

Fondations d'une station de traitement d'eau potable par colonnes ballastées injectées

Le cas de la station de traitement de Dourd'hal¹

Nadine Dellinger^a et Gérard Mathieu^b

Le sol est un matériau complexe, parfois évolutif, dont le comportement est approché par des théories établies de façon empirique et validées par l'expérience. Sa connaissance passe par la prise en compte de ses caractéristiques mécaniques mais aussi des nappes phréatiques décelées (niveaux des plus hautes et des plus basses eaux, existence d'un réseau hydrodynamique...), des pollutions qui peuvent l'affecter (risque d'agressivité du sol vis-à-vis de la structure installée), des mouvements de terrains (fontis, affaissements miniers, dissolution de gypse...), de son environnement (terrains en zone inondable par exemple).

Un ouvrage édifié sur un sol doit assurer la fonction pour laquelle il a été exécuté de façon pérenne, de la phase de construction jusqu'à la fin de sa durée de vie et en tenant compte des modifications prévisibles de son environnement et des caractéristiques du sol. L'étude géotechnique revêt donc un caractère fondamental : elle permet de connaître le sol d'assise de l'ouvrage, de définir le mode de fondation et de calculer les valeurs des interactions sol-structure. Par la suite, la vérification en cours de chantier de la bonne exécution des fondations est un préalable à la poursuite de l'ouvrage et doit faire l'objet d'un programme de contrôles pré-établi.

L'expérience décrite ci-après est un exemple des difficultés que l'on peut rencontrer. L'ouvrage concerné est une station de traitement des eaux potables réalisée pour le compte d'une collectivité locale, fondée sur colonnes ballastées injectées (CBI).

Contexte

Le Syndicat intercommunal des eaux de Folschviller produit et distribue de l'eau potable à 9 500 habitants, représentant 3 000 abonnés. Cette collectivité située dans le bassin houiller lorrain a hérité des Houillères du Bassin de Lorraine ses ouvrages de production et une partie de ses ouvrages de stockage : cinq forages au grès vosgien, une station de reprise d'eaux brutes, une station de déferrisation et des réservoirs implantés dans les anciennes cités minières. Le syndicat a confié la gestion de son service public de production et de distribution d'eau potable à une société privée, par contrat d'affermage.

La collectivité décide en 1995 de construire une nouvelle usine de traitement en raison de l'ancienneté et de la vétusté des installations existantes qui ne permettaient pas d'envisager leur rénovation. La maîtrise d'œuvre est confiée à la DDAF de la Moselle. L'avant-projet sommaire est dressé en octobre 1995. Les travaux, estimés

Les contacts

a. DDAF-Moselle
BP 21034
57036 Metz Cedex

b. Cemagref
UR Ouvrages
hydrauliques et
équipements pour
l'irrigation
Le Tholonet
BP 31
13612 Aix-en-Provence
Cedex

1. La station de traitement de Dourd'hal relève du Syndicat intercommunal des eaux de Folschviller, dans le département de la Moselle.

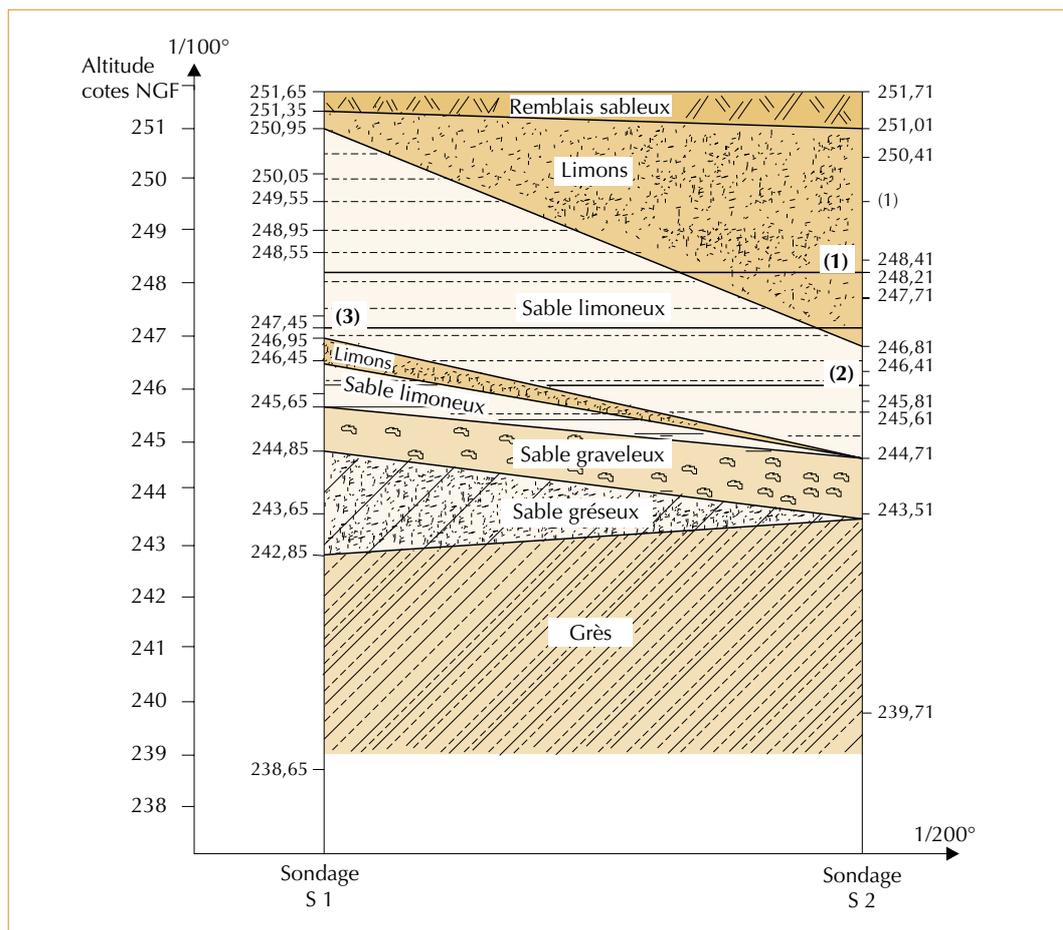
à 6 millions de francs hors taxes, sont subventionnés par le département de la Moselle et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse.

Après avoir choisi l'emplacement de la nouvelle usine de traitement à partir de raisons techniques, le syndicat acquiert alors les terrains nécessaires à la construction, à proximité de la station de reprise d'eaux brutes, dans un site pavillonnaire. Le coordonnateur Sécurité et protection de la santé ainsi que le contrôleur technique sont désignés.

L'étude géotechnique du site est réalisée en avril 1996. La nature des terrains rencontrés est décrite à la figure 1. En présence de tourbe et de mauvaises caractéristiques géotechniques des

terrains, le géotechnicien conclut à la nécessité de fonder les ouvrages sur des fondations spéciales. De plus, la présence d'une nappe d'eau circulant dans les sables limoneux ou limoneux-sableux avait été détectée. Parmi les différentes techniques possibles, il propose les trois alternatives suivantes pour asseoir la nouvelle usine de traitement :

- soit sur puits ancrés de 50 cm dans les sables gréseux ;
- soit sur pieux forés, armés et fichés dans les terrains à une profondeur d'environ 10 m ;
- soit sur colonnes ballastées injectées à 8 m de profondeur.



▲ Figure 1 – Coupe géotechnique (source FONDASOL, 1996) à partir de deux sondages réalisés sur le site de Dourd'hal.

- (1) arrivée d'eau en cours de forage.
 (2) niveau d'eau en fin de forage.
 (3) niveau d'eau relevé le 26/04/96.

Les travaux sont dévolus par voie d'appel d'offres sur performances à une entreprise principale, spécialisée en traitement des eaux potables. Le marché est notifié le 7 avril 1997. Les travaux de génie civil font l'objet d'un contrat de sous-traitance.

Le traitement des eaux comprend trois niveaux :

- déferrisation-démanganisation par voie biologique à l'intérieur de trois filtres fermés ;
- neutralisation des eaux brutes par injection de soude ;
- désinfection préventive au chlore.

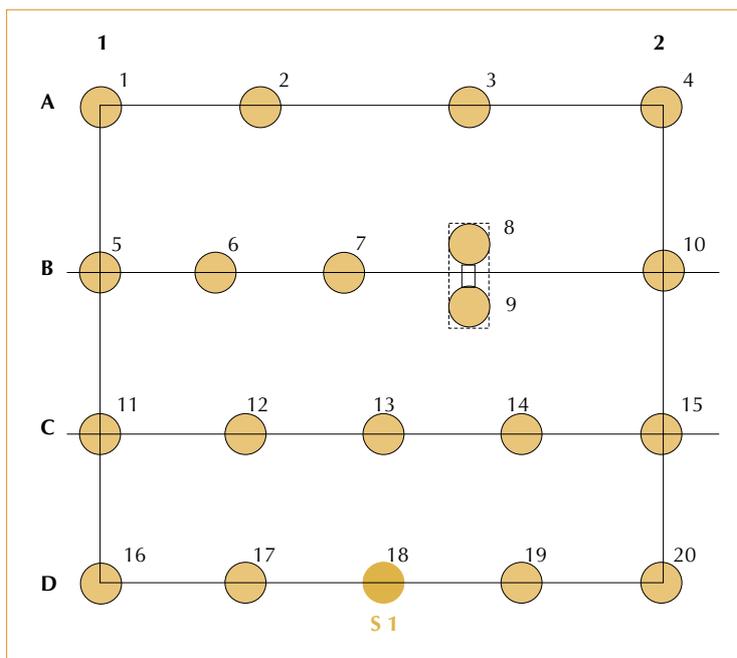
Les eaux traitées sont refoulées sur le réservoir de tête par la station de reprise existante située à proximité de la nouvelle usine.

L'usine de traitement présente une emprise au sol de 13 x 12 m et se compose de deux parties :

- la partie enterrée, réalisée en béton armé et constituée de deux baches accolées. L'une, de 300 m³ de capacité, stocke les eaux brutes à traiter ; l'autre, de 100 m³ de capacité, récupère et permet la décantation des eaux de lavage des filtres avant leur rejet dans le milieu naturel.

- la partie aérienne, réalisée en maçonnerie, est située au-dessus des deux baches précitées et abrite le local de commande, les sanitaires, un local machinerie et la salle des filtres.

L'ordre de service de commencement des travaux est notifié le 6 juin 1997. Après une période de préparation, les travaux commencent le 4 août 1997. L'entreprise principale choisit en accord avec son sous-traitant la technique de fondation



▲ Figure 2 – Plan simplifié d'implantation des CBI du site de Dourd'hal (d'après document FONDASOL, 1997).

sur colonnes ballastées injectées (CBI) décrite dans l'encadré 1 (ci-dessous et p. 16). La réalisation de ces dernières est confiée par l'entreprise de génie civil à une entreprise spécialisée détentrice de la technique des CBI.

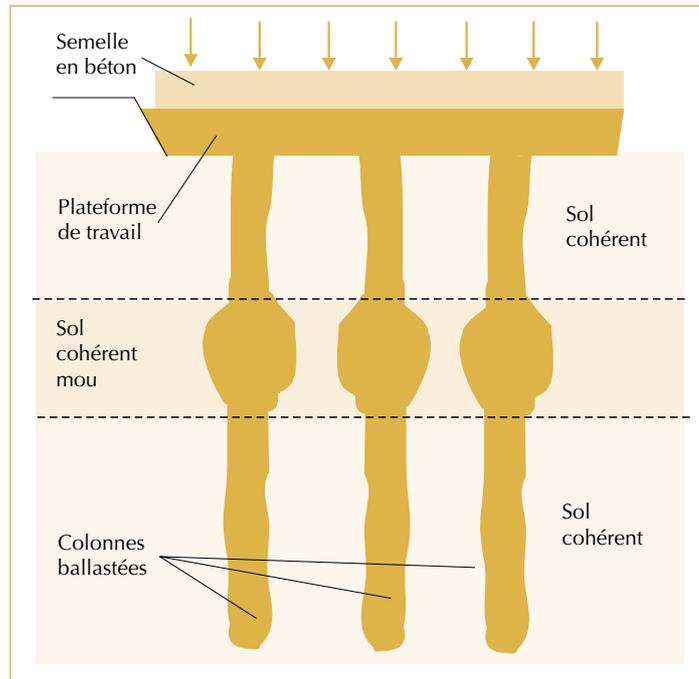
Les colonnes ballastées injectées sont réalisées les 2 et 3 septembre 1997, suivant des mailles de 3 m sur 3 m (figure 2), soit au total vingt colonnes ballastées injectées avec du béton prêt à l'emploi.

Encadré 1

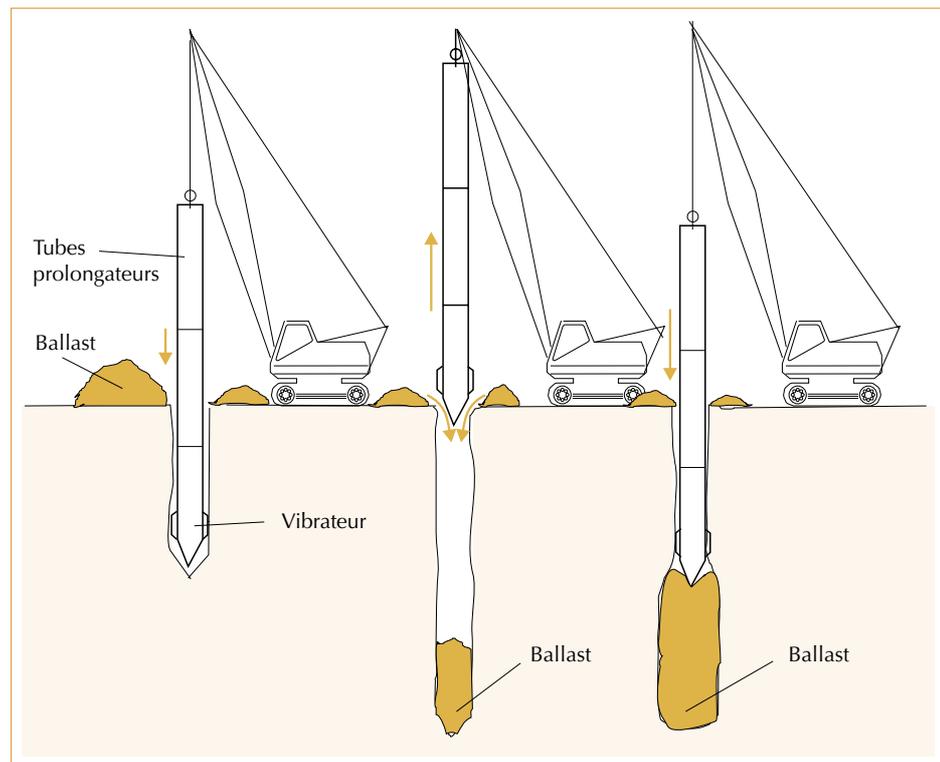
La technique des colonnes ballastées injectées (CBI)

La technique des CBI consiste à réaliser un forage dans le sol à l'aide d'un vibreur (figure a, p. 16). Par l'intermédiaire de deux tubes d'alimentation, une chambre de malaxage solidaire du vibreur est alimentée d'une part par du gravier de granulométrie contrôlée, d'autre part par du coulis de ciment prédosé. En cours de fonçage, les valeurs des paramètres « vitesse d'avancement », « profondeur » et « intensité du courant passant dans le vibreur » sont enregistrées en continu. En fin de fonçage, l'introduction du mélange gravier-coulis en pied de vibreur associée à des mouvements verticaux alternatifs ascendants de celui-ci provoque un refoulement latéral du sol et le bourrage du mélange gravier-coulis dans le forage (figure b, p. 16). L'inclusion rigide ainsi obtenue par refoulement et vibration en place du matériau « gravier-coulis » possède, du fait de l'irrégularité de forme du fût une bonne adhérence (frottement latéral) aux sols traversés et un bon contact avec les sols d'assise en pointe. La pression et le débit du coulis ainsi que la quantité de matériau d'apport sont enregistrés en phase de « bétonnage ». Une variante à ce procédé consiste à injecter un béton prêt à l'emploi en lieu et place du mélange agrégats-coulis de ciment. Le procédé et sa variante ont fait l'objet d'une enquête réalisée par Technique Nouvelle.

Encadré 1 (figures)



▲ Figure a – Principe de consolidation d'un sol par des colonnes ballastées.



▲ Figure b – Principe de réalisation des colonnes balastées.

Outils et méthodes

Les enregistrements prévus par le cahier des charges du procédé sont effectués et remis au maître d'œuvre. La DDAF, en accord avec le syndicat, décide alors de faire exécuter un forage destructif sur une des colonnes afin de vérifier la bonne profondeur d'ancrage des CBI, ainsi que la nature et les caractéristiques mécaniques du sol sous-jacent à la colonne testée. Cet essai, non prévu par le marché, est rémunéré par le maître d'ouvrage.

La colonne la moins profonde (n° 18) d'après les enregistrements réalisés en cours de forage est choisie pour la réalisation de cet essai.

Le forage réalisé le 22 septembre 1997 met en évidence les points suivants :

- le bon niveau d'assise de la colonne et les bonnes caractéristiques mécaniques du sol sous-jacent ;
- une anomalie dans la continuité du béton de la colonne.

À partir de ce constat, la DDAF consulte le Cemagref d'Aix-en-Provence afin d'éclairer les questions suivantes :

- le défaut de continuité affecte-t-il d'autres colonnes ?
- le défaut constaté ne remet-t-il pas en cause le dimensionnement des CBI et celles-ci sont-elles aptes à supporter l'ouvrage ?
- de quelle marge de sécurité dispose-t-on par le dimensionnement des CBI ?
- est-ce qu'une baisse de résistance peut être compensée par une augmentation de diamètre des colonnes ?
- peut-on envisager une réparation de la colonne n° 18 et par quelle technique ?

Les réponses aux questions posées ne pouvant être immédiates, la DDAF décide de suspendre la réalisation des travaux.

L'entreprise responsable de l'exécution des fondations rejette les conclusions du géotechnicien en mettant en cause la nature du contrôle réalisé : elle fait exécuter, à ses frais, le contrôle par une société spécialisée de la continuité des colonnes au moyen d'essais d'impédance, essais qu'elle juge représentatifs de l'état des CBI.

Le procès-verbal de ces essais est remis le 8 octobre 1997 : le contrôleur conclut à l'absence d'anomalie parce que les résultats obtenus (dénommés « raideurs ») sont tous regroupés autour d'une valeur moyenne. Se posent alors les questions de l'étalonnage des essais d'impédance et du domaine de validité de ceux-ci : doit-on conclure que les essais d'impédance ont démontré la continuité des CBI par l'homogénéité des résultats obtenus, ou bien que les colonnes sont effectivement homogènes dans leur médiocrité si l'on se base sur le carottage destructif ?

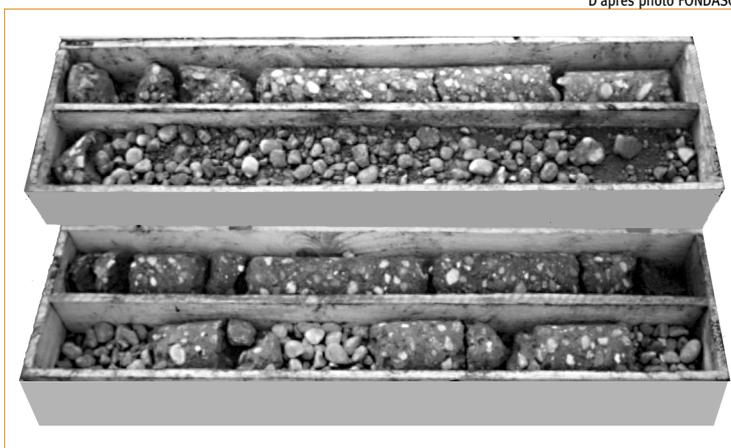
Il est décidé le 24 novembre 1997 de réaliser des essais complémentaires selon un protocole approuvé par l'ensemble des parties prenantes. Des carottages non destructifs, de diamètre 116 mm, doivent être réalisés sur trois CBI : l'une de faible « raideur » (CBI n° 12), une seconde de forte « raideur » (CBI n° 2), la troisième étant celle ayant fait l'objet du premier essai (CBI n° 18).

Les carottages non destructifs sont réalisés le 18 décembre 1997. Ils mettent en évidence (photo 1) un béton désagrégé pour la CBI n° 2, des zones de discontinuités (agrégats et ciment non liés) pour la CBI n° 12. L'essai est annulé pour la CBI n° 18.

La confortation des fondations de l'ouvrage s'impose et différentes techniques de confortement sont proposées et examinées :

- réalisation de micro-pieux en remplacement des CBI : solution jugée trop onéreuse et qui fait abstraction des CBI réalisées ;

D'après photo FONDASOL



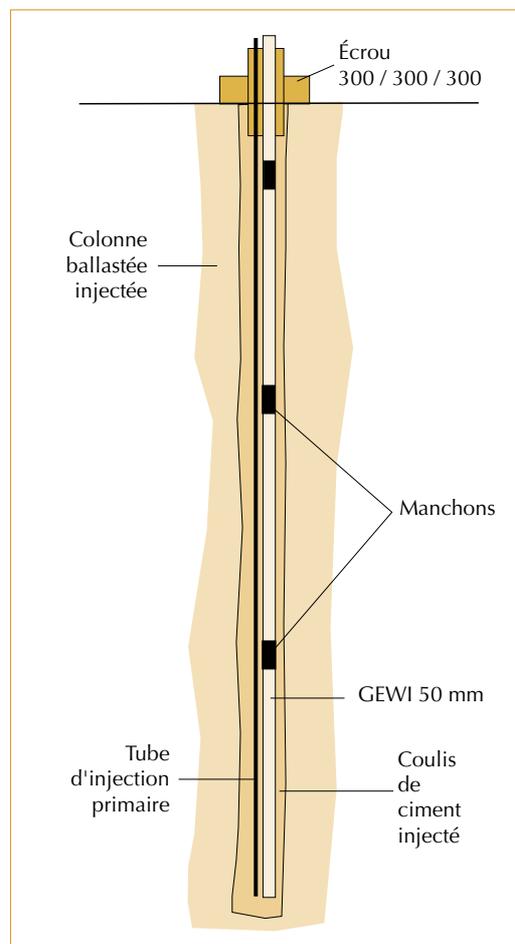
▲ Photo 1 – Anomalies de cohésion observées sur des segments de carottage des CBI n° 2 (en haut) et n° 12 (en bas).

– réaliser deux nouvelles colonnes ballastées de part et d'autre de chaque CBI. Cette proposition est abandonnée car le chantier est devenu depuis inaccessible à l'appareil, à la suite de l'arase du fond de fouille ;

– changer l'implantation de la station de traitement : solution impossible à mettre en œuvre du fait de l'exiguïté du terrain ;

– injecter un coulis de ciment sous-pression au sein des CBI (technique du « jet-grouting ») ;

– mise en place après forage de tiges métalliques le long et au sein des CBI avec injection d'un coulis de ciment. Les tiges sont censées assurer la continuité des colonnes.



► Figure 3 – Vue de principe en coupe d'une réparation de colonne ballastée injectée.

La société responsable de l'exécution des CBI propose le 15 décembre 1997 de renforcer les CBI par mise en place de tiges d'acier et suggère de tester la CBI n° 2 avant renforcement au moyen d'un essai de chargement. Les méthodologies de confortement des CBI (figure 3) et de réalisation de l'essai de chargement sont agréées par le contrôleur technique.

- les CBI sont renforcées en janvier 1998 par mise en place sur toute leur hauteur d'une barre d'acier avec injection d'un coulis de ciment dans l'espace annulaire ;

- l'essai de chargement a lieu le même mois selon le mode opératoire du Laboratoire central des Ponts et Chaussées. La charge est appliquée par un vérin hydraulique ayant une capacité maximale de 1 000 kN sur une plaque de répartition de 96 cm de diamètre coiffant la tête de la colonne ballastée injectée.

Chaque palier de chargement est contrôlé au moyen d'un manomètre à pression d'huile. À l'aide d'une pompe hydraulique reliée directement au manomètre, on assure une charge constante pour chaque palier.

Les tassements sont mesurés par des indicateurs de précision (au 100^e de millimètre) sur des poutres de référence indépendantes. Pour chaque palier de chargement, les pressions et les tassements donnés par les comparateurs sont inscrits sur une feuille d'essai de charges.

Le DTU prévoit un essai de chargement à 1,5 fois la charge nominale sur une colonne ballastée injectée, soit une charge d'environ 100 tonnes dans le cas présent.

Les étapes de chargement prévues sont résumées dans le tableau 1.

Cet essai ne peut être mené à terme du fait de la rupture en cours d'essai du dispositif mis en place. Le tassement cumulé observé est de 2,8 mm à l'ELS. Le contrôleur technique estime, au vu des résultats obtenus, le tassement absolu à 1 cm.

Étape de chargement	Charge appliquée T	Pression d'huile du manomètre (bars)	Durée
25 %	16,3	68,8	15 à 30 mm
50 %	32,5	137,5	1 h
75 %	48,8	206,3	1 h
100 %	65,0	275,-	3 h
125 %	81,3	343,8	1 h
150 %	97,5	412,5	1 h

▲ Tableau 1 – Les étapes de chargement prévues.

La question de la prise en compte de tassements différentiels se pose alors : il n'est pas certain que l'affaissement des colonnes soit identique sous l'effet des charges rapportées. Le contrôleur technique demande que la structure de l'ouvrage soit recalculée de façon à pouvoir encaisser un tassement différentiel de l'ordre du centimètre entre deux colonnes distantes de 3 à 4 mètres environ. Ainsi, une nouvelle note de calculs est produite et de nouveaux plans de coffrage et de béton armé sont élaborés.

La DDAF notifie à l'entreprise principale l'ordre de service de reprendre les travaux le 15 juin 1998 ; le chantier redémarre le 3 août 1998 ; le constat d'achèvement de la construction est réalisé le 30 avril 1999 (photo 2).

Photo DDAF de la Moselle



▲ Photo 2 – La station de traitement des eaux potables de Dourd'hal en mai 2000.

Conséquences

Les travaux complémentaires de renforcement des fondations et de la structure de l'ouvrage sont pris en charge intégralement par les entreprises. Le coût des essais complémentaires, payés par le maître d'ouvrage, est déduit des sommes dues aux entreprises par application du CCAP du marché. Il n'est pas fait application des pénalités de retard du fait de la complexité de l'affaire.

En 1998, une série de recours en cascade est engagée par les entreprises devant les tribunaux : le fournisseur de béton contre l'entreprise responsable de la réalisation des CBI pour raison d'impayé, l'entreprise responsable des CBI contre l'entreprise de génie civil, l'entreprise de génie civil, sous-traitante, contre l'entreprise principale. L'entreprise principale attaque alors en référé le maître d'ouvrage, la DDAF en tant que maître d'œuvre, le géotechnicien et le contrô-

leur technique : il leur est reproché d'avoir causé un préjudice financier aux entreprises concernées par des décisions tardives ayant entraîné un arrêt de chantier de presque un an ; l'entreprise responsable des fondations cherche en outre à se faire rembourser les frais engagés pour le renforcement des CBI. Le rapport de l'expert désigné par le tribunal administratif de Strasbourg met finalement hors de cause le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage qui « ont agi dans l'intérêt de la collectivité et ont fait preuve de compréhension ». Il est reproché au géotechnicien un commentaire superflu qui a alarmé inutilement les autres intervenants.

Le contrôleur technique et la société responsable de la réalisation des CBI sont par contre mis en cause :

- le contrôleur technique pour avoir tardé dans ses prises de décision, pour avoir posé des questions auxquelles il ne peut pas y avoir de réponse, pour avoir proposé des moyens de contrôle inadaptés, pour ne pas avoir défini de méthodologie de contrôle des fondations avant le démarrage du chantier et enfin pour avoir demandé des confortements de la structure jugés superflus par l'expert ;
- l'entreprise responsable des fondations pour ne pas pouvoir apporter la preuve de la bonne exécution des CBI alors qu'elle est détentrice de la technique utilisée qu'elle a, elle-même, mise au point. Par ailleurs, s'étant engagée en cours de chantier à prendre à sa charge les frais de renforcement des CBI, elle ne peut valablement demander à en être remboursée après coup.

Conclusion

À la date de préparation de cette publication, le tribunal administratif n'a pas rendu son jugement sur le dossier de la station de traitement de Dourd'hal. Au-delà des conclusions de l'expert, cette affaire rappelle la nécessité de conduire des études préalables avant toute construction, et en particulier, de réaliser des études géotechniques. Le cas qui vient d'être présenté, interpelle également sur un certain nombre de points :

- les discordances apparues sur ce chantier entre les contrôles non destructifs (essais d'impédance) et les contrôles destructifs (carottage) conduisent à s'interroger aujourd'hui sur la validité d'une procédure de contrôle réalisée uniquement avec des essais d'impédance. La mise au point d'une norme validée sur le contrôle des colon-

nes ballastées injectées apparaît en conséquence nécessaire ou souhaitable pour prévenir des litiges dans des cas similaires.

– les interrogations soulevées par le « délavage » du béton conduisent à examiner l'intérêt et la nécessité d'études complémentaires (exemple : hydrodynamique des sols dans ce cas) à produire en fonction de la technique de fondations retenue (colonnes ballastées sèches, colonnes ballastées injectées, pieux, substitution...) afin de s'assurer de la compatibilité des tassements absolus et différentiels probables, avec la conception et les hypothèses choisies pour l'ouvrage.

Il apparaît en outre indispensable de définir au moment de l'élaboration des cahiers des charges, avec l'aide du contrôleur technique, les essais successifs à réaliser, selon les séquences suivantes :

– avant réalisation des fondations : vérification des hypothèses du géotechnicien ;

– en cours de chantier : essais de fondations entre autres ;

– en fin de chantier : vérification des étanchéités par exemple, et ce d'autant plus que la construction aura peut-être évolué entre l'étude d'avant-projet ou de projet et le moment de sa réalisation.

La prise en charge financière de essais doit être notifiée de manière parfaitement claire dans la rédaction des pièces contractuelles, en privilégiant les contrôles externes à l'entreprise, tout en gardant à l'esprit la nécessité d'une bonne coordination travaux-essais. Le financement et la conduite des travaux compensatoires doivent être également précisés autant que faire se peut en cas d'essais non concluants. Le maître d'ouvrage doit en outre pouvoir conserver la possibilité de faire réaliser des essais complémentaires, non prévus, en cas de doute sur la bonne réalisation de l'ouvrage ; leur prise en charge financière doit être également précisée.

Enfin, dans le domaine de l'ingénierie, l'accroissement des contentieux apparaît inévitable en raison du nombre croissant d'intervenants, les-

quels doivent appréhender des tâches et des modes relationnels de plus en plus complexes. Par ailleurs, on ne peut exclure que dans certaines situations ce type de difficultés soit pour certains l'occasion de dégager des profits à moindre frais. Ces aspects ne doivent donc pas être minimisés et les différents acteurs de l'ingénierie doivent apprendre à les prévenir (d'où l'importance des démarches « qualité »), à y faire face et doivent pouvoir trouver l'aide et les conseils juridiques nécessaires.

Au-delà du cas qui vient d'être exposé, les ouvrages de station de traitement des eaux posent un certain nombre de problématiques de réalisation dont les causes résumées ci-après rappellent tout l'intérêt d'études géotechniques préalables de qualité :

1. La maîtrise foncière et/ou la réserve foncière, mais aussi l'environnement local ne permettent pas souvent de construire une nouvelle STEP.

2. Les fondations d'ouvrages de stations d'épuration sont souvent en milieu difficile, du fait de leur localisation qui doit être définie par rapport à la collecte des eaux...

3. Lorsque la solution de réhabiliter une ancienne station est envisagée, l'étude géotechnique peut mettre en lumière les insuffisances ou carences des assises d'ouvrages et des fondations à conserver.

4. Dans certains cas, l'ancienneté et la vétusté des installations existantes y compris des fondations et des structures de génie civil, ne permettent pas, après étude, d'envisager leur rénovation partielle ou totale.

5. Le choix d'une nouvelle localisation peut résulter de considérations foncières mais aussi de considérations pratiques telles que : eau, proximité du réseau électrique, possibilité de raccordement d'une commune, extension du réseau...

6. La préoccupation des gestionnaires et des collectivités est de prévoir la pérennité des installations et permettre l'évolution éventuelle des ouvrages et équipements constitutifs des stations de traitement et d'épuration. □

Résumé

L'article souligne l'importance et l'intérêt d'études géotechniques de qualité préalables à la construction de traitement d'eau potable, la nature des terrains rencontrés, le choix des fondations spéciales par colonnes ballastées injectées, les sondages, essais et contrôles réalisés sur ces fondations. Nous décrivons les anomalies et pathologies constatées, les questions posées, les essais complémentaires d'investigations réalisés, les solutions de confortement envisagées et le mode de réparation adopté. Les conséquences engendrées par ces anomalies sont abordées, ainsi que les problématiques de réalisation d'ouvrages de station de traitement des eaux.

Abstract

This article underlines the importance and the interest of high quality geotechnical studies prior to drinkable water treatment station, the ground foundation nature, the special deep-grouted foundations choice, consisting in injected ballasted columns, the soundings, controls and tests realised on these foundations.

We describe the recorded anomalies and pathologies, the arisen questions, investigation complementary tests, the projected reinforcement solutions and the planned mode of repair. The consequences due to these anomalies are approached as well as engineering works of drinkable water treatment station problematics.

Bibliographie

Cahiers des clauses techniques générales applicables aux marchés publics des travaux

Fascicule 62 – Titre 5 « Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil » ;

Fascicule 68 – Exécution des travaux de fondation des ouvrages de génie civil ;

Fascicule 62 – Règles techniques de conception de technique des ouvrages de génie civil

* Titre 1 : constructions en béton armé (règles BAEL)

* Titre 2 : constructions en béton précontraint (règles BPEL).

Fascicule 74 – Construction de réservoirs en béton.

Fascicule 65a – Exécution des ouvrages en béton armé ou béton précontraint par post-tension, plus additif au fascicule 65a.

Fascicule 65b – Exécution des ouvrages de génie civil de faible importance en béton armé.

Fascicule 70 – Canalisations d'assainissement et ouvrages annexes.

Norme relative à la classification des missions géotechniques

NF P 94-500 – Classification des missions géotechniques types

Normes relatives au sol, reconnaissances et essais

Série XP P 94-0XX – Sols : reconnaissances et essais

Série NF P 94-0XX – Sols : reconnaissances et essais

Série XP P 94-1XX – Sols : reconnaissances et essais

Série NP P 94-1XX – Sols : reconnaissances et essais