



INNOVATION CHANTIER STRUCTURE



© Florence At/Tisséo Ingénierie

Lieu

Toulouse

Maitrise d'ouvrage

Tisséo Collectivités [syndicat des transports en commun de l'Agglomération toulousaine], Tisséo Ingénierie [société de la mobilité de l'Agglomération toulousaine] [maitre d'ouvrage délégué]

Maitrise d'œuvre

Groupe Arc & Sites [architecte mandataire], UBC Ingénierie [BET structure], avec les sous-traitants Geolithe [BET géotechnique], AGP [relevés scan et modélisation], Urbasense [BET racinaire], Ecovi [économiste], Artelia [OPC et interface métro], Tollis [diagnostic sculpture]

Apave [contrôle technique], Présents [CSPS]

Entreprises

Lot 1 [structure et déplacement] : Bouygues TP Régions France/VSL France [GO, études d'exécution et charpente métal], Rodrigues Bizeul [sous-traitant, dépose/repose maçonnerie], Boas Services [sous-traitant, instrumentation]

Lot 2 [protection des sculptures] : Correa [mandataire, dépose/repose trophées, protection sculptures], Socra [co-traitant, consolidation de sculptures et conception protection]

Coût des travaux

7 M€ HT [déplacement et remise en place future]

Le tour de force d'un arc de triomphe

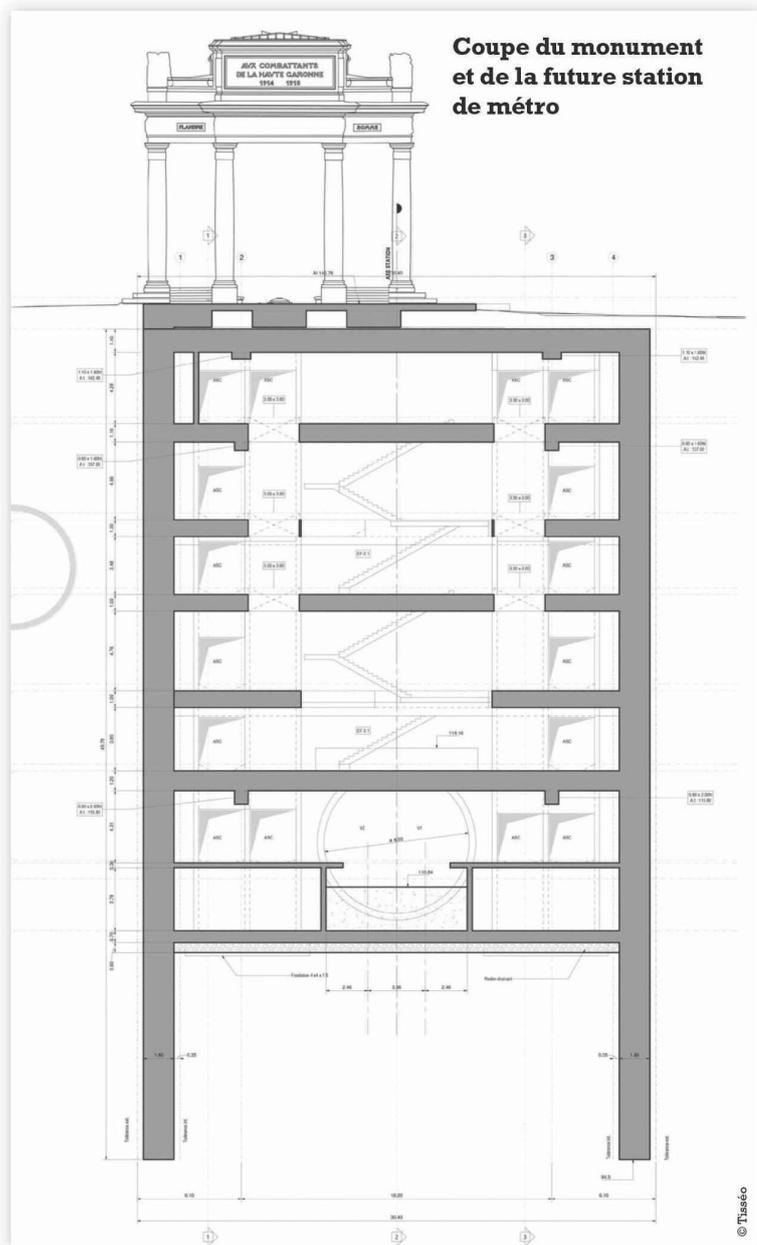
À Toulouse, un Monument historique a fait l'objet d'une opération exceptionnelle. Fin août, en quelques heures, il a pivoté à 90° pour parcourir une trentaine de mètres. Une prouesse technique.

Il est toujours debout. Et, fait extraordinaire pour un édifice – qui plus est patrimonial – le monument « à la Gloire des combattants de Haute-Garonne » se présente désormais sous un angle inédit; il a par la même occasion trouvé de nouveaux ombrages sous les platanes des allées Forain-François-Verdier de la Ville rose, à quelque distance de son emplacement d'origine. Qu'il réintègrera en 2027.

Cet ouvrage, œuvre de l'architecte Léon Jausseley (Prix de Rome) et des sculpteurs Camille Raynaud, André Abbal, Henri-Raphaël Moncassin et Jean-Marie Fourès, protégé au titre des Monuments historiques, a été construit il y a un siècle (entre 1923 et 1928 pour l'édifice, achevé en 1931 pour la sculpture) en commémoration de la Grande Guerre. C'est a priori le seul exemple d'arc de triomphe Art déco connu. Son déplacement a été motivé par le projet d'implantation d'une station de la troisième ligne de métro (C) de l'agglomération toulousaine, qui va être creusée à près de 40 m de profondeur, sous l'exacte emprise du monument, avec des parois moulées fondées à 50 m. Exceptionnelle à bien des égards, sa translation découle de l'étude de multiples scénarios de mise en sécurité de l'édifice menée à partir de 2021 par le groupement de maîtrise d'œuvre constitué autour de l'agence Arc & Sites, à l'appui d'une longue phase d'investigations.

Diagnostic et arbitrages techniques

En complément de l'étude des archives du chantier d'origine, des relevés 3D, des auscultations au géoradar et l'évaluation des caractéristiques mécaniques et chimiques de la pierre (granit pour le socle, calcaire gréseux pour le reste) ont été effectués afin d'acquies la connaissance la plus fine de la structure du monument et de son état général. L'arc de 17 x 12 x 16 m (Lxlxh) est composé d'un attique muni de trophées sculptés reposant sur un entablement orné d'une frise. Cette partie haute de 660 t est portée par huit colonnes et deux piédroits qui totalisent un peu moins de 400 t, sur un emmarchement de 300 t. Les investigations ont permis de découvrir que cette partie haute était creuse (attique) et son système constructif, constitué de pierres de taille et de béton intimement imbriqués. « Ces deux matériaux forment un tout, les pierres ayant notamment pu servir d'éléments de coffrage au béton, précise l'architecte Rémi Desalbres (Arc & Sites).

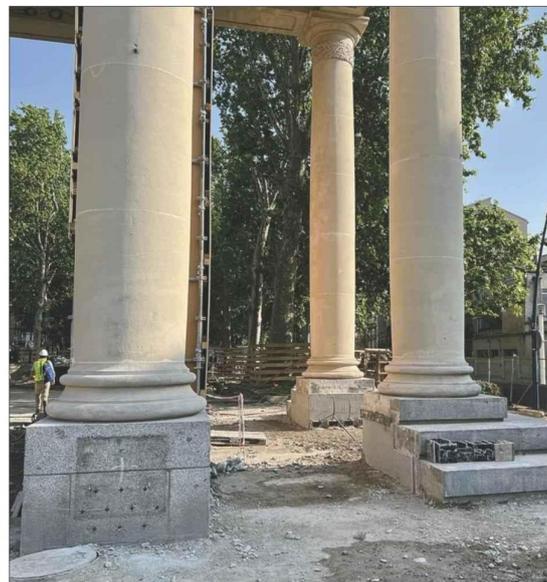


Dès lors, l'hypothèse d'un démontage pierre à pierre a été écartée, d'autant que la désolidarisation des éléments sculptés de cet alliage présentait un risque élevé de dégradations». Écartée également, l'hypothèse de reprise en sous-œuvre du monument, jugée trop complexe compte tenu de l'environnement bâti et planté, de la multiplicité des réseaux en infrastructure (dont la ligne de métro B) et de la nécessité de renforcer les protections des pieux et du monument face au risque de vibrations et de

Après la construction de la station souterraine, l'arc retrouvera sa position initiale, à égale altimétrie.



Investigations menées sur la partie haute lors de la phase de diagnostic en 2021. L'occasion d'accéder à l'intérieur de l'attique par une trappe.



Pieds de colonnes après dépose des emmarchements.

PROTECTION

Mesures de précaution

Conformément au scénario de mise en sécurité retenu, les trophées sculptés de l'attique ont été déposés (A), après de menues interventions conservatoires. En tête des colonnes et piédroits ainsi que dans les voûtes, des butées ont été mises en place pour reprendre les efforts horizontaux générés en cas de freinage brusque. Ce dispositif a été renforcé par un étrésolement bois à l'intérieur de l'attique (B) et par un cerclage extérieur à base de sangles maintenues par des selles en bois. ■



dégradations occasionnées par la réalisation des parois moulées de la future station. Au final, la solution préconisée comportait deux variantes : soit un déplacement par grands éléments (attique d'une part, colonne et piédroits d'autre part, avec découpe au fil diamanté au droit des joints) ; soit un déplacement d'un seul tenant, moyennant une dépose préalable du socle, du pavage et des trophées de l'attique. La première variante impliquant plus de manipulations, donc plus de risques d'endommagements, c'est la seconde qui, au printemps 2022, a été définitivement retenue.

Maintenir le schéma statique du monument

De là, s'est ouverte une longue phase d'études d'exécution ayant conduit à produire, analyser et valider plus de 300 plans et notes de calcul. Car déplacer un bâtiment est une opération des plus rares, même s'il existe un précédent récent (2007) en Europe, avec l'église d'Heuersdorf (Allemagne), édifice de quelque 650 t, qui n'avait pas non plus été construit pour être déplacé. Par ailleurs, la structure spécifique d'arc de triomphe de l'édifice toulousain, qui place la masse principale en partie sommitale, devait pouvoir résister aux étapes de levage, de pivotage et d'acheminement. « Il importait de conserver le schéma statique du monument et d'éviter tout effort susceptible de l'endommager, résume Vincent Géraud, directeur commercial



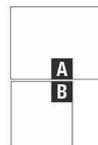
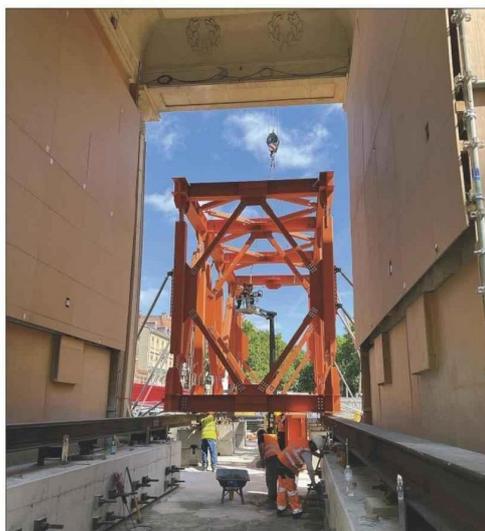
Photos © Arc&Sites

Les fondations existantes sont serrées par d'imposantes longrines qui ont été coulées en place.

chez Bouygues TP Régions France et VSL France. « Le centre de gravité du monument étant élevé, il a fallu concevoir une charpente métallique capable de parer au risque de désolidarisation de la partie haute des colonnes et piédroits qui le tiennent, de reprendre le plan de cisaillement et d'assurer le contreventement, détaille Marc Thomas, chargé d'études chez UBC Ingénierie (BET structure). Les éléments constitutifs de cet exosquelette ont été dimensionnés à la fois pour gérer la descente de charges et bloquer les efforts horizontaux susceptibles de déstabiliser la structure. » En partie basse, en contre-œuvre des soubassements existants des piédroits et des colonnes, des longrines ont été coulées puis mises en précontrainte de manière à comprimer cette partie des fondations. Longrines qui ont été suspendues à la base de la charpente au moyen de tirants métalliques. À noter, il a fallu au préalable (après dépose des emmarchements et du parvis), régénérer les fondations du soubassement via l'injection de coulis et mortiers ultrarésistants pour éviter un éventuel écrasement dû au pincement et en sus, garantir une liaison à toute épreuve de cette base avec la cage métallique.

En lévitation

La charpente métallique reprend donc directement les appuis du monument, ceci pour permettre de le soulever sans modifier le



Fabriqué et monté à blanc en Moselle, l'exosquelette a été transporté in situ et mis en place (A), en commençant par le caisson central qui a été ripé sur rails (B).



Mise en place des vérins avant le levage.



Une fois le monument soulevé à une hauteur de 1,60 m, les plateformes automotrices ont été placées en dessous.



Progression de l'arc de triomphe entre le double alignement de platanes des allées Forain-François-Verdier, le 31 août.

INSTRUMENTATION

Capteurs : de la surveillance au pilotage assisté



© Boas Services

Au printemps 2023, 20 capteurs ont été mis en place en divers points du monument. D'abord pendant un mois pour mesurer la respiration naturelle de l'ouvrage et réaliser une planche d'essais à blanc. Planche d'essais grâce à laquelle, au cours des travaux préparatoires, les

différents seuils d'alerte et d'arrêt ont été déterminés avec l'ensemble des acteurs du projet. Ces seuils devant faire foi en cas de désordres lors des opérations de levage, rotation et déplacement. « Il s'agit de 18 extensomètres destinés à surveiller d'éventuelles apparitions de fissures en tête de colonnes et de piédroits à la liaison avec l'attique et à contrôler l'ouverture des arcs de l'attique, décrit Jonathan Barbut, président du bureau d'études Boas (groupe BTP Consultants). Ils sont complétés par deux inclinomètres bi-axe qui mesurent en degrés les rotations du monument dans son sens longitudinal et transversal, pour vérifier qu'il reste droit dans les deux plans. Cette instrumentation a joué un rôle majeur dans le bon déroulement des opérations le 31 août. Grâce aux données recueillies et transmises en temps réel aux entreprises, tout s'est passé beaucoup plus rapidement que prévu, notamment pour le roulage, au cours duquel le sous-traitant Sarens a pu corriger l'inclinaison du convoi en fonction des éventuels défauts de planéité ou d'horizontalité du sol. Ces capteurs au rôle préventif ont d'une certaine manière assuré un rôle de pilotage assisté des opérations ! » Ils resteront en place pour surveiller la stabilité de l'ouvrage jusqu'à ce qu'il retrouve sa place initiale. ■

fonctionnement de sa descente de charges. Quatre massifs de vérinage (soit 16 vérins hydrauliques double effet) ont été installés aux quatre coins de la cage en vue de soulever le complexe (1000 t du monument + 500 t d'exosquelette) à 1,60 m de haut, une dizaine de jours avant son déplacement proprement dit. Sur deux journées, le transfert de charges s'est opéré, par passes de 10 cm, du monument vers l'exosquelette. « Du fait de son assemblage par boulonnage, la charpente s'est légèrement déformée au cours du levage, mais au final, la flèche de 9 mm était conforme aux calculs », souligne Vincent Géraud. Lorsque la prise en charges a été effectuée à 80 %, un sciage horizontal au fil diamanté a été pratiqué sous les longrines afin de désolidariser l'édifice de ses fondations. La répartition des charges sur les neuf plateformes automotrices (kamags) prévues pour assurer l'acheminement s'est opérée via deux méga-poutres, l'édifice restant suspendu à l'exosquelette. Les plateformes et leurs 228 roues ont été acheminées sur site, assemblées à l'aide d'une grue puis glissées sous le monument et l'exosquelette. Le 31 août, quelques heures auront suffi pour que le colosse de pierre atteigne sans dommage la dalle de répartition qu'il occupera jusqu'à 2027, où il retrouvera son emplacement d'origine, à son exacte altimétrie. Au-dessus d'une nouvelle station de métro.

Félicie Geslin