

HENRI CAMBEFORT ET L'INJECTION DES SOLS

Par **Thibault Badinier** et **Youssef Abboud**, membres jeunes du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS Jeunes), avril 2022

L'injection des sols est un ensemble de techniques permettant l'amélioration des sols à distance en termes de résistance ou de perméabilité par l'incorporation dans le sol d'un liant remplissant la porosité du sol. Henri Cambefort est l'une des figures les plus importantes ayant participé au développement de ces méthodes.

Injection des sols, principes et utilisations

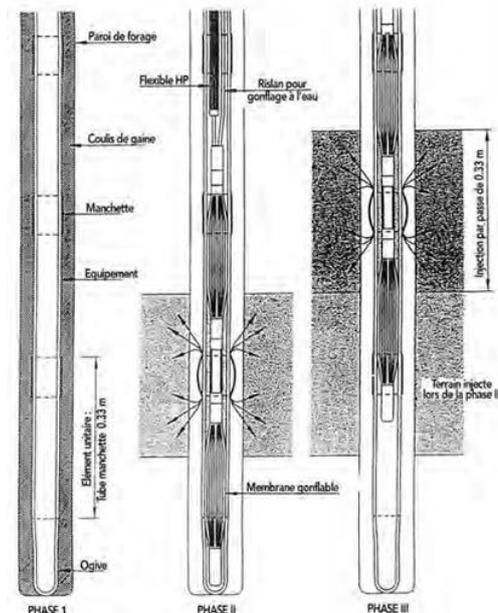
“L'injection consiste à introduire dans le terrain (sol ou roche), sous forme “liquide”, un matériau susceptible d'occuper la porosité, afin de réduire la perméabilité et d'améliorer la cohésion.” (AFTES 2006)

L'injection consiste donc à modifier le sol en remplaçant l'espace des vides inter-particulaires par un liant formant à terme une matrice imperméable et plus résistante. Ce type de technique est attesté pour la première fois en 1802 sous l'impulsion de Charles Berigny, qui réalise, dans le port de Dieppe, des injections de coulis de mortier, lui permettant de renforcer les fondations des écluses. Par la suite, la méthode se révélera déterminante dans les années 1920-1930, époque durant laquelle de nombreux chantiers de grands barrages sont conduits à travers le monde. En effet, la méthode des injections permet en occupant la porosité du sol par un coulis, de réduire sa perméabilité et de rendre étanche les couches de sols sous les barrages, opération sans laquelle l'écoulement de l'eau sous le barrage rendrait leur fonctionnement impossible. Aujourd'hui, les injections sont réalisées dans de nombreux projets et se déclinent en différentes méthodes : injection de calquage, injection de compensation, injection de compensation, jet grouting, etc.

Le traitement d'un sol par injection dépend d'abord de la nature du sol, mais aussi de la profondeur de l'injection et du type de coulis utilisé. La méthode actuelle consiste à réaliser des forages régulièrement espacés permettant d'atteindre les couches de sol à injecter. Elles peuvent être espacées entre 1 m et 10 m selon la perméabilité et le type de sol.

Par passe successive, le coulis est ensuite injecté sous pression via les forages à l'aide d'une pompe. L'injection peut être réalisée directement via les parois du forage, dans le cas d'une roche fissurée par exemple. Mais, dans la plupart des sols, le forage d'injection est équipé de tubes à machettes qui sont des dispositifs de tube

disposant de clapets s'ouvrant sous la pression d'injection et permettant ainsi le passage du coulis.



Le processus d'injection est contrôlé par quatre paramètres principaux : le volume d'injection, la pression, le débit et l'ordre des phases d'injection. La pression et le débit sont deux paramètres liés dont la maîtrise est importante pour le mode d'injection et qui sont fixés en fonction de la profondeur et de l'état de contrainte du sol. On distingue alors les injections par imprégnation qui conservent la structure du sol et qui nécessitent des pressions relativement faibles et les injections par claquage pour lesquelles la pression utilisée est suffisamment importante pour détruire le sol. L'injection d'imprégnation est alors plus facile en profondeur ou les contraintes géostatiques sont plus importantes tandis qu'à faible profondeur le risque de claquage est plus important.

Les progrès dans les méthodes d'injection sont fortement liés à l'évolution du produit utilisé pour l'injection. Tout comme les premiers coulis qui étaient des mortiers, les coulis à base de ciment sont encore très répandus aujourd'hui. Selon le type de sol, les coulis de ciment sont additionnés à de divers produits. Dans le cas de l'injection de roche fissurée ou de grave très grossière par exemple, des mélanges ciment, bentonite et sable pourront être utilisés. Dans le cas de sol plus fin comme des sables, on préférera par exemple des mélanges de ciment ultra fin (sur-moulu) et d'adjuvants chimiques permettant une meilleure mise en suspension dans l'eau et la défloculation des particules. Les coulis à base de produits chimiques sont quant à eux plus chers, mais permettent l'injection des sols plus fins. Ils ont permis également de compléter l'étanchéité réalisée par un coulis de ciment. Les plus

répandus sont les gels de silice qui sont formés par la réaction de solution de silicate de soude et d'acide. D'autres coulis existent notamment des formulations à base de résines chimiques. Historiquement, d'autres matériaux ont également été utilisés tels que l'asphalte sur le barrage de Hales Bar.

Les méthodes d'injection des sols étant aujourd'hui largement répandues, elles ont fait l'objet d'une recommandation publiée par l'AFTES en 2006 et rédigée par le groupe de travail 8 sous la direction de M. Chopin. Une nouvelle version de celle-ci sera publiée au cours de l'année 2022. Avant cela, elle avait fait l'objet de premières recommandations également publiées par l'AFTES en 1975 (mise à jour en 1987), et la publication d'un ouvrage de référence "Injection des sols" (en deux volumes) par Henri Cambefort.

Henri Cambefort (1912-1995)

Henri Cambefort, né en 1912, est considéré comme l'une des figures les plus importantes pour les méthodes d'injection des sols, bien qu'il n'en soit pas l'inventeur.



Il est diplômé en 1936, Ingénieur Civil de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Il commence alors sa carrière à la Compagnie Nationale du Rhône, après un passage au Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics. Il intègre en 1943 la société SEC, qui deviendra Solétanche en 1948, où il finira sa carrière en 1975. Il y devient directeur technique à partir de 1946. Henri Cambefort fut à la base de la plupart des techniques mises au point à cette époque pour

les travaux de fondation : tubes à manchettes pour les injections, parois moulées, barrettes et boues de forage, gels à base de silicate, ancrages réinjectables, préchargement atmosphérique, carottier à triple enveloppe, micromoulinet pour la mesure des courants d'eau dans les forages, etc. Il travaillera dans de nombreux pays, en commençant par la France sur le chantier du barrage de Castillon, en passant le Maghreb ou le Mexique.

Durant sa carrière, il était reconnu pour son expertise. Il était réputé pour accorder une importance particulière à l'expérience, à l'observation et au travail de terrain, davantage qu'à la théorie et au travail mathématique.

Il fut enseignant à l'École Spéciale des Travaux Publics de 1949 à 1975. De façon atypique, il y décrit des cas de chantiers sur lesquels il est intervenu, notamment des cas de barrages et de travaux d'injection comme sur les chantiers du barrage d'Assouan ou de Tachkent, mais également des travaux de stabilisation des sols ou de renforcement de rochers.

Il est l'auteur de nombreux ouvrages de références dont la plupart ont été traduits dans de nombreuses langues dont l'espagnol, le russe, l'allemand et le japonais :

- Forages et sondages (1955, réédité en 1966) ;
- Reconnaissance des sols et fondations spéciales (1963) ;

- Géotechnique de l'ingénieur (1970) ;
- Introduction à la géotechnique (1971).

En particulier, il est l'auteur de l'ouvrage "Injection des sols (en deux volumes)" (édition Eyrolles, 1964). Il décrit dans le premier volume les cas d'application des méthodes d'injection, la théorie, les principes utilisés, mais il y détaille également les aspects techniques selon les objectifs et les

sols concernés, ainsi que les différents matériels et types de coulis. Dans le second volume, il présente de nombreux cas d'études où les injections ont permis l'étanchement ou la consolidation de roches fissurées et d'alluvions, mais aussi des cas d'usage dans la maçonnerie et pour la mise à niveau et la compensation des tassements.

Barrage de Serre-Ponçon, un chantier remarquable

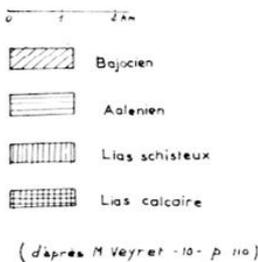
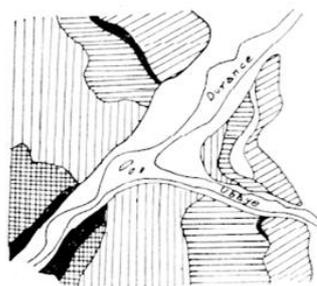
Ce barrage est emblématique dans l'histoire de l'injection des sols. Outre sa hauteur inédite et l'échelle des travaux d'injection allant jusqu'à 100m de profondeur, il s'agissait de la première utilisation de l'injection avec des tubes à manchettes.

L'ouvrage s'inscrit dans le cadre de l'aménagement hydraulique de la Durance et du Verdon. L'idée de construire un barrage sur la Durance est apparue durant le 19^{ème} siècle, en particulier suite à la crue exceptionnelle de mai 1856. Le but de la construction d'un tel barrage est d'amortir les fortes crues de la rivière et de résoudre le problème de manque d'eau en période de sécheresse. L'idée de ce barrage est lancée et abandonnée à plusieurs reprises entre

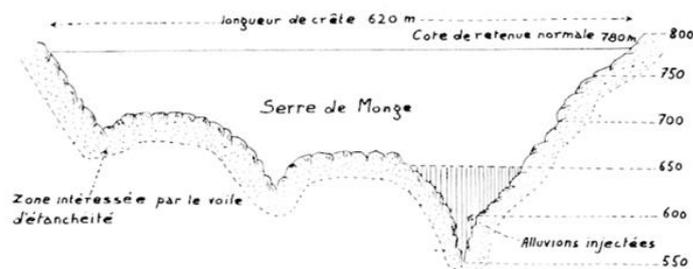
1897 et 1909 pour diverses raisons techniques. En 1919, le projet est relancé sous l'impulsion de l'ingénieur des Ponts et Chaussées Ivan Wilhelm.

12 campagnes de sondages ont été alors réalisées jusqu'en 1927. Elles ont permis de mettre en évidence les difficultés liées au contexte géotechnique. Le substratum rocheux, situé à plus de 100 m de profondeur, est surmonté d'une couche d'alluvions grenues de nature hétérogène. La perméabilité élevée des alluvions (entre 10^{-3} à 10^{-4} m/s) et leur grande épaisseur conduit à écarter la solution de barrage en béton nécessitant un sol de fondation plus résistant. La solution de barrage en terre compactée a été retenue pour la première fois en Europe occidentale.

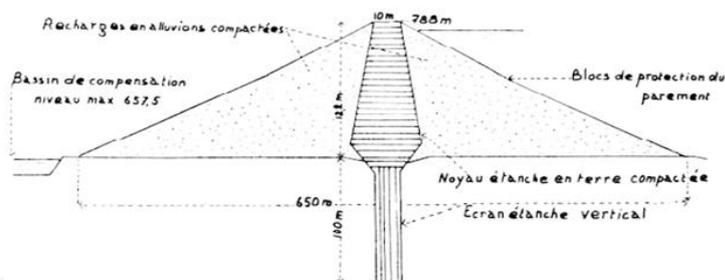
Le site du barrage



Profil en travers du lit rocheux



Coupe de la digue



Un concours pour la construction a été ouvert par EDF en 1948. Le projet de barrage retenu est un barrage en terre compactée de 124 m de hauteur, de 600 m de longueur et de 650 m de largeur à la

base, le tout pour une retenue d'eau de l'ordre de 1200 millions m³. La construction débute en 1952 et se termine en 1958.

La mise en place de cette solution a nécessité d'étanchéfier la vallée alluvionnaire par un rideau d'injection mis en place dans les 100 m d'alluvions. Cette solution a permis d'éviter les infiltrations et les érosions internes qui pourraient altérer la stabilité des fondations de la digue.

L'injection sur une hauteur si importante a nécessité la mise au point de techniques d'injection adaptées, permettant des injections à très haute pression, une réinjection par tranche, ainsi que la fabrication de coulis fins qui ne se décantent pas trop vite sur la hauteur injectée. Les injections ont été réalisées par Solétanche avec des tubes à manchettes. Il s'agit de la première utilisation de cette technique. Cette dernière, mise au point par Solétanche, est adaptée pour l'injection des terrains meubles. L'injection suivant cette technique se déroule en plusieurs étapes :

- Un forage est réalisé, dans lequel est inséré un tube à manchettes. Le tube est scellé dans le sol afin d'éviter que le coulis remonte sous l'effet de la pression d'injection à travers l'espace entre le tube et le sol.

Un tube à manchettes est un tube (en métal ou en PVC) lisse à l'intérieur et perforé tous les 30 à 40 cm. Au niveau de chaque perforation, des anneaux avec des fentes, appelés manchettes, sont installés. Ces anneaux jouent le rôle de clapets.

- L'injection est réalisée du bas jusqu'en haut à l'aide d'un flexible d'injection muni d'un obturateur pour empêcher la remontée du coulis dans le tube.

- À chaque profondeur, l'injection est effectuée en deux phases : une phase d'injection d'un coulis bentonite ciment pour remplir la granulométrie grossière, suivie d'une phase où est injecté un coulis plus pénétrant pour remplir la granulométrie plus fine.

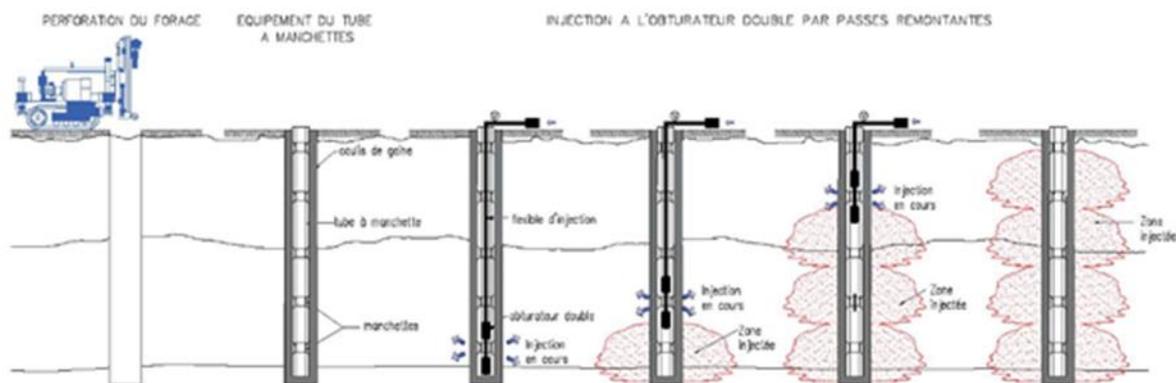


Figure n° 12 : principe de l'injection de claquage - séquence des opérations



Les injections ont été réalisées sur une surface de 4200 m², sur une largeur variable entre de 15m en profondeur et 35 m à la connexion avec le barrage. Elles ont nécessité 10 000 tonnes de ciment laitier finement broyé et 20 000 tonnes d'argile d'Apt. Le volume d'alluvions traité est estimé à 100 000 m³.

Les mesures ont permis de confirmer l'utilité de ces injections. L'écoulement maximal mesuré à travers l'écran d'étanchéité est de 25 L/s et la perméabilité horizontale des alluvions a été réduite à un ordre de grandeur de $2 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Interview : Michel Chopin

Après un début de carrière, notamment chez Solétanche sous la direction d'Henri Cambefort, Michel Chopin travaille actuellement dans la société KF International SA et poursuit des activités de conseil sur les ouvrages géotechniques spéciaux. Il est reconnu aujourd'hui comme un expert de l'injection des sols et des roches et dirige le groupe de travail de l'AFTES en charge des recommandations sur le sujet.

Youssef et Thibault : Pour vous, en quoi les méthodes d'injection des sols est particulièrement intéressante dans le cadre des travaux géotechniques ?

Michel : Pour moi, l'utilité de l'injection est de, à distance, transformer les propriétés du sol, d'en changer la perméabilité, d'en améliorer le module de déformabilité, y compris même pour certains massifs rocheux. Donc c'est une opération qui est relativement facile à faire et qui permet, par rapport à d'autres méthodes invasives ou qui nécessitent de l'excavation, de pouvoir à l'avance transformer les conditions de sol, et ainsi réaliser des ouvrages dans des conditions de faisabilité tout à fait acceptables.

Youssef et Thibault : De votre point de vue, quels sont les progrès majeurs des méthodes d'injection des sols depuis le début de votre carrière ?

Michel : Les progrès de l'injection se subdivisent en trois parties. Premièrement, une partie technique de forage. Au cours des 40 dernières années les techniques de forage ont sensiblement évolué. On arrive aujourd'hui à disposer de machines qui permettent de façon très économique et très productive de réaliser des forages tubés, qui permettent de passer des terrains difficiles avec des performances bien améliorées. Également, l'enregistrement des paramètres de forage est devenu une habitude, un mode de traitement et un mode d'information très utile.

Deuxièmement, au niveau du matériel, selon l'idée d'Henry Cambefort, qu'il partageait avec G. Rodio, le développement de la méthode du tube à manchettes a permis d'équiper et de réaliser des travaux d'imprégnation dans les sols granulaires et les sols non cohérents. Ce qu'on peut regretter par contre, c'est l'utilisation des tubes à manchettes dans des sols cohérents. Dans ces

sols, le fait de sceller un tube à manchettes isole la fissuration et pour la retrouver, on est obligé de passer en force ce qui conduit à surfracturer ces sols. Et cette sur-fracturation est souvent nuisible, n'est pas utile tout au moins. De plus, c'est une méthode qui conduit à faire des travaux d'injection à des pressions qui intègrent des pertes de charge élevées et du coup qui sont mal maîtrisés. Alors, on a développé depuis plus de trente ans, le multi-packer system (MPSP), qui utilise le tube à manchettes équipé de sacs extensibles (des séparateurs injectables) à une distance que l'on fixe à l'avance, et qui permet d'injecter, en direct sans coulis de scellement, des tranches de 2 m, 3 m ou 5 m. Cette méthode permet de mieux gérer les pressions d'injection et de contrôler le régime de débit, qui lui va être majoré par rapport à l'injection limitée d'un tube à manchettes. C'est une méthode qu'on a encore largement développée récemment dans le terrain parisien, en particulier dans les marnes et caillasses où il n'est pas génial d'utiliser un tube à manchettes sellé. D'une part, l'utilisation du coulis remplit les discontinuités que l'on souhaitait traiter avec un coulis différent et d'autre part, passer le coulis de gaine va conduire à surfracturer les marnes et crée des pertes de charge trop élevées et ne permet pas d'arriver à trouver une pression de refus techniquement valide. Donc, avec le multi-packer system, on arrive à traiter des sols entre 5 bars et 7 bars, alors qu'au tube à manchettes, il est fréquent d'utiliser des pressions de 10 bars et plus. Ça fait une énorme différence en termes de qualité de traitement et en termes de quantité et de délais. Parce que si vous utilisez un paramètre de pression, ça va vous amener à injecter des quantités, à recycler, et à reprendre des injections à plusieurs reprises. Ces choix sur les quantités et les pressions d'injection, relèvent typiquement de la conception des travaux d'injection.

La dernière mise au point sur le matériel, ce sont les systèmes auto-foreurs, mais qui sont souvent des prototypes. Il existe des systèmes d'injection qui peuvent être embarqués dans des systèmes auto forants et qui permettent en une seule opération de mettre en place l'équipement de forage, d'injecter, tout ça à travers un sas, donc c'est assez intéressant quand vous avez des pressions d'eau.

Enfin, en termes de matériaux, je vois trois sujets. D'abord, l'arrivée des ciments ultrafins qui a permis de traiter des sols fins au-delà des limites que l'on connaissait par le passé, à des valeurs de l'ordre de 10^{-4} m/s. Ça a permis de remplacer le gel de silice dur qui était utilisé dans les années 70/80 et qui était sensible à un phénomène de synérèse. Il est lié à la rétractation des ions siliciques dès lors qu'ils sont injectés en masse. En cas de claquage, le gel de silice dans ces claquages va disparaître en 3/4 semaines et vous allez retrouver une perméabilité grandissante. Deuxièmement, dans les années 90, on a abandonné les gels de silice à durcisseur organique et on a parallèlement développé des nano-silices, qui n'ont rien de commun avec les gels de silicate, qui sont des ions siliciques purs qui sont en émulsion et qui sont rompus par une solution saline. On utilise ce matériau depuis les années 2000 – 2005 puisque ce matériau coûtait à l'époque une fortune. Lorsqu'on injecte des sols, c'est problématique, puisque l'on injecte 30% de porosité, mais lorsque l'on injecte des roches ça va beaucoup mieux puisque l'on n'injecte pas plus de 3% de porosité. Enfin, les résines et les polyacrylates ont été largement développés dans les années 90. On n'utilise pas souvent ce type de matériaux, sauf dans des cas particuliers. Par exemple, lorsqu'on veut faire des noyaux étanches dans le sable fin, on peut très bien imaginer un système bilinéaire avec des lignes de silicate et une ligne centrale en acrylate ou polyacrylate.

Youssef et Thibault : Comment diffèrent les techniques d'injection dans les différents pays ?

Michel : La différence entre la vision franco-européenne et américano-canadienne de l'injection, c'est presque aussi différent que le pressiomètre Menard et l'essai SPT dans la géotechnique. La technologie qu'ils utilisent avec un circuit de return line n'est pas facile à saisir. Lors de l'injection, on fait un circuit retour pour que la pression ne monte pas trop, pour que l'on n'ait pas un refus de blocage à la pompe. Cette technologie n'est pas dans notre façon d'obtenir le refus et d'apprécier le traitement à l'injection. Ce n'est pas très efficace et c'est quelques fois assez contreproductif. J'ai une idée sur ce système qui à mon avis demeure perfectible, par rapport à ce que nous faisons nous.

Claude Caron s'est aperçu, et c'était déjà une démarche d'Henri Cambefort, que bien souvent

les gens ne parvenaient pas à maîtriser les conditions d'injection parce qu'ils ne tenaient pas compte des contraintes géostatiques. Or, c'est un paramètre de base dans l'injection qui va définir la possibilité d'injecter ou non à un niveau donné. Le même sol de même perméabilité est peut-être injectable à 50 m ou 100 m de profondeur, mais il ne l'est plus quand on arrive à 10 m, car les contraintes horizontales sont tellement faibles que les matériaux ne s'imprègnent pas dans la porosité du sol et forme un claquage tout simplement, donc ce sont des travaux en pure perte. Et c'est toujours une problématique récurrente sur certains chantiers aujourd'hui.

Youssef et Thibault : Un exemple remarquable de chantier où l'injection des sols a été déterminante dans la réussite du projet ?

Michel : Le chantier typique dans lequel des matériaux typiques ont constitué une avancée technologique et un sujet d'intérêt, c'est le tunnel du Lötschberg en Suisse. C'est le premier tunnel de feroutage qui a été mis en service en 2007.

Ce tunnel du Lötschberg a été réalisé de manière assez intéressante techniquement. Il y avait un sujet : c'était l'attaque sud à la fenêtre de Ferden. Il y a un accident géologique qui est un rebroussement des liasses du Trias qui sont subverticales à l'émergence des Alpes. Dans cet accident, il y a une exploitation en surface d'eau minéralisée (source thermale). Cette production thermale est alimentée par une zone contenue dans cet accident. Et le tunnel traverse cet accident à deux reprises à 150 m d'intervalle.

Les contraintes environnementales imposées par l'exploitant de la source thermale, et par la justice étaient de ne prélever au maximum que 2 L/s sur l'ensemble de ces deux accidents. Alors, il a fallu faire des investigations à l'avancement du tunnel pour détecter la position des accidents et l'importance de l'aquifère, et traiter ces discontinuités qui étaient subverticales. Pour atteindre cet objectif de 2 L/s max, on a fait donc ces travaux de traitement avec des forages de longue distance équipés de stand pipes métalliques et il a fallu atteindre une perméabilité de $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, ce qui n'est pas très courant. Pour y parvenir, on a injecté la fissuration avec une série de liants ultra fins puis en complément un coulis à base de nano silice. C'était la première application faite avec de la nano silice en grande échelle. L'opération a tout à fait donné satisfaction : le système mis en place s'est révélé très efficace et fonctionne toujours.

Youssef et Thibault : De votre point de vue, en quoi Henri Cambefort a joué un rôle déterminant dans le développement et la démocratisation de la technique ?

Michel : Henri Cambefort a été l'un des premiers à faire une opération de vulgarisation qui consistait à organiser la réflexion de conception à partir des éléments factuels, d'une analyse très soignée des données et des mesures faites *in situ* et du comportement de l'injection. Il est l'un des premiers à avoir tenté de rationaliser le comportement de l'injection par une application numérique et il a été largement aidé dans cette tâche par Brillant qui a essayé d'extraire tout ce qui était possible de l'hydraulique souterraine pour s'en servir et essayer d'interpréter le comportement et donner des exemples du comportement des liants hydrauliques pendant leur injection.

On peut aussi largement rappeler que Cambefort a travaillé sur l'injection des milieux fissurés. Il y a beaucoup d'applications dans son ouvrage qui permettent d'expliquer comment on peut s'affranchir du traitement des fissures, du frottement résiduel et de perte de charge résiduelle en fissuration

Donc, ce livre est assez intéressant car il a permis de vulgariser mais aussi d'expliquer beaucoup de choses et de donner des éléments mathématiques et numériques capables de supporter des opérations d'injection (des sols et des milieux fissurés) et d'expliquer comment on peut les organiser, les concevoir et les arrêter et s'en satisfaire.

Une autre contribution de Cambefort, c'est l'introduction du tube à manchettes.

Enfin, après sa retraite, Cambefort a publié dans les annales de l'IBTP, comme par exemple «Injections des sols et ses limites», qui est un travail réalisé avec Claude Caron. Dans ce travail, il y a une théorie sur la façon de prédire la rupture du sol en fonction des contraintes. Cette théorie permet de prédéterminer des conditions d'injectabilité des produits dans les sols fins à partir seulement d'un régime de débit calculé en tenant compte des contraintes géostatiques.

Youssef et Thibault : Une nouvelle version des «Recommandations de l'AFTES relatives à la conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches» rédigée sous votre direction sera publiée en 2022. Quelles sont les nouveautés de cette version ?

Michel : Il manquait très clairement quelques choses dans les recommandations de 2006.

Tout d'abord, il faut noter que les travaux d'injection constituent un ouvrage géotechnique spécial aux termes de la norme. Ils sont faisables dans certaines conditions qui doivent être définies à l'avance, précisées et évaluées au stade de l'Avant-Projet Sommaire. Au moment où le Maître d'Ouvrage (MOA) commence à regarder son projet et évaluer sa faisabilité, il est obligé de regarder son impact environnemental. Et si on s'aperçoit que, pour que la construction de l'ouvrage soit faisable, on va interférer dans des niveaux qui nécessitent des injections, cette partie de travaux doit être intégrée à l'ouvrage, sa conception et faisabilité doivent être vérifiées.

Si ce n'est pas faisable, il faut gérer ce risque chez le MOA au moment des études préalables ou des études de l'Avant-Projet Sommaire. Cette approche de risque est associée à l'établissement d'un journal de risques. Ce journal doit être communiqué au Maître d'Œuvre (MOE) au moment de la contractualisation avec les bureaux d'étude, pour que chacun prenne conscience de l'état d'avancement de la gestion de risques, notamment en ce qui concerne l'injection et le risque environnemental en général. Ensuite, cette approche continue d'être gérée pendant toute la période d'études : Avant-Projet, projet, DCE. Au moment de la contractualiser avec l'entreprise, celle-ci devra se positionner pour refuser, contester ou accepter ce journal de risques.

La raison pour laquelle on essaie de créer ce cheminement est simple. C'est que si la gestion de risques est vue à chaque étape de la contractualisation entre le MOA, le MOE et l'entreprise, on va pouvoir établir avec elle un contrat dans lequel la rémunération est subdivisée en trois parties. La première partie, principale, semi forfaitisée, correspond à des quantités données. La deuxième partie, secondaire, correspond à des quantités supplémentaires dans le cas où celles-ci sont nécessaires compte tenu des variables environnementales. La troisième partie est une partie flexible qui permettra la rémunération des études supplémentaires, des changements de matériaux ou de matériel en cas de conditions particulières qui seraient manifestées et qu'on n'avait pas démontré, trouvé ou identifié pendant les études.

Pour ce qui est de l'opération elle-même : l'injection, ses caractéristiques, son extension et

sa qualité doivent être précisément définies dans le projet. Si on a recours à une méthode d'injection, c'est pour obtenir des caractéristiques différentes du terrain naturel. Si on a besoin d'une perméabilité donnée, il faut le préciser et s'assurer que tout au long du projet que les moyens qui sont mis en œuvre sont appropriés pour obtenir ce résultat. Y compris que le MOE, au moment où il fait son design, ait bien conscience des moyens qu'il faudra mettre en place pour atteindre ces résultats et garantir les objectifs (nécessité de matériaux et matériels non standards par exemple).

On va essayer de pousser dans ce sens pour éviter que le Maître d'Ouvrage ait peur des travaux d'injection dans un projet (à cause de l'incertitude au niveau du temps nécessaire pour ces travaux et leur utilité) et que l'ingénieur ne tienne pas compte des injections dans ces calculs par sécurité, parce qu'on n'est pas sûr si on a une homogénéité du traitement. On finit parfois par laisser faire des travaux auxquels personne ne croit vraiment, sans savoir vraiment pourquoi puisqu'on n'a pas défini un objectif précis à atteindre.

Il faut donc arriver à sortir de cette problématique qui n'a pas de sens technique ni financier. Donc, pour en sortir, il faut clarifier la faisabilité et clarifier la manière dont on peut imaginer une amélioration des sols et comment on peut la prendre en compte aussi. Cela fait bien partie de la discussion avec le MOE en termes de design et avec le MOA en termes de conception initiale pour son projet, et ce pour éviter des éventuels bouleversements des programmes et coûts des travaux et par la suite du projet.

Voilà pourquoi c'est important de savoir au départ si on a lieu de choisir telle ou telle méthode, pourquoi on l'a choisie, quels sont les objectifs et comment les contrôler pour être sûr de prendre

en compte ces paramètres améliorés dans le design.

Il reste actuellement la partie technique qui est en fait une reprise de l'ancienne recommandation qui constitue une règle de l'art. Cette partie va être mise à jour et puis organisée un peu mieux au niveau de la présentation des arguments pour que ça soit plus facile à lire.

Par ailleurs, l'organisation de la recommandation est totalement différente que la précédente : elle est organisée en 6 chapitres, plus une annexe technique. Le document est organisé comme une opération ou un projet : vous entrez avec l'acquisition des données au niveau du MOA, les préoccupations du MOA avec son Avant-Projet Sommaire et ses objectifs, ainsi que le partage du risque. Puis vous avez la MOA avec toute sa partie *études* et la manière dont est élaboré le projet de traitement. Ensuite, vous avez la contractualisation avec tout ce qui a pour que chacun comprenne bien quels sont ses engagements et ses responsabilités. Puis vous avez la partie *travaux* avec tout ce que comportent la préparation et la réalisation des travaux, le documentaire nécessaire, les contrôles appropriés à chacun des objectifs recherchés. Et enfin, l'annexe qui permet d'avoir toute la partie technique en une seule place avec des tableaux et graphes. Donc, c'est un changement radical par rapport à la précédente.

D'autre part, on a bien sûr des retours d'expériences permanents sur toutes sortes d'opérations qu'on pourrait inclure dans les recommandations qui visent à éviter des catastrophes et surtout éviter une mauvaise perception de la conception des travaux. On va tirer profit comme on fait souvent chaque fois qu'on publie une recommandation de quelques expériences fâcheuses pour éviter que ça se reproduise.

Références

La conception et la réalisation des travaux d'injection des sols et des roches. (AFTES 2006), Tunnels et ouvrages souterrains, (194-95), 70-149.

Cambefort, H. (1964). Injection des Sols, Part I and Part II. Eyrolles

Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction, 1st Edition - February 1, 1989, Author: J. Verfel

Grouting Deep Alluvial Fill in the Durance River Valley, Serre Poncon Dam, France, Marcel Haffen, Engineering Geology Case Histories Number 4, Geological Society of America, Volume 4

Barrage de Serre-Ponçon. Gap (Hautes-Alpes). France (1960).

<https://www.soletanche-bachy.com/fr/solutions/techniques/etanchement/injections>

Réparation et renforcement des fondations (guide STRRES)

Remerciements

Un grand merci à Michel Chopin pour sa participation et pour ses réponses à nos questions.