La Tour Hekla s’enracine profondément dans le sous-sol de la Défense

Avril 2023

Grâce à un système complexe de fondations, constitué d’une large paroi moulée tirantée et de pieux en béton armé s’enfonçant profondément dans le sol, la majestueuse tour Hekla et ses 220 mètres de hauteur peut s’ériger fièrement, et en toute quiétude, dans le ciel du quartier d’affaires de la Défense. Explications.

Le chantier de réalisation des fondations de la tour Hekla était soumis à d’importantes contraintes, liées à la configuration particulière de la Défense. La parcelle sur laquelle est réalisé le projet, dans le quartier de la Rose de Cherbourg, présente une superficie de 2500 m2 – soit à peine davantage que celle de la tour – délimitée par trois axes routiers importants : le boulevard circulaire, l’avenue du Général de Gaulle et la route de Demi-Lune. Sur cette emprise contrainte, les circuits logistiques et les phasages de chantier devaient être mûrement préparés et conçus en amont, aucun stock ne pouvant être établi sur place.

À la Défense (92), les tours se suivent mais ne se ressemblent pas ! Point culminant du premier quartier d’affaires européen, la tour Hekla et ses 220 mètres de haut, inaugurée en décembre 2022, tutoie le ciel : ses 48 étages déploient une surface de bureaux de 76 000 m^2 et peuvent accueillir 5 800 personnes. Pour assurer sa stabilité, ce géant de béton et de verre, conçu par le célèbre architecte Jean Nouvel, s’enracine profondément dans le sous-sol de la Défense.

Du fait de l’exiguïté de la parcelle, la totalité des installations nécessaires au traitement, au recyclage et au stockage de la boue bentonitique ont été implantées en surélévation de l’emprise. C’est une paroi berlinoise qui assure la stabilité du dispositif.

Le site présentait initialement un dénivelé important, peu propice à la mise en œuvre de travaux de fondations... D’importants travaux initiaux de terrassement ont permis de créer deux plateformes de travail horizontales, reliés par des rampes d’accès.

Une paroi moulée comme fondation et soutènement

Ses fondations sont en effet à la mesure de son gigantisme. Celles-ci sont de deux types. Une paroi moulée en béton armé d’une part. Ancrée dans le substratum rocheux à 32 mètres de profondeur, elle forme un polygone dont les côtés suivent les contours de la tour. « *Cette paroi moulée possède une double fonction*, expose Arnaud Lelimousin, ingénieur projet, responsable du chantier pour Soletanche Bachy France, en charge de la réalisation des fondations de la tour. *Elle reprend d’une part les descentes de charges des poteaux périphériques de la tour et, d’autre part, elle constitue le soutènement nécessaire à la réalisation des six niveaux de sous-sol, à usage de parkings et de locaux techniques.* » D’autre part, cette fondation profonde est complétée d’un ensemble de 131 pieux en béton de 23 mètres de longueur, réalisés depuis le fond de la fouille, et destinés à supporter les charges des structures intérieures de la tour.

Vue d’une benne preneuse hydraulique. Cette machine était utilisée pour l’excavation des sols meubles. Pour les sols plus durs, elle était remplacée par une hydrofraise, une haveuse de paroi mise au point par Solétanche-Bachy.

Du coulis de ciment pour « étanchéifier » le sol

Avant de pouvoir démarrer la construction de ce système de fondations complexe, les équipes de Soletanche Bachy ont procédé à une phase de travaux préparatoires. Celle-ci consistait à déconstruire les ouvrages existants sur l’emprise – une partie d’échangeur routier et une rampe d’accès au boulevard circulaire. Dans le même temps, l’entreprise a procédé au prétraitement du sol. « *Par l’intermédiaire de 120 forages de 30 mètres de profondeur, nous avons injecté du coulis de ciment dans le sol, sur le tracé de la future paroi moulée, afin de combler les vides par lesquels pourrait s’échapper la boue utilisée dans le processus de construction de la paroi moulée (voir encadré 1).* »

Excavation en cours dans la tranchée d’un panneau de la future paroi moulée. La boue bentonitique affleure. Celle-ci est injectée au fur et à mesure de la réalisation de l’excavation. Ces propriétés thixotropiques lui permettent de stabiliser les parois du trou de forage et d’empêcher le sol de s’effondrer.

La boue bentonitique est traitée pour en éliminer les particules solides et les impuretés, puis elle est stockée jusqu’à ce qu’elle soit prête à être réutilisée. Ce processus en circuit fermé permet d’économiser de l’eau, de la bentonite et de réduire les coûts de traitement des déchets.

Un coulage continu de 200 m^3 pour chaque panneau

Une fois cette étape de préparation terminée, les équipes travaux ont pu réaliser la paroi moulée. Celle-ci se décomposait en 32 panneaux de 6,5 à 7 m de large, 1 m d’épaisseur et 32 mètres de profondeur. En tout, 200 mètres linéaires de paroi moulée ont été fabriqués. « *Nous bétonnions 3 panneaux de 6,5 à 7m de large par semaine. Pendant deux semaines, nous avons même réussi à produire 4 panneaux !* », se félicite Arnaud Lelimousin.

Chaque panneau, constitué d’environ 200 m^3 de béton, devait être coulé en continu. Une contrainte qui nécessitait de préparer bien en amont l’approvisionnement. « *Nous pouvions couler uniquement le matin, entre 7h et midi. Avant d’amorcer le coulage d’un panneau, nous nous assurions de la présence de deux camions malaxeurs sur chacune des deux colonnes de bétonnage. Puis nous démarrions le bétonnage, les toupies se succédant alors après avoir attendu en file indienne sur la voie réservée.* » Ce ballet finement synchronisé a permis de tenir une cadence de coulage de 60 m^3 par heure.

Les travaux se sont poursuivis par la réalisation de la poutre de couronnement qui surmonte la paroi moulée. «*En liaisonnant structurellement les panneaux entre eux, cette poutre massive – 3 à 6 mètres de hauteur pour 1 mètre d’épaisseur – permet de diffuser les charges verticales de la tour de manière homogène sur les panneaux de paroi moulée sous-jacents*», précise Arnaud Lelimousin.

Levage de la cage d’armature d’une paroi moulée avant son installation dans la tranchée. Cette phase spectaculaire permet de se rendre compte des dimensions exceptionnelles de l’excavation.

Des tirants d’ancrage pour limiter la déformation de la paroi...

Puis les terrassements à l’intérieur de l’enceinte formée par la paroi moulée ont pu démarrer, afin de l’évider. Au fur et à mesure de l’excavation, des paliers étaient ménagés sur la plateforme pour pouvoir installer des tirants d’ancrage. « *Ces tirants précontraints provisoires, d’une vingtaine de mètres de long, étaient mis en place à travers la paroi. En contrant la poussée des terres, ils permettaient de tenir la paroi moulée, ou du moins d’en limiter la déformation à l’avancement.* » En tout, jusqu’à quatre niveaux de tirants d’ancrage ont été mis en place sur toute la hauteur de la paroi jusqu’au fond de fouille, à 22 mètres de profondeur.

Après l’équipement de la tranchée avec la cage d’armature, des tubes plongeurs sont installés pour permettre le bétonnage en continu et sans interruption depuis le fond de la tranchée. Grâce à ces tubes, le béton se substitue au fluide d’excavation.

... et permettre la descente d’imposants matériels en fond de fouille

« Nous avons ainsi pu maintenir la fouille à ciel ouvert jusqu’au bout. Nous avions en effet besoin de disposer de cette ouverture pour pouvoir descendre l’atelier de forage de pieux dans le fond de la fouille. Cette spectaculaire opération de grutage constitue d’ailleurs l’un des moments forts du chantier : en moins de dix heures, une grue mobile de capacité 700 tonnes positionnée à la surface, au bord de l’excavation, a ainsi descendu 22 mètres plus bas une foreuse de plus de 70 tonnes, une

grue sur chenilles de 45 tonnes, une pelle mécanique et l'intégralité des outils de forage ! »

Ainsi installé au fond de l'excavation, cet atelier a pu réaliser 131 pieux Starsol® de gros diamètre (1 200 mm) et de 23 mètres de profondeur, ancrés dans le calcaire grossier de la Défense, et destinés à reprendre directement les descentes de charges des poteaux intérieurs de la tour Hekla.

La cage d'armature est placée au-dessus de la tranchée, avant d'être descendue avec précaution jusqu'au fond.

Les étapes-clés de fabrication de la paroi moulée

La technique de mise en œuvre des 200 ml de parois moulées de la tour Hekla suit un protocole précis. Tout d'abord, des murettes-guide sont construites. D'environ un mètre de hauteur, ces éléments sont destinés à assurer la verticalité de la future paroi. Une fois ces guides réalisés, une benne preneuse à **câble** ou une hydrofraise – une haveuse de paroi mise au point par Soletanche Bachy dédiée aux sols durs – fore le sol par panneaux de 6,5 à 7 mètres de large tout en injectant dans la fouille une boue bentonitique, à base d'argile. Cette boue aux propriétés thixotropiques (*) est un élément clé du processus puisqu'elle tient la paroi sur toute sa hauteur en attendant le bétonnage. Une fois cette tranchée profonde (32 m de profondeur pour 1 m d'épaisseur) creusée, une **cage** d'armature aux dimensions tout aussi exceptionnelles est **levée** à l'aide d'une grue puis elle est introduite sur toute la hauteur. Le coulage du béton peut alors commencer via des tubes plongeurs. Pour chaque panneau, les 200 m^3 de béton sont coulés en continu via deux colonnes de bétonnage. La boue, moins dense, est poussée par le béton vers le haut puis pompée pour être recyclée. Des joints polymères « water stop » pris à moitié dans deux panneaux successifs assurent l'étanchéité de la paroi.

(*) La **thixotropie** est la propriété qu'ont certains fluides de passer d'un état visqueux à un état liquide lorsqu'on les agite et de retrouver leur état initial après un temps de repos.

Paroi moulée : un bétonnage de grande hauteur et à l'aveugle

La mise en œuvre de fondations profondes, et des parois moulées en particulier, est soumise à une **contrainte** singulière : « *Nous bétonnons à l'aveugle dans le sol, sur des hauteurs très importantes* » synthétise Arnaud Lelimousin. *Il est donc primordial de nous assurer que le béton se répartira à coup sûr de manière* ***homogène*** *dans la fouille, et sans* ***vibration****. C'est pour cela que nous sommes très exigeants sur ses performances.* » Le béton des parois moulées doit ainsi être fluide, mais sans contenir toutefois une trop grande proportion d'eau – ce qui peut favoriser la **ségrégation** des **granulats**. Le caractère fluide est ainsi obtenu par **addition** de plastifiants.

Le **ciment** est pour sa part de type CEM III/A PM/ES. « *Dans ce* ***type de ciment****, adapté aux environnements agressifs - le béton est ici en contact direct avec le sol - une proportion importante du* ***clinker*** *est remplacée par des laitiers de haut-fourneau, ce qui limite la chaleur générée lors de la* ***prise*** *du béton, et améliore de fait la maîtrise des risques d'apparition de pathologies structurelles* », conclut Arnaud Lelimousin.

Fiche technique

Reportage photos : © Cedric HELSLY, © Arnaud LELIMOUSIN

Chiffres

Tour Hekla

- 220 mètres de haut
- 49 étages
- 76 000 m^2 de bureaux
- 5 800 personnes accueillies
- Coût du projet : 270 millions d'euros

Fondations

- 32 panneaux de parois moulées : 1 m d'épaisseur – 6,5 à 7 mètres de large.
- 131 pieux Starsol®
- 9,25 millions d'euros : montant du marché de fondations

Fiche technique

- **Maîtrise d'ouvrage :** HEKLA
- **Architecte :** Ateliers Jean Nouvel
- **Maîtrise d'œuvre :** Artelia/EGIS
- **Maîtrise d'œuvre géotechnique :** Fugro
- **Entreprise générale :** BATEG (groupe VINCI)
- **Entreprise Fondations :** Solétanche Bachy France (paroi moulée, tirants) Solétanche Bachy Fondations Spéciales (pieux Starsol®)
- **Période chantier de fondations :** juillet 2018 – juin 2019

CONSTRUCTION MODERNE

Auteur

Olivier BAUMANN

Retrouvez tout l'univers de la revue Construction Moderne sur
constructionmoderne.com

Consultez les derniers projets publiés
Accédez à toutes les archives de la revue
Abonnez-vous et gérez vos préférences
Soumettez votre projet