

Mariage **caché** entre bois et acier

Etroitement encadrée par les tôles de couverture et les faux-plafonds, la charpente mixte en bois et acier de la toiture du Rolex Learning Center n'aura pas été visible longtemps. C'est pourtant l'association de ces deux matériaux qui a permis de suivre au mieux les formes courbes tridimensionnelles de la toiture.

Le projet initial prévoyait une charpente construite entièrement en acier. La structure principale se composait d'IPE400 courbés, reliés par des pannes courbes en IPE300 espacées de 3 m. La couverture était une tôle SP80 gauchie, qui devait reposer sur la structure à l'aide de nombreux calages.

L'entreprise *Sottas SA*, associée à *Ducret-Orges SA* pour la partie bois, a proposé comme variante à la solution entièrement métallique, une solution mixte acier-bois (fig. 1) qui offrait notamment les deux avantages suivants :

- la charpente en bois usinée est à même de reproduire exactement la courbure de la toiture, ce qui permet de renoncer aux calages initialement prévus ;
- rendu indispensable pour demeurer dans l'enveloppe prévue pour la toiture, le resserrement de l'entraxe des pannes en bois à 1,5 m au lieu des 3 m du projet original a permis d'utiliser des tôles de 26 mm d'épaisseur dont l'inertie est dix fois plus faible que celles de tôles de 80 mm initialement prévues. Sensiblement moins rigides, ces tôles sont nettement plus aptes à suivre exactement la forme de la toiture.

Cette solution, utilisant de manière optimale ces deux matériaux complémentaires, a été retenue pour les 80 % de la charpente (soit la surface correspondant à des zones courbes), les 20 % des zones plates restant naturellement avec la solution initiale entièrement en acier.

Conception de la charpente

La conception générale de la charpente pour la toiture du Rolex Learning Centre a déjà été présentée¹. En résumé,

cette charpente comprend une trame principale faite de traverses IPE400 en acier, espacées de 9 m. Ces profilés servent de support pour des pannes en acier distantes de trois mètres dans les zones plates ou en bois espacées de 1,5 m dans les zones courbes.

Les traverses reposent tantôt sur des poteaux composés de tubes ronds en acier de 127 mm de diamètre, tantôt sur les ceintures de patios réalisées à l'aide de tubes carrés en acier (RRW 260 x 260). Un système complexe de contreventements de toiture associé à 17 contreventements verticaux répartis sur toute la surface du bâtiment garantissent sa stabilité horizontale.



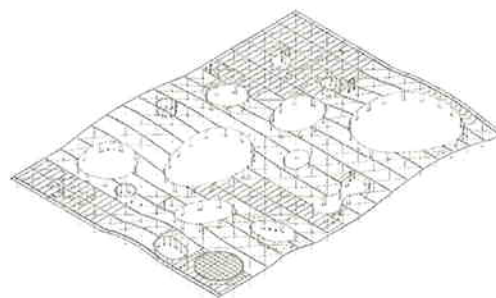
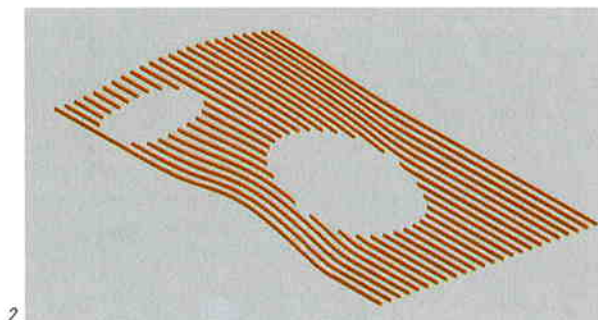
¹ Voir *TRACES* n° 12 du 2 juillet 2008

Fig. 1 : Charpente bois métal et coque

Fig. 2 : Modélisation géométrique de la charpente bois

Fig. 3 : Modélisation géométrique de la charpente métallique

Fig. 4 : Gabarit de montage pour les profilés métalliques



Modélisation géométrique

L'enveloppe spatiale allouée à la charpente est extrêmement réduite, puisque la hauteur à disposition pour faire passer les traverses (IPE400) ainsi que les pannes en bois (360 mm de hauteur pour 200 mm de largeur) avec leurs attaches était limitée à 445 mm. La modélisation géométrique des éléments en acier a nécessité de redéfinir toutes les cassures afin de s'adapter au plus près de la toiture tout en respectant cette contrainte d'épaisseur.

Dans les cas les plus extrêmes, la pente perpendiculaire à l'axe principal des IPE400 suffisait pour absorber à elle seule les 45 mm de marge entre les 400 mm du profilé et l'enveloppe à disposition. Le respect de cette dernière a de plus impliqué de segmenter presque tous les profilés. Il a ainsi fallu réaliser environ 800 cassures en plan dans les profilés IPE et plus de 500 cassures tridimensionnelles dans les profilés situés au bord des patios (fig. 5).

Pour dessiner l'ensemble de la charpente, on a commencé par modéliser sa partie métallique, y compris les 1800 attaches prévues pour les 900 pannes en bois ; il convient encore de souligner ici que chacune des attaches occupait

une position différente sur les profilés. Au terme de cette première étape, les dessins des différentes zones de la charpente métallique ont été transmis à *Ducret-Orges SA* qui a alors pu modéliser les pannes en bois en tenant compte du positionnement des attaches métalliques.

La complexité du dessin de la charpente bois est pour l'essentiel liée à la géométrie différenciée des faces supérieures et inférieures des poutres. La modélisation de cette charpente a commencé avec la définition, par le bureau d'architectes, des courbes de niveau supérieure et inférieure situées à une distance horizontale de 100 mm de part et d'autre de l'axe, afin de définir le gauchissement des poutres.

Ces courbes de niveau ont été livrées sous forme de polygones et ont pu être utilisées comme frontière pour la génération de solides qui respectent la géométrie définie. Ces solides 3D constituent les éléments bruts à la base de la définition du dessin final des pannes en bois (fig. 2). Ils ne tiennent pas encore compte de l'interaction avec la charpente métallique. Il a donc encore fallu les intégrer dans le plan de charpente métallique afin de définir les coupes d'extrémités ainsi que les assemblages, les chevêtres et les percements techniques.

Le modèle 3D finalement obtenu a ensuite été envoyé au bureau d'architecte pour un contrôle final de la géométrie visant à s'assurer que les diverses manipulations effectuées sur les courbes de niveau de base (polyligne-splines-solide) n'aient pas affecté le respect des tolérances.

Une fois ces éléments en bois intégrés au modèle, celui-ci est retourné chez *Sottas SA* afin d'être complété avec les contreventements métalliques horizontaux, qui devaient être plaqués juste sous les pannes en bois (fig. 3).

C'est ainsi que, rien que pour la structure métallique, plus de 2 000 heures de dessin ont été nécessaires pour modéliser et réaliser les plans d'atelier des quelque 16 800 pièces de débitage (3 900 positions différentes) composant les 3 470 pièces de montage (1 520 différentes) de cette structure de 500 tonnes.



Fig. 5 : Vue de la charpente en bordure d'un patio

Fig. 6 : Fabrication des pannes en lamellé-collé

Fig. 7 : Usinage des pannes en bois

Fabrication de la charpente en acier

La complexité de la structure métallique, qui se caractérise notamment par le nombre très élevé de pièces différentes et par les cassures imposées par la forme architecturale du bâtiment, a bien sûr imposé de définir des détails aussi simples que possible et de chercher à simplifier autant que possible le travail à l'atelier. On a par exemple essayé d'utiliser toujours les mêmes détails pour les goussets d'attaches des pannes en bois, qui étaient ensuite soudés à des hauteurs ou selon des angles différents.

Des gabarits de montage ont dû être créés pour chacune des différentes pièces, ceci aussi bien pour les profilés IPE cassés (fig. 4) que pour les tubes constituant les ceintures de bord de patios. Pour les cassures dans les IPE, l'âme et une seule aile ont été découpées, pliées et ressoudées, afin d'éviter la soudure de la seconde aile à chaque cassure. Ces efforts n'ont toutefois pas suffi à empêcher de franchir allègrement la barre des 10 000 heures de main d'œuvre pour le façonnage de quelque 500 tonnes de charpente.

Pannes en bois

La fabrication de la charpente bois s'est effectuée en suivant les principes utilisés pour la génération du modèle géométrique 3D. Chacune des quelque 950 pannes étant différentes, elles ont été classées par famille de courbes pour procéder à la fabrication du bois lamellé-collé. Chacune des familles est définie en fonction de la géométrie de la pièce. Pour chacune de ces familles, un gabarit est monté à l'échelle 1:1 afin de fabriquer les éléments cintrés en lamellé-collés (fig. 6).

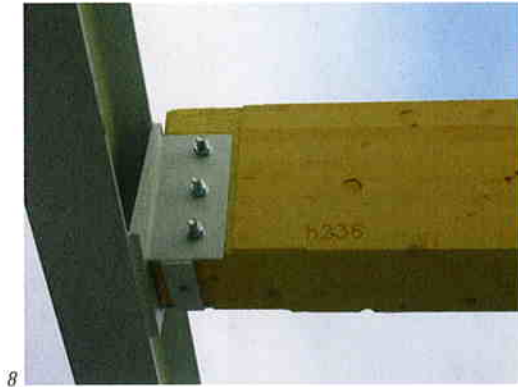
Chaque pièce se voit alors attribuer un nom qui la relie à sa position selon les axes principaux. Cette dénomination est ensuite doublement utilisée, d'une part pour l'usinage des pièces, d'autre part pour le suivi du chantier. Elle sert ainsi de référence lors de la définition des caractéristiques de l'usinage de chaque pièce individuelle : un programme machine (CNC 5 axes) est généré afin d'effectuer les usinages nécessaires, à savoir essentiellement les percements des assemblages et le façonnage définitif des faces inférieures et supérieures. Chaque élément est alors positionné sur la machine CNC en fonction de sa famille de courbe et la pièce est usinée (fig. 7). Ensuite, ce principe de dénomination étant utilisé systématiquement, il rend aisé le repérage des pièces lors du montage et permet aussi de retrouver facilement une éventuelle erreur de positionnement ou de fabrication.

Il faut enfin souligner que, à la demande de l'entreprise générale, la totalité du bois utilisé dans la charpente est du bois PEFC d'origine suisse.



Fig. 8 et 9 : Détail de fixation des pannes en bois

Fig. 10 : Vue d'ensemble de la charpente avec les contreventements



Détails

Les détails de construction pour la liaison entre l'acier et le bois (pannes / traverses) sont assez simples. Il s'agit de goussets doubles pour les pannes simples qui ne sont pas soumises à des efforts de traction ou de compression (fig. 8) et de plaques frontales pour les pannes faisant partie des contreventements, avec des tiges d'ancrages scellées dans le bois (fig. 9).

Un prototype à l'échelle 1:1 d'une zone de 18 m x 9 m de la charpente a été fabriqué et monté un mois avant le début de la fabrication de la structure définitive du Rolex Learning Center, pour améliorer et finaliser ces détails, notamment au niveau des tolérances d'exécution et de certains détails d'aide au montage.

Les principaux défis pour la réalisation des détails n'étaient pas directement liées à la connexion entre l'acier et le bois, mais plutôt à l'enveloppe très fine disponible entre les tôles de toiture et les faux plafonds, un espace restreint qui a parfois nécessité des détails complexes. Les éléments de structure métallique qui resteront visibles (le *Multipurpose Hall* ainsi que tous les contreventements verticaux) ont également nécessité des détails parfois compliqués, ceci afin de cacher au mieux les attaches et de ne laisser qu'un minimum de la charpente métallique visible (la partie en bois sera essentiellement cachée à l'état final).



Montage

Le dernier élément clé pour les entreprises de charpente concernait le montage sur le chantier. Il a d'abord été décidé qu'une seule entreprise se chargerait de l'intégrité du montage de la charpente, tant pour la partie acier que pour la partie bois. Ce choix se justifie par le fait que les interactions entre la structure en acier et celle en bois étaient trop importantes pour envisager l'engagement rationnel de deux équipes de montage différentes.

Une première difficulté concernait les montages devant avoir lieu dans les zones en pente. Cette difficulté a été résolue sans grand problème par l'utilisation de nacelles de type araignée (fig. 11), qui ont parfois dû être calées dans les fortes pentes.

Un autre point, bien plus critique, tenait à la difficulté d'avoir des points fixes pour le montage de la charpente, puisque celui-ci devait s'effectuer sur une zone en mouvement (coques en béton). Le fluage du béton, auquel venaient s'ajouter des déformations dues aux variations de température, empêchait de disposer de repères fixes. La solution la plus évidente aurait consisté à procéder à ce montage avant le décoffrage des dalles, mais il a finalement fallu y renoncer pour des raisons de planning.

C'est ainsi qu'un géomètre a effectué des relevés de chaque point d'appui de la charpente avant le décoffrage des coques afin de pouvoir quantifier et tenir compte des imprécisions du béton. Tous les poteaux de la charpente ont ensuite été fabriqués à partir de ces relevés.

A noter enfin que les poteaux ont systématiquement été montés dans un état « déformé », afin de tenir compte du fluage des coques et avec pour but d'obtenir la forme de la toiture voulue par l'architecte à l'état définitif.



La dernière difficulté à signaler concernant le montage de la charpente tient aux délais imposés pour sa réalisation. Ces impératifs nous ont contraint à démarrer le montage dans les trois zones planes situées aux extrémités du bâtiment, les zones sur la coque en béton ayant démarré ultérieurement. Une contrainte qui accentuait considérablement les exigences de précision afin d'éviter tout problème lors des raccords entre les diverses zones.

Vincent Haesler, ing. civil EPF, dr ès sc. techniques
Sottas SA, Constructions métalliques
Rue de l'Industrie 30, CH - 1630 Bulle

Jean-Marc Ducret, ing. civil EPF, dr ès sc. techniques
Ducret-Orges SA, Charpente en bois lamellé-collé
CH - 1430 Orges



TRAVAUX SPÉCIAUX
TIRANTS D'ANCRAGE
FREYSSIBAR



ETAYAGE MEGASTEEL
VÉRINS PLATS



PRÉCONTRAINTÉ



Moudon - Zürich - Bellinzona

