

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Reprise de Bâtiments Anciens par Pieux I.M.

Underpinning of Old Buildings Using I.M. Piles

G.Y. FENOUX Directeur des Etudes — Soletanche — France
D. GOUVENOT Ingénieur Principal — Soletanche — France

RESUME : Le pieu I.M. (I pour injection, M pour métal) est un pieu foré de petit diamètre (moins de 0,25 m) fortement armé par un tube ou des barres d'acier et scellé au terrain encaissant par injection de ciment sous pression. De ce fait, une haute capacité portante est obtenue. Les caractéristiques géométriques et mécaniques font de ce pieu un moyen très performant pour le sauvetage des bâtiments anciens. Plusieurs exemples d'application sont présentés, et les règles de calcul usuelles rappelées.

INTRODUCTION

Le sauvetage des bâtiments anciens se pose avec acuité compte tenu des agressions de plus en plus violentes auxquelles ils sont soumis. En effet, les pollutions, les variations des niveaux de nappe, les affouillements dans les lits des rivières soumettent les fondations des bâtiments anciens à rude épreuve. Comme de plus ces fondations sont la plupart du temps à base de pieux en bois, il s'ensuit assez souvent un pourrissement de ces derniers.

Le pieu I.M., que nous décrivons plus loin, s'adapte bien au sauvetage des bâtiments anciens de par son diamètre, sa capacité portante, et surtout par les conditions d'exécution requises.

Nous décrivons quelques exemples de sauvetages réalisés ces dernières années :

- Monument historique à Bordeaux (France),
- Palais de Justice de Marseille (France),
- Différents ponts historiques en Italie,
- Crypte hébraïque romane près du Palais de Justice de Rouen (France).

Lors de ces différentes réalisations le pieu I.M. a permis de résoudre des problèmes aussi différents que :

- tassements dus à des couches de sols compressibles et/ou à des variations de nappe,
- agressions chimiques de fondation,
- affouillements.

DEFINITION ET DESCRIPTION DU PIEUX I.M.

Il s'agit d'un pieu foré de diamètre généralement inférieur à 0,25 m et dont la capacité usuelle varie de 500 à 1000 kN. Cette fourchette n'est pas limitative puisque, dans certains cas particuliers, des capacités de plusieurs milliers de kN ont pu être atteintes (FENOUX 1976).

1. Armature métallique

L'élément porteur essentiel est une armature métallique (tubes, barres etc...) dimensionnée pour assurer intégralement la reprise des efforts axiaux amenés par la structure, que ces efforts soient de traction ou de compression.

L'armature, déjà protégée contre la corrosion par le coulis de ciment qui assure son scellement dans le sol, peut voir sa protection améliorée dans les cas d'agressions particulières par enduction d'un produit anti-corrosion (peinture, brai epoxy, etc...)

2. Forage

L'armature est placée dans un forage dont le mode d'exécution est choisi en fonction de la nature des formations qui doivent être perforées (sol, maçonnerie, obstacles divers).

La disposition des lieux est également déterminante car il n'est pas rare d'avoir à exécuter ces pieux dans des conditions de très grande exigüité.

3. Scellement

Lorsque le forage est terminé et équipé de son armature métallique, on assure le scellement au sol par injection d'un coulis fortement dosé en ciment. Cette injection réalisée sous très haute pression (plusieurs dizaines de bars) confère au pieu I.M. une adhérence optimale avec le sol. De cette manière, une capacité portante élevée est obtenue sans que la fiche soit très importante.

Il apparaît, à la description de cette technique que les qualités essentielles du pieu I.M. sont les suivantes :

- Ni vibration, ni ébranlement pendant l'exécution puisque ce sont les techniques de forage qui sont utilisées. Ce point est très important lorsque l'on sait que les ouvrages à sauver sont très souvent voisins de l'effondrement.
- Utilisation de machines de perforation adaptées aux espaces disponibles de telle manière qu'elles puissent pénétrer sous les ouvrages et accéder aux murs porteurs

(cave, sous-sol, couloir, escalier etc...). Dans certains cas, le sauvetage du bâtiment a pu se faire sans interrompre le travail des personnes qui l'occupaient.

BATIMENT HISTORIQUE A BORDEAUX (FRANCE)

Il s'agit d'une porte située à BORDEAUX (France) (fig. 1) dont la fondation primitive était assurée par une grosse semelle de maçonnerie. Ces maçonneries, fondées sur des terrains compressibles, ont tassé inégalement avec le temps et ont provoqué des désordres très visibles dans la superstructure. On était donc confronté, pour cet ouvrage, à un problème de tassement qui fut résolu en assurant une nouvelle fondation à base de pieux I.M.

Les pieux ont permis de reporter les efforts sur des couches de sol plus résistantes et plus rigides.

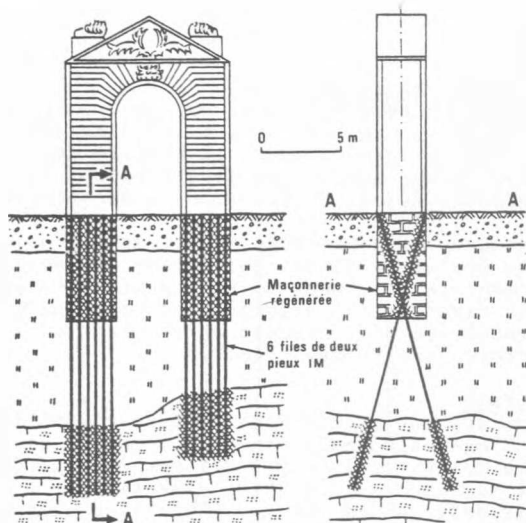


Fig. 1 Reprise des fondations d'une porte monumentale.

PALAIS DE JUSTICE DE MARSEILLE (FRANCE) (fig. 2)

Le Palais de Justice de Marseille, plus que centenaire, est un bâtiment de 3 à 4 niveaux, d'environ 60 x 50 m. Sa façade est ornée d'un péristyle de 6 colonnes. Une enceinte intérieure de 17 x 17 m supporte une coupole à une dizaine de mètres de hauteur au-dessus de la salle des pas perdus.

Les charges sont reprises par des murs porteurs et des colonnes reposant sur des semelles de gros béton de 2 à 6 m de hauteur, fondées sur des pieux de bois, eux-mêmes battus dans du limon argilo-sableux.

La baisse du niveau de la nappe a provoqué l'altération ou même la destruction des pieux de bois. Le bâtiment était fissuré depuis fort longtemps, notamment dans l'angle sud-ouest où les fenêtres de la façade avaient dû être étayées.

En 1974, la décision fut prise de redonner des fondations stables au bâtiment, tout en maintenant en activité les services qu'il abritait.

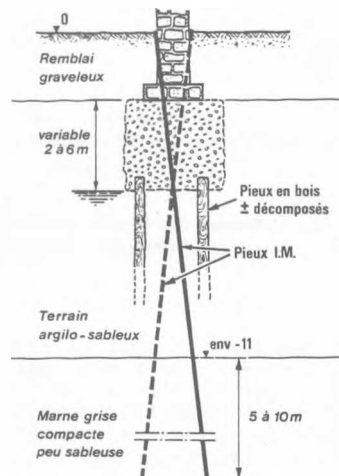


Fig. 2 Coupe type de la nouvelle fondation

La solution retenue a consisté à reporter les charges sur la formation de marnes compactes, reconnue à environ 11 mètres de profondeur, par l'intermédiaire de pieux I.M. Ces pieux métalliques, d'une capacité unitaire de 320 et 500 kN, sont scellés par injection à leur base dans la marnes compactes sur une longueur de 10 mètres au plus. Les pieux I.M. des murs porteurs sont implantés en quinconce de part et d'autre de ceux-ci. Ils sont légèrement inclinés. Tous les pieux I.M. du massif du péristyle sont verticaux, d'une capacité de 500 kN.

Les pieux I.M. sont constitués de 2 barres $\varnothing 40$ (ou $\varnothing 32$) à haute adhérence et d'un tube à manchettes qui permet l'injection sous pression du scellement. Lors des calculs en élasticité, le taux de travail de l'acier est pris égal à la moitié de sa limite élastique. Les barres sont protégées par une peinture anti-corrosion (2 couches). Les éléments de 2,50 m de longueur unitaire sont liés entre eux par manchons et soudure.

La liaison pieu-massif de maçonnerie est assurée par l'injection sur 2 à 6 m de haut avec un coulis C/E = 2.

Ces travaux ont été réalisés en 20 mois, dans des conditions difficiles, à partir des caves, des couloirs ou des bureaux, par petites zones pour ne pas perturber les services installés dans ce bâtiment.

REPRISE EN SOUS-OEUVRE DE DIFFERENTS PONTS HISTORIQUES EN ITALIE

Il s'agit d'un problème très important et d'une très grande ampleur, qui se pose également en France notamment sur tous les ponts magnifiques qui enjambent la Loire.

Les fondations initiales de ces ponts ont, très souvent, été réalisés à l'abri de batardeaux exécutés dans le lit de la rivière.

Compte tenu des moyens de pompage de l'époque (12-13e siècle), les piles en maçonnerie ont été fondées à des cotes assez hautes sur un plateau en bois, lui-même reposant sur des pieux en bois.

Les dragages de sable, exécutés de nos jours, ont provoqué un abaissement du lit de la rivière. L'évolution du fond du lit a provoqué un déchaussement des pieux et, très souvent, la disparition des éléments fins dans les alluvions de la rivière. Il s'en est suivi une très grande décompression sous les piles qui a conduit à des désordres d'une extrême gravité. Dans certains cas, des ouvrages ont été ruinés.

Dans le cas des ponts Italiens (fig. 3), l'utilisation de pieux injectés métalliques a permis de résoudre trois problèmes :

- Reprise en sous-oeuvre de la fondation proprement dite, en reportant les charges sur les couches de sable non décomprimées par les affouillements.
- Du fait de l'utilisation de la technique de l'injection, consolidation des couches de sable décomprimé par utilisation de coulis à base de ciment et de gel de silice.
- Enfin renforcement de la structure du pont, en prolongeant les pieux métalliques à travers la maçonnerie jusqu'au niveau de la chaussée que supporte l'ouvrage.

On dispose donc d'une technique très souple, facilement adaptable aux problèmes rencontrés, qui permet de conforter en plus de la fondation l'ouvrage lui-même.

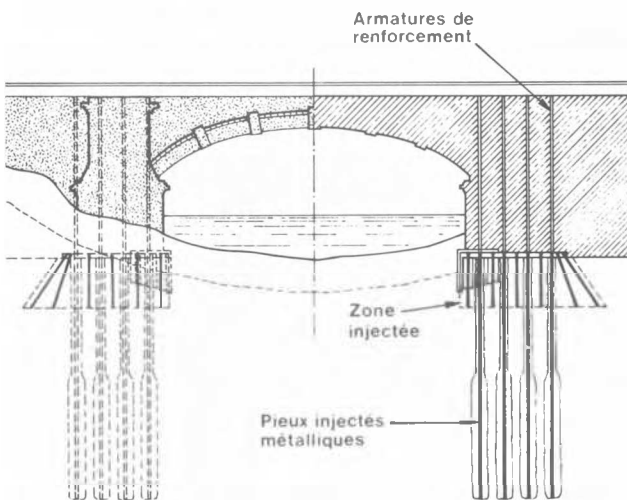


Fig. 3 Principe de confortement d'un pont Italien

CRYPTE HEBRAIQUE ROMANE DE ROUEN (FRANCE)

Le 11 Avril 1976, au cours des travaux d'aménagement de la Cour d'Honneur du Palais de Justice de Rouen, l'engin qui effectuait les terrassements perça la voûte d'une cave romane.

Les investigations complémentaires permettaient de mettre à jour un édifice de 14 mètres de longueur sur 10 mètres de largeur aux murs épais de 1 m 50.

Sa hauteur est d'environ 3 mètres et la qualité de son exécution et, plus particulièrement celle de ses parements, permet de dater l'édifice de la fin du 11e siècle. Il s'agit certainement du plus ancien édifice juif découvert en France. Le retentissement de cette découverte impliquait la conservation de ces vestiges. Il fut décidé de laisser le monument dans son état de découverte sans aucun apport de pierres neuves.

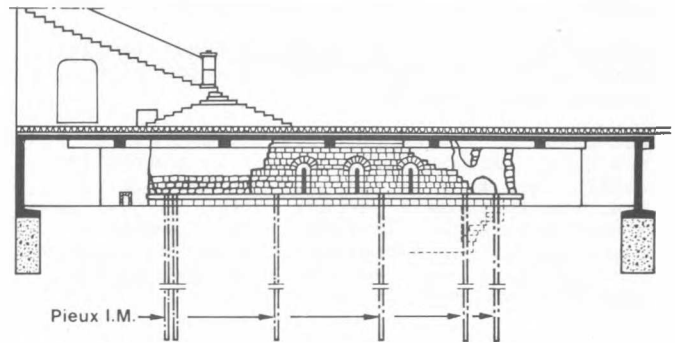


Fig. 4 Crypte Hébraïque sous le Palais de Justice de Rouen. Coupe type

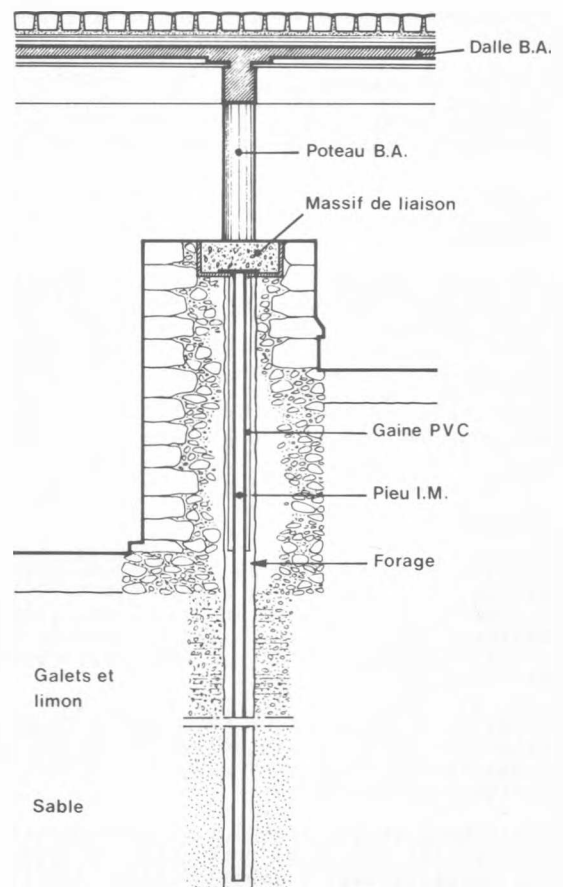


Fig. 5 Crypte Hébraïque. Détail d'un pieu I.M.

Des injections au mortier de chaux ont redonné de la cohésion aux maçonneries désorganisées. Les pierres fissurées ont été consolidées par des injections de colle. Une dalle en béton armé destinée à recevoir le dallage de la Cour du Palais de Justice a été reposée sur des poutres en béton armé pré-contraint portant sur les murs périphériques et sur des poteaux en béton armé forés à l'intérieur des murs anciens.

Pour des problèmes de fondation, l'assise de l'ouvrage roman a été dissociée de celle de la dalle de la Cour du Palais de Justice.

Les pieux I.M., qui assurent la fondation de cette dalle, traversent donc la maçonnerie romane (fig. 4 et 5).

Les pieux I.M. sont protégés par une gaine P.V.C. qui assure simultanément la protection contre la corrosion et l'indépendance du pieu I.M. vis-à-vis de l'ouvrage roman. On réalise ainsi, à coup sûr, le report des charges importantes, que supporte la dalle, en dessous des fondations de l'ouvrage roman qui aurait bien été incapable de les supporter.

ELABORATION DES PROJETS

Les différentes réalisations, décrites précédemment, ont été exécutées avec succès grâce à une étude attentive au niveau de l'élaboration des projets.

Les points originaux qui relèvent de cette étude sont la sécurité vis-à-vis du flambement de l'armature métallique et les conditions de scellement au sol de fondation.

FLAMBEMENT

Il est très important de vérifier la sécurité vis-à-vis du flambement, en raison des fortes charges axiales (1 000 kN) qui sont exercées sur des pieux dont le diamètre est de l'ordre de 0,10 à 0,15 m, avec des fiches d'une quinzaine de mètres. La méthode de vérification utilisée (GOUVENOT, 1975) a donné toute satisfaction.

SCELLEMENT

En ce qui concerne la longueur de scellement, un pieu I.M. ne saurait être simplement calculé par les formules utilisées pour les pieux forés qui conduisent, dans ce cas, à des valeurs de fiche peu réalistes eu égard aux forces portantes que l'on constate pratiquement.

Il s'agit de mobiliser la force portante par frottement latéral essentiellement, et ceci dans les meilleures conditions possibles, tant techniques qu'économiques.

On sait bien ce que l'injection sous pression peut apporter pour améliorer, dans des proportions appréciables, la mobilisation effective du frottement latéral. Les expériences sont nombreuses et diverses depuis les tirants d'ancrage jusqu'aux pieux métalliques de tous diamètres.

Une analyse bibliographique de ces expériences a été faite ainsi que de nouveaux essais en vraie grandeur (GOUVENOT, 1973).

Les conclusions sont remarquables : l'injection permet de multiplier par 3 les forces mobilisables et ce, même si le forage a traumatisé le terrain encaissant. Ainsi, l'utilisation du procédé d'injection sous pression nous permet d'envisager sans risque de multiplier par 2 la valeur que donnerait une formule classique de force portante appliquée à un pieu I.M. On ne parle plus de fiche d'ancrage, mais de scellement.

Toutefois, la prudence nécessaire au niveau d'un Bureau d'Etudes incite à recommander le plus souvent possible des essais en vraie grandeur in situ pour confirmer le bien-fondé de la théorie.

CONCLUSION

L'application des techniques de scellement par injection aux pieux de petit diamètre a considérablement augmenté l'intérêt de ces pieux. Leur usage s'est récemment développé pour la reprise des fondations de bâtiments ou ouvrages mal fondés, et pour des fondations nouvelles dans des cas difficiles (accès, nature du sous-sol, nature des efforts). Des progrès ont été accomplis, des essais nombreux réalisés, des références et expériences accumulées. La maîtrise technique de cet outil nouveau a autorisé leur application aux cas délicats du sauvetage des fondations des bâtiments historiques anciens, avec un succès total.

BIBLIOGRAPHIE

- FENOUX (1976) Les pieux aiguilles I.M. CONSTRUCTION n° 6 DUNOD
- GOUVENOT (1973) Essais en France et à l'Etranger sur le frottement latéral en fondation : amélioration par injection, TRAVAUX (Nov. 1973).
- GOUVENOT (1975) Essais de chargement et de Flambement de pieux aiguilles ANNALES ITBTP n° 124 (Déc. 1975).