

03/16 steeldoc

Métal digital



Un génie sorti de sa bouteille

Maître de l'ouvrage

ProRail B.V., Ministère de l'Infrastructure et de l'Environnement, Ville d'Arnhem

Architectes

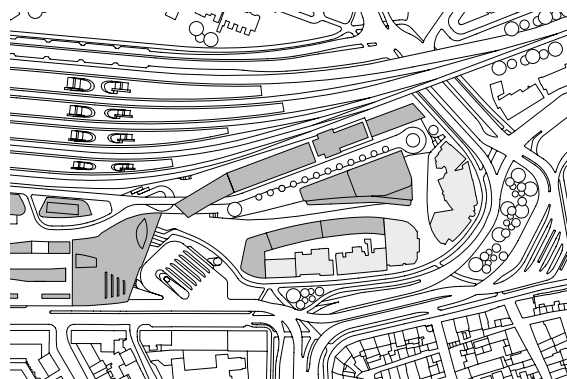
UNStudio, Amsterdam

Ingénieurs

Arup Amsterdam, BAM Advies & Engineering, ABT

Année de réalisation

2015



Situation, échelle 1:6000

La forme non standard du nouveau pôle multimodal d'Arnhem est une image emblématique d'une mobilité diversifiée. La fluidité des espaces aide les passagers à s'y orienter. Pour en permettre la réalisation, le potentiel des outils numériques a été repensé.

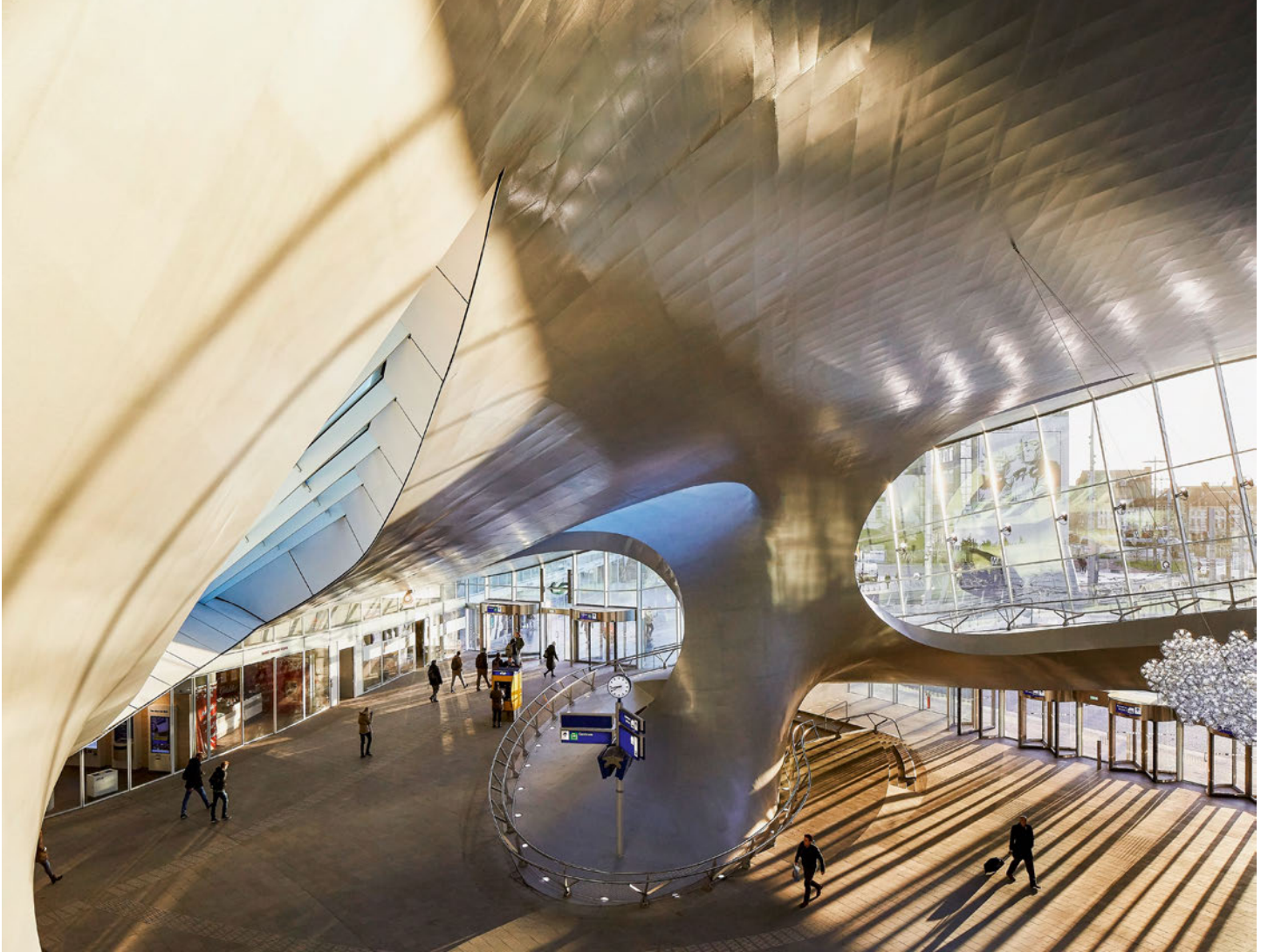
Le pôle de transports publics d'Arnhem fait partie intégrante d'un projet de développement urbain comportant des immeubles de bureaux, des commerces, des logements, la gare ferroviaire – avec son hall et ses quais –, ainsi qu'un passage inférieur pour les piétons et deux parkings souterrains, l'un pour les bicyclettes, l'autre pour les voitures. Sous une toiture aux formes libres, tous les modes de déplacement sont réunis : train, tram, trolleybus, vélo, voiture, sans oublier les piétons. La gare ferroviaire, élément-clé des liaisons entre la Belgique, les Pays-Bas et l'Allemagne, voit se croiser quotidiennement quelque 40 000 passagers. Le nouveau pôle pourra en accueillir 110 000 d'ici 2020.

Le choix des formes donne son unité à l'aménagement urbain.

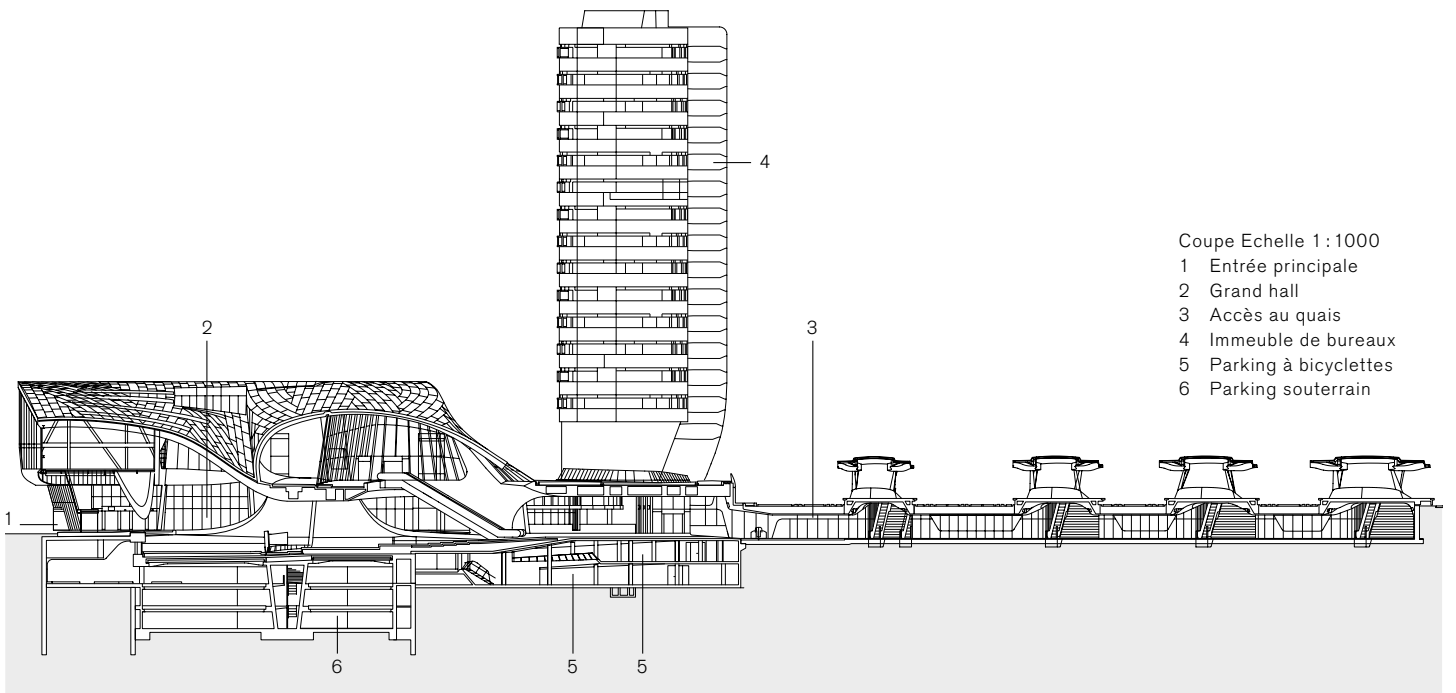
Retournement

La bouteille de Klein, du nom du mathématicien allemand qui fut le premier à la décrire, a servi de référence à la conception. Elle a la particularité de n'avoir ni intérieur ni extérieur, de confondre en fait intérieur et extérieur. Plafonds, murs, sols s'enchaînent dans une continuité sans faille, créant un espace d'une fluidité parfaite. Tout naturellement, l'intérieur se retourne vers l'extérieur. Passagers et passants traversent le pôle de mille et une manières, dans mille et une directions. Les façades transparentes, le cheminement de la lumière artificielle et naturelle, les différences de niveau, tout concourt à faciliter leur orientation. Le thème du retournement

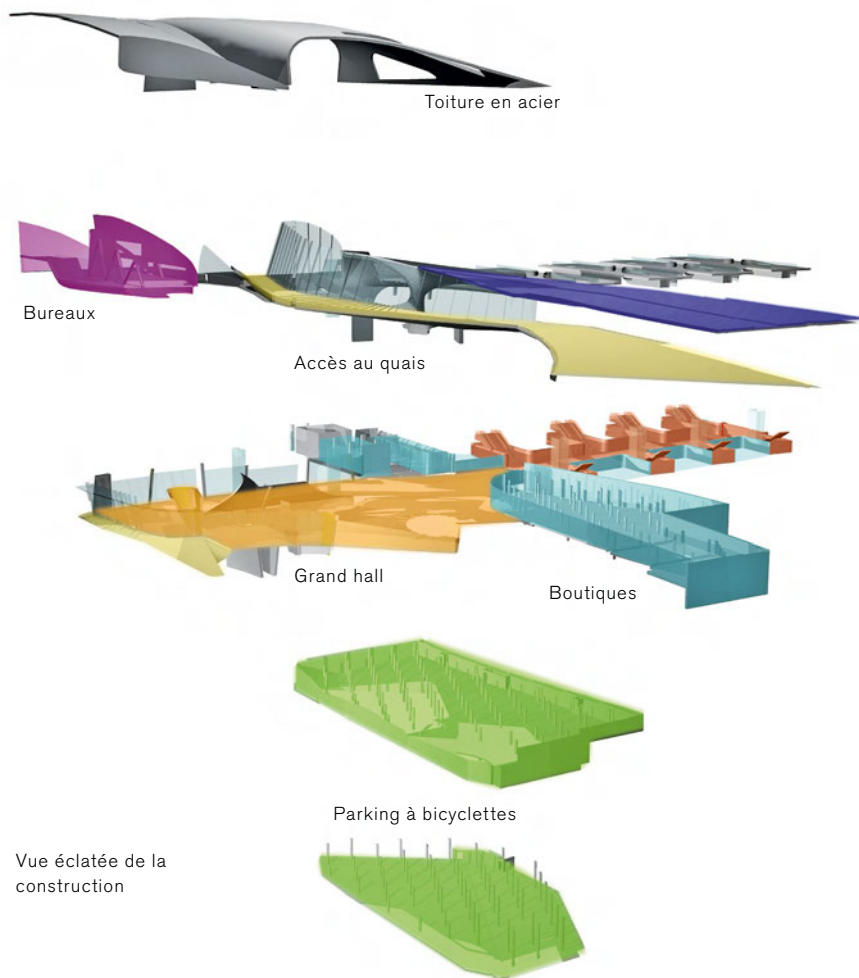




Les formes du hall central sont une illustration parfaite du principe de la bouteille de Klein, où l'intérieur devient extérieur, et vice-versa.



Coupe Echelle 1 : 1000
 1 Entrée principale
 2 Grand hall
 3 Accès au quais
 4 Immeuble de bureaux
 5 Parking à bicyclettes
 6 Parking souterrain



est aussi à l'œuvre dans le principe de construction lui-même, inspiré de la construction navale, mais inversant charpente (à l'extérieur) et «bordé» (à l'intérieur).

Les contraintes

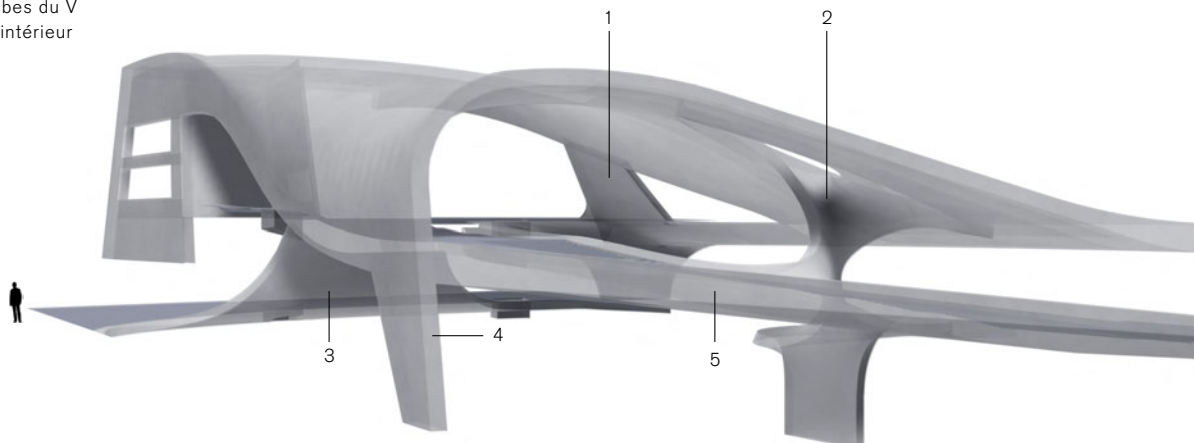
La version primitive du masterplan du site date de 1996. A ce tout premier stade déjà, architectes et ingénieurs avaient coordonné leurs études. La difficulté, sur ce site extrêmement limité, consistait à parvenir à loger à la fois le grand hall, les locaux qui lui étaient rattachés et l'infrastructure nécessaire. Le tout devait fonctionner – au sens propre comme au sens figuré – sur plusieurs plans. C'est ainsi que le pôle s'articule sur deux niveaux en sous-sol et quatre en surface.

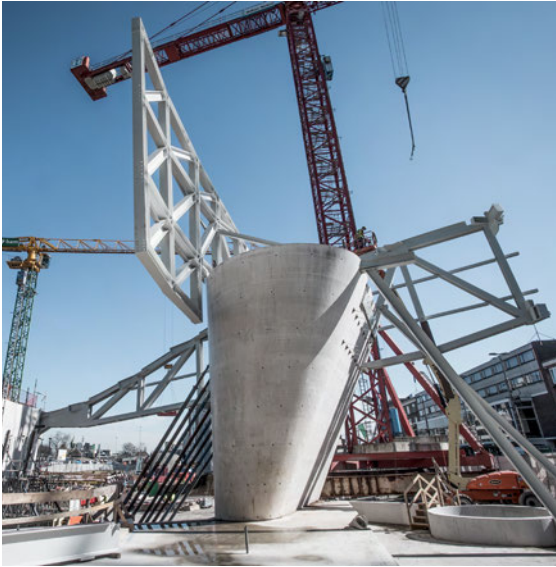
La complexité du projet a conduit à le réaliser en deux phases. La première, achevée en juillet 2011, comportait la construction en sous-sol du parking à bicyclettes et du passage donnant accès aux quais, la seconde consistant à réaliser le hall principal. En dépit de la nécessité d'un tel phasage, l'unité des formes entre infrastructure et superstructure est totale.

L'extérieur comme l'intérieur du pôle multimodal se caractérisent par une succession de surfaces courbes, avec un réseau complexe de rampes et de plans horizontaux et une toiture dont la courbure lui permet de franchir des portées allant jusqu'à 35 mètres.

Ensemble des éléments en acier:

- 1 Backtwist
- 2 Fronttwist
- 3 Flip
- 4 Voile formant l'une des jambes du V
- 5 Balcon intérieur





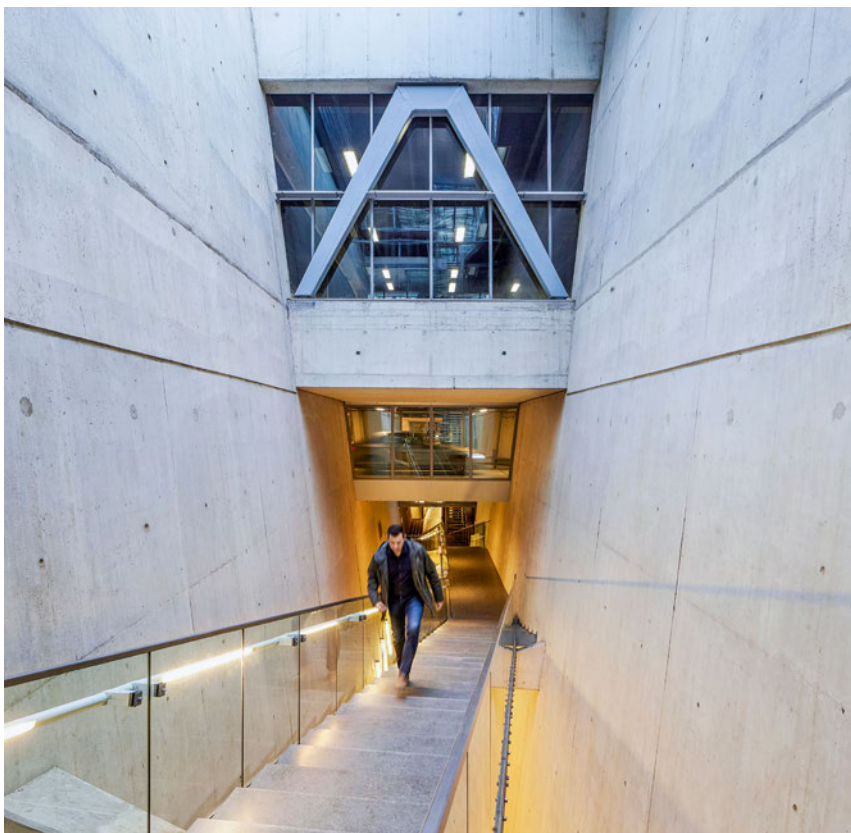
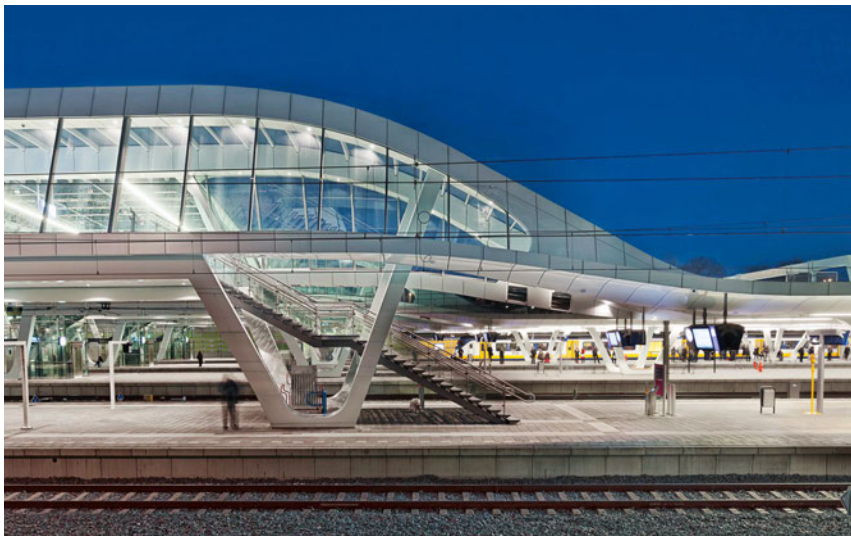
Raccordement de la structure métallique au support en béton.



Livraison et montage des éléments métalliques préfabriqués.



Installation du parement supérieur sur les membrures de la « coque de navire » inversée.



Les niveaux hauts et bas sont reliés par des voiles, des poteaux, des puits en forme de V, pour lesquels le rôle structural se double d'un rôle esthétique. L'ensemble est conçu de manière à laisser la lumière naturelle pénétrer jusque dans les étages inférieurs, facilitant ainsi l'orientation.

Appréhender la complexité

La réalisation d'un projet tel que celui-ci a nécessité une collaboration étroite entre le maître de l'ouvrage, les équipes d'architectes et d'ingénieurs et les entreprises de construction. Les outils numériques nécessaires – devenus depuis des outils standard – n'existaient pas encore et ont dû être développés spécialement pour le projet.

Les statistiques relatives au comportement des usagers ont servi à définir les enjeux. Elles ont montré que 35 pour cent des personnes fréquentant

le site le faisaient parce qu'elles empruntaient le train, un quart parce qu'elles prenaient le trolleybus, tandis que pour un autre quart, elles contenaient de traverser la gare sur leur chemin vers ou depuis le centre-ville. Le pôle devait par conséquent permettre à tous ces usagers de transiter ou d'accéder aux différents modes de transports en commun dans de bonnes conditions, et devait éviter au maximum les croisements de flux, les intersections de trajectoires, les conflits de destinations.

Une orientation intuitive

Le résultat est un espace ample, ouvert, que le regard peut traverser de part en part, où il est facile de s'orienter. Passagers et passants se déplacent dans un continuum qu'aucun poteau ni mur ne vient interrompre. Les cheminements en pente douce mènent presque imperceptiblement jusqu'aux trolleybus. L'orientation est facilitée également par le traitement de la lumière, naturelle ou artificielle. Cela fonctionne aussi dans le sens vertical : on passe des parkings souterrains aux niveaux supérieurs en empruntant des escaliers logés dans des puits de lumière en forme de V, où la lumière naturelle pénètre jusqu'au dernier niveau.

Génération des formes

La conception d'un tel pôle multimodal passe habituellement par l'étude des flux de déplacements. L'approche retenue à Arnhem est différente : ici, c'est l'architecture qui définit et oriente les flux. Partant de la bouteille de Klein et de ses propriétés, l'équipe d'ingénieurs a d'abord fait des essais avec des bulles de savon mises en forme au moyen de fils de fer, ce qui les a conduits jusqu'à la formulation mathématique, indispensable à une représentation numérique. S'en est suivie une série d'analyses au moyen de divers programmes informatiques pour lesquels des plug-ins spécifiques ont été développés afin de permettre ces calculs complexes.

Le feu vert pour la construction du pôle multimodal a été donné en 2000. Mais on n'en était alors qu'aux prémices de ce qui aboutirait à la réalisation finale. Dans un premier temps, un modèle en cire a été imprimé en 3D afin de montrer les formes aux différents protagonistes. Pour la génération des formes libres, les ingénieurs ont utilisé le logiciel de modélisation en 3D Rhinoceros, auquel il a fallu adjoindre, pour le dimensionnement, des plug-ins développés spécifiquement à cet effet. Alors seulement les efforts ont pu être calculés et optimisés.

Acier au lieu de béton

Le dimensionnement de la structure, initialement prévue en béton, a rapidement montré que ce matériau impliquait des risques importants et des coûts élevés. Le maître de l'ouvrage a donc invité les entreprises à assortir leur offre de propositions de solutions techniques. C'est ainsi que la réalisation a été confiée à l'entreprise qui proposait une variante acier au même coût que le béton. Le choix de l'acier s'est traduit par une plus grande légèreté de la

construction, tandis que le recours aux techniques de construction navale permettait de réaliser les surfaces courbes complexes souhaitées, autrement impossibles à exécuter.

La construction se décompose en trois parties : la toiture en acier, le socle en béton, avec son balcon intérieur, et enfin le pont et les éléments assurant la jonction avec les constructions adjacentes, existantes ou à réaliser. Les assemblages entre ces trois parties assurent la transmission des efforts.

Les éléments majeurs portent chacun un nom. Fronttwist est celui donné à l'élément servant d'appui central à la toiture. Ses courbures lui assurent une grande capacité portante, et la répartition des lignes de force autorise la réalisation d'ouvertures dans la toiture, permettant ainsi un éclairage naturel. Flip et Backtwist sont les deux autres éléments d'appui de la toiture, aux formes sculpturales. Flip, au droit de ce qui peut être considéré comme le faitage du bâtiment, sous le

L'accès au hall se caractérise par le déploiement généreux de la façade qui donne à voir la continuité des formes à l'intérieur.



balcon intérieur, est formé d'une rampe de 70 centimètres d'épaisseur; il transfère les charges du balcon et d'une grande partie de la toiture à quatre points d'appui. Backtwist, qui fait face à Fronttwist, se compose de deux parties distinctes: la partie inférieure, réalisée dès la première phase en 2011, est principalement en béton; la partie supérieure, courbe, de 60 centimètres d'épaisseur, est en acier.

La partie inférieure de Backtwist reprend les efforts verticaux de la toiture et du pont. La partie supérieure passe par-dessus ce dernier et se retourne dans la toiture. Elle reprend les efforts horizontaux et verticaux. Les forces latérales de flambage de la toiture côté nord sont transmises par Backtwist et équilibrent les efforts du balcon et de Flip, du côté opposé.

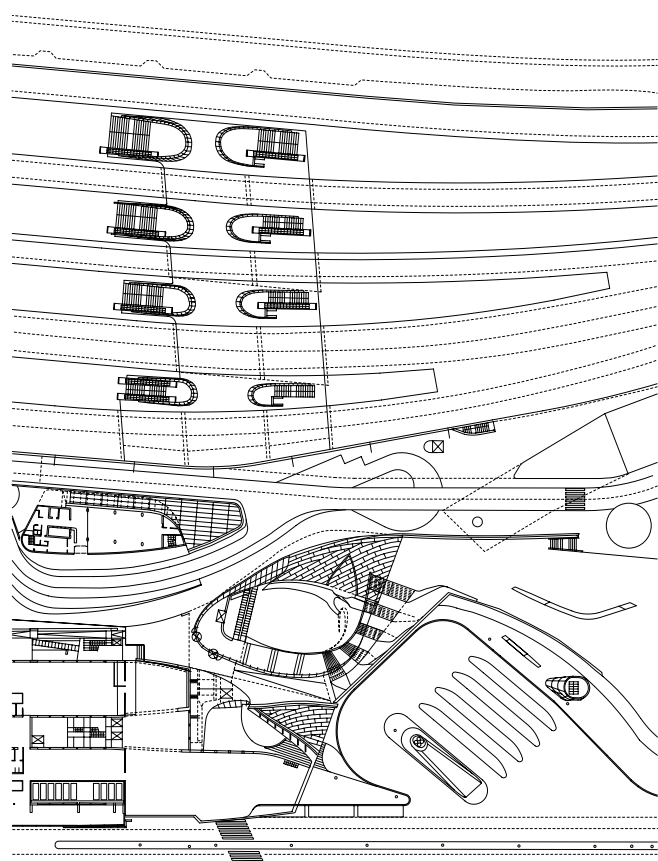
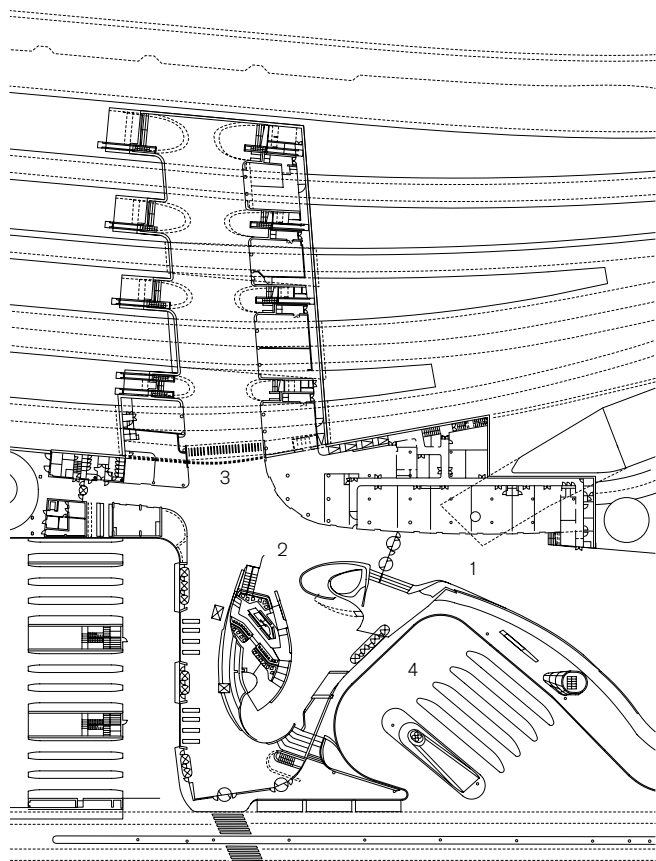
D'un point de vue mathématique, les éléments majeurs de la construction, tels que Fronttwist, sont des NURBS (Non-Uniform Rational Basic Splines).

Pour les besoins du calcul par la méthode des éléments finis, ils ont été triangulés. Des adaptations et des optimisations continues ont permis de déterminer l'épaisseur, variable, des éléments en chaque point. Pour cela, les ingénieurs ont développé un outil de modélisation paramétrique sur mesure, capable de produire un modèle numérique détaillé, qui a servi aux entreprises pour la production. Cette manière de procéder était incontournable en raison de la grande complexité des formes: la courbure de chaque élément est déterminée individuellement, mais l'effet doit en être calculé pour le bâtiment dans son ensemble. Les capacités limitées des ordinateurs et des programmes utilisés ont contraint à décomposer la construction et à modéliser séparément la toiture de forme libre, la charpente métallique de l'immeuble de bureaux, le balcon avec le pont ainsi que le parking à bicyclettes. Ces modèles ont ensuite été intégrés dans un modèle global pour la vérification de l'ensemble.

Vues en plan niveaux hall et quais.

Echelle 1:2000

- 1 Entrée principale
- 2 Grand hall
- 3 Accès au quais
- 4 Gare routière





Coque de navire inversée

A l'origine, il était prévu de réaliser l'ensemble du bâtiment en béton. Finalement, les éléments supérieurs du pôle ont été réalisés en acier, un choix motivé par la légèreté de la structure, la rapidité d'installation et la meilleure qualité d'exécution. La réduction des efforts transmis aux infrastructures déjà achevées est un autre élément qui a joué en faveur de la solution acier.

Deux variantes ont d'abord été étudiées : treillis tridimensionnel ou, comme en construction navale, application d'une peau métallique sur un système de membrures. Cette dernière solution, retenue, conduit à des épaisseurs moindres et offre des surfaces d'une grande qualité esthétique. Elle permet en outre, comme c'est le cas ici, la réalisation d'éléments de formes particulièrement complexes.

Le pôle a été inauguré en novembre 2015, 19 ans après le lancement des toutes premières études. Il a reçu le Prix de la construction métallique néerlandais. L'utilisation d'outils numériques pour la conception et la réalisation, à une époque où les bureaux d'études commençaient seulement à utiliser ce type d'outils, est exemplaire.

Si les formes apparaissent arbitraires, une réelle vision a présidé à leur développement et l'architecture permet aux bâtiments de se fondre dans leur environnement urbain.

La modulation des cheminements, les relations visuelles entre les différents niveaux, l'éclairage artificiel comme la lumière naturelle aident à s'orienter, guident et accompagnent au travers de ce pôle de transports complexe.

Projet Arnhem Centraal Transfer Terminal, Arnhem, NL
Lieu Stadionsplein 38, Arnhem
Maître de l'ouvrage ProRail B.V., Ministère de l'Infrastructure et de l'Environnement, Ville d'Arnhem
Architectes UNStudio, Amsterdam
Ingénieurs Arup Amsterdam, BAM Advies & Engineering, ABT
Construction métallique Groupement OV-Terminal Arnhem (BCOVTA, BAM et Ballast Nedam)
Construction navale Centraal Staal, Groningue
Tonnage 680 t
Nuances d'acier S235, S355
Surface brute 16 891 m²
Surfaces 5355 m² (hall), 21 750 m² (totalité du pôle)
Volume 90 000 m³
Coût 37,5 mio EUR
Durée des travaux 36 mois
Achèvement octobre 2015
Outils numériques pour la conception Oasis GSA, Rhinoceros avec des plug-in, FEM Sia Engineer, logiciels développés en interne

Impressum

steeldoc 03/16, septembre 2016
Métal digital

Editeur:
SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich
Patric Fischli-Boson

Redaction et textes:
espazium – Les éditions pour la culture du bâti, Zurich
Judit Solt
Dr. Viola John, p. 20–26
Philippe Morel, p. 12–15
Christof Rostert

Johannes Herold, p. 4–11
Cornelia Froidevaux, p. 16–19

Traduction française:
Chantal Pradines

Mise en page:
Anna-Lena Walther, Stämpfli AG

Textes basés sur les informations des concepteurs.
Les informations et les plans ont été fournis par
les bureaux d'études. Dessins retravaillés par
Martina Helzel, circa drei, München.
Plans de terrain p. 12: Swiss Topo

Photos:
Titre: Ronald Tillman
p. 4, 5, 8 en bas, 9, 11: Hufton + Crow
p. 7: Maarten Meuleman
p. 13 et 15: DMK Architecture Photography /
Adrien Barakat
p. 3, 16–17: KPMG, Groven
p. 18: Valentiny Architectes
p. 21: Messe Frankfurt / Ingo Bach
p. 22: Ingo Schrader / Bollinger + Grohmann
p. 23: Ingo Schrader
p. 24–26: Bollinger + Grohmann

Conception graphique:
Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Impression:
Stämpfli SA, Berne

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 60.– / étranger CHF 90.–
Numéros isolés CHF 18.– / doubles numéros CHF 30.–
Sous réserve de changement de prix. A commander sur
www.steeldoc.ch

Construire en acier/steeldoc© est la documentation d'architecture du Centre suisse de la construction métallique et paraît quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les informations techniques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes, le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. Une reproduction et la traduction même partielle de cette édition n'est autorisée qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication de la source.

**Abonnement annuel à steeldoc pour CHF 60.–
(étudiants gratuit) sur www.steeldoc.ch**