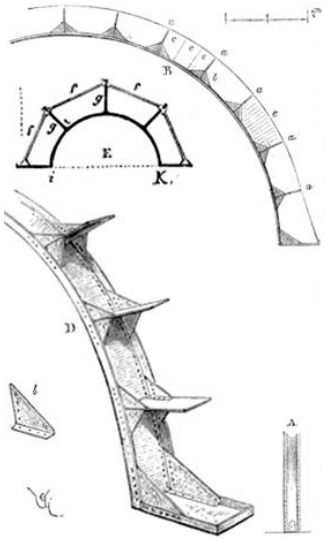
E. E. Viollet-le-Duc et les ossatures constructives mixtes: spéculations morphologiques et constructives sur le thème de l'arc armé.

GIUSEPPE FALLACARA, MAURIZIO BROCATO, LUC TAMBORERO[1].

Cette étude[2] souhaite souligner l'importance des spéculations-projets de Viollet-le-Duc, en particulier de ses intuitions en ce qui concerne les structures mixtes en pierre et acier, afin de les considérer comme fondement d'une recherche sur la pierre portante. Ceci représente aujourd'hui un thème très intéressant sur lequel beaucoup de chercheurs, architectes et ingénieurs fondent leurs analyses : depuis les prototypes de Peter Rice jusqu'à l'œuvre magistrale de Renzo Piano à San Giovanni Rotondo (en Italie).

L'arc en pierre armée, présenté par Viollet-le-Duc en 1863 dans le deuxième tome de ses Entretiens sur l'Architecture, est un exemple éclatant de la volonté d'améliorer les prestations de l'élément portant en agissant mutuellement sur les actions statiques et mécaniques optimales de la pierre et du fer. À cet égard, il écrit dans son traité:



«Poursuivons donc nos tentatives; si imparfaites qu'elles soient, elles n'en montreront pas moins qu'il y a tout à faire dans l'art de la construction aujourd'hui, et que l'architecture ne prendra une nouvelle forme que si elle se met franchement à la remorque des procédés réellement neufs et raisonnés que nous fournit notre temps».[3]

L'intuition de Viollet-le-Duc trouve ses antécédents historiques dans les études et les réalisations des grands monuments gothiques dans lesquels, pour répondre à une volonté de

---

[1] *G. FALLACARA: Chercheur et responsable de l'enseignement sur les Projets d'Architecture, Faculté d'architecture Politecnico di Bari (Italie)* ; *Maurizio BROCATO, Ingénieur au Laboratoire GSA de l'Ecole d'Architecture Paris-Malaquais ; Luc TAMBORERO, Tailleur de pierre; Compagnon du Devoir du Tour de France et Chercheur au Laboratoire GSA de l'Ecole d'Architecture Paris-Malaquais.*

[2] *Cet article a été écrit en collaboration avec: SNBR, (Société Coopérative Ouvrière de Production Restauration des Monuments Historiques, Troyes) et ses collaborateurs Philippe BOBRI, Bernard LAUCORNET, Lucia MONDARDINI; merci aussi à : E. ANTONACCI, D. BAVIA, C. CALABRIA, I. CALO', T. PAGNELLI, G. TROTTI, les étudiants d'architecture au Politecnico di Bari qui écrit une thèse sur le sujet « Aggiornamento tecnico-morfologico di strutture complesse in pietra armata » suivi par le professeur G. Fallacara.*

« gigantisme », s'associaient la stéréotomie et l'ourdis métallique caché dans les joints des claveaux ou dans les renforts des voûtes.
Fort de ces observations archéologiques Viollet-le-Duc théoricien ne cache pas la vérité constructive et structurale de l'œuvre, il traduit la nervure métallique en éléments tout autant dignes d'être admirés esthétiquement, que la parfaite coupe d'un claveau en pierre.
En ce sens, le champ de recherche s'ouvre à de nouvelles expérimentations de composition-projet qui permettront la réalisation de monuments rationnels et esthétiquement exceptionnels.
Cette étude se propose ainsi d'expérimenter le projet de Viollet-le-Duc en décrivant les phases de réalisation, montage et test de résistance de l'arc présenté dans les Entretiens sur l'Architecture, expressément réalisé (à échelle opportune) pour l'occasion du colloque de Pierrefonds.
Cet exemple mérite une attention particulière, bien qu'il ne représente qu'une brève digression au sein d'un ample discours sur les formes les plus appropriées à donners aux couvertures "de nos jours".
Le thème, cette fois-ci, est l'arc. Viollet-le-Duc laisse peu de place à cet exemple, car à son avis, il ne représente pas une réelle innovation, mais plutôt une utilisation du fer dans une structure conçue de manière ancien.

Le système constructif proposé par Viollet-le-Duc se compose, en utilisant la terminologie de l'auteur, d'une bande d'intrados en acier, de claveaux en pierre et de palettes en acier engagées entre claveaux et liées à la bande d'intrados.

Ce système permet l'établissement d'une collaboration entre pierre et acier qui génère une structure mixte ayant de prestations supérieures de celles qui auraient deux structures composées des mêmes éléments, mais prises séparément. De ce fait il s'inscrit parmi les innovations parues au milieu du XIXe siècle visant l'emploi de l'acier dans la construction civile – qui porterons au

[3] *Viollet-le-Duc Eugene E., Entretiens sur l'architecture, op. cit., tome II, XII, p. 78.*

développement du béton armé – et anticipe de plus de deux décennies le concept fondamental d'étrier (la poutre à étrier en béton apparaitra vers 1870, mais ne sera breveté par Hennebique que en 1892).

La clé de l'innovation propre de ce système est l'introduction des palettes intercalaires en acier liées à la bande d'intrados. Dans l'explication du fonctionnement de la structure mixte, Viollet-le-Duc montre avoir la perception correcte du rôle que ces palettes doivent jouer pour la stabilité de l'ensemble : en faisant appel à la raideur en traction de la bande elles empêchent tout écartement des claveaux à l'intrados. Si les claveaux pouvaient glisser sur la bande, ce blocage ne pourrait pas avoir lieu ; c'est donc en s'opposant à ce glissement que les palettes interviennent et mettent en relation les compressions exercées sur les claveaux à l'extrados avec la traction de la bande à l'intrados, ce qui correspond au fonctionnement des étriers dans une poutre en béton armé. Dans un des dessins qui illustrent cet exemple, apparaît le schéma 'statique' de référence: une sorte de polygone funiculaire qui est en avance par rapport à la diffusion de la théorie des sciences de la construction qui atteint à cette période son organisation définitive. Il traduit, ensuite, ce polygone funiculaire en structure, reposant sur des tiges et des jambes de force, selon le rôle qu'ils ont à jouer, pour en vérifier la résistance.

Le dimensionnement de l'armature de l'arche procède de ces considérations. La bande d'intrados doit fonctionner comme un cintre en phase de construction et comme un tirant dans la structure finie ; par conséquent l'aire de sa section peut être choisie sur la base de la poussée maximale prévue dans l'arche équivalente non armée, alors que son inertie dépendra du besoin de porter – éventuellement avec l'aide d'étançons provisoires – les claveaux posés jusqu'aux contre-clés. Les palettes doivent être suffisamment longues pour s'engager dans la zone comprimée entre claveaux, leur section étant dimensionnée par la traction générée par les efforts tranchants et normaux dans le sens radial sur la structure courbe.

L'arche ainsi dimensionné a été modelé numériquement comme un solide tridimensionnel composé d'éléments séparés en interaction. Chaque claveaux a été modélisé comme un solide élastique linéaire (subdivisé en éléments finis pour le calcul) ; la bande d'intrados et les palettes ont été modélisées comme un ensemble continu de poutres élastiques linéaires encastrées entre-elles. Le contact entre claveaux est considéré comme unilatéral (la compénétration étant interdite, mais la séparation étant possible) et le glissement sur ce contact a été modélisé comme générant de la friction (contact de Coulomb).

Les conditions de blocage pour l'arche finie sont d'encastrement à une imposte et de glissière (déplacement horizontal autorisé, tout autre mouvement étant exclu) à l'autre. Pour étudier le comportement de la bande d'intrados comme cintre le système a été modelé de la même manière, mais sans la clé de voute ; les conditions de blocage du cintre sont de double encastrement. Dans les deux cas le chargement de calcul est celui du poids propre.

Le modèle numérique de la structure a été programmé dans Cast3M, un programme développé au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) en France, disponible gratuitement en téléchargement à des fins de recherche et d'enseignement. Les routines nécessaires au calcul des blocs distincts ont été programmées dans le Centre commun de recherche de la Commission européenne[4]. Le calcul est non linéaire, conduit pas à pas en faisant augmenter graduellement le chargement jusqu'à sa valeur finale.

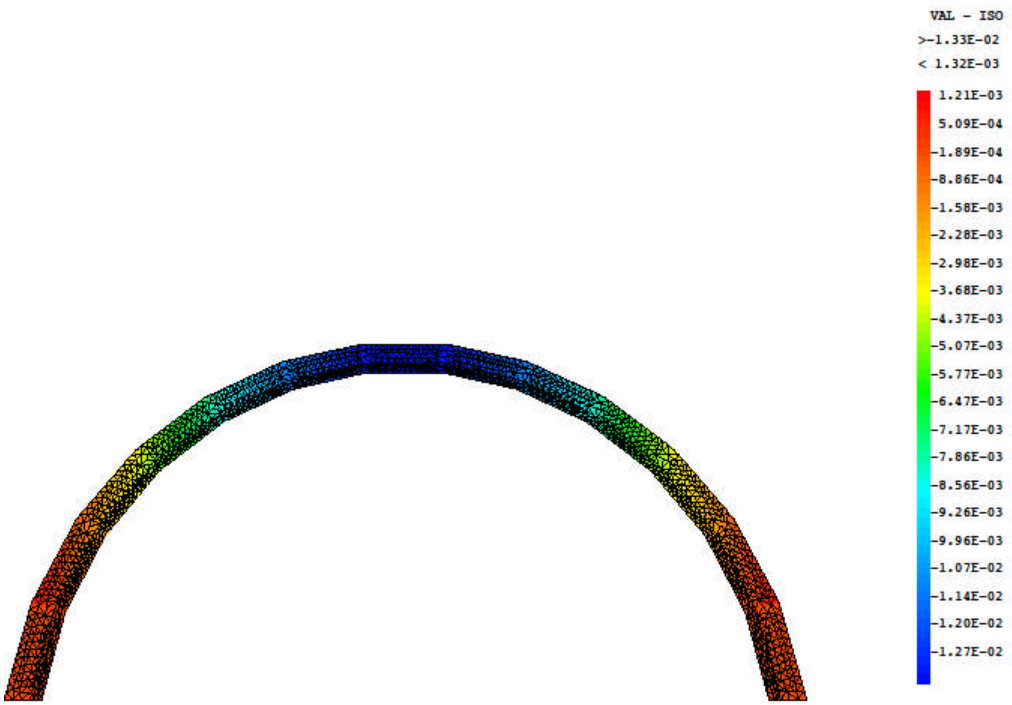
Les paramètres pris pour le calcul sont :

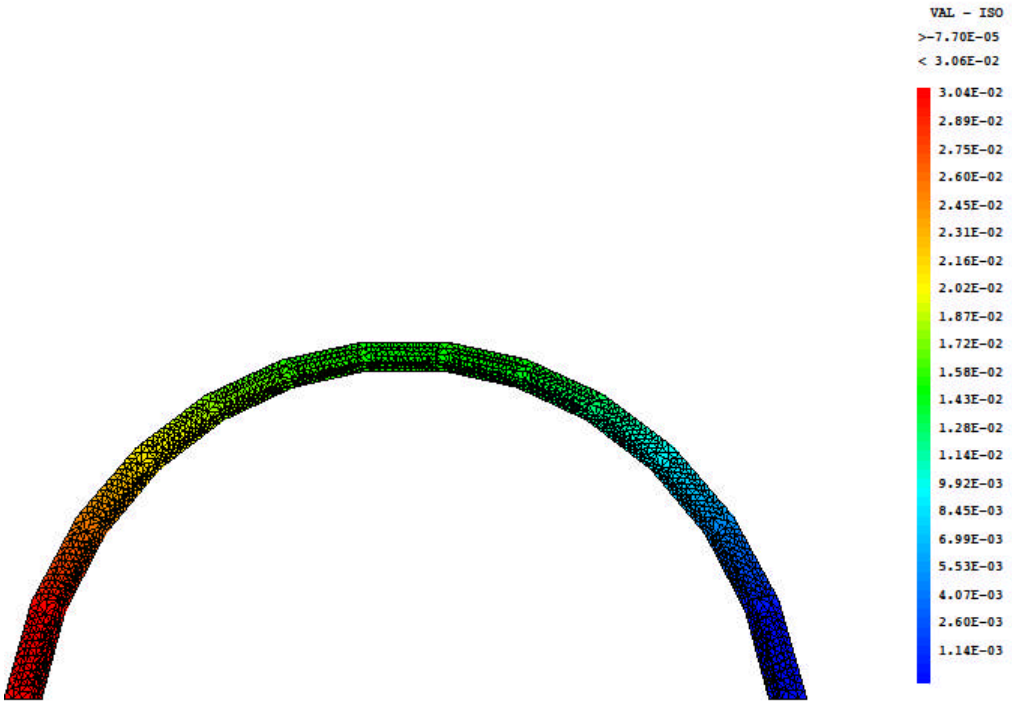
pour l'acier : E=210 GPa (module d'Young), n=0.25 (coefficient de Poisson), r=7850 kg/m3 (densité);

pour la pierre : E=27 GPa, n=0.27, r=2000 kg/m3;

pour les joints : F = 45° (angle de frottement), c=0.1 MPa (cohesion) et E=2.5 GPa.

[4] *P. Pegon, A. V. Pinto, M. Géradin. Numerical modelling of stone-block monumental structures. Computers & Structures, 79 (2001), pp. 2165 -2181.*





Déplacements calculés de l'arche complète (libre de s'écarter à l'imposte), verticaux en haut et horizontaux en bas. Le déplacement vertical maximal calculé est d'environ 1 cm et il a lieu à la clé, l'horizontal est d'environ 3 cm et a lieu à l'imposte mobile.

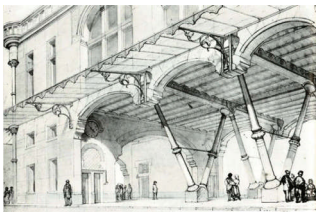
Les résultats montrent de déplacements sous poids propre de l'ordre de 1 cm pour ce qui concerne la flèche à la clé et de 3 cm pour l'écartement des impostes. En phase de construction l'affaissement du cintre avant la pose de la clé est inférieur au millimètre.

Ces résultats sont en accord avec l'expérience qui a été mené dans le chantier de la Société Nouvelle le Bâtiment Régional (SNBR), ce qui montre le bien fondé des hypothèses de calcul et du modèle statique de principe présenté ci-dessus.

Une campagne d'essais est prévue pour l' identification du comportement des joints.

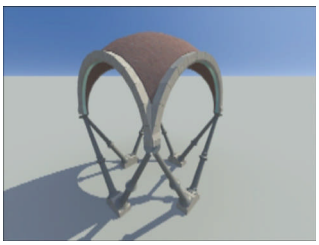
Viollet-le-Duc remplace l'arc, qui tient grâce à sa forme et grâce à l'adhérence du mortier sur les joints de contact, par une armature qui sert de soutien aux claveaux en pierre et aux briques. Innovation qui pourrait sembler absurde mais ,d'une part, elle répond au désir de diminuer les échafaudages -l'effort de tous les constructeurs à l'époque est en effet orienté vers la possibilité d'économiser de l'espace et des matériaux dans le réalisation d'une œuvre. D'autre part, l'armature et les claveaux ne sont pas vus comme indépendants les uns des autres.

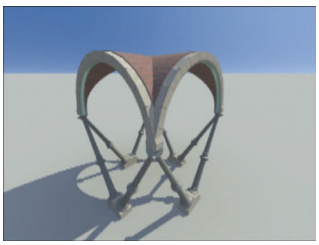
Cela met en évidence l'intuition, d'un point de vue statique, que Viollet-le-Duc illustre dans ses quelques lignes sur l'arc ‘en pierre armée’ comme nous dirions aujourd'hui.



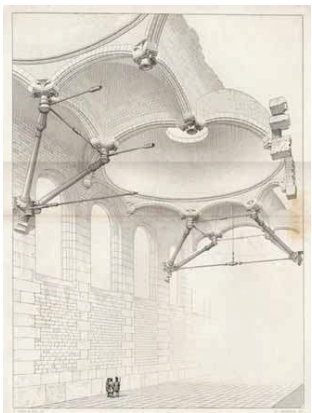
Mais il ne se limite pas à cette chose. Il envisage d'augmenter cet arc pour créer des structures plus complexes ou des espaces voûtés:

« Au moyen de ce système on pourrait élever des arcs doubleaux portant des voûtes d’arêtes en brique ou en blocage, comme les voûtes romaines, sur des piles d’une très-faible section. Ce serait donc là un progrès au point de vue de l’économie de la construction et de la surface occupée par les pleins sur le sol. Mais ce n’est là qu’une application du fer à un mode ancien de structure. »[5] Sur la base théorique du Traité de Viollet-le-Duc on a essayé, alors, pour réaliser ces structures à la modélisation 3D, avec des résultats impressionnants en termes de structure et d'esthétique. Par rapport aux dernières poussant voûtée, l'intuition de Viollet-le-Duc l'a amené à affirmer que:





«Nous avons fait voir comment les poussées des voûtes peuvent être neutralisées par un système de tirants, comment quelques combinaisons de voûtes peuvent reposer sur du fer. Il s’agit d’analyser plus attentivement encore les ressources que fournit le fer lorsqu’il s’agit de voûter un édifice, d’examiner s’il n’est pas possible, sans l’aide des tirants, de neutraliser la poussée d’un arc par une combinaison de la ferronnerie avec la maçonnerie»[6]. Il propose un système dans lequel les voûtes lourds sont "suspendues " dans l'air et sont libres de se déplacer, car de cette manière tout mouvement est absorbée par la structure de fer. Ceci est très important d'un point de vue statique parce qu'elle nous permet d'adopter, aujourd’hui, ce type de structure dans les zones sismiques.



Ce n'est ni la première ni la seule fois que Viollet-le-Duc se penche sur le thème de l'arc, sur sa résistance et sur la forme la plus appropriée qu'il doive prendre en vue de son utilisation dans l'architecture raisonnée.

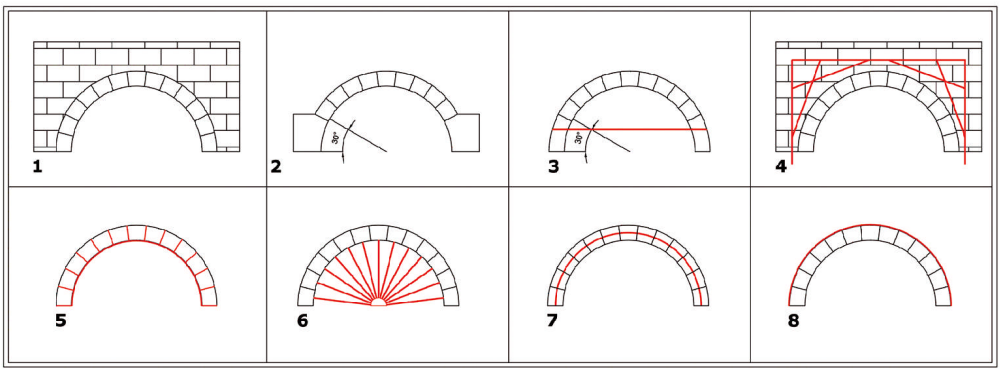
---

[5] *Viollet-le-Duc Eugene E., Entretiens sur l’architecture, op. cit., tome II, XII, p. 80.*

[6] *Viollet-le-Duc Eugene E., Entretiens sur l'architecture, op. cit., tome II, XII, p. 78.*

Mais la pertinence de notre exemple, laissant de côté tout jugement esthétique, doit être attribuée à une troublante similitude avec le thème de l'arc en pierre armée, qui est actuellement l'objet de nombreuses recherches. Ce thème rappelle le concept d'une série d'expérimentations qui ont eu lieu dans les années 1980.

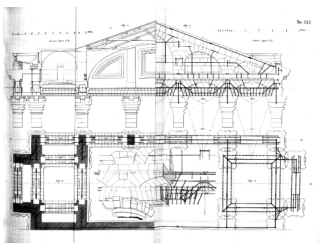
Avant d'entrer dans les détails de certains bâtiments représentatifs doivent procéder à un classement des chaînes en fonction du rapport entre les deux matériaux.



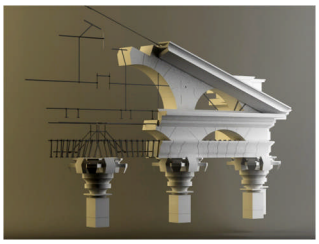
Les exemples 1 à 4 relevant de l'expérience de la tradition, où l'armure ne sert qu'à une fonction structurale, tandis que ceux de 5 à 8 sont une partie de l'innovation, où l'armure est une partie intégrante de l'esthétique; en particulier, 1 et 2 sont des chaînes qui n'ont pas besoin de renfort, 3 et 4 sont arcs armés à la manière traditionnelle, c'est à dire avec la cravate ou l'armure cachés dans les culées.

Parmi les exemples qui font partie de l'innovation peuvent être distingués les 5 et 8 en tant que arcs "contrecarrés", c'est à dire où le renforcement joue un rôle passif dans le système de construction, alors que les 6 et 7 sont dans la série des arcs précontrainte, dans ce cas par la post-tension, dans laquelle toutefois l'armure est activement impliqué dans le bâtiment. Une autre distinction peut être faite entre l'armure à l'intrados (exemples 5 et 6), l'armure qui passe entre les blocs (par exemple 7) et l'armure a l'extrados (par exemple 8).

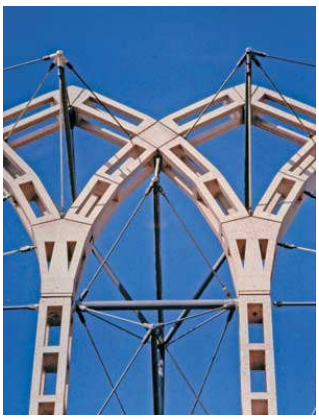
Quant à l'armure cachés dans les culées ou linteaux de bâtiments en pierre, un exemple très clair est le portique de Sainte



Geneviève à Paris, par Jean-Baptiste Rondelet, qui offre une description détaillée dans son Traité Théorique et Pratique de l 'art de bâtir, publiés entre 1802 et 1803. Le septième livre de ce traité est dédié à l'utilisation du fer dans les bâtiments en brique ou en pierre.

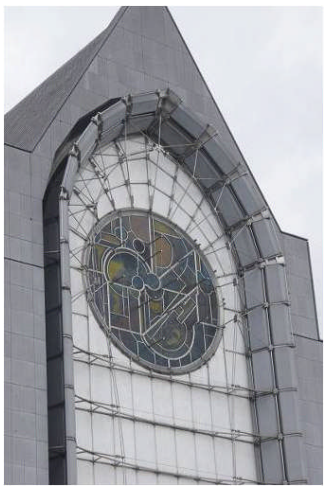


Plus près de nos jours, cependant, les expériences faites sur les arcs "contrecarrés", qui couvre l'éventail complet de Viollet-le-Duc dans le cas de l'armure dans l'intrados. Parmi les influences que Viollet-le-Duc a vraisemblablement généré dans l'architecture, il faut mentionner l'expérience de Peter Rice pour le Pavillon du Futur de Séville (1992)[7]: une façade, autonome et indépendante de la structure du pavillon lui-même (même si elle reprend une partie de la charge de la couverture), composée d'une séquence de onze arches. La finesse de cette structure implique une importante réaction à l'action du vent: contrairement aux monuments en maçonnerie faits dans le passé, en effet, celle-ci ne résiste pas par sa masse mais par sa forme. Les arcs formant la structure en pierre sont accompagnés d'une seconde structure, en acier, destinées à de reprendre les efforts dynamiques en dehors du plan de la façade.



Si l'arc de Viollet-le-Duc présente une armure en contact direct avec la pierre, celui-ci– en se servant de câbles plutôt que de bandes métalliques - l'en sépare, tout en conservant le rôle de cerclage. Ce rôle nous donne le renforcement de post-tension.

Le même système qu'il adopte pour la façade de l'église de Notre-Dame de Lille en France. Il recouvre la façade originale une arche de pierre de nouvelles dont les concerts ne transmettre que des contraintes de compression et sont reliés entre eux par des liaisons



[7] *Il s'agit d'un pavillon thématique de l'Expo '92, dont la mise en œuvre a été confiée aux architectes catalans Martorèl Bohigas-Mackay. Il commémorait le 500e anniversaire du voyage de Christophe Colomb et donc devait évoquer le sens de la découverte. Les architectes partirent de l'idée de concevoir une façade monumentale et ouverte qui constitue une toile de fond pour les jardins, où il était placé, et auxquels était suspendue la couverture du pavillon lui-même. La tâche de la conception et la mise en œuvre a été confiée à Peter Rice et Ove Arup, qui s'inspirèrent de la façade plane, inachevée et ouverte du Palacio de Ajuda à Lisbonne. L'objectif de ce projet était de concevoir une structure en pierre, à la fois monumentale et minime par rapport aux bâtiments massifs du passé, d'où la possibilité d'adapter les techniques de la préfabrication à des éléments structurels en pierre, pour obtenir une plus grande transparence, une économie importante de matériaux et une rationalisation du chantier.*

métal dont un bon contact est assuré par un joint de mortier dans un faible retrait. Un câble en forme de poisson nécessite une précontrainte extérieure qui assure la stabilité globale de l'arc.

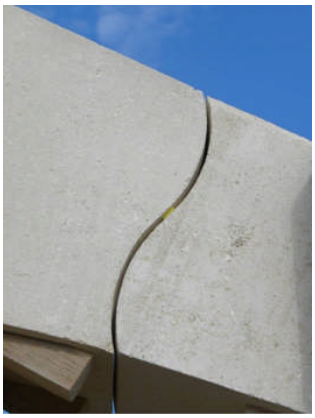
Renzo Piano parvient à ce résultat quelques années plus tard, dans son projet pour l'église du Padre Pio à San Giovanni Rotondo (2000), qui crée un langage formel.

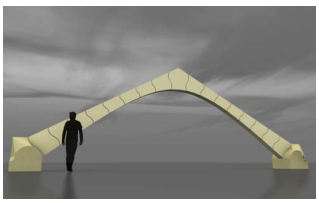
La structure, dans ce cas, est jointe à la forme pour donner naissance à un espace. Contrairement au résultat final d'apparence complexe, le schéma structurel est lié à une composition répétitive, qui est en fait très simple. L'élément, à la fois formel et structurel de cette œuvre est l'arc en pierre: évènement constructif traditionnel de l'architecture médiévale sacrée proposé ici avec l'aide de la technologie actuelle. Il est répété radialement autour d'un pilier central, ce qui permet aux vingt et un arcs de se contreventer les uns les autres à travers la couverture, sans l'utilisation de contreforts. Chaque arc - qui ne travaille uniquement qu'en compression axiale - se compose de cinq modules préfabriqués (des maxi blocs), maintenus en tension par un système de six câbles d'acier qui agissent comme des tirants et stabilisent la structure en cas de catastrophes naturelles. La travée principale, qui est l'entrée, mesure vingt-quatre mètres de haut et quarante-huit de long: c'est le plus long arc de pierre portant jamais réalise.

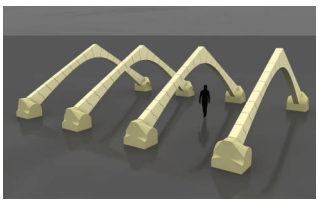
Cette technologie contemporaine originale se compose de câbles en acier qui passent entre les blocs, de entretoises bipied en acier inoxydable ancrés à l'arc et enfin de la technique de «pré-compression de la pierre». Dans ce cas, donc, le rôle de cerclage que joue le métal est déplacé à l'intérieur de la pierre: celle qui, dans les schémas, représente la «courbe de pression», se concrétise ici par un tirant métallique.

Le même système de renforcement précontraint a été utilisé pour la construction de l' «Arc diaphragme » par l'SNBR.

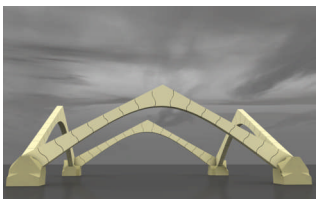
L' Arc diaphragme fait partie de un programme de recherche sur la nouvelle architecture en pierre de taille mise au point de la société française (Société Nouvelle Bâtiment Régional - Troyes),

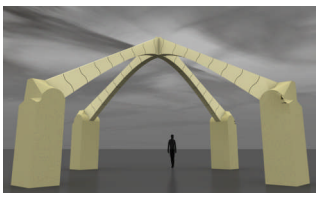


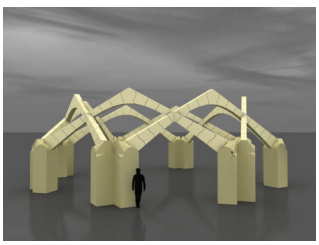


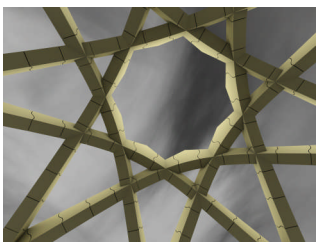


spécialisées dans la restauration et la pierre de traitement informatisé de contrôle numérique. Le développement de la forme structurale de l'arc était fondée sur l'optimisation des formes architecturales afin de minimiser l'utilisation de la pierre pour des raisons évidentes de coûts et les charges impliquées dans le projet. La courbe parabolique de intrados "suit" la courbe des pressions auxquelles l'arc est exposé, les lignes droites (double pente) extrados est pensé pour soutenir directement la charpente du toit, et enfin, la modélisation curviligne des joints augmente la surface de contact de friction entre eux en éliminant possible facturation de la pierre.









En généralisant - et se hasardant dans des hypothèses peut-être risquées par rapport à ce que Viollet-le-Duc aurait pu concrètement imaginer, compte tenu des connaissances techniques en sa possession à l'époque - le rôle joué par le bande métallique est devenu évident au cours de la description. Par contre, celui des palettes qui séparent les claveaux dans son arc, peuvent être comparés à celui des joints de séparation en acier placés entre les mini-blocs ou aux plaques qui alternent avec les maxi-claveaux dans les arcs de Renzo Piano, ou même à des joints en époxy dans la structure de Peter Rice. Encore une fois, donc, l'intuition statique conduit Viollet-le-Duc à développer avant leur temps des solutions formelles à des questions qui suscitent encore aujourd'hui beaucoup d'intérêt.

Le dernier exemple d'un arc que nous allons savoir, c'est celui avec l'armure sur l'extrados. À cet égard, mérite l'attention le projet de une petit structure appelé « Foglia ». La Foglia est le prototype d'un grand surplomb lytique pour la création des logements ou, plus généralement, en porte à faux les structures de toit.

Il est en forme de semi-arquée et se compose de pierre courbée, maintenues ensemble par une bande de métal qui les engage dans la partie supérieure, et qui agit comme un extrados armature.

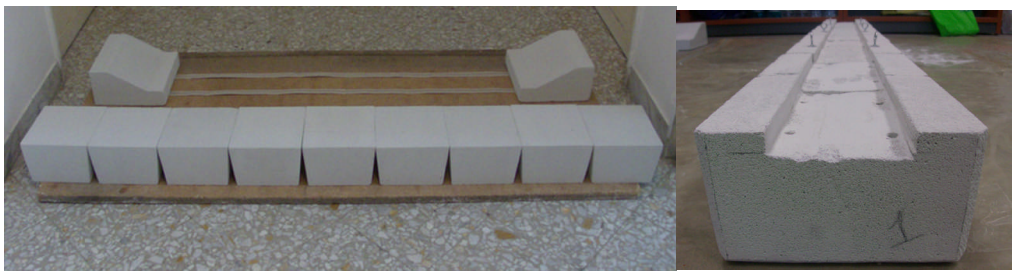
Dans le même temps, en Irlande a breveté un arc en béton armé appelé « FlexiArch » par la Macrete Ltd. Il s'agit d'un arc unique qui ne nécessite pas l'utilisation de côtes à monter ou d'armature.

L'arc est composé de blocs de béton préfabriqués individuellement et placés côte à côte sur un lit plat, sur les blocs est posé une grille en matériau polymère qui a le rôle de maintenir l'unité et empêcher la rotation mutuelle de ces blocs pendant le levage.

Au-dessus des polymères est un jet de quelques centimètres de béton, quand il durcit, il forme les interconnexions entre les blocs. À ce stade, l'arche, qui a encore une conformation horizontale, est transporté dans une voiture-remorque sur le site sous la forme de "flat-pack, est engagée ici en trois points et soulevé par une grue, pour assumer automatiquement la conformation arquée. De cette

façon, il est prêt à être mis en place comme un arc en maçonnerie normale, ou répétée en série pour former un pont.

Sur la base du projet brevetée par la Macrete, les étudiants de la Faculté d'architecture du Politecnico di Bari (E. Antonacci, D. Bavia, C. Calabria, I. Calò, T. Pagnelli, G. Trotti) ont conçu un moyen d'y arriver voûte en pierre. En faisant cela ils ont suivi toutes les étapes de montage et de levage proposées par la société irlandaise, mais en l'adaptant au comportement différent de la pierre par rapport au béton. Les bandes de support placé sur l'extrados de l'arc en fait, réagissent à la traction et assurent la stabilité de la structure en intégrant les qualités de la résistance à la compression de la pierre. En réalité, cette armure est "mort" dans le système car il réagit uniquement à la demande. Il s'agit en effet d'un arc contrecarrée.



Un exemple d'un arc flexible en pierre a été faite lors d'un atelier sur la construction d'arches en pierre de taille dans lequel, avec l'aide d'une grue, a été soulevée un arc de six mètres.

En conclusion, nous pouvons donc dire que trois principaux courants de pensée ce distinguent dans la conception des arches armées.

Le premier cherche a contenir les poussées de l'arche par un tirant horizontal en general, le procédé est le plus rependu, puisqu'il s'applique au beton armé, il s'agit de contenir dans des armatures de fer les effort de traction des structures.

Le second procédé consiste à contraindre la tenue des clavaux par l'ajout d'un systeme de serrage. Ce procédé est mis en théorie et appliqué par Eugene Freyssinet dés les années 1928, ce qui permet de mettre en place des arches clavées de trés grande portée. Le procédé est trés en usage encore aujourd'hui.

Le troisième courant de pensée cherche à contrecarré les forces devellopées par la mise en place des structures, c'est le cas dans cette invention de Violet-le-Duc: l'arche en acier et metal que nous avons présenté.

Les structures contrecarrées existe à partir du moment ou leur geometrie devient multifonctionelle: les forces de compression par exemple, participe à la récuperation des forces de traction, par l'artifice d'un second composant de la structure.

C'est precisement le cas de la structure qu'a imaginé Viollet-le-Duc ou les forces de compressions des joints entre les pierres maintienent les plaques de fer fixèe à la bande de fer destinée à contenir les efforts de traction de la structure. Les deux corps participent donc independamment l'un a la tenue de l'autre, et c'est ce qui fait toute la qualitée de ce type de structure. Les structures contrecarrées nous etonnent parce qu'elle sont irremediablement dynamique, n'etant bloquées que par leur masse, ellent peuvent facilement se deformer sous la contrainte.

Ce qui nous fais peur fais surtout leur force, car un procédé bien calculé permet d'obtenir de trés bon resultat de maintient et surtout des structure ductiles, la ductilité est encore aujourd'hui le Grall de la recherche pour les structures sysmique et pour la chimie des betons moderne.

Viollet-le-Duc avait donc une approche extremement raisonné au point de vue de la tenue des batiments pour inventer ce genre de structure contrecarré en double composition.