

Le parking Odysseum de Montpellier

Un ruban de 1 900 tonnes d'acier

Montpellier Odysseum car park.

A 1 900 tons steel ribbon

Un grand huit en charpente métallique réalisé avec environ 1 900 tonnes d'acier.

Le parking ressemble davantage à une attraction foraine qu'à un ouvrage de stationnement classique. Pas de plateau, mais un long ruban de 1 200 m qui monte puis descend en s'enroulant trois fois sur lui-même.

Pour des raisons de faisabilité économique et de rapidité d'exécution, l'équipe de maîtrise d'œuvre a opté pour une solution en charpente métallique. La structure primaire est constituée d'une ossature régulière composée d'ensembles poteaux/poutres. La structure secondaire est composée de deux poutres caisson en rive qui suivent la courbe de la rampe. Un plancher collaborant connecté forme la « dalle ruban ».

A grand carousel in "8" shape, steel structure frame, realized with circa 1 900 tons of steel.

The car park looks more like an open attraction than a traditional parking. No horizontal floor but a long ribbon of 1 200 m, which goes up then goes down while being rolled up three times on itself.

For economic feasibility and speed of execution reasons, the project management team chose a steel solution. The primary structure is made of a regular framework of columns/beams. The secondary structure is made of two box girders which follow the curve of the slope. A collaborating floor in composite action forms the "deck-ribbon".



Photo 1 : Le parking Odysseum de Montpellier / Montpellier Odysseum car park

1 UN PARKING RUBAN

Un grand ruban en charpente métallique réalisé avec 1900 t d'acier environ, voilà le parking odysseum. D'inspiration ludique, le parking offre un concept différent d'un ouvrage de stationnement classique. Pas de plateau, mais une voie de circulation centrale et des emplacements de stationnement tout en long de 1200 mètres qui monte, puis descend en s'enroulant trois fois sur elle-même. Gradué comme un mètre de couturière par une signalétique spécifique, il est desservi par 3 circulations verticales principales placées sur un axe qui traverse l'ouvrage en diagonale.

Le parc de stationnement Odysseum de Montpellier est un ouvrage inhabituel. Il est composé d'une superposition de « rubans » de 15 m de large sur plusieurs niveaux (Rez-de-chaussée + 3 niveaux au maximum), avec une voie de circulation centrale de 5 m et des places de parking de part et d'autre. Les différents niveaux peuvent se recouvrir (totalement ou partiellement) ou se croiser.

Conceptuellement, le parc de stationnement a été pensé comme un ruban (Figures 1 et 2), c'est-à-dire en remettant en question la typologie fonctionnelle des parkings pour véhicule léger par :

- La continuité des stationnements ;
- L'absence de rupture entre les niveaux ;
- L'absence de rampe entre niveaux (le parking est une rampe de stationnement globale).

Dans ce dispositif d'intégration des fonctions et des usages en un seul système global, le ratio traditionnel surface/place est optimisé à 21 m².

La capacité totale du parking est de l'ordre de 1 200 places (véhicules légers). Il est totalement ouvert vers l'extérieur en façade et remplit, par conséquent, amplement les conditions pour être classé dans la catégorie des parcs de stationnement largement ventilés (PSLV) au sens de l'article PS 3 de l'arrêté du 9 mai 2006. C'est l'arrêté qui porte approbation de

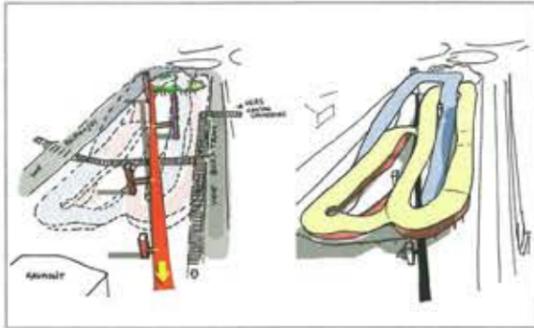


Fig.1 et 2 : Documents d'études de l'agence Brullmann&Crochon / Design documents from Brullmann&Crochon agency

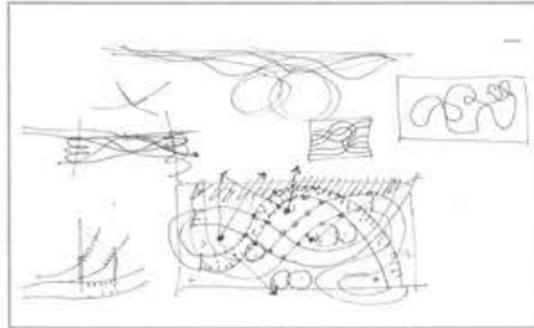


Fig. 4 : Plan d'ensemble avec localisation des noyaux de circulation verticale / General lay out showing wind bracings nodes

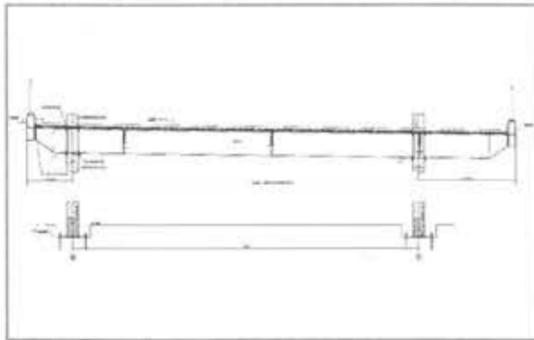


Fig. 3 : Coupe transversale courante du parking / Common cross section of the parking

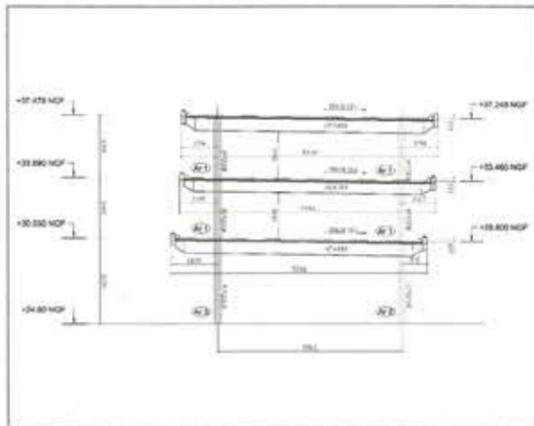
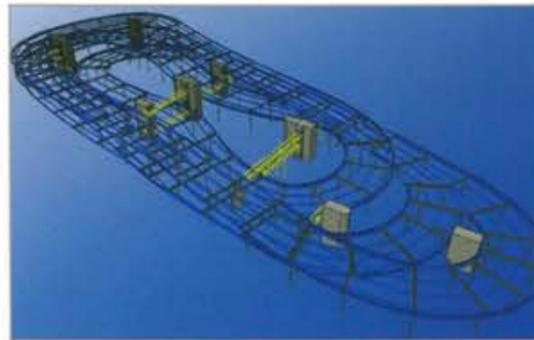


Fig. 5 : Coupe transversale caractéristique / Typical transversal section

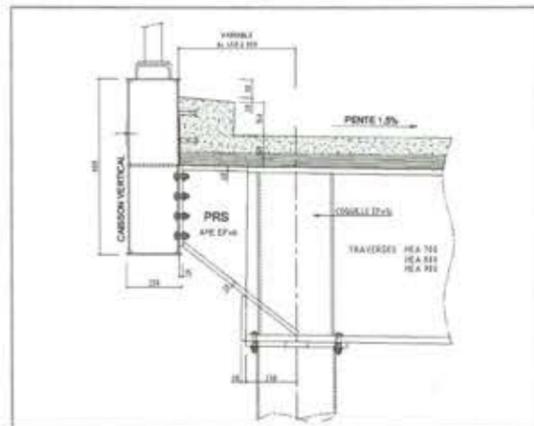


Fig. 6 : Coupe sur la rive de dalle / Edge detailed

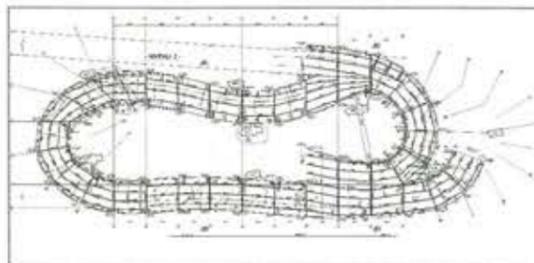


Fig. 7 : Plan de niveau partiel / Partial level plan

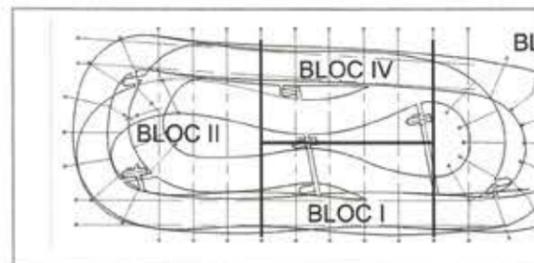


Fig. 8 : Découpage des joints de dilatation / Expansion joints location

dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (parcs de stationnement couverts). Ce qui permet d'envisager la réalisation d'une ossature en charpente métallique non protégée.

2 UNE STRUCTURE RÉGULIÈRE ASSOCIÉE À DES PORTE-À-FAUX IRRÉGULIERS

Pour des raisons de faisabilité économique et de rapidité d'exécution, l'équipe de maîtrise d'œuvre a opté pour une solution en charpente métallique. La structure primaire est constituée d'une ossature régulière ; composée d'ensembles poteaux/poutres disposés selon une trame de 15 m, fondés sur pieux. La structure secondaire est composée de deux poutres caisson en rive qui suivent la courbe de la rampe et de solives droites intermédiaires. Un plancher collaborant connecté forme la « dalle ruban » (figure 3).

La structure métallique est contreventée par les noyaux en béton armé des cages d'escalier (Figure 4). Les trois anneaux du parking oscillent sur cette trame régulière, générant des porte-à-faux plus ou moins importants tout en respectant une superposition stricte de la structure verticale.

Les plateaux se déplacent le long de la courbe par une translation horizontale sans jamais empêcher les poteaux de se superposer pour respecter la rationalité de la descente de charges. Cette hypothèse de conception est présente dans le projet depuis l'esquisse du concours (Figures 5 à 7).

3 LE SCHÉMA STATIQUE DU PARKING

Lors des discussions de mise au point du marché avec le groupement d'entreprises Cabrol & Fondeville, le principe de contreventement de l'ouvrage a évolué. Dans sa conception initiale, le contreventement dans le sens transversal était assuré par des portiques en charpente métallique et dans le sens longitudinal par des piles en béton armé encastées sur les fondations sur pieux, ceci pour dégager le ruban de circulation des cages d'escaliers intérieurs.

La solution définitive, mise au point avec le groupement d'entreprises, a consisté à découper l'ouvrage en quatre ensembles de 83 m de long environ, ce qui limite d'autant le nombre de joints de dilatation, et à



Photo 2 : Vue du contreventement par les noyaux / Bracing nodes viewing

stabiliser le ruban par un butonnage sur sept des huit cages d'escalier situées à l'intérieur de l'anneau. Deux blocs au niveau des virages (blocs II et III) et deux blocs en zone droite (blocs I et IV). La stabilité de chaque bloc est assurée par un couple de deux cages d'escalier en béton armé (Figure 8). Cette solution a permis d'alléger les fondations de la charpente métallique qui n'avaient plus dès lors que des efforts principalement verticaux à reprendre. Elle a également simplifié la mise en œuvre : les profilés reconstitués soudés (PRS) prévus dans la solution initiale pour la structure transversale primaire ont été remplacés par des HEA classiques boulonnés sur des poteaux métalliques en profilés tubulaires circulaires creux.

Dans ce dispositif, les pièces de charpente sont articulées les unes aux autres et stabilisées sur les noyaux de circulation verticale en béton armé (photo 2). Les déplacements horizontaux sont faibles.

La décomposition du transfert des efforts, en distinguant les efforts horizontaux (transmis par les noyaux) et les efforts verticaux (transmis par les poteaux en profilés creux tubulaires), a permis de simplifier la mise en œuvre de la structure en réalisant, pour commencer, les noyaux en béton armé contre lesquels la charpente métallique s'est accrochée à l'avancement. La singularité du dispositif consiste à positionner les noyaux de contreventement en dehors de l'emprise de la « rampe ruban » afin de ne pas modifier la perception de la translation des plateaux horizontaux les uns par rapport aux

autres. Le ruban est constitué d'un plancher collaborant en béton sur bac acier de type Cofraplus 60 (Arval) de 14 cm, connecté à des poutres métalliques par des goudjons de type Nelson. Il est bordé en rives par des poutres caisson droites et cintrées qui unifient visuellement la structure. La poutre caisson de rive permet tout d'abord de travailler en torsion. Elle présente aussi une hauteur suffisante (80 cm) pour servir de barrière à la propagation du feu d'un étage à l'autre (Photos 3 à 5).

La structure en charpente métallique a été conçue à partir d'une trame courante constituée des profilés suivants :

- Poutres transversales mises en œuvre selon un entraxe de 15,10 m en HEA de 700 à 900 d'une longueur de 15,00 m en porte-à-faux depuis les poteaux tubulaires verticaux vers la rive de la « dalle ruban ».
- Solives secondaires disposées selon un entraxe de 4,70 m en IPE 600 ou HEA 500 et d'une longueur moyenne de 15,10 m (Ces longueurs pouvant atteindre plus de 17,00 m dans les virages).
- Poteaux tubulaires en acier S355J0 avec des épaisseurs variant de 8 à 16 mm suivant leur hauteur et leur chargement. Ces charges peuvent atteindre jusqu'à 400 t. Pour des raisons de stabilité au feu, les poteaux ont été remplis de béton de type C30/37 et parfois en C50/60 directement sur le chantier.

4 MODÉLISATION DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE ET HYPOTHÈSES DE CALCUL

4.1 MATÉRIAUX

Les principaux matériaux mis en œuvre sont les suivants :

- Acier de charpente de type S355J0,
- Acier à béton de type FeE500,
- Béton de type C30/37,
- Connecteur pour la dalle collaborante de type TRW Nelson 3/4 - 100.

4.2 CHARGES D'EXPLOITATION

Pour le calcul des charges d'exploitation verticales sur la dalle de parking, les valeurs suivantes ont été retenues (selon les Eurocodes) :

- 1,84 kN/m² pour $S < 112,5$ m² (Valeurs établies en référence à l'Eurocode EN 1991-1-1),
- 2,30 kN/m² pour $S < 15$ m².

Pour le calcul de la charge de freinage en service, les valeurs suivantes ont été retenues :



Photo 3 : Fabrication de la poutre de rive / Edge beam fabrication

- 7,2 t par bloc de 60 m dans le sens longitudinal appliquées sur un ou deux niveaux. La force de freinage est calculée à partir de la décélération maximale compatible avec le système de freinage et le glissement des pneumatiques sur la chaussée et n'excède pas - 6 m/s² soit 1,2 t pour un véhicule de masse égale à 2 t. Sur une voie de 60 m de long, il ne peut y avoir simultanément que six véhicules en mouvement (véhicules en mouvement tous les 10 m environ).
- 3,6 t disposées de manière aléatoire dans le sens transversal à un seul niveau.

4.3 CHARGES CLIMATIQUES

Pour le calcul des charges climatiques, les valeurs suivantes ont été retenues :

- Neige région 2B, soit $S_0 = 0,45$ kN/m²
- Vent région 2 site normal, soit une pression de base de 0,6 kN/m² avec prise en compte de l'effort de frottement sur les dalles, d'entraînement en considérant un écran fictif correspondant à la hauteur cumulée des poutres et des poteaux selon la direction du vent (soit un C_s max de 1,3 et un effort de frottement de 0,02 q).
- Variation de température : L'écart de température pris en compte est de + 25 °C / - 33 °C. Sur une longueur de bloc de 80 m, la variation de longueur est de + 2 / - 2,64 cm.

La variation de température retenue entre deux niveaux, consécutive à l'ensoleillement, est de : + 12,5 / - 16,5 °C. La variation de température entre les deux faces d'un plancher varie du fait de l'ensoleillement de + 12,5 / - 16,5 °C, provoquant ainsi un gradient de température.

4.4 EFFORTS HORIZONTAUX AUTRES QUE LE FREINAGE ET LE VENT

Les autres actions horizontales sont les suivantes :



Photos 4 et 5 : Poutre et plancher connectés / Connected beam and floor

- Efforts horizontaux résultant des charges verticales sur une structure présentant des imperfections géométriques.
- Efforts horizontaux du second ordre résultant des déformations horizontales de la structure.
- Les chocs accidentels d'un véhicule sur un poteau, soit 5 t ponctuelles à 50 cm de hauteur dans le sens de la circulation ou 2,5 t perpendiculairement.

4.5 FRÉQUENCE

La combinaison utilisée pour le calcul de la fréquence propre sur le tablier du parking est $G + 0,2 Q$ et correspond à celle recommandée par l'Eurocode NF P 06-100-2 de juin 2004 sur la base de 18 véhicules de 2 t en station sur une surface de 15 m x 16 m, soit 150 daN/m². Au sens de l'Eurocode 3, la fréquence propre de la structure à obtenir doit tendre vers 2,6 Hz, soit une flèche de service maximale de 48 mm.

4.6 DÉPLACEMENTS VERTICAL ET HORIZONTAL

Les flèches ont été calculées sous charges permanentes et charges d'exploitations.

La flèche nuisible verticale est limitée à :

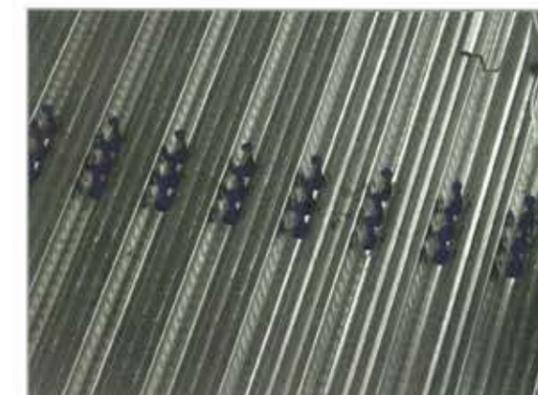
- L/300 pour les éléments de plancher.
- L/300 pour les éléments en porte-à-faux (ou la longueur de référence est le double de la longueur de la console).

La flèche nuisible horizontale est limitée à :

- H/250 pour les flèches relatives entre étages.
- H/300 pour la flèche globale de la construction.

4.7 MODÉLISATION DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

Le calcul du projet a été réalisé à partir d'un modèle



3D global incluant les cages d'ascenseurs et les escaliers. Les cages ont été modélisées par des appuis horizontaux et, en parallèle, les actions liées à la charpente ont été modélisées par des forces sur chaque cage, afin de vérifier les déplacements correspondant et d'en déduire les raideurs équivalentes pour recalculer le modèle global avec des appuis élastiques. Pour cette analyse, la raideur des pieux a été prise en compte pour l'évaluation des déplacements des cages en béton armé pour des efforts de courte durée. Compte tenu du mode de contreventement, la structure métallique modélisée est à « nœuds fixes ».

Les poutres métalliques qui constituent l'ossature horizontale du ruban sont connectées avec la dalle collaborante en béton armé. Cette disposition permet d'avoir une température moyenne similaire entre la charpente métallique et la dalle béton. On a donc peu d'effet bilame sous l'effet de la température, mais par contre il en existe un sous l'effet de retrait du béton.

La dalle mixte formant le ruban assure la fonction de diaphragme de la manière suivante :

- Un ferrailage périmétrique sur les quatre côtés du panneau permet à la dalle collaborante de fonctionner comme un treillis avec un effet de bielle de compression dans la diagonale du panneau.
- La bielle est dimensionnée pour reprendre l'effort de compression induit par l'effet diaphragme.

5 UNE APPROCHE D'INGÉNIEURIE INCENDIE

L'ambition du projet était de laisser la charpente métallique visible sur la totalité de l'ouvrage. Dans cette optique et compte tenu de la configuration

de l'ouvrage (PSLV, façades totalement ouvertes vers l'extérieur), le recours à une approche d'ingénierie incendie, conforme à l'arrêté du 22 Mars 2004 et à l'article PS7 de l'arrêté du 09 Mai 2006, pour justifier la stabilité au feu de l'ouvrage s'est imposé naturellement. La conception de la stabilité au feu de la structure a été établie en fonction des composants mis en œuvre et de leur localisation dans l'emprise du projet.

Les hypothèses de conceptions suivantes ont été prises en compte pour l'approche d'ingénierie incendie :

- Les poteaux verticaux en profilés tubulaires creux ont été remplis de béton.
- La structure horizontale connectée à la dalle collaborante n'est pas protégée au feu par un revêtement intumescent.
- Les passerelles formant sortie de secours en cas d'incendie ont été stabilisées par peinture intumescente.
- Les bracons assurant la liaison aux noyaux en béton armé ont été stabilisés par peinture intumescente.

La particularité de ce projet a donc consisté à intégrer dans le processus de conception le calcul de la stabilité au feu du parking sous scénarios d'incendie réel (feu de véhicules).

Ainsi l'étude a été menée en deux phases :

Phase 1 : Étude particulière sous scénarios d'incendie réel de deux tronçons représentatifs, soit un tronçon droit et un tronçon courbe. D'un point de vue « mécanique », les deux tronçons représentent les cas les plus défavorables, c'est-à-dire ceux pour lesquels les taux de travail sous chargement statique sont les plus élevés.

D'un point de vue « feu », les scénarios d'incendie réel pris en compte pour l'étude de ces deux tronçons sont « enveloppes » par rapport à l'ensemble du parking. C'est-à-dire qu'il a été recherché sur tout le parking quels étaient les cas critiques en termes de sollicitations thermiques générées vers les éléments de structure.

Les scénarios génériques étudiés sont les suivants (Figure 8) :

- Un scénario type : feu de sept voitures alignées, situées sous une solive de rive ou sous une solive extérieure avec un véhicule de classe 3 (406, Laguna, Xantia) et un utilitaire.
- Deux scénarios pour traiter des cas particuliers : un feu de quatre véhicules entourant un poteau et un

feu d'un véhicule à mi-portée d'une traverse de portique ou d'une solive avec un véhicule de classe 3 et un utilitaire.

Phase 2 : Justification de l'ensemble de la structure métallique du parking sur la base de l'étude particulière des deux tronçons sous scénarios d'incendie « enveloppes », et analyse exhaustive des taux de travail et des facteurs de massivité des éléments situés dans les autres zones du parking.

Le taux de travail à température normale, m_0 , d'un élément de structure représente la réserve mécanique de cet élément. Par exemple, si $m_0 = 0.30$, cela veut dire que l'élément ne travaille qu'à 30% dans les conditions normales d'exploitation à température normale. Plus le taux de travail d'un élément à température normale est faible, plus il pourra accepter un échauffement important avant de perdre sa stabilité.

NB : Le facteur de massivité d'un élément de structure est le ratio "Aire échauffée / Volume échauffé. Un élément très massif aura un facteur de massivité faible, et inversement. La combinaison de ces deux paramètres - taux de travail et facteur de massivité - permet de tirer des enseignements sur la stabilité au feu de tel ou tel élément de structure.

L'étude du comportement au feu sous incendie réel du parc de stationnement « Odysseum » des deux tronçons sélectionnés a été réalisée en 4 étapes :

E.1 : Définition des scénarios d'incendie réel de véhicules les plus défavorables vis-à-vis de la stabilité au feu de la structure (Figures 9 et 10). Conformément à l'arrêté du 22 Mars 2004 (article 6), les scénarios d'incendie retenus ont été validés par la Sous-commission départementale de sécurité suite à des échanges avec le Service Prévention du SDIS 34.

E.2 : Détermination des actions thermiques vers les éléments de structure. En fonction des scénarios proposés à l'étape précédente, les flux thermiques reçus par les éléments de la structure en fonction de leur positionnement par rapport aux véhicules soumis au feu ont été déterminés.

E.3 : Détermination de l'échauffement des structures. A partir des actions thermiques vers les éléments de structure déterminées à l'étape précédente, les températures atteintes par les éléments de structure ont été déterminées en fonction du temps (Figure 11).



Photos 6 à 9 : Photos de chantier / Photos on construction site

E.4 : Analyse numérique du comportement thermomécanique de la structure (Figures 12 et 13). A partir des échauffements obtenus à l'étape précédente, le comportement au feu de la structure a été étudié à partir des résultats relatifs aux déformations de la structure, ainsi qu'aux efforts internes de tous les éléments de la structure. Les analyses des trames ont été effectuées à l'aide du code de calcul aux éléments finis ANSYS en utilisant les lois de comportement données par les règles en vigueur, soit les ENV1993-1-2 et ENV1994-1-2 avec leur document d'application nationale respectif.

L'étude a ainsi permis de démontrer que la structure proposée satisfait les différents critères de sécurité définis (flèche de l'ossature horizontale, stabilité des poteaux, déformation des armatures en acier de la dalle en béton armé), et ceci sans recourir à une protection au feu.

Enfin, cette étude a fait l'objet d'une appréciation favorable de la part d'un laboratoire agréé (Avis sur étude au sens de l'article 15 de l'arrêté du 22 mars 2004).



6 MONTAGE ET MISE EN ŒUVRE

Afin de gérer le chantier et son planning, le projet a été décomposé en dix-huit zones. Chaque zone représentait deux trames principales sur 1, 2 ou 3 niveaux suivants les endroits où la charpente a été montée simultanément afin de libérer l'espace pour le déroulement du chantier et particulièrement pour l'intervention des autres tâches (pose des bacs de plancher, mise en œuvre des armatures et coulage du béton) (Photos 6 à 9).

La géométrie très particulière de l'ouvrage a nécessité d'importants calculs lors des études d'exécution. Il n'y a pas deux trames semblables. Il a donc fallu modéliser entièrement l'ouvrage pour calculer chaque pièce sur le logiciel TEKLA Structures, le calcul étant réalisé sur le logiciel Robot. Les bacs acier des planchers collaborants, livrés pré-perçés, ont dû être calepinés un à un à partir d'une modélisation 3D.

En phase réalisation, chaque poteau a été repéré par un géomètre en X, Y et Z à partir d'un point zéro et de la cote NGF. L'ouvrage a été réalisé par tronçons successifs, chaque tronçon intégrant simultanément les trois niveaux du ruban. Le coulage du plancher a été réalisé au fur et à mesure de l'avancement de la structure.

Pour des raisons de montage, le projet a été décomposé en quatre blocs principaux qui se joignent en files 3 et 8, celles-ci correspondent aux joints de dilatation. Pour des problèmes de tenue au feu, et en tant que structure extérieure, les profils utilisés sont en acier nuance S355J0 et ont été remplis de béton de type C30/37 et parfois C50/60 directement sur le chantier.

La stabilité provisoire des différents sous-ensembles structurels a été assurée par des palées verticales en rez-de-chaussée de type croix de Saint-André. La fixation sur les poteaux a été réalisée par deux demi-fusées circulaires laissant ainsi, après démontage, l'intégrité structurelle des poteaux.

Le phasage a été dicté par l'évolution des accès de chantier liés aux travaux de voirie du site. Ainsi la charpente métallique a été montée en commençant par le bloc II, suivi du bloc I, puis du bloc III, pour finir par le bloc IV.

Le phasage a été établi comme suit :

- Réalisation des fondations sur pieux et longrines associées.
- Réalisation des noyaux de circulation verticaux en béton armé assurant le contreventement d'ensemble de l'ouvrage.
- Réalisation de la charpente métallique selon le découpage en zones prévu.

7 CHIFFRES CLÉS

Dimensions

- Longueur : 1 200 m
- Largeur : 15 m

Poids

- Poteaux en profils creux tubulaires : 135 t
- Poutres transversales portant entre les poteaux en profils creux tubulaires : 465 t
- Solives droites longitudinales support des bacs collaborants : 840 t
- Solives-caissons, cintrées ou droites, localisées sur les rives du parking : 370 t
- Structures diverses telles que butons, chevêtres, etc. : 90 t

100 000 goujons Nelson permettant d'assurer la connexion entre la structure horizontale en charpente métallique et la dalle collaborante.

8 PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitrise d'ouvrage : SERM Montpellier

Bureau de contrôle : APAVE

Maitrise d'œuvre

- Architecte mandataire : Brullmann & Crochon Architectes, Jean-Luc Crochon
- Architecte associé : Atelier Patrice Genet
- Ingénieurs béton armé et corps d'état techniques : Iosis
- Ingénieurs charpente métallique : C&E Ingénierie, Jean-Marc Weill et Guillaume Ranchin
- Ingénieurs incendie : Efectis France, Roland De Cecco et Nicolas Ayme

Etudes d'exécution

- Conception/coordination des études et ingénieurs béton armé : BET SECIM, André Verdier
- Ingénieurs charpente métallique : BET ECBA, Christian Polkotycki
- Entreprise de charpente métallique : Cabrol
- Entreprise de gros-œuvre : Fondeville