

L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE EN QUESTION
ACTES DE COLLOQUES



LE PATRIMOINE D'INGÉNIERIE
150 ANS D'INNOVATIONS STRUCTURALES À BRUXELLES

Journée d'étude du 7 juin 2011
organisée par l'ULB, la VUB et le CIVA



Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale
Administration de l'Aménagement du Territoire et du Logement

Nouvelle collection « L'aménagement du territoire en question. Actes de colloques »

Nombreux sont les débats portant sur l'aménagement du territoire et le logement en Région de Bruxelles-Capitale. Quoi de plus normal quand on touche à des sujets aussi sensibles que le cadre de vie, le logement, les infrastructures ou les espaces publics.

Pour garder une trace tangible de ces débats et capitaliser leurs résultats, l'Administration de l'Aménagement du Territoire et du Logement (AATL) a décidé de lancer une nouvelle collection de publications intitulée « L'aménagement du territoire en question. Actes de colloques ».

Cette collection présente les actes des différents colloques, journées d'étude, tables-rondes, séminaires et autres conférences que l'AATL organise en interne ou qu'elle soutient financièrement.

Les conférences présentées depuis septembre 2011 dans le cadre des « Midis de l'AATL » feront ainsi l'objet d'un numéro spécial annuel.

Le présent ouvrage constitue le premier numéro de cette collection.

Pour obtenir un exemplaire de cette publication, contactez-nous par téléphone au 02/204.17.68/69 ou par mail à l'adresse aatl.communication@mrbc.irisnet.be.

Vous pouvez également télécharger ce document sur le site www.urbanisme.irisnet.be.

Le patrimoine d'ingénierie. 150 ans d'innovations structurales à Bruxelles

Actes de la journée d'étude du 7 juin 2011 organisée par l'ULB, la VUB et le CIVA, dans le cadre de l'exposition «Bruxelles, prouesses d'ingénieurs» (20 mai au 2 octobre 2011 au CIVA) et du guide « Sur les traces des ingénieurs bâtisseurs ».

Editeur responsable : Philippe Thiéry, coordinateur de l'AATL - CCN, Rue du Progrès, 80/1 B-1035 BRUXELLES

Sous la direction de : David Attas et Michel Provost

Révision et relecture : Rika Devos (NL), Ine Wouters (NL), Bernard Espion (FR), Armande Hellebois (FR) et Myriam Goblet (FR-NL)

Traduction : 3T Vertaalbureau BVBA

Graphisme et mise en page : AATL communication

Crédits photographiques : voir mentions spéciales sous les photos

Photos de couverture

La façade de la banque Lambert (ING)

Le Berlaymont en construction

La maquette de l'église du pavillon du Vatican à l'Expo 58

L'intérieur de l'église Saint-Jean-Baptiste à Molenbeek

Le tunnel de métro sous le parc de Bruxelles

ISBN : 2012/11.404/1

© 2012 Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale. Tous droits réservés.

INTRODUCTION

La mise en valeur de l'ingénierie bruxelloise n'est que justice rendue à un patrimoine souvent mis sous le boisseau. Le présent colloque ainsi que l'exposition aussi abondante que pédagogique « Bruxelles, prouesses d'ingénieurs » et le guide « Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs », montrent une richesse qui a irrigué toutes les strates du territoire bruxellois.

L'ingénieur est souvent considéré comme celui qui participe à la conception d'un projet, au point même de l'oublier. L'histoire a ainsi perdu le nom des ingénieurs de nombre de constructions bruxelloises emblématiques, des arcades du Cinquantenaire aux serres de Laeken, en passant par le garage Citroën. Et pourtant, au-delà de leurs prouesses techniques, les ingénieurs sont des « passeurs » qui permettent au plus grand nombre de se loger, de travailler et de circuler dans la ville.

Ce travail de l'ombre méritait un coup de projecteur. La mise en évidence du patrimoine d'ingénierie remplit cet objectif. Ces trésors constituent le paradigme de la qualité et de la créativité des ingénieurs à Bruxelles. Ceux du pont de Buda seraient heureux d'apprendre la notoriété actuelle de leur ouvrage, considéré comme une sculpture mécanique qui structure l'entrée de Bruxelles par le canal, tout comme Eiffel lorsqu'il construisit le viaduc de Garabit.

La technique n'est pas neutre ; elle est associée directement à l'évolution socio-économique, comme le montre l'utilisation du béton au 20^e siècle. Aujourd'hui, les exigences de performance énergétique et d'éco-construction imposent à tous, et particulièrement aux ingénieurs, de trouver les moyens de développer la ville durable.

Tout en souhaitant que la mise en valeur du patrimoine d'ingénierie bruxellois se poursuive, j'espère que les ingénieurs continueront à construire la ville de demain.

Charles Picqué, Ministre-Président
du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale,
en charge de l'aménagement du territoire et du patrimoine

Préface

Pour répondre aux besoins d'une ville liés à son évolution, il a constamment été nécessaire de réaliser de nouvelles infrastructures qui se sont souvent accompagnées d'innovations techniques. Beaucoup de villes, dont Bruxelles, possèdent ainsi un patrimoine d'ingénierie.

Cette journée d'étude souhaite souligner l'apport significatif des ingénieurs belges au développement de Bruxelles et à l'histoire de la construction au travers d'exemples tels que les entrepôts de Tour & Taxis, le CBR, la tour du Midi, la Chapelle Notre-Dame Reine des Cieux, l'auditoire Janson, etc. Outre l'attention portée au patrimoine régional, un lien est établi avec l'évolution des matériaux et des techniques.

Cette journée est organisée par l'ULB, la VUB et le CIVA, dans le cadre de l'exposition «Bruxelles, prouesses d'ingénieurs» et du guide « Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs » qui propose des balades thématiques à Bruxelles.

Nous trouvons ainsi dans ce recueil les contributions suivantes:

- *Patrimoine d'ingénierie en Région bruxelloise. Un patrimoine à découvrir*, David Attas, Université Libre de Bruxelles, service BATir (page 7);
- *Fer ou béton armé ? Protection contre l'incendie comme moteur au 19e siècle?* Ine Wouters, Vrije Universiteit Brussel, vakgroep Architectonische Ingenieurswetenschappen (page 13);
- *Technique et architecture, une alliance féconde. Arcs, voiles minces et parements en béton*, Armande Hellebois, Université libre de Bruxelles (Aspirante F.R.S.-FNRS), Service BATir (page 19);
- *Précontrainte du béton et préflexion de l'acier. Deux méthodes d'optimisation de l'utilisation de ces matériaux au milieu du 20e siècle*, Bernard Espion, Université Libre de Bruxelles, Service BATir (page 25);
- *Nouvelle image pour un matériau connu. La promotion et l'utilisation du bois comme matériau de construction moderne à Bruxelles*, Rika Devos, UGent/St. Lucas WENK (page 31);
- *De l'auditoire P.E. Janson de l'ULB à la Station de Métro Erasme. 50 ans de structures tendues*, Michel Provost, Université Libre de Bruxelles, Service BATir (page 37);
- *Patrimoine d'ingénierie légalement protégé*, Manja Vanhaelen et Harry Lelièvre, Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Direction des Monuments et Sites (page 43).
- En annexe figure l'inventaire de l'ULB/VUB reprenant 169 ouvrages d'ingénierie ayant un intérêt patrimonial (dont 28 sont actuellement classés).

Nous sommes très heureux, au nom des auteurs de ces contributions, de pouvoir vous offrir la découverte de cet ouvrage.

W. Patrick De Wilde
Vrije Universiteit Brussel

Philippe Bouillard
Université Libre de Bruxelles

Patrimoine d'ingénierie en Région bruxelloise

Un patrimoine à découvrir

David Attas

Université Libre de Bruxelles, service BATir

A Bruxelles, il existe de nombreuses constructions - des bâtiments, des ouvrages d'art ou encore des tunnels - intéressantes par leurs aspects techniques. Ce patrimoine d'ingénierie est, en comparaison au patrimoine architectural, beaucoup moins connu voire inconnu du grand public. Il est souvent nécessaire d'investiguer pour découvrir l'originalité de ces ouvrages. La connaissance des techniques et procédés anciens, et par extension du patrimoine d'ingénierie, est bien entendu indispensable au moment de rénover, de restaurer, de réhabiliter ou d'agrandir un ouvrage ancien - situations auxquelles nous sommes confrontés de plus en plus souvent. Peut-être est-il aussi simplement important de comprendre le fonctionnement des constructions qui nous entourent ? Les initiatives visant à définir, à étudier et à promouvoir ce riche patrimoine se sont multipliées ces dernières années.

1. A LA DÉCOUVERTE D'UN PATRIMOINE CACHÉ

Nombreux sont ceux dont la curiosité a un jour été suscitée au regard d'un bâtiment, d'un pont, d'un barrage ou d'un tunnel. « Comment tient-il debout ? », « Comment a-t-on fait pour le réaliser ? », questions que l'on se pose et qui demeurent généralement sans réponse.

Science appliquée indissociable du fonctionnement d'une société, l'ingénierie de la construction est pourtant très peu valorisée auprès du grand public, en comparaison avec d'autres domaines tels que l'architecture ou l'histoire – voir l'article de Manja Van Haelen et de Harry Lelièvre. L'art de bâtir mérite sûrement que l'on s'y intéresse, d'autant plus que, contrairement à ce que certains craignent, ce domaine est loin d'être inaccessible.

La mise en évidence de ce patrimoine se fait de manière sporadique au travers de quelques articles dans des publications destinées au « grand public ». A titre d'exemple, ceux-ci mettent en avant les apports techniques liés aux pavillons de l'Expo 58 [1] ou encore – plus généralement – de quelques ouvrages d'ingénierie bruxellois qui ont marqué le 20^e siècle [2]. Plusieurs publications évoquent les grands chantiers qui ont marqué la ville [3,4]. Si celles-ci s'attardent largement sur le contexte social, économique ou politique dans lequel ces chantiers ont été menés, rares sont les descriptions des techniques ou procédés d'exécution, même remarquables, qui y ont été utilisés.

Le constat est similaire lorsque l'on se penche sur les critères employés actuellement par la Direction des Monuments et Sites du Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale dans le but d'établir l'inventaire du patrimoine immobilier régional. Les caractéristiques techniques d'une construction ne sont actuellement pas réellement évaluées au cours du processus de sélection.

Rares sont donc les ouvrages d'ingénierie inclus dans l'inventaire. Ceux qui s'y trouvent doivent généralement leur présence à des caractéristiques qui leur permettent de remplir d'autres critères – non techniques.

Celui qui s'intéresse au patrimoine d'ingénierie devra donc se plonger dans la littérature spécialisée – revues techniques, actes de colloques sur l'histoire des constructions, thèses de doctorat, etc. – ou dans les centres d'archives et de documentations, généralement moins faciles d'accès pour le grand public.

Parallèlement, le patrimoine bâti est de plus en plus important et, aujourd'hui, nombreux sont les cas où la rénovation, la restauration, la réhabilitation, l'extension sont privilégiées par rapport à la démolition et à la reconstruction. Lorsque l'on travaille sur une ancienne construction, il est indispensable de connaître son historique – les informations liées à son dimensionnement, à son fonctionnement structural, à la manière dont elle a été construite, aux éventuelles modifications. Une bonne compréhension de cet historique permet d'améliorer un éventuel projet de rénovation, de restauration ou de réhabilitation et, dans de nombreux cas, de minimiser le risque d'erreurs.

Au-delà de l'indéniable apport à l'histoire des sciences et des techniques, l'étude et la diffusion des connaissances liées au patrimoine d'ingénierie sont donc aujourd'hui intimement liées aux projets de constructions actuels et futurs et, plus généralement, à la gestion de notre patrimoine immobilier.

L'Université Libre de Bruxelles (ULB) et la Vrije Universiteit Brussel (VUB), avec l'importante collaboration du Centre International pour la Ville, l'Architecture et le Paysage (CIVA), ont consenti, ces dernières années, des efforts pour mettre en avant ce patrimoine caché et son importance dans notre société.

Le fruit de ce travail d'équipe est matérialisé par une exposition grand public « Bruxelles, prouesses d'ingénieurs » et par un guide « Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs » [5], premières actions d'envergure visant à valoriser le patrimoine d'ingénierie, patrimoine jusqu'alors jamais mis en avant, tant auprès des spécialistes qu'auprès d'un public plus large.

2. MÉTHODOLOGIE DE SÉLECTION

Avant de valoriser le patrimoine d'ingénierie, une définition précise de cette notion devait être établie et une méthodologie permettant d'en déterminer son contenu développée [6] (fig. 1).

La première étape de cette méthodologie consista à inventorier l'ensemble des ouvrages d'ingénierie présents en Région bruxelloise. Ce travail de longue haleine revint à parcourir les administrations – pour les ouvrages publics – et les différentes sociétés privées – pour les ouvrages privés. Parallèlement, les critères utilisés pour la définition d'autres patrimoines – tels les patrimoines architectural et industriel – furent analysés tout comme les critères utilisés par des organisations étrangères ou internationales, tels l'UNESCO, l'European Council of Civil Engineers (ECCE), l'Institution of Civil Engineers (ICE) ou encore l'American Society of Civil Engineers (ASCE).

Une liste de critères adaptée au patrimoine d'ingénierie fut ensuite dressée sur la base des renseignements issus de la recherche mentionnée ci-dessus et de l'analyse par des membres d'un comité d'experts, préalablement formé. Cette liste permet à ce même comité de sélectionner les

ouvrages d'ingénierie les plus remarquables. Ces ouvrages constituent le patrimoine d'ingénierie.

Cette liste des ouvrages remarquables – le patrimoine d'ingénierie – ne doit en aucun cas être considérée comme figée. Au contraire, une réflexion permanente doit être portée sur son contenu. Plusieurs situations montrent l'importance d'une interaction constante entre l'ensemble des ouvrages existants et le patrimoine d'ingénierie :

- au moment de l'inventaire, un ou plusieurs ouvrages peuvent avoir été oubliés ;
- de nouveaux ouvrages d'ingénierie sont construits en permanence ;
- suite à de nouvelles découvertes, certains ouvrages peuvent s'avérer plus ou moins intéressants qu'il n'y paraissait au départ ;
- certains ouvrages peuvent gagner en potentiel au fil des années.

2.1. LISTE DES CRITÈRES

Pour faire partie du patrimoine d'ingénierie, l'ouvrage doit au moins répondre à l'un des critères suivants :

1. avoir une importance significative dans l'histoire de l'ingénierie ;
2. être associé à un événement de l'histoire de l'ingénierie, à l'œuvre d'une personnalité du monde de l'ingénierie ou d'un groupe de personnalités ;
3. répondre adéquatement à un programme induit par les besoins et tenant compte des contraintes environnementales – tant au moment de la réalisation que de l'exploitation ;
4. constituer un témoin remarquable de la diffusion d'une connaissance – technique, typologie,

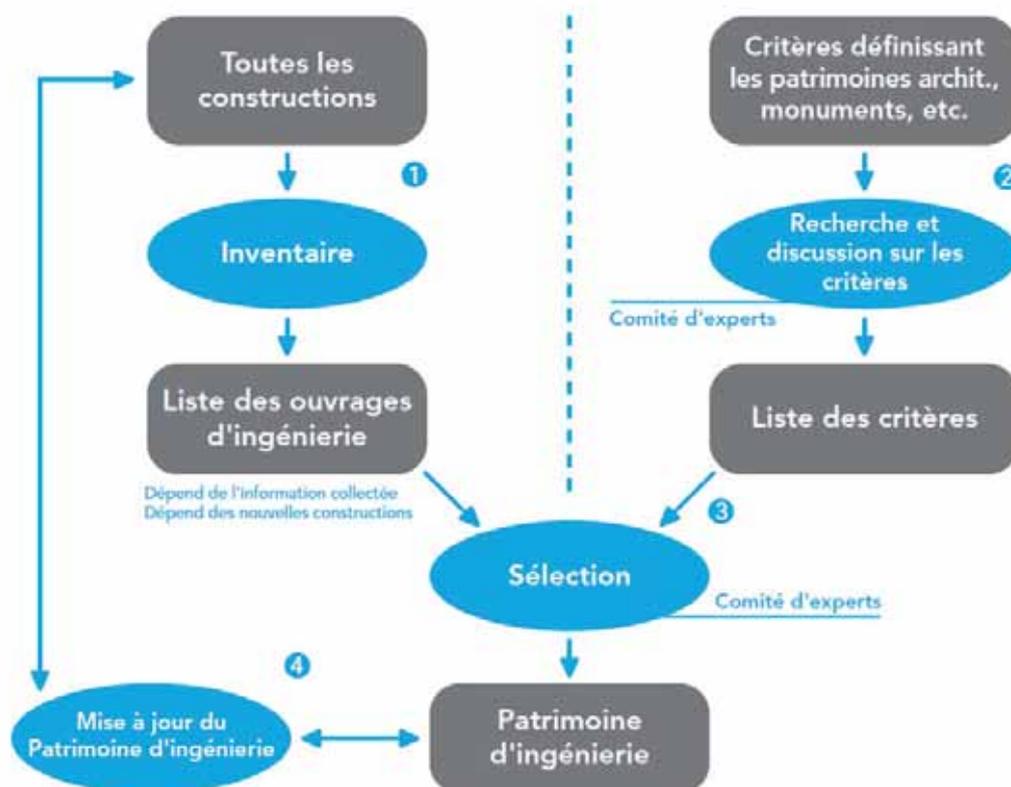


Fig. 1 : Méthodologie de sélection des ouvrages remarquables [5].

méthode – qui a contribué au développement de la zone ;

5. constituer une utilisation remarquable d'une technique ou d'un matériau ;
6. avoir été l'objet d'un procédé d'exécution ou d'une technologie remarquable ;
7. constituer, grâce à une conception adaptée, un exemple remarquable de construction durable ;
8. constituer un exemple remarquable d'un type de construction, évoquant une période de l'histoire de l'ingénierie.

La plupart des critères sont directement liés à la notion d'innovation. Cette innovation pouvant être technique, technologique, constructive ... Au cours de la sélection, lorsqu'il faut évaluer l'innovation, il faut inévitablement prendre en compte une échelle. Un ouvrage ne sera pas évalué de la même manière à l'échelle d'une ville qu'à l'échelle d'un continent.

D'autre part, il faut rester conscient qu'une certaine part de subjectivité subsiste toujours au moment d'évaluer l'intensité avec laquelle un ouvrage remplit un critère.

2.2. DÉFINITION DU PATRIMOINE D'INGÉNIERIE

Le patrimoine d'ingénierie est l'ensemble des ouvrages d'ingénierie qui répondent, de manière idéale, à un besoin de la société en se démarquant par l'application éminente d'une technique ou d'un matériau, par l'utilisation d'un procédé d'exécution original ou par une conception durable remarquable.

Font également partie du patrimoine d'ingénierie, les ouvrages constituant des exemples remarquables d'un type de construction ainsi que ceux constituant les témoins éminents de la diffusion d'une connaissance ayant contribué au développement de la société.

Ils sont ainsi souvent associés à une personnalité ou à un événement de l'histoire de l'ingénierie. Par ces attributs, ces ouvrages constituent notre héritage commun.

2.3. COMITÉ D'EXPERTS

Le comité pluridisciplinaire est composé d'experts en ingénierie, en architecture, en histoire et en urbanisme. Deux raisons principales ont poussé à former ce comité : l'objectivité et la transversalité.

Le choix d'un comité composé d'un panel de disciplines a été pris dans le but de ne pas s'arrêter uniquement aux aspects techniques. Un ouvrage d'ingénierie de qualité doit non seulement posséder des caractéristiques techniques remarquables mais également montrer une bonne intégration à son milieu et répondre de manière idéale à un besoin.

3. QUELQUES TRÉSORS DU PATRIMOINE D'INGÉNIERIE BRUXELLOIS

Le fruit de la méthodologie décrite ci-dessus, appliquée à la Région bruxelloise, est une liste regroupant près de 170 réalisations – ponts, bâtiments, tunnels, etc. (voir liste en annexe).

Cette sélection reprend évidemment des ouvrages phares qui font l'unanimité tant au sein du monde des ingénieurs qu'auprès d'un public plus large.

Derrière ces exemples incontournables se cachent des ouvrages qui, bien que moins connus, se révèlent particulièrement intéressants. Le grand public est généralement peu conscient de ce patrimoine car ces ouvrages :

- ont été **détruits** ;
- possèdent une **structure** ou ont fait l'objet d'une **technique remarquable** qui n'est pas mise en valeur ;
- sont expérimentaux ou sont **précoces** ;
- ont été réalisés à l'aide d'un **procédé d'exécution remarquable** ;
- etc.

3.1. LES INCONTOURNABLES

Même si, comme explicité précédemment, le patrimoine d'ingénierie de la construction est rarement mis en avant, il existe quelques ouvrages remarquables, constituant des symboles et des réalisations, que le grand public associe à l'ingénierie de la construction.

Symbole de l'Expo 58 et de Bruxelles, l'Atomium constitue, dans une certaine mesure, un symbole de l'ingénierie de la construction. La passerelle en arc de la Woluwe, qui enjambe l'avenue de Tervuren au niveau de l'ancienne ligne de chemin fer Etterbeek-Tervuren ou encore le pont de Buda, qui matérialise l'entrée du port de Bruxelles, sont deux autres réalisations phares.

Les entrepôts de Tour & Taxis (fig. 2) et les palais du Heysel (fig. 3) sont parfois assimilés à de beaux exemples d'ingénierie, ... bien que les premiers soient plutôt associés au patrimoine industriel.



Fig. 2 : Entrepôt A de Tour & Taxis [5].

S'ils constituent des symboles de l'ingénierie auprès d'un large public, ces ouvrages ne sont pas toujours les plus intéressants – du point de vue technique en tout cas.



Fig. 3 : Palais 5 du Heysel en construction [5].

3.2 OUVRAGES DÉTRUITS

Plusieurs chefs-d'œuvre d'ingénierie ont été détruits soit parce qu'ils avaient été conçus comme des ouvrages temporaires soit parce que leur présence n'était plus considérée comme justifiée. Bien que communément acceptés comme ouvrages remarquables au moment de leur existence, ceux-ci disparaissent peu à peu des mémoires et ne subsistent pratiquement plus que dans celles des personnes qui ont eu la chance de les voir debout.



Fig. 4 : Pavillon des Etats-Unis de l'Expo 58 (Source : Egicarte).

Au rang de ces chefs-d'œuvre, citons le pavillon de la France ou le pavillon des Etats-Unis (fig. 4) qui comptent parmi les plus spacieux et remarquables pavillons de l'Exposition Universelle de 1958 [7]. A côté des nombreuses structures légères – principalement à câbles (voir l'article de Michel Provost) mais aussi gonflables – la Flèche du Génie Civil, ne faisait pas pâle figure. Véritable sculpture en voile mince en béton armé, elle était posée sur trois points seulement. Un porte-à-faux de près de 78 m était contrebalancé par une salle d'exposition [8] – voir l'article de Armande Hellebois. L'Expo 58 n'est pas en reste quant aux structures en bois lamellé-collé (BLC) – voir l'article de Rika Devos – avec notamment le pavillon d'accueil de l'Expo, construit place De Brouckère, qui était couvert par

une étonnante structure en BLC en forme de paraboloïde hyperbolique.

L'immeuble du Foncolin (Fond Colonial des Invalidités), premier bâtiment pour lequel des éléments préfabriqués en béton architectonique de façade ont été utilisés en Belgique [9], est un autre exemple d'ouvrage remarquable disparu. Bien qu'il ait joué un rôle indéniable dans la diffusion des façades en béton architectonique à partir des années 1960, il est aujourd'hui quasi inconnu du grand public. Situé dans le quartier européen, il fut détruit en 1999.

3.3 STRUCTURES CACHÉES

La structure des bâtiments, des ouvrages souterrains, voire même des ouvrages d'art, est rarement mise en avant. Dans de nombreux cas, celle-ci est même volontairement cachée.

Si la structure d'une construction ne présente pas toujours un grand intérêt, il n'est pas rare de tomber sur des cas intéressants.

A titre d'exemple, le garage Renault, situé à Anderlecht, possède une façade commerciale relativement ordinaire derrière laquelle se cache un hangar couvert par un ensemble remarquable de paraboloïdes hyperboliques en béton armé [10]. Il s'agit d'un des derniers exemples de voile mince en béton armé à Bruxelles – voir l'article de Armande Hellebois. Dans le même genre, notons l'intéressante mais discrète succession de voûtes en maçonnerie cachée derrière la façade de l'église du Divin Enfant-Jésus, à Laeken.



Fig. 5 : Berlaymont en construction (Source : Archives d'Architecture Moderne).

Le Berlaymont (fig. 5) et la Tour du Midi possèdent une structure novatrice constituée de poutres préfléchies et de suspentes – voir l'article de Bernard Espion – qui n'est visible ni par un observateur situé à l'extérieur ni par un observateur situé à l'intérieur de l'édifice.

Dans certains cas extrêmes, une structure remarquable est découverte par hasard lors d'une restauration. C'est ainsi que la belle ossature en fonte et en maçonnerie du bâtiment abritant le centre communautaire de Markten – l'une des plus anciennes de Bruxelles – a été mise à jour à la fin des années 1990 – voir l'article de Ine Wouters.

3.4. OUVRAGES PRÉCOCES / EXPÉRIMENTAL

Un ouvrage précoce ou expérimentaux présente souvent peu d'intérêt une fois qu'il est mis en service. On se retrouve ainsi souvent devant des ouvrages à l'esthétique et à la fonctionnalité peu recherchées mais avec un côté technique novateur. Leur intérêt réside dans leur apport à l'histoire de l'ingénierie. Ces ouvrages ont été des précurseurs et ont permis l'application ultérieure d'une technique ou d'une technologie à de nombreux ouvrages.

A titre d'exemple, le pont de la rue du Miroir, situé sur le parcours de la Jonction Nord-Midi, a fait l'objet d'essais permettant de comparer béton précontraint et béton armé [11]. La passerelle de la rue de Gosselies (fig. 6) et le pont de la Place de la Justice sont des applications précoces, respectivement des techniques du béton précontraint et de la préflexion de poutres mixtes acier-béton – voir l'article de Bernard Espion – techniques qui ont été largement employées à Bruxelles par la suite.



Fig. 6 : Passerelle de la rue de Gosselies [5].

Côté bâtiment, l'immeuble de la Royale Belge, situé boulevard du Souverain et mieux connu pour ses caractéristiques esthétiques, constitue une des premières applications belges de l'acier autopatinable [12]. L'utilisation de ce matériau explique d'ailleurs la couleur rouille de sa structure.

3.5. PROCÉDÉS D'EXÉCUTION REMARQUABLES

En général, il subsiste des traces des techniques ou matériaux utilisés soit car ils sont visibles sur l'ouvrage en service soit car les documents qui y font allusion sont conservés. C'est moins souvent le cas des informations

concernant la manière dont l'ouvrage a été construit. Un ouvrage en service, donne généralement peu d'information sur le procédé d'exécution utilisé et les documents y faisant référence sont peu fréquents – ce sont souvent les premiers qui disparaissent.

Le savoir-faire lié aux procédés d'exécution est un savoir qui se transmet « de génération en génération ». Il en découle un oubli progressif de nombreux procédés d'exécution anciens (qui dans certains cas étaient particulièrement ingénieux).

Les ouvrages souterrains – qui ne seront pas abordés dans cette publication – sont de bons exemples d'ouvrages dont la structure en service est rarement extraordinaire mais pour lesquels un procédé d'exécution intéressant est parfois utilisé. Le tunnel métro situé sous le Parc de Bruxelles a été réalisé à l'aide d'un bouclier, véritable taupe mécanique. Dans ce cas, la forme circulaire du tunnel donne un indice sur le procédé utilisé (fig. 7).



Fig. 7 : Tunnel métro sous le parc de Bruxelles (Source : STIB).

La tour Dexia, située place Rogier à Bruxelles, a été érigée à l'aide d'éléments en béton préfabriqués en usine et assemblés sur chantier. Ce procédé d'exécution, qui a permis de réduire considérablement les délais de construction et de diminuer les coûts, n'est évidemment pas appréciable lorsque l'on observe la tour aujourd'hui, alors qu'elle est en service.

4. UNE PRISE DE CONSCIENCE NAISSANTE

La connaissance approfondie des techniques et procédés de construction anciens – et par extension de notre patrimoine d'ingénierie – s'avère être un outil de plus en plus indispensable, notamment lorsqu'il s'agit de restaurer, de rénover, de réhabiliter ou d'agrandir un ouvrage ancien, solution aujourd'hui souvent préférée à la destruction-reconstruction. Ce n'est que depuis peu que des projets visant à développer et à mettre en évidence cette connaissance sont menés.

Des travaux de recherche sur plusieurs aspects de l'histoire de l'ingénierie sont menés au sein des différentes universités belges (ULB, VUB, Ugent, KUL, etc.).

En 2007, l'ULB, la VUB et le CIVA ont lancé un projet d'envergure, financé par Innoviris, sur l'étude du

patrimoine d'ingénierie en Région bruxelloise qui s'est conclu par la réalisation d'une exposition et d'un guide grand public entièrement consacré à ce patrimoine [5].

Du côté des administrations, une prise de conscience naissante passe, notamment, par une intention de prendre en compte les aspects techniques des constructions lors du processus de sélection permettant d'établir les inventaires bruxellois.

RÉFÉRENCES

- [1] Espion, B., Devos, R. & Provost, M., Innovations structurales à l'Expo 58. *Architecture Moderne à l'Expo 58*. « Pour un monde plus humain », eds. M. De Kooning & R. Devos, Dexia/Mercatorfonds: Bruxelles, pp. 100-127, 2006.
- [2] Halleux, P., *L'évolution des techniques : quelques réalisations bruxelloises à travers le siècle*, in *Un siècle d'architecture et d'urbanisme 1900-2000*, Mardaga : Sprimont, pp. 23-38, 2000.
- [3] Demey, Th., *Bruxelles, chronique d'une capitale en chantier. 1 : Du vœuement de la Senne à la jonction Nord-Midi*, P. Legrain: Bruxelles, 1990.
- [4] Demey, Th., *Bruxelles, chronique d'une capitale en chantier. 2 : De l'expo 58 au siège de la C.E.E*, P. Legrain: Bruxelles, 1992.
- [5] Attas, D. & Provost, M., eds., *Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs*, CIVA : Bruxelles, 2011.
- [6] Attas, D., Provost, M. & Bouillard, Ph., Definition and identification of an Engineering Heritage : Application to the Region of Brussels. *Proc. of the 3rd Int. Congr. on Construction History*, eds. K.-E. Kurrer, W. Lorenz & V. Wetzck, Cottbus, vol. 1, pp. 61-66, 2009.
- [7] Vandepitte, D. & Massonnet, M., Quelques enseignements qui découlent du contrôle technique des constructions effectué à l'occasion de l'Exposition universelle et internationale de Bruxelles 1958. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* (Paris), 137, pp. 421-52, 1959.
- [8] Espion, B., Halleux, P. & Schiffmann, J., Contributions of André Paduart to the art of thin concrete shell vaulting. *Proc. of the 1st Int. Congr. on Construction History*, ed. Huerta, S., Madrid, vol. 2, pp. 829-838, 2003.
- [9] Novgorodsky, L., Le « Foncolin » à Bruxelles. Nouvel Immeuble du Fonds Colonial des Invalidités. *La Technique des Travaux*, 35 (3-4), pp. 103-110, 1959.
- [10] Anon, L'Agence Belge des Automobiles Renault. *La Maison*, 7, pp.214-216, 1963.
- [11] Espion, B., Early applications of prestressing to bridges and footbridges in Brussels area. *Proc. of the 3rd Int. Congr. on Construction History*, eds. K.-E. Kurrer, W. Lorenz & V. Wetzck, Cottbus, Vol. 2, pp. 535-541, 2009.
- [12] Zaczek, J., Siège social de la S.A. la Royale Belge à Bruxelles. *Acier-Stahl-Steel*, 36 (3), pp. 97-105, 1971.

Fer ou béton armé ? Protection contre l'incendie comme moteur au 19e siècle ?

Ine Wouters

Vrije Universiteit Brussel, vakgroep Architectonische Ingenieurswetenschappen

Au 19e siècle, les développements en matière de protection contre l'incendie dans la conception de bâtiments se sont rapidement succédés. En Angleterre, une technique de construction à l'épreuve du feu a vu le jour en 1830 et a rapidement été adoptée à Bruxelles et dans d'autres pays. Après d'importants incendies urbains à Londres et Chicago, ce système de construction a cependant été remis en question. Sur base des exemples bruxellois, la problématique relative à la protection de la structure porteuse métallique et la recherche d'alternatives en béton armé est abordée au niveau international. Des rénovations réussies montrent comment la science du feu peut être utilisée au 21e siècle pour la conservation du patrimoine architectural.

1. VERS UNE TYPOLOGIE DE PROTECTION CONTRE L'INCENDIE

1.1. LA FONTE MISE EN AVANT COMME MATÉRIAU DE CONSTRUCTION IGNIFUGE

L'amélioration de la protection contre l'incendie est un problème dont on se soucie depuis longtemps. À la fin du 18e siècle, une série de développements ont accéléré, en Angleterre, le processus visant à protéger les constructions au feu. Ceux-ci se rapportaient à une typologie bien déterminée, celle de la construction industrielle. Le nombre alarmant d'incendies dévastateurs dans les bâtiments d'usine au début du 19e siècle a été à l'origine des changements apportés au mode de construction traditionnel. Le stockage de matériaux inflammables (tels que du coton, de la soie, du lin) associé aux mauvaises conditions de travail et à un éclairage à l'aide de lampes à huile, était la cause la plus importante des fréquents incendies. L'espace ouvert et l'ossature en bois contribuaient alors à la propagation ultrarapide du feu. Par ailleurs, en raison de leur équipement primitif, les pompiers restaient impuissants devant ces incendies de grande ampleur. Le développement de techniques apportant une meilleure résistance au feu des structures pour ce type de bâtiments industriels typiques s'avérait donc indispensable.

Grâce aux améliorations dans le processus de production, un nouveau matériau de construction a été développé : la fonte. L'avantage principal de ce nouveau matériau résidait dans son ininflammabilité, ce qui lui donnait, par conséquent, un net avantage par rapport au bois, matériau à l'époque le plus utilisé pour la construction de planchers, de toitures et de charpentes. De plus, la fonte présentait une plus grande résistance à la compression et pouvait être utilisée dans des bâtiments d'usine aux dimensions de plus en plus importantes.

Les premières étapes dans ce sens sont dues aux ingénieurs anglais William Strutt et Charles Bage [1]. En 1792, l'ingénieur William Strutt a construit à Derby une filature de coton en essayant d'éliminer les matériaux combustibles de son bâtiment. Il a utilisé des voûtes en briques comme plancher et remplacé les colonnes en bois par des exemplaires en fonte.

Il a recouvert les poutres de bois d'une couche de plâtre afin qu'en cas d'incendie, elles ne contribuent pas à une propagation ultérieure du feu. Au cours des dix années qui ont suivi, des étapes ont été systématiquement franchies vers une typologie de protection anti-incendie qui, à partir de 1830, a été appliquée comme typologie standard en Angleterre.

Les caractéristiques les plus importantes d'une telle typologie standard de protection contre l'incendie, appelée fireproof mill construction, sont l'ossature porteuse faite de poutres et de colonnes en fonte, les voûtes de plancher en briques avec des façades extérieures portantes en maçonnerie.

EXEMPLES BRUXELLOIS

Un premier exemple bruxellois de cette technique de construction est celui de l'Entrepôt royal, bâti entre 1843 et 1847 dans l'ancien port intérieur et démoli en 1910 au moment où les docks intérieurs furent comblés. Cet entrepôt impressionnant, avec un plan au sol rectangulaire de 145 m sur 63 m, comptait quatre étages. La littérature internationale le référence comme l'une des premières applications de la fonte à une aussi grande échelle sur le continent [2]. L'entrepôt était construit de manière modulaire et était constitué d'une trame structurale de 3,75 m sur 6,10 m (fig. 1). La voûte en briques avait une portée de 3,75 m et était supportée par des poutres en fonte de 6,10 m de long posées à leurs extrémités sur deux colonnes de fonte.

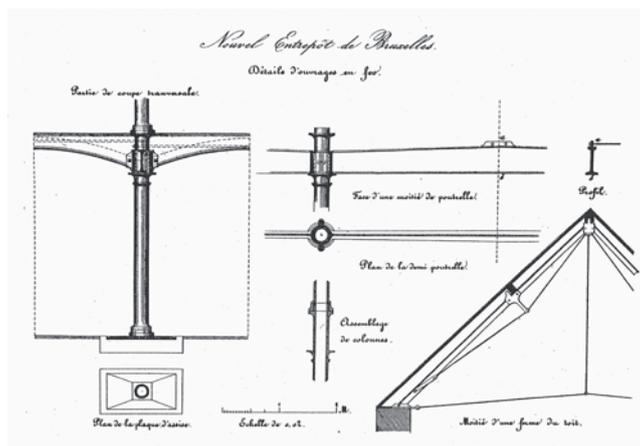


Fig. 1 : Plan de 1843 avec des détails de construction de la ferronnerie pour l'Entrepôt royal qui renvoient à la construction anglaise fireproof mill typique [2].

Un autre exemple, encore existant, de cette technique de construction est celui de l'entrepôt de 1854 (fig. 2) qui héberge actuellement le centre communautaire De Markten sur le Vieux marché aux grains dans le centre de Bruxelles. C'est au cours de sa rénovation, lorsqu'une voûte en briques fut enlevée pour faire place à une nouvelle cage d'escaliers, que la forme asymétrique caractéristique de la poutre en fonte fut découverte.



Fig. 2 : Entrepôt (1854) réaffecté comme centre communautaire De Markten. Édifié selon la construction fireproof mill typique avec des poutres et colonnes en fonte. (photo 1998).

1.2. VERS UNE STRUCTURE LÉGÈRE

À côté des avantages, cette technique de construction de filatures à l'épreuve du feu présentait plusieurs inconvénients. D'abord, la fonte coûtait cher. On y remédia en optimisant son utilisation en adaptant la section des éléments structuraux autant que possible à la courbe des contraintes dans le matériau. Les colonnes étaient donc coulées comme éléments cylindriques creux alors que les poutres en fonte possédaient une forme telle que la section était élargie aux endroits les plus sollicités, c'est-à-dire dans la semelle des poutres pour pouvoir absorber les forces de traction et plus vers le milieu de la poutre pour y obtenir un moment résistant plus élevé.

Le poids propre des planchers de l'entrepôt sur le Vieux marché aux grains était considérable. Ceux-ci étaient

constitués d'une voûte en briques pleines jointes, remplis de sable et terminés avec des carreaux et pesaient 750 kg/m^2 pour une portée de 3,5 m. Réduire le poids propre de telles constructions de plancher était donc un réel souci. Le remplacement des éléments en briques pleines par des blocs creux a permis de faire une économie de poids considérable. Le système avait déjà été appliqué par les Romains lors de la construction de voûtes et fut réintroduit dans une forme légèrement modifiée. L'Anglais Joseph Bunnett fit breveter en 1853 une construction de plancher avec une voûte constituée de blocs creux. Le brevet de l'Américain Peterson améliora encore la structure de plancher en remplaçant le dessous cintré de la voûte par des blocs dont le côté inférieur était horizontal afin d'obtenir un plafond droit.

EXEMPLES BRUXELLOIS

À Bruxelles, ces briques creuses ne furent pratiquement pas utilisées. Une autre solution visant à réduire le poids de la construction de planchers fut adoptée. Cette innovation correspond à l'introduction du fer forgé. Ce matériau, qui résiste aussi bien à la traction qu'à la compression (contrairement à la fonte qui ne résistait pas bien à la traction), permit une meilleure utilisation des éléments de poutraison. Dès que le prix de ce matériau devint abordable, on l'utilisa pour construire des planchers qui étaient alors constitués de poutres primaires et secondaires. Les poutres secondaires étant placées à intervalles d'environ 80 cm, la portée des voûtes en briques ne devait plus être que de 80 cm, ce qui diminua la hauteur des planchers et, par conséquent, leur poids propre de moitié. Ces planchers dits « légers » avaient un poids propre d'environ 450 kg/m^2 .

Le Mont-de-Piété de la rue St-Ghislain à Bruxelles (fig. 3) constitue l'un des premiers exemples de ce mode de construction de planchers. Les voûtes en maçonnerie composées de briques pleines sont supportées par des profilés en I en fer forgé, eux même supportées par une poutre principale possédant une section qui se présente comme deux profilés en I superposés. L'utilisation de profilés en I en fer forgé était tout à fait nouvelle à cette époque. Dix ans auparavant, le premier profilé en I était sorti du laminoir en France (1849). La Belgique suivit rapidement et fut vite reconnue pour sa technique de laminage. L'Angleterre, par exemple, était un acheteur important de profilés laminés belges, la Belgique pouvant fournir ces profilés pour un prix inférieur de 30%.

1.3. RÉSISTANCE AU FEU VERSUS INFLAMMABILITÉ

Outre cette première application du plancher léger, le Mont-de-Piété bruxellois reflète les nouvelles idées concernant le comportement au feu de la fonte.

En réaction aux grands incendies de 1840 et 1860, les prescriptions en matière de construction devinrent plus strictes en Angleterre [6].

Bien que reconnue comme ininflammable, la fonte possédait une résistance au feu limitée par sa perte

de résistance mécanique à températures élevées. Les structures en fonte devaient donc être protégées. Au Mont-de-Piété, tous les éléments en fonte et en fer forgé apparents furent ainsi protégés. Les colonnes en fonte furent enrobées d'un revêtement en pierres naturelles de 10 cm d'épaisseur. Les poutres primaires et secondaires en fer forgé furent imbriquées entre les voûtes en brique et leurs semelles furent protégées par une épaisse couche de plâtre (fig. 3).



Fig. 3 : Structure ajourée du plancher léger du Mont-de-Piété bruxellois (1859). Tous les éléments structuraux en fer sont protégés de manière passive. (photo 1998).

1.4. MESURES ACTIVES ET PASSIVES POUR LE FER FORGÉ ET L'ACIER

La recherche sur la protection de la ferronnerie exposée ne fut lancée qu'au moment où l'Amérique fut également confrontée à de graves incendies à Chicago et Boston. Un groupe d'experts fut créé pour étudier les ruines de l'incendie de 1871 à Chicago et pour déterminer pourquoi les bâtiments à l'épreuve du feu étaient tombés et la manière dont on pouvait éviter cela ultérieurement. Pour protéger la ferronnerie contre la chaleur, les mesures les plus importantes concernèrent à nouveau le revêtement. À partir de 1870, de nouveaux brevets et produits pour les systèmes de plancher et de construction furent mis sur le marché (fig. 4).

Outre ces mesures de protection passives, on s'est également intéressé à l'évacuation des personnes. La géométrie appropriée et l'emplacement de voies d'issue furent étudiés. Les escaliers furent placés à l'extérieur du volume de la construction. L'installation d'extincteurs automatiques d'incendie (sprinkleurs) fut introduite. Les installations antérieures étaient commandées manuellement : l'ouverture d'un robinet faisait s'écouler l'eau dans un tuyau perforé. À partir de 1880, des extincteurs automatiques d'incendie furent installés. Lors de l'incendie, la chaleur faisait fondre les têtes d'extincteur fixées à intervalles réguliers sur des conduites remplies d'eau. Cette eau s'écoulait ainsi directement sur la source de chaleur. Un réservoir d'eau, le plus souvent placé au-dessus de la cage d'escalier, garantissait le maintien de la pression nécessaire pendant l'extinction [6].

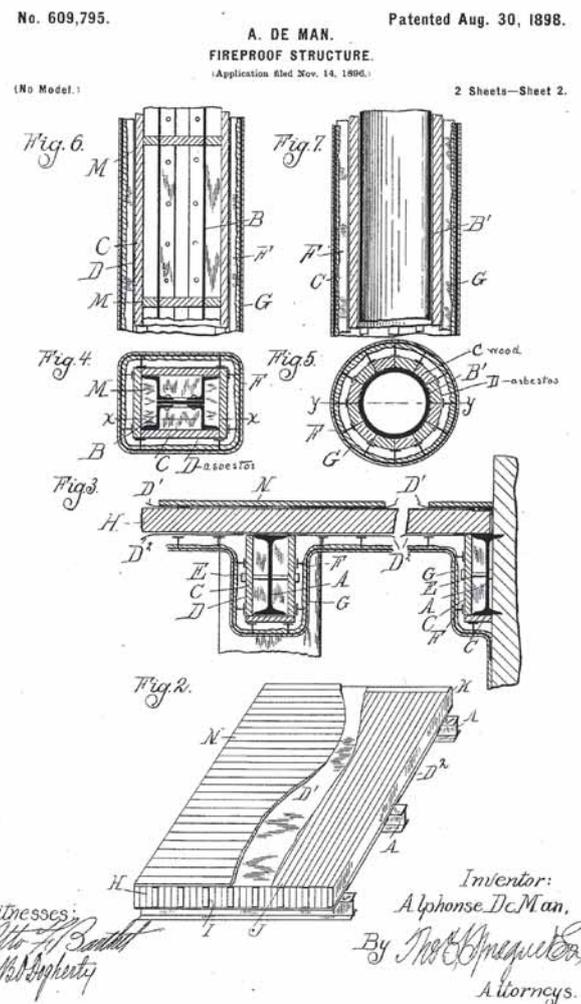


Fig. 4 : Brevet de 1898 concernant l'augmentation de la résistance au feu de colonnes métalliques par un revêtement (en bois et amiante) [5].

2. BÉTON ARMÉ COMME ALTERNATIVE RÉSISTANT AU FEU

Le Français François Hennebique a fait figurer le slogan « Plus d'incendies désastreux » sur ses dépliants de 1892 pour vendre la résistance au feu de son système monolithique breveté en béton armé. Un industriel français de Roubaix retint le slogan et passa commande pour la construction d'une filature en 1893 [7]. D'autres commandes suivirent rapidement.

À partir de 1897, Hennebique organisa chaque année une réunion « les congrès annuels du béton et du ciment armé ». Tous les agents et concessionnaires de son brevet y étaient invités pour présenter leur travail. Des experts indépendants et des personnes ayant des fonctions importantes dans les administrations publiques étaient également les bienvenues. L'ingénieur en chef du service des Ponts et Chaussées à Bruxelles, Jules Zone, fut invité en 1900 au quatrième congrès international [7]. Le recours par l'ingénieur Jules Zone au système Hennebique quand, quelques années plus tard, il fallut installer un nouveau port maritime sur le site de Tour & Taxis, n'était donc pas étonnant. Pour l'entrepôt public, comprenant 5 étages, Jules Zone choisit une structure à l'épreuve du feu en

béton armé. C'est le concessionnaire Louis de Waelle qui exécuta le bétonnage. Ce bâtiment, qui devait remplacer l'Entrepôt royal de 1847 dans le port intérieur, mesure 60 m sur 180 m. Les magasins faisant chacun 20 m sur 21 m sont disposés autour d'un atrium central d'où les marchandises sont déchargées. Huit cages d'escalier, qui permettent une circulation rapide, se raccordent à l'atrium. Les réservoirs du toit sont repoussés vers l'arrière et sont ainsi cachés (fig. 5). La trame structurale des magasins est de 3,90 m sur 4,30 m. L'agrandissement des portées (par rapport à l'Entrepôt royal de 1847) n'était donc pas d'actualité. Nous pouvons toutefois constater certaines avancées dans la technique de construction. La hauteur de construction des planchers voûtés en béton armé, qui ont une portée de 3,90 m, n'est que de 23 cm et diminue pour ne plus faire que 8 cm au milieu de la voûte. Dans l'Entrepôt royal, la hauteur du plancher était tout de même de 72 cm !

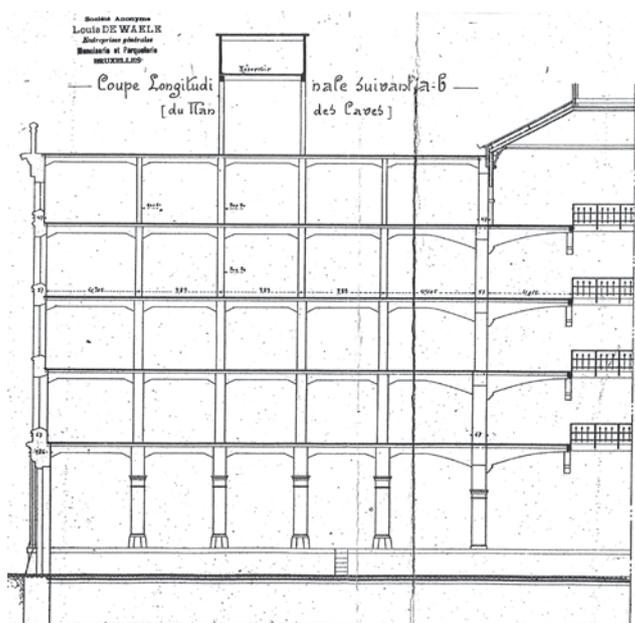


Fig. 5 : Coupe longitudinale de l'Entrepôt public B (1904) sur le site de Tour & Taxis construit selon le système de protection anti-incendie de Hennebique.

3. UNE NOUVELLE ÈRE, UNE NOUVELLE APPROCHE

3.1. FIRE SAFETY ENGINEERING

Outre l'établissement de méthodes de calcul uniformes que tous les concepteurs devaient suivre dans un même pays, on travaille en Europe, depuis 1970, à l'établissement de méthodes de calcul uniformes pour l'élaboration de constructions : les Eurocodes.

Depuis l'introduction des Eurocodes, les ingénieurs belges font connaissance avec une nouvelle science, appliquée depuis longtemps en Angleterre et en Suède : le fire engineering. Cette discipline vise à calculer le risque d'incendie et à déterminer les règles pour le réduire. Les ingénieurs belges disposent donc depuis lors d'un instrument réglementaire pour estimer la résistance au feu d'un élément. À cet effet, des essais furent effectués

pour déterminer la résistance au feu des constructions et des éléments de construction.

En Belgique, cela a ouvert de nouvelles perspectives ; on pouvait dès lors calculer à partir de paramètres tels que la géométrie du bâtiment, les matériaux utilisés, la quantité d'ouvertures et la destination du bâtiment (charge calorifique) une courbe d'incendie indiquant la manière dont la température évolue dans un local en fonction du temps. La nouveauté dans ces méthodes réside dans la prise en compte des moyens actifs de lutte contre l'incendie. L'installation d'un système de sprinkleurs a, par exemple, une influence positive sur le calcul.

Les calculs permettent également de déterminer avec précision la température dans les éléments structuraux et de calculer l'efficacité d'un revêtement passif tel qu'un gainage ou une couche de peinture intumescente. Ces nouveaux outils peuvent être utilisés lors de la rénovation ou de la réaffectation de bâtiments existants pour valider le concept anti-feu initial ou pour l'adapter aux normes actuelles.

3.2. RÉAFFECTATION SUR MESURE

Le fait que la protection des éléments en ferronnerie et en acier n'est pas acceptée par tout le monde est démontré par le cas du magasin bruxellois *Old England* (fig. 6). Ce bâtiment qui a été érigé sur le Mont des Arts en 1899 par l'architecte P. Saintenoy et l'ingénieur E. Wyhowski est considéré comme un des fleurons de l'Art Nouveau. Le visiteur peut admirer la façade et la structure intérieure complètement ouverte. Les poutres et les colonnes rivetées en fer forgé, caractéristique de cette architecture, déterminent l'espace. Lorsqu'on a décidé de réaffecter ce bâtiment vide et d'y installer le musée des instruments de musique (MIM), il était compliqué d'adapter la structure porteuse pour qu'elle réponde aux exigences actuelles liées à la sécurité incendie. Pour ne pas avoir à modifier cette structure, les fonctions furent permutées. La circulation du musée a été aménagée dans le bâtiment Art Nouveau et la collection proprement dite du musée a été déplacée dans le bâtiment adjacent. En faisant en sorte que la charge calorifique dans l'espace de circulation soit minimale, la structure en acier a pu rester non protégée.

En ce qui concerne l'Entrepôt public B sur le site de Tour & Taxis (fig. 7), on a eu recours aux dernières techniques pour permettre sa réaffectation en espace commercial. Différents scénarios ont été calculés pour déterminer le développement de fumée dans l'atrium et pour dimensionner une installation adéquate d'évacuation de fumée et de chaleur.

Le bois a un succès grandissant. Là où, au 19e siècle, il était encore banni de toute construction à l'épreuve du feu, ce même matériau est maintenant apprécié pour son comportement au feu. Pour autant qu'on lui donne des dimensions adéquates, il est capable d'offrir une longue résistance puisque seule la couche extérieure sera carbonisée à des températures élevées.



Fig. 6 : Lors de la réaffectation du complexe immobilier sur le Mont des Arts, tout l'espace de circulation a été aménagé dans le bâtiment *Old England* pour pouvoir laisser la structure porteuse métallique non protégée (Source : Baldheretic).



Fig. 7 : Vue sur la structure porteuse en béton armé de l'Entrepôt public B de Tour et Taxis

RÉFÉRENCES

- [1] Swailes, T., Marsh, J., *Structural appraisal of iron-framed textile mills*, Thomas Telford : London, 1998.
- [2] *Inventaire visuel de l'architecture industrielle à Bruxelles*. Brussel Oost. Fiche 151, A.A.M.: Brussel, 1980.
- [3] Wells, J.C., *History of Structural Hollow Clay Tile in the United States*, *Construction History*, 22, pp.27-46, 2007.
- [4] Swailes, T., *Scottish Iron Structures*. Guide for Practitioners, Historic Scotland: Edinburgh, 2006.
- [5] De Man, A., *Fireproof Structure*, Patent N° 609,795, United States Patent Office, 1898, 4p. (consulté via www.google.com/patents le 3 juillet 2011)
- [6] Wermiel, S.A., *The Fireproof Building. Technology and Public Safety in the Nineteenth-Century American City*, John Hopkins University Press : Baltimore, 2000.
- [7] Van de Voorde, S., *Bouwen in beton in België (1890-1975)*. Samenspel van kennis, experiment en innovatie, Thèse de Doctorat, UGent : Gent, 2011.

Technique et architecture, une alliance féconde. Arcs, voiles minces et parements en béton

Armande Hellebois

Université Libre de Bruxelles (Aspirante F.R.S.-FNRS), Service BATir

Par la diversité de ses constructions, la Région bruxelloise permet une intéressante mise en perspective de l'utilisation et du développement du béton armé. Cette étude succincte, basée sur une sélection de bâtiments et d'ouvrages bruxellois, donne un aperçu des divers avantages mais aussi des limites du matériau. Les premières structures en béton armé apparaissent à la fin du 19^e siècle. Jusqu'à la Première Guerre Mondiale, ce matériau novateur est en phase d'expérimentation, utilisé surtout pour des constructions utilitaires et industrielles. Dans la période d'entre-deux-guerres, le béton armé est alors employé pour supporter de lourdes charges ou franchir de grandes portées. Architectes et ingénieurs créent, ensuite, des formes audacieuses et légères, inspirées par les forces et contraintes du matériau. Dans les années 1960, le béton revendique une place de choix dans la construction. La préfabrication en masse, que ce soit pour des logements ou des bâtiments de bureau, offre, à un prix compétitif, une image forte, parfois polémique, au béton armé.

1. LES DÉBUTS DU BÉTON ARMÉ

Le béton armé, tel qu'on le définit actuellement, est constitué de deux matériaux qui apparaissent vers le milieu du 19^e siècle : d'une part, le ciment artificiel (mélangé à du sable, des graviers et de l'eau) et, d'autre part, les armatures en fer ou en acier. Avant la Première Guerre Mondiale, le matériau est novateur [1]. Son efficacité structurale reste alors à démontrer et des formes architecturales adaptées sont encore à trouver. De plus, l'introduction de ce matériau dans la construction modifie le secteur en profondeur, depuis l'organisation du projet jusqu'aux intervenants sur chantier. A cette époque, les constructions en béton armé sont dominées par des systèmes commerciaux brevetés. Les réalisations sont souvent empiriques mais déjà résistantes structurellement. L'usage du béton armé est d'ailleurs déjà assez largement répandu dans les années 1900. Au début, les typologies les plus utilisées sont les planchers et les escaliers, puis les hangars industriels (par exemple l'entrepôt royal de Tour & Taxis, 1904-1907), les bâtiments publics et les maisons individuelles. Le leitmotiv, celui notamment de la firme Hennebique, est de limiter le risque d'incendie, le béton offrant une meilleure résistance au feu par rapport aux constructions métalliques. Le second avantage du matériau est sa résistance aux lourdes charges et aux vibrations, bien utile dans les usines par exemple. Les désirs nouveaux et hygiénistes de la population favorisent aussi le béton armé, reconnu comme matériau hygiénique. Petit-à-petit, le monde scientifique s'approprie le sujet et les premières normes apparaissent vers 1905-1910, en Europe.

2. LA DIFFUSION DU MATÉRIAU DANS L'ENTRE-DEUX-GUERRES

A Bruxelles comme ailleurs, la période de l'entre-deux-guerres est marquée par une utilisation plus visible du béton armé. Le matériau se met alors au service



Fig. 1 : Eglise Saint-Jean-Baptiste à Molenbeek-Saint-Jean, vue des arcs paraboliques principaux (Attas, [4]).

d'imposantes constructions comme support de lourdes charges et franchissement de grandes portées. La forme en arc est particulièrement adaptée pour offrir un minimum d'encombrement au sol. L'ossature de l'église Saint-Jean Baptiste de Molenbeek (1930-1932) est composée de grands arcs paraboliques (hauteur 23 m et largeur 16,5 m) (fig. 1). Outre l'aspect moderne d'inspiration Art Déco suggéré notamment par l'utilisation du béton armé, l'architecte J. Diongre exploite surtout ce matériau pour ses avantages: rapidité d'exécution et faible coût [2].

Cependant dans ce cas, la forme d'arc n'était sans doute pas le choix structural le plus judicieux à cause des charges ponctuelles. Dans le traitement formel, on peut y voir une certaine référence à la piscine de la Butte aux Cailles à Paris (1921-1924, L. Bonnier, système Hennebique) ainsi qu'à l'Église du Raincy (1922, Frères Perret) [3]. La construction d'églises en béton armé se répand à cette époque, bien qu'une des premières utilisations du béton dans un édifice religieux remonte à l'Église de Saint-Jean de Montmartre à Paris (1894-1904, A. de Baudot, système Cottancin).

En 1935, Bruxelles organise, pour la troisième fois, une Exposition Universelle dont le but principal est de célébrer le centenaire des chemins de fer belges ainsi que le cinquantième anniversaire de la colonie belge. L'Exposition a lieu sur le plateau du Heysel. C'est dans ce cadre qu'est construit le grand palais du Heysel, actuellement Palais 5 (J. Van Neck, L. Baes) dont la façade Art Déco est aujourd'hui emblématique. La structure portante est constituée de 12 arcs paraboliques, à trois rotules, construits deux par deux. Ils ont une portée de 86 m pour une hauteur sous clef de 31 m. Un des aspects remarquables de l'ouvrage réside dans son exécution ingénieuse, minimisant le temps nécessaire à la construction (fig. 2). Les étapes clés du processus de construction sont les suivantes [5]. Premièrement, les cintres métalliques à 3 rotules sont construits pour supporter le coffrage et le bétonnage des arcs définitifs. Ensuite, les fondations des appuis permanents sont réalisées avec des pieux inclinés et verticaux. Puis, les arcs sont coffrés et bétonnés avec du ciment à durcissement rapide, pour pouvoir décoffrer relativement rapidement. Vient ensuite la délicate opération de décintrement, qui se fait en montant, ce qui est rare, grâce à un vérin placé à la rotule centrale de l'arc. Finalement, le ripage du cintre métallique a lieu pour déplacer longitudinalement le cintre et recommencer le processus pour la paire d'arcs suivante.



Fig. 2 : Palais 5 du Heysel pendant sa construction [6].

D'autres structures en arc en béton armé caractéristiques de cette époque existent toujours à Bruxelles [4]. Par exemple, le viaduc ferroviaire de la Pède (1929) est formé de 16 travées (23 m de portée maximum) en arc à 3 rotules, de type Freyssinet. La passerelle du Parc

d'Osseghem, enjambant un étang, est construite lors de l'Exposition Universelle de 1935. Sa structure en arc, soutenant le tablier, a seulement 40 cm d'épaisseur pour une portée de 35 m. Sa forme s'inscrit dans une tendance de l'époque, remarquable notamment dans l'œuvre de l'ingénieur suisse R. Maillart. Le planétarium (M. Keym, C. Van Nueten) est également réalisé en 1935. Cet ouvrage est exceptionnel par l'épaisseur de sa coupole de 5 cm d'épaisseur seulement pour 23,5 m de diamètre intérieur. En 1968, il fut remplacé par une coupole de 25 m de diamètre et de 6,8 cm d'épaisseur. On pourrait donc l'associer à celle du planétarium d'Iéna (1925) des ingénieurs F. Dischinger et W. Bauersfeld, une des premières coupoles en béton armé, d'une épaisseur extrêmement mince. Le planétarium d'Iéna annonce la période de la construction en voiles minces en béton armé, créations originales des ingénieurs.

3. FORME ET STRUCTURE

Dans les années 1920 apparaissent les premières constructions de coques en béton armé de faible épaisseur, grâce aux travaux de E. Freyssinet, F. Dischinger et E. Torroja, entre autres. Elles sont alors principalement utilisées pour couvrir des halls industriels et des hangars d'aviation, le but étant de réduire le poids et d'économiser de la matière [7]. L'idée est, comme l'a écrit Joedicke, « de choisir la forme de la construction à partir de la distribution des forces » [8]. Les caractéristiques d'une voile mince sont un comportement structural fourni par la résistance et la raideur de la forme globale, une faible épaisseur par rapport à la superficie et l'absence de distinction entre les éléments porteurs et portés. Les formes sont à simple courbure (en berceau par exemple), à double courbure positive (comme les coupoles) ou négative (pour les paraboloides hyperboliques (PH)), ou autres (voiles plissés, conoïdes, etc.) (fig. 3). Ces nouvelles formes sont devenues possibles grâce à l'utilisation de matériaux résistants à la compression et à la traction, comme le béton armé.

Le PH, voile à double courbure négative, présente l'avantage d'avoir un coffrage fait d'éléments droits, ce qui facilite la construction. Dans les années 1930, deux ingénieurs français, B. Lafaille et F. Aimond, travaillent sur les surfaces en forme de PH et en développent tous les fondements mathématiques relatifs à leur géométrie et à leur état de contrainte (efforts membranaires) [10]. Cependant, les coques en béton en forme de PH n'auront un réel succès qu'entre 1950 et 1970 avec, notamment, les réalisations de F. Candela au Mexique. A cette époque, de nombreuses variantes, combinaisons ou intersections de formes se réalisent en voiles minces. En Belgique, le développement des voiles minces est associé à une figure célèbre, le professeur A. Paduart [7]. Paduart entama son travail de conception et de réalisation de voiles minces par les hangars du Port d'Anvers (1948, 8 à 12 cm d'épaisseur, 15 m de large). La motivation essentielle en faveur de pareilles voûtes en berceau est un souci d'économie des matériaux et particulièrement de l'acier. Dans le contexte de la reconstruction d'après guerre où les matériaux manquent,

les voiles minces sont, en effet, une solution économique, même si ce sont des projets consommateurs de main d'œuvre. Ensuite, avec des voiles minces en forme d'arcs ondulés, Paduart réalise les hangars d'avion à Chièvres (1950-1952, 6 cm d'épaisseur, 60 m de large), se situant dans la continuité des hangars d'Orly (1923) de Freyssinet [7].



Fig. 3 : Surface à courbure gaussienne positive, négative ou nulle [9].

L'auvent de l'Institut de Sociologie de l'ULB (1966) résulte d'une collaboration entre l'architecte R. Puttemans et l'ingénieur A. Paduart, par l'intermédiaire du bureau Setesco. Il s'agit d'un exemple de voile mince de 7 cm d'épaisseur constitué de quatre PH, dont deux sont en porte-à-faux sur quelques 12 m [7]. La couverture des ateliers du garage Renault à Anderlecht (1963) est un autre exemple bruxellois de couverture en voiles minces composés de PH, mais de type « parapluie », à son apogée dans les années 1950-1960 [4]. Le PH est une forme tridimensionnelle dont la surface peut être obtenue par translation d'une parabole convexe sur une parabole concave ou par déplacement d'une droite (la génératrice) sur deux directrices (droites non concourantes) (fig. 3). Le PH se comporte donc comme un ensemble de voûtes et de chaînettes orientées à 45° par rapport aux rives (fig. 4) [9]. Les rives sont sollicitées par un effort de cisaillement à l'interface entre le voile et la rive. La simplicité des coffrages est due au fait qu'il s'agit d'une surface réglée. Le PH possède quatre coins et la projection orthogonale constitue un quadrilatère. Il possède deux points bas et deux points hauts (fig. 4). Les forces dans les rives, engendrées par les actions sont orientées des points hauts vers les points bas structuraux, les forces tendent donc à écarter les deux points bas. Dans le cas auvent de l'Institut de Sociologie, grâce à la juxtaposition des PH, certaines forces se compensent, mais par contre les forces transmises aux deux béquilles tendent à les écarter. C'est pourquoi, un tirant en béton précontraint relie les fondations des deux pieds [7].

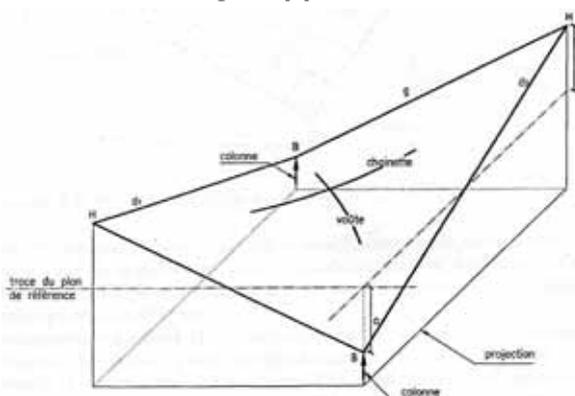


Fig. 4 : Concept du PH [11].

Pour l'Expo 1958 est érigé le pavillon Philips, œuvre de l'architecte Le Corbusier et de son collaborateur Xenakis (fig. 5) [12]. Cette œuvre d'art totale devait permettre au visiteur d'expérimenter une composition acoustique et visuelle, le « Poème électronique ». Le pavillon était davantage un objet, presque une sculpture, qu'un bâtiment. Et il a d'ailleurs été pensé comme tel.

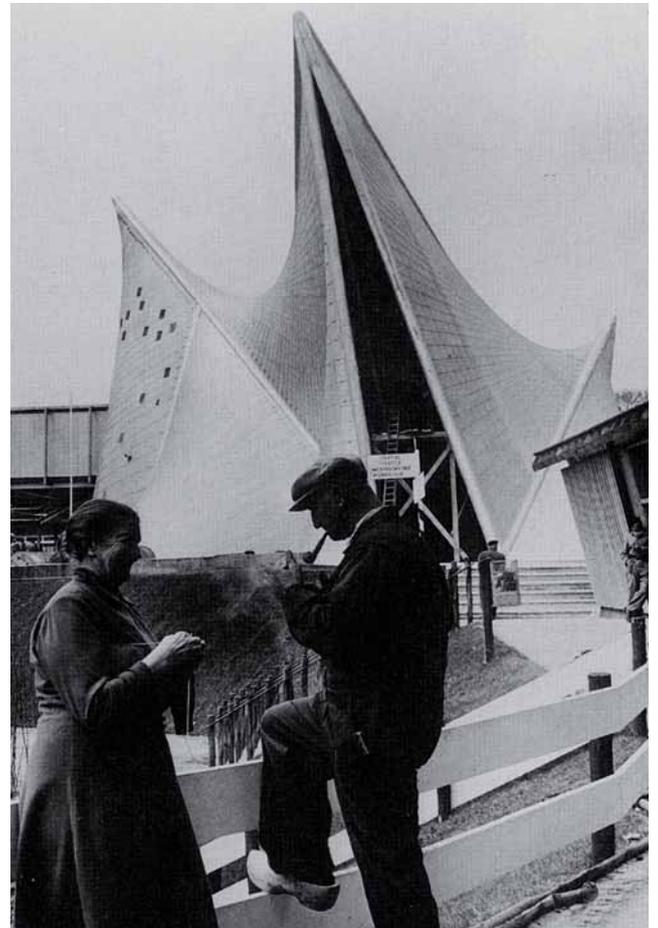


Fig. 5 : Pavillon Philips pendant l'Expo 58 (Source : Archives Le Corbusier).

L'ingéniosité technique du pavillon, d'une hauteur de 20 m, provient surtout de la mise en place de ses 9 coques en PH, d'épaisseur 5 cm, qui ont été divisées en petites plaques d'un m² en béton armé préfabriqué. Ces dalles ont été assemblées sur place en tendant des fils des deux côtés des plaques. Cette forme très complexe à calculer fut donc surtout l'objet d'essai de dimensionnement par maquette [12].

Pour cette même Exposition Universelle, Paduart en association avec J. Van Doosselaere et J. Moeschal construisent la célèbre Flèche du Génie Civil (détruite en 1970). « Cette construction en béton armé devait constituer un signal, une attraction, qui pouvait être obtenue grâce à une originalité technique et esthétique » et qui par ailleurs représentait « la victoire du Génie Civil Belge sur la nature » [13]. La Flèche du Génie Civil se composait de deux porte-à-faux supportés par une seule et même fondation. D'un côté, une coupole en voile mince de béton de 6 cm d'épaisseur couvrant une salle d'exposition et servant de contrepoids à l'autre côté composé de la flèche monumentale. Cette flèche était constituée d'une énorme

poutre en béton armé de 78 m de portée, à section en V à parois minces d'épaisseur variant de 12 cm à 4 cm. La pointe se situait à 35 m au-dessus du sol. L'exécution de ce porte-à-faux ne fut pas chose aisée, de par la complexité et la densité des armatures, tout comme le décintrement qui fut difficile à une si grande hauteur [4].



Fig. 6 : Vue du voile plissé de l'hippodrome de Groenendael (Espion, [7]).

Le dernier exemple de l'œuvre de A. Paduart dans le domaine des voiles minces est une tribune au champ de courses de Groenendael, réalisée en 1980 dans la périphérie bruxelloise (J. Vandevorde) (fig. 6).

La couverture des tribunes est réalisée par des voiles minces plissés en porte-à-faux (13,5 m) dont l'épaisseur n'est que de 7 cm. Cet exemple est significatif car il est

probablement le plus grand voile mince plissé en Région bruxelloise [7]. Bien que plus tardif, il s'inscrit dans la droite ligne des voiles minces plissés, notamment célèbres par l'auditorium de l'UNESCO à Paris (1958, P. Nervi, A. Breuer). Cette œuvre de Paduart rappelle aussi l'hippodrome à Zarzuela de E. Torroja (1935), aux dimensions similaires même si le type de voiles minces est différent (secteur d'hyperboloïde à la tribune espagnole).

A partir des années 1970 les tendances économiques se modifient et les voiles minces, coûteux en main d'œuvre, seront alors supplantés par des charpentes métalliques, ou par des structures tendues à câbles par exemple.

4. QUAND LA PRÉFABRICATION DÉVELOPPE UNE NOUVELLE IMAGE

Après la Seconde Guerre Mondiale, grâce aux progrès de l'industrialisation, l'application du béton préfabriqué augmente fortement [2]. L'industrie de la préfabrication permet alors une économie substantielle grâce aux éléments répétitifs et au montage rapide. Cependant, un des points délicats de la préfabrication est l'assemblage des éléments. De plus, le béton préfabriqué, bien qu'en qualité de finition excellente, doit trouver sa place dans l'esthétique collective. Le béton architectonique est une solution qui s'oppose aux murs rideaux pour lesquels le bâtiment est entièrement enveloppé dans une peau vitrée qui n'assure aucun rôle dans la stabilité de l'édifice, contrairement au béton architectonique. Cela permet au mur-rideau d'être

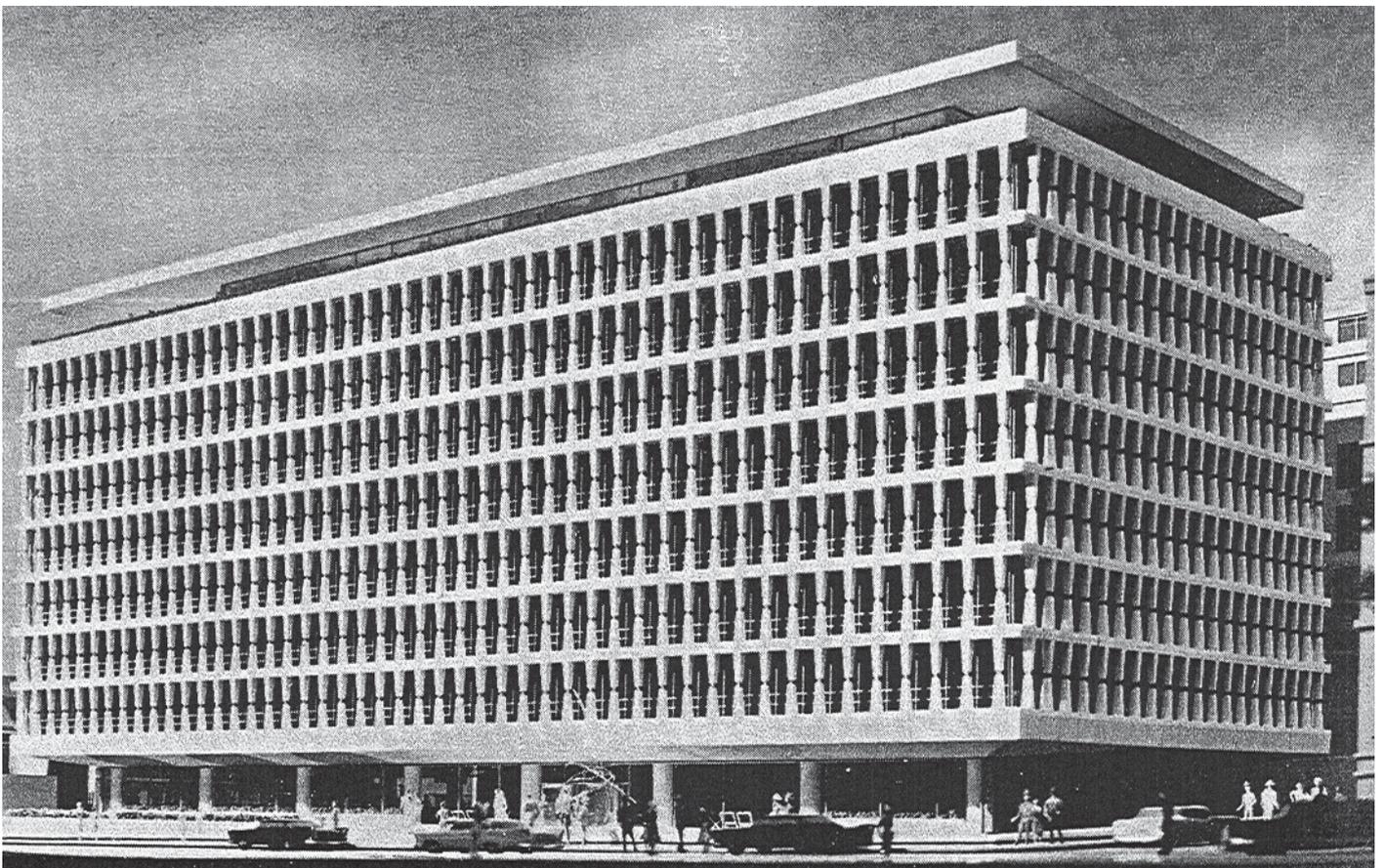


Fig. 7 : Façade de la Banque Lambert, illustration d'après maquette du bâtiment [15].

léger et d'avoir un encombrement limité. Le mur-rideau, tout comme le béton architectonique, se prête bien à la modulation et donc à la préfabrication [4]. La première façade en Belgique édifée avec la technique du mur-rideau est la tour PS (1957, H. Van Kuyck) qui, à l'époque de sa construction, fut le plus haut gratte-ciel de Bruxelles. Néanmoins les façades en murs-rideaux sont utilisées aux Etats-Unis dès les années 1910 et fréquemment dans les années 1930 [4].

A Bruxelles, une des premières applications en façade du béton préfabriqué est le Foncolin (1955-1958), Fonds Colonial des Invalidités, des architectes A. Jacquain, J. Wabbes et V. Mulpas, en collaboration avec les ingénieurs de la firme néerlandaise Schokbeton [2]. La façade est constituée de cadres préfabriqués qui supportent en grande partie les charges des planchers. Le Foncolin, par l'emploi du béton préfabriqué, va inspirer de nombreux bâtiments à Bruxelles. La Banque Bruxelles Lambert (1958-1964), aujourd'hui ING, fait partie des premières utilisations de béton architectonique (fig. 7). Ce bâtiment de bureaux rappelle d'ailleurs aussi celui de la RTT (1959, L. Stynen, P. De Meyer) pour ses caractéristiques techniques, soit une façade supportant les planchers et très peu de colonnes intérieures [14]. Le nouveau siège social de la BBL se voulait être une image forte de la banque, c'est pourquoi le bureau d'architecture new-yorkais mondialement connu, Skidmore, Owings and Merrill, fut engagé. Les éléments de façade sont des éléments cruciformes préfabriqués et précontraints en béton, qui supportent les hourdis des planchers (fig. 8). Ces éléments sont reliés entre eux par une rotule en acier inoxydable (fig. 8).

Quelques années plus tard, le groupe CBR (1967-1970) a saisi l'opportunité offerte par cette architecture nouvelle pour créer à Bruxelles un bâtiment emblématique pour le secteur de la préfabrication. L'ouvrage se présente sous forme d'un immeuble tour de neuf étages. Les éléments de façade en béton architectonique soutiennent les hourdis du plancher, réalisés en béton précontraint préfabriqué mais servent aussi d'enveloppe et d'éléments décoratifs du bâtiment [16]. Les éléments préfabriqués sont ici situés dans le plan de la façade, contrairement à l'ancienne Banque Lambert. L'utilisation d'éléments préfabriqués a permis de construire rapidement le bâtiment. Cette facilité d'exécution est, en effet, un des avantages majeurs de la technique de préfabrication.

A la même époque, la Caisse Générale d'Épargne et de Retraite désire aussi ériger son nouveau siège social à Bruxelles (1971-1973). Outre l'utilisation de planchers en dalle champignon, relativement peu courante en Belgique, et celle de poutres originales de type Préflex, la façade de ce bâtiment a aussi utilisé des éléments de béton architectonique préfabriqué [17]. La particularité réside dans leur forme en Y renversé. Ils sont composés principalement de béton armé, avec des armatures de diamètres importants. De plus, la partie inférieure de chaque élément a été précontrainte car ces éléments, supportant de lourdes charges verticales, subissent des contraintes importantes de traction à l'intrados.

Pour l'anecdote, en 1968 la CGER avait fait appel au Service d'Analyse des Contraintes de l'ULB pour réaliser des essais expérimentaux sur modèles et des simulations numériques. Pour l'aspect expérimental, il s'agissait essentiellement d'essais photoélastiques sur maquette et des essais à rupture sur un modèle réduit d'éléments, avec mesures de déformations par straingages notamment. Parallèlement, ce cas d'étude a permis aux méthodes numériques par éléments finis, théorie nouvelle à l'époque, de confronter leurs performances aux résultats expérimentaux.

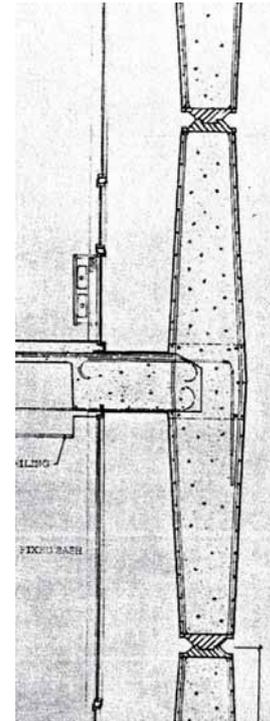


Fig. 8 : Façade de la Banque Lambert, détail des connections entre deux éléments de façade et entre les éléments de façade et le plancher [15].

5. EN CONCLUSION

Cette série d'exemples bruxellois illustre les multiples possibilités qu'offre le béton armé pour la construction. Grâce aux techniques et technologies inventées ou perfectionnées peu à peu, chaque époque a pu tirer profit du matériau. D'abord, sa résistance et sa malléabilité en ont fait un matériau privilégié pour les ouvrages d'art ou des bâtiments de grande ampleur. Ensuite, la maîtrise de la fabrication du béton et des outils technologiques associés permet une production importante et nécessaire lors des reconstructions d'après-guerre. De plus, la rapidité d'exécution a accéléré la cadence de construction. Cependant, ce fut parfois au détriment de la qualité sur le long terme ou d'une recherche architecturale et esthétique trop sommaire. Néanmoins, une collaboration étroite entre structure et forme a créé les voiles minces. Grâce aux théories mathématiques, les matériaux sont réduits au strict minimum. Cette contrainte de restriction de matière a engendré une architecture épurée aux formes originales.

RÉFÉRENCES

- [1] Hellebois, A. & Espion, B., Réflexions sur la conservation des premières constructions en béton armé (1880-1914), *Les Nouvelles du Patrimoine*, 132, pp. 11-14, 2011.
- [2] Van de Voorde, S., *Bouwen in beton in België (1890-1975). Samenspel van kennis, experiment en innovatie*, Thèse de Doctorat, UGent : Gent, 2011.
- [3] Marrey, B. & Hammoutene, F., *Le béton à Paris*, A. et J. Picard, 2000.
- [4] Attas, D. & Provost, M., eds., *Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs*, CIVA : Bruxelles, 2011.
- [5] Baes, L., Le ripage des arcs en béton armé du grand palais de l'exposition Universelle et Internationale de Bruxelles 1935, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, pp.773-789, 1934.
- [6] Baes, L., Les Grands Palais de l'Exposition Universelle et Internationale de Bruxelles 1935. Aperçu général concernant les ouvrages métalliques, *L'Ossature Métallique*, 3(6), pp.279-297, 1934.
- [7] Espion, B., Halleux, P. & Schiffmann, J.I., Contributions of André Paduart to the art of thin concrete shell vaulting, *Proc. Of the 1st Int. Conf. On Construction History*, eds. S. Huerta, Madrid, pp.829-838, 2003.
- [8] Joedicke, J., *Les Structures en Voiles et Coques*, Karl Krämer: Stuttgart, 1963.
- [9] Walther, R. & Treleani, J., *Construire en béton. Synthèse pour architectes*, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, PPUR, 1993.
- [10] Espion, B., *Thin Reinforced Concrete Shells*, Lecture given at the 1st European Summer School on Construction History CHESS 2011, Cambridge, August 4th 2011.
- [11] Provost, M., *Conception des ouvrages en béton*, vols 1 & 2, Cours CNST 299-ULB, 2005.
- [12] Xenakis, Y., Vreedenburgh, C., Bouma, A., Ligtenberg, F. & Duyster, H., Le pavillon Philips à l'Exposition Universelle de Bruxelles 1958, *Revue Technique Philips*, 20(1), pp.1-40, 1958-1959.
- [13] Paduart, A. & Van Dooselaere, J., La flèche du Génie Civil, au Heysel, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, pp. 7-54, 1958.
- [14] Novgorodsky, L., Le nouveau siège central de la banque Lambert à Bruxelles, *La Technique des Travaux*, 38 (9-10), pp. 275-286, 1962.
- [15] 50 ans d'architecture en Belgique, *Architecture*, 36, pp. 568-571, 1989.
- [16] Novgorodsky, L., Le nouveau siège social de la cimenterie CBR à Watermael-Boitsfort (Bruxelles), *La Technique des Travaux*, 47 (9-10), pp. 267-273, 1971.
- [17] Novgorodsky, L., Nouvel immeuble de la Caisse Générale d'Épargne et de Retraite (C.G.E.R.) à Bruxelles, *La Technique des Travaux*, 50 (3-4), pp. 63-76, 1974.

Précontrainte du béton et préflexion de l'acier. Deux méthodes d'optimisation de l'utilisation de ces matériaux au milieu du 20e siècle

Bernard Espion

Université Libre de Bruxelles, Service BATir

La Région bruxelloise peut s'enorgueillir d'avoir été, entre 1942 et 1952, le lieu de création et des premières expérimentations de deux importantes techniques de construction : le béton précontraint et la poutre PREFLEX. Si l'invention du béton précontraint est indiscutablement à mettre au crédit de l'ingénieur français Eugène Freyssinet, les applications avant 1940 restent confidentielles et quasi-expérimentales car toutes les techniques industrielles doivent encore être mises au point. En Belgique, le professeur gantois Gustave Magnel se lance dans la mise au point d'une technique de précontrainte « nationale » en collaboration avec l'entreprise bruxelloise Blaton-Aubert. Il réalise à Bruxelles en 1942 et en 1944 les premiers ouvrages en béton précontraint en Belgique, donnant ses lettres de crédit à un mode de construction qui se développe rapidement durant la reconstruction du pays. Alors que la précontrainte du béton se situe clairement dans l'optimisation du béton armé, la poutre PREFLEX, inventée en 1950 par l'ingénieur Abraham Lipski, établi à Bruxelles, se veut plutôt une optimisation de l'usage des poutrelles métalliques. Comme pour le béton précontraint, c'est l'achèvement de la jonction Nord-Midi qui permet la première réalisation en poutres PREFLEX. La technique connaîtra une importante utilisation en Belgique dans les années 1950-1970 avec des applications phares à Bruxelles.

1. INTRODUCTION

Le béton possède d'excellentes caractéristiques mécaniques en compression, mais une résistance très faible en traction. C'est bien de cette observation que découle la naissance, à la fin du 19e siècle, de la technique du béton armé. Les premiers éléments de structure en béton armé sont alors des poutres et des dalles de plancher dans les bâtiments. Dans ces éléments fléchis, l'armature, constituée généralement à l'époque de ronds lisses en acier doux (limite élastique : 240 MPa), est disposée avant le coulage du béton dans les parties qui seront soumises à la traction par le chargement. Le béton, une fois coulé et durci, adhère à l'armature. Lors du chargement, le béton est partiellement soumis à traction et va se fissurer. C'est à ce moment que l'armature joue pleinement son rôle : elle supplée à l'absence de résistance à la traction du béton et équilibre la résultante des efforts de compression induits par la flexion dans les poutres et dalles en béton. On notera cependant qu'en service l'ouverture de ces fissures reste très modérée (inférieure à 0,3 mm), non perceptible sauf à l'œil averti et n'est en principe pas préjudiciable pour le fonctionnement et la pérennité des constructions en béton armé.

2. INVENTION DE LA PRÉCONTRAINTÉ

Dès les débuts du béton armé, les conséquences de ce fonctionnement fissuré limitent son utilisation, en particulier en ce qui concerne la portée maximum des éléments, et certains pionniers recherchent des solutions pour empêcher cette fissuration du béton en service. L'idée de base consiste à exercer de façon permanente une compression de la partie des poutres mise en traction par la flexion. En 1888 déjà, l'ingénieur berlinois W. Döhring

imagine un système pour mettre en tension les armatures préalablement au coulage du béton : lorsque le béton a suffisamment durci, la force exercée sur les armatures est relâchée ; par le biais de l'adhérence acier-béton, cette force se transforme en compression longitudinale sur l'élément en béton. On peut reconnaître dans ce brevet certains des éléments constitutifs des principes de la précontrainte du béton par pre-tensioning (des armatures), largement utilisée aujourd'hui pour la construction de poutres et dalles précontraintes et préfabriquées en usine, une technique dont l'essor ne date que de la fin des années 1950.

Cependant, toutes les tentatives pour réaliser ainsi la précontrainte du béton par mise en tension préalable des armatures, constituées alors d'acier à basse limite élastique, se soldent par un échec, la précontrainte du béton disparaissant après quelques semaines. Ceci peut parfaitement s'expliquer si l'on prend en considération le fait que le béton n'est pas, à la différence de l'acier, un matériau au comportement élastique : il subit, en plus de sa déformation instantanée au chargement, des déformations différées de retrait et de fluage qui augmentent dans le temps. Ces déformations différées sont largement inconnues des ingénieurs au début du 20e siècle. L'ingénieur français Eugène Freyssinet (1879-1962) est probablement l'un des tous premiers à observer l'effet significatif et défavorable des déformations de fluage dans les mois qui suivent le décintrement en 1912 des arcs très surbaissés de 72,5 m de portée du pont du Veurdre sur l'Allier [1]. Ce n'est cependant que dans les années vingt que quelques rares ingénieurs commencent à effectuer des essais pour quantifier ces déformations différées. En 1928, fort d'une réflexion qualitative et quantitative sur

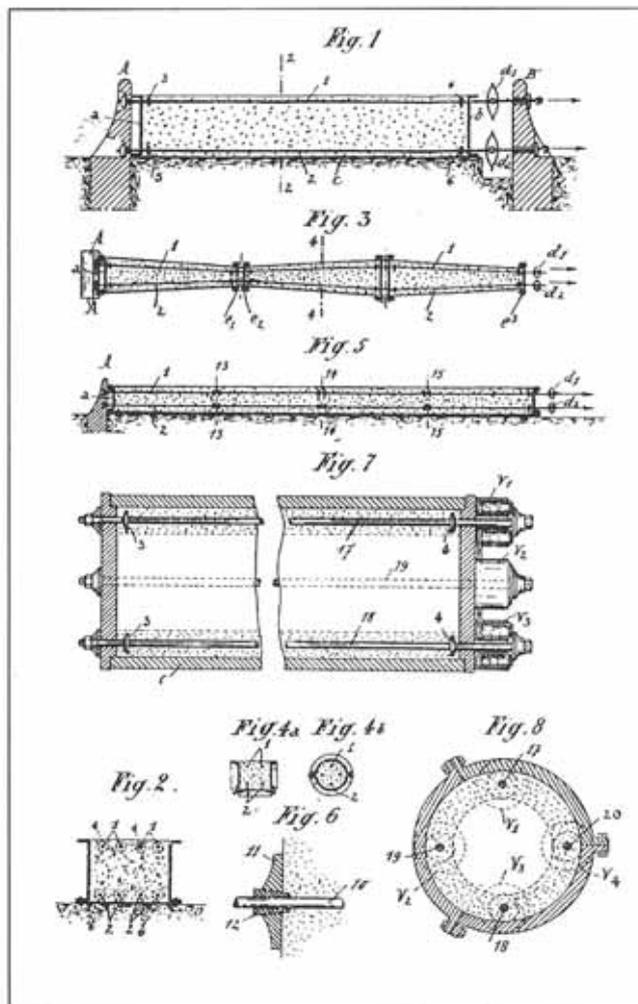


Fig. 1 : Brevet (1928) de la précontrainte [1].

les déformations différées du béton, Freyssinet dépose le 1er brevet (fig. 1) qui décrit correctement les principes du béton précontraint (surtout par pre-tensioning). Il est le premier à avoir compris le mécanisme des pertes de précontrainte dues au retrait et au fluage du béton et à en déduire que la précontrainte du béton doit impérativement être réalisée avec des armatures à très haute résistance. Il démissionne de l'entreprise (Limousin) avec laquelle il a construit de nombreuses constructions exceptionnelles qui lui ont valu une notoriété considérable en France et à l'étranger et se lance en 1929 dans la mise au point des techniques de la précontrainte en vue de l'exploitation de son brevet. Ce n'est que vers 1935 que le succès est au rendez-vous avec quelques réalisations en Algérie et quelques essais par le concessionnaire allemand du brevet à partir de 1936. Avant l'éclatement de la Seconde Guerre Mondiale, les réalisations en béton précontraint restent de l'ordre du prototype et sont peu connues [2]. A l'été 1939, Freyssinet dépose le brevet qui décrit les moyens (câbles, ancrages, vérins) efficaces pour réaliser une précontrainte du béton par post-tension des armatures, mais les applications pendant les années de guerre sont très limitées et confidentielles.

3. PREMIÈRES RÉALISATIONS BELGES

En Belgique, le pionnier en matière de béton précontraint est le professeur Gustave Magnel (1889-1955) de l'Université de Gand [3]. Sa position académique lui a sans doute permis de prendre connaissance des quelques rares publications consacrées au béton précontraint parues dans la littérature spécialisée depuis 1936. En collaboration avec l'entrepreneur bruxellois Blaton, Magnel va développer à partir de 1941 une technique de précontrainte par post-tension qui se distingue du procédé Freyssinet par le fait que les fils d'acier à haute résistance (tendus à 900 MPa) de 5 mm de diamètre qui constituent les câbles de précontrainte sont mis en tension par paires et coincés dans un système d'ancrage avec clavettes plates qui sera connu sous le nom « Blaton-Magnel » ou « Sandwich » et qui restera très utilisé en Belgique jusque dans les années soixante (fig. 2).

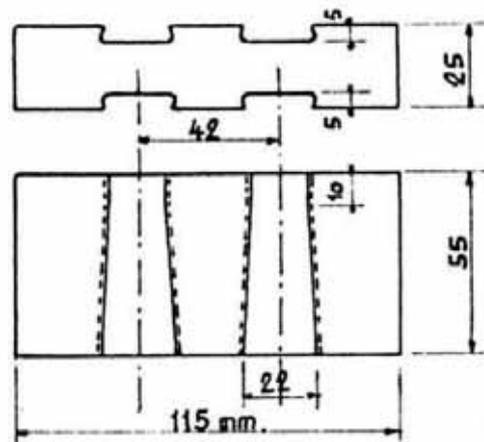
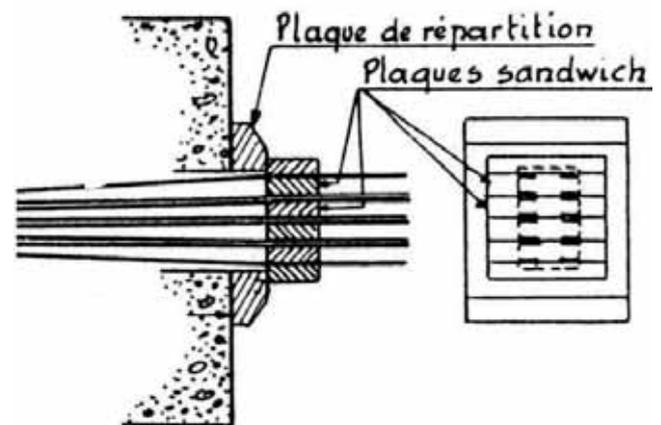


Fig. 2 : Ancreage Blaton-Magnel [5].

Après quelques expériences dans son laboratoire à l'université, Magnel est en quête d'applications et, dès 1941, propose de réaliser un tablier de pont en béton précontraint dans le cadre des travaux de la jonction ferroviaire Nord-Midi à Bruxelles. Ce projet sera connu sous le nom de « tabliers expérimentaux de la rue du Miroir » [4]. Expérimentaux car, étant donné leur caractère novateur, Magnel envisage leur construction comme un projet de recherche associant,

outre lui-même et Blaton, l'Office national pour l'achèvement de la Jonction (ONJ), la SNCB, le bureau de contrôle SECO, le Fond National de la Recherche Scientifique (FNRS) et ses collègues de l'ULB Louis Baes (1883-1961) et Frans Van den Dungen (1898-1965) pour des essais in situ. La construction de ces ponts enjambant la rue du Miroir a débuté en 1942. L'ensemble est constitué de six dalles de 20 m de portée : deux de ces dalles sont en béton précontraint et les quatre autres en béton armé. Ceci explique leur différence d'épaisseur (1,24 m pour celles en béton précontraint ; 1,85 m pour celles en béton armé) et illustre de façon particulièrement claire l'un des atouts du béton précontraint, à savoir la possibilité de concevoir des constructions plus élancées qu'en béton armé. Une poutre précontrainte témoin est essayée à rupture sur site en 1942, mais la mise en tension des deux tabliers précontraints ne sera cependant effectuée qu'à l'été 1944. Le pont est finalement mis en service avec l'achèvement de la jonction en 1952 et l'est toujours. S'il est le premier ouvrage d'art en béton précontraint conçu en Belgique, il ne sera pas le premier mis en service.

Cet honneur revient à un autre ouvrage d'art réalisé en Région bruxelloise : la passerelle enjambant avec une portée de 21 m le canal Charleroi-Bruxelles à Anderlecht à la hauteur du quai de l'Industrie, rue de Gosselies [4]. En effet, dès 1944, l'administration des ponts et chaussées, impressionnée par les résultats des essais de la rue du Miroir, et convaincue des économies importantes de matériaux (acier et béton) que permettait le béton précontraint, avait autorisé la soumission de projets qui utiliseraient le béton précontraint pour la reconstruction de ponts détruits en 1940. La construction de la passerelle de la rue de Gosselies, réalisée par l'entreprise Blaton sur un projet probablement inspiré par Magnel, a débuté en mars 1944 et la précontrainte (système Blaton-Magnel) était même réalisée avant septembre 1944.

Avant mars 1944 avait également été attribué le contrat d'entreprise pour la reconstruction d'une autre passerelle en béton précontraint enjambant avec une portée de 44,5 m le canal Charleroi-Bruxelles à Malheide (Lembeek) à quelques kilomètres des limites de la région bruxelloise [4]. Parmi les différentes soumissions reçues, l'administration avait retenu, non celle déposée par Blaton (projet Magnel), mais celui de l'entreprise bruxelloise SETRA (Société d'Etudes et de Travaux) qui cherchait à exploiter une technique de précontrainte brevetée dès 1943 par son directeur, l'ingénieur Carlos Wets. Il s'agissait d'un projet particulièrement innovant, consistant en une technique de précontrainte par post-tension réalisée, non par des fils de 5 ou 7 mm de diamètre avec ancrages par clavettes, comme dans les systèmes Freyssinet ou sandwich, mais extérieurement au béton par des barres de fort diamètre (40 mm), en acier à très haute résistance (1150 MPa), filetées à leurs extrémités et ancrées grâce à des écrous. Etant donné l'absence de référence pour cette technique, l'administration exigea de l'entreprise SETRA qu'elle réalise la mise en charge d'une poutre prototype. Une poutre de 30 m de portée, modèle réduit à grande échelle du pont de Malheide, fut construite au dépôt de

matériel de SETRA à Haren en 1945 et mise en charge en présence d'une large audience d'ingénieurs en 1946 [4]. La réalisation de l'essai était placée sous la direction de l'ingénieur André Paduart (1914-1985), engagé comme directeur technique de SETRA en 1944, et qui s'illustrera par la suite comme concepteur de voiles minces en béton. L'essai de Haren ayant satisfait l'administration, la construction de la passerelle de Malheide commença à l'été 1947. Lors de sa mise en service en octobre 1947, elle constituait la plus longue portée en béton précontraint réalisée alors en Belgique.

Il est indéniable que l'essor du béton précontraint dans l'immédiat après-guerre est dû aux économies considérables en matériaux, et singulièrement en acier, que cette technique permettait, avantage majeur en cette période de pénurie de matériaux de construction. Pour la diffusion du procédé en Belgique, il faut particulièrement souligner l'influence des publications du professeur Magnel, qui fut le premier à publier un livre de conception des ouvrages en béton précontraint didactique et pratique, régulièrement augmenté et très tôt traduit en anglais. Son rôle dans l'introduction du béton précontraint aux Etats-Unis en 1949 doit être mentionné [3,5].

4. LA PRÉFLEXION DES POUTRELLES EN ACIER

A la fin des années 1940, l'industrie sidérurgique peut produire sans grande différence de prix des poutrelles métalliques laminées à chaud en deux qualités : acier doux (limite élastique 235 MPa) ou acier à haute résistance (limite élastique 355 MPa). Mais il n'est guère possible de tirer avantage de cette haute résistance pour les poutres métalliques car ce sont souvent des considérations d'instabilité (de déversement) et de limitation de la flèche en service, plus que le taux de travail de l'acier, qui dictent le choix des profilés. C'est pour tenter d'utiliser au mieux les propriétés mécaniques des profilés en acier à haute résistance dans les poutres métalliques que l'ingénieur Abraham Lipski (1911-1982), dont le bureau d'études est établi à Bruxelles, conçoit le principe de la préflexion, breveté sous le nom commercial PREFLEX le 15 mai 1950 [5]. Les étapes de construction d'une poutre PREFLEX sont résumées à la fig. 3.

On part d'une poutre en acier à haute résistance à laquelle on a donné, au laminage, une contreflèche (fig. 3.a). A cette poutrelle, on applique une préflexion au moyen de deux forces concentrées (fig. 3.b). L'ampleur de cette préflexion en termes de contraintes dans l'acier est équivalente à celle qui serait produite en service en ne considérant que la poutrelle métallique. Un béton de haute résistance est coulé autour de la semelle tendue de la poutrelle (fig. 3.c). Lorsque le béton est suffisamment durci, les forces de préflexion sont relâchées (fig. 3.d). La poutrelle métallique veut reprendre sa position initiale mais la présence du talon de béton l'en empêche ; le talon de béton est donc fortement comprimé et les contraintes de traction dans le profilé reviennent à environ deux tiers de leur valeur initiale ; tant l'acier que le béton se trouvent donc précontraints (l'un prétendu, l'autre précomprimé).

A ce stade (fig. 3.d), la poutrelle composite, préfabriquée en usine, est prête à être transportée sur chantier. Très généralement, un béton de 2ème phase coulé sur chantier complète l'enrobage de la poutrelle métallique qui prend extérieurement l'aspect d'une poutre précontrainte (fig. 3.e). On obtient ainsi une poutre mixte acier-béton qui, pour une capacité portante et une portée données, est moins haute (moins encombrante) qu'une poutre précontrainte et bien entendu qu'une poutrelle métallique nue ou qu'une poutre en béton armé. Elle est donc toute indiquée pour franchir de grandes portées, la limitation provenant du transport routier de longues poutres.

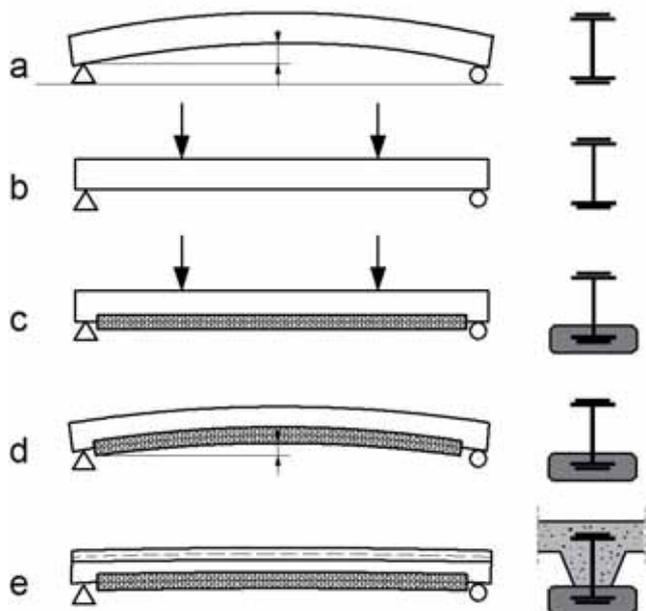


Fig. 3 : Construction d'une poutre PREFLEX [9].

5. ESSOR DE LA POUTRE PREFLEX

Abraham Lipski est diplômé de l'Université de Gand, mais c'est avec le professeur de l'ULB Louis Baes qu'il développe les méthodes de dimensionnement de la poutre PREFLEX. Suivant une longue tradition qui remonte aux premiers essais publics de mise en charge de poutres en béton armé par Hennebique, qui s'est perpétrée avec le béton précontraint, la société PREFLEX, comme la SETRA en 1946, organise (à Machelen) un événement public auquel elle convie de nombreux professionnels et clients potentiels pour la démonstration du procédé [6]. En mai 1951, on procéda à l'essai jusqu'au maximum de capacité portante de deux poutres enrobées de 11 m de portée. L'une des poutrelles était simplement enrobée, l'autre préfléchée suivant le système PREFLEX. Bien entendu, les résultats des essais furent conformes aux attentes et on en déduisit la validation de la méthode de calcul des poutres PREFLEX : il ne restait plus qu'à trouver des marchés.

Le premier client pour un marché de poutres PREFLEX est à nouveau l'Office National de la Jonction qui, décidément, se montre un maître d'ouvrage particulièrement réceptif à l'innovation technologique. En juin 1952, 166 poutres PREFLEX sont utilisées pour réaliser des plafonds de tunnel pour tramways aux abords de la gare du Midi [7].

A l'occasion de ce chantier, une poutre PREFLEX de 14 m de portée est soumise à un essai de fatigue (2 millions de cycles) en juin 1952 sur la toute nouvelle installation d'essais de l'Association des Industriels de Belgique, à Auderghem. Ces essais de fatigue sont bien entendus très importants pour justifier l'utilisation des poutres PREFLEX dans des ponts.

Un premier pont-route en poutres PREFLEX a déjà été réalisé en 1953, mais il faut attendre 1957 pour qu'un premier pont en poutres PREFLEX se construise à Bruxelles. Il s'agit du pont qui porte le boulevard de l'Empereur en franchissant la rue Lebeau à la place de la justice [8]. A nouveau, sa réalisation est à voir dans le cadre de l'aménagement de la jonction Nord-Midi. L'endroit, la portée, les contraintes de chantier avec une voie de tram à franchir, justifiaient ici l'usage de poutres PREFLEX pour une portée de 31 m avec une hauteur minimum. La SNCB utilisera souvent des poutres PREFLEX pour réaliser des ponts-rails de moyenne portée, comme par exemple celui surplombant la chaussée d'Etterbeek à la gare Schuman [9].

Les années 50-60 apparaissent comme l'âge d'or de la poutre PREFLEX avec, à Bruxelles, une utilisation très répandue dans le bâtiment, comme par exemple la réalisation du Palais des Congrès au Mont des Arts. Outre les avantages déjà cités de la poutre PREFLEX qui justifient son utilisation pour gagner en hauteur de poutre, il faut ajouter que le béton procure la résistance au feu nécessaire, point crucial pour la construction métallique dans les bâtiments. La réalisation probablement la plus spectaculaire qui fait appel à la poutre PREFLEX est la tour du Midi, ou tour des pensions, 37 étages, plan carré de 38,5 m de côté, et 150 m de hauteur, actuellement toujours la plus haute tour en Belgique (fig. 4). L'utilisation de poutres préfléchées a permis de réaliser des plateaux sans aucune colonne autour d'un noyau de forme carrée de 20 m de côté, libérant ainsi un maximum d'espace [10]. Autre immeuble phare du skyline bruxellois : le Berlaymont. De hauteur plus modeste – il ne comporte que 13 étages – sa structure portante fait également usage de poutres PREFLEX. Au niveau du 13e étage, 114 poutres PREFLEX sont posées sur les voiles en béton qui constituent le noyau. A leurs extrémités, des suspentes verticales fournissent des appuis pour les planchers métalliques de tous les niveaux inférieurs [11].

En 1989, la SNCB et la société RONVEAUX de Ciney, qui avait repris la production des poutres PREFLEX après la cessation des activités de la société PREFLEX dont l'usine se trouvait à Ternat, ont breveté un perfectionnement de la poutre PREFLEX qui associe la préflexion de deux profilés métalliques et la précontrainte d'une dalle en béton au moyen de torons adhérents (pre-tensioning) pour créer des tabliers de pont-rail à section en forme d'auge pour lesquels on recherche particulièrement une hauteur minimum sous la voie. Il s'agit d'une très belle synthèse de la technique de la précontrainte du béton et de la préflexion des profilés métalliques. Ces tabliers préfabriqués ont été abondamment utilisés pour réaliser plusieurs viaducs nécessités par l'arrivée à la gare de Bruxelles Midi des lignes à grande vitesse [12].

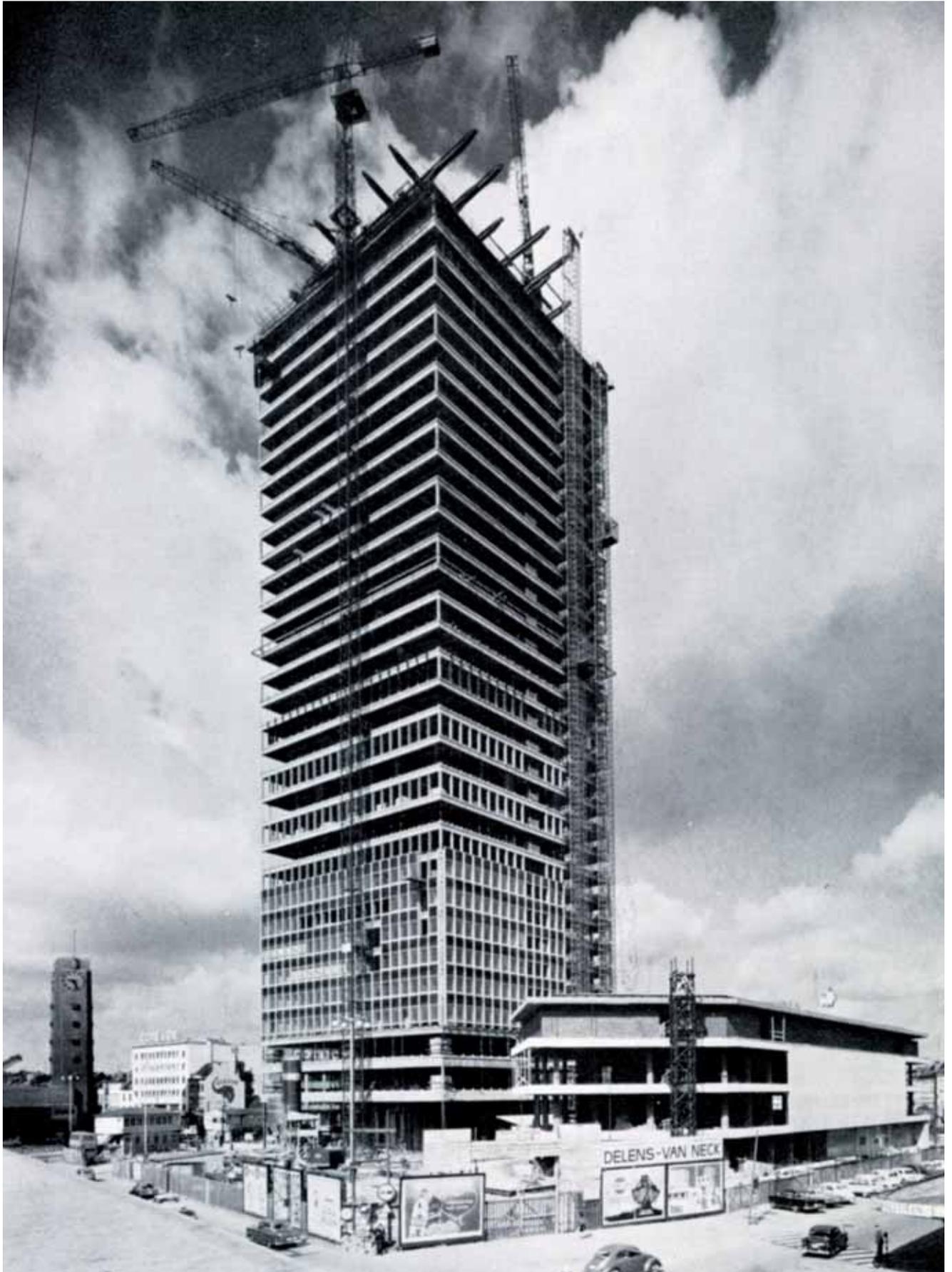


Fig. 4 : Construction de la Tour du Midi avec des poutres PREFLEX [10].

6. CONCLUSION

La construction en Région bruxelloise, et plus particulièrement l'achèvement de la jonction Nord-Midi et certains aménagements autour de la gare de Bruxelles Midi, a permis la mise au point en Belgique de deux techniques de construction innovantes dans les années 1940-1950 : le béton précontraint et la poutre PREFLEX. Les premiers projets de béton précontraint en Belgique ont été réalisés à Bruxelles par l'entrepreneur bruxellois Bleton à l'instigation du professeur G. Magnel qui contribuera significativement à la diffusion du béton précontraint, non seulement en Belgique, mais aussi dans les pays anglo-saxons. La passerelle de Malheide, conçue par l'ingénieur bruxellois Carlos Wets et réalisée par son entreprise SETRA, constitue une première mondiale en matière de précontrainte externe. La poutre PREFLEX, une authentique invention de l'ingénierie belge, a été conçue à Bruxelles et y a reçu non seulement ses premières mais aussi ses plus spectaculaires applications. Le concept de la préflexion des poutrelles métalliques, belle solution technique du point de vue de ses principes, n'a pas, à ce jour, connu une grande diffusion hors de Belgique. Sa plus grande consommation d'acier que les poutres précontraintes la réserve à des applications où de très faibles hauteurs de poutres sont recherchées.

RÉFÉRENCES

- [1] Freyssinet, E., *Un amour sans limite*, Editions du Linteau: Paris, pp. 15-81, 1993.
- [2] Grote, J. & Marrey, B., *Freyssinet, la précontrainte et l'Europe*, Editions du Linteau: Paris, 2000.
- [3] Taerwe, L. R., Contribution of Gustave Magnel to the development of prestressed concrete, *Proc. of the Ned H. Burns Symp. on Historic Innovations in Prestressed Concrete*, eds. B. W. Russel & S.P. Gross: ACI-SP-231-1, 2005.
- [4] Espion, B., Early applications of prestressing to bridges and footbridges in Brussels area, *Proc. of the 3rd Int. Congr. on Construction History*, eds. K.-E. Kurrer, W. Lorenz & V. Wetzl, Cottbus, Vol.2, pp. 535-541, 2009.
- [5] Van de Voorde, S., *Bouwen in beton in België (1890-1975)*. Samenspel van kennis, experiment en innovatie, Thèse de Doctorat, UGent : Gent, 2011.
- [6] Baes, L. & Lipski, A., Amélioration, par flexion préalable, des poutres métalliques enrobées de béton, *La Technique des Travaux*, 27(5), pp.305-320, 1951.
- [7] Lombard, A., Techniques particulières appliquées aux travaux des abords de la gare du Midi à Bruxelles, *Habitat et Habitation, documents d'architecture et d'urbanisme*, 13(7), pp.89-94, 1953.
- [8] Decarpentrie, E., Le viaduc de la place de la Justice à Bruxelles, *Acier-Stahl-Steel*, 24(4), pp.163-168, 1959.
- [9] Staquet, S., Kalogiannakis, G., Detandt, H., Van Hemelrijck, D. & Espion, B., Field testing of a 30 years old composite prebended railway bridge, *Bridge Engineering Journal*, 160 (BE2), pp.89-98, 2007.
- [10] Moussiaux, G., La Tour du Midi à Bruxelles, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, pp. 286-292, 1967.
- [11] Verkeyn, A. & Dobruszkes, A., Le Centre Administratif Berlaymont, *Annales des Travaux Publics de Belgique*, pp. 136-140, 1978.
- [12] Staquet, S., Rigot, G., Detandt, H. & Espion, B., Innovative Composite Precast Precambered U-Shaped Concrete Deck for Belgium's High Speed Railway Trains, *PCI J.*, 49(6), pp.94-113, 2004.

Nouvelle image pour un matériau connu. La promotion et l'utilisation du bois comme matériau de construction moderne à Bruxelles

Rika Devos
UGent/St. Lucas WENK

Le bois, comme matériau moderne et technologiquement développé, n'a commencé à jouer un rôle dans l'histoire de la construction que quand il a été introduit, grâce à l'arrivée des techniques perfectionnées de collage et de clouage après la Deuxième Guerre Mondiale. Ces techniques ont été largement appliquées en Région bruxelloise et les Expositions Universelles de 1910, 1935 et 1958 ont été l'occasion de grandes premières et d'expériences remarquables dans ce contexte. C'est à l'Expo 58 que la contribution et la diversité des constructions en bois ont été les plus grandes: des applications plutôt classiques aux glulams auxquels il faut ajouter les poutres HB (Hilding Brosenius) et les constructions à forme ou plan actif. Lors de cette exposition, des firmes telles que De Coene, Nemaho et les Scieries anversoises ont présenté les résultats de l'évolution et de la promotion de la construction moderne en bois en Belgique. Au cours de la décennie suivante, les techniques modernes de construction en bois ont été largement appliquées à Bruxelles.

1. LES DEUX VISAGES DU BOIS

Dans la théorie de l'architecture, le bois est le matériau qu'on emploie depuis l'origine de l'architecture qui remonte jusqu'à la hutte primitive telle qu'elle est reproduite depuis Vitruve. Le bois est la matière du fondement mythique de l'architecture, même si la matérialité des constructions semble être d'une importance accessoire. L'utilisation du bois est presque « évidente » et représente une manière de construire « originale », un modèle qui continuera à se développer. Dans l'histoire de l'architecture, le bois est également un « premier » matériau : ainsi par exemple le développement du temple grec antique, simplifié, est présenté comme une évolution des structures en bois vers des constructions en pierres naturelles plus solidement charpentées. Construire en pierre a été rapidement associé à une construction plus évoluée, ainsi qu'au pouvoir et à l'argent. La vision classique de l'architecture se limite aussi le plus souvent aux constructions en pierre et ce jusqu'à l'entrée en scène de matériaux tels que la fonte, l'acier et le béton. C'est aussi le cas dans l'histoire de l'architecture et de la construction belge. Mais le bois connaît ici aussi de nombreuses applications, souvent remarquables, du mobilier raffiné aux charpentes séculaires ingénieuses. Le bois est une constante mais plutôt anonyme en tant que matériau de construction. Il prend de l'importance et devient plus visible avec l'arrivée de nouveaux procédés modernes de construction en bois après la seconde guerre mondiale. Les systèmes collés et/ou cloués ont introduit le bois comme matériau technologiquement développé avec lequel il était également possible de réaliser des géométries complexes ou de grandes portées qui sont comparables en termes de prix de revient, de type de structure et de dimensions aux structures contemporaines en acier ou béton armé. La promotion du bois comme matériau de construction moderne est allée de pair en Belgique avec une grande campagne de promotion nationale qui a commencé officiellement au Palais des Beaux-Arts en

1955, a atteint son point culminant à l'Expo 58 et n'a pas raté son effet [1]. Comme cette relance du bois s'ajoute à une expertise de la construction en bois largement répandue et faisant partie des traditions, le visage du bois d'après guerre ne peut pas se résumer tout simplement, ou uniquement, à une histoire de grandes portées spectaculaires et de faible poids propre de la construction. Bien que peu de constructions en bois soient reprises dans l'histoire de l'architecture et de la construction à Bruxelles, celles-ci sont néanmoins particulièrement nombreuses. Les remarquables constructions en bois présentées aux expositions universelles de Bruxelles, qui ont eu leur importance non seulement dans la région bruxelloise mais aussi au niveau mondial, ne sont pas passées incognito.

2. LES PRIX BELGES DU BOIS

La promotion du bois comme matériau de construction moderne a officiellement commencé, en Belgique, avec la création de l'Institut belge du bois (1948) et le Bureau national de documentation sur le bois (1952 BNDB). Au cours de la même période, des organismes de ce type ont été créés aux Pays-Bas et en France pour informer le secteur de la construction et les concepteurs sur les nouvelles possibilités de construction avec du bois. Ce sont des instituts de recherche, d'enseignement et de documentation qui sont responsables du développement et de la diffusion de la technologie moderne du bois. Leurs travaux s'étendent également aux publications spécialisées régulières. Le périodique d'architecture *Bouwen & Wonen* coopère par exemple avec le BNDB et des publications de ce type paraissent dans les pays voisins [2, 3, 4]. Les publications illustrent non seulement les nouveaux procédés du bois mais montrent aussi explicitement comment les structures tridimensionnelles, nouvelles pour l'époque, peuvent être réalisées en bois et comment les principes de rationalisation et préfabrication peuvent être appliqués à la construction en bois [5].



Fig. 1 : Église St-Laurent (façade avant), 1954-'55, Lokeren. Arch. J. Windels et De Coene (Source: Fondation De Coene asbl).

Le BNDB a organisé entre 1953 et 1958 différents concours, journées d'études et expositions pour promouvoir l'utilisation du bois dans l'architecture en Belgique. Au cours des trois années suivantes, 1954-1956, il a planté trois « jalons » repris sous le titre *Het Hout op Nieuwe Wegen* (Le bois sur de nouvelles voies) dont a largement parlé *Bouwen & Wonen* [1, 2]. Le numéro de l'été 1954 présentait déjà les résultats du premier Prix du bois anversois. Un plus grand public n'a toutefois été touché que grâce à l'exposition des résultats du Prix national du bois au palais de Beaux-Arts de Bruxelles en 1955, intitulé *Le bois, l'ami de l'homme*. Le premier prix a été remporté par l'architecte Jan Windels pour son église St Laurent à Lokeren (fig. 1). L'église a été réalisée avec les nouvelles fermes en lamellé-collé (« glulams ») par les ateliers d'art de Courtrai « Kortrijkse Kunstwerkstede » par les Ateliers d'Art de Courtrai De Coene Frères et passe pour une des premières applications de ce type de fermes en Belgique. La même firme a également réalisé le stand de l'exposition où le projet a été présenté. Ce montage, d'après le projet de Renaat Braem, a également montré les dernières possibilités de la construction moderne en bois avec des fermes cintrées, des plaques courbées et différents types de placages. Windels et De Coene devaient une fois de plus exécuter le projet un an plus tard. L'église ND Reine des cieux de Watermael-Boitsfort a également été réalisée avec ces fermes paraboliques à trois articulations. Le « Troisième jalon », le premier Salon quinquennal du bois et industries connexes à Gand (septembre 1956) s'adressait encore davantage à un plus grand public. Les fermes qui ont reçu le premier Prix national du bois en 1955 sont le résultat d'une évolution rapide de

différents procédés de fabrication de fermes et poutres lamellées-collées pour arriver au type qui est encore utilisé aujourd'hui. Les parties d'un tel glulam sont composées de planches dentées sur la tête en sections standard qui sont collées entre elles. Les planches sont mises dans la forme voulue, serrées pour garantir le contact entre colle et bois, et sont ensuite chauffées pour optimiser le durcissement des résines. Finalement, l'élément glulam est raboté [1, 6]. Avec de tels éléments, il est possible de réaliser, en partant de petites sections standard comme matériau de base, de grandes portées et un large éventail de formes. De plus, les glulams ont aussi une bonne résistance au feu et sont insensibles aux champignons et aux insectes parasites. La percée, après la guerre, de l'utilisation de glulams et éléments connexes s'explique, pour la région bruxelloise également, par la situation économique du moment mais également par la disponibilité de nouvelles colles, plus facilement ouvrables et plus résistantes à l'humidité telles que l'urée-formaldéhyde et mélamine-formaldéhyde.

Les premières expériences et premiers brevets relatifs aux poutres en lamellé-collé remontent à 1891 et sont au nom du charpentier industriel Karl Friedrich Otto Hetzer [7, 8]. Ces poutres ont une section en forme de I, certaines sont collées (avec de la caséine), d'autres collées et clouées. Bruxelles semble important pour la diffusion de cette jeune technique. À l'Exposition universelle de Bruxelles en 1910, la grande halle des chemins de fer allemands a été exécutée, selon le projet de Peter Behrens, de l'ingénieur Kügler et de Hetzer, avec des fermes collées à deux rotules qui avaient une portée de 43 m – un record qui s'est maintenu jusque dans les années 1930. Vient ensuite, comme réalisation connue avec des poutres en bois collées selon le procédé Hetzer, la halle de tennis proche de l'avenue Louise érigée en 1954, d'après le projet d'Emile Goffay. Elle a été réalisée – un an avant le Prix national du bois – par la firme néerlandaise Nemaho avec dix fermes elliptiques à trois rotules pour une portée de quelque 35 m, de nouveau avec des profilés en I.

Nemaho, qui peut être considérée comme une filiale de la firme Hetzer, s'est également établie à Bruxelles en 1954. Peu après, les premières commandes pour des pavillons et des structures d'utilité publique ont commencé à arriver pour l'Expo 58, la première Exposition universelle d'après-guerre.

3. L'EXPO 58 ET LA PROMOTION DU BOIS MODERNE

Trois importants constructeurs en bois sont actifs à l'Expo 58 : De Coene, Nemaho et les Scieries anversoises. L'exposition leur offre l'occasion de faire la démonstration de leurs nouveaux produits et modes de travail. De remarquables structures en bois sont également réalisées avec des moyens plus classiques tels que les cadres démontables pour le snack-bar du jardin des Quatre Saisons d'après le projet de Roger Bastin en collaboration avec l'ingénieur René Greisch ou le complexe de réception au palais V du Heysel de Léon Stynen, De

Meyer, Bresseleers et Meekels. Certains pavillons ont aussi bénéficié d'une structure porteuse composée de poutres en treillis, comme le pavillon de l'agriculture dans la section coloniale, un projet de Ivan Blomme en collaboration avec l'ingénieur J. Ronsse ou le pavillon finlandais de Reima Peitilä. Après l'exposition, certaines structures en bois ont encore été ajoutées aux palais du Heysel : la passerelle à l'arrière des palais, une structure en treillis avec des éléments en bois lamellé-collé d'après le projet de Philippe Samyn et partenaires avec comme bureau d'études Setesco et Van Wetter (1999), et le palais XII qui a également été édifié avec une structure de coque en bois tridimensionnelle par Jean van Pottelsberghe et le bureau d'études Van Wetter (1988).

Le complexe des palais du Heysel date cependant de l'Exposition universelle de 1935. Lors de celle-ci, les possibilités de construction de petites sections en bois ont été montrées et ce dans un des pavillons dans une situation de premier plan, directement à côté des palais : le pavillon de la Vie catholique de l'architecte Henri Lacoste. La construction en bois des quatre coupes dont le caractère expérimental a échappé à de nombreux spectateurs et historiens est une application complexe de la construction lamellée telle qu'elle a été mise au point en 1908 à Dessau par Friedrich Zollinger. Ce dernier visait la construction bon marché de toits pour les habitations sociales par un système ingénieux, en partie préfabriqué, selon lequel de petits morceaux de bois sont assemblés simplement avec des clous et des boulons. Tout comme pour son pavillon pour l'Exposition coloniale à Vincennes en 1931, Lacoste va avec ses coupes jusqu'aux limites de cette technique. Sa géométrie ne permet toujours pas de réaliser la construction avec seulement quelques pièces standard. La recherche récente a indiqué qu'il faut de préférence 19 éléments pour la réalisation de telles coupes et que les angles et dimensions des pièces ne peuvent être déterminés que par des calculs complexes – tellement complexes que cela suppose un processus d'essais et d'erreurs, et une photo de modèles contemporains d'essai à l'échelle semble le confirmer [9].

Plus encore que celles qui l'ont précédée, l'Expo 58 est une illustration des techniques modernes de construction en bois. Sa popularité peut s'expliquer d'une part par l'encouragement des organisateurs de l'Exposition universelle à employer le bois, surtout dans la section coloniale, pour les structures porteuses. On craignait de manquer d'acier sur le chantier [10]. Le bois, ce fut le raisonnement, offrait les mêmes avantages de rapidité de montage et démontage et était certainement concurrentiel en termes de prix. Le processus de construction d'une des plus grandes structures sur le site, le palais du gouvernement du Congo, Ruanda et Urundi (150 m de long et 19 m de haut) illustre ces thèses. Le pavillon a une structure porteuse de 26 fermes collées qui ont une portée de 45,60 m, selon un projet de Georges Ricquier, exécuté par De Coene. Le choix en faveur des fermes a été effectué après une étude comparative avec des structures en acier et béton qui semblaient non seulement être plus chères mais exigeaient aussi des fondations plus lourdes. Les trois firmes spécialisées – De Coene, Nemaho et les

Scieries anversoises – ont réalisé ensemble 31 structures porteuses en bois pour l'Expo 58 [11]. Dans le cas des deux premières, il s'agit toujours de glulams, alors que les Scieries anversoises commercialisaient, vers 1957, en plus de ce type, un système collé cloué. Les prestations de ces firmes ont été hautement appréciées au niveau international. En témoignent des rapports enthousiastes dans la presse spécialisée, tel le journal britannique *Wood* [12] ou la déclaration de l'architecte du pavillon norvégien (réalisé avec des poutres glulam des Scieries anversoises) Sverre Fehn : « It was quite a shock for me, coming from Norway, to see that they had at that time, in 1958, a technology ahead of ours, they were more clever in handling wood, in structural thinking, in plywood and glue construction » [13].

Non seulement la technologie encore jeune à cette époque mais aussi le mode d'utilisation des glulams témoignent du savoir-faire et de l'inventivité de l'industrie belge du bois. Le petit pavillon du Comptoir tuilier de Courtrai, qui est un des seuls bâtiments se trouvant encore aujourd'hui au Heysel, en est une parfaite illustration, même si seul le contour est encore reconnaissable. L'architecte Geo Bontinck a dessiné ce pavillon sous la forme d'une calotte hémisphérique et a mis au point les détails avec le bureau de projet de De Coene [1, 14]. Sous la calotte hémisphérique, deux niveaux ont été aménagés, reliés par un escalier en bois avec des limons tordus (également des glulams) dans le vide. Le plancher de l'étage s'appuie sur des portiques isolés en bois lamellé-collé. Au-dessus de tout cela, quatre fermes circulaires à trois rotules déterminent la calotte hémisphérique (fig. 2).

Les deux fermes centrales se croisent au faite du pavillon, les fermes extérieures s'étendent parallèlement à la façade avant et à la façade arrière du bâtiment. Néanmoins les pieds des fermes adjacentes se touchent, la calotte hémisphérique d'une hauteur de 8,75 m ne s'appuyant que par quatre pointes sur le socle. La chapelle de la Belgique joyeuse des architectes Yvan Blomme et José Vandevoorde est une application simple des glulams. Une fois de plus, De Coene a fourni les six fermes à trois rotules, droites et asymétriques. Cette structure a été vendue après l'exposition, y compris la plus grande partie du mobilier, et est toujours en service aujourd'hui comme église de la communauté catholique romaine anglophone de Saint-Anthony de Kraainem. Dans les années 1950 - 1960, de nombreuses églises et chapelles dans le monde ont été réalisées avec des structures lamellées-collées [15]. Il y a, à Bruxelles, outre l'église ND Reine des cieux, l'église Pie X à Forest de Paul et Marcel Mignot (1967) ayant une structure comparable à celle de la chapelle de l'Expo, ou l'église Saint-Marc (1970) à Uccle de l'architecte André Milis – les deux réalisées par De Coene – qui méritent d'être mentionnées. Dans les années 1960 - début des années 1970, l'utilisation de glulams a pris son envol dans la région bruxelloise dans divers programmes, même s'ils ont disparu et que l'on en trouve aujourd'hui difficilement des traces.



Fig. 2 : Le pavillon du Comptoir Tuilier de Courtrai, 1957-'58 (Expo 58), Bruxelles. Arch. G. Bontinck et De Coene (Source: Fondation De Coene asbl).

Un autre type de fermes en bois « modernes » à l'Expo 58 consiste en fermes, pannes et portiques collés cloués tels ceux mis sur le marché par les Scieries anversoises, selon le système HB dont la firme possédait le brevet belge depuis 1954. HB sont les initiales de Hilding Brosenius, le professeur suédois enseignant à l'Institut royal de technologie de Stockholm qui a mis au point le système en 1939-1940. Des tels portiques ou poutres ont un profil en forme de I avec un âme composée de deux couches de courtes planches en bois de charpente collées qui se coupent à un angle de 90° et sont consolidées par des renforts transversaux. Les ailes sont constituées de trois couches de bois de charpente, clouées selon un motif spécifique. À l'Expo 58, huit pavillons ont été édifiés selon ce procédé, parmi lesquels on trouve même un « toit suspendu » pour l'église du pavillon du Vatican [8, 16]. Il s'agit d'un toit à câbles lestés dont les supports latéraux sont en HB. Les poutres porteuses du toit sont des poutres collées dans lesquelles sont intégrés des câbles porteurs dans la direction longitudinale, selon le projet de l'architecte Roger Bastin et l'ingénieur suédois Nils-Eric Lindskoug (fig. 3).

À l'Expo 58, les constructeurs ont également produits des structures en bois à forme ou plan actif. Dans les années 1950, les méthodes de calcul pour les surfaces à double

courbure et pliées, qui avaient déjà été mises au point dans l'entre-deux-guerres, entrent dans la pratique de la construction et font l'objet de nombreuses expériences. Une des grandes réalisations en bois selon ces principes à l'Expo 58 est fournie par la structure cristalline du pavillon du gouvernement britannique exécutée par la firme britannique Rainham Timber Engineering, avec Howard



Fig. 3 : Maquette de l'église Christi Gloriosi du pavillon du Vatican, 1956-'58 (Expo 58), Bruxelles. Arch. R. Bastin, ing. N. Lindskoug et les Scieries anversoises (Source : Archives générales du royaume, Bruxelles, fonds d'archives Expo 58).

Lobb & partners comme architectes et Felix Samuely comme ingénieur conseil. Le bâtiment se compose de trois parties en forme de tente, chacune d'elle étant constituée de quatre éléments consistant en un système de nervures en bois sur le dessus et le dessous desquels une peau multiplex est collée. Cette peau remplit aussi une fonction porteuse – le procédé dit *stressed skin*, permet non seulement une préfabrication extensive mais aussi de nombreux détails poussés. L'essentiel est toutefois la résistance à l'eau des différentes parties, en particulier des plaques dont les joints sont des points délicats. En témoigne l'auvent de la porte des Nations d'après le projet de Pierre Guilissen et Jean Koning, avec André Paduart comme ingénieur et De Coene comme exécutant. Outre le fameux signal en tenségrité, un double auvent expérimental a été édifié : une double plaque plissée qui fait saillie de 13,5 m au-delà du point d'appui central sur les deux côtés. Le tout semble être un précurseur de l'auvent que réalisera Paduart en 1985 pour l'hippodrome de Groenendael. L'auvent de la porte des Nations s'est en partie effondré la nuit du 8-9 juin, ce qui est imputable à des difficultés dues aux matériaux et aux procédés mais aussi à des erreurs de conception et de construction. Le paraboloïde hyperbolique (« hypar ») en bois collé du pavillon d'information sur la place de Brouckère a eu plus de succès. Le pavillon a été édifié en 1957 d'après le projet de Lucien-Jacques Baucher, Jean-Pierre Blondel et Odette Filippone, avec René Sarger comme ingénieur conseil. Nemaho est exécutant du projet, avec l'ingénieur néerlandais J.H. Pestman comme consultant [17]. Le pavillon a finalement continué à être utilisé pendant plus d'une décennie. C'est une construction avec un plan libre et des parois de verre, organisée sous l'hypar en bois qui s'appuie par ses deux pointes inférieures sur le sol – deux massifs en béton. La membrane en bois est constituée de trois couches de planches collées. Le collage a eu lieu in situ, sous une tente, pour pouvoir garantir des bonnes températures et une humidité adéquates. Les planches du dessus et du dessous sont placées parallèlement aux bords tandis que la couche intermédiaire suit la pente de la parabole. Les poutres de rive le long des façades sont exécutées en bois lamellé-collé. Le collage des planches en une surface à double courbure est une première qui sera imitée à partir de 1959 dans la construction britannique. On a en tout cas constaté que le collage donnait une coque qui était quatre fois plus rigide que par clouage. Le raffinement technique du pavillon se cache toutefois dans des optimisations peu visibles mais ingénieuses. C'est ainsi que le plan du pavillon a la forme d'un losange irrégulier dont le seul axe de symétrie relie les deux points hauts, situés à 25 m l'un de l'autre. La stabilité de l'hypar est assurée par de fins profilés métalliques reliant les poutres de rive aux massifs de fondation : ils « tirent » les poutres de rive vers le bas. Ces profilés servent en même temps de châssis pour le vitrage des façades. En fin de compte, la coque est également renforcée par la tension des profilés, ce qui exclut pratiquement des déformations et d'éventuelles vibrations des parois vitrées.

4. LE BOIS À BRUXELLES

Une vue d'ensemble des constructions en bois à Bruxelles ne peut pas se limiter à la logique du canon de l'architecture ou aux récits d'expériences et d'innovations d'ingénieurs ou d'architectes. Les constructions en bois plus traditionnelles, ainsi que les procédés « sophistiqués » « modernes » qui ont permis de redécouvrir le bois après la deuxième guerre mondiale, ont toutefois laissé peu de traces dans l'histoire de la construction et de l'architecture. Le pavillon de Brouckère fait partie des rares exceptions [18]. Il s'agit néanmoins d'un grand nombre de bâtiments avec des programmes et systèmes de construction en bois très différents. Les Expositions universelles de Bruxelles offrent un fil conducteur pour évaluer et analyser la quantité et la diversité des constructions et leurs pratiques. Dans aucune autre Exposition universelle, le nombre de constructions en bois n'a été aussi grand qu'à l'Expo 58 et, à aucun moment, il n'y a eu autant de constructions en bois (et d'une telle ampleur) édifiées à Bruxelles. Les constructions en bois de l'après-guerre illustrent une histoire de la construction dans laquelle les acteurs se sont vus attribuer de nouveaux rôles : souvent, ce n'est ni l'architecte ni l'ingénieur mais bien le producteur et l'entrepreneur qui jouent un rôle central, poussés par une ambition commerciale et internationale. Une grande partie du travail de conception (calculs, dimensions, détails) a été effectuée dans les bureaux d'études [10]. Par l'ampleur et la qualité de ses pavillons « en bois » et le rôle qu'elle a joué pour promouvoir la construction moderne en bois à Bruxelles – et par extension en Belgique – l'Expo 58 offre un moment de référence pour s'informer sur les possibilités et variations de la construction moderne en bois.

RÉFÉRENCES

- [1] Devos, R. & De Kooning, M., *De Coene op Expo 58. 28 projecten*. Art De Coene Jaarboek 4/ Vlees & Beton 61, Stichting De Coene/ GUAEP: Kortrijk/Gent, 2003.
- [2] Hout op nieuwe wegen. Eerste Mijlpaal. De Antwerpse houtprijs voor architectuur. *Bouwen en Wonen*, 8/9, 1954; Het hout op nieuwe wegen. Tweede mijlpaal. De nationale architectuur prijskamp. *Bouwen en Wonen*, 6, 1955 en Het hout op nieuwe wegen. Derde mijlpaal. Het eerste vijfjaarlijkse Internationaal Salon van het Hout en aanverwante nijverheden, te Gent. *Bouwen en Wonen*, 8, 1956.
- [3] Lourdin, R., *Structures en bois*, Centre d'Etudes Architecturales: Brussel, [1969 ?].
- [4] Pestman, J.H. ., *Vormgeving in hout. Van ligger tot schaaldak*, Amsterdam: Houtvoorlichtingsinstituut, s.d.
- [5] Espion, B., Devos, R. & Provost, M., Lichtgewichten. Structuurinnovaties op Expo 58. *Moderne architectuur op Expo 58. « Voor een humaner wereld »*, eds. M. De Kooning & R. Devos, Dexia/ Mercatorfonds: Brussel, pp. 100-127, 2006.
- [6] de Saint-Font, A. F. e.a., *Charpente lamellée collée*, Monographies de la charpente en bois, Dourdan : Vial, pp. 12-30, 1966.
- [7] Müller, Ch., *Holzleimbau. Laminated Timber Construction*, Birkhäuser: Basel, pp. 21-31 en 58-61, 2000.
- [8] Nauwelaerts, J., *Moderne architectuur op de wereldtentoonstellingen van Brussel 1910 en Gent 1913*, onuitgegeven MA thesis, UGent: Gent, pp. 42-45, 2003.
- [9] Lagae, J., Henri Lacoste et la « charpente à lamelles » à l'Exposition coloniale internationale de Paris, 1931. Chronique d'une construction en bois préfabriquée. *Edifice & Artifice. Histoires constructives*, eds. R. Carvais, A. Guillerme, V. Nègre & J. Sakarovitch, Picard: Paris, pp. 781-790, 2010.
- [10] Devos, R. & Floré, F., Modern wood. De Coene at Expo 58. *Construction history. Journal of the Construction History Society*, 24, pp. 105 & 117-118, 2009.

- [11] Scheerlynck, W., *De Coene op Expo 58. Een blik op de ontwikkeling van het gebruik van hout als modern constructiemateriaal in België*, onuitgegeven MA thesis, UGent: Gent, 2003.
- [12] Timber at Brussels, en Timber structures at the Brussels Exhibition, *Wood*, oktober, p. 403 & 405-418, 1958.
- [13] Sverre Fehn in Norberg-Schulz Ch. & Postiglione, G., *Sverre Fehn. Works, Projects, Writings, 1949–1996*, The Monacelli Press: New York, p. 249, 1997.
- [NdT] « Cela a été un choc pour moi, venant de Norvège, de voir qu'ils avaient, à cette époque, en 1958, une technologie en avance sur la nôtre, qu'ils étaient plus habiles dans le maniement du bois et le raisonnement structurel, pour les constructions à base de contreplaqué et en lamellé-collé »
- [14] Devos, R., *Het paviljoen van het Kortrijks Dakpannenkantoor op Expo 58. Art De Coene. Jaarboek 6*, Stichting De Coene: Kortrijk, pp. 31-34, 2006.
- [15] Herman, F. & Van Dijk, T., *Kortrijkse Kunstwerkstede Gebroeders De Coene. 80 jaar ambacht en industrie. Meubelen – interieurs - architectuur*, Groeninghe: Kortrijk, pp. 218-231, 2006.
- [16] Devos, R., *Het Civitas Dei paviljoen op Expo 58*, onuitgegeven MA thesis, UGent: Gent, pp. 117-125, 2000.
- [17] Pestman, J.H. Informatiecentrum voor de Expo, *Bouw*, 24, pp. 603-605, 1958.
- [18] Joedicke, J., *Les Structures en Voiles et Coques*, Karl Krämer : Stuttgart, 1963.

De l'auditoire P.E. Janson de l'ULB à la Station de Métro Erasme, 50 ans de structures tendues

Michel Provost
Université Libre de Bruxelles, Service BATIr

Les ouvrages en structures tendues réalisés en Région bruxelloise de l'Expo 58 à nos jours synthétisent le développement de ce type de structures au cours des cinquante dernières années. Plusieurs ouvrages importants de l'histoire internationale de ces structures ont été réalisés pour l'Expo 58. D'abord simples pour en permettre le calcul, les formes ont pu ensuite être plus complexes grâce aux développements de l'informatique. Puis, l'évolution des matériaux a permis l'épanouissement de l'architecture textile. L'analyse de ces ouvrages nous amène à la distinction entre légèreté « visuelle ou architecturale » et légèreté « matérielle ». Leur réussite architecturale et structurale passe par la cohérence entre les formes et les forces et par une parfaite compréhension du cheminement des efforts en leur sein.

1. INTRODUCTION

Des trois formes structurales de pontage, l'arc, la poutre et la chaînette, la dernière, totalement en traction et donc non sujette au risque de flambement, est la moins consommatrice de matière. La légèreté des structures en chaînette les rend sensibles aux sollicitations parasites telles que l'action du vent ; ces structures doivent donc être lestées ou prétendues.

Dans un objectif de légèreté et d'économie de matière, la solution par lestage, qui est par essence une solution lourde, n'a pas de sens. Les structures légères sont donc en chaînette et prétendues.

Pour limiter les déformations sous l'effet des sollicitations, la prétension devra être élevée. En effet, ne perdons pas de vue qu'il s'agit de structures du deuxième ordre et que ce sont donc leurs déformations qui induisent les réactions aux efforts qui les sollicitent. Prenons l'exemple d'un équilibriste sur un câble : plus le câble sera prétendu, moins il devra se déformer pour équilibrer l'action de l'équilibriste (fig. 1).

Comme nous le verrons, la mise en prétension des structures tendues implique des efforts d'ancrage importants. Il faudra veiller à ce que ces efforts soient intelligemment repris pour ne pas perdre l'avantage d'économie de matière lié à la structure légère.

Le principe des structures tendues est fort ancien, par exemple les passerelles en lianes, mais il faut attendre la seconde moitié du 20e siècle et le développement de

matériaux tels l'acier à haute résistance, les toiles de fibres de verre enduites de PVC ou de Téflon, et de méthodes et moyens de calcul pour que ces structures soient davantage utilisées.

L'Exposition Universelle de 1958 à Bruxelles, où sept bâtiments avaient une toiture en câbles, a une place importante dans l'histoire des structures tendues. Excepté l'auditoire P.E. Janson de l'ULB, toutes les structures tendues construites dans le contexte de l'Expo ont été détruites. Jusqu'à l'époque de l'Expo, le pavillon Marie-Thumas mis à part, la forme des structures à câbles est relativement simple « pour être calculable ». La logique de l'ingénieur, « form follows force », prime sur celle de l'architecte. Ce n'est que par la suite, notamment grâce au développement d'outils d'analyse sur maquette ou par ordinateur, que des formes qui s'affranchissent des géométries simples comme celle du paraboloïde hyperbolique pourront apparaître dans les années 1960 et 1970 et déboucher notamment sur l'Olympia Park de Munich pour les Jeux Olympiques de 1972 et ensuite sur l'architecture textile.

Dans cet article, nous parcourrons 50 ans d'évolution des structures tendues au travers de quatre exemples de l'Expo 58 et de quatre ouvrages qui existent toujours actuellement.

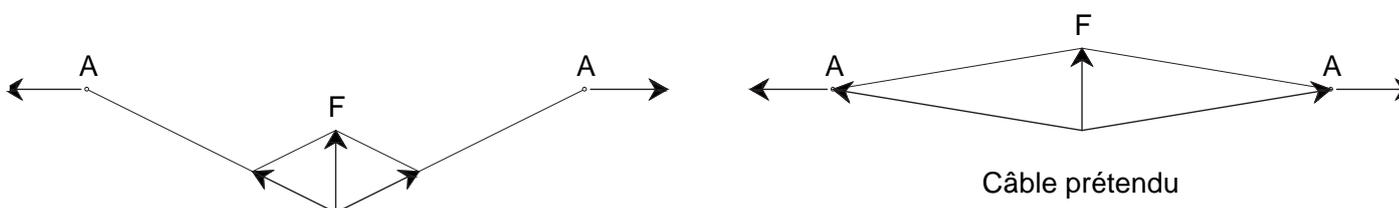


Fig. 1 : Réaction d'un câble tendu à une force perpendiculaire.

2. LA PORTE DES NATIONS

(Architectes : Jean Koning et Pierre Guillissen ;
Ingénieur : André Paduart)

Signal « flottant » composé de V superposés mais ne se touchant pas, la Porte des Nations (fig. 2) est la structure à câbles la plus spectaculaire de l'Expo 58. D'une envergure de 55 m et d'une hauteur de 48 m elle est composée de trois caissons en acier en forme de V soutenus par des câbles ancrés soit au sol soit aux extrémités des branches des V [1]. Cette structure relève de la catégorie des structures en tensegrité [2].



Fig. 2 : Porte des Nations (D. Mutoni, [1]).

Leur principe résulte de la collaboration entre l'ingénieur inventeur Buckminster Fuller et son élève, le sculpteur Kenneth Snelson. Dans les structures en tensegrité les éléments en compression ne se touchent pas et sont maintenus en équilibre par un système continu de câbles en traction.

Dans la Porte des Nations, les éléments en compression sont les caissons d'acier en V. Les rares réalisations de structures en tensegrité se limitent à quelques mâts basés sur les idées de Snelson, comme le modèle qui a été exposé au Museum of Modern Art de New York en 1959. En dépit de ses expérimentations précoces, le brevet de tensegrité de Fuller ne date en fin de compte que de 1962, celui de Snelson de 1965. La présence d'une structure en tensegrité à l'Expo 58 est dès lors remarquable.

Malgré les recherches théoriques, il faudra attendre le milieu des années 1980 pour voir le principe de tensegrité appliqué par David Geiger à la couverture de grands espaces par des structures ultra-légères. Dans le cas de la Porte des Nations, c'est surtout la « lourdeur » et les dimensions gigantesques des éléments sollicités en compression qui sautent aux yeux. Ce qui intéresse les auteurs de la sculpture, ce n'est pas tant la légèreté structurale du signal, mais bien l'illusion qui est créée : celle de V flottants.

3. LE PAVILLON DES ETATS-UNIS

(Architecte : Edward Stone ; Ingénieur : Dr. W. Cornelius)

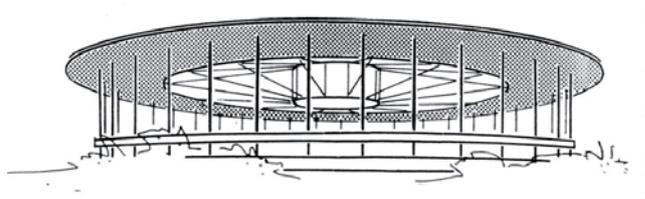


Fig. 3 : Pavillon des Etats-Unis.

La toiture de ce pavillon, d'un genre tout à fait inédit à l'époque, se compose d'une énorme « roue de vélo » d'un diamètre extérieur de 104 m, dont la « jante » en acier repose sur une double couronne de colonnes élancées en acier [3]. La toiture elle-même est formée de deux familles de câbles d'acier en forme de V (ou forme \wedge), qui sont fixés radialement à la manière de rayons entre la « jante » et le « moyeu » et qui sont recouverts de plaques de plastique. Les câbles bas, V ouvert vers le haut, sont les câbles « porteurs », les câbles hauts, V ouvert vers le bas (\wedge), qui tendent les premiers et assurent la stabilité de la toiture sont les câbles « tenseurs ». Les deux familles de câbles sont mises sous tension permanente, sollicitant ainsi en compression la poutre de rive circulaire – la jante – et en traction le moyeu de 20 m de diamètre.

La couverture du pavillon américain est la première toiture « en roue de vélo » dotée d'une double nappe de câbles radiaux porteurs et tenseurs ; elle est le précurseur de l'auditorium municipal d'Itaca (Etat de New York, 1960) de l'ingénieur Lev Zetlin [2].

Les précurseurs de ces toitures à symétrie circulaire sont des toitures lestées comme par exemple la toiture du pavillon français de la Foire annuelle de Zagreb en 1935 conçu par Bernard Laffaille ou encore la toiture circulaire de 94 m de diamètre du stade Municipal de Montevideo dont la construction se termine en 1957 constituée d'une seule famille de câbles radiaux porteurs qui supportent des dalles en béton, assurant la fonction de couverture, mais aussi de lestage, ou de pré-tension des câbles. Mais ces solutions par lestage, plus lourdes, sont moins satisfaisantes considérant la logique d'économie de matière.

4. LES TOITURES À CÂBLES EN PARABOLOÏDE HYPERBOLIQUE (PH)

Dans le cas du pavillon des Etats-Unis les câbles porteurs et tenseurs en forme de V, disposés suivant les diamètres de la roue, se superposent dans des plans diamétraux verticaux.

Une autre manière de disposer les câbles porteurs et tenseurs est de les placer dans des plans orthogonaux, la forme de couverture obtenue est alors celle d'une selle de cheval : un paraboloides hyperbolique (PH) (fig. 4).

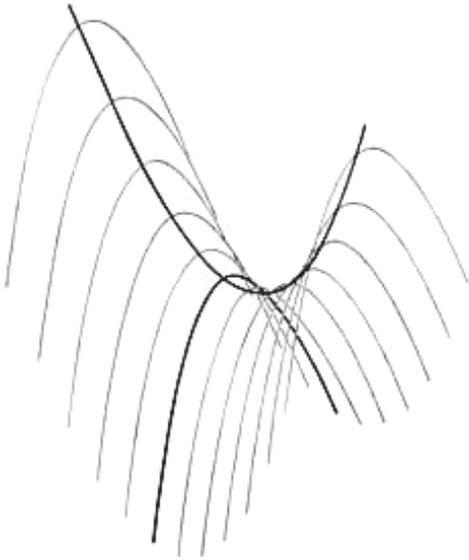


Fig.4 : Parabolôïde hyperbolique (PH).

Ces toitures sont donc composées de deux réseaux orthogonaux de câbles en forme de parabole, les câbles porteurs à concavité tournée vers le haut, les câbles tenseurs à concavité tournée vers le bas. Ces deux réseaux de câbles s'auto-tendent et assurent la stabilité de la structure même en cas de dépression de vent.

La première application de ce principe est une construction assez fondamentale dans l'histoire de la construction: il s'agit de la couverture en « selle de cheval » de la halle à bestiaux de Raleigh en Caroline du Nord en 1952, actuellement appelée « Dorton Arena » (fig. 5). L'idée en revenait à l'architecte Mathew Nowicki et à l'ingénieur Fred Severud. La surface couverte au sol était d'environ 92 m par 97 m.

Les trois ouvrages suivants dérivent de cette couverture. Commençons par l'auditoire P.E. Janson de l'ULB construit dans le cadre de l'Expo 58.

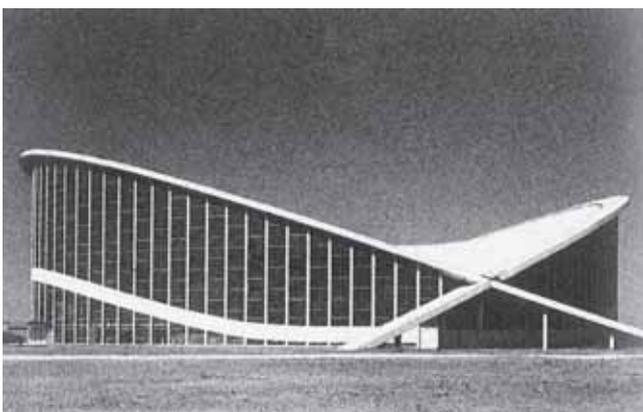


Fig.5 : Halle de Raleigh.

5. L'AUDITOIRE PAUL-EMILE JANSON DE L'ULB

(Architecte : Marcel Van Goethem ; Ingénieur : Paul Moenaert)

Construit dans le cadre de l'Expo 58 pour accueillir des manifestations qui y sont liées, cet auditoire de 1.500 places sera ensuite cédé à l'ULB. Sa structure est similaire à celle de la halle de Raleigh mais ses dimensions sont plus modestes. Sa forme en plan approximativement elliptique est de 48 m par 44 m (fig. 6).

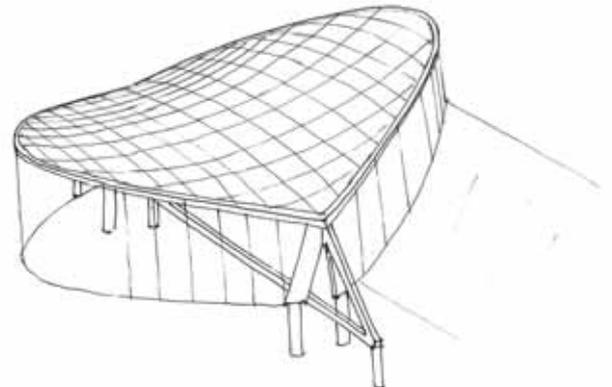


Fig. 6 : Auditoire PE Janson (D. Mutoni, [1]).

Les câbles porteurs et tenseurs qui forment la couverture en forme de PH sont disposés tous les deux mètres et leurs diamètres sont respectivement de 33 mm et 21 mm. La couverture proprement dite est composée d'un plancher de bois recouvert de zinc [4].

Ces câbles sont ancrés dans les arcs de rives paraboliques en béton armé de 0,60 m de hauteur et 1,20 m de largeur. Ces arcs, dont le poids mort est repris par des colonnettes métalliques, sont mis en compression par la mise en tension des câbles.

Ces arcs reposent sur des tripodes qui assurent la stabilité longitudinale et transversale de l'ensemble. La poussée au vide des arcs est reprise par un tirant précontraint placé sous le bâtiment.

La relation force - forme - matériaux est parfaite : la couverture proprement dite est à câbles en forme de chaînette en traction et en acier, les rives sont en forme de parabole, en compression et en béton armé.

La structure à câble de cette toiture est particulièrement légère : le poids des câbles rapporté à la surface est d'environ 0,05 kN/m². Mais si on y ajoute le poids des poutres de rive on arrive à environ 1,60 kN/m², le poids des poutres de rive constitue 97% du poids de la structure de la toiture.

Cet ouvrage exceptionnel dont la structure est méconnue est un élément majeur du patrimoine d'ingénierie de la région bruxelloise.

6. LE PAVILLON DE LA FRANCE

(Architecte : Guillaume Gillet ; Ingénieurs : René Sarger et Jean Prouvé)

Revenons à l'Expo pour dire quelques mots de ce pavillon couvert par une toiture composée de deux PH à câbles à rives droites dont la projection en plan forme deux losanges accolés de 70 m de côté. La surface couverte est d'environ 12.000 m² sans appui intérieur [5].

Les rives de chaque PH comprennent deux points hauts et deux points bas. Les PH sont appuyés aux points bas. L'une des rives étant commune au deux PH, l'ensemble repose sur trois appuis (O, B1, B2). Reliés par deux passerelles diagonales, ces trois appuis forment un ensemble appuyé principalement en O, d'où part une flèche en porte-à-faux de 65 m de hauteur, et accessoirement en B1 et B2 (fig. 7).

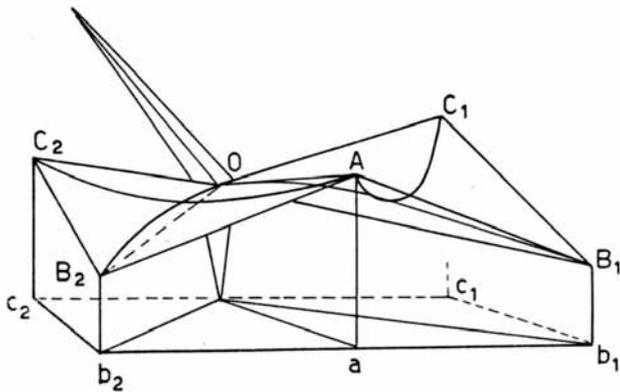


Fig. 7 : Croquis du Pavillon de la France [5].

Les câbles porteurs (dans la direction A-C) et tenseurs (dans la direction O-B) sont disposés suivant les diagonales des losanges ; ils sont ancrés dans les poutres de rive et les sollicitent perpendiculairement, celles-ci sont donc en flexion. Ces poutres de rive en acier ne sont pas encastées aux angles, leur poids propre est repris par des colonnes en façades. La couverture est composée de tôles minces fixées sur les câbles et recouvertes d'une chape d'étanchéité. Cet ouvrage était exceptionnel par l'ampleur de la surface couverte sans appui intermédiaire, sa statique d'ensemble et bien entendu par sa légèreté qui est toutefois à relativiser vu l'importance des poutres de rive. De cette structure est issue notamment la couverture de la piscine du Longchamp.

7. LA PISCINE DU LONGCHAMP

(Architectes C. De Meutter et J. Koning ; Ingénieurs : R. Pluys avec la collaboration de René Sarger)

La couverture de cette piscine inaugurée en 1971 est également un PH à câbles, il couvre une surface un carré de 45 m de côté. La toiture est appuyée aux deux points

bas sur deux culées liaisonnées par un tirant placé sous le bâtiment (fig. 8).

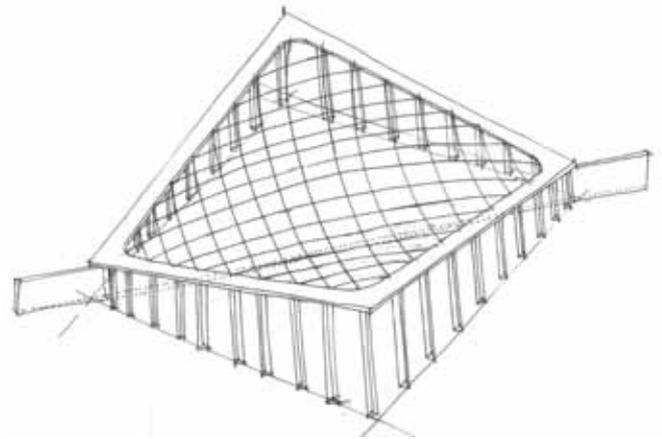


Fig. 8 : Piscine du Longchamp (D. Mutoni, [1]).

Comme au pavillon de la France, les rives sont droites et donc en flexion sous l'action de la mise en tension des câbles. Ici ces rives sont des poutres caissons en béton armé encastées les unes dans les autres aux quatre sommets du carré [6]. Vu les efforts qui les sollicitent les rives sont particulièrement lourdes. Le poids des poutres de rive rapporté à la surface de la toiture est de 3,78 kN/m² à comparer au poids des câbles proprement dit d'environ 0,05 kN/m². Soit un poids total de 3,83 kN/m². A titre indicatif le poids rapporté à la surface de la structure d'une couverture de dimensions comparables en béton armé et précontraint préfabriqué est d'environ 2,00 kN/m². Pour la couverture de la piscine du Longchamp on peut éventuellement parler de légèreté « visuelle ou architecturale » mais certainement pas de légèreté « matérielle ». Contrairement à l'auditoire Janson, ici la forme des rives n'est pas en relation optimale avec les efforts qui les sollicitent. De plus, le poids important de ces poutres de rive a une incidence sur les appuis de celles-ci. Dans la conception des structures, il faut veiller à ce que la forme soit la réponse logique au fonctionnement structural. Ainsi, dans le cas de PH en béton armé qui sont composés de voûtes en compression et de chaînettes en traction, les efforts sollicitant les rives sont alignés le long de celles-ci : les rives droites qui travailleront en compression sont donc la réponse structurale optimale (fig. 9).

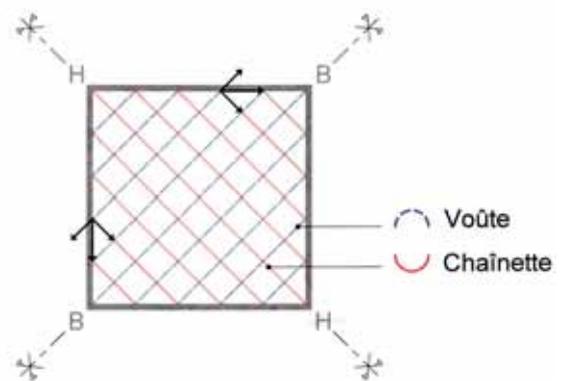


Fig. 9 : Efforts sollicitant les rives des PH en béton.

Dans le cas des PH à câbles, les rives sont sollicitées par des efforts qui leur sont perpendiculaires (fig. 10). Les formes optimales des rives sont soit des arcs en compression à concavité tournée vers l'intérieur (Raleigh, Janson) soit des chaînettes en traction à concavité tournée vers l'extérieur comme nous le verrons en architecture textile.

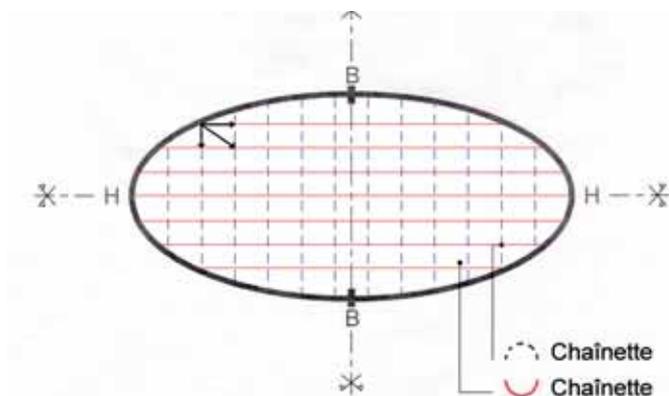


Fig. 10 : Efforts sollicitant les rives des PH à câbles.

8. LE PAVILLON MARIE-THUMAS

(Architectes : Lucien-Jacques Baucher, Jean-Pierre Blondel, Odette Filippone ; Ingénieurs : René Sarger, Claude Gérard et Jean-Pierre Battelier)

Après ces ouvrages aux formes simples, revenons à l'Expo 58 pour examiner cette structure à câbles qui y était probablement la plus porteuse de futur. Cette structure plus complexe s'inspire du modèle de la tente. Elle se présente comme une tente à trois faîtes à plan rectangulaire de 53 m sur 37 m supportée par quatre paires de mâts en treillis d'acier (fig. 11). Chaque paire se compose de deux pylônes qui forment un V et s'inclinent vers l'extérieur [7].

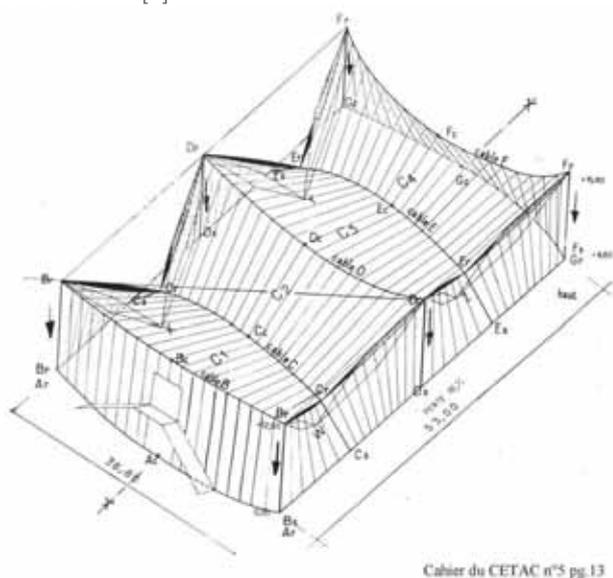


Fig. 11 : Pavillon Marie Thumas [7].

Des câbles droits sont disposés entre les têtes des mâts pour assurer la stabilité longitudinale. Transversalement, les têtes des mâts sont reliées par les câbles porteurs à concavité tournée vers le haut ou « câbles de crête ». Au fond des deux vallées de la tente se trouvent les câbles tenseurs à concavité tournée vers le bas ou « câbles de gorge ou de vallée », ancrés dans les fondations.

Entre ces deux types de câbles sont fixées de très légères fermes métalliques droites. Ces fermettes supportent la toile de la tente, faite de films de texaglas, un plastique très souple, opaque ou translucide. Les versants de la tente et les deux pignons sont des surfaces doublement incurvées en forme de conoïdes. Le concept de câbles porteurs et tenseurs est analogue à celui des autres couvertures que nous avons étudiées mais la forme complexe ne permet pas le calcul analytique. Le processus de conception et les nombreux déboires qui ont accompagné l'exécution témoignent du caractère expérimental du projet [2].

9. VERS L'ARCHITECTURE TEXTILE

On peut légitimement considérer le pavillon Marie-Thumas comme un précurseur avant-gardiste des structures en architecture textile qui vont apparaître 30 ans plus tard, lorsque les matériaux de couverture adéquats, qui n'étaient pas disponibles en 1958, le deviennent.

Dans un premier temps on assistera au développement des structures à câbles. Dans ces structures du deuxième ordre, la déformation est indissociable de la reprise des efforts. Mais la déformation des câbles, éléments porteurs, pose des problèmes pour la jonction et l'étanchéité entre les éléments portés. Dans le cas de l'Olympia Park de Munich la couverture est réalisée au moyen de plaques de polycarbonate, les mouvements relatifs de ces plaques imposent une récolte des eaux à chacun des joints entre plaques.

A partir de années 1980, les toiles en fibres de verre recouvertes de PVC ou de Téflon dans lesquelles les éléments porteurs et les éléments portés ne font plus qu'un ont permis le développement de l'architecture textile dont la région bruxelloise compte deux exemples intéressants.

10. L'AUVENT DE L'ÉCOLE BERKENDAEL

(Architectes : Art&Build ; Ingénieurs : CENOTEC, Bureau d'études Verdeyn et Moenaert)

Réalisé en 1999, cet auvent couvre environ 800 m² de la cour de récréation de l'école Berkendael à Forest [1] (fig. 12).

Cette membrane en Téflon renforcée de fibres de verre s'appuie, en sept points hauts centraux, sur des mâts tubulaires en acier [8]. Des câbles périphériques sont fixés au sommet de colonnes en béton armé, elles-mêmes encastrées dans le sol. Ces câbles ne sont pas ancrés directement dans le sol, comme c'est généralement le cas pour ce type de structure. Ce choix qui a été fait afin d'éviter tout risque de voir des enfants grimper sur la structure n'est pas sans

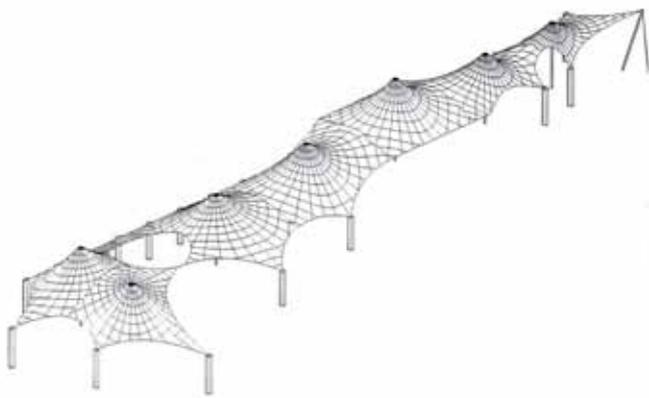


Fig. 12 : Auvent Berkendael [8].

incidence sur la consommation de matière, le poids et le coût total de la structure. En effet, les couples induits par les efforts en tête des colonnes périphériques sollicitent celles-ci en flexion et imposent d'importantes fondations. Comme pour la piscine du Longchamp ci-avant, il est nécessaire de faire la distinction entre légèreté « visuelle ou architecturale » et légèreté « matérielle ».

11. LA STATION DE MÉTRO ÉRASME

(Architectes : Philippe Samyn and Partners architects & engineers ; Ingénieurs: Philippe Samyn and Partners architects & engineers, Bureau d'études Setesco, Marijke Mollaert (VUB))

Inaugurée en 2003 et longue de 168 m la couverture de cette station est composée de 11 modules carrés de 15,3 m de côté couverts d'une membrane en forme de selle de cheval (PH) en tissu de fibre de verre recouvert de Teflon (fig. 13). La mise en tension de la toile est obtenue par la réalisation d'une succession longitudinale de lignes de crête et de lignes de vallées. Les lignes de crêtes sont réalisées par des structures en treillis en forme de T à branche supérieure courbe. Les lignes de vallées sont obtenues par la mise en tension transversale de la toile

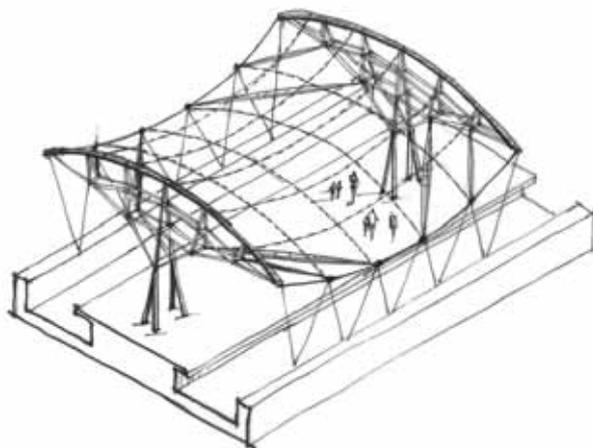


Fig. 13 : Un module de la couverture de la Station (D. Mutoni, [1]).

entre deux lignes de crête successives. La présence de voiries latérales impose que l'encombrement de la station se limite à l'espace couvert : une mise en tension par des câbles extérieurs inclinés n'était donc pas possible. La solution fort intéressante mise en œuvre consiste en une mise en tension par des câbles verticaux situés dans le plan des façades, la reprise des efforts de déviation se fait par des butons en treillis qui prennent appui sur les structures en T des crêtes. Le résultat est une structure remarquable par sa légèreté et sa cohérence entre force et forme, architecture et structure.

12. CONCLUSIONS

Au travers de ces huit exemples bruxellois, nous avons parcouru l'histoire des structures tendues : des formes simples à des formes complexes, de structures à câbles avec éléments porteurs et couverture portée à l'architecture textile dans laquelle ces éléments se combinent. Pour ces structures légères, qui sont le siège d'efforts préliminaires importants, la cohérence des logiques des forces et des formes est déterminante pour conserver cette légèreté. Le calcul de ces structures fait aujourd'hui appel à des moyens informatiques sophistiqués mais ce n'est pas là que se jouent leurs qualités structurale et architecturale. Celles-ci résident dans la compréhension du cheminement des efforts, dans sa logique et dans la réponse structurale qui y est apportée lors de la conception.

RÉFÉRENCES

- [1] Attas, D. & Provost, M., eds., *Bruxelles, sur les traces des ingénieurs bâtisseurs*, CIVIA : Bruxelles, 2011.
- [2] Espion, B., Devos, R. & Provost, M., *Innovations structurales à l'Expo 58. Architecture Moderne à l'Expo 58. « Pour un monde plus humain »*, eds. M. De Kooning & R. Devos, Dexia/Mercatorfonds : Bruxelles, pp. 100-127, 2006.
- [3] Hähl, H., L'ossature métallique du pavillon des Etats-Unis à l'Expositions de Bruxelles 1958, *Acier-Stahl-Steel*, 23 (2), pp.49-57, 1958.
- [4] Moenaert, P., Toitures et parois en câbles précontraints – Grand auditorium de l'Université Libre de Bruxelles, *Acier-Stahl-Steel*, 25 (7/8), pp.293-298, 1960.
- [5] Gillet, G. et al., Le Pavillon de la France à l'Exposition de Bruxelles 1958, *Acier-Stahl-Steel*, 23 (5), pp.193-204, 1958.
- [6] De Meutter, C. & Koning J., Bassin de natation à Uccle (Bruxelles), *La technique des Travaux*, 50(1), pp. 9-18, 1974.
- [7] Vandepitte, D. & Sarger, R., Le pavillon Marie Thumas de « La commerciale des Conserves », *Acier-Stahl-Steel*, 24 (4), pp.157-162, 1959.
- [8] Art & Build Architects, Creating the tensile structure for the Berkendael European School (Brussels), ed. M. Mollaert, *The design of membrane and lightweight structures*, Brussel: VUB Press, s.p., 2000.

Patrimoine d'ingénierie légalement protégé

Manja Vanhaelen et Harry Lelièvre

Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale, Direction des Monuments et Sites

Le patrimoine est protégé pour sa valeur historique, archéologique, artistique, esthétique, scientifique, sociale, folklorique ou technique. Il prend en considération des biens de toutes périodes, de tous styles et de toutes typologies. La valeur d'un bien est déterminée par différents critères tels que la qualité, l'authenticité, la rareté et le caractère historique ou exemplaire [1].

L'établissement d'un inventaire thématique permet de mieux comprendre une catégorie particulière de bâtiments. Tel est le cas de l'inventaire établi par l'Université Libre de Bruxelles (ULB) qui reprend une sélection d'ouvrages remarquables de la Région de Bruxelles-Capitale ayant une valeur d'ingénierie. La recherche des ouvrages d'ingénierie les plus importants ou pertinents permet d'avoir une vue d'ensemble de l'histoire de l'ingénierie -notamment de l'évolution des matériaux et des techniques- et d'améliorer la connaissance des structures de constructions.

1. ÉTAT ACTUEL DE LA PROTECTION DU PATRIMOINE D'INGÉNIERIE

Parmi les 169 ouvrages repris dans l'inventaire de l'ULB, 27 font l'objet d'une protection légale (voir inventaire en annexe).

La subdivision de l'inventaire en sous-catégories permet d'avoir une vue d'ensemble des types de biens qui sont classés [2].

La catégorie comprenant le plus d'ouvrages classés est celle des constructions en béton. Celles qui datent d'avant 1918 sont, à peu de choses près, toutes classées. En ce qui concerne les structures en métal d'avant 1918, environ la moitié est classée. Pour ce qui est des autres catégories, les classements sont sporadiques, aucune structure légère et aucun tunnel n'étant classé.

La présence d'une majorité de structures anciennes parmi les monuments classés est la constatation la plus frappante. 19 de ces constructions classées datent de la fin du 19e ou du début du 20e siècle, sept de l'entre-deux-guerres. La galerie Ravenstein, seule construction d'après-guerre à avoir été classée comme monument, constitue une exception [3]. L'absence d'ouvrages plus récents est sans doute la conséquence de l'utilisation de critères qui rendent nécessaire un certain recul pour déterminer une valeur patrimoniale pertinente. Cette conclusion est valable pour tous les autres types de patrimoine. Les ouvrages d'art récents sont également très imbriqués dans notre vie quotidienne (tunnels, métro, ...) si bien que leur reconnaissance en tant que monument peut sembler contradictoire. En outre, de nombreuses réalisations d'ingénieurs sont, d'abord, utiles et fonctionnelles.

Il convient aussi de se demander sur quelle base les ouvrages d'art ou constructions sont protégés et si on tient compte du travail accompli par l'ingénieur pour la protection. Selon la législation actuelle (arrêté depuis

1993 [4]), la protection est justifiée explicitement dans l'arrêté par sa valeur archéologique, esthétique, sociale, folklorique ou technique. Ce dernier point fait référence aux témoignages du savoir-faire technique des générations précédentes et donc, entre autres, au travail de l'ingénieur [5]. L'aspect technique ne se rapporte pas uniquement aux réalisations d'ingénieurs. Il se rapporte aussi à d'autres réalisations telles celles du patrimoine industriel. Il est donc nettement plus vaste.

Dans la législation antérieure à 1931 [6], seuls étaient protégés les monuments selon leur un intérêt historique, artistique ou scientifique. L'aspect technique dans les protections antérieures n'était donc pas explicite. Cela ne veut toutefois pas dire qu'il n'était aucunement tenu compte de la valeur technique des constructions dans le cadre de cette protection. Dans les arrêtés d'avant 1993, aucune justification de la protection n'est mentionnée. Quand une valeur technique était reconnue à l'objet protégé, c'est dans le dossier administratif et notamment dans l'avis de la Commission Royale des Monuments et Sites qu'on en trouve la trace.



Fig. 1 : Marché couvert de Cureghem (© MRBC)

2. PATRIMOINE D'INGÉNIERIE LÉGALEMENT PROTÉGÉ

Sept réalisations citées dans l'inventaire ont été classées comme monuments en vertu de la loi de 1931. Il s'agit de l'église Saint-Jean-Baptiste sur le parvis Saint-Jean-Baptiste à Molenbeek-Saint-Jean (29/02/1984), de l'église Saint-Augustin à la place Altitude Cent à Forest (08/08/1988), des galeries Saint-Hubert à Bruxelles (19/11/1986), du marché aux bestiaux couvert de Cureghem à Anderlecht (08/08/1988) (fig.1), de l'immeuble *Old England* de la Montagne de la Cour à Bruxelles (30/03/1989), des anciennes glaciers royales de la chaussée de Wavre 1013 à Auderghem (13/05/1993) (fig.2) et du Théâtre royal flamand (09/09/1993).



Fig. 2 : Ancienne cave de glace (Loeckx-quasi © MRBC)

L'aspect technique est presque toujours traité comme faisant partie de l'intérêt historique, combiné ou non à l'intérêt esthétique, dans le dossier administratif pour ces constructions. C'est notamment le cas pour le marché aux bestiaux et pour les glaciers, leur intérêt historique se réduisant totalement à leur intérêt technique. Il n'y a que dans le cas de l'église Saint-Augustin qu'il n'est pas du tout fait mention de l'aspect technique, sauf évidemment le fait qu'elle fasse partie des trois églises en béton (apparent) que compte la Région.

Une seule construction reprise dans l'inventaire fait partie d'un classement comme site. Il s'agit de la passerelle dans le parc d'Osseghem (16/10/1975). Le point de départ de ce classement est l'intérêt scientifique et paysager,

aucune attention particulière n'étant accordée aux autres constructions qui sont également présentes bien que faisant également partie du paysage.

Pour les classements après 1993, une distinction est faite entre ceux pour lesquels il est explicitement tenu compte de l'aspect technique, ou lié au travail de l'ingénieur comme valeur du bien, et ceux pour lesquels ce n'est pas le cas.

Les constructions suivantes sont classées notamment pour leur valeur technique : les bâtiments et l'arcade du parc du Cinquantenaire (22/04/2004), le pont Sobieski sur l'avenue des Robiniers à Bruxelles (14/03/1996) et le pont sur le boulevard du Jubilé à Molenbeek-Saint-Jean (19/04/2007), l'ancien château d'eau sur la rue Marconi 167 à Forest (liste de sauvegarde 01/10/1998), l'église Sainte-Suzanne sur l'avenue Latinis à Schaerbeek (27/03/2003) et le Palais de justice à Bruxelles (03/05/2001) (fig.3).



Fig. 3 : Palais de justice
(Source : Ch. Bastin & J. Evrard © MRBC)

Pour un certain nombre d'ouvrages d'art, il n'est pas question de l'aspect technique. C'est le cas pour les appartements sociaux de la rue Marconi 32 à Forest (06/11/1997), les anciens magasins Merchie-Pède de la rue des Tanneurs 52-56 à Bruxelles (29/03/2001), les galeries funéraires du cimetière de Laeken sur le parvis Notre-Dame à Laeken (06/02/1997), l'ancienne banque Brunner de la rue de la Loi 78 à Bruxelles (09/05/1995), le Résidence Palace de la rue de la Loi 155-175 à Bruxelles (22/04/2004), les Pavillons français de la rue du Noyer 282 à Schaerbeek (19/04/2007), l'immeuble à appartements du boulevard Général Jacques 20 à Ixelles (14/07/2005), la galerie Ravenstein (03/03/2011) et le collège Saint-Jean Berchmans (08/11/2001).

Le pont de la rue du Charroi à Anderlecht (16/03/1995) n'est pas classé pour sa valeur technique. Dans l'arrêté de protection, il est toutefois indiqué que le concepteur était un ingénieur et que le pont est remarquable parce qu'il va de pair avec une construction industrielle de style néo-égyptien (fig. 4).

Comme pour la passerelle dans le parc d'Osseghem, celle du parc Tournay-Solvay (18/11/1993) est reprise dans un site, celui des étangs de Boitsfort.

Il doit aussi être clair que certains monuments qui ne sont pas repris dans l'inventaire de l'ULB sont classés pour leur

valeur technique. En 2010, les bains de Bruxelles ont été classés pour leur valeur historique, esthétique, sociale et technique. Ce dernier point renvoie clairement au travail de l'ingénieur Boloukhère qui consistait à placer deux bains l'un au-dessus de l'autre et à garantir la stabilité de l'ensemble.

Aucune construction n'a été classée uniquement pour sa valeur technique. Les valeurs les plus importantes qui sont prises en considération pour une protection sont l'intérêt historique et esthétique. Les autres valeurs sont plutôt complémentaires et accroissent l'intérêt d'un bien. Dans la motivation pour un classement, il est important de prendre en considération les aspects les plus marquants dont ne fait, par conséquent, pas toujours partie l'aspect technique. Il faut également tenir compte du fait que chaque classement est un pur produit de son époque et que l'aspect technique dans le passé était considéré comme moins important ou que les motifs du classement étaient autres. Chaque classement est aussi toujours le résultat d'une opportunité qui se présente à un moment déterminé.

Le best of de cet inventaire thématique pourrait éventuellement constituer une base de données pour classer, dans le futur, certaines de ces constructions/réalisations d'ingénieurs pour leur valeur technique. L'inventaire peut contribuer, pour d'éventuels futurs classements, à ce que l'intérêt d'un bien soit traité dans tous ses aspects et donc que l'aspect spécifiquement technique soit également documenté. Il fait aussi en sorte qu'une construction soit mieux connue. Le travail d'inventorisation doit également attirer l'attention sur l'existence de ces constructions ou de techniques dans la grande collection du patrimoine bâti. De cette façon, nous pourrions appréhender autrement les anciens classements. Grâce à l'identification et à la compréhension des techniques qui ont été appliquées lors de la construction initiale, on pourra aussi mieux traiter les parties ou aspects techniques de la construction lors d'une restauration ou d'une transformation (cf. études préalables).

3. PRINCIPES DE RESTAURATION DU PATRIMOINE D'INGÉNIEURIE

La protection du patrimoine a pour but la conservation mais celle-ci exige souvent d'intervenir, de restaurer ou de rénover, et d'apporter des modifications.

La restauration d'un ouvrage d'ingénieur exige une bonne compréhension de la structure, du concept du bâti. Elle doit toujours se baser sur une analyse approfondie de la construction initiale, et ce, d'un point de vue historique, matériel et technique, etc. Comprendre le fonctionnement structural est donc essentiel. Les travaux de conservation se font en principe avec les mêmes matériaux, les mêmes techniques et dans le respect du concept original. On cherche la même composition de béton, la même qualité d'acier, le même type de bois ou un type de bois présentant les mêmes propriétés techniques. Des liaisons articulées

ne sont pas remplacées par des liaisons soudées, une construction en arc n'est pas remplacée par une autre forme.

Les constructions sont parfois agrandies, les structures reçoivent une réaffectation. La conservation vise aussi plus qu'une préservation matérielle. La conservation idéale consiste à préserver le bien matériel tout en préservant la fonction.

Dans la catégorie 'réalisations d'ingénieurs', la fonction constitue souvent l'essence de l'objet. Naturellement, de nombreuses réalisations d'ingénieurs sont aussi intégrées dans des ensembles architecturaux et/ou ont des propriétés autres que leur seule utilité. La passerelle qui enjambe le canal dans le prolongement de la rue de Gosselies à Molenbeek-Saint-Jean est un exemple d'innovation et de fonction purement technique.

Le caractère fortement utilitaire de bâtiments est quasi diamétralement opposé au souhait de conservation. Le jour où on n'aura plus besoin de traverser le canal à cet endroit ou le jour où les bateaux sur le canal deviendront par exemple, plus grands, la conservation éventuelle du pont posera un problème délicat.



Fig. 4 : Pont de la rue du Charroi (© MRBC).

Le pont de chemin de fer sur la rue du Charroi à Anderlecht, qui se situe à quelques centaines de mètres de l'entrée des trains à Bruxelles-midi, est un exemple intéressant. Ce pont est avant tout classé pour ses qualités esthétiques, comme témoin de l'architecture bourgeoise des années 1910. Cette infrastructure fait aujourd'hui face à un trafic ferroviaire toujours plus dense, y compris à celui des trains à grande vitesse. La construction industrielle ne répond plus à notre époque aux nouvelles exigences sur le plan technique et esthétique. Les nouvelles exigences à l'égard du pont ne sont pas vraiment compatibles avec son statut classé.

Tout d'abord, il n'est pas facile d'évaluer la capacité portante des constructions anciennes. Celle-ci est basée sur des données empiriques et non sur une méthode de calcul ou un modèle actuels. Évaluer la capacité portante aujourd'hui exige de mettre au point des modèles de calcul souvent très complexes qui s'approchent autant que possible de la situation réelle. Il est aussi souvent impossible de satisfaire aux normes de sécurité actuelles sur la base d'une telle évaluation. Dans le cas de ce pont classé, il doit aussi être préservé dans tous ses aspects. On pourrait envisager de mettre le pont hors d'usage et de construire radicalement un pont de chemin de fer neuf qui satisfait au nouveau mandat de l'ingénieur. Le pont de chemin de fer original serait gardé comme un témoin de l'ancienne époque des chemins de fer à côté d'un exemplaire contemporain flambant neuf. Dans ce cas, seul l'aspect matériel et esthétique du pont est protégé alors que la protection d'un ouvrage inclut l'ambition de préserver l'objet dans toute sa gloire et donc aussi dans sa fonction. Plus le caractère utilitaire des constructions est important, plus la résistance à une protection est grande. Notre société imposera en tout cas de nouvelles exigences, demandera un nouvel usage. L'ingénieur est confronté à un nouveau défi, ce qui fera obligatoirement disparaître l'essence de la construction.

Si le nombre d'ouvrages d'ingénieurs classés n'est pas élevé, c'est également dû à ces difficultés. Pour les ouvrages d'ingénieurs classés, la 'réaffectation' conduit fréquemment à la perte de la valeur technique. Il est évidemment possible de conserver les aspects esthétiques et visuels mais les prestations techniques caractéristiques se perdent souvent.

Il faut essayer, avec les mesures de protection, de maintenir le pont en fonction en le réservant, par exemple, à un usage sporadique ou passer à l'adaptation aux nouvelles exigences et le consolider. Par une adaptation et une consolidation, nous en revenons naturellement à la valeur technique initiale.

La discussion se déplace et porte alors, notamment, sur le maintien du principe de la structure porteuse, mais peut-être en améliorant la réalisation. Dans le cas d'un pont de chemin de fer en acier de haute qualité, les assemblages rivetés seront remplacés par des assemblages soudés ou boulonnés (avec des boulons à haute résistance), tout en gardant les éléments porteurs originaux ; dans certains cas, il faudra compléter avec une structure complémentaire ... on finira toujours par modifier plus ou moins le concept original en prenant la réalisation initiale à laquelle on

applique de nouveaux principes et matériaux.

Dans le cas d'une conservation ou d'une restauration, on cherche des systèmes qui laissent, dans la mesure du possible, l'ouvrage dans un état similaire ou proche de son état originel. Le principe est donc de conserver sans modifier tant l'aspect que le concept, de restaurer sans démonter, d'améliorer des constructions qui, sans intervention, ne résisteront pas à l'usure. Cela requiert souvent d'innover et de chercher la solution technique la plus adéquate. Par conséquent, une nouvelle mission pour l'ingénieur surgit. Le monde de la restauration de bâtiments constitue un laboratoire pour des pratiques techniques innovantes des ingénieurs.

Une nouvelle catégorie devrait ainsi apparaître dans l'inventaire des ouvrages d'architecture d'ingénieurs : le monument restauré de façon ingénieuse.

RÉFÉRENCES

- [1] *Le patrimoine immobilier dans la Région de Bruxelles-Capitale*, brochure. Monuments et sites de la Région de Bruxelles-Capitale. Ministère de la Région de Bruxelles-Capitale: p.13, 2004.
- [2] La subdivision suivante a été suivie : ossature métallique d'avant 1918 - couvertures métalliques - ouvrages d'art métallique - constructions en béton (première génération avant 1918) - bâtiments en béton (autres que la première génération) - ouvrages d'art en béton - constructions en bois - structures légères - constructions en maçonnerie - tunnels (excepté tunnels en maçonnerie).
- [3] Le bâtiment classé le plus récent est le rectorat de la VUB édifié en 1970 selon un projet de l'architecte Renaat Braem.
- [4] Ordonnance du 4 mars 1993 relative à la conservation du patrimoine immobilier, coordonnée et intégrée dans le Code bruxellois de l'Aménagement du Territoire (CobAT). Le Code a été adopté par l'Arrêté du Gouvernement de la Région de Bruxelles-Capitale et ratifié par l'Ordonnance du 13 mai 2004. La dernière modification du 14 mai 2009 est entrée en vigueur le 1er janvier 2010.
- [5] Loi du 7 août 1931 sur la conservation des monuments et sites. Conseil de la Région de Bruxelles-Capitale. Projet d'ordonnance relative à la conservation du patrimoine immobilier, 17 décembre 1991, p.8.
- [6] A partir de 1993, une description sommaire du bien et une description de la valeur du bien sont reprises dans l'arrêté de protection.

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

LÉGENDE DES TYPES D'OUVRAGE

- MA — Anciens ouvrages métalliques (avant 1918)
 MO — Ouvrages à ossature métallique
 MC — Couvertures métalliques
 MP — Ouvrages d'art métalliques
 BA — Ouvrages anciens en béton armé (avant 1918)
 BB — Bâtiments en béton (armé ou précontraint)
 BP — Ouvrages d'art en béton (armé ou précontraint)
 Bois — Ouvrages en bois
 SL — Structures légères
 Maç — Ouvrages en maçonnerie
 T — Tunnels et autres ouvrages souterrains

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Abattoirs d'Anderlecht (grande halle)	Rue Ropsy-Chaudron 24, 1070 Anderlecht	MA	1890	08/08/1988
Arcade du Cinquantenaire	Parc du Cinquantenaire, 1000 Bruxelles	Maç	1905	22/04/2004
Atomium	Square de l'Atomium, 1020 Laeken	MO	1958	
Auditoire Paul-Emile Janson	Avenue Franklin Roosevelt 48, 1000 Bruxelles	SL	1958	
Auvent de la Place Flagey	Place Flagey, 1050 Ixelles	MC	2008	
Banque Brunner	Rue de la Loi 78, 1000 Bruxelles	BA	1900	09/05/1195
Banque Bruxelles Lambert	Avenue Marnix 24, 1000 Bruxelles	BB	1964	
Banque nationale de Belgique	Boulevard de Berlaymont 14, 1000 Bruxelles	BB	1953	
Basilique nationale du Sacré-Coeur	Parvis de la Basilique 1, 1081 Koekelberg	BB	1970	
Berlaymont	Rue de la Loi 200, 1000 Bruxelles	BB	1967	
Brussimmo	Rue de Trèves 74, 1000 Bruxelles	MO	1993	
Caisse général d'Epargne et de Retraite	Rue du Marais 2, 1000 Bruxelles	BB	1973	
C.B.R.	Chaussée de la Hulpe 185, 1170 Watermael-Boitsfort	BB	1971	
Centre communautaire "De Markten"	Rue du Vieux Marché aux Grains 5, 1000 Bruxelles	MA	1854	
Centre de communication nord (surélévation)	Rue du Progrès 80, 1030 Schaerbeek	MO	1994	
Centre démocrate humaniste	Rue des deux Eglises 41, 1000 Bruxelles	BB	1964	
Centre international Rogier	Place Rogier 1, 1210 Saint-Josse-ten-Noode	BB	1960	
Centre sportif de la Forêt de Soignes	Chaussée de Wavre 2057, 1160 Auderghem	MC	1986	
Centre sportif de Woluwe-Saint-Pierre	Avenue Salomé 2, 1150 Woluwe-Saint-Pierre	MC	1974	
Chapelle du collège Sint-Jan Berchmans	Rue des Ursulines 4, 1000 Bruxelles	Bois	1852	08/11/2001

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Chapelle moderne de la Belgique joyeuse	Avenue des Anciens Combattants 23-25, 1950 Crainhem	Bois	1958	
Chapelle Notre-Dame des Cieux	Heiligenborre, 1170 Watermael-Boitsfort	Bois	1956	
Château d'eau rue Marconi	Rue Marconi 167, 1190 Forest	BA	1904	01/10/1998 (liste de sauvegarde)
Cimetière de Laeken (galeries funéraires)	Cimetière de Laeken Parvis Notre-Dame, 1020 Bruxelles	BA	1876	06/02/1997
Cirque royal	Rue de l'enseignement 81, 1000 Bruxelles	MC	1953	
Complexe Citroën	Place de l'Yser 7, 1000 Bruxelles	MC	1934	
Conseil européen	Rue de la Loi 155, 1000 Bruxelles	MO	en cours	
Covent Garden	Place Rogier 16, 1210 Saint-Josse-ten-Noode	BB	2007	
Ecole Berkendael (auvent)	Rue Berkendael 70-74, 1190 Forest	SL	1999	
Ecole Cooremans	Place Anneessens 11, 1000 Bruxelles	MA	1880	
Ecole européenne de Laeken	Drève Sainte-Anne, 1020 Bruxelles	BB	en cours	
Ecole fondamentale Baron Steens	Rue Haute 255, 1000 Bruxelles	MA	1897	
Ecole Les Marronniers	Rue des Douvres 80, 1070 Anderlecht	MA	1902	
Eglise du Christ-Roi	Avenue Wannecouter 111, 1020 Bruxelles	MC	1983	
Eglise du Divin Enfant-Jésus	Avenue Houba de Strooper 759, 1020 Bruxelles	Maç	1942	
Eglise Saint-Augustin	Place de l'Altitude Cent, 1190 Forest	BB	1936	08/08/1988
Eglise Sainte-Suzanne	Avenue des Glycines 20, 1030 Schaerbeek	BB	1928	27/03/2003
Eglise Saint-Jean-Baptiste	Parvis de Saint-Jean-Baptiste, 1080 Molenbeek-Saint-Jean	BB	1932	29/02/1984
Eglise Saint-Marc	Avenue De Fré 74, 1180 Uccle	Bois	1970	
Eglise Saint-Pie X	Rue Roosendael 121, 1190 Forest	Bois	1967	
Entrepôt A de Tour & Taxis	Avenue du Port 86C, 1000 Bruxelles	MA	1904	
Entrepôt royal de Tour & Taxis	Avenue du Port 86C, 1000 Bruxelles	BA	1907	
Etablissements D'Ieteren	Rue du Mail 50, 1050 Ixelles	MO	1967	
Flèche du Génie civil	Plateau du Heysel, 1020 Bruxelles	BB	1958	
Foncolin	Rue Montoyer 3, 1000 Bruxelles	BB	1958	
Forest National	Avenue du Globe 36, 1190 Forest	MC	1971	
Galerie Ravenstein	Rue Ravenstein, 1000 Bruxelles	BB	1958	03/03/2011
Galerias royales Saint-Hubert (verrière)	Galerias royales Saint-Hubert, 1000 Bruxelles	MA	1847	19/11/1986
Garage Renault à Anderlecht	Chaussée de Mons, 1070 Anderlecht	BB	ca.1963	
Garage Wismeyer	Rue Vanderkindere 467, 1180 Uccle	BB	1948	
Gare maritime de Tour & Taxis	Avenue du Port 86 C, 1000 Bruxelles	MA	1910	
Glacières royales	Chaussée de Wavre 1013, 1160 Auderghem	Maç	1874	13/05/1993
Glaverbel	Chaussée de la Hulpe 166, 1170 Watermael-Boitsfort	BB	1967	
Grandes halles du Cinquantenaire	Parc du Cinquantenaire, 1000 Bruxelles	MA	1897	22/04/2004
Hall de tennis	Rue du Beau Site 26-28, 1000 Bruxelles	Bois	1954	
Halle Bordiau	Parc du Cinquantenaire, 1000 Bruxelles	MA	1880	22/04/2004

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Halles de Schaerbeek	Rue Royale Sainte-Marie 22b, 1030 Schaerbeek	MA	1901	
Hippodrome de Groenendael	Route de Mont Saint-Jean, 1560 Hoeilaart	BB	1980	
Hôtel de Ville de Bruxelles (restauration Flèche)	Grand-Place, 1000 Bruxelles	Maç	1997	
Hôtel Hilton	Boulevard de Waterloo 38, 1000 Bruxelles	BB	1967	
Ieder zijn Huis	Avenue Cicéron, 1140 Evere	BB	1961	
Institut de Sociologie de l'ULB	Avenue Jeanne 44, 1050 Ixelles	BB	1966	
Institut Jules Bordet	Rue Héger-Bordet 1, 1000 Bruxelles	MO	1939	
Léopold Village	Chaussée d'Etterbeek, 1040 Etterbeek	BB	2010	
Logements sociaux rue Marconi	Rue Marconi 32, 1190 Forest	BA	1902	06/11/1997
Magasins Merchie-Pède	Rue des Tanneurs 52-56, 1000 Bruxelles	BA	1904	29/03/2001
Maison de la Bellone (verrière)	Rue de Flandre 46, 1000 Bruxelles	MC	1996	
Maison Dubois-Petit	Rue Coudenberg 46, 1000 Bruxelles	BA	1901	
Mont-de-Piété	Rue Saint-Ghislain 19-23, 1000 Bruxelles	MA	1862	
Musée des Instruments de musique	Rue Montagne de la Cour 2, 1000 Bruxelles	MA	1899	30/03/1989
Musée et Institut royal des Sciences naturelles	Parc Léopold, Rue Vautier 29, 1000 Bruxelles	MA	1905	
Office national de l'Emploi	Boulevard de l'Empereur 7, 1000 Bruxelles	BB	1964	
Palais 3 du Heysel	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	Bois	2007	
Palais 5 du Heysel	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	BB	1935	
Palais 7 du Heysel	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	MC	1958	
Palais 11 du Heysel	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	BB	1977	
Palais 12 du Heysel	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	Bois	1988	
Palais de Justice	Place Poelaert, 1000 Bruxelles	Maç	1883	03/05/2001
Parking 58	Rue de l'Evêque 1, 1000 Bruxelles	BB	1957	
Parlement européen (couverture)	Parc Léopold, 1000 Bruxelles	Bois	ca.1990	
Passerelle de la chaussée de Stockel	Chaussée de Stockel, 1200 Woluwe-Saint-Lambert	MP	2003	
Passerelle de la rue de Gosselies	Rue de Gosselies, 1070 Anderlecht	BP	1944	
Passerelle de la Woluwe	Avenue de Tervuren, 1150 Woluwe-Saint-Pierre	MP	2001	
Passerelle du Parc des expositions	Parc des expositions chaussée Romaine, 1020 Bruxelles	Bois	1999	
Passerelle du parc d'Osseghem	Parc d'Osseghem, 1020 Bruxelles	BP	1935	16/10/1975
Passerelle du parc Tournay-Solvay	Parc Tournay-Solvay, 1170 Watermael-Boitsfort	BA	1905	18/11/1993
Passerelle du parlement européen	Esplanade du parlement européen, 1000 Bruxelles	MP	2005	
Passerelle du Peterbos	Parc du Peterbos, 1070 Anderlecht	MP	2010	
Pavillon d'accueil de l'Expo 58	Place De Brouckère, 1000 Bruxelles	Bois	1957	
Pavillon de la France de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	SL	1958	
Pavillon de la R.F.A. de l'Expo 58 (passerelle)	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	MP	1958	
Pavillon des Etats-Unis de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	SL	1958	
Pavillon des Industries britanniques de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	MC	1958	
Pavillon des Transports de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	MC	1958	

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Pavillon Marie-Thumas de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	SL	1958	
Pavillon Pan Am de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	SL	1958	
Pavillon Philips de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Laeken	BB	1958	
Pavillons français	Rue du Noyer 282, 1030 Schaerbeek	BB	1934	19/04/2007
PetroFina (couverture du restaurant)	Rue Guimard 14, 1040 Etterbeek	MC	1994	
Piscine du Poséidon	Avenue des Vaillants 2, 1200 Woluwe-Saint-Lambert	BB	1964	
Piscine Longchamps	Square De Fré 1, 1180 Uccle	SL	1971	
Planétarium	Avenue de Bouchout 10, 1020 Laeken	BB	1935	
Pont de Buda	Avenue Anton Van Oss, 1020 Laeken	MP	1955	
Pont de la Petit-Ile	Rue Pierre Marchant, 1070 Anderlecht	MP	en cours	
Pont ferroviaire chaussée d'Etterbeek	Chaussée d'Etterbeek, 1040 Etterbeek	BP	1976	
Pont ferroviaire d'Anderlecht	Quai Fernand Demets, 1070 Anderlecht	MP	1932	
Pont ferroviaire de la rue du Charroi	Rue du Charroi, 1070 Anderlecht	MP	1911	16/03/1995
Pont ferroviaire de la rue du Miroir	Rue du Miroir, 1000 Bruxelles	BP	1944	
Pont ferroviaire de Laeken	Chaussée de Vilvorde, 1020 Bruxelles	MP	1942	
Pont ferroviaire de Schaerbeek	1130 Schaerbeek	MP	2005	
Pont ferroviaire L028-3.00565 (prox. av. Fonsny)	1190 Forest	MP	1930	
Pont routier Albert	Avenue Zénobe Gramme, 1030 Schaerbeek	BP	1925	
Pont routier de la place de la Justice	Boulevard de l'Empereur, 1000 Bruxelles	BP	1957	
Pont routier de la rue du Gerموir	Rue du Gerموir, 1040 Etterbeek	MP	2007	
Pont routier de l'avenue du Jubilé	Avenue du Jubilé, 1080 Molenbeek-Saint-Jean	MP	1904	19/04/2007
Pont routier de l'Humanité	Boulevard de l'Humanité, 1620 Drogenbos	MP	1995	
Pont routier Gray-Couronne	Avenue de la Couronne, 1040 Etterbeek	Maç	1878	
Ponts routiers des chauss. d'Haecht et d'Helmet	Boulevard Lambermont, 1030 Schaerbeek	Maç	1909	
Pont Sobieski	Rue Sobieski, 1020 Bruxelles	MP	1906	14/03/1996
Porte des Nations de l'Expo 58	Plateau du Heysel, 1020 Bruxelles	SL	1958	
R.T.T.	Boulevard de l'Impératrice 17-19, 1000 Bruxelles	BB	1959	
Réservoir d'Etterbeek	Entre la rue Général Leman et la rue du Cornet, 1040 Etterbeek	Maç	1871	
Réservoir d'Ixelles	Rue de la Vanne, 1050 Ixelles	Maç	1855	
Résidence de La Cambre	Boulevard Général Jacques 20, 1050 Ixelles	BB	1939	14/07/2005
Résidence Eden Green	Avenue de l'Observatoire 11A-E, 1180 Uccle	BB	1966	
Résidence Palace	Rue de la Loi 155-175, 1000 Bruxelles	BB	1928	22/04/2004
Royale Belge	Boulevard du Souverain 25, 1170 Watermael-Boitsfort	MO	1970	
Salle de sports Campus Erasme	Campus Erasme, Route de Lennik, 1070 Anderlecht	BB	2009	
Serres royales de Laeken	Avenue du Parc Royal, 1020 Bruxelles	MA	1905	
Signal de Zellik	Echangeur de Grand-Bigard, 1731 Zellik	BB	ca.1963	
Solvay Brussels School	Avenue Franklin Roosevelt 42, 1000 Bruxelles	BB	2010	
Stade Constant Van den Stock	Parc Astrid, 1070 Anderlecht	BB	1988	

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Stade Roi Baudouin (couverture des tribunes)	Avenue du Marathon 135, 1020 Bruxelles	MC	1998	
Station de métro Sainte-Catherine (auvents)	Place du Marché-aux-Poissons, 1000 Bruxelles	MC	2005	
Station d'épuration nord	Avenue de Vilvorde 450, 1130 Bruxelles	BB	2006	
Station métro Erasme	Route de Lennik 808, 1070 Anderlecht	SL	2003	
Station métro Louise bis	Avenue Louise, 1000 Bruxelles	T	1984	
Station métro Saint-Guidon	Place de la Vaillance, 1070 Anderlecht	T	1980	
Station métro sous la rue couverte	Rue Couverte, 1040 Saint-Gilles	T	1987	
Stations métro Beekkant et Osseghem	Chaussée de Ninove, 1080 Molenbeek-Saint-Jean	MC	1977	
Théâtre Royal Flamand	Rue de Laeken 146, 1000 Bruxelles	MA	1887	09/09/1993
Tour Dexia	Place Rogier 1, 1210 Saint-Josse-ten-Noode	BB	2006	
Tour du Midi	Tour du Midi, 1060 Saint-Gilles	BB	1967	
Tour Madou	Place Madou 1, 1210 Saint-Josse-ten-Noode	BB	1965	
Tour PS	Rue Royale 151, 1210 Saint-Josse-ten-Noode	MO	1957	
Tour VRT/RTBF	Boulevard Reyers, 1030 Schaerbeek	BB	1979	
Tunnel de la jonction Nord-Midi	1000 Bruxelles	T	1952	
Tunnel ferroviaire de jonction Schuman-Josaphat	Avenue de Cortenberg, 1030 Schaerbeek	T	en cours	
Tunnel ferroviaire Mérode-Josaphat	1040 Etterbeek/1030 Schaerbeek	T	1926	
Tunnel ferroviaire Vivier d'Oie	1180 Uccle/1000 Bruxelles	T	1926	
Tunnel métro entre Porte de Namur et Louise	Avenue de la Toison d'or, 1000 Bruxelles	T	1982	
Tunnel métro rue de la Loi	Rue de la Loi, 1000 Bruxelles	T	1969	
Tunnel métro sous canal (rue Locquenghien)	Rue Locquenghien, 1000 Bruxelles	T	1978	
Tunnel métro sous la jonction Nord-Midi	Rue Saint-Lazare, 1000 Bruxelles	T	1974	
Tunnel métro sous la Société générale de Belg.	Montagne du Parc, 3, 1000 Bruxelles	T	1969	
Tunnel métro sous le parc de Bruxelles	Parc de Bruxelles, 1000 Bruxelles	T	1969	
Tunnel métro sous les boulevards du centre	Boulevard Anspach, 1000 Bruxelles	T	1976	
Tunnel métro sous l'usine Côte d'Or	Entre les rues de France et Bara, 1070 Anderlecht	T	1987	
Tunnel métro-routier Léopold II	Boulevard Léopold II, 1000 Bruxelles/1080 Molenbeek-Saint-Jean	T	1986	
Tunnel métro-routier sous le canal	Place Saintelette, 1000 Bruxelles	T	1986	
Tunnel routier Bailli-Louise	Carrefour rue du Bailli /avenue Louise, 1000 Bruxelles	T	1963	
Tunnel routier Louise	Place Louise, 1000 Bruxelles	T	1958	
Tunnel routier-métro du Cinquanteaire	Parc du Cinquanteaire, 1000 Bruxelles	T	1976	
Viaduc autoroutier de la Pède	1070 Anderlecht, Ring	BP	ca.1975	
Viaduc de Vilvorde	Viaduc de Vilvorde, 1830 Machelen	MP	1978	
Viaduc ferroviaire boulevard du Midi	Boulevard du Midi, 1000 Bruxelles	MP	1914	

Liste des 169 ouvrages d'ingénieurs d'intérêt patrimonial

NOM DE L'OUVRAGE	ADRESSE	TYPE	ANNÉE DE CONSTRUCTION	DATE DE CLASSEMENT
Viaduc ferroviaire de la Pède	1731 Zellik, ligne SNCB	BP	ca.1929	
Viaduc TGV gare Bruxelles-Midi	Sortie sud de la gare du Midi	BP	2006	
Voûtement de la Senne	1000 Bruxelles	T	1871	