

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SOLS ET FONDATIONS. 3^e LIGNE DU METRO DE TOULOUSE : ESSAIS DE CHARGEMENT STATIQUE DE PIEUX. DEVIATION DE JARGEAU (45). QUAI JOANNES COUVERT AU HAVRE. LE PARK HOTEL A NICE. STEP DES TROIS RIVIERES A CLERMONT-FERRAND. BIOMINERALISATION POUR SECURISER UN PONT A ORLEANS. REAMENAGEMENT DU RONDEAU A GRENOBLE. LIGNE 14 SUD : EXCAVATION AU TUNNELIER SOUS LES CARRIERES DE PARIS. REMONTEE DE FONTIS AU-DESSUS DES CAVITES SOUTERRAINES

N°982 NOVEMBRE 2022



STEP DES
TROIS RIVIERES
A CLERMONT-
FERRAND
© NGE

LES TRAVAUX
PUBLICS
FÉDÉRATION

STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND - UN CHANTIER DE FONDATIONS SPÉCIALES MULTI-TECHNIQUES EN CONCEPTION-RÉALISATION

AUTEURS : ROBIN PRUNEL, DIRECTEUR D'AGENCE, NGE FONDATIONS - RÉMI CHABANE, INGÉNIEUR D'AFFAIRES, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, RESPONSABLE D'EXPLOITATION, NGE FONDATIONS

LE PROJET DE MODERNISATION ET D'EXTENSION DE LA STEP DES TROIS RIVIÈRES À CLERMONT-FERRAND S'INSCRIT DANS UNE DÉMARCHÉ DE RÉDUCTION DES REJETS DANS LE MILIEU NATUREL TOUT EN PRODUISANT DU BIOGAZ. LE MARCHÉ COMPREND LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DE NOMBREUX OUVRAGES, IMPLANTÉS SUR LE SITE ACTUEL EN EXPLOITATION. NGE FONDATIONS INTERVIENT POUR LA RÉALISATION DE L'ENSEMBLE DES FONDATIONS SPÉCIALES DU PROJET, NÉCESSITANT LA MISE EN ŒUVRE DE MULTIPLES TECHNIQUES : PAROIS MOULÉES, POTEAUX PRÉFONDES, BUTONNAGES, PIEUX DE FONDATION ET MICROPIEUX D'ANCRAGE DE RADIER.

PRÉSENTATION DU PROJET

La station d'épuration des Trois Rivières, d'une capacité de 425 000 équivalents habitants, traite les eaux usées de la Métropole de Clermont-Ferrand ainsi qu'une partie des eaux pluviales mélangées aux eaux usées dans les réseaux unitaires, afin de rejeter dans le milieu naturel une eau de qualité conforme aux normes européennes.

Dans le cadre du schéma directeur d'assainissement, un marché de conception-réalisation pour la modernisation et l'extension de cette station (figure 3) a été attribué par Clermont Auvergne Métropole à un groupement d'entreprises composé de Suez-Dégrémont (mandataire), Nge GC, Chm Architectes, Scate Automation et Safège Ingénieurs Conseils.

Ce projet qui favorise la transition écologique et la valorisation énergétique, prévoit de diminuer de moitié les rejets d'eaux dans le milieu naturel lors d'événements pluvieux, tout en intégrant la transformation des boues de la station en gaz naturel. Il consiste en la réalisation de nombreux ouvrages neufs ou rénovés qui sont implantés sur le site actuel de la station en continuité d'exploitation.

Les principaux ouvrages à construire impliquant des travaux de fondations spéciales dans le cadre du projet sont les suivants :

→ Un bassin enterré circulaire de stockage-restitution (BSR) de 21 000 m³ ;



1- Atelier de forage des micropieux au fond du bassin de stockage-restitution.

2- Vue aérienne du bassin de stockage-restitution en phase fond de fouille.

1- Micropile drilling rig at the bottom of the storage-release tank.

2- Aerial view of the storage-release tank in the bottom of excavation phase.

→ Un ouvrage enterré rectangulaire de dégrillage implanté à proximité du bassin ;

→ Divers ouvrages neufs en superstructure fondés profondément sur pieux, pour le traitement de l'eau et la valorisation énergétique des boues par la production de méthane (digesteurs, gazomètre, dégrillage, désodorisation, Sédipac, bâtiment d'exploitation, ...).

Le bassin enterré concentre la majorité du volume des travaux et des problématiques géotechniques du projet. Il nécessite la réalisation d'un ouvrage de soutènement étanche définitif en paroi moulée circulaire autostable forcée à la benne sur une grande profondeur

dans le substratum marnieux, associé à des techniques de fondations profondes à l'intérieur de cette structure pour la confection des poteaux profonds de grande hauteur de type pieux forés au Kelly, ainsi que pour les ancrages du radier de type micropieux réalisés en fond de bassin.

L'ouvrage annexe de dégrillage est également réalisé à l'abri d'un soutènement étanche définitif en paroi moulée forcée à la benne, avec une profondeur terrassée plus modeste dans la hauteur des terrains alluvionnaires de couverture. La configuration géométrique en paroi plane impose toutefois la mise en œuvre d'un niveau d'appui provisoire constitué de butons métalliques pour permettre les terrassements jusqu'au fond de fouille, avant le coulage des structures intérieures horizontales.

Les autres ouvrages neufs concernent des structures superficielles en béton armé, sans partie enterrée sous le niveau de la nappe, qui nécessitent la mise en œuvre d'un grand nombre de fondations profondes de type pieux forés à la tarière creuse ancrés dans le toit du substratum marnieux.

L'intégralité de ces travaux de fondations spéciales est réalisée par Nge Fondations. On propose dans cet article de présenter la diversité des méthodes déployées sur ce chantier, dont les choix ont été orientés par les options techniques qui ont été retenues par le groupement dans le cadre de son marché de conception-réalisation. ▶



3 © AXESSDRONE

L'ORGANISATION DES ÉTUDES

Les études de conception puis d'exécution des différents ouvrages du projet se sont déroulées sur près de 18 mois à partir du lancement de l'opération à l'été 2020.

Ces études sont réparties entre plusieurs intervenants sous le pilotage de Safège, maîtrise d'œuvre intégrée au groupement : Itc réalise les études de structure comprenant la modélisation globale des ouvrages, Sol Solution (partenaire du groupement pour les missions G2 et G3) réalise les études géotechniques, le bureau d'études interne de la Direction Technique Nge Fondations réalise l'intégralité des études et des plans d'exécution des soutènements définitifs en parois moulées, des poteaux profonds du bassin ainsi que des fondations profondes des différents ouvrages.

L'ensemble des ouvrages fait l'objet d'une modélisation 3D globale sur maquette numérique en coordination avec les différents intervenants, afin de permettre l'intégration du concepteur, du réalisateur et de l'exploitant-mainteneur dès le démarrage de la phase d'études. Ce projet d'intégration de la maquette numérique pour un ouvrage de traitement de l'eau et de valorisation constitue une innovation, récompensée lors de la cérémonie des BIM d'or 2021 (figure 4).

La phase de conception a permis au groupement d'affiner les hypothèses de calcul et de valider les principes constructifs qui avaient été retenus au stade de l'appel d'offres, en intégrant notamment la mise à jour des modèles géotechniques au droit de chaque ouvrage, la prise en compte de la problématique spécifique du gonflement des marnes pour les dispositions constructives à l'interface radier/micropieux du BSR, ainsi que la gestion des interactions sol-structure pour les pieux

3- Vue aérienne d'ensemble du projet.

4- Maquette numérique du projet.

3- General aerial view of the project.

4- Digital mock-up of the project.



4 © NGE

des différents bâtiments sous sollicitations statiques et sismiques.

Le BSR a par ailleurs fait l'objet d'une modélisation globale complexe et itérative avec prise en compte des raideurs verticales de l'ensemble des éléments de fondations (paroi moulée, micropieux, poteaux profonds), afin d'appréhender la juste distribution des efforts de compression et de traction dans chacun des ouvrages, sous les différentes configurations de chargement du projet.

LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site de la STEP présente une altimétrie globalement plane et constante sur l'ensemble du projet, avec une succession lithologique relativement homogène. On relève la présence d'un horizon superficiel alluvionnaire constitué de matériaux argilo-marneux et argilo-sableux surmonté par une couche de remblais d'aménagement du site, puis la présence du substratum marneux compact de l'Oligocène, rencontré à faible profondeur entre 5 m et 10 m sous le niveau du terrain actuel.

Le substratum marneux (figure 5) présente des caractéristiques mécaniques très élevées ($PI^* > 5$ MPa et $E_m > 100$ MPa), une faible perméabilité de l'ordre de 2.10^{-6} m/s, ainsi qu'un risque potentiel de gonflement.

Le site est classé en zone 3 (aléa modéré) vis-à-vis du risque sismique. Du point de vue hydrogéologique, les sondages et suivis piézométriques réalisés confirment la présence d'une nappe à environ 2 m de profondeur sous le niveau du terrain actuel.

LE BASSIN ENTERRÉ : UNE CONCEPTION GLOBALE OPTIMISÉE

LA PAROI MOULÉE

Le bassin de stockage-restitution de capacité 21 000 m³ est un ouvrage enterré circulaire de diamètre intérieur 45 m, avec une profondeur excavée variable entre 18,50 m (au droit du radier de la zone centrale) et 21,50 m (aprofondissement au droit de la



5 © NGE

5- Substratum marneux en cours de terrassement.

6- Ateliers de forage multi-techniques au droit du bassin de stockage-restitution.

5- Marly substratum during earthworks.

6- Multi-technique drilling rigs near the storage-release tank.

cunette périphérique et de la fosse).

Le soutènement périphérique étanche est constitué d'une enceinte en paroi moulée définitive d'épaisseur 62 cm et de longueur forée maximale 25,80 m, dont le comportement est assimilé à un anneau autostable, bénéficiant d'une rigidité cylindrique sur toute sa hauteur. Le calepinage du bassin, associé au petit ouvrage rectangulaire adossé en excroissance dit "pot de purge", est constitué d'un total de 25 panneaux de longueur unitaire courante 6,62 m et équipés chacun de 3 cages d'armatures sur toute leur hauteur.

Pour chaque phase de calcul, la vérification structurelle de la contrainte maximale de compression dans la

section de béton est vérifiée en consi-

dérant l'épaisseur réduite de l'anneau inscrit de la paroi moulée, qui tient compte de la géométrie "en facettes" de ce type de soutènement, ainsi que des tolérances d'implantation (1 cm) et de verticalité du forage (0,5 cm/m) imposées dans le cadre du cahier des charges du projet. La paroi moulée est profondément ancrée dans le substratum marneux compact et semi-imperméable, avec une fiche mécanique minimum de 4,25 m sous le niveau du fond de fouille, permettant de justifier les différents critères de dimensionnement géotechniques usuels pour ce type d'ouvrage (butée, renard solide, boulangé et portance), tout en vérifiant un débit d'exhaure théorique inférieur à 20 m³/h, estimé selon la méthode de Davidenkoff pour la phase provisoire de mise à sec de l'enceinte étanche en phase de travaux.

Le forage de la paroi moulée a nécessité une très forte mobilisation de moyens matériels (figures 6 et 7) avec 2 ateliers de production en continu sur une durée de 12 semaines (1 atelier avec benne à câbles et 1 atelier avec benne hydraulique), constitués pour chacun d'un porteur principal équipé de son outil de forage, ainsi que d'un engin de manutention de forte capacité de type grue à flèche treillis sur chenilles pour l'équipement des panneaux, avec la mise en œuvre sur toute la hauteur forée des porte-joints waterstop, des cages d'armatures et des colonnes de bétonnage.

L'ouvrage annexe de dégrillage (figure 8), qui présente une géométrie en "L" de dimensions 9 m x 40 m, a été réalisé dans la continuité des travaux du BSR implanté à proximité immédiate, avec la mobilisation des mêmes moyens humains et matériels.

La conception du soutènement en paroi moulée définitive, pour cet ouvrage courant faiblement enterré sous nappe, a été retenue dans une logique d'harmonisation des modes constructifs, de mutualisation des installations présentes sur site et d'optimisation du planning de réalisation des structures de génie civil verticales.

Le forage est exécuté à la benne en épaisseur 52 cm avec une longueur forée maximale de 12,00 m et un ancrage dans le toit du substratum marneux. La profondeur terrassée est comprise entre 6,00 m et 8,50 m et concerne uniquement la hauteur des terrains alluvionnaires de couverture. La phase de terrassement au fond de fouille nécessite la mise en œuvre d'un lit de butons métalliques provisoires, ▷



6 © NGE

dont la dépose est programmée juste après le coulage du radier, afin de permettre la réalisation sans encombrement des structures intérieures en élévations.

LES POTEAUX PRÉFONDÉS

La dalle supérieure du bassin est portée par 22 poteaux intérieurs circulaires de grande hauteur en béton armé, qui permettent de reporter les charges verticales appliquées en surface de l'ouvrage jusqu'au substratum marneux sous le radier. Dès la phase d'appel d'offres, le groupement a mené une réflexion de conception générale pour trouver une solution technique alternative à la tâche de coffrage et de coulage traditionnel en place de ces poteaux, initialement prévue à la remontée depuis le fond de fouille du bassin et qui se situe sur le chemin critique du planning d'exécution. Il a ainsi été envisagé de réaliser des poteaux de type préfondés, exécutés de façon anticipée depuis la plateforme de travail haute par la technique de pieux forés au Kelly sous boue bentonitique, afin de bénéficier de la mutualisation des installations de centrale à boue déjà prévues pour la réalisation de la paroi moulée.

Les pieux sont forés en diamètre 1 000 mm sur une longueur totale de 23,40 m, avec un ancrage minimal de 5,00 m sous le fond de fouille dans le substratum marneux compact. Un tubage métallique provisoire est mis en œuvre en tête de forage, sur la hauteur des horizons superficiels alluvionnaires potentiellement instables. Les pieux sont équipés d'une cage d'armatures sur toute leur hauteur, dimensionnée par le BET Structure dans une configuration de poteau vertical vérifié au flambement, avec prise en compte d'un excentrement de la charge axiale du fait des tolérances d'exécution spécifiquement liées au mode de réalisation en pieux forés. Des scellements sont ensuite réalisés en pied de poteaux lors de la phase de terrassements au fond de fouille pour permettre la connexion avec le radier (figure 9).

Ce choix technique de pieux-poteaux préfondés présente une optimisation significative pour le phasage général du BSR et la sécurisation des délais, puisqu'il intègre la confection de l'intégralité des poteaux intérieurs en temps masqué du forage du soutènement périphérique, tout en permettant une anticipation des travaux de Génie Civil de pourtrains en tête de l'ouvrage avant le démarrage des terrassements.



Il offre également la possibilité de débiter la réalisation de la dalle supérieure sans impact sur le chemin critique du planning, pendant le forage des micropieux en fond de bassin.

LES MICROPIEUX

Le radier du BSR est partiellement fondé sur un réseau de 265 micropieux, qui s'inscrit en complément des appuis rigides verticaux porteurs en béton armé déjà constitués par la paroi moulée périphérique et les 22 pieux des poteaux préfondés.

7- Atelier de forage de la paroi moulée type benne à câbles.

8- Ouvrage de dégrillage avec butons provisoires.

7- Diaphragm wall drilling rig of the cable grab type.

8- Screen cleaning structure with temporary struts.

Les micropieux sont de type III avec un maillage général homogène de 2,00 m x 2,00 m, un diamètre de forage de 200 mm et une longueur de 19,50 m. Ils sont forés à l'air avec un outil trilame et sont ancrés sur toute leur longueur dans le substratum marneux compact. Les micropieux sont réalisés depuis le fond du bassin, nécessitant le grutage des 2 ateliers de forage de 15 t équipés chacun d'un barillet (figure 1).

Afin de s'affranchir des effets du gonflement des marnes, qui constitue un cas de charge de soulèvement très péna-



9- Pieux-poteaux préfondés.

10- Atelier de forage des pieux de fondation à la tarière creuse.

9- Plunge column piles.

10- Hollow flight auger foundation pile drilling rig.

lisant pour le dimensionnement des micropieux et du radier, le groupement a retenu une solution technique alternative avec la création d'une couche fusible de polystyrène en sous-face du radier, mise en œuvre après la réalisation des micropieux et avant le coulage du béton de propreté. Le radier présente ainsi un fonctionnement mécanique en dalle portée, sans prise en compte de la raideur verticale du sol d'assise. Les micropieux sont donc sollicités à la fois par des charges de traction (configuration bassin vide) et de compression

(configuration bassin plein), avec des ordres de grandeur respectifs globalement équivalents, compris entre +/- 40 à 90 t à l'ELS selon la localisation et les combinaisons de charges.

Les pieux-poteaux, qui constituent des points d'appui très raides dans la modélisation globale du BSR, du fait d'un contraste de raideur élevé apporté par l'effet de pointe, concentrent quant à eux des charges de compression portées jusqu'à 400 t à l'ELS, tandis que leurs charges de traction restent sensiblement équivalentes à celles

des micropieux avec une sollicitation moyenne de 50 t.

LES PIEUX DE FONDATION

En parallèle des travaux multi-techniques du BSR et de l'ouvrage de dégrillage, une équipe a été mobilisée en continu avec un atelier de forage à la tarière creuse (figure 10) pour la réalisation de l'ensemble des 321 pieux de fondation du projet, répartis sur 11 ouvrages. Ces fondations courantes de diamètre 42 cm à 62 cm et de longueur variable jusqu'à 13 m maximum,

avec mise en œuvre de cages d'armatures, sont systématiquement ancrées dans le toit du substratum marneux. Les études d'exécution ont nécessité l'intégration de problématiques spécifiques liées au contexte sismique, avec application des préconisations du Cahier Technique 38 de l'Afips : modélisations globales itératives des raideurs de pieux en interaction avec le BET Structure et prise en compte ponctuelle du phénomène de liquéfaction des sols ainsi que des efforts de frottement négatif associés. □

PRINCIPALES QUANTITÉS

PAROIS MOULÉES :

255 m - 4 670 m² - Longueur max 25,80 m

PIEUX FORÉS-BOUE - POTEAUX PRÉFONDÉS :

22 unités Ø 1 000 mm - Longueur 23,40 m

MICROPIEUX - ANCRAGE RADIER :

265 unités Ø 200 mm - Longueur 19,50 m

PIEUX TARIÈRE CREUSE - FONDATIONS :

321 unités Ø 420 à 620 mm - Longueur max 13 m

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Clermont Auvergne Métropole
ASSISTANT À MAÎTRISE D'OUVRAGE : Cabinet Merlin / Artelia
CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Qualiconsult
GÉOTECHNICIEN PHASE G4 : Hydrogéotechnique
GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Suez-Degrémont (mandataire) - Nge GC - Chm Architectes - Scate Automation
MAÎTRISE D'ŒUVRE GROUPEMENT : Safège Ingénieurs Conseils
BET STRUCTURE GROUPEMENT : Itc
GÉOTECHNICIEN GROUPEMENT : Sol Solution

ABSTRACT

TROIS RIVIERES SEWAGE TREATMENT PLANT IN CLERMONT-FERRAND - A MULTI-TECHNIQUE SPECIAL FOUNDATIONS DESIGN AND BUILD PROJECT

ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - REMI CHABANE, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, NGE FONDATIONS

The project for modernisation and extension of the Trois Rivières sewage treatment plant in Clermont-Ferrand forms part of an overall approach to reducing discharges into the natural environment while ensuring the production of biogas. This Design and Build project enabled the NGE Foundations teams to deploy multiple techniques for execution of all the project's special foundations, on the various structures to be built on the premises of the current site in operation (diaphragm walls, slurry bored piles, continuous flight auger piles and micropiles). At peak production, up to 30 personnel and 5 drilling rigs were operating simultaneously on the site. The foundation works took place over a period of one year between November 2021 and November 2022. □

PTAR DE TROIS RIVIERES EN CLERMONT-FERRAND - UNA OBRA DE CIMENTACIÓN ESPECIAL MULTI-TÉCNICAS EN DISEÑO-REALIZACIÓN

ROBIN PRUNEL, NGE FONDATIONS - REMI CHABANE, NGE FONDATIONS - JOAO NUNES, NGE FONDATIONS

El proyecto de modernización y ampliación de la planta depuradora de Trois Rivières, en Clermont-Ferrand (Francia), se inscribe en una política global de reducción de los residuos en el medio natural, produciendo a mismo tiempo biogás. Esta obra de diseño-realización ha permitido a los equipos de Nge Foundations desplegar múltiples técnicas para la realización de la totalidad de los cimientos especiales del proyecto en las distintas construcciones previstas en la superficie del emplazamiento actual en explotación (pantallas de hormigón, pilotes perforados en lodo, pilotes de barrena continua y micropilotes). En el pico de producción, han intervenido simultáneamente en la obra hasta 30 personas y 5 unidades de perforación. Las obras de cimentación se han desarrollado a lo largo de un año, entre noviembre de 2021 y noviembre 2022. □