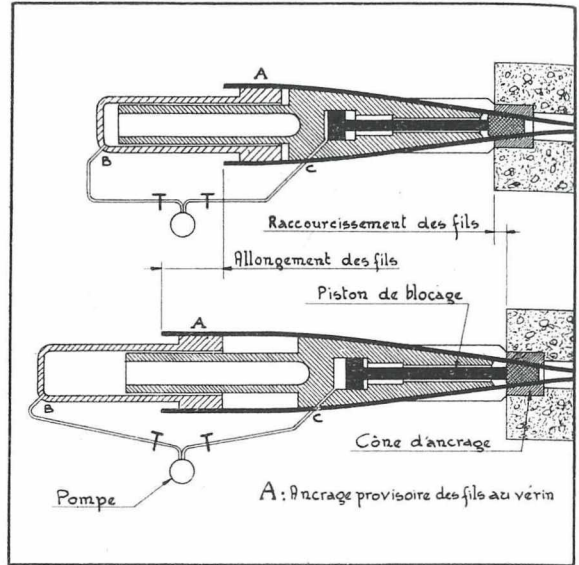


Figure 8 : Ancrage à cône et son vérin de mise en tension à double effet¹



les problèmes de ponts. C'est pour cette raison qu'en 1939, il invente l'ancrage à cône dont le principe est l'ancrage des fils par frottement entre un cône mâle simplement en mortier et un cône femelle en béton fretté (Fig. 8). Ces ancrages étaient commodes, adaptables (modèles pour ancrer six à douze fils ou douze à dix-huit fils de 5 mm) et peu coûteux. Ils vont être employés pendant près de 20 ans. Lors d'une célèbre conférence donnée à Paris en novembre 1941⁷, il expose le principe du vérin à double effet de mise en tension simultanée et de blocage de tous les fils d'un câble (Fig. 8). Grâce aux ancrages et aux vérins de mise en

tension adaptés, il devenait possible de réaliser sans difficulté toute forme de précontrainte concevable, en ligne droite ou courbe, en une seule fois, ou en contraignant partiellement par étapes successives, avec l'ensemble de toutes les armatures ou indépendamment pour chaque câble ou fil. La précontrainte par post-tensioning était véritablement née, mais l'éclatement de la Seconde Guerre mondiale allait en retarder son application. Le premier ouvrage réalisé à l'aide de cette technique est le pont de Luzancy sur la Marne, dont le projet date de 1939, le début de la réalisation en 1940 et l'achèvement en 1946.

CONTRIBUTIONS DE GUSTAVE MAGNEL AU DÉVELOPPEMENT DU BÉTON PRÉCONTRAIT

Luc Taerwe

LA PÉRIODE « BÉTON ARMÉ »

Gustave Magnel (Fig. 1) est né en 1889 et est diplômé ingénieur civil de l'Université de Gand en 1912. De 1914 à 1919, il est employé par un entrepreneur de travaux de Londres et, en 1919, commence sa carrière à l'Université de Gand. Grâce à son séjour à Londres, il maîtrisait non seulement le français et le néerlandais, mais également très bien l'anglais, ce qui s'avérera fort utile par la suite pour ses relations en Amérique du Nord. À cette époque, le français était la langue principalement utilisée par les ingénieurs en Belgique, ainsi qu'une des langues de travail pour les contacts internationaux en Europe.



Figure 1 : Le Professeur Gustave Magnel (1889-1955)¹

En 1923, il publie son premier livre « Pratique du calcul du béton armé » consacré au

dimensionnement du béton armé. La même année, l'Institut Belge de Normalisation (IBS) publie ses premières recommandations concernant le béton armé et Magnel en est le principal auteur. L'un des tout premiers articles techniques de Magnel est consacré à l'influence de la rigidité des colonnes sur la distribution des efforts dans les poutres continues en béton armé.

Pour Magnel, il devient clair que le développement futur du béton armé doit s'accompagner de recherches et donc qu'il doit s'équiper d'un laboratoire. Après avoir surmonté de nombreuses difficultés d'ordre politique ou financier, il réussit à créer le « Laboratoire de Béton Armé » en 1926, dont la première localisation se trouve dans les caves d'un ancien hôtel. Dans ce laboratoire, Magnel

dispose d'une machine universelle d'essais de 300 kN et d'une presse de compression de 3 000 kN. Voici ce qu'écrivit Magnel à propos des efforts qu'il a dû mettre en œuvre pour créer son laboratoire et le maintenir en fonctionnement : « L'évolution ultra rapide de la technique oblige les établissements universitaires de s'adapter aux exigences du moment sous peine de faillir à leur tâche. Cette adaptation - quand il s'agit d'universités de l'État - ne saurait se faire par l'initiative de l'administration qui est, par définition, incompétente et qui, d'autre part, cherche des économies plutôt que des dépenses nouvelles. C'est donc aux professeurs qu'il incombe de faire l'impossible pour tenir leur enseignement et leur centre de recherches à la hauteur de la science technique du moment ». Et d'ajouter : « Il ne suffit pas d'équiper un laboratoire : la question est de le maintenir opérationnel, ce qui nécessite un financement additionnel. Nous obtenons des revenus supplémentaires en exécutant des essais pour des entrepreneurs, pour des sociétés ou des administrations publiques... ».

En 1937, le laboratoire est déplacé dans un tout nouveau bâtiment de la Faculté des Sciences Appliquées, où il dispose d'un espace plus vaste et où de nouvelles machines d'essais sont installées. En 1940, ce laboratoire constitue le centre d'essais et de recherches sur le béton armé le plus avancé et le plus sophistiqué au monde. Magnel n'avait que peu d'intérêt pour les essais sur modèles de petites dimensions et, en 1950, le laboratoire est équipé d'une dalle d'essais permettant la mise en charge d'éléments de structure en béton armé et précontraint en vraie grandeur. En 1975, le laboratoire déménage sur un nouveau campus dans la banlieue de Gand (à Zwijnaarde) où il se trouve toujours. Dans les années 1990, le laboratoire est rebaptisé « Laboratoire Magnel pour la recherche sur le béton » pour souligner que la recherche qui y est effectuée est consacrée tant au niveau matériau qu'au niveau structure.

CONTRIBUTIONS PRÉCOCES AU DÉVELOPPEMENT DU BÉTON PRÉCONTRAIT

La première mention par Magnel du béton précontraint par pre- et post-tensioning date de 1940. Ces techniques étaient alors déjà utilisées à l'étranger et Magnel tente de convaincre des sociétés Belges d'appliquer ces procédés.

Magnel fut interdit d'enseignement par l'occupant durant la Seconde Guerre mondiale. Cependant, les Allemands l'autorisèrent à continuer à diriger le laboratoire qu'il avait créé. Durant ces années de réclusion dans son laboratoire, Magnel eu l'opportunité d'effectuer une recherche de grande envergure sur des poutres en béton précontraint. Il étudia également le fluage des fils en acier à haute résistance ainsi que le retrait et le fluage du béton. Durant les années de guerre, il était impossible pour lui d'obtenir le système de précontrainte développé par Freyssinet en France. En conséquence, il développa lui-même un système de post-tensioning baptisé « Belge » connu plus tard sous le nom système « Blaton-Magnel » (Fig. 2). L'ancrage de ce système est constitué de plusieurs plaques « sandwich » superposées parallèlement l'une sur l'autre et prenant appui sur une plaque d'about en acier coulé. Chaque élément sandwich présente quatre rainures qui permettent la fixation de huit fils par paires au moyen de quatre clavettes en forme de coin plat. De cette façon, la tension des fils (typiquement de diamètre 5 mm) d'un câble est plus uniforme que si tous les fils avaient été tendus simultanément. De plus, la mise en tension des fils par ce système ne nécessite qu'un vérin de capacité modérée (Fig. 3). Le câble est disposé dans une gaine métallique, ou des trous réservés dans le béton pour y permettre le passage du câble dans la poutre après durcissement du béton. Sur toute la longueur du câble, des écarteurs verticaux et horizontaux sont disposés à intervalle régulier pour s'assurer que la position relative des fils reste constante le long du tracé du câble. Grâce

Figure 2 : Ancrage du système Blaton-Magnel

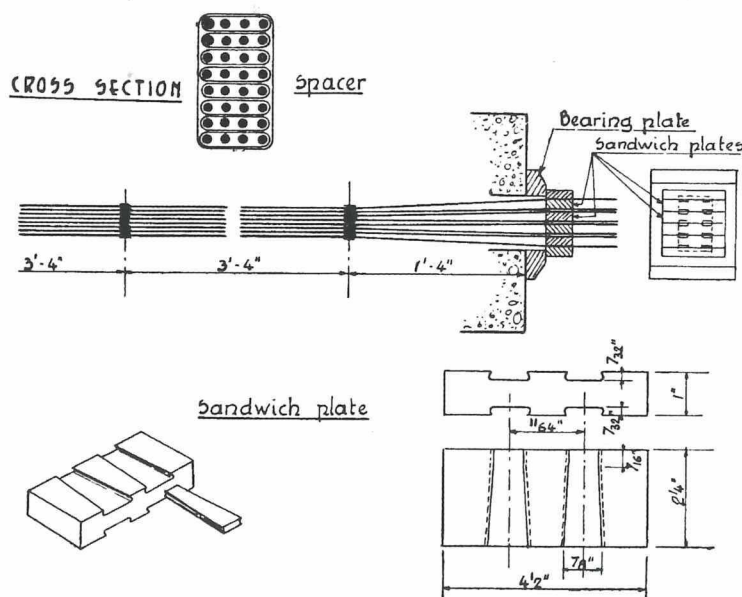
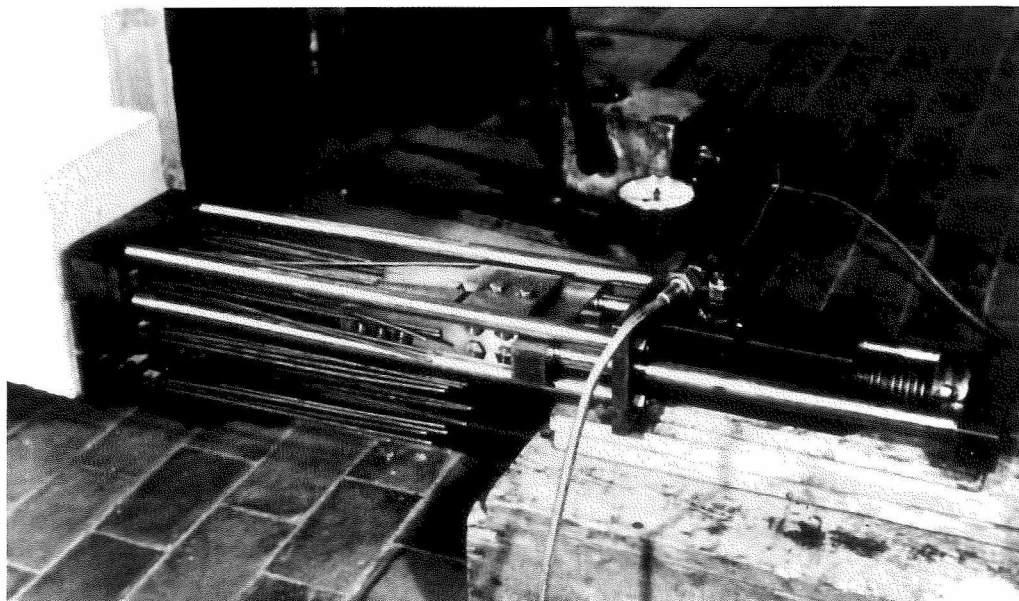


Figure 3 : Vérin utilisé avec le système Blaton-Magnel'



à ce détail qui garantissait un espace libre de géométrie régulière autour de chaque fil, il était possible d'effectuer une injection au ciment de bonne qualité, condition essentielle d'une bonne protection des fils contre la corrosion.

En 1946, Magnel publie sa méthode de dimensionnement des poutres isostatiques. Il énonce les quatre conditions suivantes à satisfaire sous charge de service relativement à la distribution de contraintes dans le béton dans la section critique :

- limitation à une valeur admissible de la contrainte de traction à la fibre supérieure à la précontrainte sous poids propre ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de compression à la fibre supérieure en précontrainte et sous pleine charge de service ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de compression à la fibre inférieure à la précontrainte et sous poids propre ;
- limitation à une valeur admissible de la contrainte de traction à la fibre inférieure en précontrainte et sous pleine charge de service.

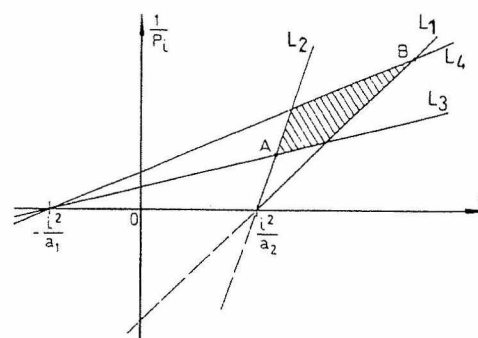
Ces conditions d'inégalité sont représentées par quatre droites dans un diagramme d'axes $1/P_i$ (avec P_i : valeur initiale de l'effort de précontrainte) et e (excentricité) qui délimitent un quadrilatère à l'intérieur duquel tous les

couples de valeurs $(1/P_i, e)$ sont admissibles (Fig. 4). En principe, l'excentricité qui conduit à la plus petite valeur de P_i est choisie.

En ce qui concerne l'effort tranchant, il tient compte de l'effet favorable de la précontrainte sur la valeur de l'effort tranchant agissant sur les sections de béton. Il recherche ensuite la section et la fibre où apparaît la plus grande contrainte principale de traction et la compare avec une valeur admissible.

Pour le dimensionnement des abouts des poutres, il propose de calculer l'effort tranchant et le moment fléchissant agissant sur des sections horizontales, ce qui constitue l'approche actuellement connue sous le nom d'analogie de la poutre courte. Les contraintes tangentielles et normales résultantes sont combinées avec des composantes de contrainte venant d'autres contributions pour calculer la plus grande contrainte principale de traction.

Figure 4 : Quadrilatère de solutions admissibles pour $1/P_i$ et e



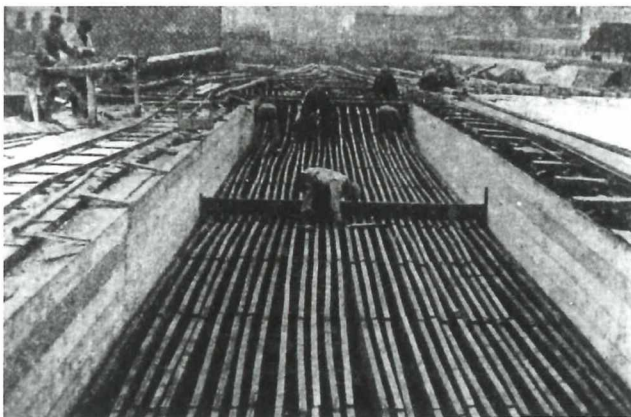
En 1951, Magnel écrit : *"In my opinion, for each beam two calculations have to be made: the first based on stresses using the elastic theory, the other on ultimate load. However, it seems to be impossible at present to make this latter calculation accurately because all known methods require the use of coefficients, the value of which we really ignore. This is mainly true when the failure occurs by crushing of the concrete. I recommend the design based on stresses as the fundamental one, but as it does not always give the same factor of safety against ultimate failure, an attempt must be made in each case to check whether this factor of safety is sufficiently high."*

En 1946 déjà, il essaye une poutre partiellement précontrainte pour laquelle la charge de fissuration est plus faible que la charge de service, et ce en contradiction avec le principe original de la précontrainte « totale » qui n'admettait pas l'apparition de contraintes de traction dans le béton en service. Quoique Freyssinet s'opposât vivement à l'usage de la précontrainte partielle, Magnel réalisa que celle-ci pouvait offrir quelques avantages.

En 1947, il élabore une solution pratique pour le cas des poutres continues précontraintes par post-tensioning. Il introduit le concept des moments secondaires (« parasites » selon la terminologie de Magnel) M_{psec} induits par la force de précontrainte P et définit l'excentricité équivalente comme :

$$e_{eq} = e + M_{psec} / P \quad (1)$$

De cette façon il peut utiliser un diagramme $1/P_1 - e_{eq}$ similaire à celui pour les poutres isostatiques. Les relations entre les vraies excentricités et les excentricités équivalentes sont calculées en fonction des expressions des moments secondaires.



Ayant accumulé suffisamment de connaissances théoriques et d'expérience pratique à propos du béton précontraint, il rédige son premier livre sur le sujet. Il est d'abord publié en français en 1948, mais est très rapidement traduit en anglais et en espagnol.

PREMIERS PROJETS EN BELGIQUE

Pour le pont-rail de la Rue du Miroir de la jonction Nord-Midi à Bruxelles, deux des six tabliers furent réalisés (1943-1944) en béton précontraint (Fig. 5). Pour une portée de 20 m, une hauteur totale de ces tabliers de 1,15 m s'avéra suffisante alors qu'un tablier en béton armé nécessitait une hauteur de 1,75 m. La construction de ce pont fut considérée comme un projet-pilote et le programme expérimental l'accompagnant fut financé, partiellement, par le Fonds National de la Recherche Scientifique. Dès lors, la Belgique était l'un des premiers pays à se voir doter d'un pont-rail en béton précontraint. À propos de ce projet, Magnel conclut : « À notre avis, le béton précontraint est le matériau de l'avenir. Dans dix ans, on ne construira plus beaucoup de ponts en béton armé ordinaire, tellement on sera pénétré des avantages de la précontrainte. L'entreprise des ponts expérimentaux de la Rue du Miroir aura été le catalyseur de cette évolution et tous ceux qui y ont collaboré peuvent justement être fiers du résultat obtenu. »

Les premiers ponts-routes en Belgique ont été construits à Zammel (début des travaux en 1944 ; 12 m de portée) et à Eeklo (1945-1946 ; 20 m de portée).

En 1947-1948, une nouvelle usine textile est construite à Gand pour l'Union Cotonnière (UCO). Elle va se voir dotée de la plus grande couverture au monde (35 000 m²) en béton précontraint ; elle existe toujours en l'état (Fig. 6). Il fut nécessaire de réaliser plus de

Figure 5 : Pont-rail au-dessus de la rue du Miroir à Bruxelles (1943-1944)¹

Figure 6 : Usine textile avec poutres de toiture précontraintes par post-tensioning (1947-1948)¹



Figure 7 : Poutres pour toiture de hangar à l'aéroport de Melsbroek'



100 poutres principales de 20,5 m de portée et 600 poutres secondaires de 13,7 m. Toutes ces poutres ont été préfabriquées sur chantier au rythme de trois poutres principales et dix-huit poutres secondaires par semaine, ce qui nécessita une parfaite organisation du chantier de préfabrication. Magnel écrit à propos de cette réalisation remarquable : « Durant les 3 ou 4 derniers mois, ce projet attire de nombreux architectes, ingénieurs et entrepreneurs belges ou étrangers. Ils veulent s'instruire dans le domaine du béton précontraint, tout d'abord dans notre laboratoire et ensuite sur chantier. »

De la même époque date la construction d'un hangar pour avions à Melsbroek, l'ancien aéroport de Bruxelles. La toiture est supportée par dix-sept poutres précontraintes par post-

Figure 8 : Pont sur la Meuse à Sclayn'



tensioning de 52 m de portée et pesant plus de 300 tonnes chacune (Fig. 7). Comme dans le projet UCO, ces poutres ont été coulées au niveau du sol, précontraintes, puis mises en place par levage au moyen de vérins.

1949 est l'année de construction du fameux pont de Sclayn sur la Meuse (Fig. 8). Il s'agit du premier pont au monde à poutre continue en béton précontraint (Fig. 9 et 10). Avec deux travées de 63 m de longueur chacune, il s'agit également, à l'époque, du plus long pont en béton précontraint au monde.

Grâce à l'inertie variable de la section de la poutre, le tracé des câbles est quasi rectiligne d'un bout à l'autre, avec une très faible discontinuité angulaire au niveau de la section au droit de l'appui central. Dans cette section, le moment secondaire induit par la précontrainte équivaut à 68 % du moment dû au poids propre.

LE PONT DE LA WALNUT LANE À PHILADELPHIE

En 1946, Magnel effectue son premier voyage aux États-Unis grâce à la Belgian-American Educational Foundation fondée par Herbert Hoover en 1920. Son voyage a été organisé par Charles C. Zollman, ancien étudiant de Magnel à l'Université de Gand. Un peu plus tard, il devient le représentant officiel de Magnel aux États-Unis, responsable des détails pratiques de plusieurs voyages de Magnel vers ce continent. Les interventions précoces de Zollman dans la conception et la construction d'usines de préfabrication en divers endroits des États-Unis, ses activités dans le domaine de la préfabrication, de même que

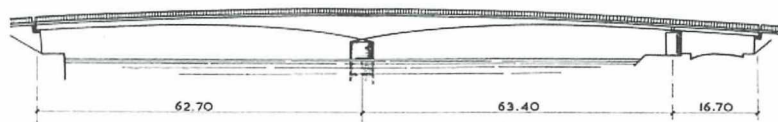


Figure 9 : Élévation du pont de Sclayn¹

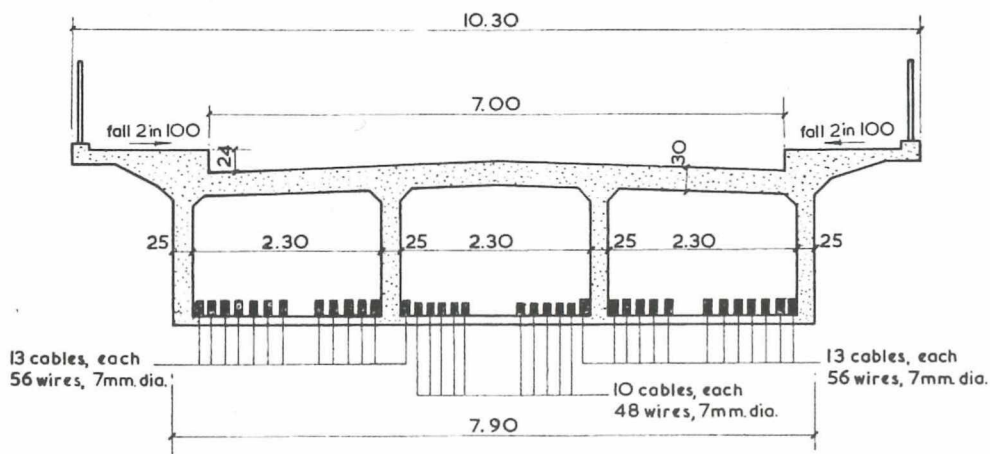


Figure 10 : Section transversale du tablier du pont de Sclayn¹

ses nombreuses contributions au *Prestressed Concrete Institute* font de Zollman un des pionniers de la préfabrication aux États-Unis. Durant sa visite aux États-Unis, Magnel donna des conférences sur le béton précontraint en plusieurs endroits, alors que ce sujet était alors quasi inconnu dans ce pays. Magnel avait le don unique d'expliquer des théories complexes et des problèmes ardu d'une façon très simple et parvenait ainsi à captiver de grands auditoires.

Deux événements importants se produisent durant le séjour de Magnel aux États-Unis, et ils auront une influence directe sur le développement initial du béton précontraint en Amérique, qui culmine avec la réalisation du pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie, le tout premier pont en béton précontraint aux États-Unis (Fig. 11). Le premier événement est la rencontre de Magnel avec la Preload Corporation de New York, société qui deviendra sous-traitante pour la construction du pont de la *Walnut Lane*. Le second est la demande adressée par Magnel à Zollman pour que ce dernier traduise en anglais le manuscrit français de son livre sur le béton précontraint. Après beaucoup d'efforts et de difficultés, le livre est publié à Londres en 1948. Le premier tirage à 6 000 exemplaires est rapidement épuisé. La seconde édition, revue et augmentée, tirée à 8 000 exemplaires, est publiée en 1950. La 3^{ème} édition est publiée en 1954. À cette époque, le livre de Magnel est l'outil pratique que tous les étudiants et tous les ingénieurs praticiens utilisent pour le

dimensionnement et l'analyse des constructions en béton précontraint. L'impact qu'ont eu sur l'industrie du béton précontraint les diverses éditions de ce traité, ainsi que d'autres publications de Magnel, est très significatif. Au début des années, 1950, l'ingénieur sino-américain T.Y. Lin passe une année complète dans le laboratoire de Magnel et publie à son retour aux États-Unis son livre *Design of Prestressed Concrete Structures* (1955) appelé à devenir l'une des références classiques de la littérature sur le béton précontraint.

À la fin des années 1940, C. Zollman, qui a alors rejoint la Preload Corporation, parvient à convaincre le département des travaux de la ville de Philadelphie de réaliser la superstructure du pont de la *Walnut Lane* en béton

Figure 11 : Pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie¹



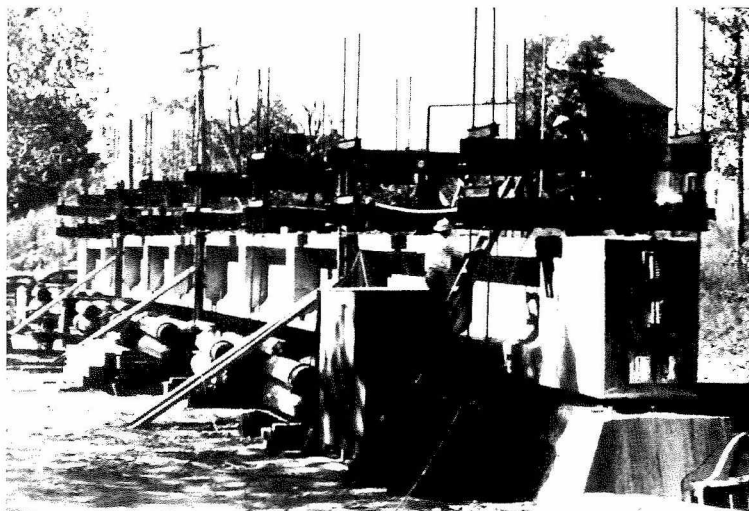
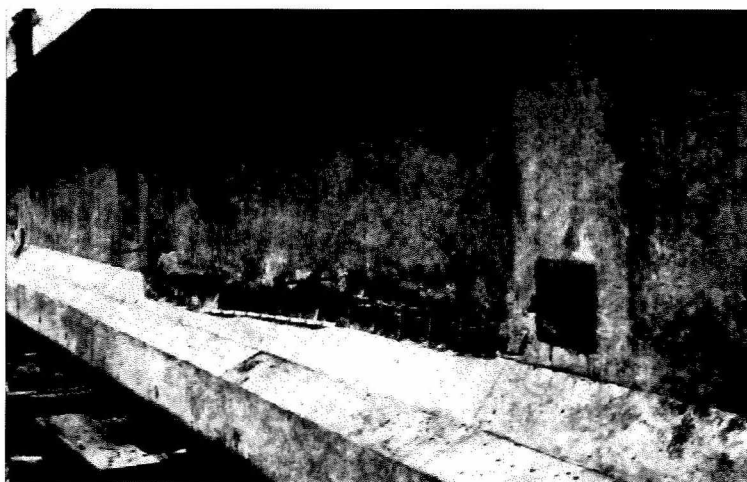


Figure 12 : Essai de chargement d'une poutre du Pont de la Walnut Lane¹

précontraint sur base d'un projet élaboré par Magnel. La Preload Corporation est déclarée adjudicataire pour la réalisation des poutres du pont en 1949. En octobre 1949 est organisé un essai en vraie grandeur de mise en charge d'une poutre de 49 m de portée et 2 m de hauteur, identique aux poutres qui seront mises en œuvre pour réaliser la travée centrale du pont (Fig. 12). Cet essai est réalisé en présence de quelques 300 ingénieurs venus de dix-sept états et de cinq pays qui passent la journée sous la pluie pour assister à cet événement. La réussite de cet essai à rupture réalisé sur le site du chantier, loin du confort d'un laboratoire, représentait un succès remarquable qui contribua à inspirer la confiance publique vis-à-vis du béton précontraint. C. Zollman formula cela de la façon suivante : *"No single event was more instrumental in launching the prestressed and precast concrete industry in North-America than the construction of the Walnut Lane Bridge in Philadelphia in 1950. More than anything else however, it was the charisma, the dynamism and engineering talent displayed by the man who designed the Walnut*

Figure 13 : Nids de gravier sur la 1^{ère} poutre coulée en 1949¹



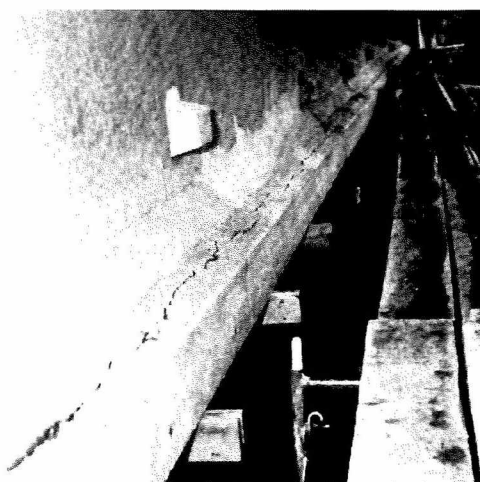
Lane Bridge, namely Prof. Gustave Magnel of Belgium, that gave the impetus necessary for the acceptance and development of prestressed concrete in the United States."

Avant et pendant la construction du pont, il fallut cependant résoudre certains problèmes car Magnel avait spécifié un béton avec "zero slump". Suivant la pratique américaine, ceci n'était guère possible, mais Magnel devait approuver tous les détails d'exécution. Finalement, une solution pratique fut trouvée, mais plusieurs poutres présentaient des nids de gravier ou d'autres imperfections (Fig. 13 et Fig. 14). La controverse alla suffisamment loin pour trouver un écho dans l'influent périodique « Engineering News Record » qui titra : *"Americans make soup, not concrete, says Belgian professor"*.

En octobre 1950, le Franklin Institute de Philadelphie décerne au professeur Magnel sa prestigieuse médaille Frank P. Brown pour ses contributions exceptionnelles au développement du béton précontraint.

Le *Walnut Lane Memorial Bridge* fut affecté de quelques problèmes qui limitèrent sa durabilité: certaines poutres durent subir des réparations majeures et il fut finalement décidé de remplacer toute la superstructure. L'installation du chantier en vue de l'évacuation des poutres d'origine débuta en 1989. La reconstruction du pont en 1990 et la rectification de ses approches suscitèrent presque autant d'intérêt et de curiosité dans le milieu des ingénieurs et de la construction que l'avait fait la structure originale 40 ans plus tôt. Les nouvelles poutres, de conception basée sur

Figure 14 : Fissuration longitudinale à la semelle inférieure d'une des poutres¹



une adaptation hybride de la poutre standard AASHTO Type V, furent toutes préfabriquées dans une usine certifiée PCI, alors qu'en 1949, les poutres avaient été fabriquées et précontraintes par post-tensioning sur le chantier.

L'APRÈS WALNUT LANE

Au début des années 1950, plusieurs chercheurs américains qui deviendront célèbres, ont séjourné dans le laboratoire de Magnel, parmi eux T.Y. Lin (Berkeley), David P. Billington (Princeton University) et Robert N. Bruce (Tulane University, New Orleans).

Avec d'autres pionniers de la précontrainte, Magnel fonde en 1952 la Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP), qui devient une organisation technique internationale florissante. En 1996, la FIP fusionne avec le Comité Euro-International du Béton (CEB) pour constituer la Fédération Internationale du Béton/International Federation for Structural Concrete (fib).

Magnel a non seulement écrit plus de 180 articles techniques et scientifiques, mais il a également publié une impressionnante série de livres relatifs à la stabilité des constructions et au dimensionnement des constructions en béton armé et précontraint. Tous ses livres apportent des méthodes de calcul pratiques, dont l'usage est facilité par l'emploi de nombreuses tables et graphiques.

Durant les dernières années de sa vie, Magnel consacre une énergie importante au projet d'une très haute tour de télécommunications à ériger à l'occasion de l'Exposition universelle de 1958 à Bruxelles.

Cette tour en béton armé aurait eu un diamètre de 100 m à sa base et une hauteur de 500 m. La tour aurait été surmontée d'un mât en acier de 135 m de haut. À l'époque, cette construction eût certainement constitué une attraction mondiale. Finalement, en raison de controverses technique et politique, ce projet ne fut pas réalisé.

Gustave Magnel décède inopinément le 5 juillet 1955. Cette disparition subite fut ressentie avec tristesse tant en Belgique qu'à l'étranger.

En octobre 1956, une séance académique est organisée à Gand pour commémorer la mémoire de Gustave Magnel. Plusieurs

de ses anciens collègues et amis vinrent de l'étranger. À cette occasion, le professeur R. Evans de l'Université de Leeds s'exprima en ces termes : "... *His concrete laboratory was recognized as one of the best in the world. Hundreds of members of staff and research workers from a large number of universities have had the pleasure and privilege of visiting this excellent laboratory. Magnel always warmly welcomed at his laboratory those who wished to improve their knowledge. His gift of friendly intercourse enriched us all by their genial and mellow qualities. Although he often had strong views on technical questions, he was by nature so generous that it was a pleasure even to disagree with him.*"

Dans le but de continuer à commémorer sur le long terme les réalisations exceptionnelles du Professeur Magnel, l'Association Générale des Ingénieurs diplômés de l'Université de Gand (AIG) décerne tous les cinq ans la « Médaille d'or Gustave Magnel » au concepteur d'une structure constituant une application importante ou remarquable en béton armé ou précontraint. Les onze premiers lauréats sont : N. Esquillan (1959), P. Blokland (1963), F. Leonhardt (1968), U. Finsterwalder (1973), R. De Keyser (1979), H. Wittfoht (1984), R. Greisch (1988), O. Olsen (1994), M. Virlogeux (1990), J. Schlaich (2004) et J.J. Arenas (2009).

CONCLUSION

Du survol qui vient d'être fait, il ressort que le Professeur Gustave Magnel était une personnalité exceptionnelle tant du point de vue académique qu'humain. On peut souligner ses principaux accomplissements :

- contribution aux méthodes pratiques de dimensionnement du béton armé ;
- développement d'un système de précontrainte original ;
- développement de méthodes de dimensionnement du béton précontraint et rédaction du premier livre publié en anglais sur le sujet ;
- implication dans la conception et la réalisation du premier pont en béton précontraint et continu au monde ;
- contribution à la réalisation du pont de la *Walnut Lane* à Philadelphie, le tout premier pont en béton précontraint aux USA.