résistances de 1,1).

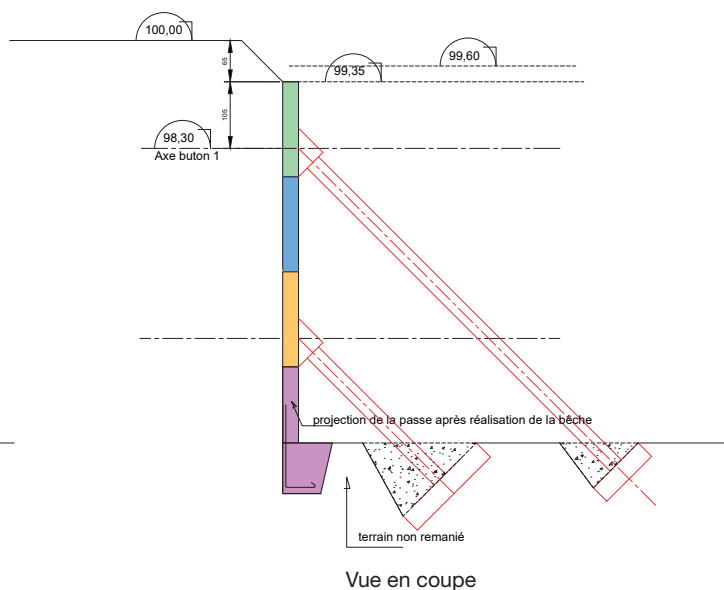
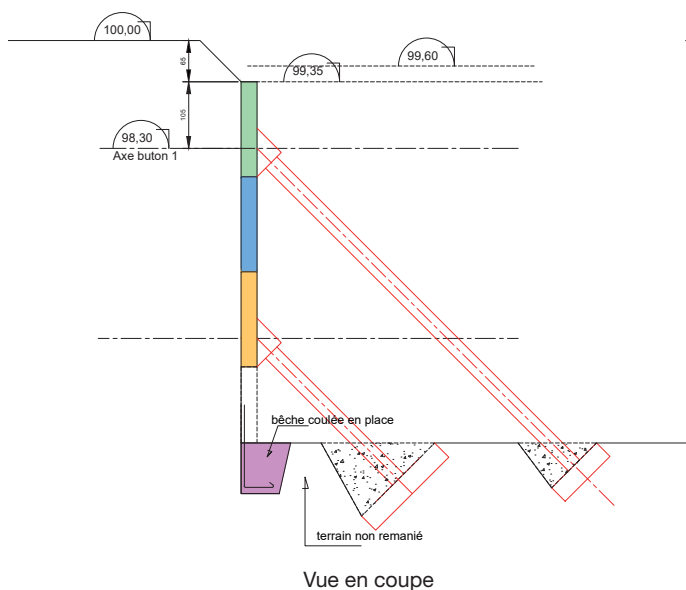
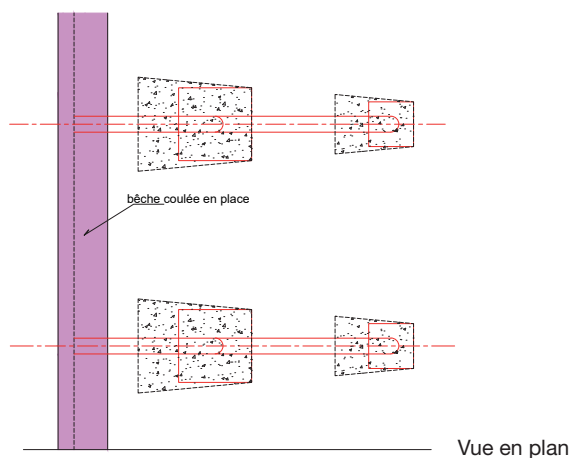


Figure 3-5 : Illustration du phasage à respecter pour prendre en compte la butée dans le calcul

¹⁴ Un plan de contrôle doit être mis en place pour vérifier la bonne réalisation des bêches (voir Annexe 5-A).

3.3.5.2 LA BÊCHE SANS BUTÉE (= SEMELLE)

Dans ce cas de figure :

- La bêche ne contribue pas à l'équilibre des poussées ;
- La bêche sert uniquement de fondations pour la reprise de charge verticale du voile par passes ;
- La bêche peut être coffrée et/ou réalisée après la projection de la dernière passe ;
- Au moins 2 niveaux de butons doivent être mis en œuvre car un seul lit de butons ne permet pas d'assurer l'équilibre statique du voile par passes voile par passes ;
- Le voile fonctionne en console sous le dernier niveau de butons.

3.3.5.3 TABLEAU COMPARATIF

Avantages	
Bêche avec butée	• Réduction des efforts dans le bouton inférieur • Réduction des dimensions des semelles de butons • Risque de rotation en pied de voile maîtrisé
Bêche sans butée	• Réalisation simple après projection de la dernière passe
Inconvénients	
Bêche avec butée	• Réalisation stricte soumise à un plan de contrôle (voir Annexe 5-A)
Bêche sans butée	• Efforts dans les butons importants • Ferrailage adapté au fonctionnement en console sous le dernier niveau de butons • 2 niveaux de butons <i>a minima</i> pour assurer l'équilibre en rotation du voile

Tableau 3-1 : Tableau comparatif entre les deux types de bêches

3.3.6 CALCUL DES SEMELLES DES BUTONS

On rappelle que la résistance du sol sous les semelles des butons (taux de travail) est nécessairement fonction :

- De l'angle des butons par rapport à la verticale ;
- Des conditions d'ancrage sous le niveau de terrassement ;
- Des dimensions des semelles ;
- De l'inclinaison de la semelle par rapport à l'horizontale.

Par ailleurs, il convient de rappeler que les butons et leurs semelles sont :

- Provisoires (même les butons dits « définitifs ») ;
- Mis en charge lors de la réalisation du voile par passes (voir §4.5.1).

Il est ainsi recommandé que :

- La surface d'assise des semelles soit perpendiculaire à la résultante des efforts dans les butons, ce qui implique $i_\delta = 1$;
- L'inclinaison de la surface d'assise des semelles soit au plus près de 45° par rapport à la verticale (pour limiter le risque de glissement) ;
- Les déformations soient maîtrisées :
 - > Par un suivi des déplacements (voir Chapitre 5) ;
 - > Par le recalage et la recharge des butons au niveau des corbeaux (voir §4.5.1).

Dans ce cadre, et à condition que les semelles ne se trouvent jamais à proximité de la tête d'une risberme provisoire (terrassement en banquettes normale), il est admis :

- Que le calcul de portance des semelles soit mené uniquement en combinaison fondamentale de l'ELU ;
- De retenir forfaitairement $i_\beta = 0,5$ (voir Annexe 3-A pour un calcul plus précis).

Dans les autres configurations, il est nécessaire de calculer :

- i_δ selon la norme NF P94-261 ;
- i_β selon la norme NF P94-261, par analogie avec une semelle implantée à proximité de la tête d'un talus (voir Annexe 3-A).

Dans tous les cas, on calcule k_p selon la norme NF P94-261.

3.3.7 CALCUL DES BUTONS HORIZONTAUX ET/OU INCLINÉS

La charge dans les butons horizontaux et/ou inclinés est précisée sur les plans.

La multiplicité des matériaux et des formes de butons (bois [type / résistance / longueur / Eurocode 5] – métal [résistance / forme / Eurocode 3]) implique que le dimensionnement des butons soit à la charge de l'entreprise de voiles par passes.

Dans tous les cas, les butons sont justifiés au flambement.

A noter également que les butons sont très souvent en bois et réutilisés de chantiers en chantiers.

Il est alors nécessaire de s'assurer que la section soit homogène sur la longueur des butons.

3.3.8 DISPOSITIONS POUR LES CORBEAUX

C'est en collaboration avec l'entreprise de voiles par passes, que le bureau d'études structure en charge du calcul définit le type de corbeaux. Seuls deux types de corbeaux sont recommandés :

- Les corbeaux en béton armé ;
- Les corbeaux métalliques.

Dans tous les cas (butons inclinés et/ou horizontaux) :

- La tête des butons doit toujours rester libre mécaniquement ;
- La mise en charge des butons est réalisée par un coin, qui doit être remis en charge régulièrement, et en fonction des déplacements constatés (voir §4.5.1).

3.3.8.1 CAS DES CORBEAUX EN BÉTON ARMÉ

Les dimensions des corbeaux en béton armé sont définies en fonction de la charge, du diamètre et de l'inclinaison des butons qu'ils doivent réceptionner. Les armatures, correctement ancrées et enrobées, sont calculées selon les règles de béton armé en vigueur (Eurocode 2).

Les corbeaux en béton armé sont coffrés à l'avancement des passes.

Pour ce qui concerne leur démolition, elle est réalisée après débutonnage ; en sécurité. Les armatures sont coupées et passivées ou enrobées. Une finition est à prévoir pour éviter la fissuration et des problèmes esthétiques.

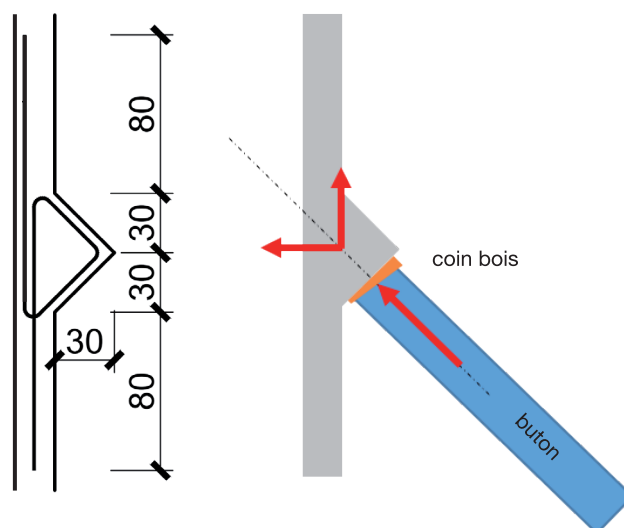


Figure 3-6 : Exemple d'illustration d'un corbeau en béton armé et de son ferrailage liaisonné à celui du voile

3.3.8.2 CAS DES CORBEAUX MÉTALLIQUES

Les corbeaux métalliques sont ancrés dans le voile béton par scellements de barres HA ou par des aciers en attente dans le voile.

Les corbeaux doivent être plaqués correctement contre le voile pour éviter toute rotation, et ne produire que du cisaillement au niveau des barres HA.

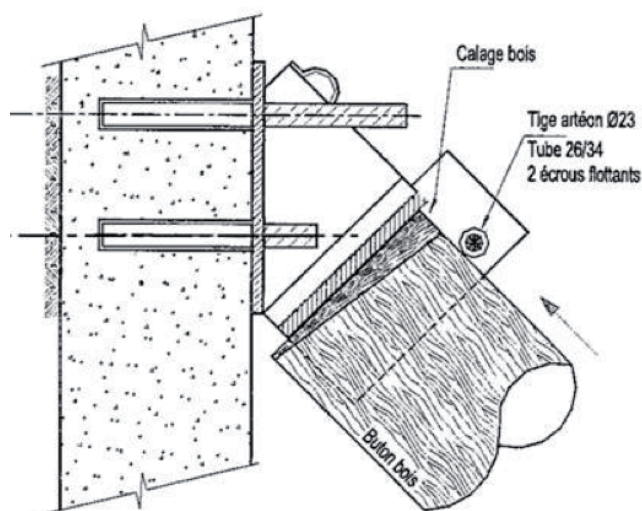


Figure 3-7 : Illustration d'un exemple de corbeau métallique et de son ancrage dans le voile

3.3.8.3 CAS DES « CIGARES »

Les « cigares » correspondent à la mise en place de barres HA de gros diamètre dépassant des voiles en béton armé.

Ce système est à proscrire. En effet, il ne permet pas d'avoir uniquement du cisaillement dans les tiges HA dépassant du voile.

L'apparition d'un couple ne permet pas de justifier la barre HA et son ancrage dans le voile.

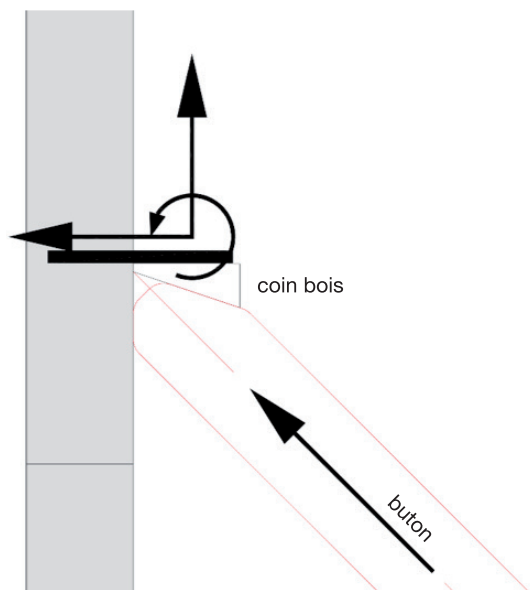


Figure 3-8 : Illustration d'un « cigare » : **solution proscrite**

3.3.9 CALCUL DU VOILE

Le calcul du voile doit être mené suivant les normes de béton armé en vigueur (Eurocode 2).

Les calculs béton armé (parement, corbeaux et bandes noyées) sont menés avec c_{trav} et φ_{trav} lors de la phase de butonnage définitif (ou fond de fouille).

La résistance et la classe d'environnement du béton¹⁵, ainsi que les enrobages minimums doivent être définis en fonction de l'agressivité du milieu (sol et eau), XA par exemple.

Les armatures mises en place, doivent être dimensionnées à partir de l'enveloppe des sollicitations des phases provisoires (liées au phasage) et de la phase définitive.

Une attention particulière est apportée aux différents enrobages de calcul liés à la superposition des armatures (armatures du voiles phase provisoire / phase définitive + bandes noyées provisoires qui assurent le transfert des efforts jusqu'aux butons).

Dans le cas d'un cuvelage, le voile est justifié en phase définitive en référence à la norme NF DTU 14.1, en tenant compte de la poussée hydrostatique.

Les aciers sont généralement façonnés (pliés/dépliés) sur site : pour ce type de mise en œuvre, on se limite à des barres $\leq$ HA14.

Au-delà du HA14, et jusqu'à HA20, il est nécessaire de prévoir une mise en place adaptée des armatures.

Les armatures de reprise de passes ainsi que les longueurs de recouvrement d'armatures sont indiquées sur les plans d'armatures.

¹⁵ La composition du béton sera donnée par l'entreprise de voiles par passes pour s'adapter au béton projeté.



CHAPITRE 4

MODE OPÉRATOIRE ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES POUR LES VOILES PAR PASSES

- 4.1 FINALISATION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION
ET ATTENDUS AU NIVEAU DES PLANS D'EXÉCUTION
- 4.2 MODE OPÉRATOIRE AU NIVEAU D'UNE PASSE
- 4.3 MODE OPÉRATOIRE AU NIVEAU D'UNE CEINTURE
- 4.4 MODE OPÉRATOIRE DU TERRASSEMENT ASSOCIÉ
AUX VOILES PAR PASSES
- 4.5 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES POUR LES VOILES
PAR PASSES

4 MODE OPÉRAIRE ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES POUR LES VOILES PAR PASSES

Pour assurer la sécurité des personnels, la stabilité du voile à toutes les phases et limiter les infiltrations, cette solution technique exige un mode opératoire robuste et adaptable qui complète les études d'exécution (voir Chapitre 3). Ce mode opératoire est présenté lors de la réunion de coordination (voir Chapitre 5).

Après avoir caractérisé la largeur et la hauteur d'ouverture de chaque passe (voir Chapitres 2 et 3), il convient de :

- Finaliser les études d'exécution ;
- Préciser et ajuster le mode opératoire ;
- Respecter l'ensemble des dispositions constructives.

L'annexe 4-C présente un exemple de phasage pour réaliser un voile par passes avec 2 ceintures.

L'annexe 4-D présente un exemple de phasage pour réaliser un voile par passes avec 4 ceintures.

L'annexe 4-E recense les principales mesures de prévention en lien avec les travaux de voiles par passes.

4.1 FINALISATION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION ET ATTENDUS AU NIVEAU DES PLANS D'EXÉCUTION

Pour que l'entreprise de voiles par passes explique son mode opératoire, il est nécessaire qu'elle produise des documents techniques mettant en évidence :

- L'ensemble des voiles périmétriques réalisés par passes alternées ;
- L'ensemble des ceintures ;
- L'enchaînement de toutes les passes (qui sont nécessairement alternées au niveau de chaque ceinture) ;
- L'ensemble des butons (horizontaux et inclinés).

Par ailleurs, pour finaliser les études d'exécution, et :

- Limiter les problèmes de superposition tels que des butons qui traversent de futurs voiles et/ou des butons inclinés qui traversent de futurs planchers, l'ensemble des impacts (voiles, dalles et poutres) sont reportés sur **l'ensemble des coupes repérées sur une vue en plan ou une élévation développée** (voir Annexe 4-A) ;
- Éviter les problèmes de superposition et d'interactions entre les semelles de fondation des butons des voiles par passes et les fondations de l'ouvrage, il est nécessaire de réaliser **une vue en plan de synthèse** pour identifier leurs implantations respectives (voir Annexe 4-B).

La résolution de ces problèmes de superposition, qui concernent tous les soutènements butonnés, doit avoir lieu au plus tard lors de la **réunion de coordination, organisée avant le démarrage des travaux**.

4.2 MODE OPÉRAIRE AU NIVEAU D'UNE PASSE

Pour chaque passe, cette solution technique impose toujours le même enchaînement de tâches ; ce qui permet de décrire le mode opératoire générique suivant :

- **Ouverture d'une passe par terrassement avec profilage soigné.** Au niveau de la première ceinture, en tête de l'ouvrage, il peut être nécessaire de mettre en place un coffrage et/ou un dispositif de protection pour éviter la projection de béton en dehors de l'emprise du chantier. Il peut également être nécessaire de projeter du béton sur quelques centimètres (un gunitage) pour assurer la stabilité.
- **Piochage du béton en limite des passes adjacentes/sus-jacentes déjà projetées et dégagement des armatures de recouvrement.** Ce piochage est nécessaire pour assurer un bon contact béton/béton entre passes et ainsi éviter les infiltrations d'eau. Le piochage en biseau vers la terre limitera les infiltrations par des fissures potentielles. Le recouvrement des armatures entre passes permet d'obtenir un voile béton armé continu.

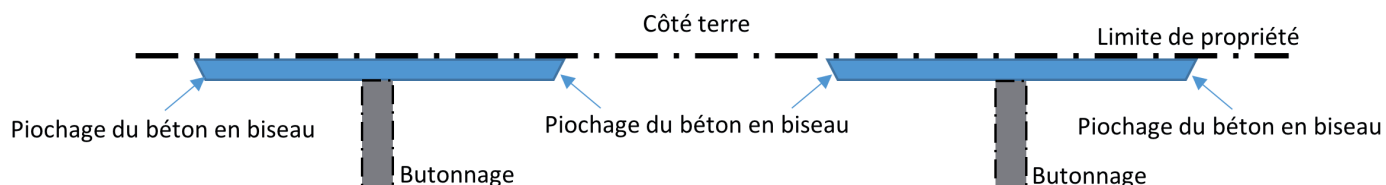


Figure 4-1 : Illustration du principe de piochage du béton en limite des passes adjacentes – Schéma en plan

- **Mise en place du système de drainage.** Le système de drainage est mis en place dès les phases provisoires¹⁶. Il est constitué de barbacanes et éventuellement de bandes drainantes verticales. Le chapitre 4.5 précise ces dispositions constructives.
- **Mise en place de l'ensemble des armatures.** Dans le détail, il s'agit des armatures (y compris recouvrements¹⁷ et dispositifs pour garantir les enrobages) :
 - > Du voile en partie courante côtés extrados et intrados (avec calage provisoire) ;
 - > Des bandes noyées du système de butonnage ;
 - > Des corbeaux (si en béton armé) ;
 - > Nécessaires au fonctionnement mécanique du voile en phase définitive ;
 - > D'attentes au niveau des dalles, des voiles et des poutres.
- **Projection du béton jusqu'à ce qu'il recouvre superficiellement les armatures côté intrados.**
- **Mise en place du système de butonnage dit « provisoire ».** Lorsqu'il n'y a qu'un seul niveau de butonnage, la stabilité en rotation de la passe est assurée par divers mécanismes dont la mise en butée du voile au-dessus ou en-dessous de l'appui.

Cet enchaînement doit impérativement être réalisé dans la journée. Il est à noter qu'à ce stade, l'épaisseur nominale du voile n'est pas encore atteinte.

L'épaisseur courante des voiles par passes est comprise entre 20 et 30 cm.

Entre 30 cm et 50 cm d'épaisseur, il est usuel de réaliser le voile en deux étapes de projections (hors finition) pour permettre un temps de prise suffisant.

Une optimisation des étapes et épaisseurs de projection passe par un plot d'essais.

4.3 MODE OPÉRATOIRE AU NIVEAU D'UNE CEINTURE

Pour créer une ceinture, l'entreprise réalise plusieurs passes en alternance. Pour réaliser des passes adjacentes, il faut s'assurer de la montée en résistance du béton projeté. Un délai de 48 heures est généralement nécessaire pour obtenir une résistance suffisante.

La ceinture est terminée lorsque :

- L'entreprise a projeté du béton pour atteindre l'épaisseur nominale du voile¹⁸ et a créé les corbeaux prévus ;
- L'entreprise a mis en place un système de butonnage dit « provisoire »¹⁹ ou dit « définitif » ;
- Le fonctionnement du système de drainage a été vérifié (*a minima* une absence de béton projeté dans les barbacanes) ;
- L'instrumentation sur le voile a été mise en place.



Figure 4-2 : Illustration d'un calage du ferrailage pendant la projection du béton (photo du haut), d'un bouton « provisoire » et d'un bouton « définitif » (photo du bas)

¹⁶ Le système de drainage est indispensable vis-à-vis des événements pluvieux importants et imprévisibles.

¹⁷ Les armatures doivent disposer d'un certificat d'aptitude au pliage / dépliage.

¹⁸ Cette étape inclut la pose et la dépose de guides verticaux permettant la finition du voile (dressement à la règle, puis finition brute ou talochée).

¹⁹ Cette étape inclut le dégarnissage (par piochage) du béton autour de l'empreinte des butons sur le voile ainsi que son comblement et sa finition au niveau de l'empreinte. En aucun cas du béton tombé au sol peut être utilisé.

4.4 MODE OPÉRATOIRE DU TERRASSEMENT ASSOCIÉ AUX VOILES PAR PASSES

4.4.1 BANQUETTES NORMALES ET BANQUETTES INVERSÉES

La réalisation des voiles d'infrastructure par passes implique la réalisation de banquettes de terrassement.

Ces banquettes peuvent être normales ou inversées.

La technique de la banquette normale permet de travailler dans un environnement dégagé.

La technique de la banquette inversée permet d'améliorer le fonctionnement mécanique du système de butonnage « provisoire ».

4.4.2 PRÉTERRASSEMENT

Il est possible de faire un préterrassement sur deux ceintures au maximum en maintenant une banquette (risberme) avant de démarrer les voiles d'infrastructure par passes (voir partie droite de la Figure 4-3). Cela est d'ailleurs de nature à limiter la co-activité et à assurer la sécurité des personnels lors de la phase de mise en place des semelles des butons. Il faut néanmoins :

- Garantir une largeur de travail suffisante, de l'ordre de 3 à 4 mètres *a minima* ; point critique lors de la projection du béton au niveau de la première ceinture ;
- Fonder les butons « provisoires » sous ce niveau de préterrassement ;
- Conserver suffisamment de terre pour assurer une éventuelle mise en sécurité au niveau d'un voile.

4.4.3 PHASAGE DES TERRASSEMENTS

Il est important de préciser où l'entreprise va débiter les travaux de projection des voiles réalisés par passes alternées.

Si pour permettre d'achever l'évacuation des terres, l'entreprise termine très généralement du côté de l'accès principal (sur une rue), il n'est pas toujours évident de savoir dans quel secteur les travaux vont débiter.

Pour assurer une éventuelle mise en sécurité à l'aide de butons et de terre, il est fortement recommandé de ne pas terminer par le tronçon où les risques sont les plus élevés.

En cas d'avoisinant compatible avec la technique des voiles par passes, il est recommandé :

- De mettre en place une première ceinture avant d'entamer les terrassements sous le niveau de ses fondations ;
- De s'assurer que la hauteur de la ceinture permette le recouvrement de la base du mur et que le butonnage associé permette un blocage des fondations et de leur assise.

Deux exemples de phasages de terrassements sont proposés en annexes. Ils sont donnés à titre informatif.

4.4.4 CAS D'UN ARRÊT PROLONGÉ DES TRAVAUX

Comme pour tous les soutènements, en cas d'un arrêt prolongé des travaux, des déplacements plus importants sont possibles. De ce fait et *a minima*, il est nécessaire d'adapter la surveillance des ouvrages et des avoisinants. Une justification des ouvrages avec les paramètres « long terme » et une mise en sécurité (butonnage et remblayage) peuvent s'avérer nécessaires.

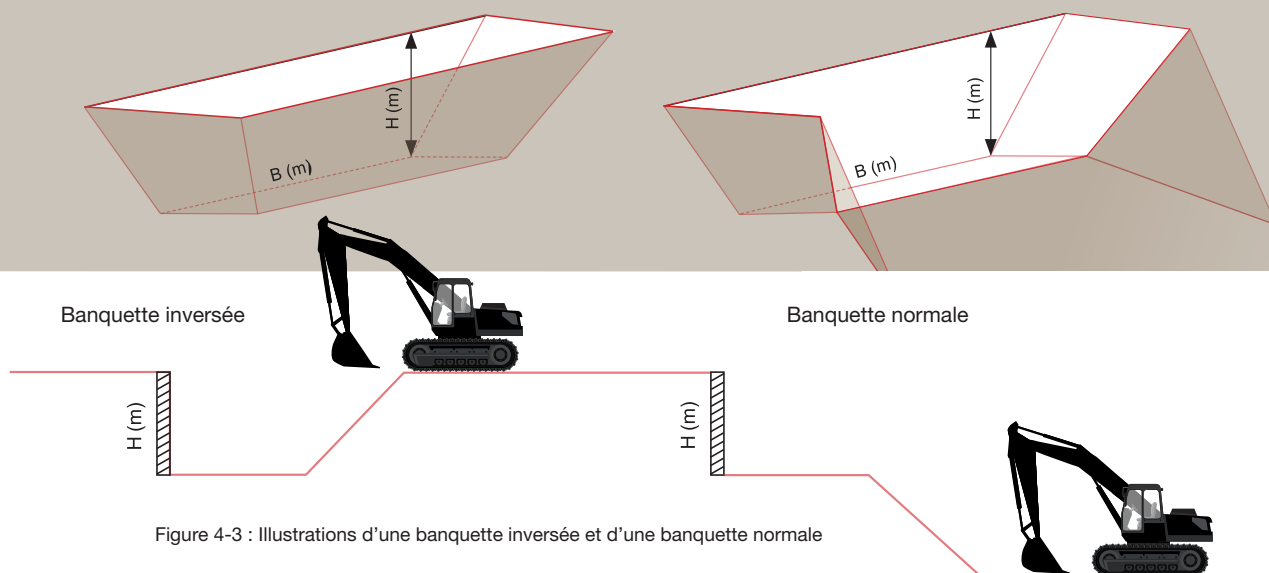


Figure 4-3 : Illustrations d'une banquette inversée et d'une banquette normale

4.5 DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES POUR LES VOILES PAR PASSES

4.5.1 SYSTÈME DE BUTONNAGE (BUTON + SEMELLE)

Tout butonnage commencé doit être terminé avant de réaliser la passe suivante.

Le buton est mis en place au niveau de son corbeau puis au niveau de sa semelle en pied (voir Figure 4-4).

La semelle préfabriquée doit être posée sur du sol en place et non foisonné (voir Figure 4-4).

La semelle peut également être bétonnée pleine fouille.

Le serrage du buton est nécessaire. Il est généralement assuré par des coins au niveau du corbeau (voir Figures 4-5 & 4-6).

De façon alternative, la mise en pression au niveau de la semelle peut se faire via une pelle hydraulique (voir Figure 4-4).

Pour des questions de sécurité, l'accès dans les fouilles des semelles est interdit et ces semelles sont recouvertes de remblais.

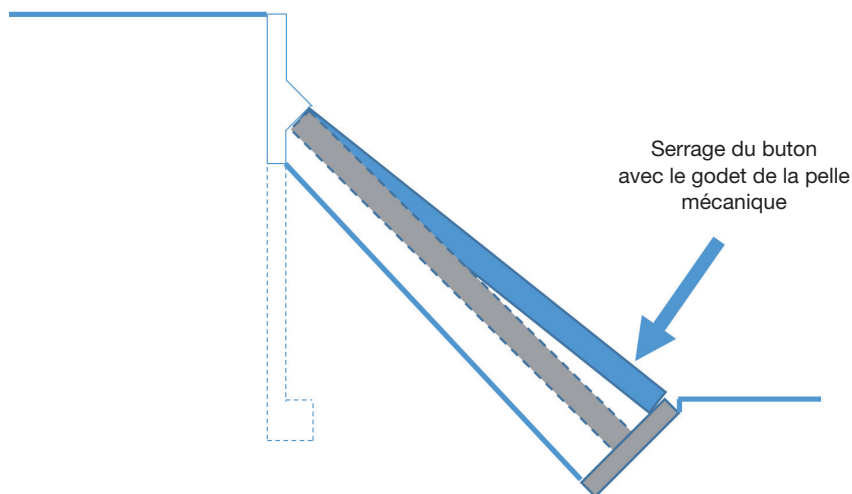


Figure 4-4 : Illustration du serrage d'un buton au niveau de la semelle



Figure 4-5 : Buton serré par des coins au niveau du corbeau

Lorsque le fond de fouille est destiné à recevoir un dallage, des dispositions spécifiques de contrôle de remblayage du volume de la fouille creusée pour mettre en place la semelle de buton, doivent être prises pour que la portance générale de la plate-forme soit assurée en ce point singulier (après dépose des butons). Ces dispositions sont identiques à celles du remblayage d'une tranchée.

Pour les semelles de butons qui se situent à proximité des semelles de fondation de l'ouvrage et pour les radiers, la compatibilité et l'interaction des systèmes de fondation doit être analysée. Il est possible :

- De couler les semelles de butons pleine fouille ;
- D'abaisser le niveau de fondation des semelles de l'ouvrage ;
- De remblayer en gros béton au-dessus des semelles de butons (pour éviter un compactage du remblais).

Contre un mitoyen, il est nécessaire de mettre en place une ligne de butons au niveau de l'arase inférieure de ses fondations. Ces butons doivent être « définitifs ».

Il est impératif de maintenir le système de butonnage jusqu'à reprise des efforts par la structure. En effet, le système de butonnage correspond au seul élément structural qui assure la stabilité du voile avant que ne débutent les travaux de l'entreprise de gros-œuvre.

Lors de la dépose du système de butonnage, le béton de la paroi est pioché sur 30 mm par rapport au nu, au niveau des corbeaux. Les armatures non utilisées sont coupées de manière à assurer un enrobage de 30 mm.

Généralement, les semelles des butons sont laissées en place sous le fond de fouille.

4.5.2 SYSTÈME DE DRAINAGE

Le drainage en phase provisoire est toujours nécessaire. Il se justifie en particulier au voisinage de réseaux dont le caractère non-fuyard n'est pas vérifié et lors d'intenses épisodes pluvieux en cours de terrassement.

Il est recommandé de prévoir *a minima* une barbacane, d'un diamètre minimal de 6 cm, tous les 10 m² de voile projeté.

En cas d'emploi de bandes drainantes, il est recommandé :

- De limiter le taux de couverture à 50%. Dans des terrains limoneux et/ou à passées finement sableuses où les bandes drainantes peuvent être à l'origine d'instabilités, le taux de couverture pourra être plus faible ;

- D'installer les bandes drainantes à partir d'environ 50 centimètres sous le niveau du terrain naturel. Cette disposition permet d'éviter le drainage des eaux de surface (voir Figure 4-7).

Le produit doit disposer d'un référentiel (avis technique de la CCFAT par exemple). Son domaine d'emploi doit être compatible avec les caractéristiques du chantier :

- Non endommagement de la partie drainante sous l'effet de la projection du béton. Pour éviter la présence de béton projeté au sein des bandes drainantes, elles sont nécessairement équipées d'une couche filtrante sur chacune des deux faces ;
- Hauteur de soutènement compatible avec le domaine d'emploi du produit.

Le système de drainage vient en recouvrement entre deux ceintures pour assurer la continuité du drainage sur toute la hauteur de l'ouvrage, jusqu'à son exutoire (voir Figure 4-7).

L'évacuation des eaux drainées en pied ne peut se faire par un drain collecteur traditionnel. L'évacuation des eaux drainées doit se faire par l'intermédiaire de barbacanes mises en œuvre avant la phase de projection du béton (voir Figure 4-8). Elles permettent de récupérer les eaux drainées en pied de voile et de les diriger vers l'exutoire. L'exutoire peut être une cunette en pied de voile, un collecteur sous le dallage, un tapis drainant...

On veillera à ne pas boucher la barbacane lors de la projection du béton.



Figure 4-6 : Illustration du serrage de butons d'angle à l'aide de coins en bois installés au niveau des corbeaux en béton armé

En complément du drainage, il est recommandé de protéger un talus en tête de voile en le bâchant et en veillant à ce que la bâche conduise l'eau de pluie dans la fouille et non à l'arrière du voile. Cependant, les eaux de pluie dans la fouille doivent être collectées et évacuées, en particulier pour ne pas altérer les sols d'assise des semelles.

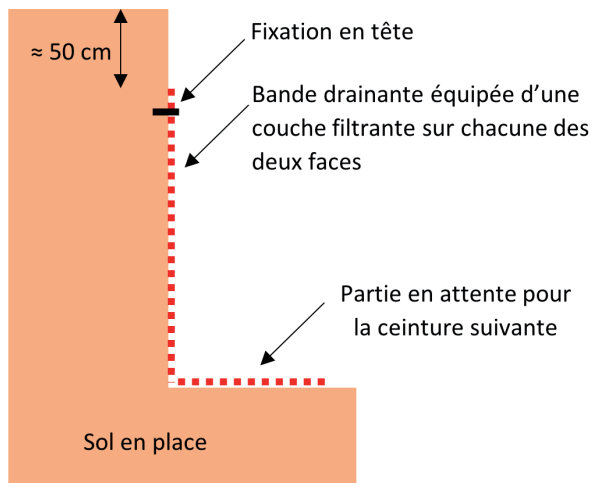


Figure 4-7 : Illustration de la pose du drainage vertical dans la réalisation de voiles par passes

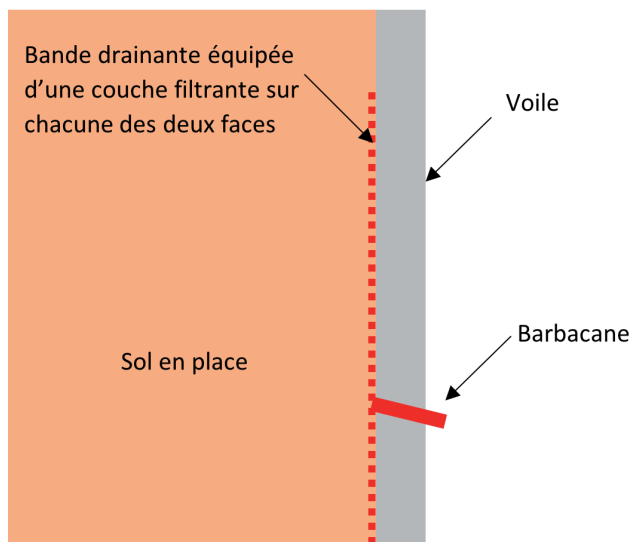


Figure 4-8 : Illustration de la pose d'une barbacane et de la connexion avec le drainage vertical

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 PROJec-tion 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.



CHAPITRE 5

SUIVI, CONTRÔLE ET RÉCEPTION DES VOILES PAR PASSES

- 5.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX D'UNE PROCÉDURE
DE SUIVI
- 5.2 PÉRIMÈTRE DE LA SURVEILLANCE DES VOILES
PAR PASSES ET DE LEUR ENVIRONNEMENT (ZIG)
- 5.3 SURVEILLANCE DES VOILES PAR PASSES
ET DE LEUR ENVIRONNEMENT (ZIG)

5 SUIVI, CONTRÔLE ET RÉCEPTION DES VOILES PAR PASSES

Dans le cadre du suivi et du contrôle des voiles par passes, l'entreprise en charge des travaux, doit :

- Etablir au fur et à mesure les documents synthétiques précisant les conditions géotechniques rencontrées ;
- Suivre le programme d'auscultation, défini sur la base des pièces marché, permettant d'évaluer :
 - > Le comportement des ouvrages en phase de construction ;
 - > L'impact sur les avoisinants.

En cas d'atteinte du seuil d'alerte, les dispositions conservatoires nécessaires sont mises en œuvre (voir §2.4.4).

En cas d'atteinte du seuil d'arrêt, l'ouvrage doit être mis en sécurité (butonnage et remblayage) (voir §2.4.4).

5.1 PRINCIPES FONDAMENTAUX D'UNE PROCÉDURE DE SUIVI

Pour chaque type de mesure (topographique, piézométrique, ...), la procédure de suivi doit décrire :

- Ce qui est suivi (déplacement de l'ouvrage, déplacement d'un avoisinant, dimensions des passes, position d'un bouton, niveau d'eau, ...) ;
- Les moyens mis en œuvre pour ce suivi (visuel, appareil de mesure + précision, ...) ;
- Les moyens prévus pour la protection de l'instrumentation ;
- La valeur de l'état initial dit « 0 » (avant le démarrage des travaux) ;
- La durée (par rapport aux phases du planning) et la fréquence de la mesure ;
- Le traitement des données mesurées ;
- L'interprétation des données mesurées en regard des valeurs seuils (vitesse d'acquisition des déplacements et tendances entre deux mesures) ;
- La définition des actions correctives selon les différents seuils ;
- La fiche d'autocontrôle permettant d'assurer et de vérifier de façon synthétique le suivi (voir exemple en Annexe 5-B).

L'instrumentation de l'ouvrage et des avoisinants doit faire l'objet d'une synthèse par les entreprises et d'une diffusion rapide à l'ensemble des intervenants concernés.

5.2 PÉRIMÈTRE DE LA SURVEILLANCE DES VOILES PAR PASSES ET DE LEUR ENVIRONNEMENT (ZIG)

La surveillance des voiles par passes et de leur environnement (ZIG) débute avec les premiers terrassements et s'achève *a minima* lorsque la structure de l'ouvrage assure le butonnage définitif de la paroi.

Par exemple, pour un projet immobilier avec deux niveaux de sous-sol, la surveillance des voiles par passes et de leur environnement (ZIG) ne doit pas s'arrêter avant que le plancher haut du premier niveau de sous-sol soit construit et apte à reprendre les efforts de poussée.

Cette surveillance concerne :

- Tous les points décrits dans le Tableau 5-2 ;
- Tous les points décrits dans le Tableau 5-3 ;
- Le plan de contrôle mis en place par l'entreprise en charge des travaux de voiles par passes (voir exemple en Annexe 5-A) ;
- Les fiches d'autocontrôle renseignées par l'entreprise en charge des travaux de voiles par passes (voir exemple en Annexe 5-B).

Elle est anticipée de façon exhaustive au plus tard lors des études d'exécution, au moyen de la réunion de coordination qui devra aborder les points techniques regroupés dans le Tableau 5-1.

Il est nécessaire de réaliser cette réunion de coordination des études géotechniques et des études de structure avant le démarrage des travaux.

Elle implique tous les intervenants (Maître d'ouvrage, Maître d'œuvre, géotechniciens, entreprises, leurs bureaux d'études, contrôleur technique et coordonnateur SPS²⁰).

²⁰ La mission du coordonnateur SPS n'étant en général pas bien connue, on rappelle qu'il peut imposer temporairement un « arrêt de tâche » en cas de danger grave et imminent tels :

- Qu'un système de butonnage absent lorsque l'entreprise réalise les voiles par passes ;
- Qu'un système de butonnage retiré au moment où l'entreprise de gros-œuvre construit la structure définitive.

Items
• Connaissances du niveau de fondation des avoisinants (dont réseaux et bassins)
• Connaissances des niveaux d'eau
• Connaissances des niveaux du terrain avant, pendant et après travaux (de voirie en particulier)
• Dimensions des passes et phasage de réalisation des voiles
• Fonds de plans de coffrage avec impacts des rampes d'accès aux différents niveaux d'infrastructures, des voiles de refend et des poutres d'infrastructure
• Fond de plan d'implantation des fondations du bâtiment
• Fond de plan d'implantation du système de butonnage (en plan et en coupe)
• Stratégie de dépose du système de butonnage et traitement des corbeaux au niveau du voile
• Rebouchage des barbacanes provisoires
• Identification des reprises de bétonnage (liaisons entre passes et corbeaux) et des barbacanes provisoires nécessitant un traitement particulier (LMTP selon la norme NF DTU 14.1)
• Procédure de surveillance du comportement des voiles par passes et des avoisinants (mise en place de l'instrumentation, recueil des données, actions prévues en cas d'atteinte du seuil d'alerte et actions prévues en cas d'atteinte du seuil d'arrêt)

Tableau 5-1 : Points à l'ordre du jour de la réunion de coordination avant le démarrage des travaux

On rappelle qu'il est impératif que les incertitudes sur la nature, la géométrie et les arases inférieures des fondations soient levées pour l'ensemble des avoisinants idéalement au terme de la phase PRO afin de fiabiliser la solution voile par passes. Il est entendu que la connaissance de ces informations doit être effective au plus tard au démarrage des études d'exécution.

A l'issue de cette réunion, il pourra apparaître nécessaire d'adapter le phasage, le planning voire les moyens.

A titre d'exemples, nous rappelons que :

- Un dispositif de rabatement de nappe n'est pas efficace de façon instantanée. Le cas échéant, il ne faudra pas commencer la première ceinture avant que le rabatement de nappe soit effectif ;
- En lien avec la stratégie de débutonnage, un complément d'études du voile (et des refends) est nécessaire si l'on envisage de le faire fonctionner avec un sens de portée horizontale, entre deux voiles de refend, avant qu'il fonctionne de plancher à plancher.

5.3 SURVEILLANCE DES VOILES PAR PASSES ET DE LEUR ENVIRONNEMENT (ZIG)

En cours de travaux, une attention particulière est portée par les divers intervenants (entreprise de terrassement, entreprise de voiles par passes, entreprise de gros-œuvre) pour garder en état de fonctionnement l'instrumentation nécessaire à la surveillance des voiles par passes et de leur environnement (ZIG).

Le Tableau 5-2 précise la ou les disposition(s) adaptée(s) ainsi que leur fréquence minimale d'utilisation pour vérifier les hypothèses définies en phase conception et retenues lors des études d'exécution.

Le Tableau 5-3 précise la ou les disposition(s) adaptée(s) ainsi que leur fréquence minimale d'utilisation pour surveiller le comportement des voiles par passes et de leur environnement (ZIG).

En complément des Tableaux 5-2 et 5-3, l'entreprise met en place son plan de contrôle (voir exemple en Annexe 5-A) et renseigne ses fiches d'autocontrôle (voir exemple en Annexe 5-B).

Il est à noter que l'essentiel du contenu des Tableaux 5-2 et 5-3 est applicable à tous les types de soutènements. Il est recommandé que les contrôles décrits dans ces tableaux constituent des points d'arrêt, prévus dans les Dossiers de Consultation des Entreprises puis intégrés dans les marchés de travaux.

Vérification des hypothèses	Dispositions adaptées	Fréquences min.	Commentaires et/ou conséquences
Type, géométrie, état et niveau des fondations des mitoyens	Contrôle visuel*	A l'avancement des travaux	Avis G4/MOe nécessaire en cas de constat d'écart.
Nature et compacité des terrains excavés	Contrôle visuel*	En continu à l'avancement des terrassements	Avis G4/MOe nécessaire en cas de constat d'écart. Attention aux effets de la pluviométrie sur la compacité des matériaux.
Arrivées d'eau	Contrôle visuel*	En continu à l'avancement des terrassements	Attention aux effets de la pluviométrie et aux réseaux fuyards qu'ils soient sous pression ou non.
Niveau de nappe	Piézomètre	Une fois par semaine	Prévoir des piézomètres (idéalement hors emprise terrassement). Attention : primordial en cas de rabattement de nappe.
Vérification de la nature du support des semelles des butons	Contrôle visuel*	A chaque lit de butons	Pour éviter la dégradation du support, il est impératif que les semelles soient mises en place juste après la phase de terrassement.
Vérification des dimensions et de la stabilité des banquettes/risbermes prévues	Contrôle visuel* + mesure	En continu à l'avancement des terrassements	

Tableau 5-2 : Vérification des hypothèses

*Les contrôles visuels de l'entreprise sont avantageusement étayés par des photographies voire des vidéos.

Suivi du comportement	Dispositions adaptées	Fréquences min.	Commentaires et/ou conséquences
Vérification des déplacements horizontaux et verticaux des ouvrages avoisinants	Cibles topographiques Fils à plomb Fissuromètre (notamment par fibre optique) Clinomètre	Toutes les semaines	Attention le nombre de relevés sur les avoisinants peut augmenter selon leur comportement et celui du voile par passes (voir seuils et procédure de suivi). Attention aux effets du sous-cavage (affouillement), en particulier sur les tassements des ouvrages avoisinants. En phase de construction de l'infrastructure définitive, il est possible d'espacer les relevés.
Vérification des déplacements horizontaux et verticaux des voiles par passes	Cibles topographiques Fils à plomb	Toutes les semaines	Le nombre de cibles évolue en fonction de l'avancement des ceintures (état 0 spécifique). Il convient qu'il y ait un niveau de cibles en partie basse de chaque niveau d'infrastructure. En phase de construction de l'infrastructure définitive, il est possible d'espacer les relevés.

Tableau 5-3 : Suivi du comportement

*Les contrôles visuels de l'entreprise sont avantageusement étayés par des photographies voire des vidéos.

La synthèse des données obtenues sert de support pour réceptionner les voiles par passes.



ANNEXES

- **ANNEXE CHAPITRE 2-A**
Caractérisation de c_{trav} et φ_{trav} à partir d'essais de tenue des terrains
- **ANNEXE CHAPITRE 2-B**
Sensibilité des avoisinants
- **ANNEXE CHAPITRE 3-A**
Détermination de la contrainte q_{net} des semelles de butons
- **ANNEXE CHAPITRE 4-A**
Exemple d'éléments graphiques pour limiter les problèmes de superposition entre les butons et les éléments de l'infrastructure
- **ANNEXE CHAPITRE 4-B**
Exemple d'éléments graphiques pour éviter les problèmes de superposition et d'interactions entre les semelles de fondation des butons des voiles par passes et les fondations de l'ouvrage
- **ANNEXE CHAPITRE 4-C**
Exemple de phasage avec 2 ceintures
- **ANNEXE CHAPITRE 4-D**
Exemple de phasage avec 4 ceintures
- **ANNEXE CHAPITRE 4-E**
Principales mesures de prévention en lien avec les travaux de voiles par passes
- **ANNEXE CHAPITRE 5-A**
Exemple de plan de contrôle de l'entreprise de voiles par passes
- **ANNEXE CHAPITRE 5-B**
Exemple de fiche d'autocontrôle de l'entreprise de voiles par passes

ANNEXE CHAPITRE 2-A

CARACTÉRISATION DE c_{trav} ET φ_{trav} À PARTIR D'ESSAIS DE TENUE DES TERRAINS

L'objet de la présente annexe est de montrer comment les observations faites lors de l'ouverture d'une fouille, dénommée « Essai de tenue des terrains » (voir Chapitre 2.1.2.2), peuvent être exploitées de façon simple dans l'approche de la cohésion c_{trav} , connaissant *a priori* l'angle de frottement interne à court terme du milieu φ_{trav} .

Si la fouille d'essai de tenue des terrains a été ouverte sur une hauteur h_c pendant 24 ou 48 heures sans présenter de signes d'instabilité, l'observateur peut adapter la formule théorique **pour une tranchée infinie**. Cette formule donne la hauteur critique de stabilité d'un front de taille non surchargé, dans un milieu homogène hors nappe, de caractéristiques intrinsèques (c , φ) et de poids volumique γ soit :

$$h_c = \frac{4 * c * \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}{\gamma}$$

L'angle de frottement interne du milieu reste un paramètre plus facile à appréhender que la cohésion, au moins de façon approximative ; en particulier du fait qu'il reste peu influencé par la teneur en eau alors qu'une partie au moins de la cohésion est due à des phénomènes de succion directement dépendant du degré de saturation du sol.

Ainsi, considérant $\varphi = \varphi_{trav}$ il est possible de déduire

$$c = \frac{c_{trav}}{\eta}$$

Le coefficient de réduction η permet de tenir compte de l'effet de voûte.

La Figure 2-A-1 propose une représentation graphique à l'équilibre limite ($F = 1$), pour $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, de la relation entre h_c , $c = \frac{c_{trav}}{\eta}$ et φ_{trav}

Lorsque l'essai de tenue des terrains concerne plusieurs horizons, il est nécessaire d'en tenir compte au moment de la caractérisation de c_{trav} , φ_{trav} .

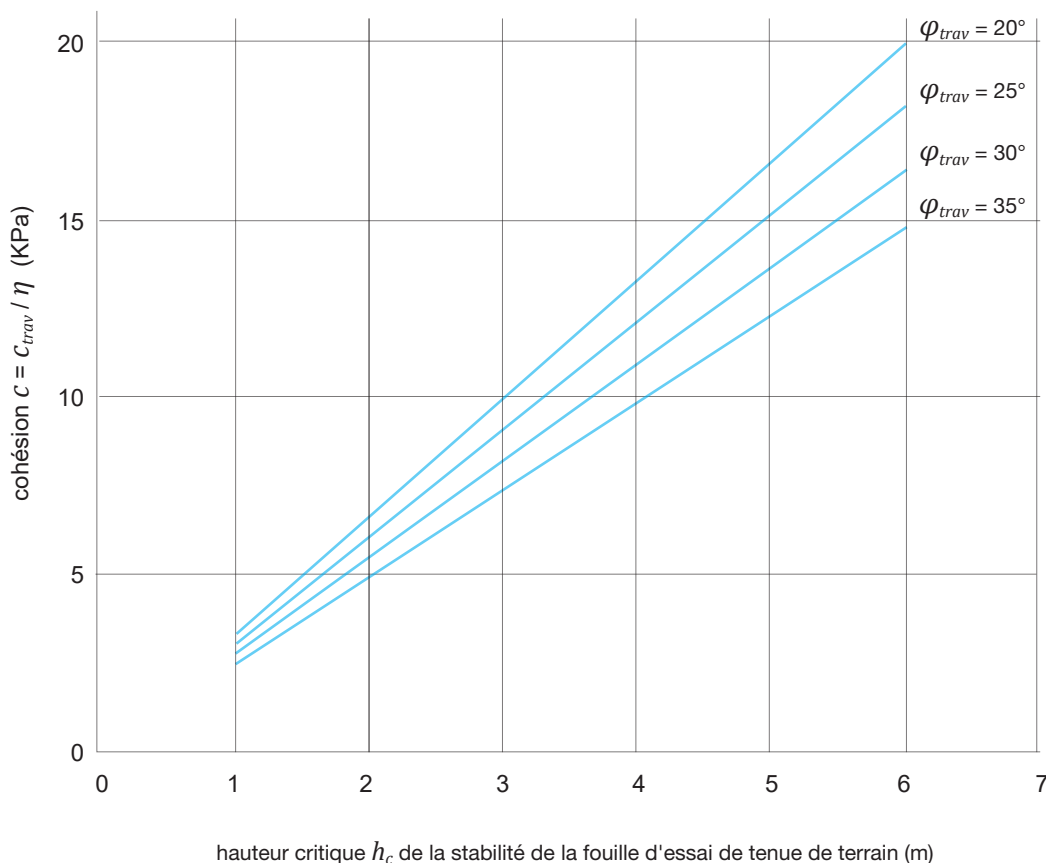


Figure 2-A-1 : Illustration de la relation entre h_c , $c = \frac{c_{trav}}{\eta}$ et φ_{trav} pour $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$

Dans l'objectif de préciser le coefficient de réduction η à prendre en compte, des calculs aux éléments finis 3D ont été réalisés dans le cadre de l'élaboration de ces recommandations. Ces calculs ont été menés pour des terrains élasto-plastiques avec le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

Ils confirment que l'effet de voûte joue un rôle important sur la stabilité du parement même sur des fouilles d'assez grande longueur (voir Figure 2-A-2).

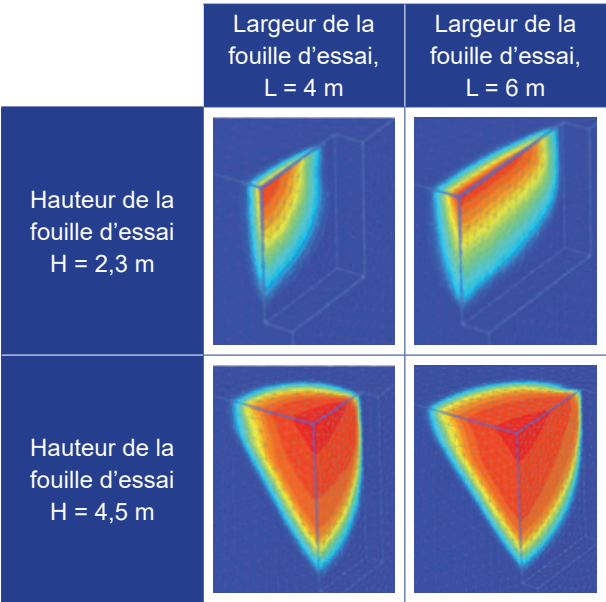


Figure 2-A-2 : Illustrations des champs d'incrément de déplacements, lors de la dernière phase des calculs aux éléments finis 3D, c'est-à-dire juste avant la rupture, qui mettent en évidence la géométrie des surfaces de rupture liée à l'effet de voûte²¹

Ainsi, la cohésion réelle déduite de la simple observation de la stabilité d'une fouille d'essai de tenue des terrains est moindre que la cohésion déduite par la formule simplifiée donnée ci-avant pour une tranchée infinie et sans prendre en compte la troisième dimension.

Pour pallier l'action stabilisante de l'effet de voûte, il est donc recommandé de prendre en compte un coefficient de réduction η sur la cohésion déduite de la seule observation de la fouille d'essai par la formule simplifiée donnée précédemment. Ce coefficient de réduction η est laissé à l'appréciation du géotechnicien car il dépend de nombreux facteurs (hétérogénéité du milieu, teneur en eau du sol variable en fonction des saisons, longueur réelle de la fouille d'essai de tenue des terrains, etc.).

A défaut de justifications particulières, les coefficients de réduction η présentés dans le Tableau 2-A-1 peuvent être pris en compte.

Rapport longueur/profondeur de la fouille d'essai de tenue des terrains	> 2	> 4	> 6
Coefficient de réduction η sur la cohésion calculée sans prise en compte de l'effet de voûte	0,75	0,90	1,00

Tableau 2-A-1 : Coefficient de réduction η à appliquer sur la cohésion calculée sans prise en compte de l'effet de voûte

²¹ Du fait de la symétrie du problème, la modélisation est faite pour une demi-fouille (un quart du modèle de la tranchée complète).

ANNEXE CHAPITRE 2-B

SENSIBILITÉ DES AVOISINANTS

La sensibilité des avoisinants est présentée en référence à la recommandation GT16R2F1 « Prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains » de l'AFTES publiée en 2018.

ANNEXE CHAPITRE 2-B-1

POURQUOI UNE ÉTUDE DE SENSIBILITÉ ?

Comme pour tous les soutènements, il se produit des déplacements, autour de l'excavation, qui se propagent dans le sol. Ces déplacements, selon leur amplitude et leur direction, peuvent causer des désordres au niveau des avoisinants situés dans la zone d'influence géotechnique de l'ouvrage (bâtiments, ouvrages d'art, chaussées, réseaux enterrés, souterrains, etc.).

ANNEXE CHAPITRE 2-B-2

CARACTÉRISATION DES DÉSORDRES

Le désordre est occasionné sur une construction par une sollicitation mécanique (statique ou dynamique) et constaté à un instant donné. Il peut préexister ou bien être induit par les travaux.

Pour prendre en compte la réponse des constructions aux sollicitations mécaniques induites, on distingue trois niveaux de désordres :

- Désordre architectural ou esthétique : désordre qui affecte l'apparence visuelle d'une construction (fissures de petites dimensions dans les éléments non structuraux, dégradation ou chute d'éléments d'habillage, ...);
- Désordre fonctionnel : désordre qui affecte le confort des utilisateurs, l'usage fonctionnel d'une construction et sa durabilité (sans que cela n'affecte la tenue de la construction) : coincement ou blocage des portes et des fenêtres, perte de verticalité des ascenseurs, dysfonctionnement des réseaux, des machines ou des équipements, ...;
- Désordre structurel : désordre qui affecte la sécurité des occupants et/ou la stabilité de tout ou partie d'une construction : déformation excessive ou instabilité de certains éléments structuraux, possibilité de rupture de certaines parties, ...

Le Maître d'ouvrage peut réduire le risque en provisionnant le coût certain des mesures de protection anticipées des constructions avoisinantes. Ces mesures de protection peuvent être incompatibles avec la solution technique des voiles par passes.

ANNEXE CHAPITRE 2-B-3

DÉFINITION DE LA SENSIBILITÉ

La sensibilité (intrinsèque) est un caractère propre et essentiel d'une construction, indépendant de facteurs extérieurs, qui décrit sa capacité structurale et fonctionnelle à supporter des sollicitations mécaniques extérieures.

On définit la classe de sensibilité d'une construction comme le niveau de sensibilité exprimé en termes qualitatifs ou bien quantitatifs sous la forme d'un indice de sensibilité. Il s'exprime par exemple sous la forme d'une combinaison de facteurs relatifs à :

- La fonction de l'avoisinant et la présence d'équipements sensibles ;
- Les éléments géométriques ;
- La structure porteuse et les matériaux constitutifs ;
- Les éléments de second œuvre ;
- Le mode de fondation ;
- L'état de dégradation.

ANNEXE CHAPITRE 2-B-4

CONTENU DE L'ÉTUDE DE SENSIBILITÉ

Cette étude repose sur :

- Une visite de l'avoisinant et en particulier des infrastructures ;
- Une recherche bibliographique : plan cadastral, photo aérienne, site internet Geoportail (IGN) et équivalents, collecte et analyse des plans disponibles sur les fondations et structures des bâtiments ;
- Un recensement des arrêtés de catastrophes naturelles (en particulier ceux concernant les mouvements de terrain) ;
- Une présentation générale de l'avoisinant (surface au sol, nombre d'étages en élévation et de sous-sols, sa fonction, ...) et son histoire antérieure (modification et/ou travaux subis).

La visite de l'avoisinant doit permettre :

- La collecte complète d'éléments sur la nature, la structure, les fondations, les modifications, la maintenance, l'état de conservation, les pathologies existantes, ... ;
- En l'absence de plans, l'analyse du mode probable de conception et de fondation de l'avoisinant (en fonction de la date probable de construction et du contexte géotechnique).

Les conclusions du diagnostic doivent porter sur :

- Le constat du niveau de dégradation apparent de l'avoisinant (fissuration, déformation, humidité, ...) basé *a minima* sur l'inspection visuelle des parties communes et des façades ;
- Un avis global à dire d'expert sur l'état de conservation ;
- La présence d'équipements et d'installations sensibles ;
- Les éventuelles incertitudes associées à cette description et donc la nécessité d'effectuer des investigations complémentaires pour affiner l'analyse de risques et préciser les conclusions (exemple : fouille de reconnaissance des fondations).

Ces éléments sont ensuite utilisés pour définir la sensibilité intrinsèque de l'avoisinant qui est établie :

- De façon qualitative, à dire d'expert, en se basant sur des situations similaires documentées pour associer l'avoisinant à une classe de sensibilité ;
- Ou de façon quantitative, en pondérant chacun des critères essentiels et sous-critères relatifs combinés pour hiérarchiser les facteurs et évaluer un indice de sensibilité.

Classe de sensibilité	Dénomination
Classe 1	Peu sensible
Classe 2	Sensible
Classe 3	Très sensible
Classe 4	Extrêmement sensible

Tableau 2-B-1 : Exemple de classes de sensibilité des avoisinants

A partir de la sensibilité intrinsèque des avoisinants, les seuils admissibles, pour chaque classe de désordre et pour chaque avoisinant ou groupe d'avoisinants peuvent être établis :

- A dire d'expert ;
- Par une modélisation qui tient compte de l'état initial de l'avoisinant et permet d'en calculer les états limites ;
- En utilisant les seuils admissibles fournis dans la littérature technique pour certaines typologies d'avoisinants en bon état de conservation, minorés par l'indice de sensibilité.

Une vue en plan des avoisinants, en correspondance de la ZIG associée aux travaux envisagés, permet de bien expliciter leur implantation avec leur sensibilité.

ANNEXE CHAPITRE 3-A

DÉTERMINATION DE LA CONTRAINTE q_{net} DES SEMELLES DE BUTONS

Cette annexe vient compléter le Chapitre 3.3.6 - Calcul des semelles des boutons. Nous rappelons que ce chapitre propose de retenir forfaitairement $i_\beta = 0,5$ lorsque :

- La surface d'assise des semelles est perpendiculaire à la résultante des efforts dans les boutons, ce qui implique $i_\delta = 1$ (voir partie droite de la Figure 3-A-1) ;
- L'inclinaison de la surface d'assise des semelles est au plus près de 45° par rapport à la verticale – pour limiter le risque de glissement (voir partie droite de la Figure 3-A-1) ;
- Les semelles ne se trouvent jamais à proximité de la tête d'une risberge provisoire (terrassement en banquette normale).

De façon générale, deux configurations de semelle de fondation des boutons inclinés sont rencontrées (voir Figure 3-A-1) :

- Semelle horizontale sous une charge inclinée ;
- Semelle inclinée sous une charge perpendiculaire. La charge est légèrement inclinée en présence de deux boutons sur une même semelle ; mais dans la majorité des cas, les charges provenant des boutons sont centrées sur les semelles. Il n'y a pas de moment.

Pour la 1^{ère} configuration, la contrainte q_{net} du sol sous la semelle doit être estimée conformément à la norme NF P94-261, en particulier le coefficient de réduction i_δ lié à l'inclinaison du chargement (§D.2.4 de la norme NF P94-261).

Pour la 2^{ème} configuration, le coefficient de réduction à appliquer pour calculer la contrainte q_{net} n'est pas précisé dans la norme NF P94-261. La configuration la plus proche est celle d'une semelle située au bord d'un talus (voir Figure 3-A-2).

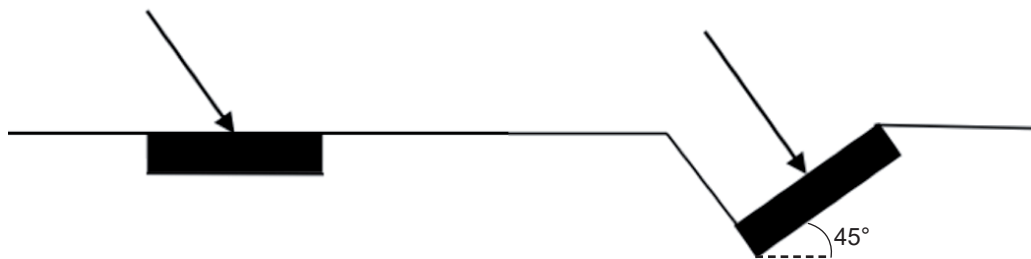


Figure 3-A-1 : Configurations courantes des semelles de fondation des boutons inclinés

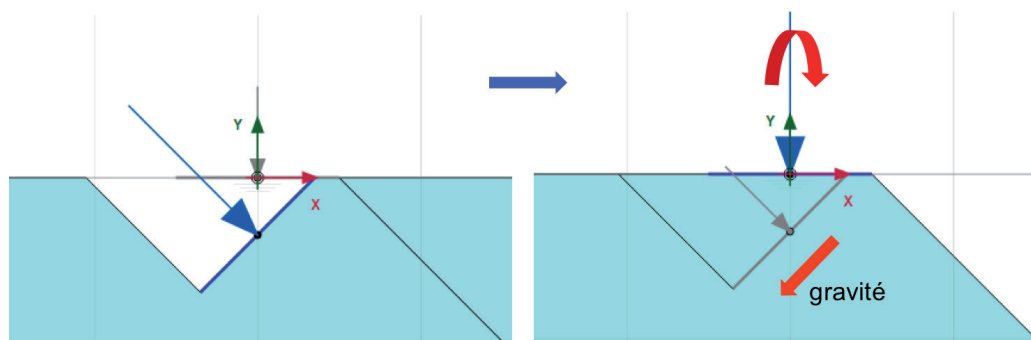


Figure 3-A-1 : Configurations courantes des semelles de fondation des boutons inclinés

Il suffit de « tourner » le modèle de la semelle inclinée (ensemble semelle + sol de fondation) pour retrouver le modèle de la semelle au bord d'un talus. Notons cependant que dans ce modèle « tourné », la gravité est dirigée vers l'intérieur (du massif de sol) ; ce qui est favorable à la portance de la semelle.

Dans l'objectif de préciser le coefficient i_β à prendre en compte pour calculer q_{net} , des calculs aux éléments finis 2D ont été réalisés. Ils montrent que la contrainte limite de la semelle inclinée est environ 15% plus importante que celle de la semelle équivalente au bord d'un talus. Ces calculs tests ont été menés pour :

- Une semelle **filante** (largeur 1 m, inclinée 45°) ;
- Différents jeux de paramètres de sol :
 $c = 5 \text{ kPa}$; $\varphi = 25^\circ$
 $c = 10 \text{ kPa}$; $\varphi = 30^\circ$

L'étude de la portance des semelles au bord d'un talus a fait l'objet de travaux de recherches au LCPC²².

L'annexe D.2.5 de la norme NF P94-261 reprend les formules empiriques de calcul de i_β proposées par cette étude pour les semelles **filantes**.

Il a également été montré par cette étude que dans une même condition géotechnique (voir Figure 3-A-4) :

$$i_\beta (\text{semelle rectangulaire}) > i_\beta (\text{semelle filante de même largeur})$$

Des formules empiriques pour le calcul du coefficient i_β des semelles **rectangulaires** considérant un coefficient de forme C_f ont été également proposées par cette étude :

$$i_\beta = 1 - C_f * [1,8 * \tan \beta - 0,9 * \tan^2 \beta] * [1 - d / (C_f * 6 * B)]^2$$

avec $C_f = 1 - 0,4 * B / L$

Ainsi, lorsque l'inclinaison de la surface d'assise des semelles s'éloigne de 45° par rapport à la verticale, il est admis de calculer i_β à partir de la formule suivante :

$$i_{\beta ; cf; De / B} = i_{\beta ; f; De / B} + (i_{\beta ; c; De / B} - i_{\beta ; f; De / B}) * [1 - e^{-0,6 * c / (\gamma * B * \tan \varphi)}]$$

Avec :

- $i_{\beta ; c; De / B} = 1 - \beta / \pi * [1 - d / 8 / B]^2$ pour $d < 8 * B$
- $i_{\beta ; f; De / B} = 1 - C_f * 0,9 * \tan \beta * (2 - \tan \beta) * [1 - (d + D_e / B) / (C_f * 8 * B)]^2$ pour $d + D_e / B < 8 * B$
- $C_f = 1 - 0,4 * B / L$

β	35°						40°						45°					
C	0 kPa		5 kPa		10 kPa		0 kPa		5 kPa		10 kPa		0 kPa		5 kPa		10 kPa	
φ	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°	25°	30°
i_β	0,51		0,56	0,55	0,61	0,59	0,47		0,53	0,52	0,57	0,56	0,46		0,51	0,50	0,56	0,54

Tableau 3-A-1 : Valeurs de i_β pour des semelles carrées dans quelques configurations courantes
 $(B = 1,8 \text{ m}, d = 0 \text{ m}, D_e = 0 \text{ m}, \gamma = 18 \text{ kN/m}^3)$

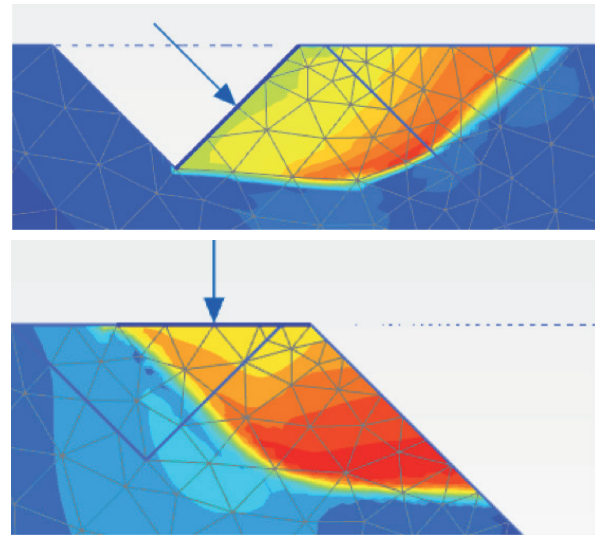


Figure 3-A-3 : Illustration des calculs de la portance d'une semelle inclinée et d'une semelle au bord d'un talus

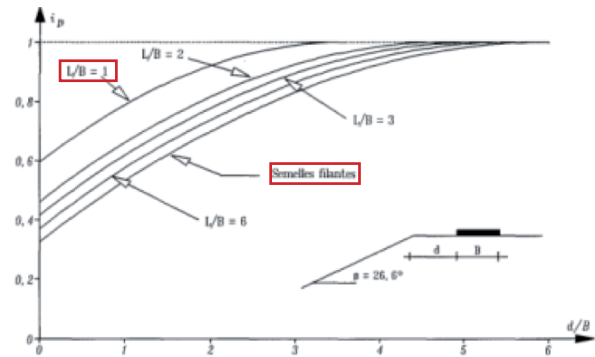


Figure 3-A-4 : Evolution de i_β selon les dimensions des semelles et la distance au bord d'un talus incliné à $\beta = 1V/2H$

²² A noter la réalisation d'essais dans des sables dans les années 1980 et d'essais dans des sols cohérents et mixtes dans les années 1990. Lors de cette étude, les résultats de plusieurs essais en centrifugeuse ont été analysés et confrontés avec d'autres résultats théoriques et expérimentaux dans la littérature. Etude sur modèles centrifuges de la capacité portante de fondations superficielles, LCPC série géotechnique GT 59, Octobre 1994.

ANNEXE CHAPITRE 4-A

Exemple d'éléments graphiques pour limiter les problèmes de superposition entre les butons et les éléments de l'infrastructure

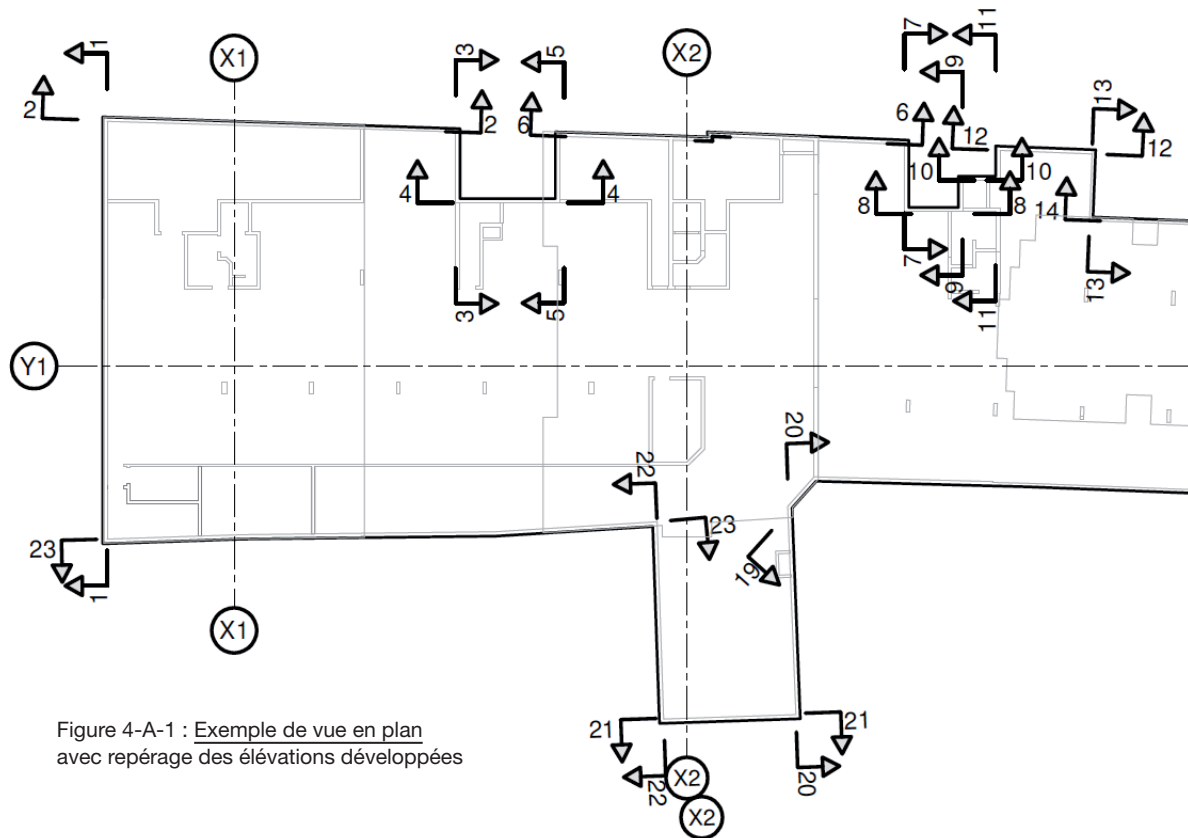


Figure 4-A-1 : Exemple de vue en plan avec repérage des élévations développées

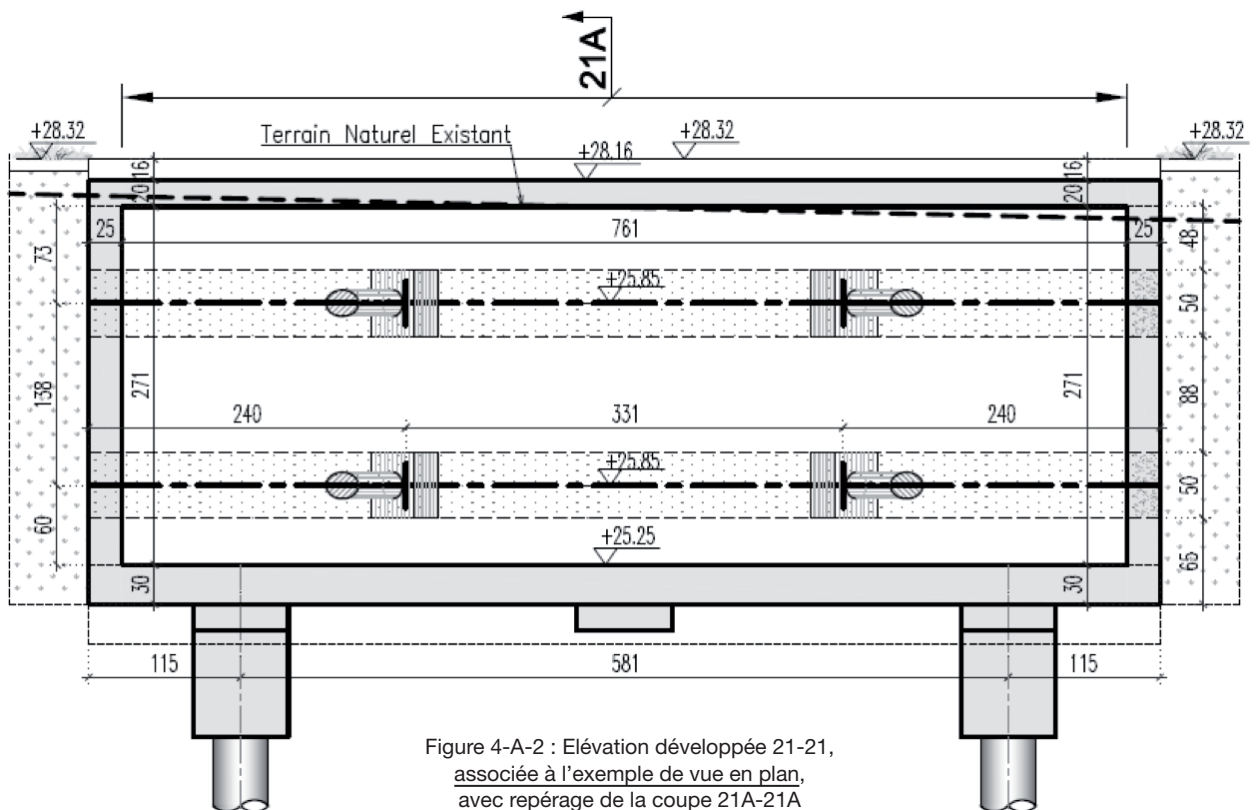


Figure 4-A-2 : Elévation développée 21-21, associée à l'exemple de vue en plan, avec repérage de la coupe 21A-21A



59

ANNEXE CHAPITRE 4-B

Exemple d'éléments graphiques pour éviter les problèmes de superposition et d'interactions entre les semelles de fondation des butons des voiles par passes et les fondations de l'ouvrage

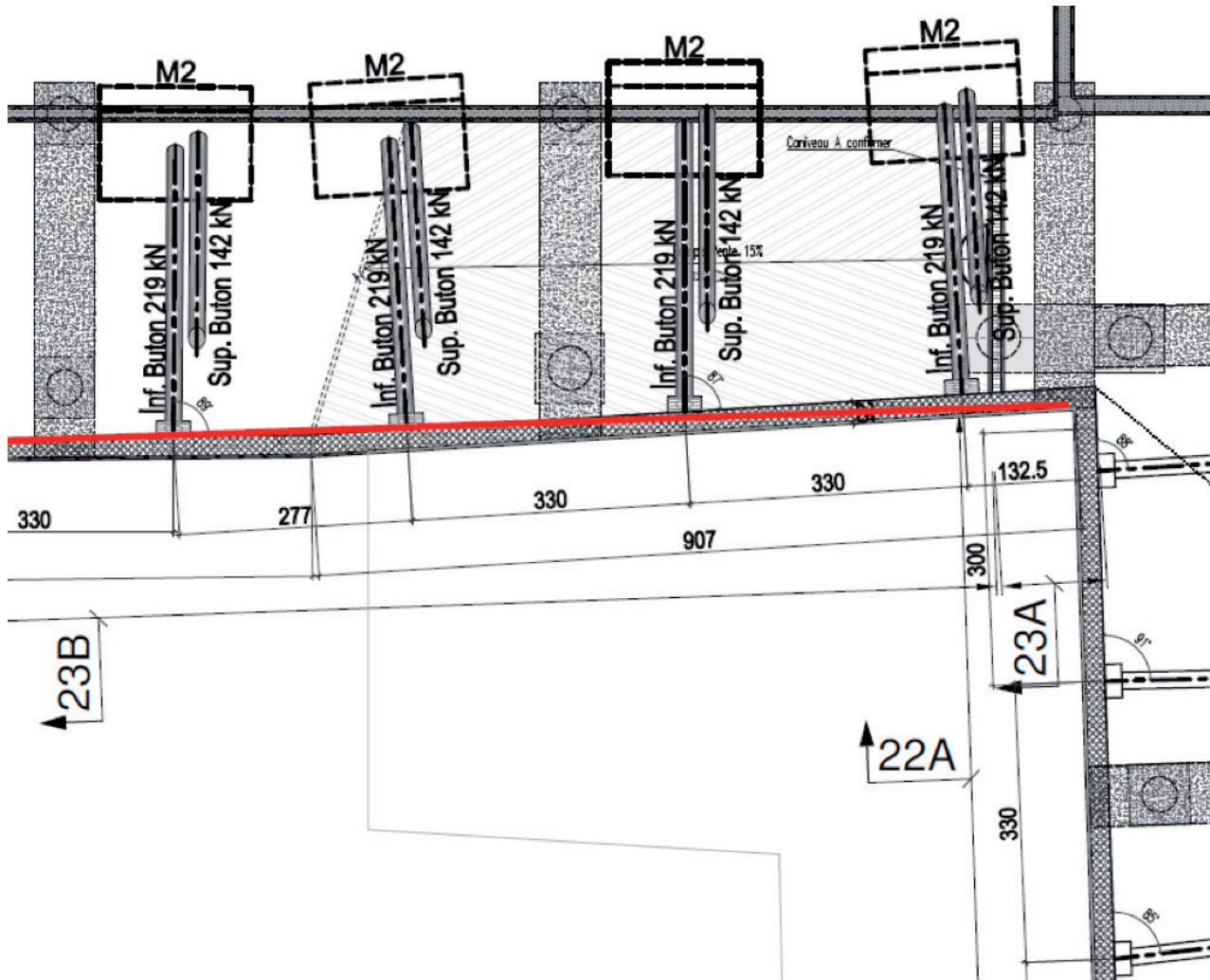


Figure 4-B-1 : Exemple de vue en plan de synthèse avec superposition des semelles des butons et des fondations de l'ouvrage

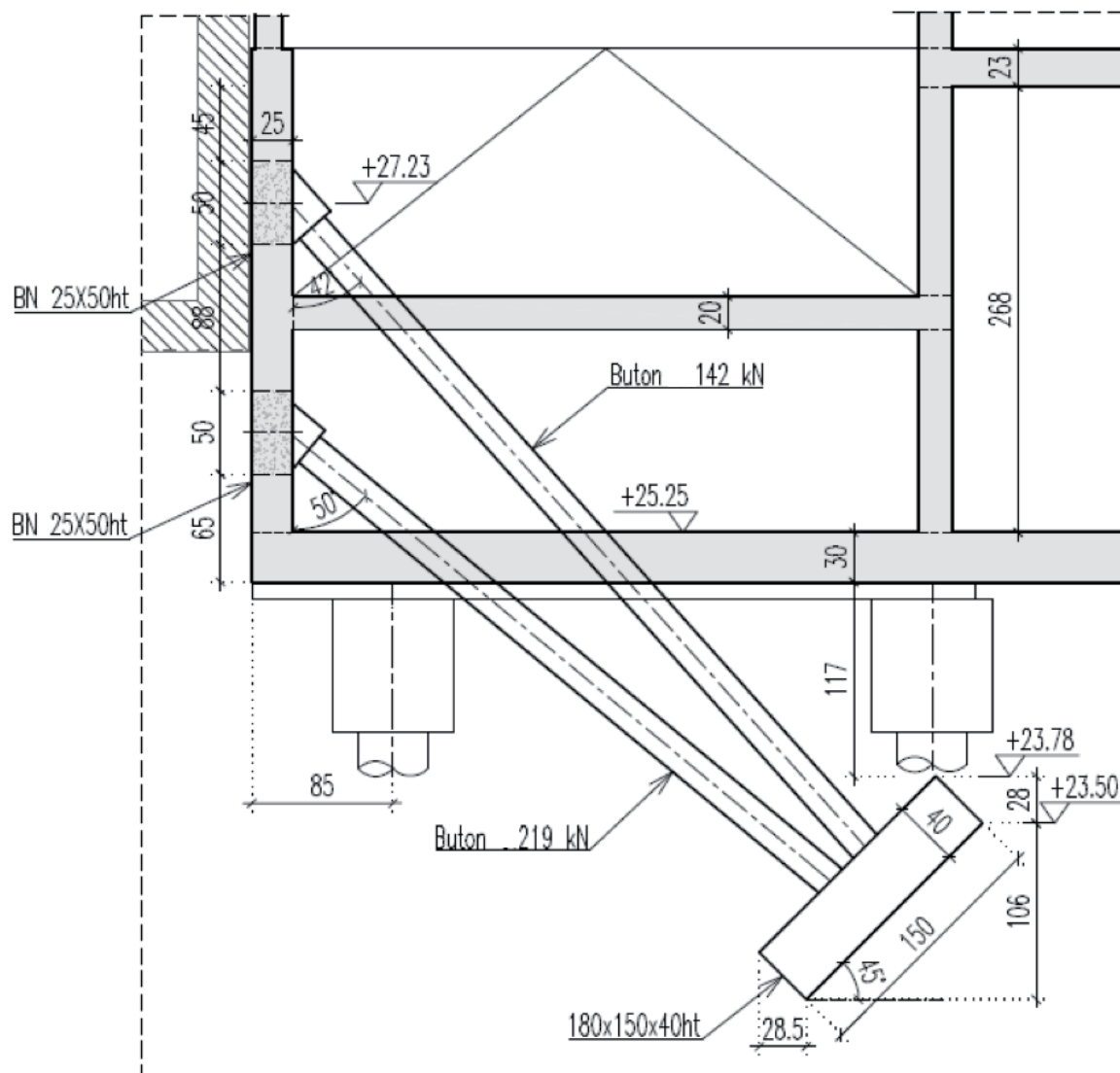


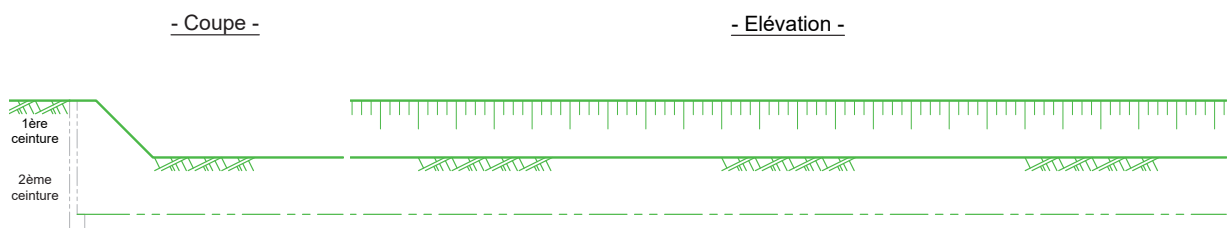
Figure 4-B-2 : Coupe 23B-23B, associée à l'exemple de vue en plan de synthèse

ANNEXE CHAPITRE 4-C

Exemple de phasage avec 2 ceintures

Phase 1a (première ceinture)

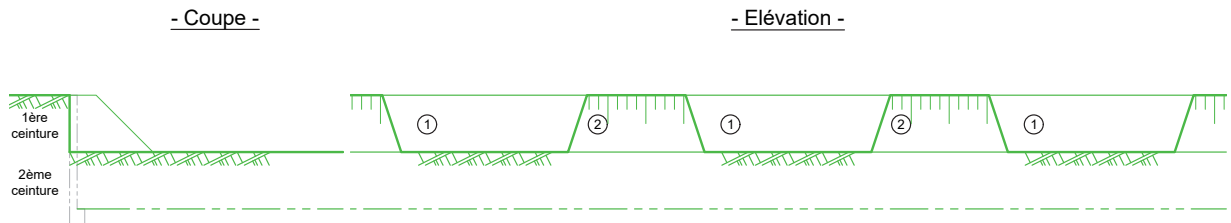
- Terrassement général de la 1^{ère} ceinture en conservant une risberge.



folio
01

Phase 1b

- Recoupement de la risberge pour réaliser les passes primaires de la 1^{ère} ceinture.

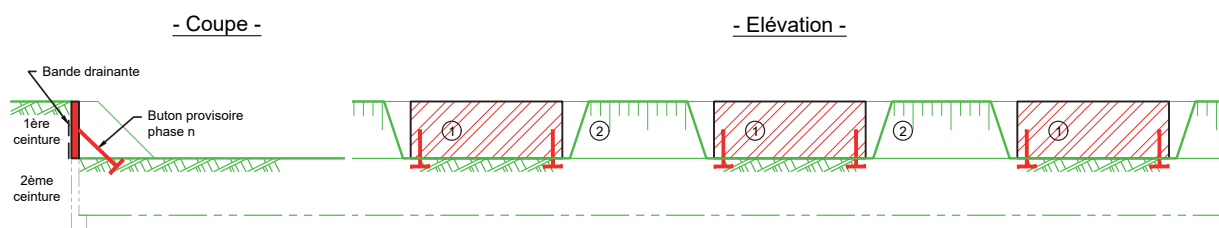


folio
02

Nota : Les phases 1b et 1c doivent être réalisées dans une même journée de travail.

Phase 1c

- Pose de la bande drainante contre terre.
- Ferrailage et bétonnage des passes primaires de la 1ère ceinture.
- Mise en place du butonnage provisoire.



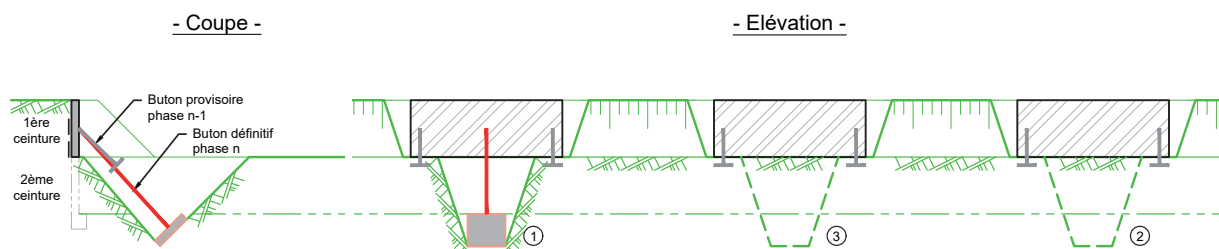
folio
03

Nota :

- Les phases 1b et 1c doivent être réalisées dans une même journée de travail.
- La surface des bandes drainantes est limitée au maximum à 50% de la surface des voiles contre terre. Les 50 premiers centimètres ne sont pas équipés de bandes drainantes.

Phase 1d

- Mise en place des butons définitifs avec leur semelle.



folio
04

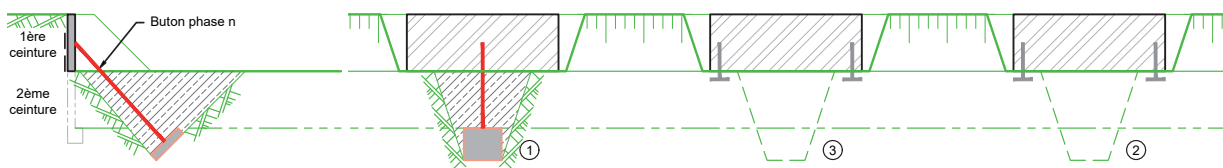
Phase 1e

- Calage des boutons.
- Remblayage avec compactage au godet.
- Dépose du bouton phase n-1.
- Répétition des opérations pour pose des boutons en ordre 2 et 3 (alternée).

Remblais compactés au godet

- Coupe -

- Elévation -



folio
05

Nota : toute fouille ouverte doit être remblayée après le calage du bouton.

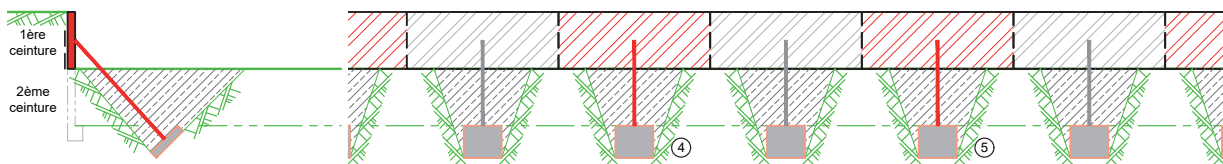
Phase 1f

- Répétition des phases 1b à 1e des passes primaires pour réalisation des passes secondaires.

Remblais compactés au godet

- Coupe -

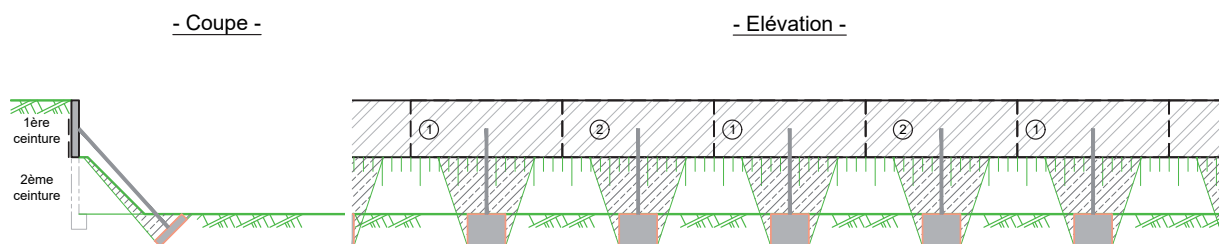
- Elévation -



folio
06

Phase 2a (deuxième ceinture)

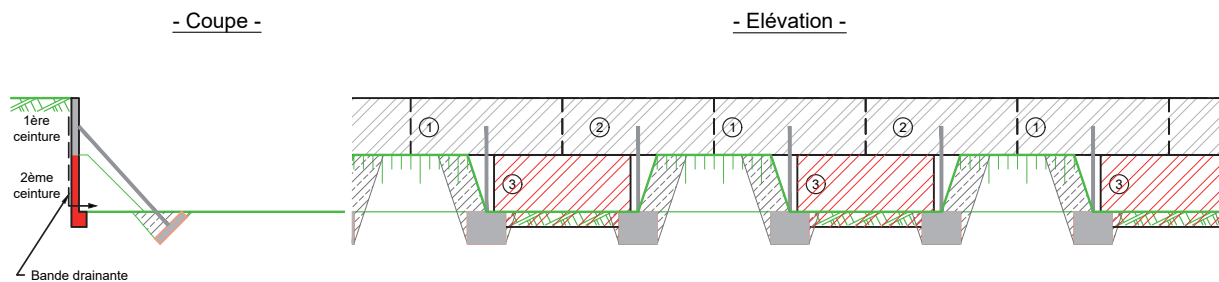
- Terrassement général de la 2^{ème} ceinture en conservant une risberge.



folio
07

Phase 2b

- Recoupement de la risberge entre butons pour réalisation des passes primaires de la 2^{ème} ceinture.
- Coulage de la semelle définitive pleine fouille.
- Pose de la nappe drainante contre terre.
- Réalisation du voile en béton projeté.



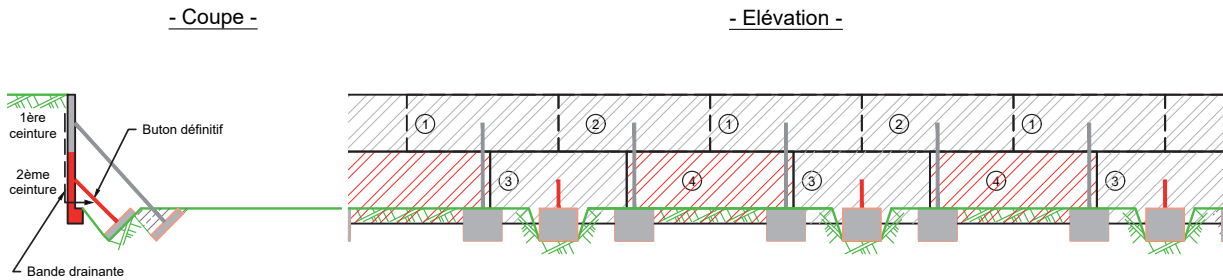
folio
08

Nota :

- La semelle réalisée avec le voile est considérée comme non butonnante.
- La semelle réalisée avant le béton projeté du voile et coulée pleine fouille peut être considérée comme butonnante.

Phase 2c

- Réalisation partielle du 2^{ème} niveau de butonnage définitif entre les butons du 1^{er} lit.
- Répétition de la phase 2b pour réalisation des passes secondaires.

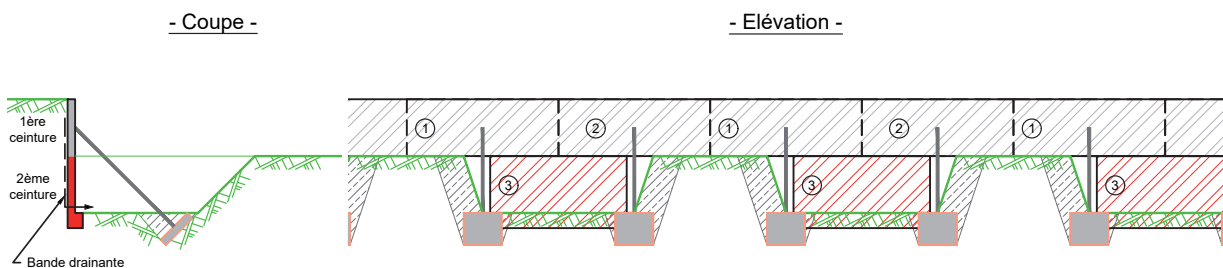


folio
09

Variante à partir de la deuxième ceinture : banquette inversée

Phase 2a (deuxième ceinture)

- Réalisation d'une banquette inversée au droit des passes primaires.
- Coulage de la semelle définitive pleine fouille.
- Pose de la nappe drainante contre terre.
- Réalisation du voile en béton projeté.



folio
07

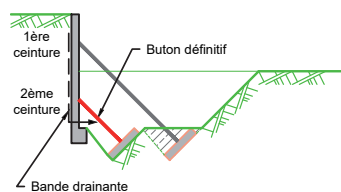
Nota :

- La semelle réalisée avec le voile est considérée comme non butonnante.
- La semelle réalisée avant le béton projeté du voile et coulée pleine fouille peut être considérée comme butonnante.

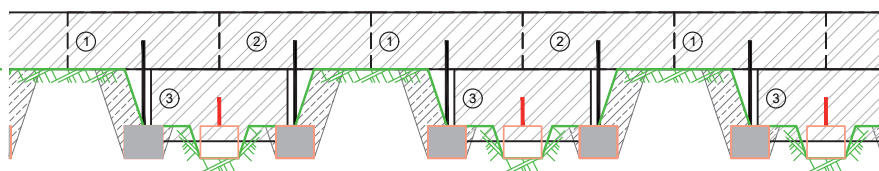
Phase 2b

- Réalisation partielle du 2^{ème} niveau de butonnage définitif entre les butons du 1^{er} lit.

- Coupe -



- Elévation -

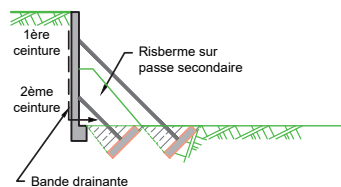


folio
08

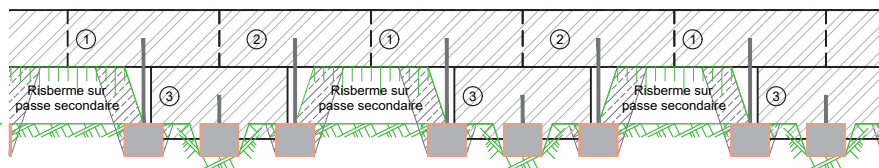
Phase 2c

- Terrassement général de la 2^{ème} ceinture en laissant une risberme au droit de la passe secondaire.

- Coupe -



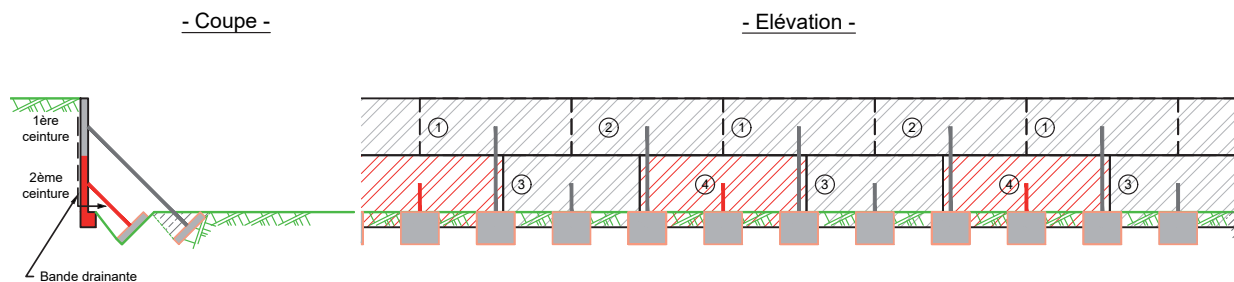
- Elévation -



folio
09

Phase 2d

- Recoupement de la risberge pour réalisation des passes secondaires.
- Coulage de la semelle définitive pleine fouille.
- Pose de la nappe drainante contre terre.
- Réalisation du voile en béton projeté.
- Pose de la fin du 2ème lit de butonnage.



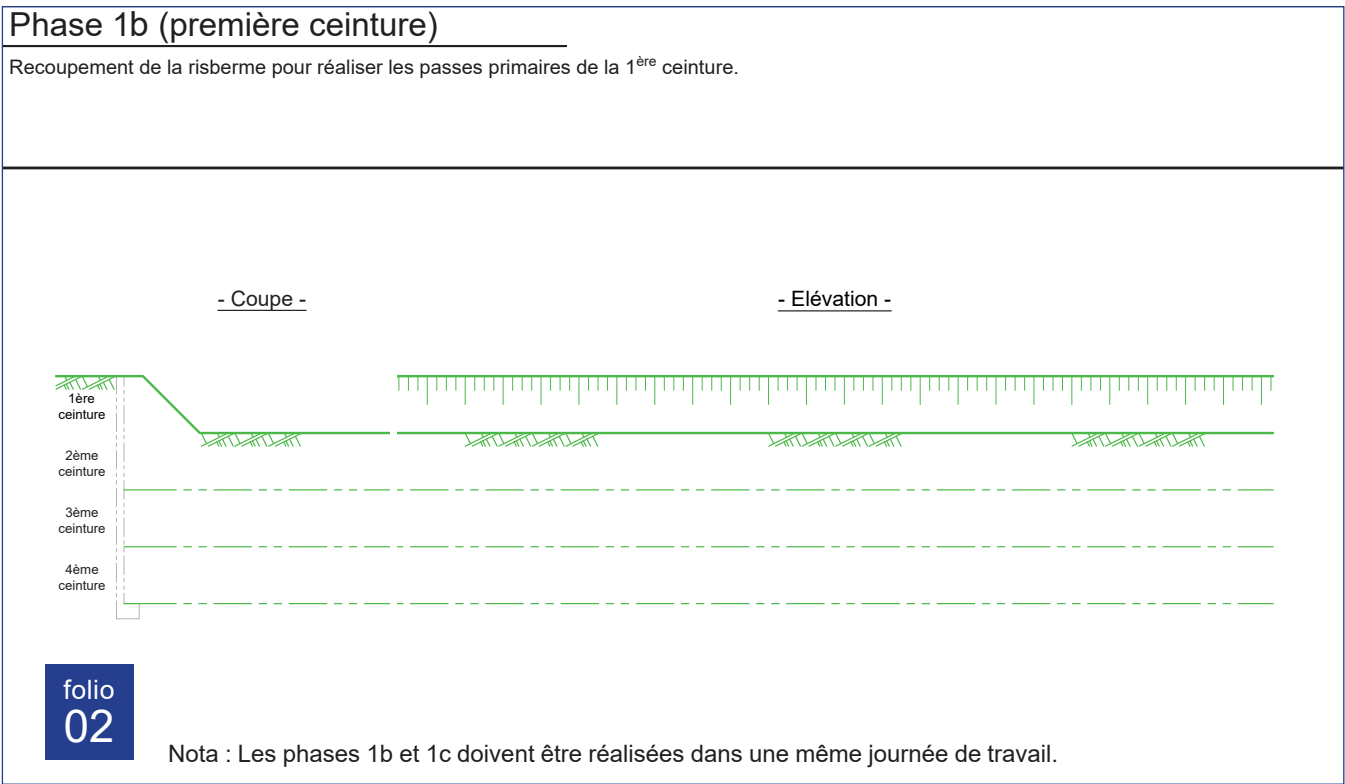
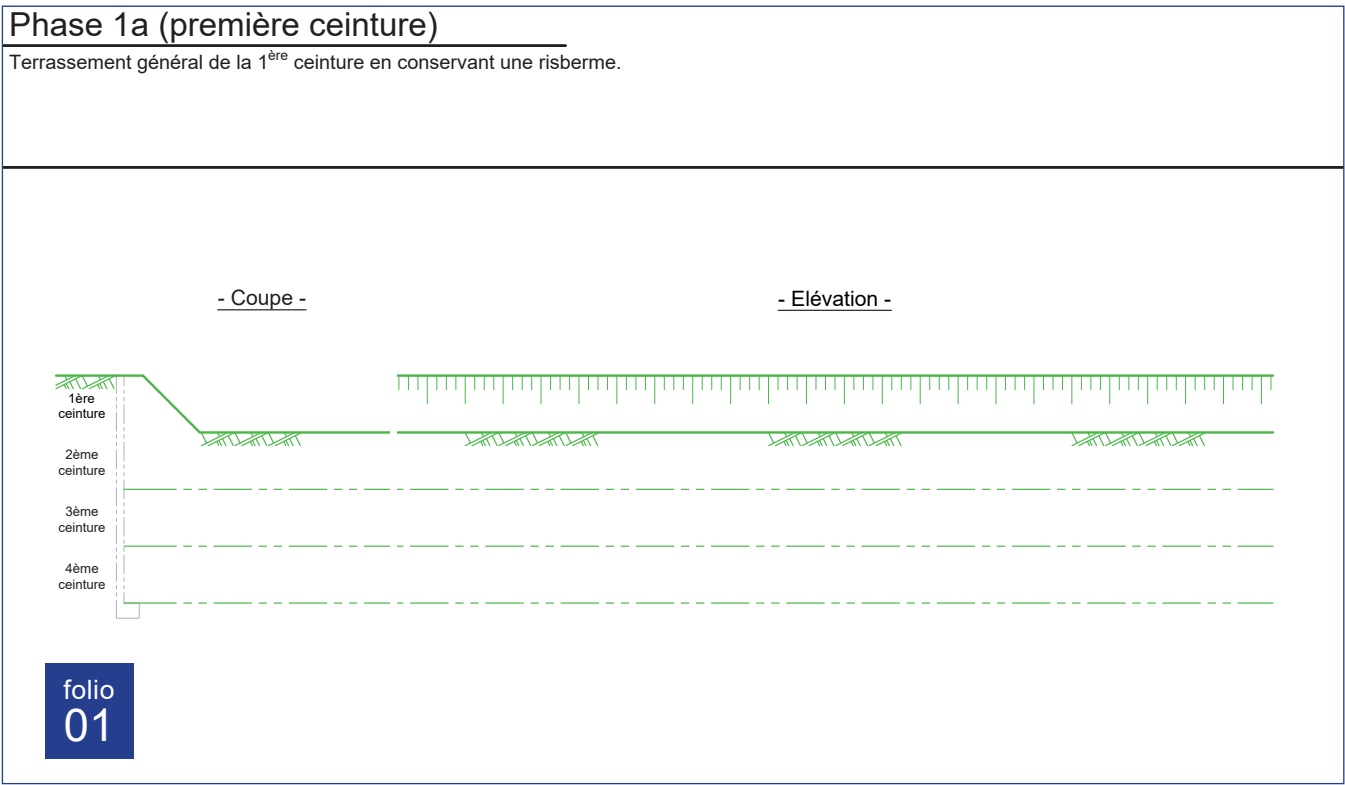
folio
10

Nota :

- La semelle réalisée avec le voile est considérée comme non butonnante.
- La semelle réalisée avant le béton projeté du voile et coulée pleine fouille peut être considérée comme butonnante.

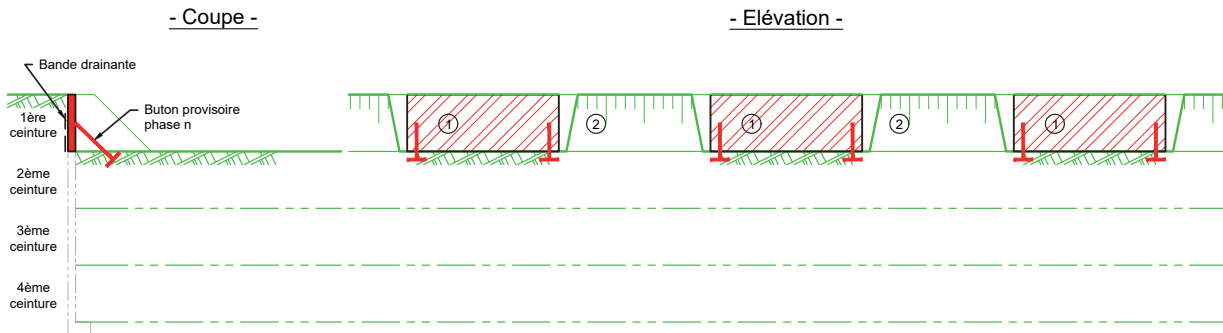
ANNEXE CHAPITRE 4-D

Exemple de phasage avec 4 ceintures



Phase 1c

- Pose de la bande drainante contre terre.
- Ferrailage et bétonnage des passes primaires de la 1ère ceinture.
- Pose des boutons provisoires.



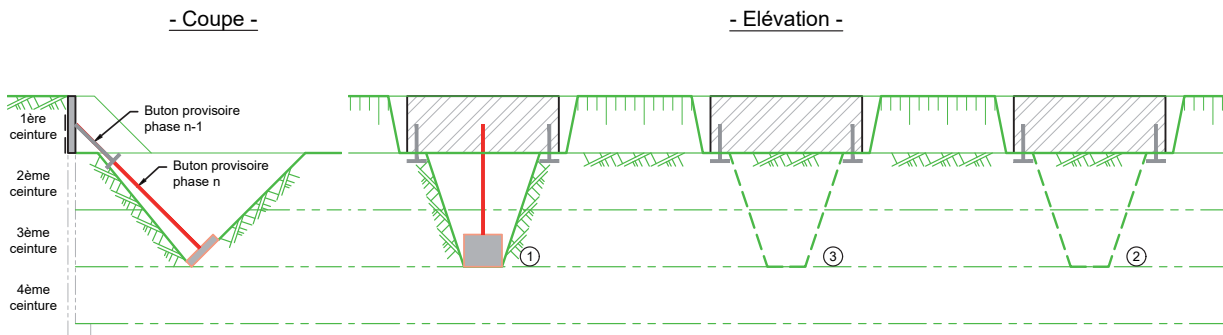
folio
03

Nota :

- Les phases 1b et 1c doivent être réalisées dans une même journée de travail.
- La surface des bandes drainantes est limitée au maximum à 50% de la surface des voiles contre terre. Les 50 premiers centimètres ne sont pas équipés de bandes drainantes.

Phase 1d

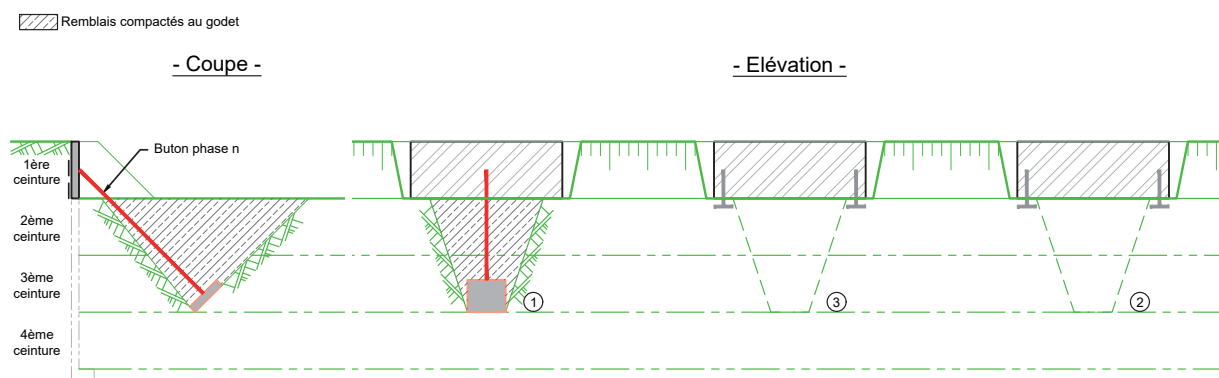
Mise en place des boutons provisoires nécessaires (avec leur semelle en pied de la 3^{ème} ceinture) pour poursuivre le terrassement de la deuxième ceinture (Phase 2).



folio
04

Phase 1e

- Calage des boutons.
- Remblayage avec compactage au godet.
- Dépose du bouton phase n-1.
- Répétition des opérations pour pose des boutons en ordre 2 et 3 (alternée).

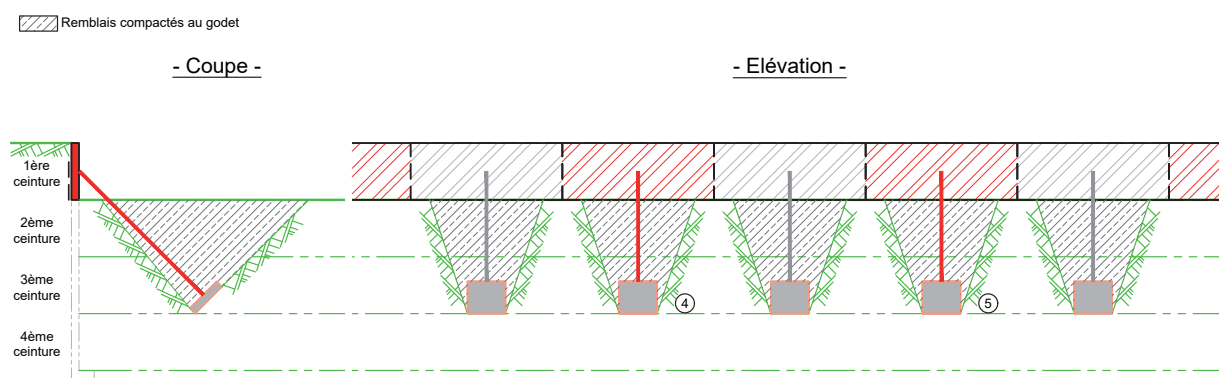


folio
05

Nota : toute fouille ouverte doit être remblayée après le calage du bouton.

Phase 1f

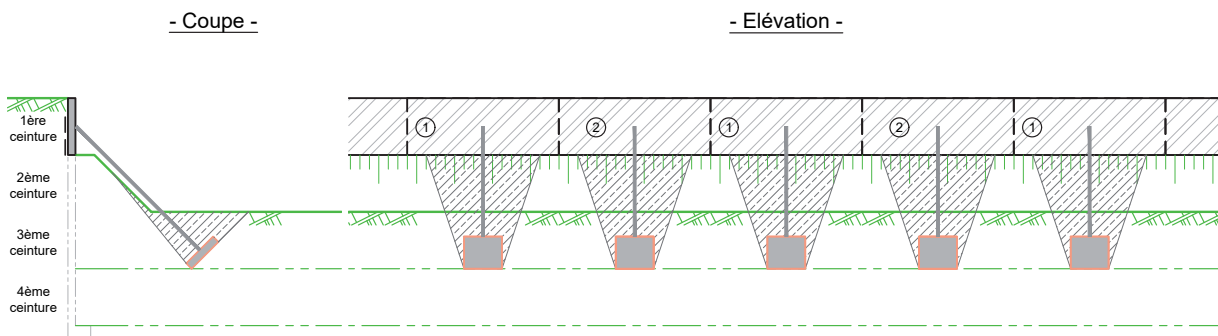
Répétition des phases 1b à 1e des passes primaires pour réalisation des passes secondaires.



folio
06

Phase 2a (deuxième ceinture)

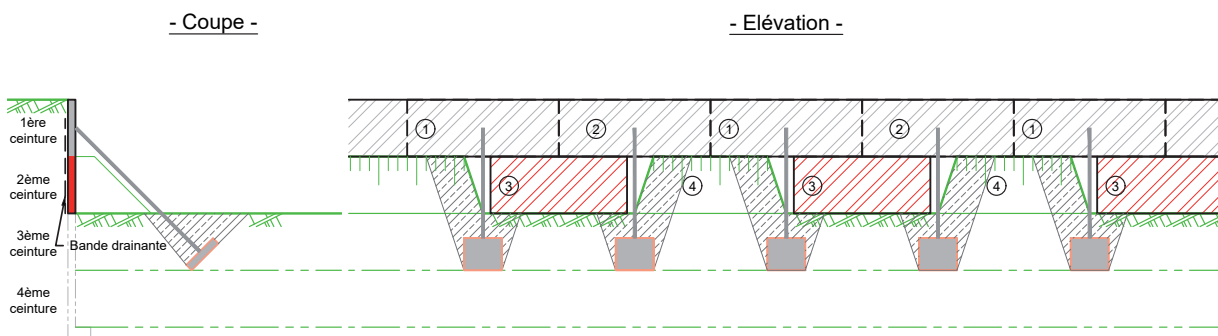
Terrassement général de la 2^{ème} ceinture en conservant une risberme.



folio
07

Phase 2b

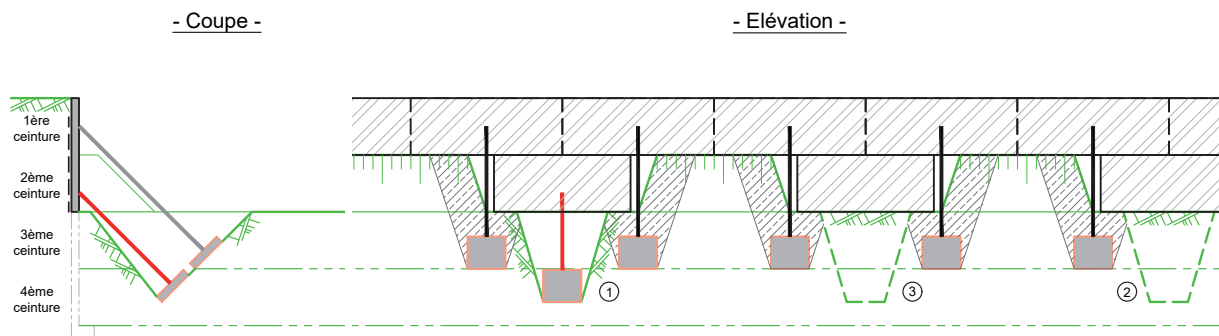
- Recoupement de la risberme entre butons pour réalisation des passes primaires de la 2^{ème} ceinture (en décalage par rapport aux passes sous jacentes).
- Pose de la nappe drainante contre terre.
- Ferrailage et bétonnage du plot.



folio
08

Phase 2c

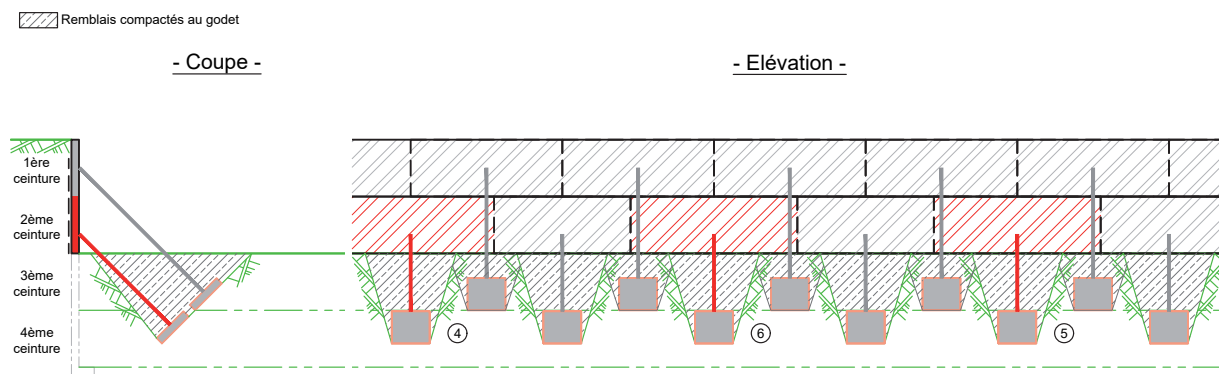
- Mise en place des boutons provisoires nécessaires du lit 2 (avec leur semelle en tête de la 4^{ème} ceinture).
- Remblayage avec compactage au godet.
- Répétition des opérations par pose alternée des boutons en phase 2 et 3.



folio
09

Phase 2d

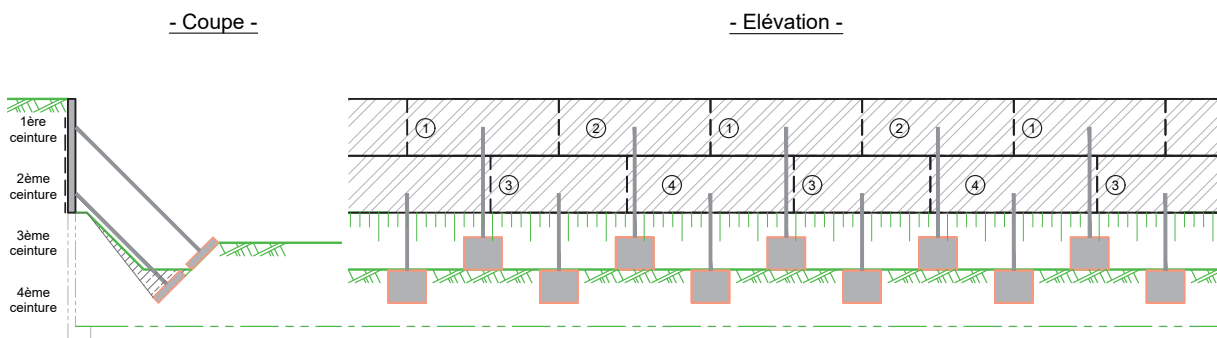
Répétition des phases 2b à 2c des passes primaires pour réalisation des passes secondaires de la 2^{ème} ceinture.



folio
10

Phase 3a (troisième ceinture)

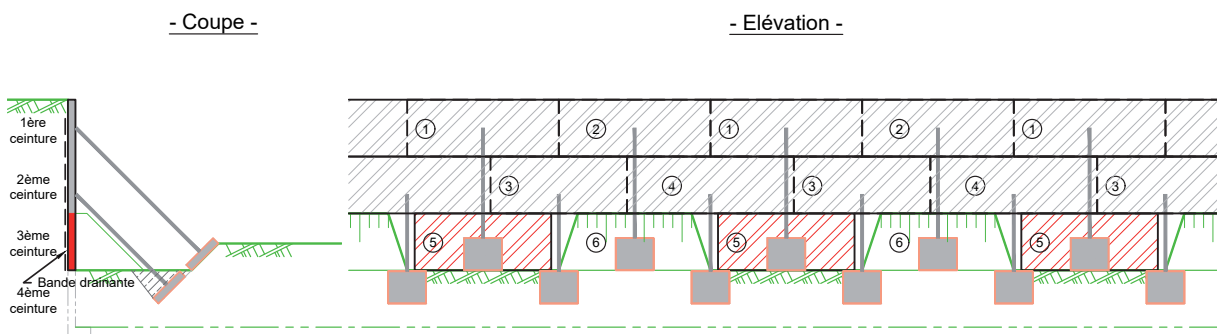
Terrassement général de la 3^{ème} ceinture en conservant une risberme.



folio
11

Phase 3b

- Recoupement de la risberme entre butons pour réalisation des passes primaires de la 3^{ème} ceinture.
- Pose de la nappe drainante, ferrailage et bétonnage des passes primaires.

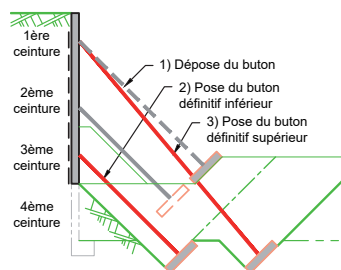


folio
12

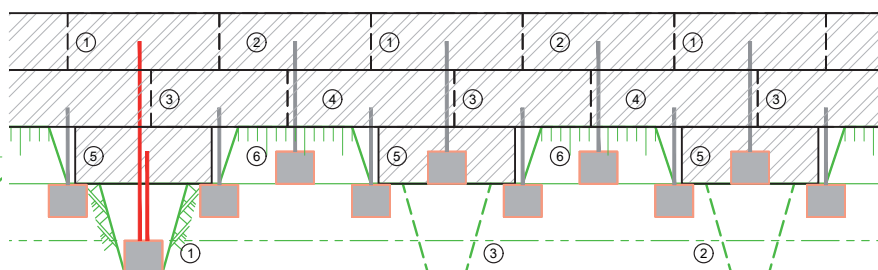
Phase 3c

- Dépose du bouton provisoire de la 1^{ère} ceinture.
- Mise en place des boutons définitifs inférieurs avec leur semelle.
- Mise en place des boutons définitifs supérieurs avec leur semelle.
- Remblayage avec compactage au godet.
- Renouveler les étapes pour les boutons 2 et 3 en ordre alterné.

- Coupe -



- Elévation -



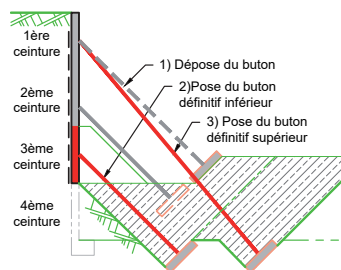
folio
13

Phase 3d

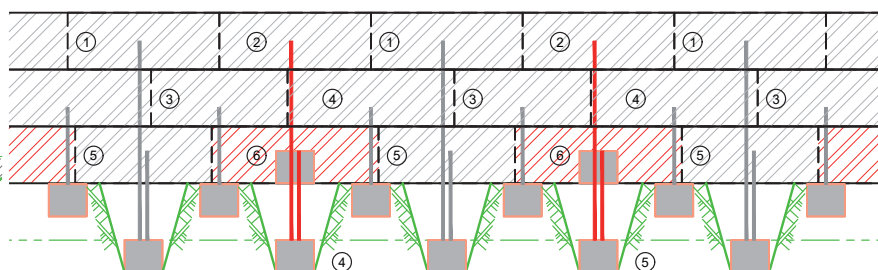
Répétition des phases 3b et 3c des passes primaires pour réalisation des passes secondaires de la 3^{ème} ceinture.

Remblais compactés au godet

- Coupe -



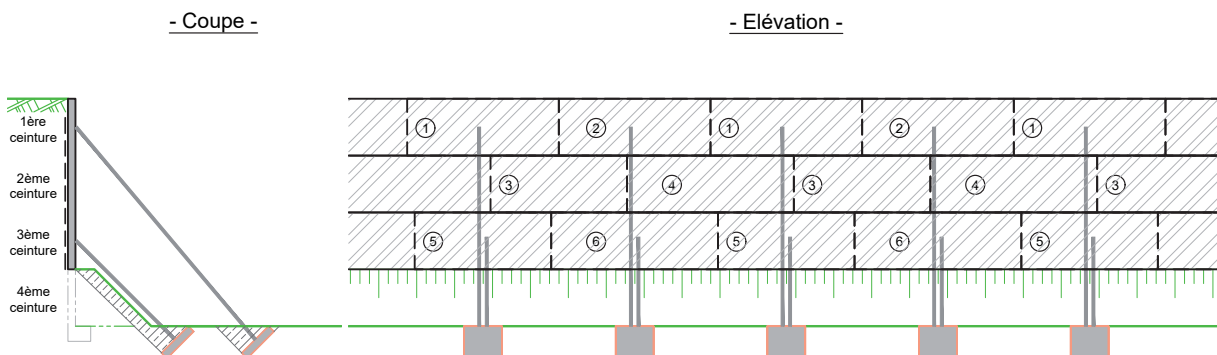
- Elévation -



folio
14

Phase 4a (quatrième ceinture)

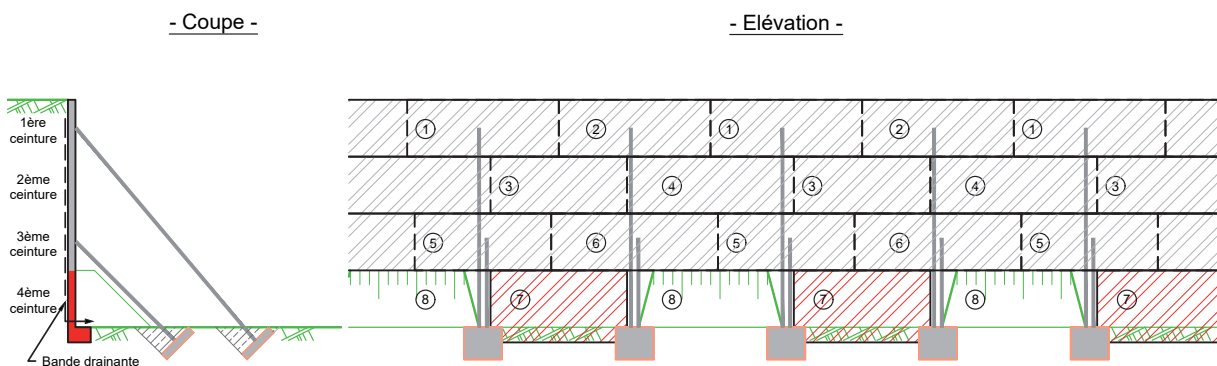
- Terrassement au fond de fouille avec conservation d'une risberme.
- Dépose des butons provisoires de la 2^{ème} ceinture.



folio
15

Phase 4b

- Recoupement de la risberme pour réaliser les passes primaires de la 4^{ème} ceinture.
- Coulage de la semelle définitive pleine fouille.
- Pose de la nappe drainante, ferrailage et bétonnage.



folio
16

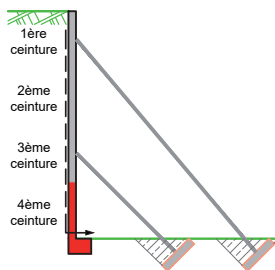
Nota :

- La semelle réalisée avec le voile est considérée comme non butonnante.
- La semelle réalisée avant le béton projeté du voile et coulée pleine fouille peut être considérée comme butonnante.

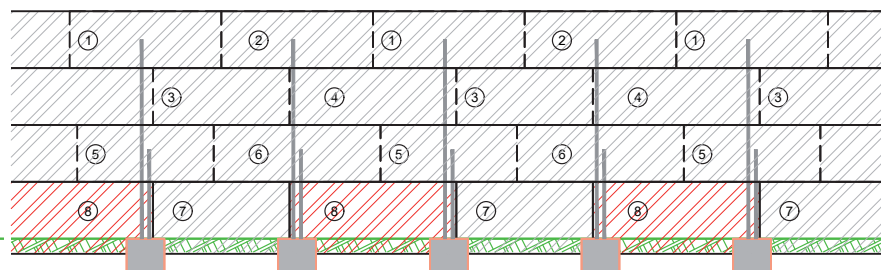
Phase 4c

Répétition de la phase 4b pour réalisation des passes secondaires.

- Coupe -



- Elévation -



folio
17

ANNEXE CHAPITRE 4-E

Principales mesures de prévention en lien avec les travaux de voiles par passes

Phases	Risques ²³ en matière de santé et de sécurité au travail	Principales mesures de prévention (liste non exhaustive)
Accès au fond de fouille	Chute de hauteur	Aménager un accès sécurisé et adaptable à la hauteur de fouille selon l'avancement, indépendant des flux PL / engins : escalier, tour escalier.
Réalisation de la première ceinture	Chute de hauteur	Mise en place de garde-corps en rive de voile contre terre, installés en sécurité et au préalable à l'ouverture de la première passe située en première ceinture.
Ouverture d'une passe par terrassement avec profilage soigné	Heurt / écrasement par engin mécanique	- Ne pas pénétrer dans la zone d'évolution de l'engin. Matérialiser la zone de travail de l'engin. - Organiser les flux piétons pour prévenir les interférences avec les circulations PL / engins.
Piochage du béton en limite des passes adjacentes/sus-jacentes déjà projetées et dégagement des armatures de recouvrement	Inhalation de poussières de silice - Chute de hauteur - Troubles musculo-squelettiques (TMS)	- Port d'EPI adaptés (masque FFP3 <i>a minima</i>). Privilégier les interventions à hauteur d'homme. - A défaut, utiliser une plateforme sécurisée de travail en hauteur (PIR, PIRL, PEMP). - Respecter la hauteur de passe préconisée. Proscrire l'emploi d'échelle. Utiliser des outils portatifs antivibratiles et légers.
Mise en place du système de drainage contre terre	Chute de hauteur	- Privilégier les interventions à hauteur d'homme. - A défaut, utiliser une plateforme sécurisée de travail en hauteur (PIR, PIRL, PEMP). - Respecter la hauteur de passe préconisée. - Proscrire l'emploi d'échelle.
Mise en place de l'ensemble des armatures	Manutention manuelle - TMS - Manutention mécanique	- Mettre en œuvre des dispositions organisationnelles pour prévenir le port de charges lourdes. - Utiliser des moyens de manutention mécanique adaptés à la configuration du chantier et des appareils de levage, conformes et en adéquation avec la charge. - Ne pas stationner sous une charge en levage. - Proscrire l'emploi d'échelle.
Projection du béton	Exposition à des substances dangereuses. Nuisance sonore - Chute de hauteur	- Port d'EPI adaptés (casque à ventilation assistée équipé de filtres de classe P3, combinaison de type 5/6, gants dont les paumes et les doigts sont enduits de nitrile, protection auditive). - Privilégier l'emploi de robot / bras de projection, particulièrement adaptés vis-à-vis de la sécurité en cas de bouchon au niveau de la lance.
Pose et dépose de corbeaux métal	Manutention manuelle - TMS - Manutention mécanique - Chute de hauteur	- Utiliser des moyens de manutention mécanique adaptés à la configuration du chantier et des appareils de levage, conformes et en adéquation avec la charge. - Privilégier les interventions à hauteur d'homme. - A défaut, utiliser une plateforme sécurisée de travail en hauteur (PIR, PIRL, PEMP). - Respecter la hauteur de passe préconisée. Proscrire l'emploi d'échelle.

²³ Risques autres qu'enfouissement et écrasement liés à un effondrement de structure.

Phases	Risques ²³ en matière de santé et de sécurité au travail	Principales mesures de prévention (liste non exhaustive)
Butonnage (butons + semelles)	Manutention mécanique - Chute d'objets - TMS	• Utiliser des moyens de manutention mécanique adaptés à la configuration du chantier et des appareils de levage, conformes et en adéquation avec la charge. • Intégrer des points de préhension correctement dimensionnés sur les butons / semelles. • Ne pas stationner sous une charge en levage. • Proscrire l'emploi d'échelle. • Mettre en œuvre des dispositions organisationnelles pour prévenir les risques liés à la coactivité.
Démolition corbeaux béton	Inhalation de poussières de silice - Chute de hauteur - Troubles musculo-squelettiques (TMS)	• Port d'EPI adaptés (masque FFP3 <i>a minima</i>). Privilégier les interventions à hauteur d'homme. A défaut, utiliser une plateforme sécurisée de travail en hauteur (PIR, PIRL, PEMP). • Proscrire l'emploi d'échelle. Utiliser des outils portatifs antivibratiles et légers.
Mise en place de l'instrumentation sur le voile	Chute de hauteur	• Utiliser une plateforme sécurisée de travail en hauteur (PIR, PIRL, PEMP). Proscrire l'emploi d'échelle.

²³ Risques autres qu'enfouissement et écrasement liés à un effondrement de structure.

ANNEXE CHAPITRE 5-A

Exemple de plan de contrôle de l'entreprise de voiles par passes

Chantier :		Date :	
Client :		Indice :	
Contrôleur :			
Points de contrôle	Tolérances	Fréquences	Moyens de contrôle
Préparation			
Sécurité du poste de travail	Selon PPSPS	Selon PPSPS	Selon PPSPS
Appoint des semelles de butons	0	Journalier et avant ouverture des passes	Inventaire du stock
Appoint des butons	0	Journalier et avant ouverture des passes	Inventaire du stock
Section d'ouverture de passe	20 cm par côté	A chaque passe ouverte, avant curage et ferrailage	Mètre ruban
Curage du béton de la passe supérieure (sauf si 1 ^{ère} ceinture)	Jusqu'à retrouver l'épaisseur de la passe supérieure et un béton sans terre	A chaque passe inférieure ouverte et avant ferrailage de celle-ci	Homogénéité du béton : Visuel Epaisseur du voile : Mètre ruban
Coffrage derrière voile (si présent)	3 cm sur règle de 1 m	A chaque face coffrée avant ferrailage	Niveau + Mètre ruban
Système de drainage avec son exutoire	0	En continu, à l'avancement des travaux	Visuel
Implantation du voile	1,5 cm	A chaque face coffrée avant ferrailage	Mètre ruban
Epaisseur du voile	1 cm	A chaque face coffrée avant ferrailage	Mètre ruban
Ferrailage			
Bande noyée	Nature des aciers : 0 Position : 3 cm Recouvrements : 50 * D minimum	A chaque passe ferrillée, avant projection	Visuel + Mètre ruban
Equerres de couture	Nature des aciers : 0 Ecartement : 1 cm Recouvrements : 50 * D minimum	A chaque passe ferrillée, avant projection	Visuel + Mètre ruban
Treillis	Nature des aciers : 0 Recouvrements : 2 mailles	A chaque passe ferrillée, avant projection	Visuel

Chantier :		Date :	
Client :		Indice :	
Contrôleur :			
Points de contrôle	Tolérances	Fréquences	Moyens de contrôle
Projection			
Planimétrie du voile	1,5 cm sur règle de 2 m et 8 mm sur règle de 60 cm	A chaque couche de finition fraichement projetée	Niveau + Mètre ruban
Propreté de l'arase (si 1 ^{ère} ceinture)	Coups de marteau sur aciers en attente + balayette	Après chaque nettoyage, après projection de finition, avant excavation de la ceinture inférieure	Visuel
Espacement et longueur des équerrés	Espacement : 3 cm Recouvrements : 50 * D minimum	A chaque passe inférieure ouverte et avant ferrailage de celle-ci	Mètre ruban
Réservations	Implantation et section : 3 cm	Pour chaque boîte posée	Mètre ruban
Vérification des performances mécaniques du béton projeté prévues		Ecrasement de 6 éprouvettes à partir de 2 caisses de béton (40 cm * 40 cm * 15 cm) 2 caisses au démarrage du chantier + 2 caisses tous les 100 m ³ ou toutes les 2 semaines	5 jours après projection du béton, il est possible de carotter le voile projeté sur 15 cm
Bêche	0 remaniement du terrain devant la bêche (si bêche avec butée)	Pour chaque bêche, si prise en compte de la butée	Visuel
Butonnage			
Position et écartement des boutons	20 cm	Entre chaque bouton posé	Mètre ruban
Serrage au refus (à la pelle ou au coin)	Refus à la masse	A chaque coin posé sauf si serrage à la pelle	Visuel

ANNEXE CHAPITRE 5-B

Exemple de fiche d'autocontrôle de l'entreprise de voiles par passes

Chantier : Client :					
Plan de coffrage N° : Plan de ferrailage N° : Voile N° :		Indice : Indice : Ceinture N° :		Date : Date : Passe N° :	
Points de contrôle	SO	Conf	NC	Remarques & Actions	Levé si NC
Préparation					
Sécurité du poste de travail (dans la fouille)					
Appoint des gardes corps à fixer sur la ceinture supérieure					
Appoint des boutons & des semelles (préfabriquées)					
Section d'ouverture des passes					
Séquence d'ouverture des passes					
Curage (piochage) du béton de la passe supérieure (sauf si 1ère ceinture) et latérales					
Système de drainage avec son exutoire (surface drainée & nombre de barbacanes, provisoires si cuvelage)					
Implantation & épaisseur du voile					
Implantation des cibles topo					
Ferrailage					
Bandes noyées					
Equerres de couture / recouvrements					
Treillis en section courante					
Projection					
Planimétrie du voile					
Propreté de l'arase (si 1ère ceinture)					
Espacement et longueur des équerrres					
Réservations					
Eprouvettes béton					

Chantier :						
Client :						
Plan de coffrage N° :		Indice :		Date :		
Plan de ferrailage N° :		Indice :		Date :		
Voile N° :		Ceinture N° :		Passe N° :		
Points de contrôle	SO	Conf	NC	Remarques & Actions	Levé si NC	
<u>Projection</u>						
Planimétrie du voile						
Propreté de l'arase (si 1 ^{ère} ceinture)						
Espacement et longueur des équerres						
Réservations						
Eprouvettes béton						
<u>Système de butonnage</u>						
Position et entre-axe des boutons (& des corbeaux si système de butonnage définitif)						
Position & dimensions des semelles (provisoires & définitives)						
Serrage au refus (à la pelle ou au coin)						
<u>Pied/Bêche du voile par passes (fondation, butée)</u>						
Coulé pleine fouille (sans remaniement du terrain devant la bêche)						
Commentaires divers :						
Nom (entreprise) :		Signature (entreprise)				
Date :						



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

2023
VERSION FRANÇAISE

