

Structure La reprise en sous-œuvre des bâtiments

Les modifications structurelles d'un bâtiment ou la construction d'ouvrages mitoyens peuvent exiger des interventions de reprise en sous-œuvre, plus ou moins complexes, afin de renforcer les fondations existantes. Une connaissance parfaite du terrain et de son entourage immédiat est nécessaire pour déterminer la ou les solutions techniques les mieux adaptées.



A B

Docs. François Fondeville; Philippe Donnaes

A La conservation d'une façade existante pour le futur musée de la Romanité, à Nîmes, a nécessité de reprendre la structure au moyen de butons fondés sur des massifs ancrés par micropieux.

B Sous l'église Saint-Germain de Charonne (Paris 20^e), qui présentait une instabilité chronique, 190 colonnes de jet grouting de 80 cm à 1 m ont permis de recréer des appuis.

Plusieurs conditions ou situations nécessitent des solutions de reprise en sous-œuvre, autrement dit, de modification ou de remplacement des fondations d'un ouvrage existant. C'est le cas lorsque le bâtiment présente certains désordres ou pathologies pouvant résulter d'une mauvaise conception (non-respect des modes opératoires prévus lors de la conception, distorsions entre les procédures de bétonnage et les hypothèses retenues à la formulation des bétons), ou d'une modification des capacités de portance du sol à la suite de phénomènes extérieurs (problèmes d'infiltration d'eau ou de gonflement-rétraction des terrains dus à la présence d'argile notamment). Mais cela est également vrai à chaque fois que des travaux sont effectués à proximité d'une construction existante, les terrassements, en fonction de leur profondeur, pouvant affaiblir plus ou moins la structure voisine (*lire l'encadré p. 34*) et la descente de charges créant des efforts diffusés dans le terrain.

Dernier cas de figure, « lorsqu'un bâtiment en bon état change d'affectation ou subit des modifications structurelles importantes », précise Stéphane Monleau, directeur commercial et marketing chez Soletanche Bachy. Par exemple, avec la création d'étages ou de cages d'ascenseur ; la transformation de logements (150 kg/m²) en bureaux (250 kg/m²), ou de bureaux en établissements recevant du public (400 kg/m²) ; ou une répartition différente des charges (déplacement de cloisons, ouverture de baies ou trémies). Ces travaux se traduisent par une modification des descentes de charges et donc, des sollicitations transmises au terrain, cette nouvelle répartition devant être « acceptée » par celui-ci, sans provoquer ni tassement ni déplacement des fondations existantes.

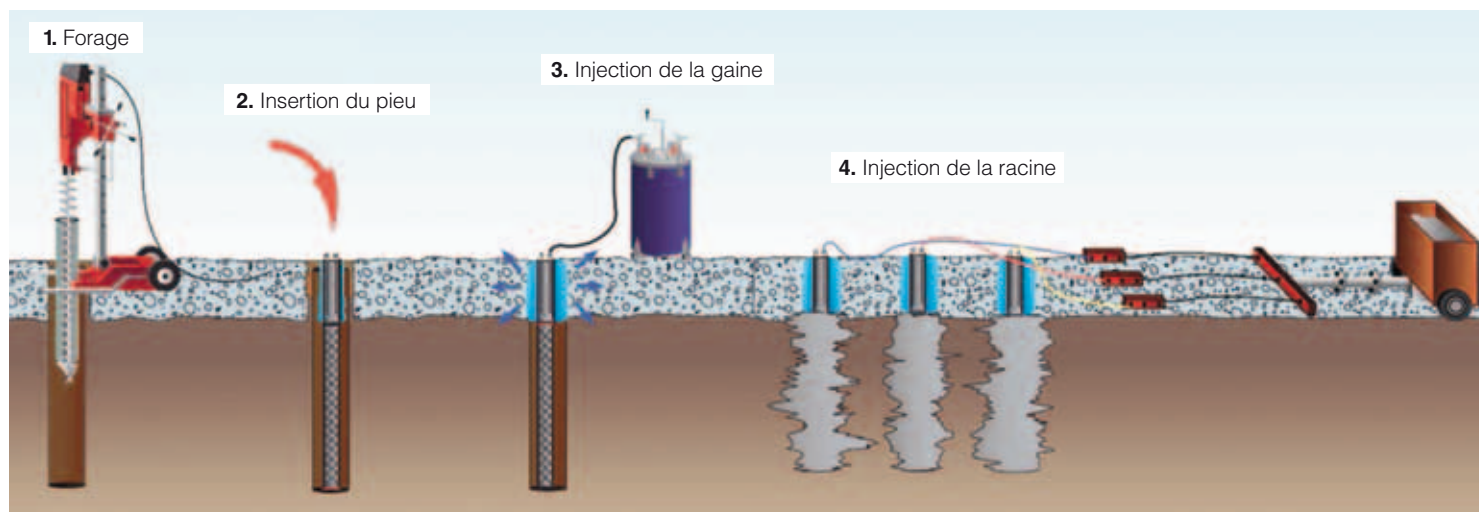
Procédé classique

La technique la plus courante, dite « traditionnelle », consiste à reprendre les fondations du bâtiment sur des longrines (dans le cas d'appuis filants) ou des massifs



La reprise des bâtiments du département des arts de l'islam du Louvre (Paris) s'est effectuée par combinaison de jet grouting dans les alluvions anciennes et injections de calcaire grossier, marnes et caillasses.

Principe des picots d'injection du sol

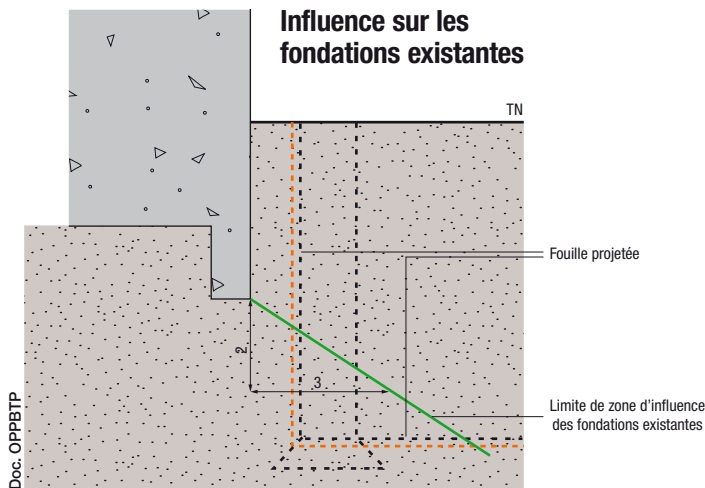


superficiels en béton armé (pour des appuis ponctuels), en allant rechercher le terrain de bonne capacité portante. Si cette solution est à la portée de nombreuses entreprises quand la profondeur n'excède pas un mètre, elle devient l'affaire de spécialistes dès lors qu'il faut descendre beaucoup plus profond, les travaux nécessitant la réalisation de puits blindés et une intervention par passes alternées. « La méthodologie consiste à pianoter, c'est-à-dire à ouvrir le terrain par plots, la largeur de ceux-ci variant, en moyenne, de 1,5 à 2,5 m en fonction des caractéristiques géotechniques du sol », explique Marc Larruy, directeur d'exploitation et directeur technique groupe chez François Fondeville. En laissant donc, entre chacun d'eux, des tranches de terrain qui assurent le transfert de charges durant cette phase provisoire. Après ferrailage, le bétonnage s'effectue en utilisant des banches classiques, « ou par béton projeté lorsque la nature du terrain ne permet pas d'ouvrir sur une largeur suffisamment importante », indique Marc Larruy. Une

fois que le béton a atteint une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges verticales, l'opération est réitérée à l'identique, dans les zones laissées en attente, jusqu'à réaliser l'ensemble de la structure. Celle-ci est ensuite butonnée, la descente jusqu'au niveau requis se poursuivant selon la même méthodologie, par bandes de 1 à 1,5 m de hauteur. Autre solution : le bilame, similaire à la technique du pré-mur employé en superstructure. « Il s'agit de terrasser sur 6 à 8 m de hauteur et d'insérer dans la fouille une structure préfabriquée de 1,5 m de largeur en moyenne, constituée de deux prédalles en béton armé qui intègrent le ferrailage dans leur épaisseur. Positionné, l'ensemble est ensuite bétonné et, là encore, l'opération se poursuit à l'identique, en pianotant. Ce système, très rapide, nécessite un terrain qui se tient très bien, de type rocheux, avec, dans le cas contraire, des risques d'affouillement. Son emploi réclame, « dans le cas de travaux mitoyens, de connaître parfaitement, (●●●)

La section basse du picot est injectée, jusqu'à saturation, 24 h après le coulage du bouchon qui solidarise le pieu aux parois de la dalle.

Terrain Connaître les contraintes juridiques et techniques



L'approfondissement de la fondation existante doit être mené jusqu'à ce que la zone d'influence ne perturbe pas le nouveau projet.

« La connaissance des données géotechniques ainsi qu'une phase de calculs menée en amont des travaux constituent des prérequis indispensables pour réaliser, avec un maximum de sécurité, toute intervention de reprise en sous-œuvre. Ces études conditionnent le choix de la meilleure solution d'exécution », souligne Jean Tarbès, responsable domaine gros œuvre à l'Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBTP). La présence de bâtiments mitoyens ou d'ouvrages avoisinants entraîne par ailleurs des contraintes techniques et juridiques. Si les conditions et obligations qui régissent des travaux de mitoyenneté sont parfaitement encadrées par l'article 662 du Code civil,

la notion d'avoisinant s'avère plus floue. Elle est pourtant tout aussi importante lors de la réalisation de travaux qui nécessitent de creuser ou d'approfondir le terrain, lesquels peuvent requérir la reprise en sous-œuvre d'un bâtiment voisin. C'est le cas chaque fois que les travaux de « fouille » s'inscrivent en dessous d'une ligne 2:3, c'est-à-dire 2 en ordonnée et 3 en abscisse (voir schéma), l'extension des fondations existantes devant être menée jusqu'à ce que leur zone d'influence ne perturbe pas le nouveau projet. « Dès lors que l'on intervient dans le terrain, il faut également se préoccuper de la présence éventuelle de réseaux ou de canalisations », poursuit Jean Tarbès. Tous les travaux prévus à proximité de telles infrastructures doivent être déclarés, avant leur exécution, au moyen d'une déclaration de projet de travaux (DT) par le maître d'ouvrage, et de déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT) par l'exécutant. Toute déclaration doit obligatoirement être précédée d'une consultation du guichet unique, accessible en ligne (www.reseaux-et-canalisation.ineris.fr), qui recense tous les exploitants de réseaux concernés dans la zone de travaux, ainsi que leurs coordonnées, les exploitants de réseaux sensibles devant obligatoirement enregistrer et mettre à jour les zones d'implantation de leurs réseaux et ouvrages au moyen de ce téléservice.

Distances pour lesquelles DT et DICT sont obligatoires

Travaux réalisés (*)	Fondations de bâtiment	Fouilles forages, enfoncement dans le sol palplanches	Forages et fouilles de plus de 5 m de profondeur	Injections
Types d'ouvrages souterrains				
Transport d'hydrocarbures liquides ou liquéfiés, transport de gaz combustibles ou de produits chimiques	15 m	15 m	40 m	50 m
Distribution de gaz	2 m	2 m ou 2 m + h	-	50 m
Lignes souterraines de transport ou de distribution d'électricité	1,50 m	1,50 m	-	-
Installations souterraines de télécommunications	-	2 m	-	-
Prélèvement d'eau destinée à la consommation humaine	50 m	50 m	-	50 m
Distribution et stockage d'eau destinée à la consommation humaine :				
• sous pression	5 m + h	5 m + h	-	50 m
• à écoulement libre	10 m + h	10 m + h	-	50 m
Transport ou distribution d'eau sous pression, de vapeur d'eau, d'eau surchauffée, d'eau chaude ou d'eau glacée et des ouvrages d'assainissement	2 m + h	2 m + h	-	50 m

(*) Les travaux réalisés sont situés à une distance inférieure aux distances mentionnées, selon le type d'ouvrages souterrains

(●●●) l'état structurel des bâtiments voisins », souligne Marc Larruy.

Autre solution, très intéressante en matière de délais : la mise en œuvre de tirants passifs qui tiennent la structure en phase provisoire et évitent ainsi la pose de butons. Assez peu employée en ville en raison des problèmes de mitoyenneté, elle est adaptée aux travaux lorsque la nature du projet permet de s'affranchir de ce type de contraintes. L'avantage ? La nécessité de réaliser un tirant d'essai fournit l'occasion de connaître la réalité du terrain, et ainsi d'être beaucoup plus précis dans le dimensionnement que sur la base des seuls résultats de l'étude géotechnique.

Micropieux

« Pour minimiser les terrassements lourds en phase provisoire, et donc les risques de fragiliser le bâtiment, la solution par micropieux permet d'intervenir à partir du terrain naturel afin d'aller chercher "le bon sol" à des profondeurs importantes, jusqu'à 25 ou 30 m », relève Romuald Ciannamea, directeur général de Sols et Fondations. Les micropieux se caractérisent par leur diamètre réduit (inférieur à 250/300 mm), l'élément porteur étant constitué d'une barre, d'un tube ou d'un profil H en acier scellé au terrain (coulis de ciment, mortier ou microbéton). Mais « les appuis créés sont de type ponctuel et la structure existante n'est pas toujours (●●●)

Reprise de dalle 2 000 tonnes levées par vérinage

Le projet consistait à créer une salle de fitness au premier niveau d'un parking souterrain situé à Boulogne-Billancourt (Hauts-de-Seine). La dalle de 2 000 t, initialement coulée à 2,40 m de hauteur sous plafond, devait être relevée à 2,90 m. Pour réaliser cette performance « qui constituait un record en la matière », précise Sénan Maroya, chef de groupe géotechnique chez Freyssinet Île-de-France, l'entreprise a positionné, en tête des 40 poteaux qui supportent la dalle, une paire de vérins capables de

soulever chacun 100 t, brêlés de part et d'autre. Les porteurs ont ensuite été sciés à leur extrémité, l'ensemble des charges transitant alors par les vérins, afin de relever la dalle de 50 cm. Les travaux se sont déroulés en quatre phases, sur une durée de cinq jours, la difficulté principale étant de lever la structure de manière homogène et ainsi ne pas risquer de l'endommager. L'opération s'est donc déroulée sous contrôle du système de levage assisté par ordinateur (LAO), développé et breveté par Freyssinet. La

technique, habituellement employée sur les ouvrages d'art permet, via un automate, de garantir le relevage simultané de tous les points d'appui. À l'issue de l'opération, la dalle a été reposée sur les poteaux rehaussés de 50 cm, après ferrailage et bétonnage. La dalle constituait l'unique accès des pompiers à la résidence attenante : « il a donc fallu être prêt, à tout moment, à mettre les vérins sur écroû de sécurité afin de permettre, si nécessaire, le passage des véhicules de secours », conclut Sénan Maroya.



Les vérins, positionnés en tête des poteaux, ont permis de soulever de 50 cm la dalle de 2 000 t.

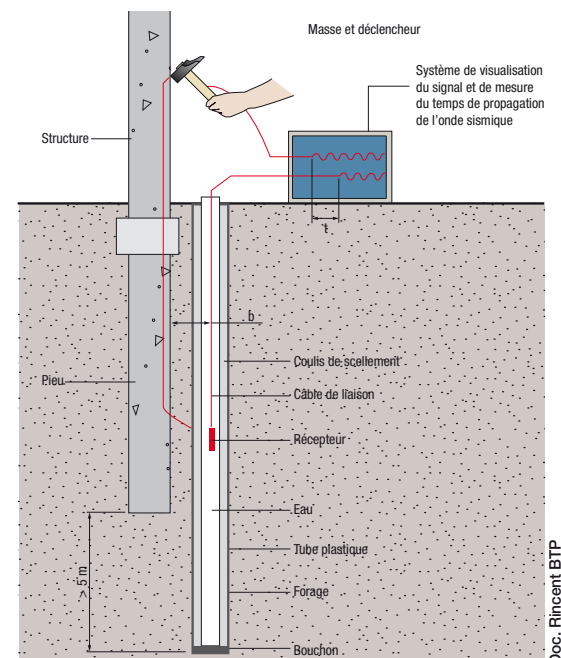
Doc. Freyssinet

Fondations profondes Deux procédés pour déceler les anomalies structurelles

« Avant toute intervention de reprise en sous-œuvre, il est impératif de procéder à une reconnaissance de sol », souligne Daniel Durot, gérant de Rincet BTP. D'une part, afin de caractériser la nature du terrain (la présence d'eau, par exemple, ou une constitution argileuse impose ou exclut d'emblée certaines techniques de soutènement) ; d'autre part, afin de déterminer le type ainsi que l'intégrité structurelle des fondations en place. « Les infrastructures d'un ouvrage soumis à un environnement agressif, à l'instar de constructions en bord de mer, peuvent en effet avoir été endommagées au fil du temps », poursuit Daniel Durot. Ces dégradations, par nature, sont invisibles à l'œil nu. Dans le cas de fondations profondes, il est nécessaire de dégager tout d'abord la tête de pieu ou de massif de fondation pour avoir une idée exacte de sa géométrie. Deux techniques peuvent ensuite être employées afin de déterminer la longueur des fondations ou celle des anomalies structurelles : l'essai d'impédance mécanique

ou la méthode sismique parallèle (MSP). La première solution consiste à analyser, via un géophone, la réponse vibratoire du pieu sous l'action d'une onde générée par un marteau manuel instrumenté. Le calcul du rapport vitesse/effort appliqué en fonction de la fréquence permet d'accéder aux paramètres recherchés. Inconvénient de la méthode : une précision sommaire due, principalement, à la difficulté de connaître la vitesse de propagation exacte des ondes dans le béton. D'où l'intérêt de lui préférer, ou mieux, de la coupler avec la MSP, « plus précise mais plus complexe à mettre en œuvre », commente Daniel Durot. Le procédé nécessite en effet de réaliser un forage équipé d'un tube étanche, scellé au terrain, et situé à 1 m maximum du bord de la fondation étudiée. Un hydrophone est ensuite placé dans ce tube rempli d'eau. Là encore, la technique consiste à mesurer le temps de propagation de l'onde créée par un impact produit en tête de pieu et les positions successives de l'hydrophone, régulièrement déplacé dans le tube.

Schéma de principe sismique parallèle



Doc. Rincet BTP

Instrumentation Les solutions se démocratisent



Un système d'instrumentation automatique, par théodolites motorisés, a permis de vérifier que les travaux de reprise en sous-cœvre du couvent des Jacobins (Rennes) n'ont induit aucun déplacement de l'ouvrage préjudiciable.



Doc. Solidata

Les solutions d'instrumentation, destinées à contrôler l'intégrité structurelle d'un bâtiment, sont apparues lors du percement de la Jubilee Line, à Londres, dans les années 1990. Il s'agissait, au moyen d'électronivelles (1), de déterminer l'incidence des travaux sur les constructions jouxtant le tracé du futur métropolitain. Leur mise en œuvre s'est rapidement étendue aux interventions de reprise en sous-cœvre, « l'évolution des techniques et la baisse des coûts entraînant une généralisation des applications de monitoring depuis quelques années », révèle Constant Choqueuse, responsable du bureau d'études Osmos. « Leur développement est surtout dû la prise de conscience des aléas et au refus de ceux-ci », complète Martin Beth, directeur technique chez SolData. Les campagnes de mesures manuelles restent d'actualité mais, outre le fait qu'elles n'autorisent pas le suivi en temps presque réel, « leur précision, parfaitement acceptable en matière de nivellement, s'avère insuffisante dès lors qu'il faut accéder aux trois dimensions », poursuit Martin Beth. D'où l'avènement, à la fin des années 1990, des solutions automatisées par théodolites motorisés, la technique consistant à viser des cibles réparties sur les façades de l'ouvrage à surveiller. « L'utilisation des systèmes à base de capteurs de nivellement hydrostatique se développe, depuis cinq ans, dans l'Hexagone », commente Martin Beth. Et, dans certains cas, les solutions à base de fibre optique, « le théodolite motorisé restant la meilleure technique pour accéder à un xyz absolu ». Pour des mesures plus rapides que les cycles habituels, généralement de 15 minutes, il peut être intéressant de coupler le ou les théodolites avec des tiltmètres (2) ou des MEMS (Micro Electrical Mechanical Sensor). Ces derniers sont interrogeables toutes les minutes ou toutes les quelques secondes si besoin, et peuvent donc permettre de déclencher des alertes instantanément en cas de problème majeur.

(1) Des électrodes placées dans une solution électrolytique déterminent l'inclinaison d'un ouvrage en mesurant les variations de résistance relative.

(2) Similaire à l'électronivelles mais ponctuel, contrairement à celle-ci qui est montée sur une barre de 1 à 3 m de long.

(3) Il s'agit, en quelque sorte, d'une électrode de dernière génération dont le capteur est intégré à la puce électronique.

(•••) apte à reprendre ces efforts », met en garde Stéphane Monleau. D'où, parfois, la nécessité de réaliser une longrine en béton qui répartisse les contraintes. Autre problème, l'exiguïté et l'accessibilité difficile qui caractérisent les chantiers de reprise en sous-cœvre. Pour contourner cet écueil, les entreprises ont développé des foreuses spécifiques, démontables et mobiles. Les injections classiques ou de résine polyuréthane peuvent également être employées. Ce dernier procédé, qui consiste à améliorer les caractéristiques du terrain en y injectant une mousse expansive de facteur 1 à 10, permet des interventions rapides et peu intrusives : perçage de faible diamètre (inférieur à 30 mm) et matériels légers. La solution est toutefois incompatible avec des sols non compressibles (de type argileux) et l'expansion n'est pas toujours maîtrisée, car elle dépend de la quantité d'eau présente dans le terrain, de la température et de la rapidité de mise en œuvre.

Picots d'injection, jet grouting et véringage

Alternative intéressante, proposée par M.Tech Patrimonium, les picots d'injection de sols (PIS) [voir le schéma p. 33]. « Contrairement aux résines chimiques, notre produit d'injection 100% écologique est un mortier minéral microbroyé exempt de toute adjuvantation chimique », fait valoir Alain Meyer, administrateur délégué de la société. Surtout, « il exclut tous les problèmes de soulèvement, alors que les résines continuent fréquemment à "pousser" ». Autre technique permettant d'intervenir depuis le terrain naturel : le jet grouting. Ce procédé d'amélioration de sol dans la masse utilise un jet de fluide à haute énergie cinétique (pression de 20 à 40 MPa) pour déstructurer le terrain et le mélanger avec un coulis liquide, de manière à former un béton permettant de créer des colonnes, panneaux ou autres structures dans le sol.

Philippe Donnaes