

Conférence Coulomb – 2020

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS OEUVRE

MAZARÉ Bruno

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

1. Introduction

Origine de la nécessité des travaux de renforcement de sol sous ouvrage existant et de reprise en sous œuvre :

- Conditions géotechniques mal appréhendées ou évolutives (climat...)
- Erreurs de conception
- Raréfaction du foncier – densification des constructions (mitoyen, sous œuvre)
- Evolution des règlements (EC 7, EC8, PMR...) => mise en conformité

Conséquence :

Reprise en sous œuvre des fondations existantes ou renforcement de sol (pérennité des existants long terme, travaux)

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE : PLAN DE LA CONFÉRENCE

PLAN DE L'EXPOSE

1. Particularités techniques de ce type de travaux : Investigations / Etudes / Travaux
2. Acteurs et cadre réglementaire
3. Techniques employées – état de l'art : Renforcement du sol de fondation / Reprises en sous œuvre
4. Techniques d'auscultation
5. Retour d'expérience sur quelques chantiers
6. Conclusion

Vaste sujet traité ici sous l'angle de l'ingénieur géotechnicien : difficultés et points d'attention

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

Intervention sur ouvrage construit, souvent mal connu (absence de plans de récolement fiables)

Compétences requises en structure (bâtiment, GC) en géotechnique, et en travaux

2.1 Particularité des investigations

Objectif :

Préciser le modèle géotechnique (ZIG)

Reconnaissance de l'existant : fondations, structures, réseaux enterrés...

Si pathologie : diagnostic précisant la cause des désordres => inspection détaillée (relevé des désordres) ; identification du mécanisme conduisant aux déformations structurelles constatées

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

2.1 Particularité des investigations

Reconnaissance des fondations :

- Puits blindés à l'avancement
- Carottages, et essais en laboratoire
- Sismique : impédance, parallèle (MSP)
- Ferroskan (acier)

Reconnaissance du sol de fondation :

- Sondage destructif avec essais pressiométriques
- Sondages carottés et essais en laboratoire

Reconnaissance structurelle : visuelle, carottage (laboratoire), ferroskan
=> géométrie, résistance, descente de charge

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

2.1 Particularité des investigations

Travail en site exigu / intervention en parties privatives



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

2.2 Particularité des études

Obtenir ou ré-établir les plans de structure de l'existant :

- Récupération d'archives, permis de construire, plans de récolement
- Enquête bâti détaillée : conformité aux plans, état de dégradation de la structure, descente de charges

Contrôler le dimensionnement des fondations existantes :

- Evolution des règlements de calculs (EC7, EC8 et béton armé)
- Descente de charge modifiée depuis la construction
- Type de pieux n'existant plus actuellement

Conception et dimensionnement de la reprise en sous œuvre :

- Calculs à la rupture mais aussi en déformation (méthodes analytiques et numériques) / Attention à leur représentativité
- Fondation mixte => raideurs différentielles
- Phase « travaux » dimensionnante > importance phasage / procédures travaux

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

2.2 Particularité des études

Conception et dimensionnement de la reprise en sous œuvre :

- Calculs à la rupture mais aussi en déformation (méthodes analytiques et numériques) : Attention à la précision affichée des calculs numériques / précision des entrants
- Prise en compte des contraintes du site et exigüité de la zone de travail : respect du tréfond environnant (ancrages => Butons)
- Fondation mixte, création de raideurs différentielles sous le bâti existant
- Phase « travaux » dimensionnante : importance du phasage / procédures travaux ; répercussions sur le dimensionnement

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

2. Particularités techniques de ce type de travaux

2.3 Particularité des travaux

Travail en site exigu : zone de stockage réduite, matériel spécifique, ventilation...
=> cadences réduites

Sensibilité de la structure aux vibrations, aux tassements différentiels
=> pianotage

Éléments nouveaux découverts en cours de travaux
=> Reprise des études, adaptation des travaux

Sensibilité de l'existant
⇒ Nécessité d'une surveillance continue en temps réel
Méthode observationnelle : attention !

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

3. Acteurs et cadre réglementaire

Acteurs « Classiques »:

- MOA / MOE
- Entreprise et son BET
- Bureau de contrôle (démarche volontaire du MOA ou obligatoire selon le code de la construction R111-38)

Acteur spécifique :

Expert de référé préventif (constat d'huissier non opposable)

Travaux spécifiques et très techniques => personnel expérimenté

Ingénieurs structure et géotechniciens (MOE, BC, BET Entreprise, Entreprise)

Cadre réglementaire : normes, règlements, recommandations en vigueur

Point de vigilance pour le MOE : variantes Entreprise très fréquentes

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4. Techniques employées – état de l’art

- Grande variété des techniques de reprise en sous œuvre et renforcement de sol
- Adaptations très fréquentes aux spécificités du chantier
- Important développement des techniques d’amélioration et de renforcement de sol depuis 30 ans

Techniques abordées dans la suite de l’exposé :

- **Amélioration du sol de fondation** : reprise d’efforts verticaux sous charges ponctuelles ou réparties **sans** modification du niveau des fondations
- **Reprise en sous œuvre** : reprise d’efforts verticaux sous charges ponctuelles ou réparties **avec ou sans** modification du niveau des fondations existantes

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4. Techniques employées – état de l’art

4.1 Amélioration du sol de fondation

Domaine d’application :

Radier ou semelles de surface conséquente

Objectif de réduire les tassements absolus et/ou différentiels

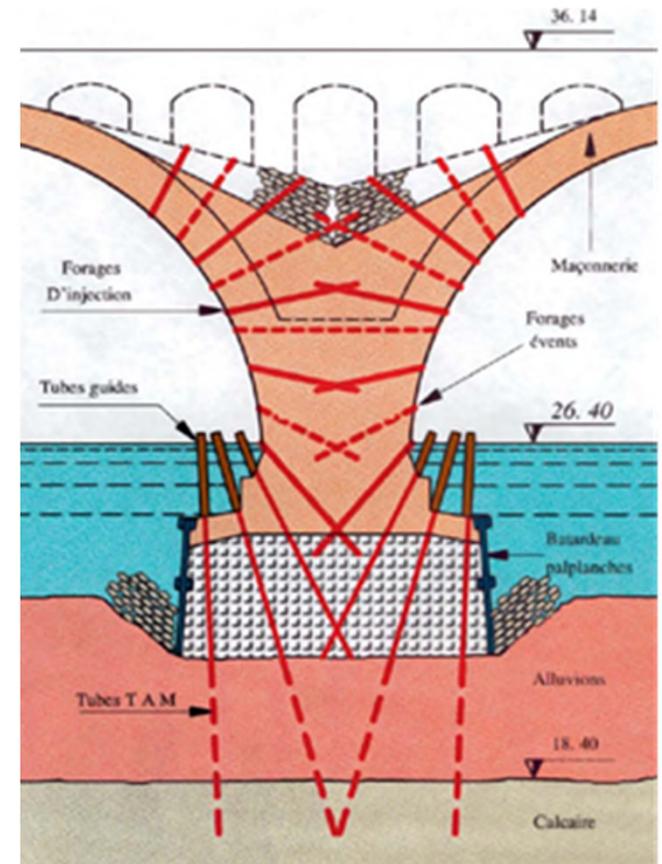
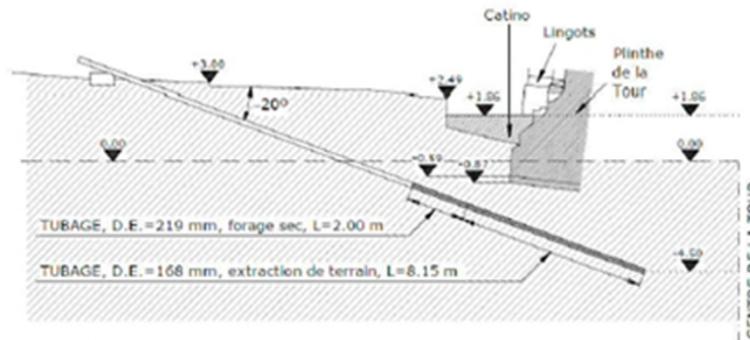
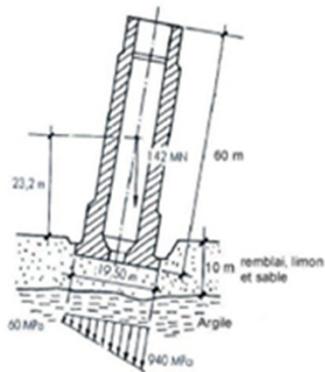
Type d’amélioration de sol : Injection du terrain sous fondation

1. Injections « classiques » à l’aide de mortier et/ou coulis
2. Injections de résines expansives
3. Injections solides

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.1.1 Injections classiques à l'aide de coulis et/ou mortier

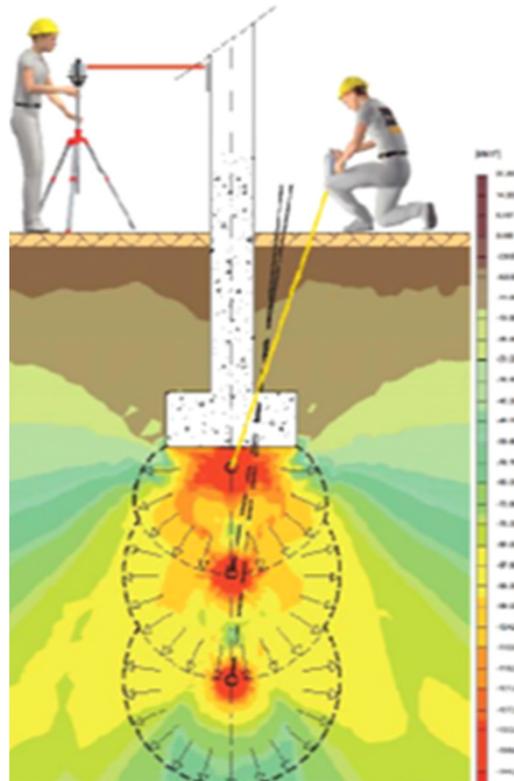
- Injections de comblement (cavité)
 - Injections d'imprégnation (sol ou maçonnerie)
 - Injections de compensation (soulèvement)
- Amélioration permanente des produits injectés et matériels de forage, et d'injection (enregistreurs)
- Matériels adaptés aux contraintes de chantier



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.1.2. Injection de résine expansive (résines à polymérisation rapide)

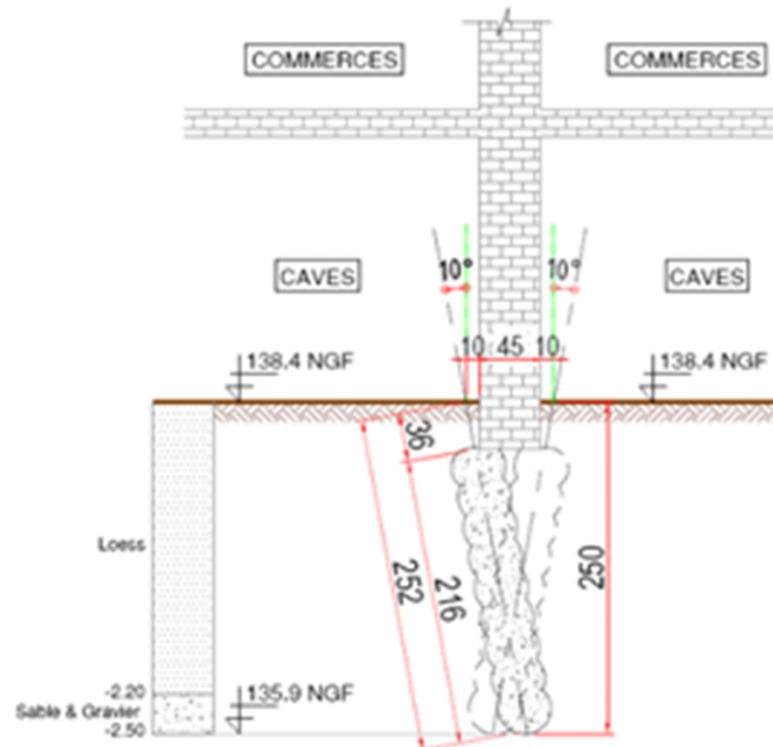
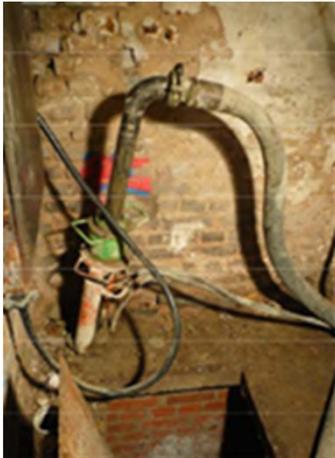
Facilité d'exécution pour injection à faible profondeur (matériel adapté)



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.1.3. Injections solides

- Adaptées aux terrains peu argileux ; rhéologie du mortier à maîtriser
- Contrainte de chantier identique aux injections classiques mais chantier « propre »



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4. Techniques employées – état de l’art

4.2 Reprise en sous œuvre

4.2.1 Sans modification du niveau de la fondation existante

- Micropieux
- Colonnes de Jet Grouting
- Elargissement de la semelle de fondation

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.1. Micropieux

- Forage de diamètre < 300 mm
- Armature métallique scellée au coulis de ciment
- Reprise de l'effort par frottement latéral (compression / traction)
- 4 Types selon le mode d'injection : types II voire III couramment utilisés en reprises en sous œuvre
- Existence de micropieu auto-foreur (tige forage = tige armature)

Machines adaptées au travail en site exigu, peu accessible et en milieu confiné

Forage à la boue : gestion contraignante

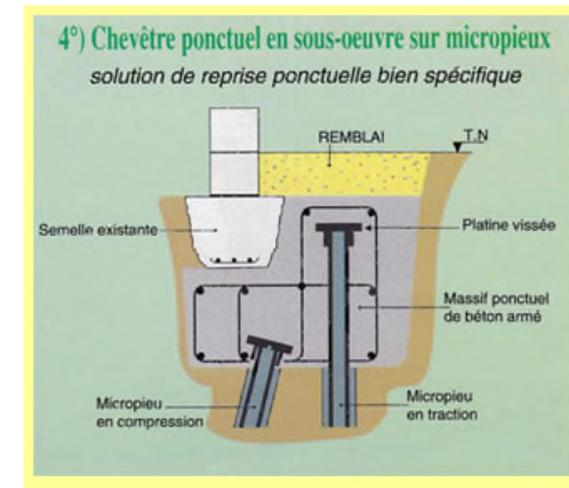
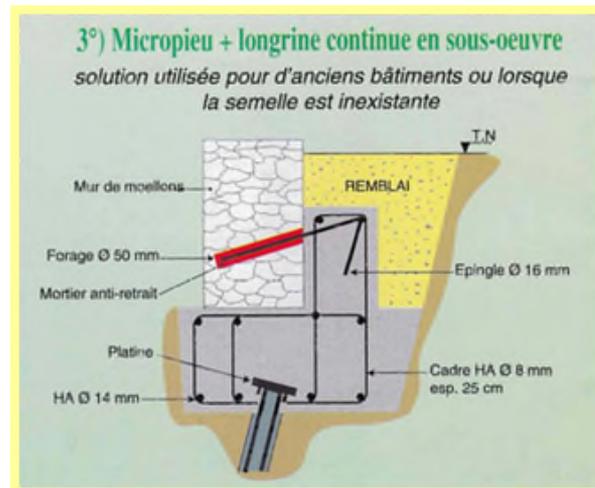
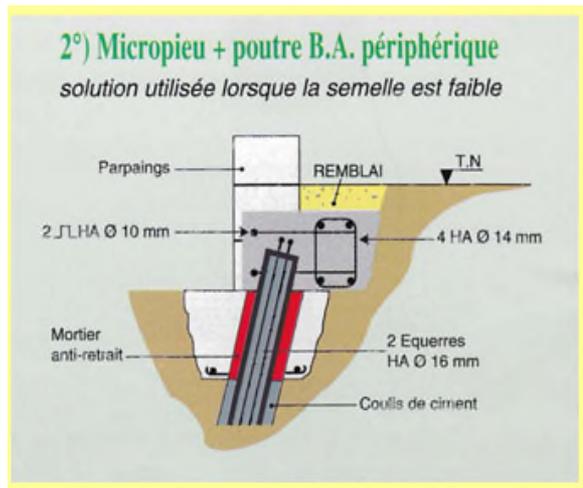
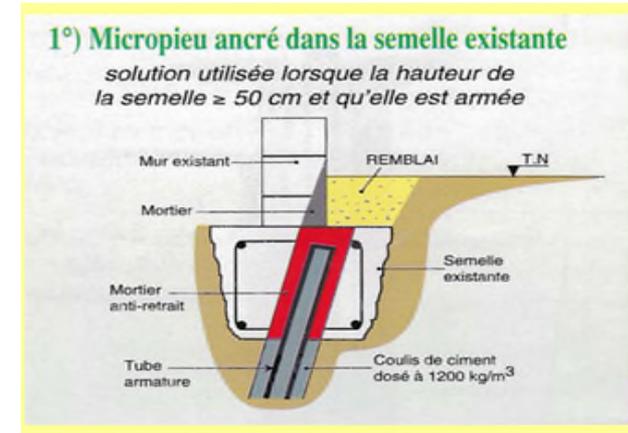


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.1. Micropieux

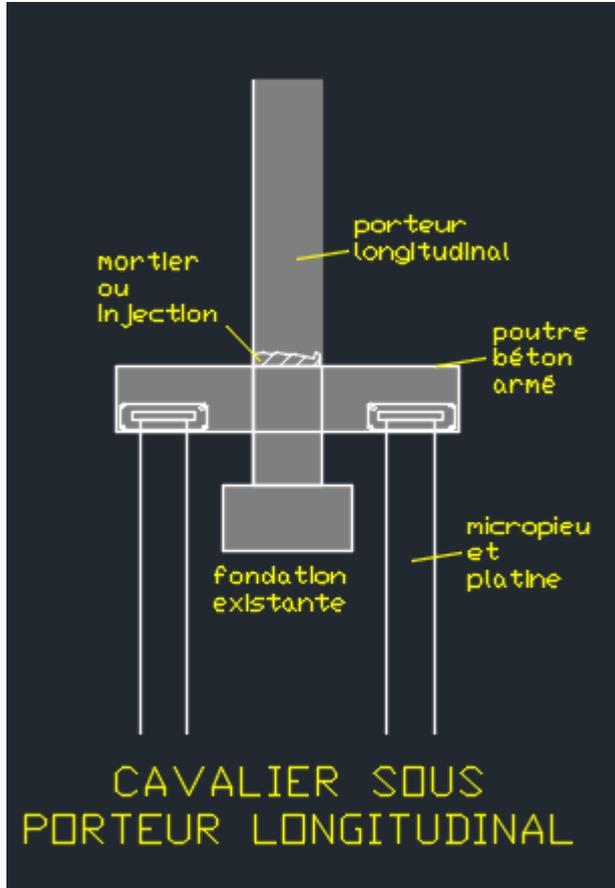
Point de vigilance : conception réalisation de la liaison micropieu – semelle de fondation

Vérification de la résistance intrinsèque de la fondation
=> plusieurs solutions en fonction du résultat et de l'accessibilité / mur porteur



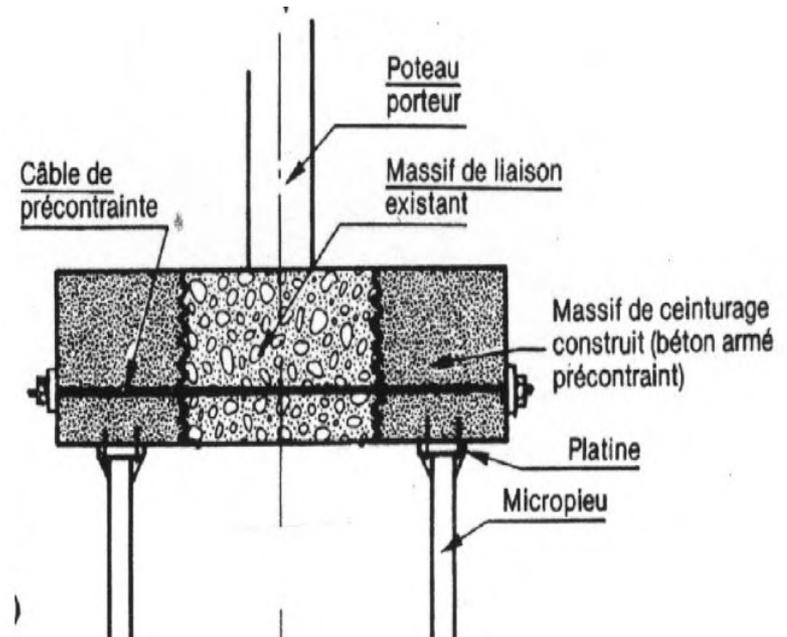
RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.1. Micropieux : porteur accessible des deux côtés



Cavalier sous porteur longitudinal

Poutres post contraintes à la fondation existante reprise par micropieux

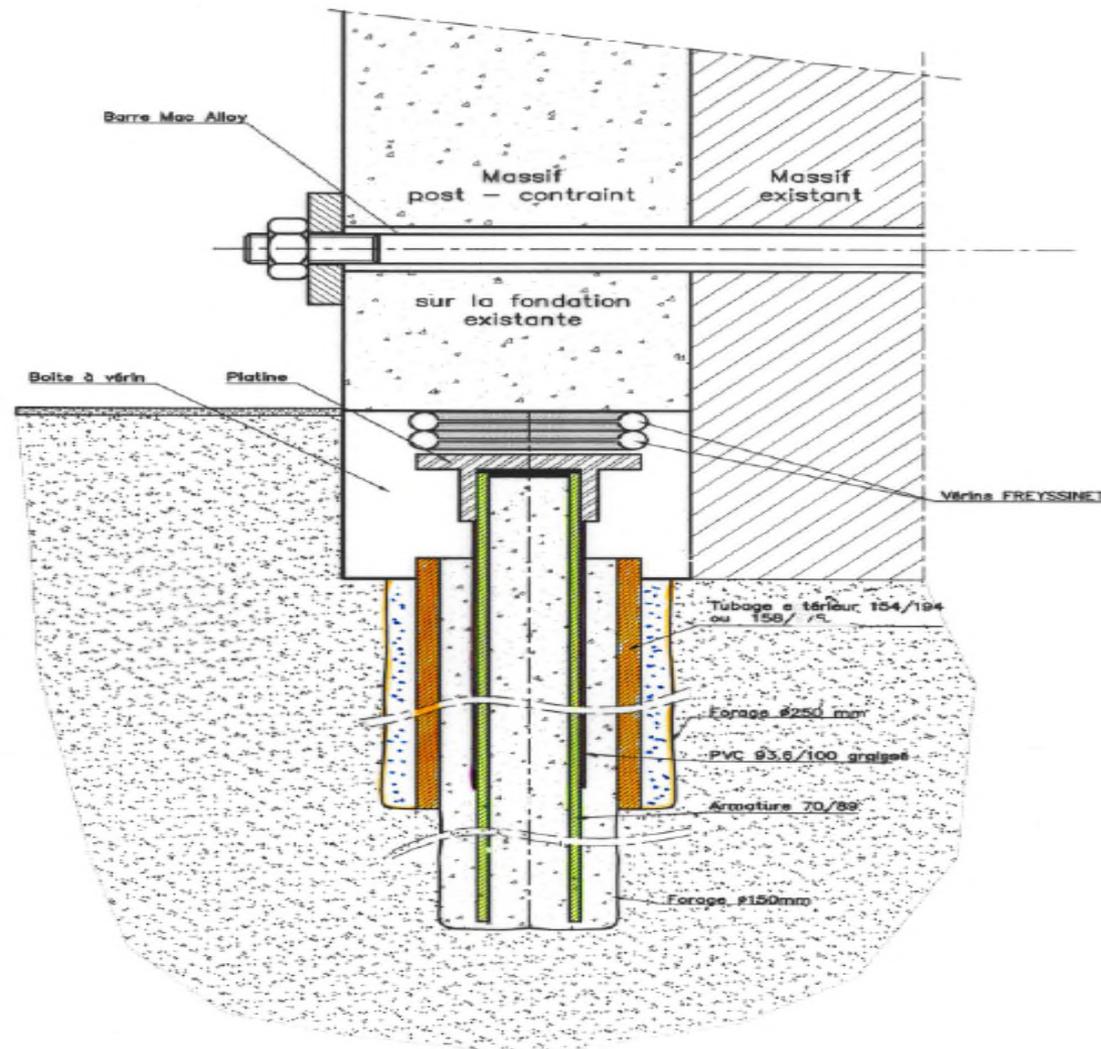


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.1. Micropieux

Problème du raccourcissement élastique du micropieu sous le transfert progressif de la charge :
des solutions existent

Exemple de micro pieu vériné
Équipé d'un dispositif anti-friction



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.2 Jet grouting

Forage destructif + jet rotatif déstructurant le terrain + injection de coulis de ciment
=> Création de colonne ou panneau de sol traité au ciment

Trois types de jet :



Adapté aux terrains peu cohérents et relativement peu compacts
(sinon pré-découpage nécessaire)

Adapté à l'amélioration de la capacité portante du sol sous radier, semelle

Augmentation de la capacité portante d'un pieu par colonnes de jet périphériques

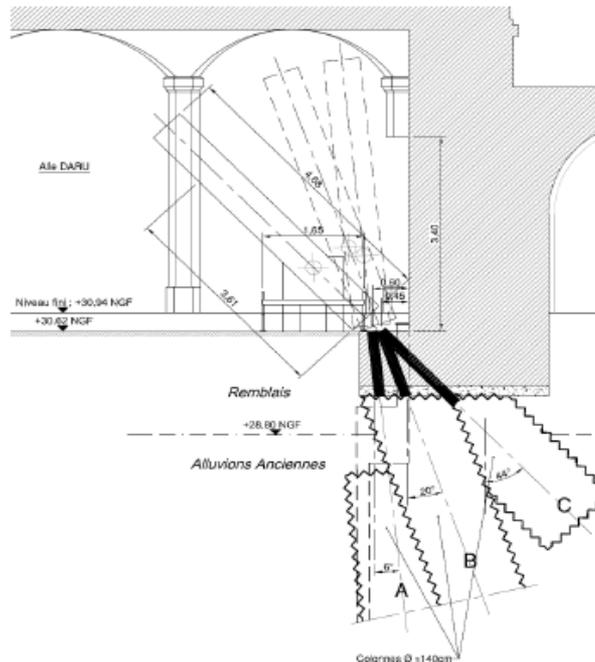
Possibilité d'armer la colonne pour reprise d'effort de flexion

Matériels adaptés pour travail sous gabarit réduit

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.2 Colonnes de jet grouting

Exemple d'application



Inconvénient :

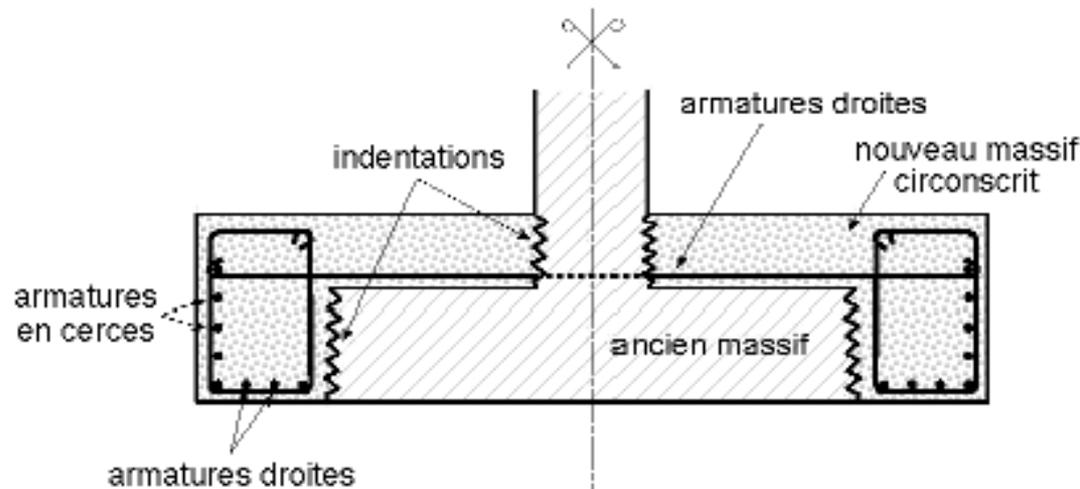
- Veiller à la bonne remontée du spoil sinon risque de claquage et soulèvement
- Chantier « sale » : gestion du spoil plus ou moins contraignante (volume important)

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2.1.3 Elargissement de fondation

Poutres BA périphériques moisées à la semelle existante (aciers passifs ou post contrainte) élargissant la surface d'appui

Nécessite l'accessibilité des deux ou quatre côtés de la semelle d'origine



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2 Reprise en sous œuvre

4.2.2 Avec modification du niveau de la fondation existante

4.2.2.1 Approfondissement de voile périphérique

Sol de bonne portance

Faible approfondissement

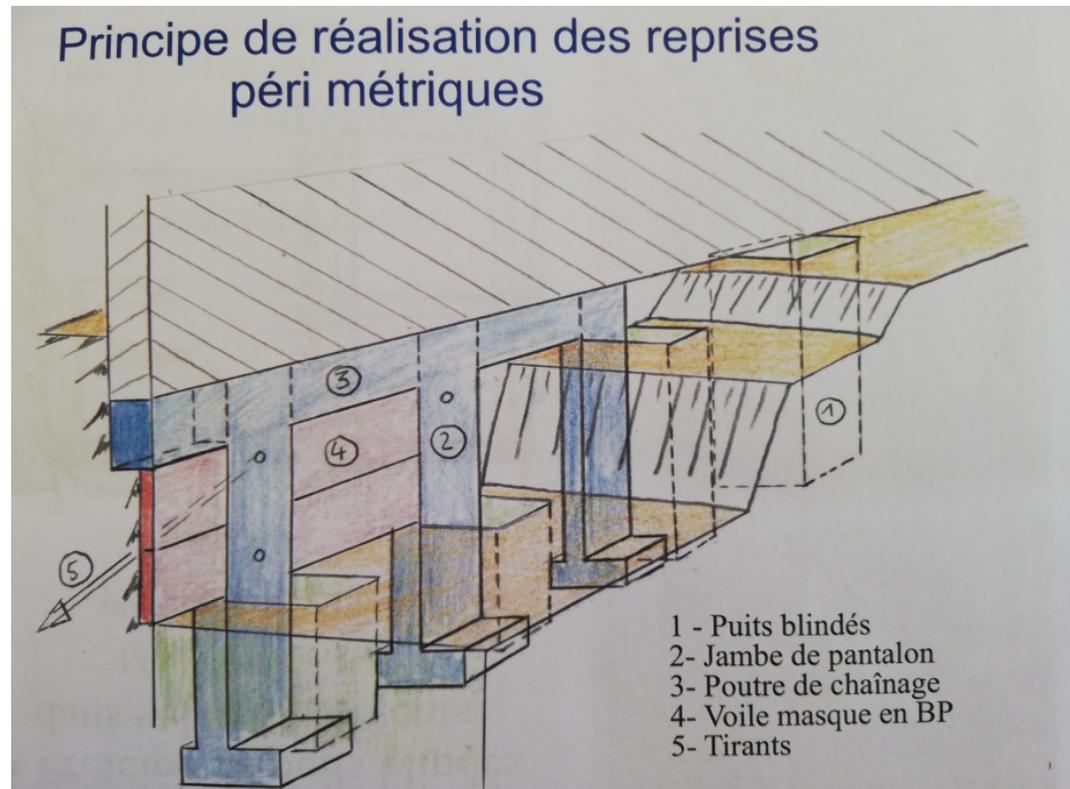
1. Puits : largeur $> 1,5$ m
2. Jambe : réalisée dans le puits
3. Poutre de chaînage
4. Voile : possibilité recours palfeuilles
5. Tirants ou butons

Conditions :

Sol cohérent (tenue des parois)

Absence de nappe aquifère

Technique souple et adaptable



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2 Reprise en sous œuvre

4.2.2 Avec modification du niveau de la fondation existante

4.2.2.1 Approfondissement de semelle isolée ou filante - profondeur importante

Nécessité de reprendre les charges linéaires ou ponctuelles :

Sur poteau ou voile :

- Poutre moisée
- Chevalement
- Etaisement

repris par micropieux ou colonnes de jet

Découpe poteau ou voile

Approfondissement du porteur

Transfert de la charge

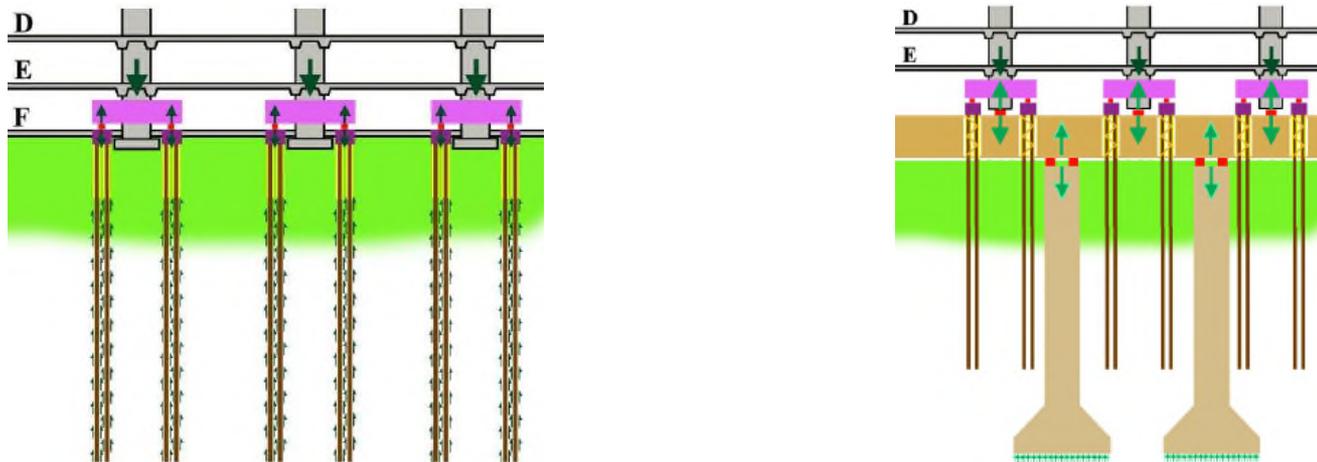


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2 Reprise en sous œuvre

4.2.2 Avec modification du niveau de la fondation existante

4.2.2.2 Création de sous sol – plancher de transfert (exemple du CNIT)



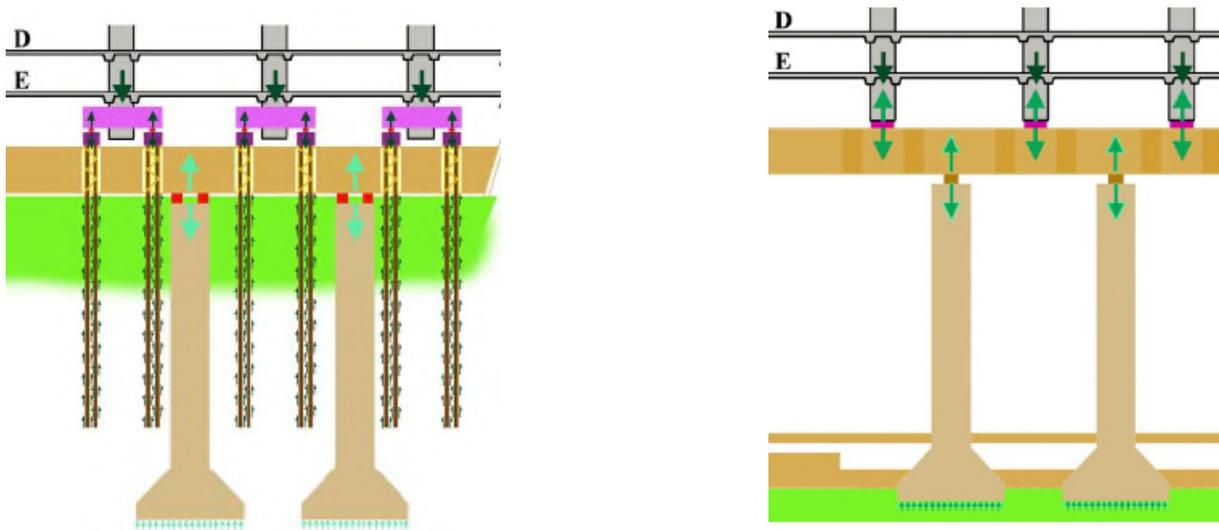
- 1, Reprise poteaux existants (jusqu'à 1000 t) : micropieux, poutres moisantes précontraintes aux poteaux, vérinage (transfert de charge)
2. Réalisation de nouveaux piliers (beiges) dans des puits, terrassement et réalisation de la dalle de transfert (réservation autour des micropieux), coulage des pied de poteaux et report de la charge des poteaux sur la dalle

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

4.2 Reprise en sous œuvre

4.2.2 Avec modification du niveau de la fondation existante

4.2.2.2 Création de sous sol – plancher de transfert (exemple du CNIT)



3. Report de la charge des poteaux existants sur la dalle de transfert par vérinage

4. Excavation en taube sous la dalle de transfert, découpe des micropieux, réalisation du radier, injection des vérins

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

5. Techniques d'auscultation

Topographique :

- Prismes, théodolite à visée laser robotisée, seuils, alarmes
- Points de vigilance : variations thermiques (soleil), vibrations...
- Télé-niveaux hydrauliques

- Tiltmètres verticaux ou horizontaux (variation d'inclinaison d'une structure)
- Fissuromètres automatiques
- Accéléromètres pour mesure de
- Jauges de contrainte
- Piézomètres, inclinomètres

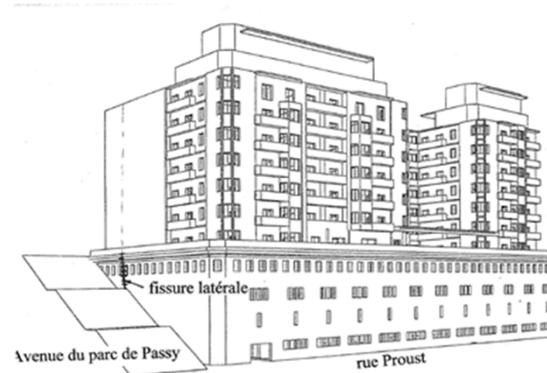


Auscultation : Partie intégrante des travaux => maintenance, exploitation en temps réel par un personnel dédié ayant pouvoir de décision

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

6. Retour d'expérience sur quelques chantiers de reprise en sous œuvre et renforcement de sol

- Immeuble R+10 sur 4 niveaux de sous sol à Paris 16^{ème} déstabilisé par un mouvement de terrain – renforcement de la structure et micropieux vérinés de grand longueur



- Silo de ciment en site compressible à Douala – renforcement de la couronnes par inclusions rigides



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

6. Retour d'expérience sur quelques chantiers de reprise en sous œuvre et renforcement de sol

- Viaduc autoroutier en site instable à Modane
- création de semelles élargies pour recentrage des charges
- Poste d'observation de la pointe du Hoc menacé par le recul de la falaise
- renforcement de sa stabilité par un corset d'inclusions rigides tirantées
- Soufflerie de Modane – Avrieux (Onéra)
subissant des tassements liés à la dissolution du gypse
– amélioration des sols par injections ; renforcement des fondations par colonnes de jet grouting clavées aux semelles superficielles

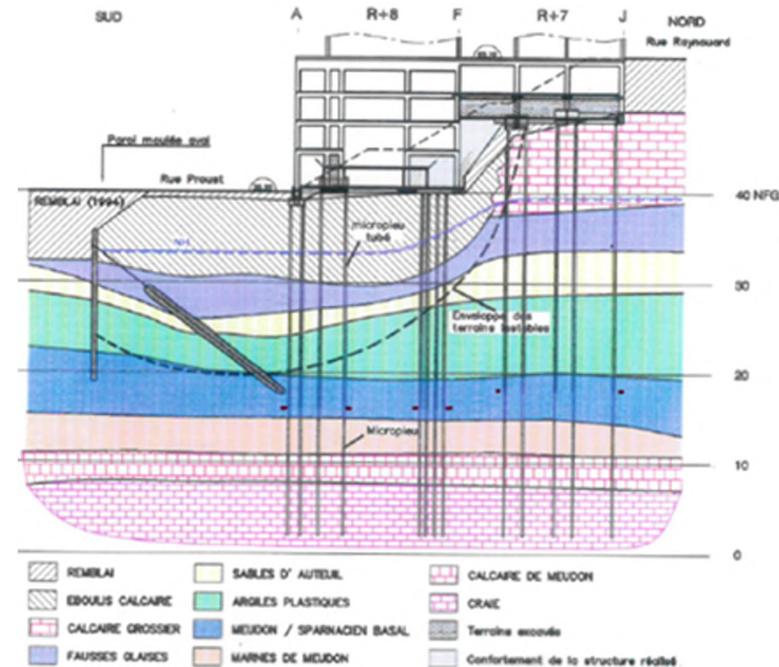
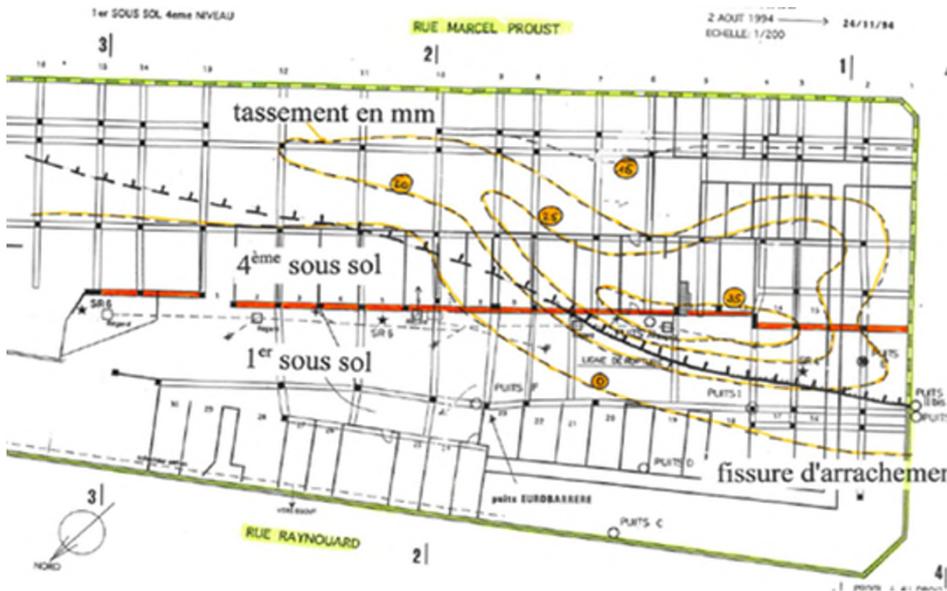


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Structure poteaux poutres peu contreventée

- Un voile médian (10 m) entre 1^{er} et 2^{ème} sous sol
- Colline de Passy : instabilité ancienne – fluage de l'AP
- Instabilité réactivée par des travaux (PM tirantée)
- Mouvement de tassement différentiel (5 cm)
- Déplacement horizontal centimétrique



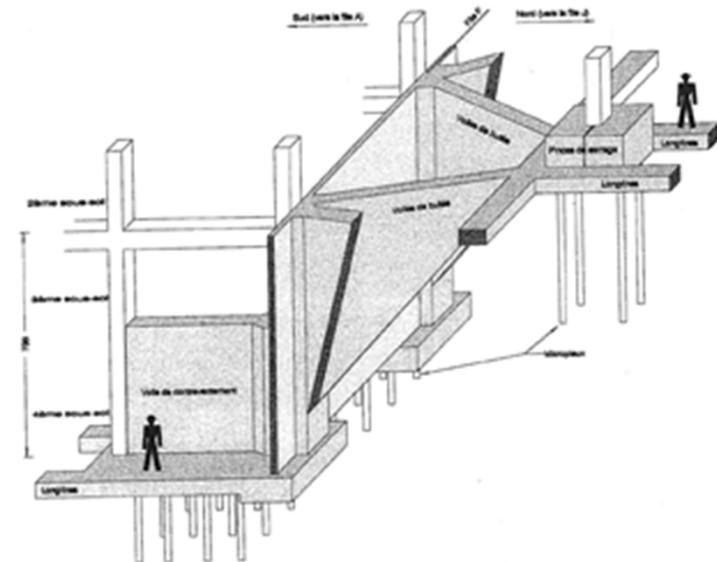
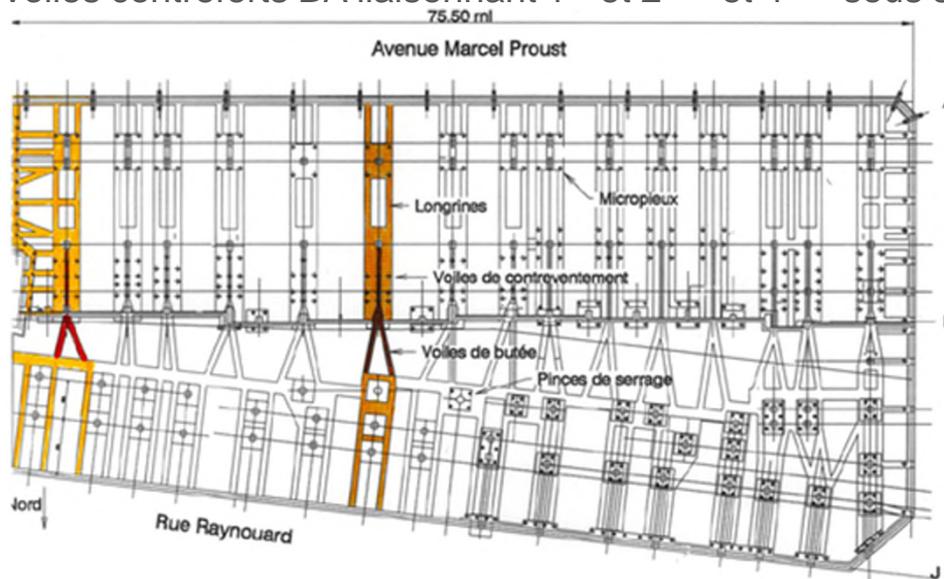
RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy – Raynouard

Expertise judiciaire ; reprise en sous œuvre et renforcement de la structure

Renforcement de la structure / mouvements horizontaux

- Solidarisation des files amont – aval par :
 - Longrines BA moisantes dans le sens de la pente (traction)
 - Voiles de contreventement
 - Voiles contreforts BA liaisonnant 1^{er} et 2^{ème} et 4^{ème} sous sol



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Reprise des charges verticales par micropieux

20 m de terrains à stabilité précaire

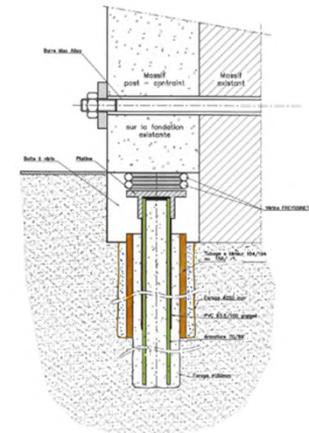
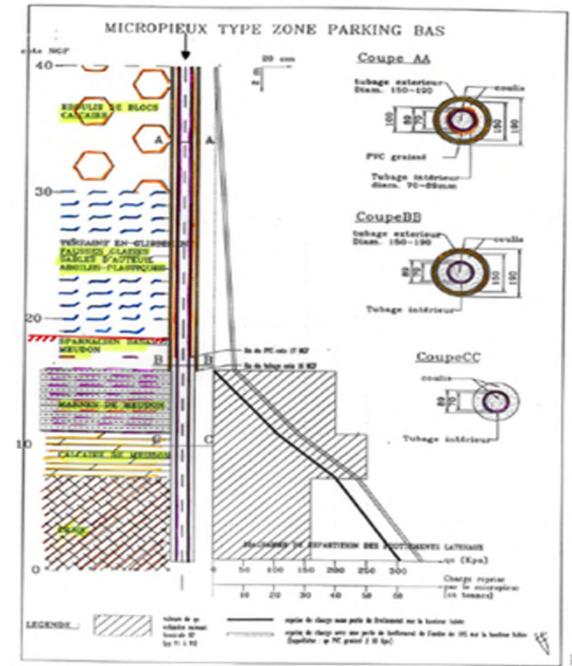
Hauteur sous plafond réduite : 3.7 m

Ancrage dans le Meudon et la craie (micropieux de 50 m)

442 micropieux – charge de service 550 kN – vérinage impératif pour limiter les mouvements à venir

Dispositif anti friction original sur 20 m

- Foreuses Soil Mec SM305 électrique
- Forage au coulis bentonite – ciment, diamètre 250 mm
- Tubage perdu 154/194 à l'avancement – scellement 1,5 m dans terrain stable
- Après 24 h : forage sous boue bentonitique diamètre 150 mm jusqu'à 50 m
- Descente de l'armature tubulaire 70/89 mm après télescopage d'un tube PVC graissé sur l'armature centrale et sur 20 m
- Substitution de la boue de forage et scellement au coulis de ciment 1200 kg/m³ toute hauteur



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

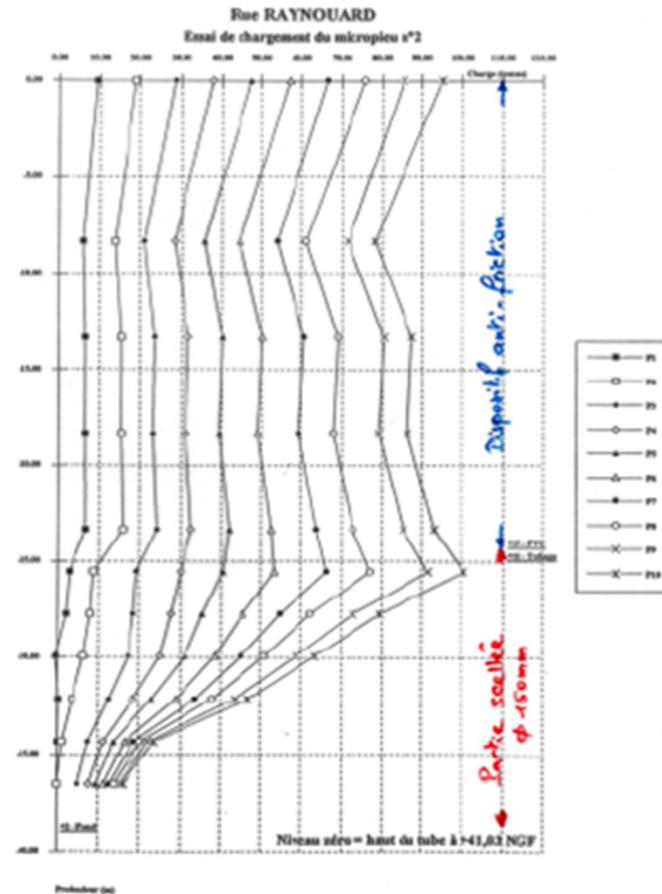
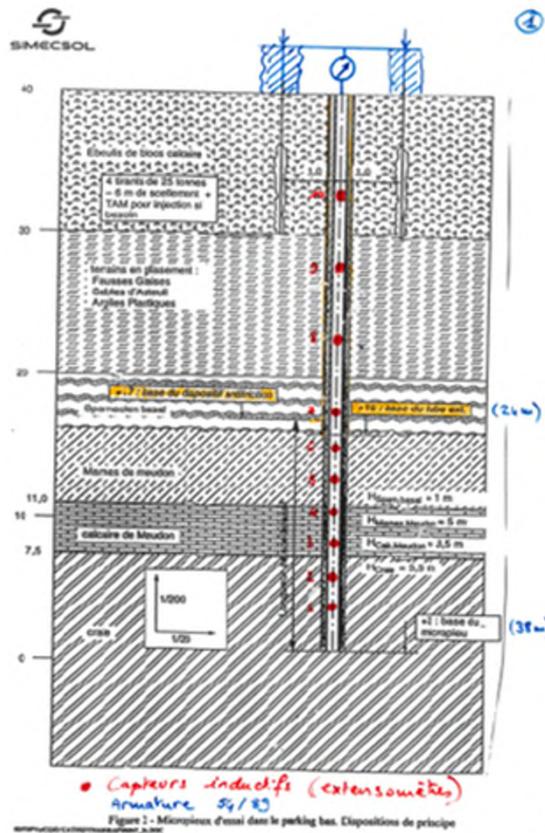
Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Réalisation de trois essais de chargement :
 vérification du q_s
 et du dispositif anti friction

10 extensomètres inductifs

Essai à 950 kN

Frottement
 sur le PVC graissé < 10 kPa

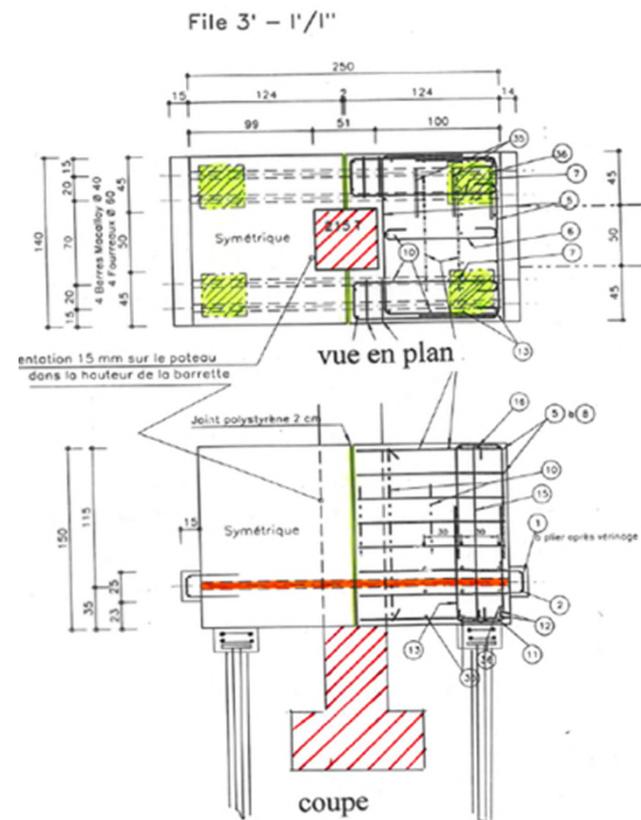


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Liaisonnement micropieux-semelles

- Platine 250 x 250 x 35 mm en tête de micropieux
- Deux vérins plats Freyssinet de 220 mm de diamètre
- Poutres BA moisées aux poteaux existants et post contrainte

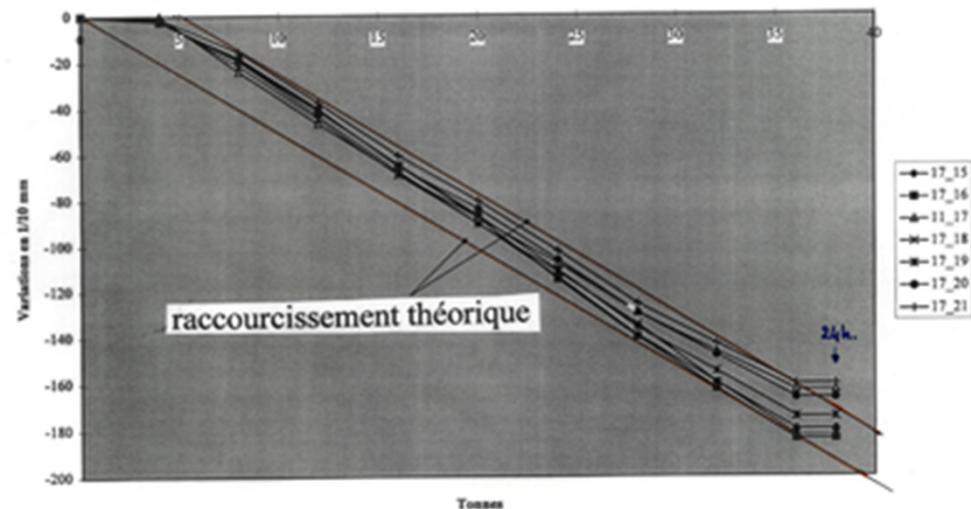


RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Mise en charge des micropieux :

- Premier vérin chargé à 70% de $G + 0.3 Q$ soit 350 kN (résine polymérisable)
- Surveillance altimétrique continu ; enregistrement de déformations et comparaison au fuseau de raccourcissement théorique (mesure au 1/10 mm ; raccourcissement théorique de 1,6 à 1,8 cm sous 350 kN)
- Surveillance de la stabilité pendant 24 h
- Possibilité d'avoir recours au 2^{ème} vérin si non stabilité
- Liaisonnement des poutres BA longitudinales aux poteaux après stabilisation



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

Surveillance altimétrique de l'immeuble en cours de chantier :

- Contrainte du CCTP : tassements admissibles lors de la réalisation des micropieux : 7 mm en absolu et 4 mm en différentiel
- Etaiements provisionnés à titre préventif
- 78 mires et niveau tournant automatisé
- Surveillance permanente – alarme
- Contrôle par géomètre tous les deux mois
- Objectif tenu : 4,9 mm en absolu et 1,4 mm en différentiel (+/- 0.6mm)



En sus :

- Mesures topographiques sur PM aval et avoisinants
- 13 inclinomètres, 10 piézomètres, jauges Saugnac sur fissures de l'immeuble

Mesure poursuivies après chantier : pas de mouvement significatif



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Immeuble R+10 Paris 16^{ème} Passy - Raynouard

REX :

- Maitrise des injections (utilisation de silicate en présence de vide ou zone décomprimée)
- Gestion des boues (forage en sous sol)
- Maitrise des vibrations (notamment lors des démolitions d'éléments béton) et maitrise du bruit (immeuble habité)
- Adaptations fréquentes en raison de fondations toutes différentes
- Mouvements constatés au forage des micropieux
- Niveau automatisé : fausses alertes en raison de présence temporaire de soleil sur certaines cibles

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Silo de ciment à Douala

Silo de 55 m de diamètre ; hauteur 10 à 14 m
Enveloppe métallique sur poutre couronne en BA
Stockage sur terreplein non renforcé

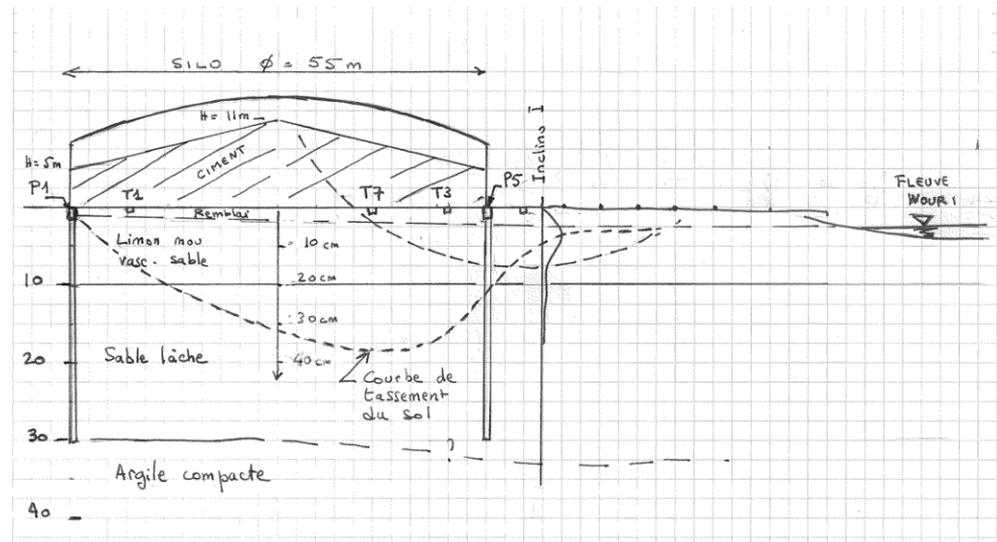
Terrains en présence :

- Remblai peu épais
- Argile sableuse molle et vase sur 10 m
- Sable lâche liquéfiable sous vibration jusqu'à 30 m environ
- Argile compacte

Nappe sub-affleurante (fleuve Wouri)

Fondation de la couronne :

36 pieux forés (tous les 5 m) –
diamètre 450 mm – profondeur 30 m



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Silo de ciment à Douala

Désordres constaté (nivellement 10 repères)

Premier chargement : 23.000 t :

- Tassement couronne 14 cm (1/3 côté fleuve) ; différentiel 13 cm / 25 m
- Pas de fissuration de la couronne
- tassement absolu sous stockage 32 cm maxi

Instrumentation mise en place :

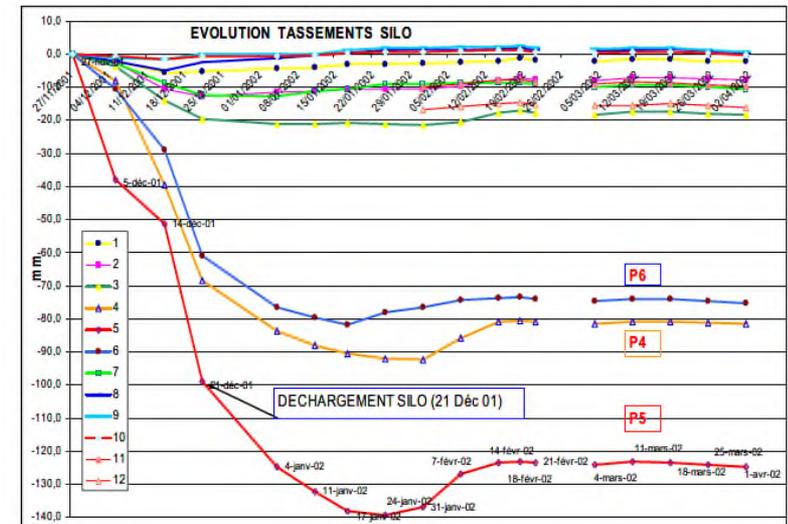
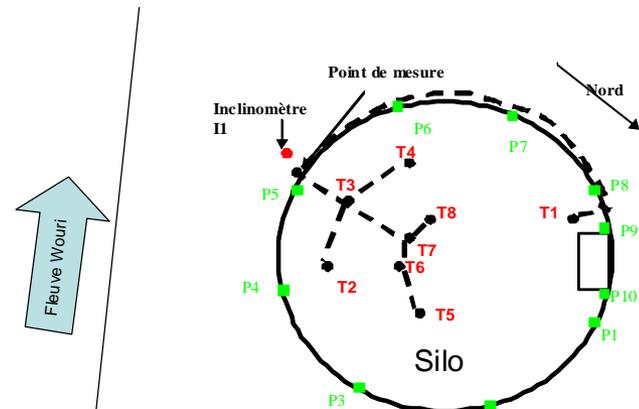
- 8 tassomères en fond de silo
- 1 inclinomètre de 36 m

Second chargement : charge de 12 à 16,000 t

- Tassement couronne 2 cm
- Tassement sous stockage : 8 cm

Diagnostic :

- Tassement sols compressibles H = 10 m
- Fluage des sols mous vers le fleuve
- Poinçonnement des pieux de la longrine sous l'effet du frottement négatif
- Sol de compressibilité variable sous le silo



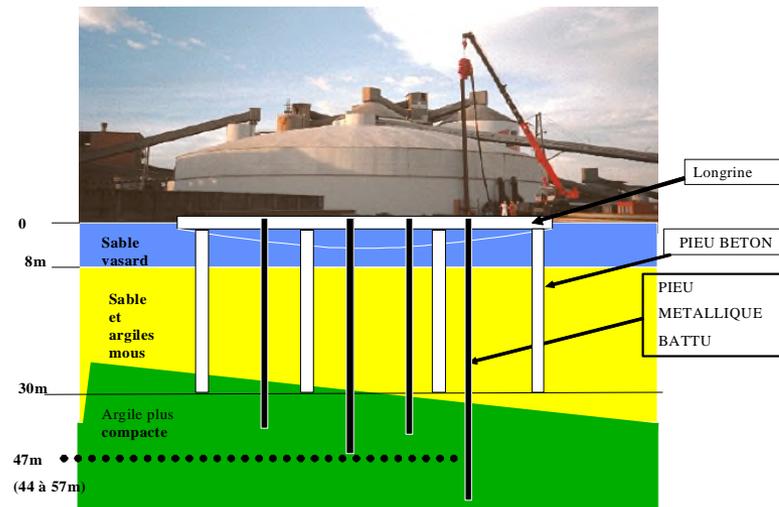
RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Silo de ciment à Douala

Solution dite «de sauvetage » car impossibilité pour le MOA d'arrêter l'exploitation pour reprendre la totalité du silo

Objectif prioritaire : limiter la déformation de la longrine car enveloppe métallique fragile

- Pieux métalliques HP de 45 m au bord externe de la longrine
- Mise en œuvre par longueur de 15 m ; vibrofonçage jusqu'à 30 m ; battage ensuite (portance du pieu : Crandall)
- Liaisonnement des pieux à la longrine par soudure sur platine métallique boulonnée



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Silo de ciment à Douala

Travaux : Méthode observationnelle

Nivellement - pour adaptation de la longueur des pieux, suivi du comportement du silo sous vibro-fonçage et battage (risque de liquéfaction des sables lâches)

1 mesure tous les $\frac{1}{4}$ h ou 5 m de fonçage

- Seuil d'alerte : $w_1 = 2$ mm en cours de battage
- Seuil d'arrêt : $w_2 = 5$ mm pour le battage d'un pieu ; $w_3 = 25$ mm cumulés

Si alerte :

- Soit attente consolidation du terrain
- Soit liaisonnement des pieux battus à la longrine (pour limiter les tassements)
- Soit renforcement de la structure

Travaux : sous poursuite de l'exploitation (chargements – déchargements)

- Démarrage avec 18.000 t de ciment : seuils d'arrêt atteints lors des premiers vibro-fonçages
- Redémarrage 3 semaines après avec 8.000 t de ciment : arrêt 15 j après : couronne + 26 mm et tôle tordue
- Confortement de la superstructure (étais – découpage de la robe) et liaisonnement pieux en place / longrine
- Redémarrage avec soudure pieux longrine au fur et à mesure : + 24 mm de tassement ; pieux en place

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

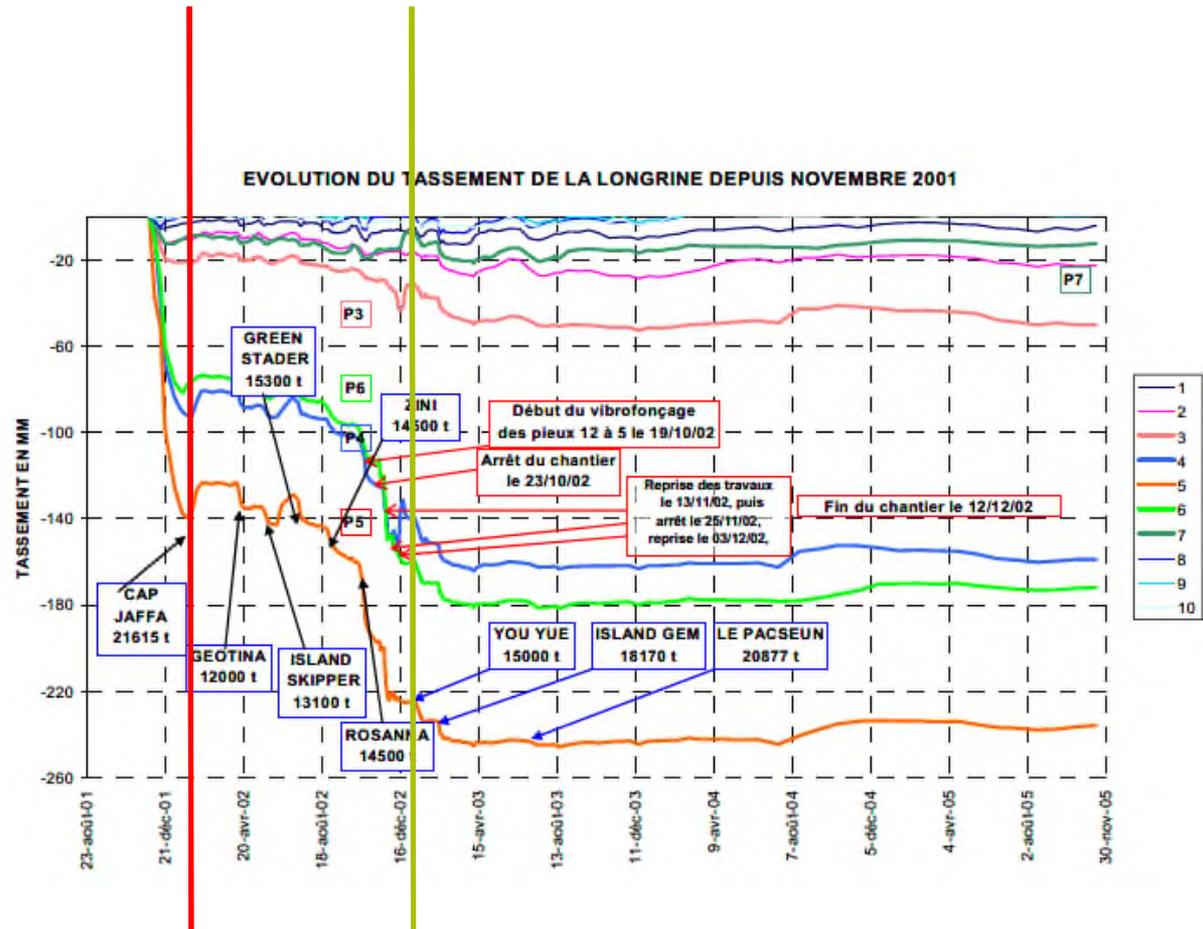
Silo de ciment à Douala

Suivi des déplacements :

- Importants lors de la mise en œuvre
- Mise en place au 1^{er} chargement après travaux (20/25 mm)
- Stabilisation ensuite

REX :

- Poursuite de l'exploitation
- Pilotage du chantier par la méthode observationnelle (liquéfaction : non effondrement)
- Suivi topo à poursuivre
- Nécessité de poursuivre les travaux au centre du silo



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Viaduc du Charmaix : rampe d'accès au tunnel du Fréjus

Viaduc franchissant le torrent du Charmaix, construit en 1976-77 dans un versant (30°) qui s'est avéré instable

Longueur : 346 m

9 travées à poutres précontraintes de 40 m

Fondations superficielles sauf une pile sur pieux au rocher (P7 - protection par viroles – garde de 50 cm)

Deux ans après construction : poutres du tabliers séparées de 5 cm en P7 en contact



Terrains éboulis et moraines surmontant le substratum du Houiller (schistes anthraciteux et grès)

Profondeur des surfaces de glissement 23 à 36 m en rive droite ; 12 à 20 m en rive gauche

Activité : 1 à 2 cm / an en moyenne ; notamment à la fonte des neiges

Nappe aquifère profonde (au toit des schistes en rive gauche)

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

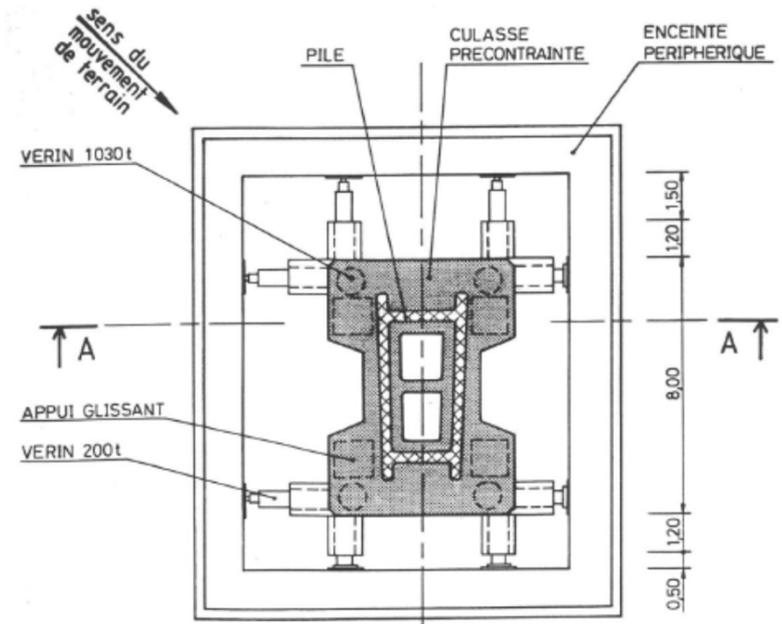
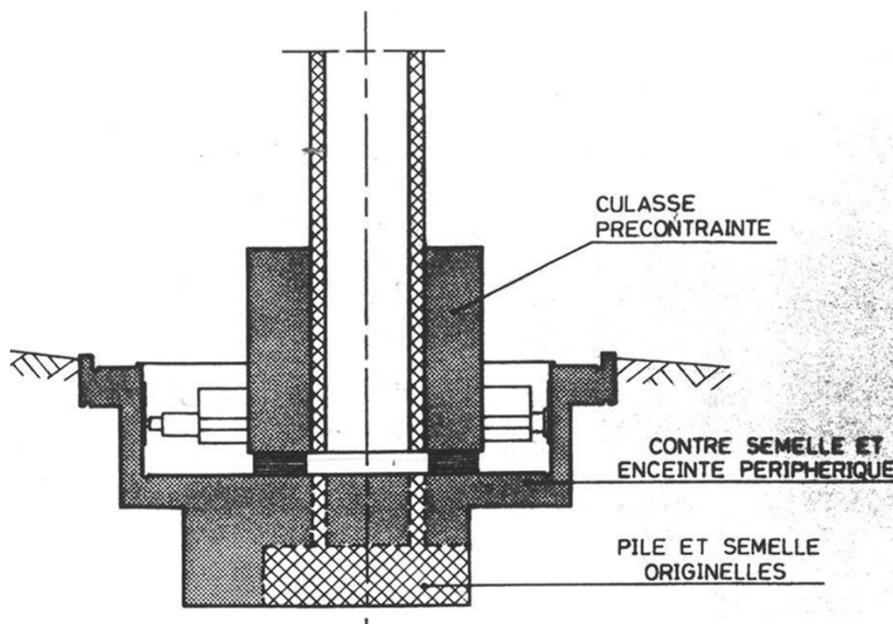
Viaduc du Charmaix : rampe d'accès au tunnel du Fréjus

Principe des travaux de reprise des fondations (BET Tonnelo)

Réalisation en sous œuvre des semelles existantes d'une contre semelle élargie – enceinte périmétrique associée à des vérins pour recentrage de la pile sur la nouvelle semelle suite aux mouvements

Estimation des efforts sous appui le plus chargé : 650 t probables - 1250 t ultimes

Estimation des efforts de frottement lors du recalage : 120 t probables – 200 t ultimes



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Viaduc du Charmaix : rampe d'accès au tunnel du Fréjus

Phasage des travaux

1. Dégagement périmétrique des semelles et terrassement de la future contre-semelle,
2. Coffrage de la future contre-semelle avec enceinte périmétrique ferrailage et coulage du béton
3. Culasse en béton armée coulée sur 4 appuis glissants posés sur la contre-semelle ; culasse précontrainte au poteau
4. 4 vérins provisoires (1030 t) sous culasse pour reprendre le poids de la pile ; vérins latéraux pour la stabilité
5. Découpe de la pile sous la culasse
6. Recalage des 4 appareils d'appuis glissants et Détente des vérins provisoires
7. Au final : Culasse reposant sur le appuis glissants posés sur la contre -semelle



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Viaduc du Charmaix : rampe d'accès au tunnel du Fréjus

Recalages successifs :

Recalage latéral en jouant sur les vérins périphériques (200t)

Recalage vertical possible



Durée d'un recalage : 2 mois environ ; contrôle topographique
Plusieurs recalages réalisés : conformes aux prévisions

REX

- Solution originale
- Solution d'attente ; construction d'un nouveau viaduc en cours

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Blockhaus du poste d'observation de la pointe du Hoc (Normandie)

Haut lieu de la mémoire du débarquement allié en 1944 – site rétrocédé en remerciement aux USA
Recul de la falaise sous l'effet de l'érosion (15/20 cm par an)

Objectif : préserver la stabilité du blockhaus « le plus longtemps possible »
permettre la réouverture au public pour les cérémonies des 70 ans
Procédure de dialogue compétitif – conception réalisation



2nd Rangers at Pointe-du-Hoc
By Vincent Wu

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Blockhaus du poste d'observation de la pointe du Hoc (Normandie)

Blockhaus : ouvrage monolithe de 15 x 15 m en BA

– radier de 2 m d'épaisseur

Falaise de 20 m de hauteur – calcaire friable sur marnes

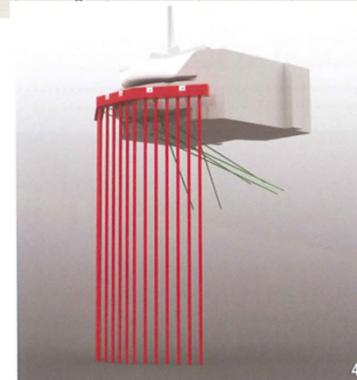
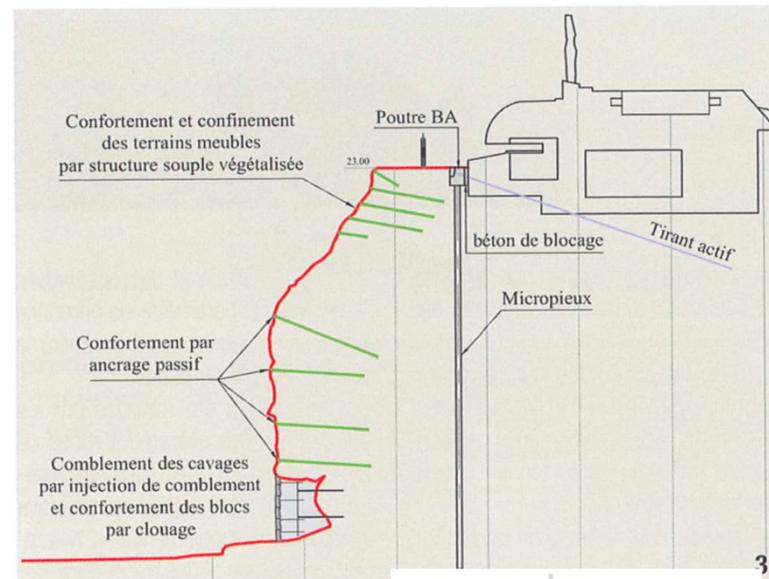
Objectif des travaux : Limiter la décompression de la falaise au voisinage du blockhaus

- Comblement des sous-cavages en pied de falaise
- Clouage de la falaise
- Dispositif visant à favoriser la végétalisation en partie sommitale

Renforcement du sol de fondation du blockhaus :

Corset d'inclusions rigides :

- tubes acier 219/199 mm FeE 560 de 23 m
- dans pieu foré diamètre 280 mm
- Encastrés dans les marnes en pied de falaise
- Poutre de couronnement BA en tête d'inclusion
- 6 tirants de 330 kN précontraints à 160 kN
barres Gewi 35 S670 scellés sur 10 m en arrière du coin de poussée sous le radier (possibilité à terme de ripage du blockhaus)



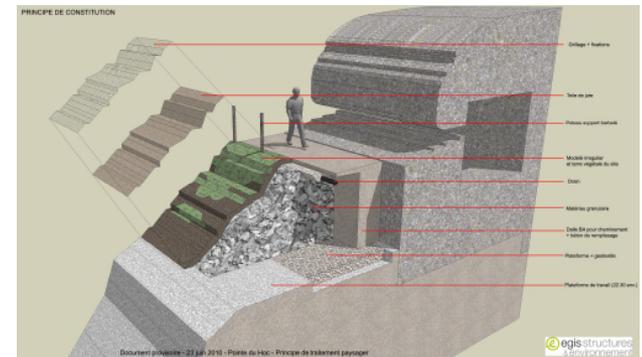
RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Blockhaus du poste d'observation de la pointe du Hoc (Normandie)

Travaux d'inclusions rigides, poutre de couronnement, tirants d'ancrage:

Zone de travail exiguë et peu compacte : renforcement du chemin de roulement de la foreuse par 7 micropieux tubes 89/76 dans forage de 150 mm
Reprise en tête par une poutre BA en appui sur le blockhaus

Forage inclusion en 280 mm : foreuse Comaccio MC800 de 11 tonnes
Mise en place par grue de grande portée située en arrière du blockhaus



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Blockhaus du poste d'observation de la pointe du Hoc (Normandie)

Instrumentation pour le suivi à long terme :

- 4 extensomètres subhorizontaux parallèles aux tirants et repris en tête par la poutre de couronnement
- 6 inclinomètres munis de chaîne de capteurs : 2 dans les IR ; 4 au pourtour du blockhaus
- 6 cales dynamométriques (tirants)
- 1 nivelle bidirectionnelle sur blockhaus
- 1 piézomètre avec capteur de pression
- 1 capteur de température
- 1 centrale d'acquisition

Mesures en temps réel avec alarmes pour exploiter le site en sécurité

REX :

- Difficulté rencontrées lors du forage des IR : bancs durs, diamètre de forage important, exigüité de la plate-forme de travail , tubes acier de grande longueur (soudés) et lourds (épaisseur 60 mm) ; difficulté de descente dans les forages ; puissance de la machine conditionnée par les conditions d'accès
- Aucun mouvement significatif enregistré lors des travaux et sur 2 ans de suivi
- A notre connaissance : bon comportement de l'ensemble 4 ans plus tard.



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Soufflerie ONERA de Modane – Avrieux

Bâtiment poteaux – poutre de fort élancement en forme de croix (cathédrale) ; construit en fin des années 1940

3 chariots de 500 t sur rails pour positionnement des maquettes dans l'axe du circuit aéraulique

Fondation des poteaux semelles sur pieux Franki ou Simplex préfabriqués – diamètres 400/500 mm profondeur 6/10m

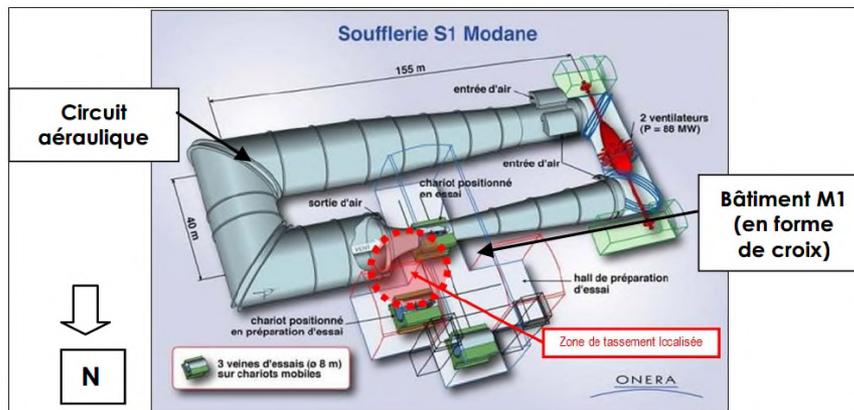
Bâtiment implanté en bordure de l'Arc :

- Limons et remblais en surface
- Alluvions fluvio glaciaires sablo graveleuses sur 25 m
- Substratum : quartzites d'un côté et cargneules et gypse de l'autre ; zone de faille



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Soufflerie ONERA de Modane – Avrieux



Tassement localisé évoluant depuis la construction (4 cm de 1953 à 2009)

Accélération en 2009 ; décision de diagnostic et définition / mise en œuvre de travaux : dialogue compétitif

Investigations => Tassement localisé lié à la dissolution du gypse



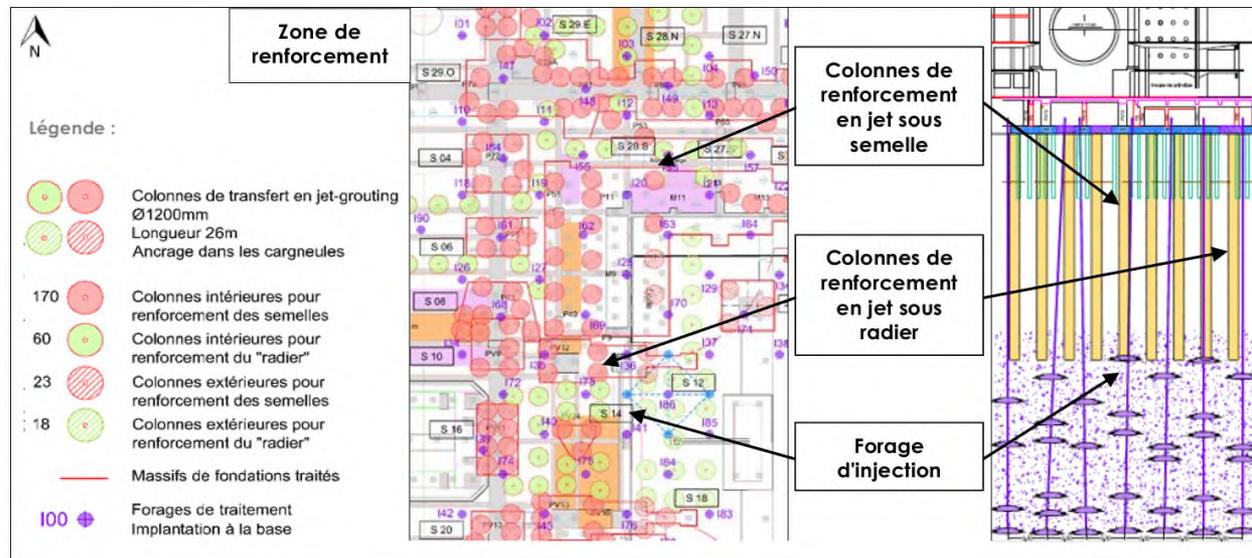
Gris : semelle
Rond noir : pieu
Vert : façades

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Soufflerie ONERA de Modane – Avrieux

Attributaire Spie Fondations ; solution retenue :

- Modèle éléments finis 3D (Terrasol) afin d'évaluer les tassements long terme après renforcement
- Injection de mortier entre 25 et 50 m dans les vides et zones décomprimées des cargneules et gypse
- Création ainsi d'un matelas de réparation homogénéisé
- Report des charges des poteaux sur ce matelas par colonnes de jet grouting clavées aux semelles existantes : 170 colonnes jet simple – diamètre 1200 mm – longueur 26 m
- Réalisation au préalable d'un radier béton armé solidarissant toutes les semelles (risque tassement différentiel)



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Soufflerie ONERA de Modane – Avrieux

Travaux :

Travaux à partir du RdC ; tubage du sous sol (hauteur faible)
Foreuse électrique (bâtiment en activité)

Planches d'essai pour caler les procédures :

Abandon forage à l'air au profit du forage à la boue avec tête vibrante (limitation des tassements)

- Forages d'injection de comblement en deux phases pour limiter les tassements :
- Traitement des 25 premiers mètres (éviter les soutirage de fines dans les alluvions)
- Approfondissement de 25 à 50 m ensuite
- Injections sous tubage par passes montantes de 2 m selon 3 compositions de mortier
- Maillage réduit de 3,3 x 3,5 m à 2,5 x 2,5 m

Jet : jet simple pour limiter les tassements

Fluvio glaciaire très différent des cargneules et gypses : adaptation des paramètres du jet nécessaire

Injection de clavage des colonnes aux semelles (tendance à la décantation)

RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

Soufflerie ONERA de Modane – Avrieux

Instrumentation

Surveillance altimétrique en temps réel (une mesure par heure) au 1/10 mm : 60 poteaux

Jauges de déformation et jauges de contraintes sur certains poteaux ou poutres

Mesures automatisées de largeur de fissures (toutes les 2 mn)

Suivi en temps réel => adaptation des cadences et phasages pour limiter les tassements

REX :

Hyper sensibilité de la structure aux tassements générés par les travaux de ce bâtiment (stabilité précaire : effets voute dans le fluvio glaciaires avec ruptures)

Adaptation du mode de forage

Importance du suivi en temps réel : adaptation du phasage et des cadences

Gestion contraignante des boues de forage et jet en sous sol



RENFORCEMENT DE SOL SOUS OUVRAGE EXISTANT ET REPRISE EN SOUS ŒUVRE

7. Conclusion

Un projet de reprise en sous œuvre est toujours original (d'où son intérêt)

Il fait appel à des compétences en structure, en géotechnique et en travaux spéciaux (méthodes et matériels)

C'est toujours un projet à risque ; la réalité diffère souvent de ce qu'on a imaginé en conception :

- Reconnaissance des sols et structures partielles
- Modèle d'interaction sol –structure approximatif
- Structure fragilisée et sol sensibles aux déformations lors des travaux
- Calculs analytiques et modélisations éléments finis souvent approchés
- Phases provisoires souvent dimensionnantes (maîtrise du phasage des travaux)

Réduire le risque passe par l'instrumentation et la méthode observationnelle (mise en œuvre, suivi et compétence des acteurs) avec un arbre préalable de décision impératif

8. Hommage

| Jean Biarez (ECP)

| Pierre Desvarreux (ADRGT)

| François Keime (Sol Engineering)

| Henri Gonin (Simecsol)

| Jean Rousseau (Soletco)

Ingénieurs de grandes qualités tant sur le plan technique que humain

Qui nous ont quittés et à qui je dois beaucoup sur le plan professionnel...



Merci pour votre attention