

Zeitschrift: Matières
Herausgeber: École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut d'architecture et de la ville
Band: 14 (2018)

Artikel: Le tressage pour les voûtes de Cottancin : au-delà de l'"architecture rationnelle"
Autor: Lampariello, Beatrice
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-984548>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

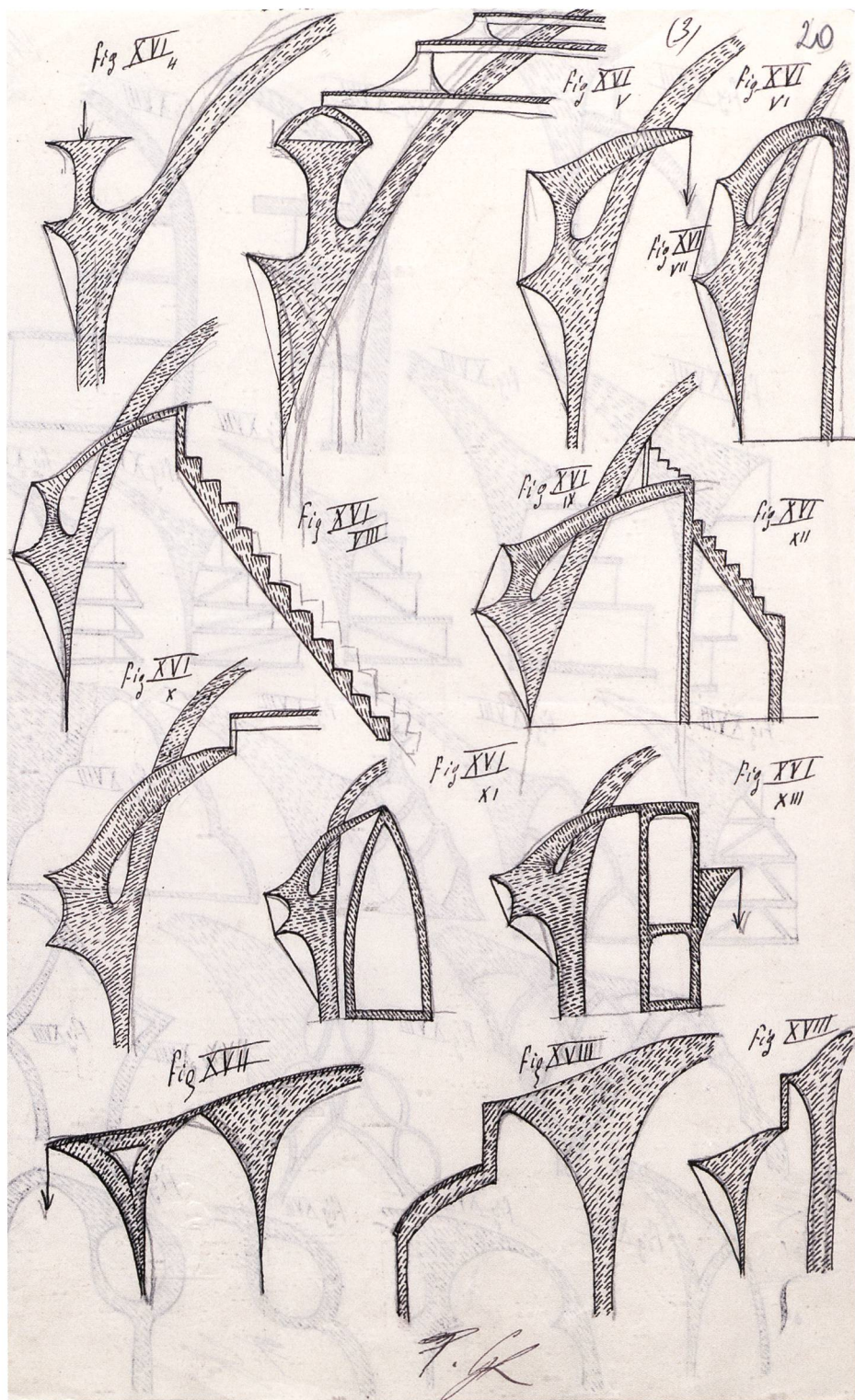
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées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

Terms of use

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

Download PDF: 27.04.2026

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



Le tressage pour les voûtes de Cottancin : au-delà de l'« architecture rationnelle »

Beatrice Lampariello

Dans le panorama architectural du XIX^e siècle, les voûtes et les coupoles, en tant que figures de la tradition, continuent à être utilisées pour couvrir des bâtiments publics et industriels. La mise en place de nouveaux matériaux capables de réduire les coûts et les temps de construction, et de garantir sécurité, stabilité, imperméabilité et non-combustibilité, ne signifie pas la disparition de ces figures, mais produit une série d'études et de recherches visant précisément à identifier les modalités techniques capables de garantir leur survie. Bien qu'il y ait encore des exemples de réalisations en maçonnerie, les ossatures métalliques à combler avec différents matériaux se diffusent largement d'abord, et on assiste ensuite à l'avènement d'un type particulier de structure mixte composée de barres métalliques et de béton.

Après les expériences de Joseph-Louis Lambot et Joseph Monier sur les treillis de barres métalliques pour des bateaux ou des réservoirs cylindriques avec des toitures à voûte surbaissée, la clarification progressive de tous les aspects théoriques et constructifs du béton armé, de la composition au dimensionnement des barres, contribue de manière décisive à son succès dans la réalisation des toitures voûtées. Monier, François et Edmond Coignet, Jean Bordenave, Thaddeus Hyatt, Ernest Leslie Ransome, Alexander Matrai, Aimé Bonna, Josef Melan, Franz Habrich, Gustav Adolf Wayss et François Hennebique ne sont que quelques-uns des ingénieurs, entrepreneurs et inventeurs engagés dans la mise au point de structures en béton armé en déposant des brevets, en effectuant des essais de résistance et en construisant des édifices.

Dans ce contexte, l'ingénieur français Paul Cottancin (1865-1928) propose un système de construction caractérisé par la combinaison de barres métalliques et de béton, éventuellement associés à des briques, pour réaliser des fondations, des planchers, des murs et des voûtes – le « ciment armé »¹. La mise au point de ce système dure une dizaine d'années, depuis la fin des années 1880, lorsque Cottancin réalise les premiers ouvrages

Paul Cottancin, Les couvertures Cottancin, brevet d'invention n° 264093, 16 février 1897.

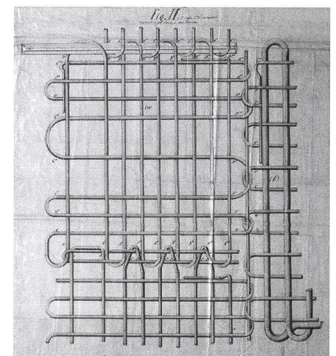
de dimensions réduites (réservoirs, tuyaux, voûtes et planchers)² et dépose un brevet concernant la configuration des barres métalliques, jusqu'au début du XX^e siècle avec la construction d'importants bâtiments et l'invention d'une méthode de construction qui vise à réduire les cintres. Les recherches de Cottancin diffèrent de celles de ses contemporains sur plusieurs plans : par la configuration particulière des barres métalliques tissées pour construire une maille sans solution de continuité, par la composition du gâchage sans gravier et avec un dosage élevé de ciment, par l'invention des structures mixtes en ciment, barres métalliques et briques, par la simplification des procédés de chantier qui l'amène à utiliser des éléments fabriqués à l'avance, et enfin par la forme des voûtes elles-mêmes. Dans ses différents brevets, Cottancin invente des structures de grandes toitures dans lesquelles les forces statiques sont contrôlées pour produire des figures qui reflètent parfois certains modèles gothiques, ou encore qui semblent parfois douées de leur propre logique pour obtenir une unité inédite de structure et d'espace, sans références à ces formes de la tradition que le béton armé contribue pourtant à produire dans les mêmes années.

« Surfaces fermées » et « non fermées »

Les brevets déposés par Cottancin entre 1889 et 1890 et les expériences qu'il mène au cours de cette même période portent sur la question centrale des études et des recherches qui occuperont architectes et ingénieurs au moins jusqu'aux années 1920 dans la configuration et la construction de toitures voûtées, nervurées ou lisses. Dans le premier brevet, déposé en mars 1889³, Cottancin propose des structures lisses obtenues à partir d'une maille métallique combinée avec le conglomerat, selon la tradition constructive inaugurée par les ouvrages de petite taille de Lambot et Monier, et progressivement précisée également pour des structures plus grandes, en éliminant tout raidissement grâce à la configuration et à l'agencement de ces barres métalliques sur lesquelles Cottancin fonde l'invention de son ciment armé. Pourtant, le même brevet de 1889 contient une variante pour des structures avec raidissements, que Cottancin développera depuis le début des années 1890 comme solution privilégiée pour son système.

Le brevet décrit les différentes méthodes de tressage d'une maille métallique à utiliser en grillage ou en treillage, ou en combinaison avec le ciment ou toute autre matière plastique (plâtre, chaux, béton comprimé, blocs de mâchefer agglomérés, terre, argile, bitume ou asphalte). La maille est constituée de deux éléments, de valeur hiérarchique différente, de taille et de section quelconques, reliés entre eux de façon à créer un tressage homogène et diffus : une « chaîne » continue, pliée en coudes successifs, croisée avec une trame de barres également continues et pliées. « Ossatures métalliques sans attaches et à réseau continu » et « carcasses » sont les définitions de la maille. Les barres de la trame sont appelées « fils » ou « brins », témoignant de la volonté de Cottancin de créer une maille à valeur textile.

La maille est tissée à la main ou avec un outil que Cottancin définit comme une « machine », et peut être plate ou courbée. La maille plate est fabriquée à l'horizontale (« à plat »), tandis que la courbe peut être tout de suite pliée par un mandrin ou tissée à



Paul Cottancin, Procédé de fabrication d'ossatures métalliques sans attaches et à réseau continu, brevet d'invention n° 196773, 18 mars 1889.

l'horizontale et courbée seulement plus tard. Lorsqu'elle est laissée à plat, elle produit une surface d'une taille quelconque et sans solution de continuité («surface non fermée»). Si par contre elle est pliée de telle sorte que ses deux côtés opposés se touchent, elle produit une «surface fermée». Son tressage varie en fonction de la configuration des «surfaces». Pour les «non fermées», on prévoit une grille à mailles orthogonales, tandis que pour les «fermées», on illustre différentes solutions avec une disposition diagonale de la «chaîne» et de la trame des barres.

Cottancin explique les différentes utilisations des «surfaces», quand la maille est combinée avec le ciment ou avec d'autres matières plastiques. Les surfaces «non fermées» produisent des «panneaux» à utiliser pour des dalles, des planchers, des toits, des voûtes, des coupoles et des réservoirs; les surfaces «fermées» sont utilisées pour des colonnes, des tuyaux et des conduits. Aucun épaissement n'est prévu par Cottancin. Les «panneaux» en ciment armé sont dépourvus de nervures et de tout renfort supplémentaire. La maille est suffisante pour garantir la sécurité et la stabilité. C'est en multipliant cette maille sur plusieurs couches, ou en modifiant la section et le pas de la «chaîne» et de la trame des barres, qu'il est possible d'assurer l'équilibre des «panneaux» même en présence d'efforts importants. Ainsi, alors que la maille métallique joue un rôle crucial dans le système de Cottancin, le ciment est réduit à un matériau de renforcement et de protection qui garantit une fermeture étanche, selon une ligne de recherche qui, au cours du XX^e siècle, verra Pier Luigi Nervi impliqué dans l'invention du «ferro-ciment». La maille représente la composante fondamentale du ciment armé, ce qui est confirmé par les études que Cottancin continuera à réaliser au cours des années 1890 sur sa configuration et sur le tressage de la «chaîne» et de la trame de barres afin d'augmenter la résistance des structures, considérant comme nulle cette force de cohésion qui est généralement attribuée à l'adhérence entre le métal et la matière plastique. La composition du conglomerat restera par contre toujours inchangée et calculée en vue d'obtenir une fermeture parfaite de la maille : un mortier de ciment gras, sans gravier et avec un dosage élevé de ciment. Ce n'est pas un hasard si la «construction métallique pétrifiée» est la définition de son ciment armé donnée par Cottancin⁴.

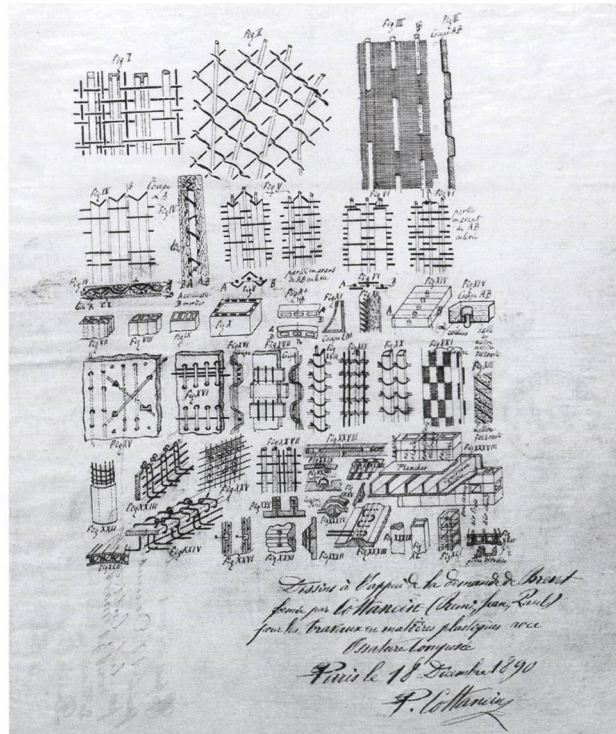
Cottancin, De Baudot et les «épines»

Parmi les différentes utilisations de la maille présentées dans le brevet de 1889, Cottancin introduit une solution destinée à modifier radicalement la configuration lisse et continue des «panneaux» en ciment armé. Il explique en effet que la maille peut être utilisée dans la maçonnerie de ciment ou «béton comprimé» des «cuves», «bacs» et «réservoirs» pour produire des «contreforts» et des «points de résistance», afin de «maintenir les panneaux constitutifs».

L'intuition d'augmenter la résistance des «panneaux» par l'introduction de «contreforts» et de «points de résistance» est développée dès 1890. Les occasions de préciser la configuration et la construction des structures en ciment armé sont offertes par quelques expériences, par de nouveaux brevets et par la réalisation de planchers et de

toitures de dimensions plus importantes que celles de la fin des années 1880. Parallèlement, la rencontre avec Anatole de Baudot (1834-1915), que Cottancin contacte au début des années 1890 et avec lequel il commence à construire plusieurs bâtiments – parmi lesquels on peut distinguer l'église Saint-Jean de Montmartre à Paris –, représente une autre occasion cruciale pour le développement des «panneaux» vers leur articulation différente de la continuité proposée en 1889⁵.

Pour vérifier les capacités statiques du ciment armé, Cottancin produit en avril 1890, au Laboratoire de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, dix-neuf dalles pour des essais de charge, de résistance à la flexion et à la rupture, ainsi que pour des vérifications de dilatation et de fissuration sous l'effet de la chaleur – les essais durent un mois⁶. Les dalles sont de dimensions et d'épaisseurs différentes (entre 2,2 et 4,5 centimètres) et sont équipées de mailles en fer avec un nombre différent de barres, mais toutes de même section. Quinze dalles sont lisses et continues, quatre sont par contre renforcées par des nervures sur l'extrados. Dans le tableau récapitulatif des résultats des tests, les dalles nervurées sont appelées «plaques armées par des épines». A travers ces expériences, Cottancin vérifie, d'une part que la résistance des dalles s'accroît avec l'augmentation du nombre de barres métalliques, jusqu'au point où leur nombre excessif se traduit par une rupture plus rapide, et d'autre part que les «plaques armées par des épines»⁷, bien qu'ayant un nombre de barres plus faible, aient une plus grande résistance que les dalles lisses, au point qu'à la fin des essais, aucune des dalles nervurées ne compte de dommages.



Paul Cottancin, Travaux en matières plastiques avec ossature composée, brevet d'invention n° 210293, 18 décembre 1890.

En décembre 1890, à la suite de ses expériences en laboratoire, Cottancin dépose un brevet consacré à quelques expédients pour augmenter la résistance du ciment armé aux chocs et aux contraintes de traction, de compression, de torsion et de flexion. La conception du système en ciment armé comme « construction métallique pétrifiée » est décisive pour orienter les réflexions de Cottancin vers une nouvelle configuration de la maille. Les barres sont tissées de manière semblable à celle d'une opération d'artisanat, comme s'il s'agissait de fils de tissus ou d'éléments végétaux de paniers. Les réflexions vont jusqu'à reconsidérer les matériaux de la maille, en proposant des fils de fer, des barres, des tubes, des « plaques perforées » et des tissus. Il n'est pas surprenant que dans l'évolution de son système basé sur le tressage de la maille, Cottancin en vienne aussi à prévoir des éléments fabriqués à l'avance pour être ensuite tissés et reliés entre eux.

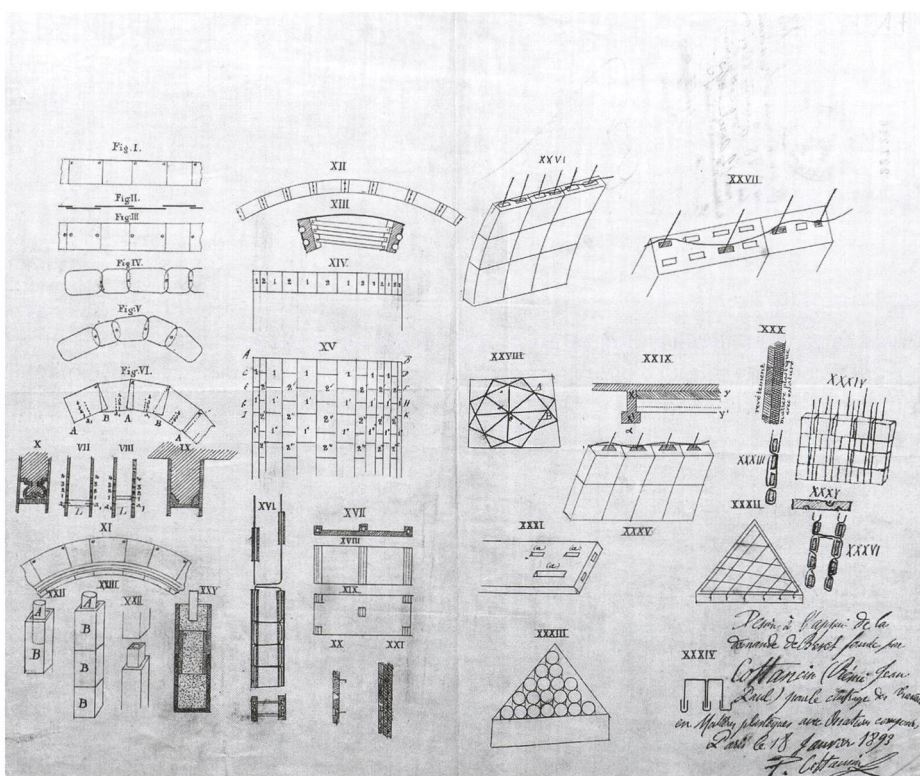
Dans le brevet de 1890, Cottancin propose d'insérer des renforts de différentes formes dans la maille, allant de barres qui se tressent avec la « chaîne » et la trame (« barres auxiliaires ») jusqu'à des fragments de toutes formes et tailles – il définit cette maille comme une « ossature composée »⁸. Cette nouvelle configuration envisage également d'utiliser des barres faites dans un matériau conducteur de courant électrique et des tubes pour le passage de gaz ou de liquides, conduisant à l'invention d'une ossature capable d'intégrer d'autres fonctions. Dans les tubes, on peut aussi introduire des « tringles » ou des « tiges » pour raccorder des parois adjacentes, ce qui préannonce le tressage entre les composantes du système en ciment armé que Cottancin commence alors à prévoir, à partir du milieu des années 1890, fabriquées à l'avance. Les renforts sont insérés dans la maille des « panneaux » – et sont donc invisibles – ou dans la maille des nervures dont le potentiel a été testé en laboratoire, et qui sont maintenant indifféremment appelées « épines », « contreforts » ou « contreforts-épines ». L'étude de la configuration de la maille métallique par l'addition de renforts pour pallier les déficiences mécaniques du ciment conduit Cottancin à proposer des variantes centrées sur la nature même des éléments constitutifs de son système : la présence des « barres auxiliaires » permet de remplacer la maille métallique par des « plaques perforées » ou des « tissus ou étoffes », confirmant sa valeur textile ; l'utilisation de tubes devient par contre le point de départ pour imaginer des structures avec des cavités fonctionnelles qui auront un rôle fondamental dans le processus de mise au point du ciment armé, et qui sont différemment obtenues par l'assemblage de blocs creux et par des dalles nervurées qui, associées à des plaques, donnent des planchers avec des vides.

Toute trace de la continuité illustrée en 1889 est désormais définitivement effacée. Les essais en laboratoire sont cruciaux pour l'évolution des voûtes en ciment armé vers leur décomposition en voiles et nervures, où les voiles eux-mêmes sont équipés de renforts dissimulés dans le conglomerat. Il est clair que la transition des toitures lisses vers des toitures avec raidissements, visibles ou non, est proposée pour permettre de couvrir des portées toujours plus grandes sans augmenter l'épaisseur des structures, en garantissant avec ces raidissements une augmentation du moment d'inertie. En même temps, le rôle des nervures et des renforts apparaît central non seulement pour l'équilibre statique des voûtes, mais aussi pour des raisons constructives, pouvant fonctionner

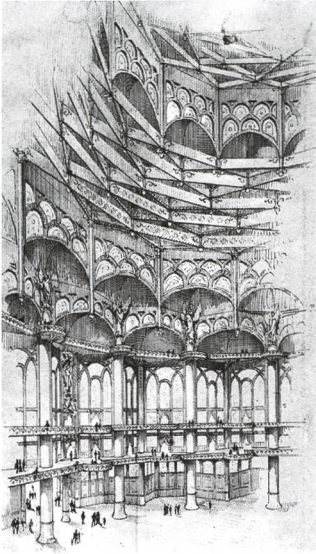
comme une structure de cintres pour la réalisation des voiles des voûtes elles-mêmes. Ce n'est pas un hasard si, environ au cours des années mêmes où Cottancin étudie les différentes possibilités de raidissement de ses structures, d'autres spécialistes du béton armé comme Hennebique et Edmond Coignet proposent également des toitures voûtées de grandes dimensions avec nervures apparentes ou ossatures métalliques fermées par un treillis de barres et englobées dans le béton.

L'une des premières applications importantes des études menées par Cottancin en 1890 sur la résistance du ciment armé est la voûte nervurée de trois centimètres d'épaisseur, avec une flèche de 1,90 mètres et une dimension de 19 sur 52 mètres, de la fabrique de papier Charles de Montgolfier et Cie à La Haye-Descartes, propriété de l'ingénieur Charles de Montgolfier⁹. C'est probablement après avoir vu cette œuvre, que De Baudot commence à se passionner pour le ciment armé.

«[...] après lui avoir présenté nos travaux dans le genre de ceux de nos voûtes à grandes portées, entre autres celle que nous avons construite, il y a quelques années, dans les papeteries de la Haye-Descartes pour MM. Ch. De Mongolfier et Cie [...] – raconte Cottancin – M. A. de Baudot a-t-il vu immédiatement tout le parti qu'il pouvait tirer de notre principe et alors, il étudia cette voûte dans tous ces détails.»¹⁰



Paul Cottancin, Cintrage des travaux en matière plastique avec ossature composée, brevet d'invention n° 227216, 18 janvier 1893.



Anatole de Baudot, projet pour une salle de fête pour l'Exposition universelle de Paris de 1900, 1894.

Les premières voûtes en ciment armé sont réalisées par De Baudot entre 1892 et 1894, dans sa résidence de la rue de Pomereu et au lycée Victor Hugo à Paris, et dans trois maisons ouvrières à Antony. Dans ces mêmes années, il participe au concours pour des installations de l'Exposition universelle de 1900, en proposant une salle des fêtes et un restaurant, tous deux à couvrir avec une superposition complexe de fines poutres combinées à des voûtains. Dans toutes ses œuvres, De Baudot propose des toitures voûtées faites de voiles et d'«épines», voulant explorer leurs combinaisons géométriques infinies, semblables aux combinaisons gothiques étudiées par Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc¹¹.

Les méthodes de construction envisagées par Cottancin pour les voûtes sont illustrées dans un brevet déposé en 1893 – alors qu'il travaille sur les premiers chantiers de construction de De Baudot – sous le titre de *Cintrage des travaux en matière plastique avec ossature composée*¹². Les études montrent la volonté de Cottancin de définir des structures faciles et rapides à réaliser, dont les différentes phases de construction produisent des cavités fonctionnelles et des formes de décoration. La coulée du ciment est combinée avec des éléments fabriqués à l'avance, ce qui produit un système composite.

La réalisation des «épines» en ciment armé est prévue par des coffrages composés de deux parois, à leur tour constituées chacune d'une séquence de plaques en bois ou en tôle, reliées entre elles par des vis pour obtenir la courbure correcte, et d'un liteau à leur base. Plusieurs dispositifs peuvent être placés sur le liteau pour modeler l'intrados des «épines» avec des moulures. La construction des voiles est par contre garantie de la coulée du ciment par un cintre constitué d'une série de claveaux pour la courbure de la voûte, qui sont décrits comme mobiles. Mais parallèlement à son étude du potentiel des structures creuses, Cottancin propose de remplacer les claveaux par des coffrages à perdre, sous forme de briques à travers lesquelles passent des barres métalliques, du ciment et des éléments fonctionnels, obtenant ainsi un voile en briques armées avec moins de béton. Une couche d'enduit et des peintures cachent les intrados des voûtes. Pour celles qui sont réalisées en ciment armé, d'autres formes de décoration sont envisagées, obtenues à partir de la construction même des voûtes : sur les claveaux et les liteaux peuvent être placés des éléments qui, enlevés après la prise, laissent le long des intrados des « empreintes », ou qui restent incrustés dans le ciment – comme des pastilles de verre et de céramique, selon la solution que Cottancin adopte à cette même période dans la résidence de De Baudot et au Lycée Victor Hugo¹³.

Les études sur les méthodes de construction de structures en ciment armé avec la génération de cavités fonctionnelles et de décors grâce à l'utilisation de briques ou de panneaux mobiles impliquent une configuration particulière des planchers et des murs, annonçant aussi une évolution ultérieure et extrême des toitures voûtées. Après l'idée du brevet de 1890 de construire des planchers à dalles nervurées fermées avec des plaques, dans le brevet de 1893 et dans certains ouvrages réalisés à la même période pour De Baudot, Cottancin propose, parmi les différentes solutions étudiées, de réaliser des structures horizontales et verticales en doublant les composantes et en les espaçant, laissant entre elles un interstice vide ou rempli de ciment et de conduits.

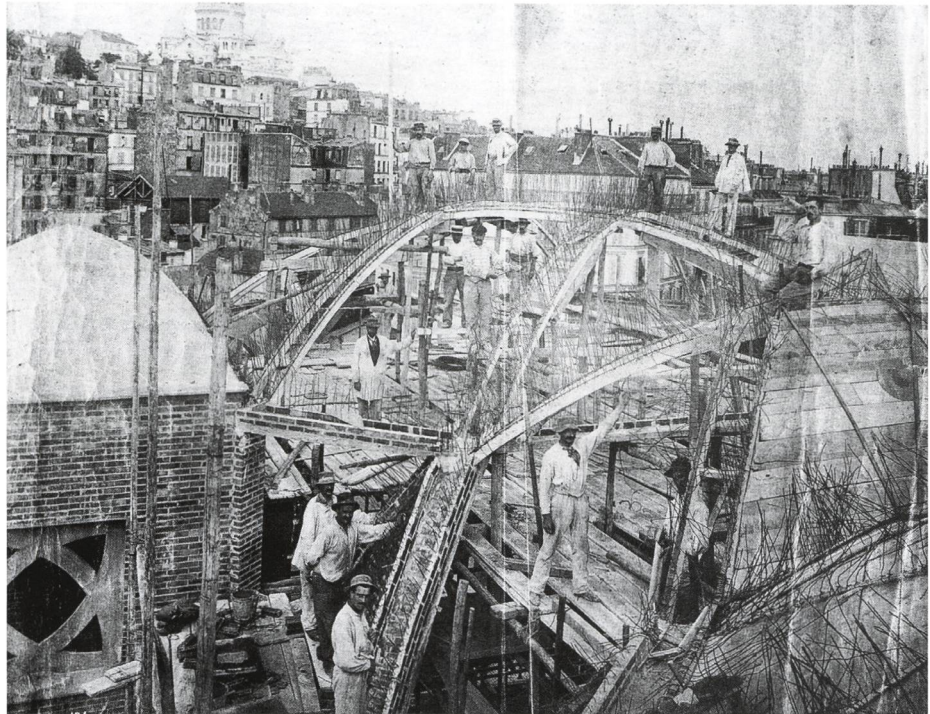
Pour les murs, il prévoit l'utilisation de coffrages à perdre sous la forme de deux parois de solides creux, tels que des briques, reliées par les barres de la maille métallique et entre lesquelles est coulé le ciment ; pour les planchers, il utilise plutôt des panneaux mobiles, fabriqués à l'avance, d'une épaisseur de deux centimètres, composés d'un cadre en liteaux et d'un treillis léger enrobé dans le « plâtre », avec un double rôle, de surface sur laquelle couler le ciment, et de fermeture inférieure de la structure. La construction est donc conçue à partir des « épines », fabriquées à l'avance, avec un profil en T pour y poser des taquets en bois sur lesquels sont à leur tour placés les panneaux, pour ensuite couler le ciment pour la construction du plancher. Une fois la prise terminée, les taquets sont retirés et les panneaux déplacés pour fermer la structure.

Amélioration du ciment armé

Le projet et la construction de bâtiments et de toitures de pavillons, de châteaux et de monuments entre 1894 et 1905 représentent une étape cruciale dans le processus de mise au point des voûtes en ciment armé. Dans le contexte de l'élaboration des projets et de l'ouverture des chantiers de construction, entre autres, de l'église Saint-Jean de Montmartre, du théâtre de Tulle, du pavillon pour enfants atteints de la diphtérie à Paris, du château de l'Orfrasière à Nouzilly, du pavillon de San Marino à l'Exposition universelle de Paris en 1900, de l'église méthodiste Saint-Sidwell à Exeter, et de la cathédrale d'Oran, Cottancin précise certains aspects constructifs et formels de ses propres structures, arrivant en même temps à en montrer le potentiel, en vue de leur application à d'autres constructions d'envergure. Dans ces ouvrages, les intuitions contenues dans le brevet de 1893 pour la réalisation de murs et de planchers sont appliquées aux voûtes, produisant deux voiles superposés en ciment armé, ou éventuellement en briques armées, d'une épaisseur comprise entre cinq et sept centimètres, espacés par une cavité à remplir de « mâchefer »¹⁴. Le choix de doubler les voiles ne sert pas seulement à générer une couche fonctionnelle, mais sert aussi à augmenter la résistance des voûtes.

Les modifications apportées au système en ciment armé dans les projets et chantiers du milieu des années 1890 se sont accompagnées de nouveaux développements, contenus dans les brevets, relatifs aux « épines », aux voiles et à leurs dispositifs statiques, qui ne seront pas toujours appliqués dans la pratique. Parallèlement, et dans un contexte de concurrence de plus en plus serrée entre les différents systèmes en béton armé, de nouveaux tests en laboratoire sont menés pour démontrer l'efficacité accrue du ciment armé par rapport au système Monier et à celui qu'Hennebique développe dans ces mêmes années¹⁵.

Après l'utilisation d'éléments fabriqués à l'avance, comme le montre le brevet de 1893 et comme expérimenté dans certains ouvrages de De Baudot, les différentes expériences de chantier amènent Cottancin à envisager le passage du coulage traditionnel avec cintres à l'assemblage de pièces avec des barres munies de vis à serrer pour les soumettre à une tension, et disposées grâce à des tirants ancrés dans la maçonnerie ou à une structure temporaire en bois – *Constructions démontables en matière plastique avec*



ossature, tel est le titre de la nouvelle invention de 1894¹⁶. Le joint entre «épines» est un détail difficile à réaliser, au point que, après avoir prévu des méthodes artisanales impliquant une série d'opérations à réaliser sur le chantier¹⁷, on est passé à sa modélisation, lors de la phase de préfabrication, sous la forme d'un emboîtement, garantissant ainsi une construction sans cintres aériens¹⁸. D'ailleurs, au cours de cette même période, Cottancin s'est engagé dans la mise au point de diverses formes d'emboîtement pour l'assemblage d'autres éléments de son système de construction, tels que le «parquet armé» et la «menuiserie armée»¹⁹. Pourtant, bien que dans les brevets il prévoie maintenant une construction de pièces fabriquées à l'avance, dans la construction de ses voûtes, Cottancin utilise toujours des solutions spéciales qui combinent la préfabrication avec de complexes opérations réalisées en chantier pour le tressage de la maille métallique, la coulée du ciment et le montage des briques.

Toujours à la recherche d'une plus grande résistance pour ses structures et de la simplification des processus de chantier, Cottancin propose des variantes pour le tressage de la maille et le profil des «épines». L'intuition d'ajouter dans la maille des renforts de formes diverses est maintenant précisée en insérant, pour les «panneaux», d'autres «chaînes» ou trames de barres auxquelles est appliquée une torsion simple ou double ; pour la maille des nervures, on étudie plutôt des tressages complexes dans lesquels les trames de barres sont pliées pour créer une séquence d'anneaux à travers lesquels passe la «chaîne», ceci sur la base de certaines études commencées en 1892, relatives à la configuration de la trame de barres en forme de spirale²⁰. Le profil des nervures évolue

Anatole de Baudot (architecte),
Paul Cottancin (ingénieur), église
de Saint-Jean de Montmartre,
Paris, 1894-1904.

de la section en T à la modélisation des arêtes arrondies pour obtenir, d'une part une plus grande élasticité et une répartition plus cohérente des efforts, et d'autre part une simplification des différentes phases de construction, réduisant les risques d'erreur des ouvriers²¹. « Epines-contreforts rationnelles » est la nouvelle dénomination des nervures, adoptée en 1896 pour souligner que leur configuration, plus efficace d'un point de vue structurel, est fonctionnelle pour une construction plus simple et plus rapide. En même temps, l'utilisation de l'adjectif « rationnel » est aussi une indication du rôle actif, lors de la mise au point du ciment armé, de De Baudot qui, à cette même époque, s'est engagé dans la définition d'une « architecture rationnelle »²². Pourtant, la rationalité que Cottancin évoque au sujet de son propre système est représentée, parmi les différents dessins du brevet, par deux images qui documentent un horizon figuratif original et parfois fantastique, bien loin de la rationalité de De Baudot. Sur ces images, la section des « épines » est modélisée pour construire un profil informe. Cette liquéfaction du profil traditionnel des nervures, bien qu'orientée pour démontrer le potentiel du ciment armé qui, sans forme, peut s'adapter à d'infinies configurations, est une indication du haut degré de liberté des structures de Cottancin.

Tout comme ces deux images suggèrent une rationalité différente de celle de l'architecture de De Baudot, dans l'étude des différentes applications de son système en ciment armé, Cottancin montre également qu'il poursuit une ligne de recherche tout à fait personnelle. Après la découverte et l'expérimentation des capacités constructives et statiques du ciment armé, il imagine des structures éloignées de toute référence historique pour les imposer comme de nouveaux systèmes capables de produire de fantastiques espaces. Ainsi, parallèlement aux projets d'églises, de pavillons, de théâtres et de châteaux, il invente d'autres toitures voûtées grandioses pour des amphithéâtres ou des églises à trois nefs, comme celle de Montmartre, caractérisées par un système de contreforts qui veut éviter la génération d'une masse statique, comme déjà le préconisait Viollet-le-Duc, mais qui est plutôt confié à l'équilibrage de la structure par l'introduction d'une charge²³. Les solutions sont conçues dans le but de résoudre la stabilité de la toiture tout en générant un dispositif spatial inédit. La charge placée à l'intérieur du bâtiment prend la forme d'un plancher continu encastré entre les sommiers de la voûte et pouvant même la traverser, ou celle d'un tirant – une série de gradins, une salle en ogive, ou un pilastre – en continuité avec un élément cunéiforme imaginé à l'extérieur du bâtiment. Disposée à l'extérieur, la charge se présente comme une superposition de planchers ou comme un entrelacement de structures minces tissées les unes avec les autres, créant un remplage gothique. Cottancin, également à partir de la comparaison avec des projets contemporains d'Hennebique, a l'idée de combiner des voûtes et des toitures à deux pans, prévoyant dans ce cas une charpente avec des géométries différenciées d'arcs et de fines poutres comme liaison entre les deux toitures. Enfin, en continuité avec son étude de configuration des « panneaux » en ciment armé à articuler avec des « rainures », il prévoit un système constitué de nervures seules, à insérer dans le sol pour créer les fondations des bâtiments, à fermer avec du verre pour obtenir des toitures telles que celles que De Baudot va concevoir pendant les années 1910, et même à combiner avec d'autres nervures et des « tubes de tension », en configurant des structures réticulaires²⁴.

Cottancin démontre maintenant qu'il a compris tout le potentiel du ciment armé, au point de proposer une structure dont la rationalité va au-delà du calcul mathématique qui émerge de la pratique contemporaine de la construction. Mais ses visions, non étayées par un calcul mathématique capable de contrôler leur comportement, sont destinées à rester inachevées. De même, la construction des monuments les plus importants, comme l'église Saint-Jean de Montmartre et la cathédrale d'Oran, documente les nombreuses difficultés rencontrées lors de la réalisation des ouvrages en ciment armé, avec retards, affaissements, et même l'éloignement de Cottancin des chantiers. Ainsi, déjà au début des années 1900, le système de Cottancin connaît un déclin rapide et définitif, malgré le fait que De Baudot et ses élèves continuent à prévoir son utilisation. La circulaire française du 20 octobre 1906, signée par le ministre des Travaux publics, Louis Barthou, relative à l'utilisation du béton armé, écrit son épilogue, en introduisant pour chaque ouvrage l'obligation de résoudre ces calculs de résistance que Cottancin n'avait jamais pu fournir²⁵.

Notes

¹ Voir: Gérard Lavergne, «Les travaux en ciment avec ossature métallique», *Le génie civil*, XXVI, n°648, 10 novembre 1894, pp.23-26; idem, «Constructions en ciment armé», *Le génie civil*, XXX, n°857, 12 novembre 1898, pp.22-24; idem, *Etude des divers systèmes de constructions en ciment armé*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Liège, 1901, pp.16-19; C. Berger, V. Guillerme, *La construction en ciment armé. Applications générales, théories et systèmes divers*, Dunod, Paris, 1902, pp.801-854, et Elisabetta Procida, «Paul Cottancin, ingénieur, inventeur et constructeur», in Robert Carvais, André Guillerme, Valérie Nègre, Joël Sakarovitch (éd.), *Edifice et artifice. Histoires constructives: recueil de textes issus du Premier congrès francophone d'histoire de la construction*, Picard, Paris, 2010, pp.597-607.

² Voir: Paul Cottancin, *Notice sur la parfaite construction moderne*, s.e., Paris, s.d.

³ Paul Cottancin, *Procédé de fabrication d'ossatures métalliques*

sans attaches et à réseau continu, brevet d'invention n°196773, 18 mars 1889.

⁴ Paul Cottancin, «Expériences du plus haut intérêt pour le Ciment Armé», in idem, *Notice sur la parfaite construction moderne*, op. cit., pp.28-32, p.31.

⁵ La rencontre entre Cottancin et De Baudot a probablement lieu entre 1891 et 1892, puisque le 4 février 1893, De Baudot tient une conférence consacrée au système de Cottancin («Conférence de M. De Baudot», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, II, n°2, février 1893, pp.31-37). Voir aussi: Henri Chaine, «L'Eglise de St-Jean-de-Montmartre», *L'Union des architectes et des artistes industriels*, n°3, 1er mars 1905, pp.22-24, p.23; Françoise Boudon, «Recherche sur la pensée et l'œuvre d'Anatole de Baudot, 1834-1915», *Architecture, mouvement, continuité*, n°28, mars 1973, pp.2-67; Marie-Jeanne Dumont, «La pietra filosofale: Anatole de Baudot e i razionalisti francesi»,

Rassegna, XIV, n°49, 1992, pp.37-43, p.38, et idem, «Fortuna di un precursore», *Rassegna*, XVIII, n°68, 1996, pp.6-13, p.9.

⁶ Voir: Gérard Lavergne, «Les travaux en ciment avec ossature métallique», op. cit., p.24, et «Extrait du Registre des Essais. Plaques en ciment avec ossatures métallique remises par M. Cottancin, ingénieur des Arts et Manufactures, Ministère des travaux publics, Ecole nationale des ponts et chaussées, Laboratoire n°4164», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, III, n°8-9, août-septembre 1895, pp.177-179.

⁷ Voir: C. Berger, V. Guillerme, *La construction en ciment armé. Applications générales, théories et systèmes divers*, op. cit., pp.816-817.

⁸ Paul Cottancin, *Travaux en matières plastiques avec ossature composée*, brevet d'invention n°210293, 18 décembre 1890.

⁹ Paul Cottancin, *Notice sur la parfaite construction moderne*, op. cit., s.p.

¹⁰ «Séance sociale de juillet 1895», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, III, n°8-9, août-septembre 1895, pp.169-225, p.214.

¹¹ Voir: Anatole de Baudot, *L'architecture et le ciment armé*, s.e., Paris, s.d.

¹² Paul Cottancin, *Cintrage des travaux en matière plastique avec ossature composée*, brevet d'invention n°227216, 18 janvier 1893.

¹³ Voir: «Conférence de M. De Baudot», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, op. cit., p.36, et «Visite du Lycée Victor-Hugo», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, III, n°19, juillet 1894, pp.318-325. Afin de garantir l'isolation thermique, des dalles d'ardoises sont ajoutées à la résidence De Baudot le long de l'extrados et, dans les parties habitées, un revêtement en «briques de liège» est disposé le long de l'intrados.

¹⁴ La toiture du château est constituée de deux voiles de cinq centimètres d'épaisseur, espacés par une cavité de vingt-cinq centimètres; les voûtes du pavillon pour enfants malades sont obtenues avec deux voiles de cinq centimètres d'épaisseur, espacés par dix centimètres de cavité; la toiture de la nef centrale de l'église Saint-Jean de Montmartre prend la forme de trois voûtes à base octogonale à oculus central protégé par une petite coupole, et d'une voûte en arc-de-cloître à plan rectangulaire, chacune constituée de deux voiles de sept centimètres, séparés par une cavité de quinze centimètres; la coupole de l'église méthodiste est constituée de deux voiles séparés par un espace fonction-

nel: le voile inférieur est réalisé en brique armée d'une épaisseur de sept centimètres, et le voile supérieur est par contre en ciment armé d'une épaisseur de cinq centimètres. Une solution particulière est adoptée à Oran, où la crypte est réalisée avec une double structure superposée, dérivée en partie du pavillon de San Marino, l'une fonctionnant comme une voûte de la crypte elle-même et l'autre comme plancher de l'église (voir: C. Berger, V. Guillerme, *La construction en ciment armé. Applications générales, théories et systèmes divers*, op. cit., p.847; «Composite structures», *Engineering*, 21 mars 1902, pp.363-364; Charles F. Marsh, *Reinforced concrete*, D. Van Nostrand Company, New York, 1904, pp.428-429; A. R. Galbraith, *The Cottancin System of Armoured Construction*, Cowell, Ipswich, 1904; Lavergne, *Etude des divers systèmes de constructions en ciment armé*, op. cit., pp.103, 106-108; E. C. [Emmanuel Chaine], «L'église Saint-Jean-de-Montmartre», *La construction moderne*, n°29, 15 avril 1905, pp.340-343; *ivi*, n°30, 22 avril 1905, pp.351-354; *ivi*, n°31, 29 avril 1905, pp.363-367; M. R., «Le Théâtre de Tulle», *La construction pratique*, n°18, 1^{er} janvier 1905, pp.309-311).

¹⁵ Gérard Lavergne, «Les travaux en ciment avec ossature métallique», op. cit., p.24.

¹⁶ Paul Cottancin, *Constructions démontables en matière plastique avec ossature*, brevet d'invention n°242238, 20 octobre 1894.

¹⁷ Voir: «Séance sociale de juillet 1895», *Union syndicale des architectes français. Bulletin et compte rendu des travaux de l'association*, op. cit., p.217.

¹⁸ Paul Cottancin, *Construction armée sans cintrage*, brevet d'in-

vention n°305778, 7 novembre 1900.

¹⁹ Paul Cottancin, *Parquets armés*, brevet d'invention n°241679, 27 septembre 1894, et *idem*, *Menuiserie armée*, brevet d'invention n°245727, 12 mars 1895.

²⁰ Paul Cottancin, *Fabrication des ossatures continues à trame spirale*, brevet d'invention n°222074, 2 juin 1892, et *idem*, *Notice sur la parfaite construction moderne*, op. cit., pp.12-15.

²¹ Paul Cottancin, *Fabrication de l'épine-contrefort rationnelle*, brevet d'invention n°260250, 7 octobre 1896.

²² Dans les pages du bulletin de l'Union syndicale des architectes français, association fondée par De Baudot en 1890, De Baudot est indiqué être l'inventeur des nervures (voir: Henri Chaine, «L'Eglise de St-Jean-de-Montmartre», *L'Union des architectes et des artistes industriels*, n°2, 1^{er} février 1905, pp.10-11, p.10). Cottancin envoie une lettre au magazine pour souligner qu'il est lui-même l'inventeur des nervures, comme De Baudot l'avait admis en 1893. Mais il reconnaît également que les nervures ont été développées en arrière-plan des chantiers de De Baudot (Paul Cottancin, «L'Eglise de St-Jean-de-Montmartre», *L'Union des architectes et des artistes industriels*, août 1905, p.53).

²³ Voir: Paul Cottancin, *Les couvertures Cottancin*, brevet d'invention n°264093, 16 février 1897.

²⁴ Paul Cottancin, *Système alvéolaire Cottancin*, brevet d'invention n°275925, 14 mars 1898.

²⁵ Louis Barthou, ministre des Travaux publics, des Postes et des Télégraphes, *Circulaire du 20 octobre 1906, concernant les instructions relatives à l'emploi du béton armé*, 20 octobre 1906.