

Un siècle d'écrans de soutènements

Revue bibliographique sur l'évolution des techniques

Luc DELATTRE,
Chef de la section Comportement des sols et ouvrages géotechniques
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Après un rappel sur l'utilisation primitivement faite de rideaux de pieux en bois pour soutenir les terres, l'article décrit les principales étapes de l'innovation en matière d'écrans de soutènements tout au long du XX^e siècle, de l'apparition des palplanches en acier et en béton aux derniers développements en matière de paroi moulée ou de techniques dérivées. Il décrit également comment ces innovations dans le domaine des écrans ont été accompagnées d'innovations parallèles dans le domaine des ancrages et appuis, depuis les ancrages passifs par corps morts aux ancrages forés et scellés et aux techniques de construction en taube. Ces différentes innovations ont progressivement permis l'application de la technique des écrans de soutènements à une famille toujours plus large d'ouvrages de génie civil, notamment dans le domaine du génie civil urbain.

MOTS CLÉS : 24-53-42 - *Ouvrages de soutènement - Acier - Béton armé - Parois moulées - Blindage (étais) - Bibliographie - Historique - Bois - Ancrages - Excavation - Méthode - Palplanches - Technologie.*

Introduction

C'est de la technique la plus commune dans la construction traditionnelle, la maçonnerie, que dérive le procédé de soutènement longtemps le plus utilisé, le mur poids en maçonnerie. Le mur poids en maçonnerie, simple prolongement du mur en maçonnerie, a vraisemblablement été utilisé depuis l'aube de la construction pour le soutènement des remblais et des excavations. Longtemps sans réelle concurrence, cette technique de soutènement s'est développée progressivement jusqu'au XIX^e siècle, époque où, après avoir accompagné l'édification des fortifications (de Vauban aux fortifications de Paris, notamment), elle a connu son apogée dans la construction des infrastructures modernes de communication (voies de chemin de fer, routes, canaux, ports, etc.).

L'utilisation de produits nouveaux, comme l'acier et le béton, puis de techniques nouvelles de construction va permettre, à partir du début du XX^e siècle, d'innover dans le domaine des soutènements. Ainsi, la technique des écrans de soutènements, jusque là réservée à la réalisation de batardeaux ou d'ouvrages de rive, va pouvoir progressivement être améliorée et diversifiée. Son utilisation pourra alors être progressivement étendue à la réalisation de soubassements d'immeubles, de voirie enterrée, parkings souterrains, etc., en relation avec le développement, en parallèle de modèles de calcul adaptés à ces nouveaux ouvrages (Delattre, 1999).

Cet article décrit comment ces innovations dans le domaine des écrans de soutènements ainsi que dans le domaine connexe – et indissociable – des ancrages, nous ont permis de disposer aujourd'hui d'un ensemble varié de techniques d'écrans de soutènements utilisées dans de nombreux ouvrages de génie civil.

Les écrans de soutènements : du bois à l'acier et au béton

L'ère du bois

La technique des écrans de soutènements, consistant à opposer à la poussée des terres des éléments de structure fichés dans le sol et résistant en flexion, a, dans un premier temps, fait appel à des pieux en bois, juxtaposés les uns aux autres de façon à constituer un écran continu.

Cette technique était, en particulier, utilisée pour la réalisation de batardeaux en rivière constitués de deux rideaux de pieux entre lesquels on disposait un remblai d'argile (fig. 1 et fig. 2). La fonction d'étanchéité du batardeau était remplie par le noyau d'argile, tandis que les rideaux de pieux assuraient le confinement de ce noyau. Ces premiers batardeaux, utilisant des pieux plus ou moins bien équarris, devaient présenter une forte sensibilité à l'érosion, l'eau pouvant s'infiltrer entre les pieux et entraîner le sol.

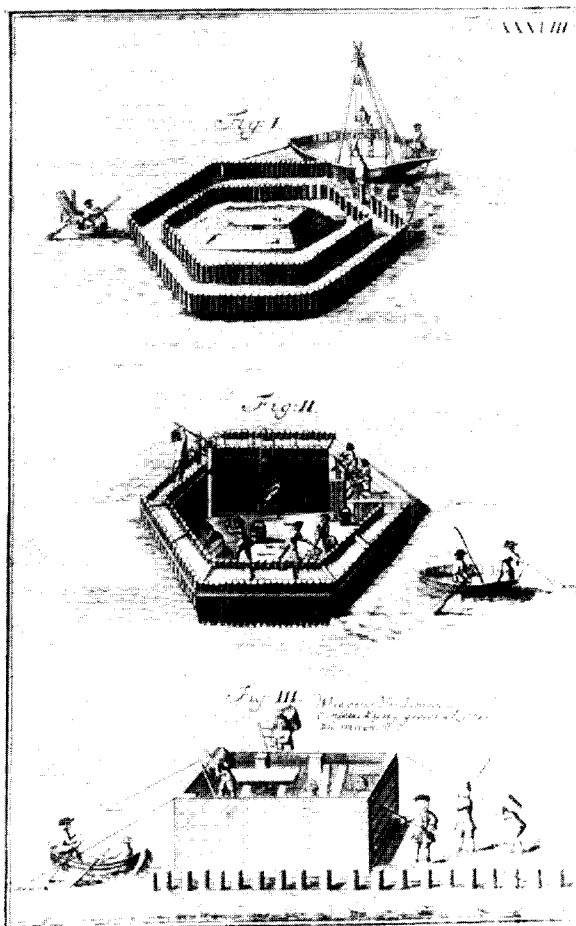
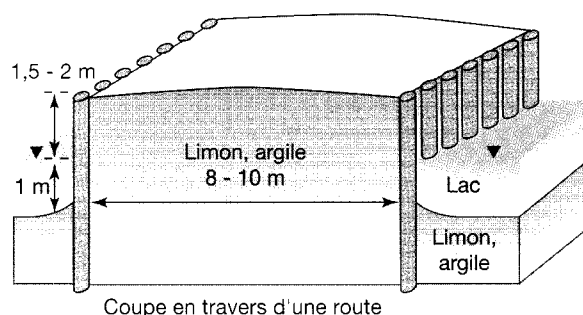


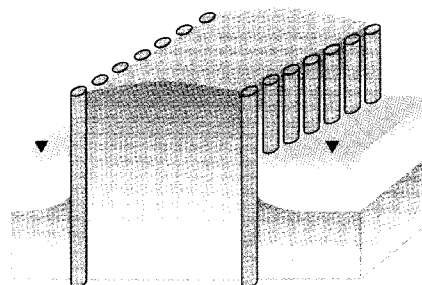
Fig. 1 - Batardeau réalisé à l'aide de pieux en bois juxtaposés (d'après Jacob Léopold « Theatrum Machinarium Hydro-technicarum », Leipzig, 1724)*.

L'évolution naturelle de cette technique a donc consisté à améliorer les joints entre les éléments successifs du soutènement. Les palplanches en bois (fig. 3), s'assemblant les unes aux autres en « grains d'orges »,

* White, p. 921, Leonards (1968).



Coupe en travers d'une route



Coupe en travers d'une digue

Fig. 2 - Coupes en travers des digues et routes de Tenochtitlan (d'après B. Diez, in Sowers, 1981, p. 409).

ou bien à l'aide d'un dispositif de rainure et languette, ou encore en faisant appel à un « clameau », se sont ainsi substituées aux pieux en bois initialement utilisés.

Ces palplanches pouvaient être utilisées en batardeau, de façon traditionnelle, en association avec un noyau de terrain, voire seules, lorsque leur étanchéité était suffisante (Frick et Lévy Salvador, 1926, p. 230). Elles pouvaient également être utilisées pour le soutènement des terres ou encore pour le coffrage de murs de quai en béton (Aubry, 1908).

Les écrans de palplanches en béton armé et en acier

La recherche d'éléments de structure plus résistants, tant pour leur mise en place dans le sol, qui s'effectue généralement par battage, que pour leur résistance à la poussée du sol, a conduit les ingénieurs du génie civil à se tourner vers les nouveaux matériaux mis à leur disposition par l'industrie. C'est ainsi que, dès le début du XX^e siècle, des palplanches en béton armé (fig. 4a et b et fig. 5) ou en acier (fig. 4c) ont été utilisées en remplacement des palplanches en bois.

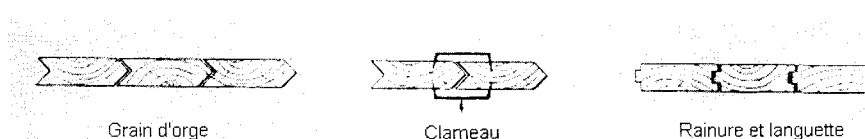


Fig. 3 - Palplanches en bois (d'après Galabru, 1963).

Fig. 4 - Premières palplanches en acier et en béton.

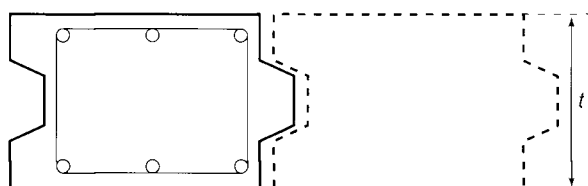


Fig. 4a - Palplanches en béton armé avec rainures et languettes (d'après Tschebotarioff, in Leonards, 1968).

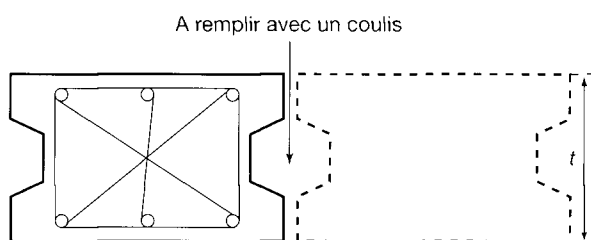


Fig. 4b - Palplanches en béton armé avec rainures pour l'injection de coulis de ciment (id.).

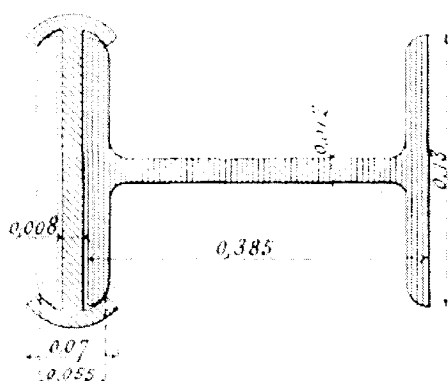


Fig. 4c - Palplanches constituées de profilés I (d'après Caudrelier, 1913).

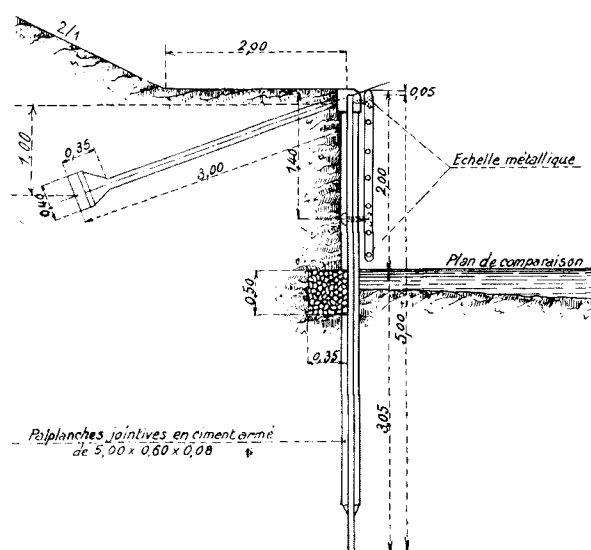


Fig. 5 - Emploi de palplanches en béton armé pour le soutènement des berges du canal de Suez (d'après de Rouville, 1937).

L'utilisation de ces palplanches en béton et en acier a concerné, dans un premier temps, des applications relativement marginales de soutènement des terres (Caudrelier, 1913 ; Frick et Lévy Salvador, 1926, p. 121 ; de Rouville, 1937).

L'emploi des palplanches en béton armé ne connaîtra pas de réel développement, à cause du poids de ces structures, de leur fragilité, des difficultés de battage qu'elles présentaient ainsi que des difficultés d'étanchement des joints entre palplanches.

Les palplanches en acier vont par contre connaître un développement important*. Initialement, elles ne différaient pas des profilés métalliques utilisés à d'autres fins et notamment en construction métallique. Il s'agissait de profilés en I ou en U assemblés de sorte à constituer des écrans continus (fig. 4c), le raccord étant constitué d'un profil en I dont les ailes avaient préalablement été recourbées. L'utilisation de telles palplanches restera marginal.

Une innovation majeure a été apportée avec l'intégration aux profilés, dès leur formage, de « serrures » permettant de les assembler en rideaux continus en les enclenchant les uns aux autres sans avoir recours à des profilés de raccord (fig. 6). Les premiers profilés possédant de telles serrures apparurent aux États-Unis vers 1910**, avec les palplanches plates Lackawanna permettant la réalisation de batardeaux de gabions de palplanches, et en Europe, à la même époque, avec les palplanches à modules à serrures (1914 pour les serrures Larssen – HSP, 1999) pour la réalisation d'écrans travaillant en flexion. Ces nouvelles palplanches seront principalement utilisées, dans un premier temps, pour la construction de batardeaux (Claise, 1921 ; Lahaye,

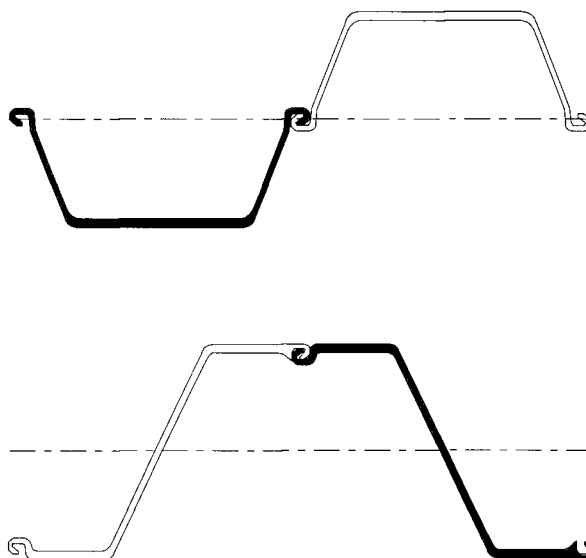


Fig. 6 - Palplanches en U et en Z (d'après la documentation Arbed).

* Blum (1931), p. 3.

** White, p. 944, Leonards (1968).

1923), dont elles dérivent plus ou moins directement*, avant de se généraliser au soutènement des terres (fig. 7).



Fig. 7 - Soutènement d'une excavation par un écran de palplanches.

Par la suite, des aciers de meilleure qualité ont été adoptés et leur utilisation a été optimisée (résistance à la flexion, pénétrabilité). Par ailleurs, l'offre en profilés s'est diversifiée (palplanches, mais aussi caissons de palplanches, tubes, pieux H, etc.), de façon à répondre à la grande variété des besoins. Des développements technologiques connexes ont permis, enfin, d'améliorer le procédé (injection d'étanchement des serrures, protection anticorrosion des aciers, contrôle du non-dégrafage des serrures, etc.).

Les techniques de mise en œuvre se sont aussi développées (Pontremoli, 1972 ; Haiun, 1975). Dans le domaine du battage, technique initialement employée pour la mise en place des rideaux de soutènement, les moutons automoteurs, à vapeur (simple puis double effet) puis diesel, se sont d'abord substitués aux moutons relevés par treuils, avant d'être eux-mêmes concurrencés par les moutons hydrauliques.

Le vibrofonçage (Body, 1962), le fonçage direct et la technique des écrans de palplanches au coulis**, par ailleurs, constituent de nos jours autant de techniques alternatives de mise en œuvre des palplanches.

Enfin, l'association aux techniques de fonçage des techniques de préforage ou de lançage (Mayer et al., 1985) permet d'améliorer leurs performances et d'élargir leurs domaines d'emploi.

Les parois berlinoises et dérivées

La technique de la paroi berlinoise fait appel à des éléments de structure verticaux, généralement des profilés

* Les palplanches plates ne font en fait que se substituer aux rideaux de pieux utilisés antérieurement pour le confinement du noyau d'argile des batardeaux. Les palplanches à module, pour leur part, se substituent d'emblée à l'ensemble du composite double-rideau de pieux-noyau d'argile, simplifiant la réalisation des batardeaux pour leur donner leur forme moderne.

** Gouvenot (1977), p. 55.

métalliques H, mis en place préalablement à l'excavation, entre les ailes desquels on dispose, à l'avancement de l'excavation, des madriers horizontaux ou des plaques en béton de blindage du terrain (Fenoux, 1971 ; fig. 8). Il s'agit d'une technique ancienne de soutènement d'excavations qui doit son nom au large emploi dont elle a fait l'objet à Berlin. Ainsi, l'article de Spilker (1937), relatant son emploi pour la construction du métro de Berlin et qui servira de base à la méthode proposée par Terzaghi (1941) pour le calcul des efforts dans les butons, constitue une référence notable de cette technique.



Fig. 8 - Paroi berlinoise réalisée pour la construction de l'ensemble Maine-Montparnasse (d'après Fenoux, 1971, p. 22).

La nature des matériaux employés, bois et acier, et le fait que, avant la mise en place du blindage, le terrain dégagé par l'excavation ne soit pas soutenu font que la paroi berlinoise est généralement réservée aux soutènements provisoires de terrains hors nappe, relativement résistants et présentant un minimum de cohésion.

Cette technique de soutènement a longtemps été utilisée en association avec des butons mis en place au fur et à mesure de la progression de l'excavation. À partir des années 1960, l'utilisation qui pourra en être faite en association avec les tirants forés et injectés, technique alors en plein développement, pour la réalisation de grandes fouilles libres de tout étai va lui donner un nouvel essor.

Cet essor va donner lieu à la naissance de nombreuses variantes utilisables pour la réalisation d'ouvrages définitifs : parois parisiennes (les profilés métalliques ont été remplacés par des pieux en béton armé et les madriers par un gunitage) et lutétiennes (les pieux sont en béton armé moulé dans le sol) et microberlinoises (ce sont des micropieux qui constituent les éléments de structure verticaux).

Les techniques utilisant un présoutènement à la boue

Les techniques de bétonnage de fouilles soutenues par une boue de bentonite dérivent des techniques de soutènement à la boue des forages, techniques utilisées depuis le début du siècle dans le domaine pétrolier***.

*** Schneebeli (1971), p. 15 et Gould (1990), p. 13.

Cette approche a d'abord été appliquée pour la réalisation de pieux de fondation. La juxtaposition, en mode sécant ou tangent, voire disjoint, de pieux de fondation ainsi réalisés, a permis, dans un deuxième temps, la réalisation d'écrans d'étanchéité et de soutènements (Veder, 1953 ; fig. 9, fig. 10).

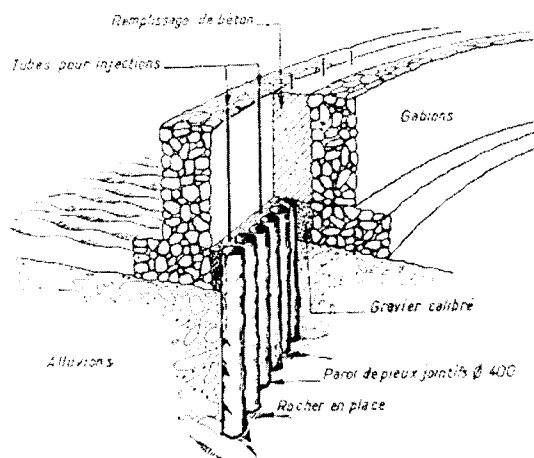


Fig. 9 - Emploi de pieux sécants pour la constitution d'un écran de soutènement (prébatardeau amont du barrage de l'Aigle, d'après Galabru, 1963).

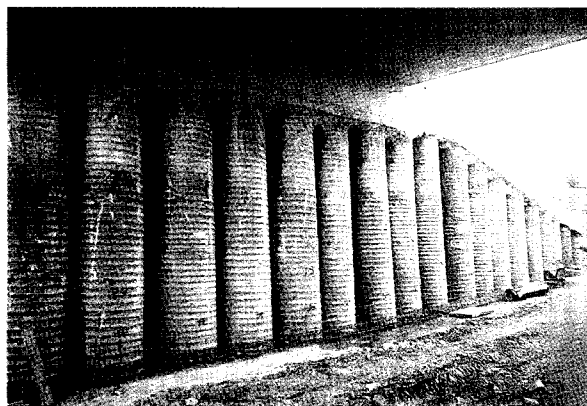


Fig. 10 - Culée et mur en retour réalisés à l'aide d'une paroi de pieux.

La technique de la paroi moulée, plus récente, est attribuée à deux ingénieurs italiens, Veder (1952) et Marconi (1953)*, avec les premières réalisations dans le cadre des travaux du métro de Milan**. Elle est apparue comme un perfectionnement, à l'époque, des parois constituées de pieux sécants et de pieux jointifs (Edison Group et al., 1961), techniques qu'elle a progressivement marginalisées, tout au moins en France***.

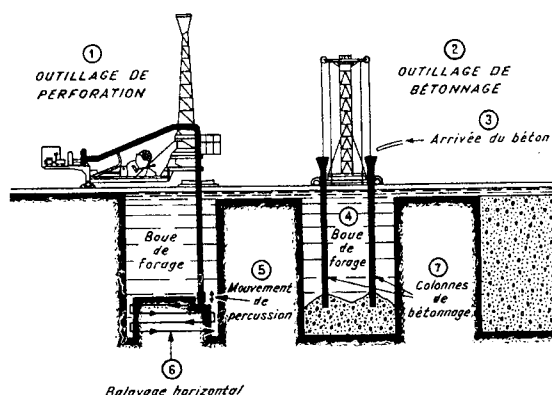
Après des premières réalisations dans les années 1950 (Chadeisson, 1961 ; Edison Group et al., 1961 ; Fehlmann, 1961), l'essor très rapide de ce procédé dans les

* Florentin (1969), p. 508.

** White, p. 980, Leonards (1968) et Gould (1990), p. 12.

*** Ce n'est pas le cas dans les pays anglo-saxons où ces techniques sont assez largement utilisées, en concurrence notamment avec les techniques de paroi moulée.

(A) PREMIÈRE PHASE D'EXÉCUTION



(B) SECONDE PHASE D'EXÉCUTION

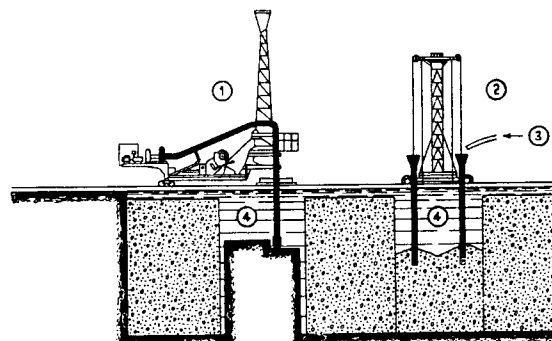


Fig. 11 - Principe de réalisation d'une paroi moulée (d'après Chadeisson, 1961). La figure illustre en outre le procédé de perforation associant un outil de forage et une circulation inverse de la boue préfigurant les hydrohaveuses.

années 1960 en a fait une technique de premier plan, notamment pour les soutènements des fouilles en milieu urbain (fig. 12, fig. 17 ; Fenoux, 1971), parkings souterrains, soubassements d'immeubles ou infrastructures de transports souterrains, mais aussi quais portuaires, ouvrages d'assainissement ou soubassements d'ensembles industriels.

Cet essor de la paroi moulée tient à la grande diversité des conditions de site et d'ouvrages auxquels le procédé se prête : conditions géotechniques variées, allant des sols mous aux horizons rocheux, possibilité de réaliser des ouvrages de formes et de dimensions variées jusqu'à des profondeurs très importantes, capacité à intégrer les contraintes du milieu urbain, d'encombrement et de voisinage en particulier, association d'une fonction de portance à la fonction de soutènement.

Ce développement s'est accompagné d'un progrès continu des techniques utilisées. En matière d'excavation, les techniques initiales (Marque, 1971) d'excavation à la benne sur kelly ou à câble sont maintenant souvent associées sur un même matériel. Une telle association d'un kelly court et de câbles a permis, en réunissant les avantages des deux techniques, de gagner en compacité, maniabilité, précision et rapidité des mouvements (Guillaud, 1999).

Complémentaires aux bennes, notamment pour la perforation des terrains résistants, les machines à circulation inverse de la boue ont connu un développement encore plus significatif. Ainsi, au procédé initial associant un matériel de forage en rotation et percussion et la remontée des matériaux de déblai par circulation inverse de la boue (Marque, 1971 ; fig. 11) ont succédé les hydrohauveuses au cours des années 1970 (hydrofraise, notamment, à partir de 1972, Fenoux, 1982 ; Guillaud, 1999), matériels constamment développés depuis lors.

Ce développement des techniques d'excavation proprement dites a, par ailleurs, été accompagné de celui de nombreux autres aspects de la paroi moulée : développements de systèmes de joints étanches entre panneaux (joint CWS, par exemple, en 1982* – Dupeuble, 1985), augmentation des capacités des outils, permettant la réalisation d'ouvrages très importants (Goto et Iguro, 1989 ; Guillaud, 1999), amélioration des systèmes de guidage, de façon à obtenir une meilleure verticalité des panneaux (Tornaghi et Saveri, 1985 ; De Paoli *et al.*, 1989 ; Guillaud, 1999), miniaturisation des équipements (Puller et Puller, 1993 ; Himick et Schwank, 1997 ; Guillaud, 1999), pour travailler dans des sites offrant de faibles dégagements (tunnels, milieu urbain, par exemple), informatisation des équipements, permettant de disposer de systèmes embarqués d'aide à la conduite de l'excavation, amélioration des formulations des boues et des bétons, etc.

Des variantes de cette technique ont, enfin, été développées : parois préfabriquées, où la paroi n'est plus bétonnée dans la fouille mais constituée de panneaux préfabriqués et juxtaposés dans la fouille (Morlet et Hurtado, 1971 ; Namy et Fenoux, 1976), parois moulées précontraintes (Gysi *et al.*, 1976), où des efforts additionnels de précontrainte permettent d'optimiser le travail du béton armé, et parois au coulis, qui utilisent une coupure en coulis de ciment renforcé par des profilés métalliques régulièrement espacés (Gouvenot, 1989 ; Gould, 1990) : dans ce dernier cas, les efforts de poussée sont redistribués par effet de voûte.

* Lacroix et Soulas (1986), p. 5.

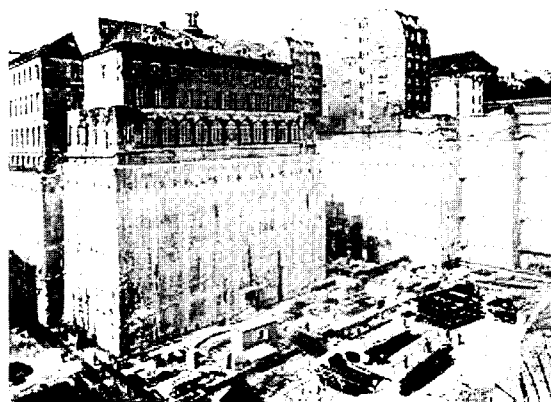


Fig. 12 - Excavation soutenue par une paroi moulée ancrée (Documentation Solétanche-Bachy).

Les techniques de mélange en place sol-ciment

Les techniques consistant à mélanger le sol en place à un coulis de ciment ont été initialement développées au Japon**. La première de ces méthodes consiste à introduire dans le terrain un coulis de ciment au travers de l'axe d'une tarière creuse, ce coulis de ciment se trouvant mélangé au terrain au cours de la rotation de la tarière. La colonne de sol-ciment ainsi réalisée peut alors être renforcée, à l'issue de la remontée de la tarière et avant que le « béton » ainsi constitué n'ait durci, à l'aide d'une cage d'armature traditionnelle.

L'injection au jet à haute pression, « jet-grouting », apparaît comme une variante de cette technique, la destruction du terrain et son mélange au coulis de ciment étant réalisés par injection à haute pression du coulis de ciment, de façon radiale, autour d'un trou de forage qui constitue ainsi l'axe d'une colonne de terrain mélangé au coulis de ciment.

La juxtaposition, en mode sécant ou en mode tangent, de telles colonnes de mortier sol-ciment permet la réalisation d'écrans de soutènements (fig. 13). L'usage de ces techniques reste cependant relativement marginal, intéressant principalement des ouvrages spéciaux (reprise en sous-œuvre, par exemple).

** O'Rourke et Jones (1990), p. 30.

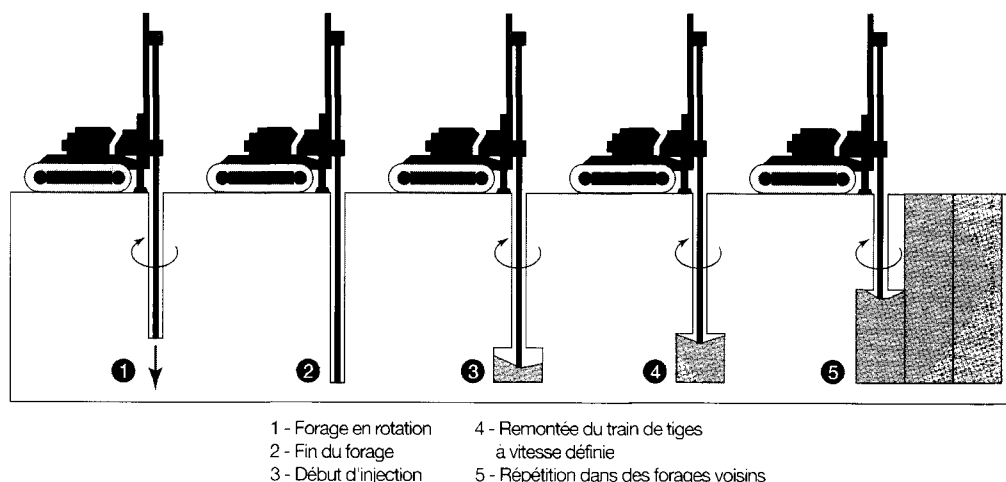


Fig. 13 - Principe de réalisation d'un écran constitué de colonnes injectées à haute pression ancrée (d'après la documentation Solétanche-Bachy).

Les systèmes d'appui

Les systèmes traditionnels

Dans le cas général, les appuis des écrans de soutènements sont constitués, d'une part, par le sol dans la partie en fiche de l'écran et, d'autre part, par des ancrages ou des butons dans la partie aérienne.

L'ancrage à des corps-morts (fig. 14) est la technique de base pour l'ancrage des ouvrages de soutènement partiellement remblayés. Les ancrages, alors disposés entre deux couches de remblai, sont constitués le plus souvent de tirants métalliques ancrés à un corps-mort ou massif d'ancrage réalisé en arrière du soutènement : blocs de béton préfabriqué, contre-rideau de palplanches ou dalle frottante.

Cette technique d'ancrage intéresse particulièrement les rideaux de palplanches compte tenu de la possibilité qu'offrent ces derniers de réaliser des soutènements en partie remblayés et en partie excavés, ce qu'excluent *a priori* les autres techniques d'écran de soutènement. La combinaison de tels rideaux de palplanches et d'ancrages à des corps-morts est ainsi d'un emploi courant pour la réalisation de murs de quai ou de soutènement de berges de rivière ou de canal. L'ouvrage est alors réalisé en rescindant la berge existante, le haut de la berge étant remblayé derrière le soutènement, tandis que son pied peut être dragué pour améliorer les profondeurs.

Le soutènement des excavations fait pour sa part traditionnellement intervenir un butonnage, en association avec l'écran proprement dit (fig. 15). Un tel butonnage est alors constitué de profilés mis en place au fur et à mesure de la progression de l'excavation (fig. 16). Ce butonnage, généralement provisoire, permet le maintien de la fouille avant que la structure définitive ne soit construite. Cette construction s'effectue alors en élévation depuis le fond de l'excavation une fois cette dernière complètement réalisée. De tels butons provisoires sont généralement des profilés métalliques, profilés H ou tubes, qui sont enlevés au fur et à mesure de l'édification de la construction.

Un butonnage peut également être définitif, dans le cas de voirie enterrée, par exemple : les butons, alors réalisés en béton armé, permettent d'appuyer l'un à l'autre les deux écrans de soutènements qui se font face.



Fig. 15 - Butonnage d'une tranchée couverte en phase provisoire.

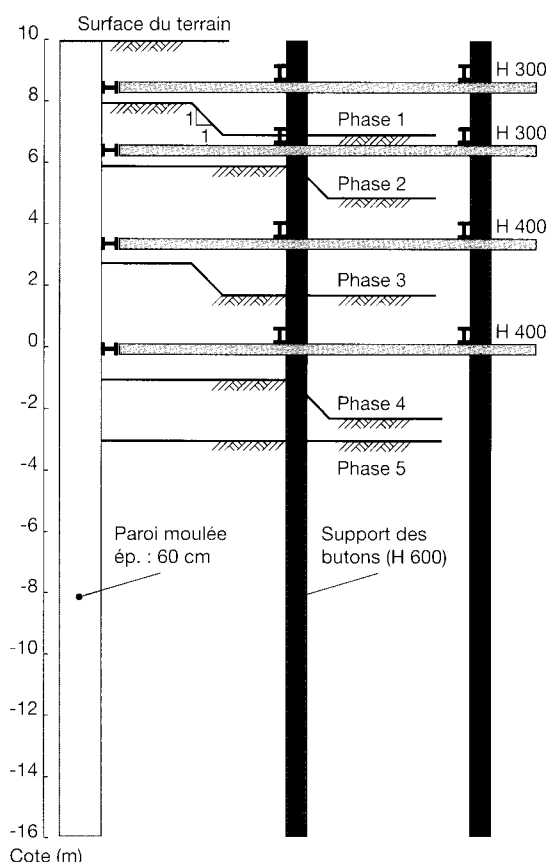


Fig. 16 - Schéma de butonnage d'une grande fouille, d'après Hsi et Small (1993).

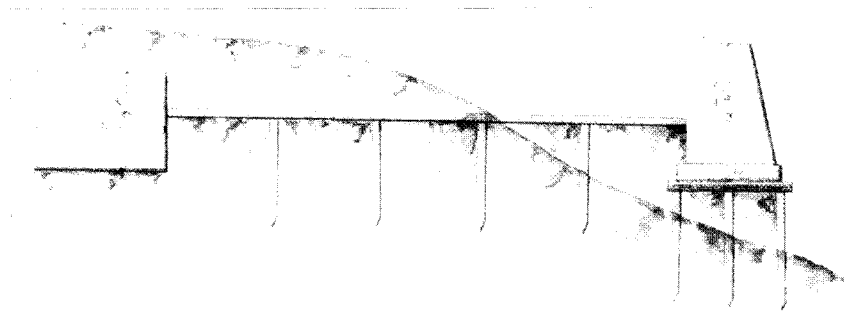


Fig. 14 - Profil de quais construits au port de Rouen en 1780 et 1781 (d'après Guillerme, 1995, p. 97).

Les inconvénients du butonnage sont principalement liés à l'encombrement de la fouille qu'ils occasionnent. Cet encombrement complique l'excavation de la fouille, qui doit donc être réalisée entre et sous les butons, mais aussi les opérations de construction qui s'effectuent à partir du fond de fouille. En dépit de ces inconvénients, cette technique reste largement utilisée, notamment lorsque, pour des raisons liées à l'occupation du sous-sol et à la nature des terrains, ou simplement à la nature de l'ouvrage (Broms et al., 1986 ; Zhao et al., 1997), ce dernier ne se prête pas à la réalisation de tirants d'ancrage ou à une construction en taupe.

Les tirants forés, injectés et précontraints

Si de nombreuses variantes des systèmes d'appui traditionnels ont progressivement été développées au gré des besoins*, l'innovation majeure dans le domaine a

* Gould (1990).

été apportée par le développement des tirants forés, injectés et précontraints, d'une part, et des méthodes d'excavation « en taupe »**, d'autre part.

Les tirants forés, injectés et précontraints sont apparus avec le développement de la précontrainte et de l'injection sous pression***. Ils ont été utilisés pour la première fois lors de la consolidation du barrage de Cheurfas (Drouhin, 1935) ; il s'agissait alors d'appliquer un effort additionnel de compression verticale à ce barrage afin d'éliminer toute traction dans la maçonnerie.

Cette technique consiste à sceller le tirant, constitué d'une armature métallique, directement au terrain, à l'intérieur d'un forage réalisé depuis le soutènement. Elle est donc directement concurrente du butonnage, puisque de tels tirants peuvent être réalisés au fur et à mesure de la progression de l'excavation.

** Dans les pays anglo-saxons, ces techniques sont appelées « top-down ».

*** Bustamante (1980), p. 3.

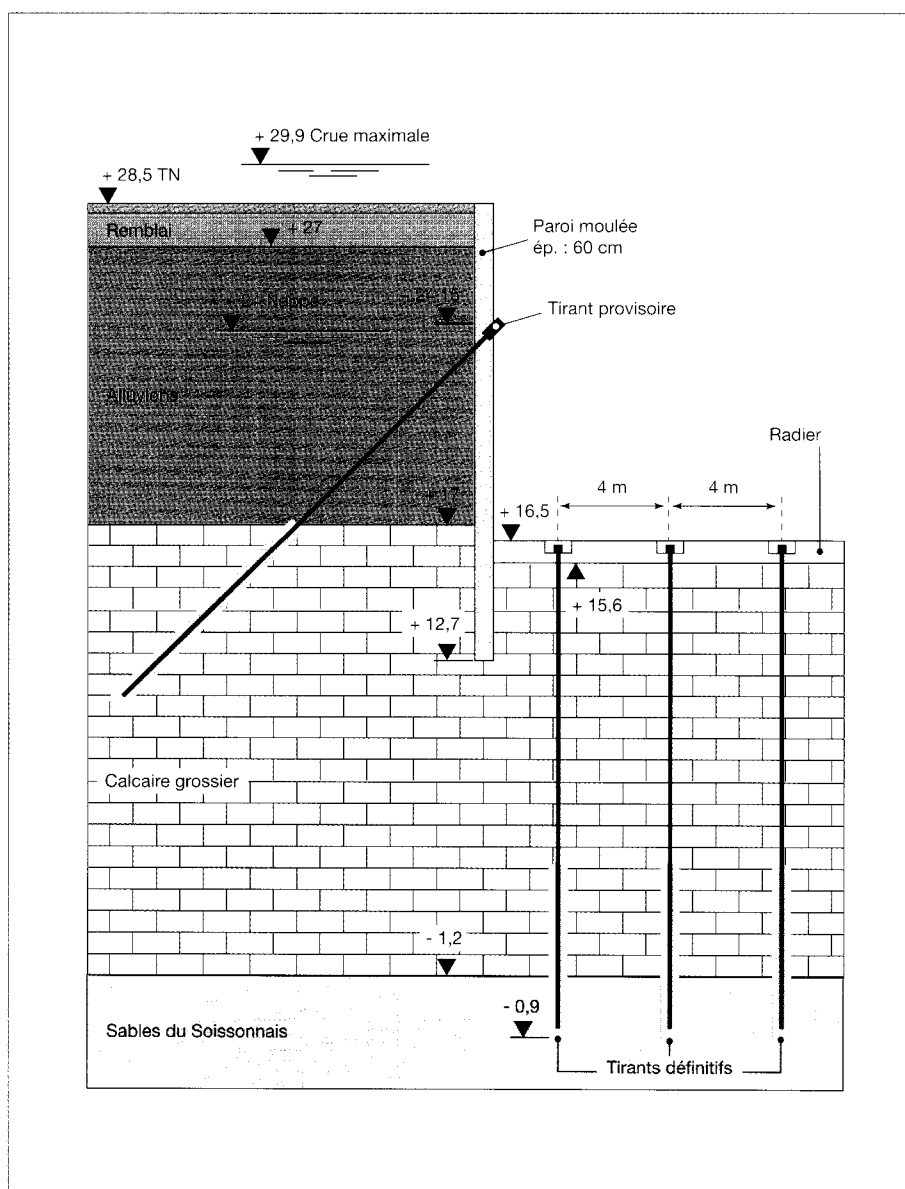


Fig. 17 - Sous-sols de l'immeuble Roche à l'abri d'une paroi moulée et d'un radier ancrés (d'après Fenoux, 1971, p. 31).

L'emploi de cette technique pour les soutènements ne s'est réellement développé que dans les années 1960*, d'abord comme système provisoire d'ancrage puis comme système d'ancrage définitif. Son essor sera alors très rapide (Habib, 1969, 1978), en relation avec celui de la paroi moulée (fig. 7, fig. 12, fig. 17), en soutènement des grandes excavations urbaines. Cette technique permet en effet de libérer les fouilles de tout l'encombrement que présentaient traditionnellement les systèmes de butonnage.

Les méthodes d'excavation en taupe

Les méthodes d'excavation en taupe sont particulièrement bien adaptées à la réalisation de constructions souterraines : voirie et métro enterrés, parkings souterrains ou en sous-sol d'immeubles. Elles consistent à mettre en place le soutènement périmétral de la fouille, généralement une paroi moulée, et à butonner de haut en bas ce soutènement, au fur et à mesure de la progression de l'excavation, à l'aide des éléments de structure de la construction souterraine (généralement les planchers, fig. 18). Ces éléments de structure sont eux-mêmes supportés verticalement, d'une part, par la paroi périmétrale et, d'autre part, par des colonnes fondées sous le niveau final de l'excavation avant réalisation de cette dernière (« poteaux profondés »). La construction souterraine se trouve donc réalisée du haut vers le bas, « top-down » ou « up-down » en anglais.

Utilisée à ses débuts lors de la construction du métro de Milan**, cette méthode a connu un large développe-

ment pour la construction d'ouvrages souterrains en site urbain, du fait de l'optimisation en temps qu'elle permet d'apporter aux chantiers ainsi que de la limitation des perturbations apportées à l'environnement de surface. Ainsi, pour les bâtiments semi-enterrés, elle permet de construire les niveaux souterrains avant d'avoir procédé à la totalité de l'excavation, de même qu'elle permet d'élever les niveaux supérieurs sans attendre que les niveaux inférieurs soient réalisés. Pour les ouvrages simplement enterrés (parkings ou voirie enterrés), elle permet de rétablir le fonctionnement normal du milieu urbain en surface sans attendre la fin des travaux.

Ces avantages généraux sont toutefois accompagnés d'inconvénients portant sur certaines opérations de chantier. Ainsi, les travaux de terrassement étant réalisés sous les planchers se trouvent compliqués. La réalisation des poteaux profondés est par ailleurs une opération délicate. Ces derniers se trouvant en effet dégagés au fur et à mesure de l'excavation, ils doivent respecter des critères de verticalité sévères, et nécessitent donc des techniques de mise en œuvre appropriées (Massiot et Feidt, 1999).

Conclusion

Ce rapide aperçu des techniques d'écrans de soutènements fait apparaître que, si ce mode de soutènement pouvait être utilisé il y a fort longtemps, notamment pour la construction de batardeaux, c'est au cours du XX^e siècle qu'il a pu se généraliser à l'ensemble des problèmes de soutènements. Les innovations les plus marquantes, ont sans conteste, été l'invention de la serrure permettant d'associer les profilés métalliques

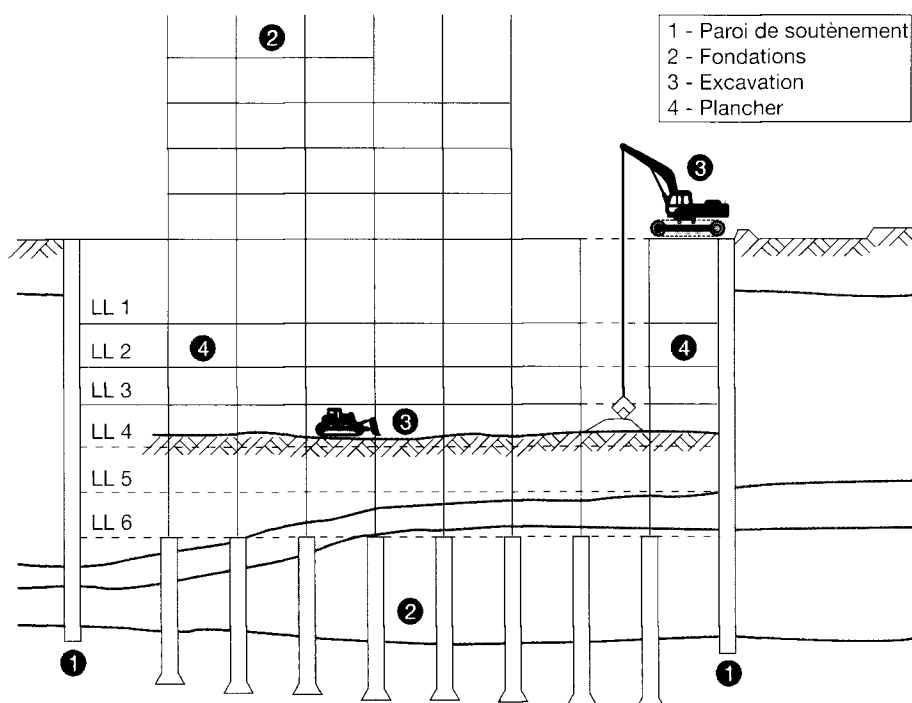


Fig. 18 - Méthode de construction en taupe, d'après Becker et Haley (1990), p. 172.

entre eux (palplanches métalliques), l'application à la réalisation d'ouvrages de soutènement des techniques de présoutènement à la boue (paroi moulée dans le sol) puis la réalisation de tirants forés et scellés.

Cet aperçu permet d'entrevoir comment, par le biais des innovations successives, la technique des écrans de soutènements a pu se développer. Ce développement touche aux dimensions des ouvrages. Des ouvrages

d'importance croissante ont ainsi pu être construits. Elle touche également aux différentes catégories de problèmes intéressés. En particulier, ces innovations ont rendu possible, l'utilisation des écrans de soutènements à la construction des ouvrages de rive (quais), puis au soutènement des grandes excavations au sein d'environnements sensibles (excavations en milieu urbain).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AUBRY C. (1908), Les murs de soutènement, Paris, Eyrolles, 180 pages.

BECKER J.M., HALEY M.X. (1990), Up/Down construction – Decision making and performance, Design and performance of earth retaining structures, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 171-189.

BLUM H. (1931), Einspannungsverhältnisse bei Bohlwerken, Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 32 pages.

BODY P. (1962), Une nouvelle technique pour le fonçage et l'arrachage des palplanches et des pieux par vibration : Vibro-fonceurs PTC, *Travaux*, **333**, p. 547.

BROMS B.B., WONG I.H., WONG K.S. (1986), *Experience with finite element analysis of braced excavations in Singapore*, Proc. IInd International Symposium on Numerical Models in Geomechanics (Ghent), Jackson & Son, Redruth, Cornwall, pp. 309-324.

BUSTAMANTE M. (1980), *Capacité d'ancrage et comportement des tirants injectés, scellés dans une argile plastique*, Thèse de doctorat, ENPC, Paris, 151 pages.

CAUDRELIER M. (1913), Emploi des palplanches métalliques sur les chantiers de la compagnie parisienne de distribution d'électricité, *Annales des Ponts et Chaussées*, Tome XVII, Vol. 7, pp. 5-57.

CHADEISSON R. (1961), *Parois continues moulées dans le sol*, Comptes-rendus du V^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Paris, Dunod, Vol. 2, pp. 563-568.

CLAISE M. (1921), Palplanches métalliques utilisées à la reconstruction des ponts de chemin de fer sur la Meuse, détruits pendant la guerre, *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 5, pp. 161-175.

DELATTRE L. (1999), Comportement des écrans de soutènement – Expérimentations et calculs, Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris : ENPC, 492 p.

DE PAOLI B., MASCARDI C., STELLA C. (1989), *Construction and quality control of a 100 m deep diaphragm wall*, Comptes-rendus du XII^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Rotterdam : Balkema, Vol. 3, pp. 1479-1482.

DUPEUBLE P. (1985), CWS System provides load-bearing and watertight joints between diaphragm wall panels, *Ground Engineering*, Vol. 18, 6, pp. 22-26.

DROUHIN (1935), Note sur la consolidation du barrage de Cheurfas par tirants métalliques mis en tension, *Annales des Ponts et Chaussées*, Vol. 8, pp. 253-273.

EDISON GROUP, SADE GROUP, SIMA COMPANY (1961), *Construction of concrete diaphragms (cut-off walls) in Italy*, Comptes-rendus du V^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Paris, Dunod, Vol. 2, pp. 403-411.

FEHLMANN H.B. (1961), *L'application des liquides thixotropiques à base de bentonite dans le génie civil*, Comptes-rendus du V^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Paris, Dunod, Vol. 2, pp. 765-770.

FENOUX Y. (1971), La réalisation des fouilles en site urbain, *Travaux*, **437-438**, pp. 18-37.

FENOUX Y. (1982), La troisième génération d'outillages pour parois et ses applications à l'étranger, *Travaux*, **571**, pp. 78-88.

FLORENTIN J. (1969), *Les parois moulées dans le sol*, Comptes-rendus du VII^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Vol. III, pp. 507-512.

FRICK P., LÉVY SALVADOR P. (1926), *Fouilles et Fondations*, Paris, Dunod, 558 pages.

GALABRU P. (1963), *Les fondations et les souterrains*, Paris, Eyrolles, 517 pages.

GOTO S., IGURO M. (1989), *The world's first high-strength, super deep slurry wall*, Comptes-rendus du XII^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Rio de Janeiro, Rotterdam, Balkema, Vol. 3, pp. 1487-1490.

GOULD J.P. (1990), *Earth retaining structures – Developments through 1970. Design and performance of earth retaining structures*, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 8-21.

GOUVENOT D. (1977), Les fondations spéciales en travaux maritimes, *Travaux*, **512**, pp. 55-64.

GOUVENOT D. (1989), *L'utilisation de nouveaux matériaux dans la technique des parois moulées*, Comptes-rendus du XII^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Rotterdam, Balkema, Vol. 3, pp. 1491-1492.

GUILLAUD M. (1999), Innovations en matière d'outillages de parois moulées, *Travaux*, **753**, pp. 70-73.

GUILLERME A. (1995), *Bâtir la ville*, Paris, Champ Vallon, 123 pages.

GYSI H.J., LINDER A., LEONI R. (1976), *Vorgespannte Schlitzwände*, Comptes-rendus du VI^e Congrès européen de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Vienne, Éd. Gistel & Cie, Vol. 1.1, pp. 141-148.

- HABIB P. (1969). *Les ancrages, notamment en terrain meuble*, Comptes-rendus du VII^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation. Mexico, SMMS. Vol. III, pp. 513-516.
- HABIB P. (1978). Rapport général de la 4^e session spéciale « Les ancrages », Comptes-rendus du IX^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation. *Revue française de Géotechnique*, **3**, pp. 5-7.
- HAÏUN G. (1975). Progrès récents dans l'efficacité des moyens de mise en œuvre des palplanches métalliques, *Travaux*, **478**, pp. 3-19.
- HIMICK D.E., SCHWANK S. (1997). *Central Artery/Tunnel Project (CA/T) in Boston, Massachusetts, USA : Construction of diaphragm walls under limited headroom*, Comptes-rendus du XIV^e du Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation (Hambourg), Rotterdam, Balkema. Vol. 3, pp. 1407-1410.
- HSI J.P., SMALL J.C. (1993). Application of a fully coupled method to the analysis of an excavation, *Soils and Foundations*, Vol. 33, **4**, pp. 36-48.
- HSP (1999). *Spundwand-Handbuch Berechnung*, Documentation technique Hoesch Spundwand und Profil. Dortmund, 249 p.
- LACROIX R., SOULAS R. (1986). Vingt-cinq ans de progrès des techniques françaises de génie civil, *Travaux*, **613**, pp. 1-10.
- LAHAYE R. (1923). Emploi des palplanches métalliques dans les fondations d'ouvrages d'art, *Annales des Ponts et Chaussées*, **Vol. 4**, pp. 81-91.
- LEONARDS G.A. (1968). Les fondations. Ouvrage collectif. Paris, Dunod, 1 106 pages.
- MARQUE J. (1971). Les matériels d'exécution des parois moulées, *Travaux*, **430**, pp. 47-55.
- MASSIOT J.-L., FEIDT G. (1999). Le parc de stationnement Franz Liszt à Paris X^e, *Travaux*, **751**, pp. 65-72.
- MAYER B.K., KREUTZ B., SCHULTZ H. (1985). *Setting sheet piles with driving aids*, Comptes-rendus du XI^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation (San Francisco), Rotterdam, Balkema. Vol. 3, pp. 1441-1444.
- MORLET G., HURTADO J. (1971). Première réalisation d'une paroi préfabriquée : l'enceinte étanche des sous-sols de l'immeuble EDF d'Issy-les-Moulineaux, *Travaux*, **433**, pp. 40-45.
- NAMY D., FENOUX G.Y. (1976). *Tranchées couvertes en parois préfabriquées*, Comptes-rendus du VI^e Congrès européen de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Vienne. Éd. Gistel & Cie. Vol. 1.1, pp. 183-188.
- O'ROURKE T.D., JONES CJFP (1990). *Overview of earth retention systems : 1970-1990, Design and performance of earth retaining structures*, Cornell University, Ithaca, New York, pp. 22-51.
- PONTREMOLI P. (1972). De la vapeur au rayon laser ou l'évolution des engins de travaux publics, *Travaux*, **446**, pp. 3-44.
- PULLER M.J., PULLER D.J. (1992). *Developments in structural slurry walls*, Proc. of the conf. retaining structures, Instn of Civ. Eng., Cambridge, 20-23 july 1992. Londres, Thomas Telford, 1993, pp. 373-384.
- ROUVILLE M.A. de (1937). Note sur le canal maritime de Suez, *Annales des Ponts et Chaussées*, **Vol. 7**, pp. 5-57.
- SCHNEEBELI G. (1971). *Les parois moulées dans le sol*, Paris, Eyrolles, 191 pages.
- SOWERS G.F. (1981). There were giants on the Earth in those days, Fifteenth Terzaghi Lecture. Proc. ASCE, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **Vol. 107, GT4**, pp. 385-419.
- SPLIKER A. (1937). Mitteilung über die Messung der Kräfte in einer Baugrubenaussteifung, *Bautechnik*, 1937, **1**, pp. 16-18.
- TERZAGHI K. (1941). *General wedge theory of earth pressure*, Trans. ASCE, pp. 68-97.
- TORNAGHI R., SAVERI E. (1985). *Alignment control of a deep cut-off wall*, Comptes-rendus du XI^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Rotterdam, Balkema. Vol. 2, pp. 1139-1143.
- VEDER C. (1953). *Procédé de construction de diaphragmes imperméables à grande profondeur au moyen de boues thixotropiques*, Comptes-rendus du III^e Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation, Zurich, Vol. 2, pp. 91-94.
- ZHAO X.H., CHEN, Z.M., PENG D.Y. (1997). *Theoretical and practical problems on design of deep excavation in Shanghai*, Comptes-rendus du XIV^e du Congrès international de Mécanique des sols et de travaux de fondation (Hambourg), Rotterdam, Balkema. Vol. 2, pp. 925-928.

Avec l'aimable autorisation de la Revue Travaux pour la reprise de la figure 8, ainsi que des Éditions Eyrolles pour les figures 3 et 9.