Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 15/16: Porta Alpina

Artikel: Construire sans nœuds
Autor: Weinand, Yves
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99489

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Yves Weinand

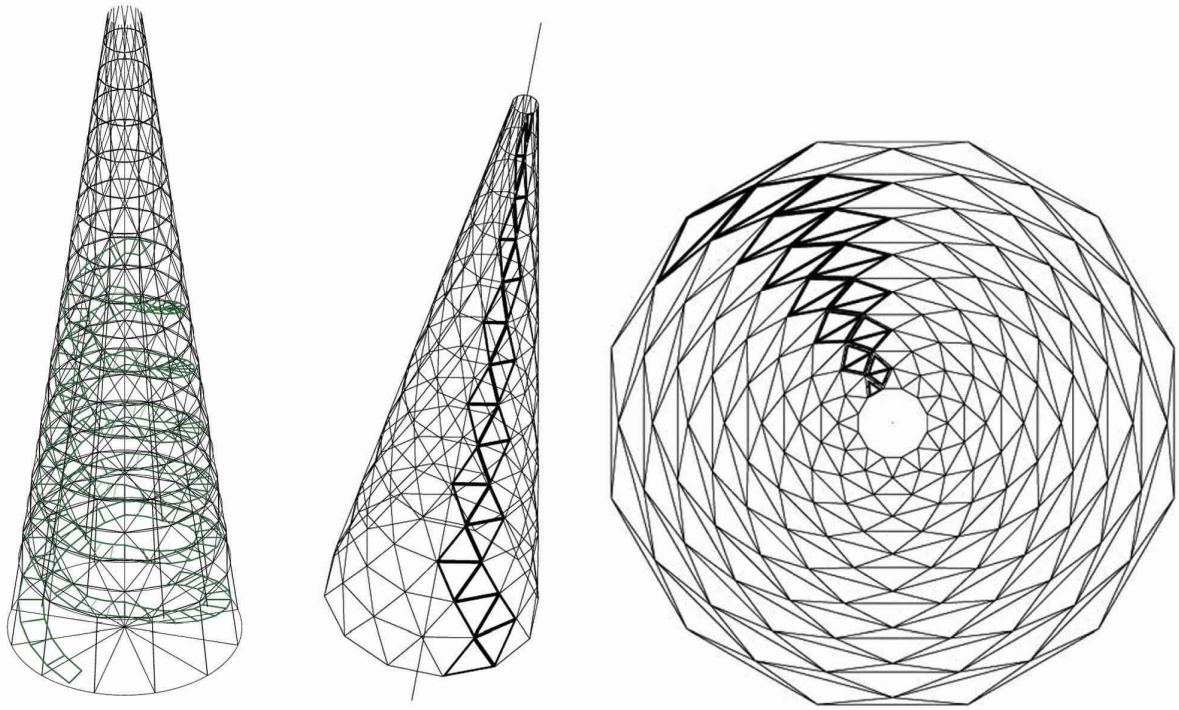
Construire **sans nœuds**

STRUCTURES

Le système de façades en verre du nouveau musée du verre à Lommel a posé des problèmes quasi insolubles à l'entreprise chargée de son exécution. Les études liées au développement d'une procédure originale pour le montage ont montré qu'il est possible de réaliser une structure métallique en supprimant les nœuds.

Le nouveau musée du verre à Lommel (Belgique) a été dessiné par Philip Samyn et Associés, auteur du projet d'architecture. Le bâtiment est composé d'un parallélépipède rectangle entièrement vitré constituant l'entrée principale du musée, ainsi que d'un cône tronqué, lui aussi entièrement vitré. Ce dernier est posé au niveau du sous-sol et traverse la toiture du parallélépipède pour constituer un point de vue à hauteur de 42 m, accessible au public par un double escalier hélicoïdal en acier (fig. 1 et 8). La stabilité d'ensemble a été vérifiée par le bureau d'études *Setesco* alors que c'est l'*Atelier du Verre* qui était chargé de l'exécution des façades en verre. L'architecte a préconisé une structure en acier tubulaire d'un diamètre de 60,3 mm ayant des épaisseurs variant de 3 à 5 mm, les détails de fixation du verre incombant à l'*Atelier du Verre*. Directeur de ce dernier, Aurelio Gangi nous a chargé de concevoir les plans issus d'une coopération étroite entre son entreprise et notre bureau d'étude.

A noter que la bonne réalisation des travaux s'est faite notamment grâce à la transmission directe des fichiers du bureau d'études vers l'entreprise chargée d'exécuter le pliage, une opération qui requiert une confiance totale entre les partenaires. La figure 7 montre un plan type qui accompagne les fichiers en format SAP directement utilisé pour le pliage et la découpe des cadres.



1

Fig. 1 : Géométrie d'ensemble de la tour, hauteur : 42 m

Fig. 2 : Composition de l'assemblage

Fig. 3 : Axonométrie montrant les tubes intérieurs, le cadre épais de 4 mm, le cadre fin de 1,5 mm et le verre

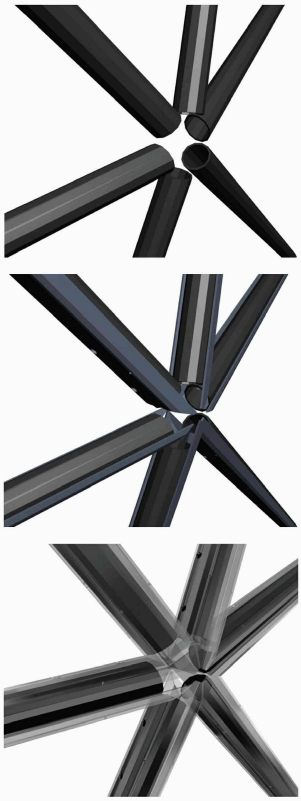
Un système original

La problématique principale réside dans le fait que la production d'éléments en verre n'admet pratiquement aucune tolérance, alors qu'ils doivent être fixés sur une structure métallique qui peut présenter des tolérances importantes en fonction du type de fixation et de la géométrie (10 mm). Ce fait peut poser de graves problèmes lors du montage. Pour contrer cette problématique, l'*Atelier du Verre* a mis au point un système de fixation du verre portant le nom de *5S* (fig. 3), lequel a obtenu un brevet européen. Le verre est d'abord collé sur un profilé pré-plié qui, lui, est clipsé sur la structure portante. Dans le cas de la tour de Lommel, le verre est collé sur un profil en inox de 1,5 mm d'épaisseur (cadre fin) qui est ensuite clipsé sur un autre cadre (cadre épais), sensé avoir les mêmes dimensions que le verre. Les cadres fins en inox doivent être fixés de façon régulière soit sur leur support portant, soit sur un cadre supplémentaire. A Lommel, on a prévu des cadres en acier inoxydables d'une épaisseur de 3 et 4 mm. Ils sont boulonnés sur des tubes qui sont quant à eux interrompus au niveau des nœuds (fig. 2). Si aucun jeu n'est admissible entre le verre et les cadres fins, le fait de clipser ces derniers sur un second système en cadres triangulaires donne un peu de jeu.

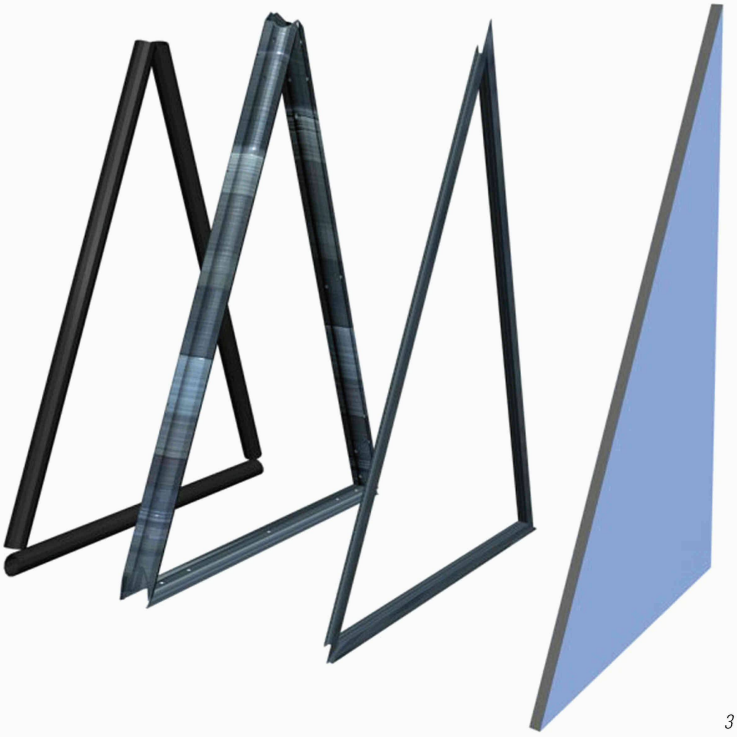
Enfin, la décision d'interrompre les tubes principaux a été prise dans un double but : faciliter le montage et reporter la problématique du jeu entre les éléments en verre et la structure métallique sur la jonction reliant les cadres épais en tôle pliée aux tubes. Par conséquent, les tubes de bases ne se rencontrent plus, ce qui conduit à une situation pour le moins particulière, puisque le nœud de la structure portante a pour ainsi dire disparu ! L'ingénieur doit alors repenser le mode de transmission des efforts appliqués sur les surfaces en verre : tout d'abord aux cadres en tôle plié (cadres épais), qui assurent ensuite leur transition aux fondations, non plus *via* des nœuds, mais par l'intermédiaire des cadres triangulaires qui sont boulonnés entre eux. Dès lors, par où les efforts sont-ils transmis ?

Analyse structurale

Plusieurs modèles de calcul dans l'espace ont dû être utilisés. Le premier est un modèle classique de barres disposées dans l'espace, utilisé pour le dimensionnement de treillis spatiaux. Il a permis de contrôler l'importance des efforts et leurs distributions sur l'ensemble de la structure. Son usage a montré que des tubes simples d'un diamètre de 60,3 mm ayant une épaisseur de 4 mm sont à même d'encaisser les efforts d'une structure initiale admettant une continuité des barres au niveau des nœuds.



2



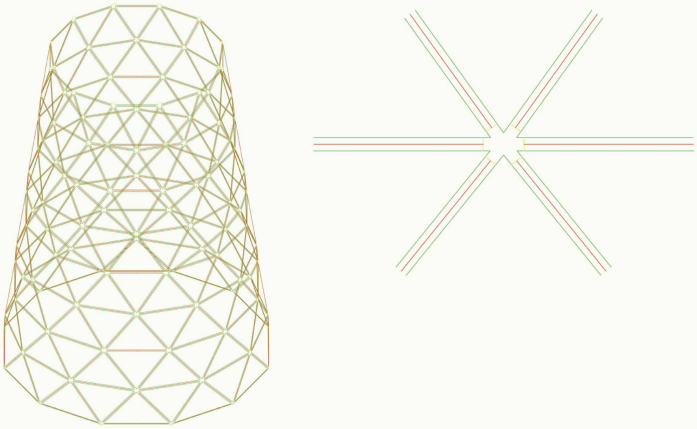
3

Fig. 4 : Modélisation de la structure en élément finis

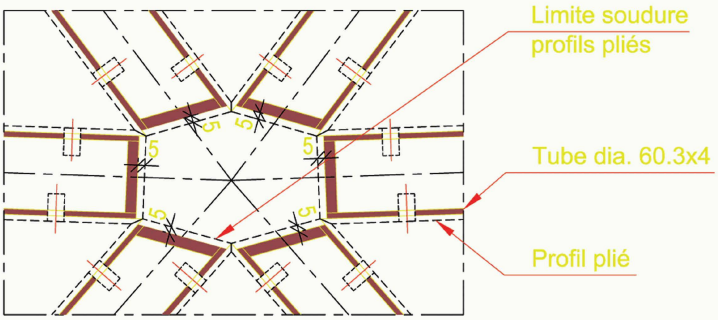
Fig. 5 : Représentation d'un nœud type soulignant l'interruption des barres

Fig. 6 : Section du profilé d'un cadre

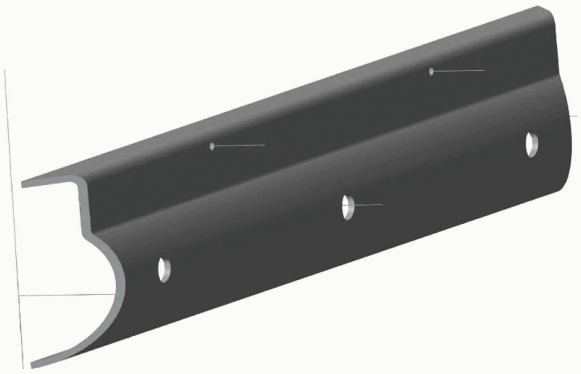
Fig. 7 : Plan type de fabrication



4



5



6

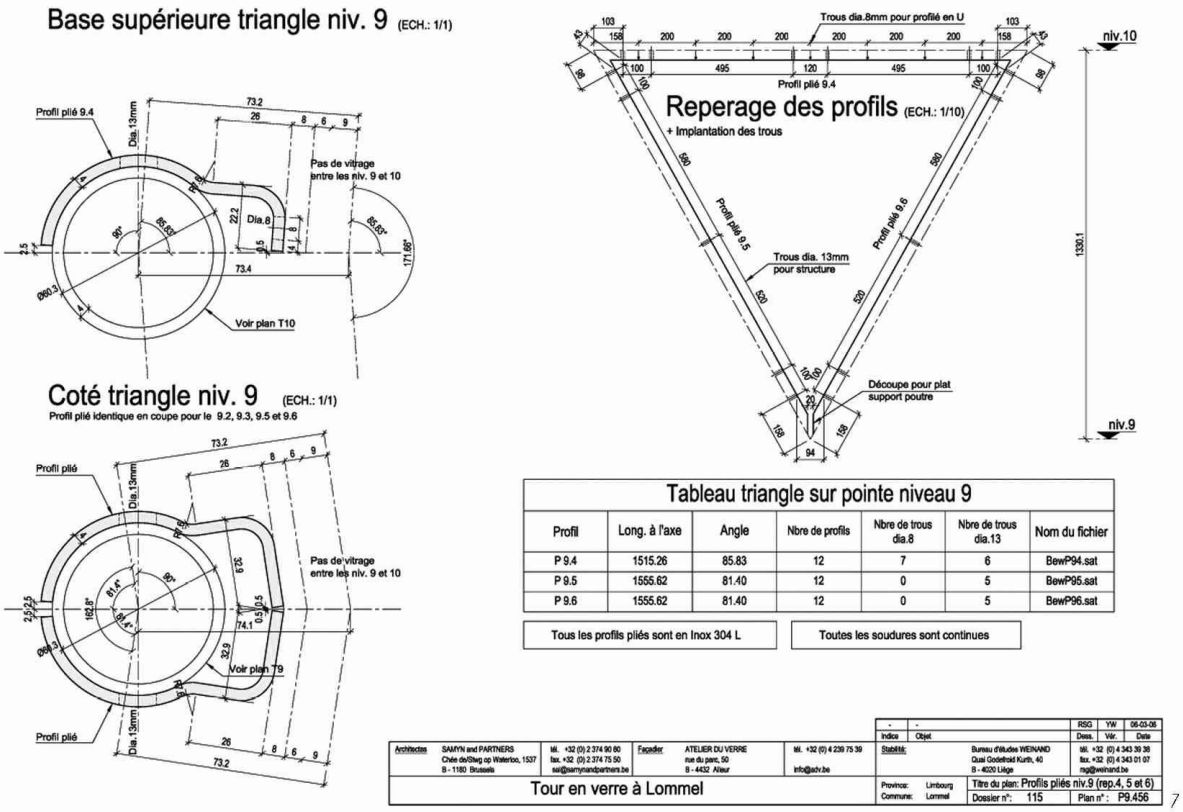
Par la suite, il a fallu définir un modèle tenant compte des éléments suivants (fig. 4) :

- tubes intérieurs interrompus au niveau des nœuds (en rouge),
- cadres triangulaires en tôle pliée de 4 mm d'épaisseur, continus aux angles,
- usage de boulons de liaison entre les tubes et les cadres.

Ce modèle a été utilisé pour le calcul de la tour dans son ensemble. Il néglige les cadres de 1,5 mm d'épaisseur ainsi que la rigidité du verre, des omissions qui le placent du côté de la sécurité. Les cadres sont modélisés indépendamment des tubes intérieurs sur lesquels ils sont fixés. La continuité des angles des cadres est ainsi garantie et, surtout, le modèle tient compte de l'interruption des tubes intérieurs au niveau des nœuds. Les vis ont été modélisées en tant qu'élément de connexion entre les cadres et les tubes. Les tubes ont été arrêtés à la hauteur de leurs connexions transversales (fig. 5).

Ce modèle a fait apparaître des moments de flexion très importants au bout des angles des cadres. Il est toutefois évident que le modèle utilisé est trop pénalisant par rapport à la réalité : les angles des cadres sont en fait quasi totalement appuyés sur les tubes intérieurs, qui ne s'arrêtent pas précisément à l'endroit du boulon, mais continuent en réalité plus loin. Une partie de l'effort transite donc par contact à proximité du nœud et non pas par flexion comme le suggère le modèle. En effet, la zone située entre le boulon et l'extrémité du cadre est soutenue par les tubes qui se poursuivent jusqu'à cet endroit.

Ce modèle de calcul a montré que les contraintes à l'état limite ultime, en modélisant précisément ces profilés ouverts à moitiés (fig. 6), restent acceptables sur l'ensemble du modèle de la structure. La problématique du voilement local des profilés pliés n'a par contre pas pu être définitivement clarifiée. Pour les efforts transitant à proximité des nœuds, les hypothèses de répartition des efforts entre une transmission par contact et une transmission par flexion n'ont pas été concluantes. Le calcul permet de déterminer correctement (par superposition) la contrainte normale maximale à la fibre extrême du profilé plié, laquelle doit rester inférieure à la résistance de l'acier. En revanche, le modèle ne permet pas une analyse correcte du voilement à proximité des angles où on se trouve en présence d'une situation géométriquement complexe : un profilé de forme courbe rencontre un profilé identique selon un certain angle ; le tout forme ainsi un système spatial présentant une rigidité locale à proximité des angles accrue, due à la présence de ces courbures.



Profil	Long. à l'axe	Angle	Nbre de profils	Nbre de trous dia.8	Nbre de trous dia.13	Nom du fichier
P 9.4	1515.26	85.83	12	7	6	BewP94.sat
P 9.5	1555.62	81.40	12	0	5	BewP95.sat
P 9.6	1555.62	81.40	12	0	5	BewP96.sat

7

Dans la partie inférieure de la tour, où les efforts sont les plus importants, une nouvelle modélisation a été faite en tenant compte d'une certaine continuité de la matière au niveau des nœuds. Cette continuité a ensuite été garantie physiquement en soudant les profilés des cadres ensemble après leur montage, transformant ainsi la section ouverte en une section semi-fermée et continue au niveau des nœuds (fig. 7). Cette modification a prouvé la possibilité de transmettre les efforts exclusivement par les tôles pliées aux endroits les plus sollicités de la partie inférieure.

Essais en laboratoire

Cette approximation qui plaçait le modèle trop clairement du côté de la sécurité n'étant pas satisfaisante, la décision a été prise d'effectuer des essais au Laboratoire de mécanique des matériaux et structures de l'Université de Liège. L'essai retenu avait pour but de soumettre une structure métallique – constituée de tubes sur lesquelles viennent se fixer des tôles pliées en inox – à deux efforts de 80 kN afin de solliciter un nœud d'assemblage (fig. 10). Les tubes de la structure sont toujours interrompus avant le nœud, ce dernier étant alors « constitué » par le soudage entre eux de caches en inox.

On a réalisé une première montée en charge jusque 160 kN correspondant aux deux forces de 80 kN. A partir de 50 kN, on a constaté une mise en place de la structure, qui se traduit par le déplacement des appuis du fond et celui des fixations latérales. Après déchargement, les jauges sont revenues à zéro. On a alors réalisé une seconde montée en charge,

Le nœud en ingénierie structurale

Les ouvrages du génie civil sont souvent basés sur la mise en place d'éléments linéaires et prismatiques. Par la suite, un certain nombre de recherche ont été menées sur les détails et les connexions entre ces éléments. A ce titre, de nombreux ouvrages traitent de la question du nœud, plus particulièrement dans le contexte des structures spatiales. L'ouvrage de Heino Engel (« Tragsysteme », DVA, 1975) fait référence en la matière.

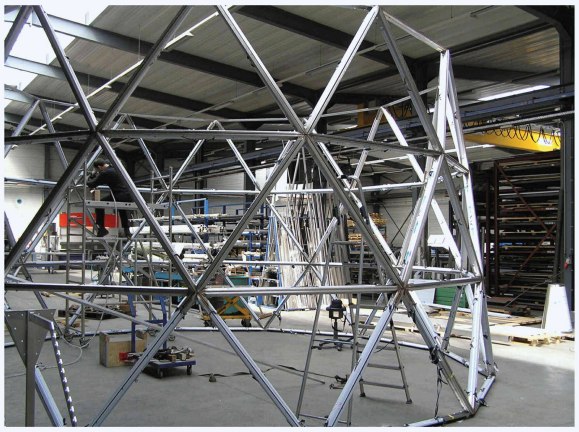
Curieusement, l'ingénieur civil n'a que très rarement remis en question le principe du nœud. Dans l'histoire de la structure métallique, il est intéressant de constater que l'expression constructive du nœud est clairement cataloguée. On part d'un élément sur lequel on vient fixer les barres d'un treillis, par exemple. Classiquement, il s'agit d'un gousset ou d'un plat, cela peu prendre la forme d'une sphère ou d'un crampon mais il existe finalement toujours un élément physique incarnant le nœud. Ces nœuds ont toujours joué un rôle important et... problématique, puisque le nœud correspond souvent à une zone affaiblie de la section courante.

Une conception permettant d'éviter purement et simplement le nœud mérite donc d'être examinée. A Lommel, on assemble de simples triangles. Le point de départ est un triangle (ou une multitude de triangles) et non pas une maille. Localement, la matière n'est pas continue à l'endroit des nœuds (puisqu'il s'agit d'une multitude de triangles indépendants). La matière d'un nœud classique est donc supprimée au profit d'un fonctionnement structurel surfacique dans l'espace.

Cette façon de faire questionne une logique structurelle basée sur l'utilisation d'éléments prismatiques (ainsi que leurs connexions) au profit d'une logique structurelle basée sur l'assemblage de triangles le long de leurs arrêtes, impliquant un comportement structurel dans l'espace.

Fig. 8 : La tour construite
Fig. 9 : Prémontage en atelier
Fig. 10 : Dispositif d'essai en laboratoire
(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

8


9

10

durant laquelle on a observé que, sous une charge de 200 kN, les extrémités des tubes proches du nœud s'ovalisaient et les caches en inox se déformaient.

Le constructeur a souhaité connaître la résistance réelle des éléments assemblés sans soudure supplémentaire. Pour cela, un échantillon sans caches soudés a été testé. Ce dispositif d'essai a été soumis à des efforts normaux conduisant à l'écrasement du joint ouvert entre les caches : des réserves de 25 % par rapport au système précédent ont été constatées. Ainsi, bien qu'une structure sans nœuds ne constitue à priori pas une structure stable classique, elle peut quand même trouver une raison d'être sur le plan constructif pour une question d'efficacité de montage.

Ce deuxième essai a par ailleurs prouvé qu'on aurait pu éviter toutes les soudures, ceci même dans la partie inférieure de la tour, ce qui signifie qu'il n'aurait pas été nécessaire de « reconstituer » les noeuds.

Inversion du processus de planification

La répartition traditionnelle des tâches entre architecte, ingénieur et constructeur a conduit à une proposition structurelle ne tenant pas compte du montage. Le façadier souhaitait pouvoir disposer d'une structure portante sur laquelle il peut fixer ses verres. La problématique principale provient de la différence de précision des deux éléments à prendre en compte, comme cela été développé plus haut.

Dans le cas de la tour de Lommel, la réflexion n'a pas été initiée à partir du support porteur (la structure), mais à partir d'une problématique de montage de la peau extérieure du bâtiment. Il a ainsi été possible de développer et réaliser une structure de façade permettant également de supporter le bâtiment. Si cette situation a exigé une étude et une compréhension approfondies du cheminement des efforts, elle a permis de dégager une structure extrêmement fine et nette. Les profils sont d'une précision totale et l'ensemble monté satisfait sur le plan esthétique (fig. 8). Le montage a pu être réalisé dans les temps et à la satisfaction de l'entreprise chargée de l'exécution des travaux.

Prof. dr Yves Weinand, architecte ISA, ing. civil EPF
Bureau d'études Weinand, ingénierie et architecture
Quai Godefroid Kurth 40, B – 4020 Liège