

Mixité bois-métal pour les auvents de péage sur l'autoroute Paris-Lille

Antoine PERCEVAL
Ingénieur ENISE-CHEM
Cabinet JAILLET ROUBY
FR-Orléans



Thomas DELBAERE
Ingénieur ENSTIB - CHEB
INGEBOIS STRUCTURES
FR-Douai



Gilles BEGUIN
Architecte ENSAIS
SCP BEGUIN & MACCHINI
FR-Paris



1. Un concours d'architecture

Le projet est issu d'un concours d'architecture lancé par la SANEF à l'été 2010 dans le cadre du plan de relance/engagements verts pour la rénovation de deux barrières pleine voie sur l'autoroute A1 entre Paris et Lille.

Il s'agissait de remplacer sous circulation des auvents abritant les opérations de péage, à l'entrée nord de Paris pour la gare de Chamant, et au sud de Lille pour la gare de Fresnes-les-Montauban. Un 3^{ème} remplacement d'auvent a été adjoint au programme initial, celui de la gare de Chevières en sortie de Compiègne ouest.

Sanef souhaitait de nouveaux ouvrages « modernes, légers, avec une impression de transparence, esthétiques, mais non ostentatoire », exprimant la fluidité du péage sans arrêt à 30 km/h, afin d'augmenter la qualité de service et le confort des usagers tout en réduisant la consommation de carburant.

Le projet est déterminé par des contraintes fortes tant techniques qu'architecturales :

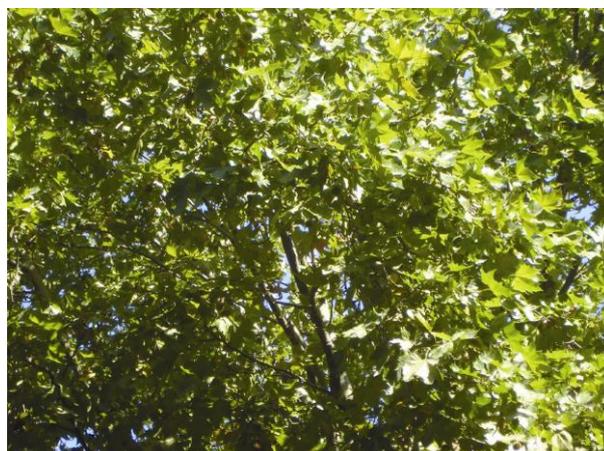
- A Chamant, la gare étant située à proximité de monuments historiques, l'architecte des bâtiments de France exigeait un ouvrage discret et de faible hauteur.
- Les nouveaux auvents étaient à poser par tronçons, de nuit entre 21 h et 5h du matin, sans coupure de la circulation,
- La configuration de la plate-forme de péage étant maintenue, les points d'appui des auvents étaient imposés sur une trame non régulière. Ils devaient de plus tenir compte des équipements de péage positionnés sur les îlots

Notre proposition a cherché à tirer parti de ces fortes contraintes, en assumant cette irrégularité de façon à donner une *liberté expressive* à la structure.

1.1. Expression de la structure

A partir du programme qui demandait « légèreté et fluidité, transparence, modularité », l'espace du péage a été conçu comme une ligne de « frondaison », à luminosité modulée, s'inscrivant dans les paysages de l'Oise pour la gare de Chamant, et du sud de la région Lilloise pour celle de Fresnes Montauban. Dans un souci de légèreté et de quasi effacement, la couverture des auvents est constituée d'une membrane transparente en ETFE qui se fond dans le ciel. Elle est supportée par une charpente mixte acier/bois la moins prégnante possible, rappelant la structure d'un arbre :

- un tronc encastré en pied, à inertie variable,
- supporte des branches principales tubulaires sur lesquelles sont fixés de petits éléments répétitifs finement ramifiés pour la mise en tension de la membrane, rappelant la structure d'une feuille.



L'acier a été employé pour les ossatures principales, afin d'en minimiser l'encombrement, notamment au niveau des appuis sur l'îlot. Les structures métalliques sont laquées brun mat de façon à s'effacer visuellement.

Le bois est mis en œuvre pour les structures support de couverture, requis pour sa légèreté et son aspect, en harmonie avec le paysage rural et forestier des abords des gares.

Cette recherche de légèreté, démarche bionique s'inspirant de la nature pour la conception des structures, reprend l'idéal gothique d'allègement des ossatures porteuses pour faire pénétrer le maximum de lumière dans le volume abrité. Cette lumière naturelle sera tempérée par les lattis bois qui formeront une véritable ombrière sous le voile transparent de la couverture.

Cette conception a permis de réduire au minimum la hauteur globale de l'ouvrage en le limitant à deux mètres d'emprise, accentuant son caractère horizontal.

Nous avons dessiné un bord d'attaque des auvents souple et non rectiligne de façon à s'inscrire en douceur dans le paysage – rappelant une lisière de boisement, et à créer des repères visuels pour les usagers en approche du péage pour ces deux gares très étendues. Ce dispositif a permis d'autre part de gérer la géométrie globale des auvents, avec une pose fractionnée de tronçons sur plusieurs mois sans possibilité de réglage sur l'ensemble du linéaire parfois très important/ 160 ml pour l'auvent de Chamant.

L'emploi raisonné de matériaux sains, naturels et recyclables, employés pour leur capacité propre, nous a permis de satisfaire aux exigences du plan de relance de SANEF, dit plan « vert », par une conception optimisée et légère limitant la quantité de matière à mettre en œuvre, et par le souci de limiter les dépenses d'énergies tant en construction qu'en exploitation.

1.2. Ambiance lumineuse

La couverture de l'auvent, réalisée à partir d'une membrane transparente, laisse pénétrer le jour la lumière naturelle. Cet apport est tempéré par le lattis de la structure bois formant « ombrière » en particulier côté sud afin de créer une ambiance intérieure sous l'auvent douce et confortable, et sécurisante pour l'utilisateur.

La nuit, la membrane laisse passer l'éclairage général de la plate-forme, créant un halo diffus et progressif dans le volume du péage. Des projecteurs de 70 W à basse consommation éclairent spécifiquement la zone de transaction. Ce dispositif va dans le sens du développement durable en profitant pleinement des apports de lumière naturelle et réduisant les besoins d'éclairage électrique.

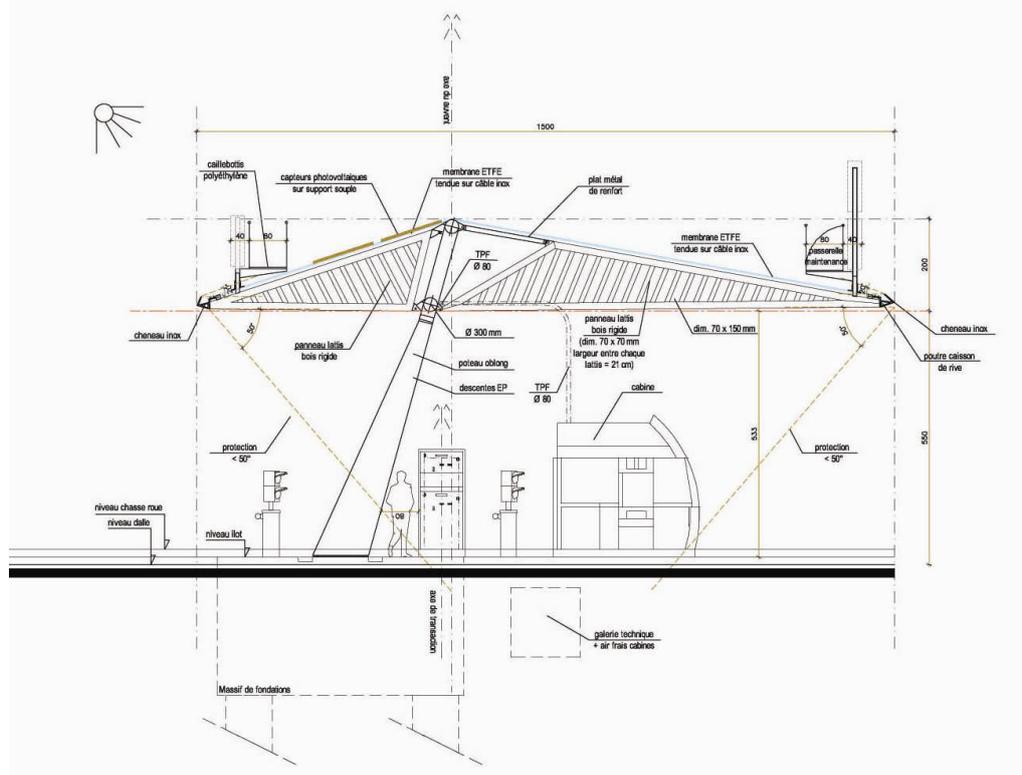


Illustration 1: Coupe sur auvent

1.3. Image du péage

L'architecture de ces auvents de péage se refuse à toute monumentalité gratuite.

Il nous semble au contraire que le péage ne doit plus être vécu comme un arrêt, une gêne sur le parcours, mais plutôt comme un espace frontière, un repère synonyme de sécurité et de sérénité. Par sa légèreté, le péage exprimera bien la demande de fluidité et de mobilité du programme.

Au-delà d'une volonté d'affichage politique et stratégique qui s'établit entre les différents moyens de transports, nous proposons de réelles améliorations, déterminantes pour le cadre de vie, pour la protection des sites et des ressources naturelles :

- Par une conception rationnelle issue du calcul, des propriétés des matériaux utilisés dans leur capacité propre, et du jeu des forces mises en jeu :
 - o flexion et torsion dans le métal,
 - o compression dans le bois,
 - o encastrement du pied de poteau.
- Par l'utilisation d'une couverture très légère et performante, qui a permis de concevoir une structure porteuse économe. Le poids propre de la couverture est en effet très faible et ne nécessite pas d'ossature secondaire puisque la membrane est directement tendue sur 4 côtés entre les membrures et les poutres de rives de la charpente. La quantité de matière à mettre en œuvre (acier, bois, & béton des fondations) est ainsi optimisée, réduisant les coûts de matière et d'énergie pour leur production (ECO CONSTRUCTION). L'emploi du bois permet de plus de stocker du CO2.
- Par l'emploi d'un matériau innovant, auto-nettoyant et pérenne, nécessitant peu de maintenance. La matière première qui n'est pas un dérivé du pétrole, est agréée par le Traité de Montréal. Le processus de production est un processus clos à base d'eau, sans utilisation de solvant. Le Texlon est d'autre part recyclable et de nombreux composants sont produits à partir des matières recyclées. Il n'est affecté ni par la pollution atmosphérique ni par les rayonnements UV. Le matériau ne durcit pas, ne jaunit pas, et ne se détériore pas avec le temps.
- Le matériau de couverture étant transparent, il réduit les besoins en énergie électrique pour l'éclairage. La mise en route de l'éclairage de nuit sera d'autre part modulée en fonction des besoins de façon à réduire les consommations.
- La conception générale du péage permet d'intégrer dès la conception le cycle de fin de vie, L'ensemble de la structure pouvant être démontée facilement pour être récupérée et recyclée y compris la membrane ETFE, grâce à la traçabilité des matériaux mis en œuvre.

1.4. Une démarche en co-conception

Dans le cadre de la gestion de la qualité et du management de projet, cette opération a permis d'intégrer dans une même démarche des pratiques d'ingénieurs et d'architectes, dans des actions concourantes et convergentes, et non additives, gage d'optimisation des solutions techniques mises en œuvre.

Le résultat est issu d'une vraie co-conception avec nos deux ingénieurs, un travail collégial à « plusieurs mains ».



Illustration 2 : Gare en pleine voie de Chamant



Illustration 3 : Gare en pleine voie de Fresnes

2. Bet métal : Cabinet JAILLET-ROUBY

La structure métallique constitue l'ossature principale de l'ouvrage. Elle s'identifie comme « la colonne vertébrale primaire » reprenant l'ensemble des sollicitations qui agissent sur la toiture des auvents pour les transmettre aux fondations.

Les premières contraintes se situent à propos de l'implantation des poteaux principaux porteurs et de la conception de l'auvent en termes de trames structurales. Cette implantation est liée de manière globale dans la répartition des portées mais aussi localement au travers de la position du poteau sur l'îlot de circulation. En effet, un travail particulier est nécessaire sur la section du poteau qui est optimisée avec l'Architecte pour les passages de réseaux en pied, la circulation sur l'îlot et l'encombrement de l'ancrage.

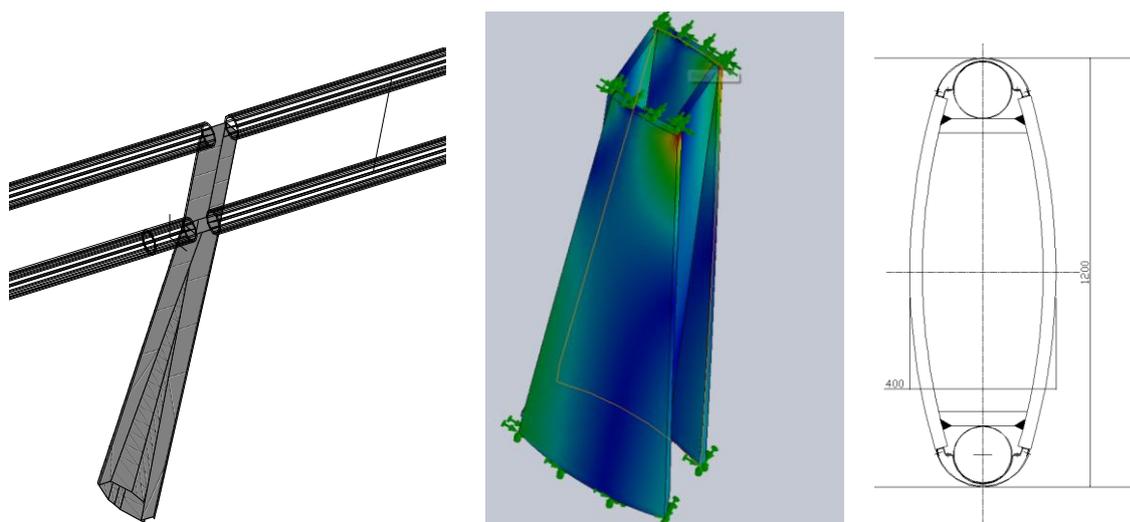


Illustration 4 : Extraits – modélisation du poteau
calcul 3D Hergos – calcul 3D SolidWorks – section en pied.

Les ouvrages ont été modélisés sous le logiciel **HERGOS** (qui utilise le noyau de calcul **HERCULE** de SOCOTEC) développé par le cabinet **JAILLET-ROUBY** pour les éléments aciers et bois (éléments finis barres) et vérifiés suivant les règles Eurocodes EN. Le modèle global de calcul bois + acier a permis de produire le dimensionnement des ouvrages mais également d'assurer les échanges de données pour le calcul des fondations et des structures bois. En particulier, les exports des efforts par type de barres bois ont été réalisés pour le dimensionnement et la vérification des trièdres bois par le bureau d'étude **INGEBOIS**.

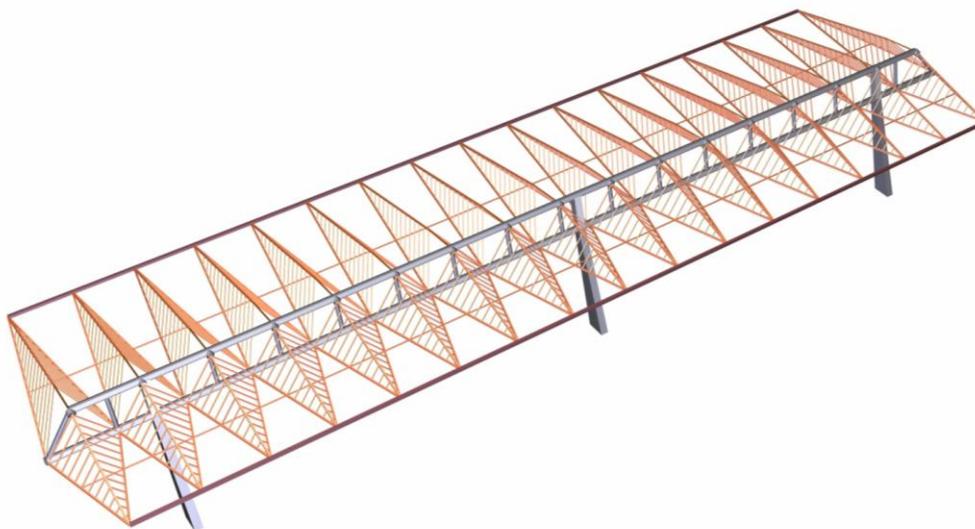


Illustration 5 : Calcul 3D Hergos – acier et bois

JAILLET ROUBY et **INGEBOIS** ont réalisé des itérations pour faire converger ce modèle global dans le cadre des évolutions des sections mais aussi de la conception des assemblages. En effet, la collaboration des deux spécialités a été indispensable pour s'assurer que les interfaces acier bois soient en phase tant sur la géométrie que sur les conceptions des nœuds de structure pour la bonne diffusion des efforts.

Pour les éléments comprimés bois principaux, un calcul spécifique de stabilité (flambement Eulerien sur modèle global) a été réalisé afin de confirmer les coefficients de flambements pour les vérifications en stabilité des sections bois de la sous face de la toiture des auvents.

La partie acier est composée de poteaux caissons inclinés qui supportent des poutres treillis en « V » totalement réalisées en section tubulaire (diagonales et membrures) soudée. Les joints et raccords sur les poteaux sont réalisés par boulonnage.

Les poteaux sont espacés tous les 20 m et assurent la stabilité totale de l'auvent par encastrement complet sur la fondation (moment de 400 T.m ELU env.). Dans le sens transversal des gares, la structure est de type portique bi-encasté (en pied et en tête de poteau).

Pour reprendre l'ensemble des sollicitations et vérifier la structure conformément aux règles EN, la section du poteau conçue en caisson est constituée d'âmes cintrées ép. 15 mm et de semelles ép. 60 mm pour des aciers de nuance S355. Le pied de poteau a été travaillé de manière à ce que la section fermée caisson passe progressivement en section ouverte type PRS en « I », ce qui répondait aux exigences du client pour l'accès en pied dans le cadre de la surveillance des ouvrages (platine d'ancrage ép. 120mm). A noter que le changement de section a joué un rôle favorable pour la gestion des efforts de température sur le comportement de l'ouvrage (variation et gradient de température). Pour les gares de Fresnes Les Montauban et Chevrière, la structure des auvents est continue. Pour la gare de Chamant (env. 180m), l'introduction du joint de dilatation a été nécessaire.



Illustration 6 : Extrait – en cours de montage

Les pressions de vent ont été déterminées suivant la partie 1-4 de l'EN 1991-1-4 (rugosité 1) prenant en compte plusieurs situations de trafic en présence sur la barrière de péage. Les calculs de vents à l'Eurocode ont montré que ces cas de charges sont prépondérants et en conséquence donnent dans les combinaisons de calcul des effets déterminants pour le dimensionnement.

La mixité bois acier a été abordée dans le cadre d'une collaboration continue Architecte-Ingénieurs pour appréhender le comportement des deux matériaux qui assurent pour chacun un rôle structurel principal. La mixité n'est pas seulement une ligne interface, mais plus précisément un mariage des deux matériaux ; pour exemple dans la structure des portes à faux, certaines barres des trièdres sont mixtes aciers/bois en tant qu'éléments supports de la toiture ETFE et des équipements signalétiques.

Tonnage (valeur DCE) :

Chamant :	240 T
Fresnes les Montauban :	200 T
Chevrière :	80 T

3. Conception de la structure bois : INGEBOIS

3.1. Contexte d'intervention du BET INGEBOIS STRUCTURES

Nous sommes initialement intervenus en phase concours, suite à la demande commune de Gilles BEGUIN et d'Antoine PERCEVAL, pour un pré dimensionnement de la partie bois de la structure des auvents. Ce travail d'esquisse a été à l'époque réalisé selon les normes françaises (règles CM66 pour le métal et règles CB71 pour le bois).

Le projet présenté par l'agence BEGUIN MACCHINI ayant finalement été retenu par la SANEF, nous avons finalement intégré l'équipe de conception.

3.2. Retour sur la conception commune

Les auvents étant des ouvrages mixtes acier-bois, la mise en œuvre d'un modèle de calcul global est apparue comme obligatoire. L'utilisation d'un code de calcul commun s'est également rapidement imposée ! Les Eurocodes, nouveaux codes de calcul Européens, ont donc été retenus pour la conception de ces ouvrages.

Le modèle de calcul global a été réalisé par le cabinet JAILLET ROUBY sur le logiciel HERGOS (logiciel métier spécialisé structures métalliques). De nombreux échanges ont permis de récolter toutes les informations nécessaires afin de bâtir ce modèle :

- Epure de la charpente métallique (principes de conception d'ensemble, de stabilité, géométrie, etc.)
- Epure de la partie bois (principes de conception d'ensemble, de géométrie, etc.)
- Prise en compte de toutes les contraintes inhérentes au projet (mode d'accrochage et points d'accroche de la couverture en membrane ETFE, etc.)
- Définition des liaisons communes acier-bois (relaxations)
- Définition des liaisons internes propres à la structure bois (relaxations)
- Définition des caractéristiques mécaniques des éléments bois (catégorie des bois, essence, masse volumique, modules d'élasticité et de cisaillement, etc.)

Ce modèle de calcul, une fois validé, a pu être exploité et nous avons pu chacun de notre côté :

- Avoir une analyse globale du comportement d'ensemble de la structure projetée (déformées, contraintes, longueurs de flambement, etc.),
- Dimensionner et concevoir la partie de structure dont nous étions en charge.

Les échanges réguliers entre nos deux bureaux d'études ont très vite permis d'agir en conception sur certains paramètres fondamentaux et ceci afin de respecter l'objectif du projet : créer une structure légère et aérienne, faite d'acier et de bois.

Certains points particuliers ont fait l'objet d'une étude approfondie afin d'atteindre cet objectif : c'est par exemple le cas des longueurs de flambement des membrures inférieures des trièdres bois qui ont dûes être limitées afin de pas obtenir sur ces barres des sections trop importantes incompatibles avec l'esthétique du projet.

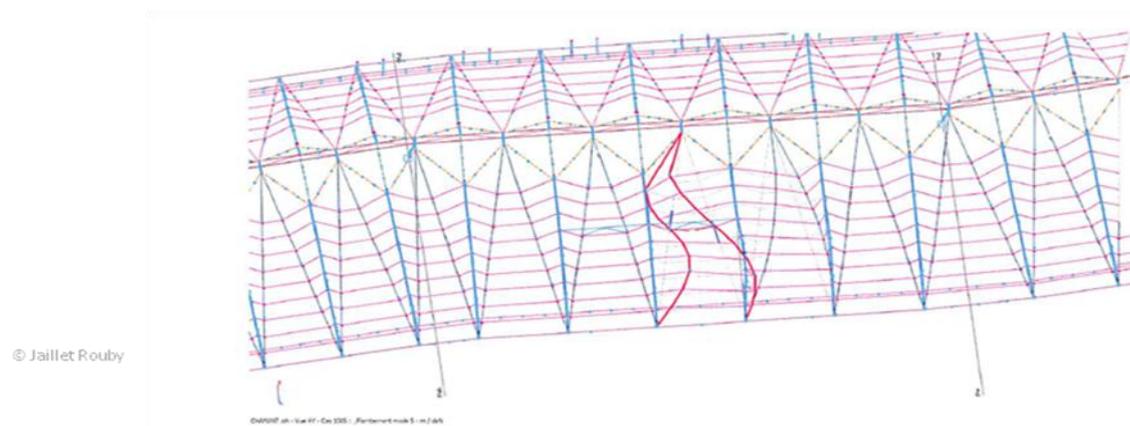


Illustration 7: Etude spécifique des modes de flambement des membrures inférieures des trièdres bois - © cabinet JAILLET ROUBY, extrait du logiciel HERGOS.

La conception des assemblages acier-bois et bois-bois a également fait l'objet d'un travail commun entre l'architecte et les ingénieurs, et ce dès l'avant-projet avec pour objectif d'intégrer au mieux ces assemblages dans l'esthétique générale du projet.

3.3. Conception de la partie « structure bois » des auvents

La conception d'un « joli meccano » :

Compte tenu de la forte technicité des ouvrages projetés, il est apparu évident à toute l'équipe de maîtrise d'œuvre et ce tout au long de la phase de conception que les deux parties de structure allaient être fabriquées séparément par deux entreprises spécialisées chacune dans leur domaine avant d'être réunies, assemblées. Oui, nous étions face à une problématique d'assemblage de deux composants fabriqués sur des sites différents.

Pour des questions de transport et de logistique, l'assemblage se ferait sur site avec en plus une problématique de place (aire de montage pas plus grande que les parkings de l'aire d'autoroute mise à notre disposition...) et de plannings assez serrés...

Les concepteurs que nous étions étions alors face à un défi de taille : en considérant chacun les spécificités de notre matériau, il nous fallait échanger, dialoguer, imaginer ensemble comment rendre possible, facile, pratique la rencontre, l'assemblage des nos deux parties de structures respectives... Il nous fallait imaginer ce « joli meccano » !

Afin de répondre parfaitement aux exigences techniques imposées par la conception du projet comme la précision dimensionnelle des éléments, la qualité dans la fabrication malgré la très grande répétitivité ; un taillage à l'aide de machine numériques a été exigé. Les éléments taillés ont été ensuite pré assemblés en atelier, formant ainsi des « triangles » transportables à plat sur un camion « courant ».

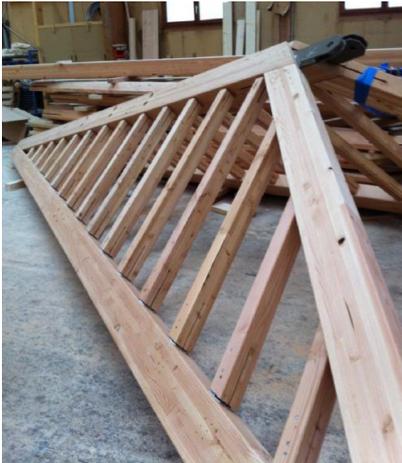


Illustration 8 : « Triangle » bois préassemblé en atelier, prêt à être expédié.

Une fois les éléments bois livrés sur l'aire de montage, arrive l'opération d'assemblage entre le bois et l'acier. Afin que cet assemblage entre la partie acier de la structure et la partie bois soit le plus simple et le plus pratique possible, l'équipe de conception a étudié et défini dès l'avant-projet des principes de raccord acier-bois simples de fabrication et de mise en œuvre, tenant compte des moyens à disposition sur site et maîtrisés par les entreprises en charge de la fabrication des deux parties de la structure. Cette anticipation dès l'avant-projet a finalement permis au « joli meccano » de se monter rapidement et sans trop de difficultés.



Illustration 9 : Assemblage structure bois sur structure acier.

Le dimensionnement des éléments en bois lamellé collé :

Après avoir bâti le modèle de calcul global avec le cabinet JAILLET ROUBY, il nous fallait l'exploiter afin de déterminer précisément la section des éléments en bois. Au regard des efforts à transmettre dans ces éléments bois, le choix du bois lamellé collé s'est vite imposé :

- Sections et longueurs plus importantes,
- Stabilité dimensionnelle,
- Performances mécaniques mieux maîtrisées que le bois massif.

Etant donné le nombre de pièces de bois sur l'ensemble des trois auvents, il nous aurait été difficile de vérifier chacune de ces barres de manière individuelle. Les barres ont donc été regroupées par famille, par type de barre selon sa fonction dans la structure. Les efforts internes dans ces barres ont donc été analysés, triés (notion de concomitance). La vérification des barres a donc ensuite été réalisée sur des feuilles de calcul Excel entièrement paramétrées pour une vérification aux Eurocodes.

Cette méthode de travail a donc permis de dimensionner au plus juste l'ensemble des barres en bois LC :

- Barres périphériques des triangles en bois LC : section
- Remplissage interne des triangles en bois LC : section
- Remplissage horizontal en bois LC entre trièdres, en sous-face : section

Notre travail de conception et de dimensionnement a donc permis aux éléments bois de ne pas apparaître comme étant plus « massifs », plus « imposants » que les éléments métalliques malgré leur participation mécanique « active » à la mécanique d'ensemble de la structure.

La conception des assemblages :

Dès le départ, l'ensemble de l'équipe de conception souhaitait apporter le plus grand soin aux assemblages afin que ceux-ci participent à l'esthétique globale du projet.

Ces assemblages devaient également répondre aux diverses contraintes suivantes :

- Etre adaptés aux petites sections de bois,
- Limiter les jeux d'assemblages,
- Résister au transport des éléments bois sur site,
- Eviter toute chute d'organe d'assemblage sur les voies de circulation,
- Ne pas constituer des pièges à eau nuisibles pour la pérennité de l'ouvrage.

Les assemblages internes bois/bois des « triangles » bois préfabriqués ont été réalisés de la manière suivante :

- Ferrure en âme + broches de diamètre 10 mm dans le bois de remplissage (petites sections). Percements des broches non débouchant en sous-face afin d'éviter la chute d'un organe d'assemblage sur les voies,
- Ferrure métallique en T reprise sur les bois périphériques (grosses sections) par des vis de diamètre 8 mm (avec pré percement de positionnement)

Les assemblages bois-métal, situés aux extrémités des « triangles » bois ont été réalisés de la manière suivante :

- Tôle en âme dans le bois + broches de diamètre 12 mm avec trou non débouchant en sous-face,
- Sur la tôle en âme, mise en œuvre de deux goussets soudés reprenant en extrémité un axe d'articulation au droit de l'assemblage métal-métal fonctionnant en double cisaillement.

Ces assemblages ont fait l'objet d'une conception drainante permettant ainsi d'éviter la formation de pièges à eau pouvant éventuellement nuire à la pérennité de la structure.

En passant dessous les auvents, la plupart des assemblages demeurent invisibles, participant ainsi à l'esthétique globale du projet..



Illustration 10 : Conception drainante des assemblages bois / bois et vue de la structure par-dessous

Le choix de l'essence :

Les parties en bois des auvents sont totalement abritées puisqu'elles sont toutes situées dessous la couverture en membrane ETFE. Cependant par jour de grand vent et de par le passage des véhicules sous les auvents ; le risque d'une humidification temporaire des éléments en bois n'est pas à exclure. C'est pourquoi, les bois à mettre en œuvre devaient correspondre à une classe d'emploi 3. Se sont alors rapidement posées à nous les questions suivantes :

- Stratégies vis-à-vis de la pérennité des ouvrages et préservation des bois,
- Choix de l'essence.

La mise en œuvre d'une essence naturellement non durable associée à un traitement de préservation lui conférant une classe d'emploi 3 ne nous est pas parue judicieuse à la fois écologiquement mais aussi techniquement au regard des problèmes de compatibilité des traitements de préservation éventuellement contenus dans le bois avec les ferrures métalliques des assemblages.

Notre première sélection s'est donc naturellement portée sur les essences naturellement durables fréquemment utilisées pour la fabrication du bois lamellé collé. En France, deux essences sont fréquemment utilisées dans ce domaine :

- Le douglas,
- Le mélèze.

Le douglas est apparu comme parfaitement adapté à ce projet :

- Bois utilisable en classe d'emploi 3 lorsqu'il est purgé de son aubier,
- Bonne stabilité dimensionnelle,
- Disponibilité à un coût raisonnable,
- Disponible en quantité dans nos forêts françaises,
- Moindre impact écologique que le mélèze qui provient souvent de forêts plus lointaines,
- Responsabilité économique et sociétale : bois cultivé, scié, séché et transformé en France par des entreprises françaises...

3.4. Quelques chiffres

Voici quelques chiffres aimablement transmis par les entreprises qui ont réalisé le chantier :

- Entreprise charpente métallique (mandataire) : entreprise VIRY (groupe FAYAT).
- Entreprise charpente bois (cotraitant) : entreprise FARGEOT (groupe VINCI).

	Gare de Chamant (60)	Gare de Fresnes Les Montauban (62)	Gare de Chevrières (60)	Total
Cubage total de bois en m3				
Nombre d'éléments en bois				
Nombre de « triangles » bois				
Nombre de broches				
Nombre de boulons				
Nombre de vis				
Nombre de ferrures reprenant les « petites sections »				
Nombre de ferrures reprenant les « grosses sections »				
Temps de taillage				
Temps de pré assemblage en atelier				

4. La fabrication et la mise en œuvre





5. Le résultat final



6. Synthèse

Le travail de conception « à plusieurs mains », réalisé par l'Architecte et les deux bureaux d'études en avant-projet, a pleinement bénéficié des apports de chacun dans sa spécialité. Ce travail initié au cours de l'avant-projet a été respecté, développé et remarquablement bien exécuté par les entreprises en charge de la réalisation du projet.

La qualité architecturale et technique proposée sur ces auvents de péage apporte encore une fois la preuve que la mixité des matériaux dans la conception des structures (ici l'acier et le bois) permet d'ouvrir d'autres voies dans le domaine de la création architecturale, d'imaginer d'autres possibilités en termes d'ingénierie et de faire travailler ensemble des entreprises aux spécialités bien différentes...

Puisse cette expérience commune réussie donner à tous les intervenants de ce projet (mais aussi à d'autres !) l'envie de concevoir et de réaliser les ouvrages mixtes de demain !