

03+04/10 steeldoc

Rénover et
réinvestir l'existant



Rénover et réinvestir l'existant

Pierre Engel, Tomà Berlanda, Andrea Bruno, Federico Mazzolani

L'acier est un matériau précieux. Léger, modulaire et flexible, il offre une grande diversité de solutions pour des projets complexes – qu'il s'agisse de renforcer des structures existantes ou d'y ajouter des éléments nouveaux, qui s'en détachent du point de vue formel.

La conscience du patrimoine est née en France au milieu du 19^e siècle, avec l'écrivain, Inspecteur des Monuments Historiques Prosper Mérimée et l'architecte Eugène Viollet-le-Duc, celle de la réhabilitation des patrimoines est elle née dans l'Europe des années 1980. Père du renouveau des édifices anciens, génie du détail l'italien Carlo Scarpa traça la voie de la transformation dans le respect de l'existant avec des projets d'anthologie comme le Castelvecchio de Vérone. Avec la Grande Halle de la Villette de Paris, Reichen et Robert positionnèrent la réhabilitation à un haut niveau d'exigence, didactiquement expliquée en 1986 lors de l'exposition «Créer dans le créé» au Centre National Georges Pompidou à Paris [1].



1

L'architecture dans les bâtiments existants

Une nouvelle ère débuta pour l'architecture, qui dure encore et où l'acier joue le rôle du matériau prépondérant. Depuis, à Londres, à Paris, à Rome, à Tokyo, Berlin, Madrid ou New York, on trouve désormais de nombreux exemples de cette manière de concevoir l'architecture dans l'existant. D'abord timides, les architectes se sont vite emparés de cette spécialité, de sorte que les plus grands ont démontré que l'acte de réhabiliter est devenu, en une trentaine d'années, une discipline à part entière de l'acte de construire. Les raisons de cet engouement sont économiques, structurelles et culturelles. Contrairement à une époque où l'on préférerait démolir complètement l'existant, les concepteurs n'hésitent plus à pratiquer cet exercice en faisant appel à des techniques de plus en plus sophistiquées pour des applications de plus en plus variées; musées, hôtels, bureaux, logements, espace commerciaux, gares, aéroports, stades – la liste est sans fin tant cette pratique qui concerne aujourd'hui entre 45 et 60 pourcent du marché de la construction s'est banalisée. Un état de l'art détaillé de ses pratiques est donné dans le tableau 5 [2].

2



L'approche générale de la réhabilitation doit mettre en avant la position de l'architecte face au matériau et à la structure de la construction à laquelle il est confronté. Le besoin d'une approche candide par rapport à cette problématique peut étonner, mais pour bien faire son travail, l'architecte doit être libre de toute timidité avec le bâtiment qu'il réhabilite afin de comprendre sa singularité. Cette approche est préférable à une théorisation pure et dogmatique de la construction. C'est pourquoi, une inclination à prendre un risque est souhaitable en respectant les règles clairement établies de réversibilité et de temporalité des constructions existantes. Une présence contemporaine sous forme de dialectique, mais aussi de matériaux et de technologies est nécessaire. Cette condition est dans la plupart des cas nécessaire pour donner vie à la substance architecturale de la construction réhabilitée. Le but ultime est de rétablir la consistance matérielle du bâtiment existant, du monument, pour préserver sa mémoire et sa place dans la société. Simple remodelage de façades ou restructuration profonde, la part des composants en acier pour les travaux de rénovation des bâtiments est importante.



3



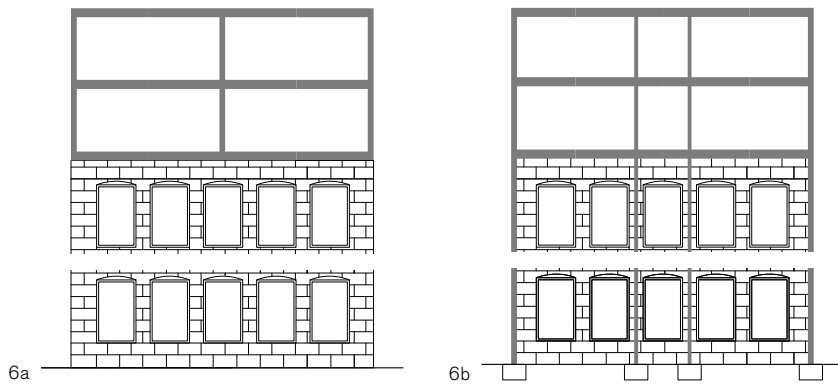
4

- 1 Réhabilitation du Pavillon de l'Arsenal, Paris 1988, Reichen & Robert
- 2 Bibliothèque de l'université d'Eichstätt (D) 1996, Karl Frey
- 3 Poutre de renfort, Castelvecchio, Vérone (I) 1964, Carlo Scarpa
- 4 Musée du Chiado, Lisbonne (P)1994, Jean-Michel Wilmotte
- 5 Aperçu des possibilités d'utilisation de l'acier pour des travaux de réhabilitation

5

Intervention à entreprendre	Localisation de l'action de réhabilitation	Points principaux à étudier Niveau de difficulté de 1 à 10*	Nature des produits en acier utilisés	
1. Ajout ou consolidation de fondations, mise hors d'eau provisoire ou permanente.	Fondations ou sols situés sous, ou au voisinage d'une construction existante devant être renforcée ou temporairement protégée contre l'afflux de l'eau pour une réparation (fondations immergées).	1 à 10	Faire une analyse soignée de la nature du sol support, de l'environnement de la fondation et des événements postérieurs à sa construction avant d'entreprendre une consolidation.	Pieux HP, palplanches, tubes pétroliers, profils de sections IPE, HE, PRS, ou pleins.
2. Renforcements locaux d'éléments à caractères structuraux.	Poutres, poteaux, et planchers existants en bois, en acier, en béton armé ou précontraint; murs en maçonnerie ou en béton armé.	1 à 5	Renforcer des éléments structuraux pour réduire les contraintes et les déformations sous de nouveaux paramètres de chargement.	Toutes sections laminées, PRS, tubes à froid et à chaud, plaques d'acier doux ou inoxydable...
3. Surélévation de constructions, ajout d'étages supplémentaires.	Constructions au-dessus d'un bâtiment existant dans le but d'accroître sa surface utile.	1 à 10	Transférer les nouvelles charges via l'existant ou via des poteaux nouveaux en acier.	Ces ajouts sont des bâtiments neufs greffés à des bâtis existants où toutes les solutions acier légères et flexibles sont utilisées.
4. Extension par juxtaposition de bâtiments complémentaires.	Constructions nouvelles juxtaposées à un existant pour accroître la surface utile du bâtiment.	1 à 2	Assurer la liaison et l'étanchéité entre la partie nouvelle et l'existant du bâtiment.	
5. Conservation des façades avec reconstruction de l'intérieur.	Murs externes classés de constructions existantes avec intervention pour consolider la façade et pour reconstruire l'intérieur du bâtiment.	1 à 5	Assurer la stabilité de la façade existante durant la construction et fournir des solutions pour les planchers et les structures internes.	Échafaudages, structures de soutien en profilés, poutres, poteaux et planchers pour la structure neuve.
6. Renforcement aux tassements et aux actions sismiques des structures.	Structures à renforcer en zones sismiques ou terrains d'affaissement pour prendre en compte des situations nouvelles exceptionnelles.	1 à 10	Adapter les structures aux séismes ou aux affaissements de sol en ajoutant des éléments de renforts de résistance et/ou de stabilité.	Sections laminées ou PRS, poteaux, poutres et/ou planchers mixtes liés à la structure initiale.
7. Réparation de la corrosion, mise aux normes du bâti à l'incendie.	Éléments structuraux corrodés et/ou nouvellement exposés ou soumis au feu à la suite d'une nouvelle exploitation ou d'un nouveau scénario d'incendie.	1 à 6	Évaluer le degré de corrosion pour traiter les éléments structuraux. Établir les nouvelles exigences de résistance à l'incendie.	Systèmes anticorrosion de protection, produits projetés, peintures intumescentes (incendie). Sections pleines de renforcement en acier.
8. Rénovation des enveloppes, des façades et des toitures.	Les façades et les toitures des bâtiments existants où la rénovation de l'enveloppe est nécessaire pour restaurer les fonctions initiales de la peau et en améliorer les performances.	1 à 6	Étudier une nouvelle enveloppe esthétique, compatible avec l'existant, avec les fonctions d'isolation acoustique et thermique requises.	Produits en aciers minces revêtus ou en acier inoxydable, isolation.
9. Construction de verrières et d'écrans sur des bâtis existants.	Espaces résiduels situés au-dessus de cours internes de bâtiments ou générés par un agrandissement des combles.	1 à 7	Étudier la reprise des descentes de charges sur l'existant, le raccord d'étanchéité et l'écoulement des eaux de la verrière.	Sections d'acier laminé ou PRS en acier ou acier inoxydable, tôle pliée.

*1 le plus bas, 10 le plus haut



- 6 Diverses possibilités d'extensions verticales
 a Ajout simple, sans poteaux additionnels
 b Étages supplémentaires avec ajout de poteaux et fondations.
- 7 Rénovation du Couvent des Bernardins, Paris 2008, Jean-Michel Wilmotte
 a Phase de construction de la nouvelle structure en acier
 b L'intérieur après la rénovation
 c Vue extérieure
- 8 Istituto di Riposo per la Vecchiaia, Turin (I) 1981, Andrea Bruno
 a Vue d'ensemble
 b Façade de l'extension

L'acier pour le développement durable

Au-delà de la valeur ajoutée qu'il apporte dans les réalisations phares, l'acier s'adresse à une très large gamme d'opérations de réhabilitation plus modestes ou moins ostentatoires que les projets de prestige. L'évolution de l'esprit dans lequel on rénove aujourd'hui les bâtiments a suivi un chemin parallèle à une autre préoccupation sociétale clé liée à l'environnement. Généralement, l'initiation au développement durable commence par la citation de la phrase clé du rapport Brundtland: «Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs...» [3]. Cette définition signifie qu'un développement durable n'est possible que lorsqu'il concilie le respect de l'environnement, l'équité sociale et la rentabilité économique. Elle implique donc que tout bâtiment construit entre dans un cycle construction – exploitation – démolition dont la somme des pollutions générées sur ce cycle caractérise le caractère écologique de l'ouvrage. Dans une telle approche, la réhabilitation présente un intérêt évident: c'est un mode de construction sans déconstruction qui est idéal pour le développement durable, de par la réutilisation in fine de tout ou partie des matériaux sans recyclage.

L'acier, un matériau intéressant en réhabilitation?

Au fil du temps, les réutilisations, les réhabilitations intelligentes, la protection et la préservation de structures existantes, souvent historiques, ont montré le rôle im-

portant qui est joué par l'acier. Son utilisation dans les consolidations et les restaurations structurelles apporte des avantages évidents que l'on peut énoncer comme suit:

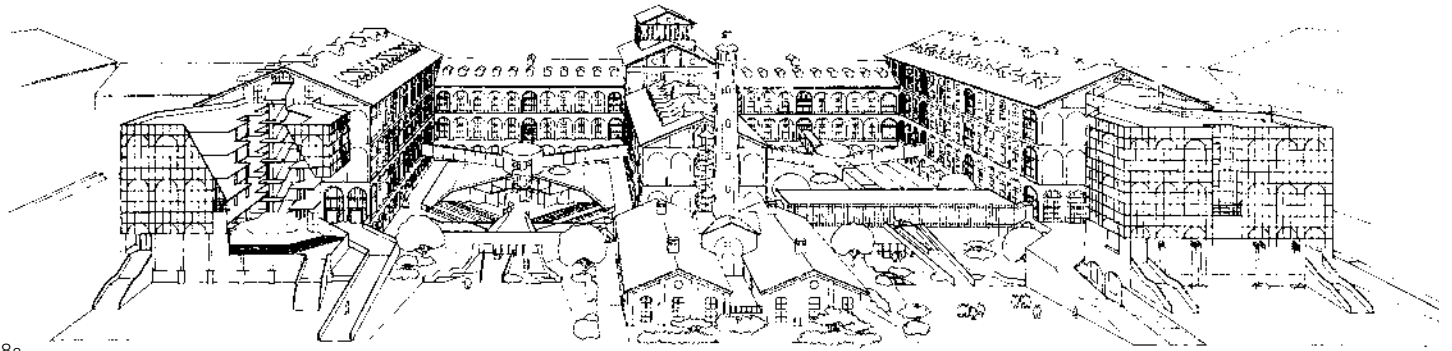
- Les structures en acier sont préfabriquées en atelier, elles peuvent être montées à blanc en usine avant d'être transportées et facilement boulonnées sur le chantier.
- La réversibilité est une propriété de base de l'acier, elle est renforcée par l'usage de liaisons démontables pour des constructions permanentes ou temporaires.
- Grâce au faible rapport poids/résistance, la légèreté des structures en acier facilite le transport et la construction et minore le poids rajouté sur l'existant.
- La section réduite des éléments structuraux est une conséquence naturelle de la grande efficacité de l'acier, elle facilite la substitution et l'intégration de nouveaux éléments de renforts dans l'existant.
- L'esthétique plaisante de l'acier est fondamentale là où la synergie structurelle entre les nouveaux et les anciens matériaux est combinée avec une architecture créée par leurs caractères contrastés.
- La facilité de montage est appréciée dans tous les projets et particulièrement pour les interventions urgentes, pour mettre fin aux détériorations et pour assurer la sécurité du public.
- Le large choix et la grande disponibilité des composants en acier sur le marché satisfont toutes les



7a



7b



8a

conceptions et tous les besoins constructifs. Les produits disponibles vont des sections laminées traditionnelles (I, U, H, cornières...) aux plaques pour faire des PRS ou encore des poutres cellulaires en passant par les bacs nervurés galvanisés et/ou prélaqués.

Lorsque l'on veut résoudre un problème de consolidation structurelle d'un bâtiment, il est utile de classer le travail à accomplir en catégories qui correspondent au caractère de l'intervention et aussi à l'ordre chronologique dans lequel les opérations de consolidations devraient être effectuées. La classification proposée considère quatre niveaux:

1. sauvegarde
2. réparation
3. renforcement
4. restructuration

1. Extensions verticales des bâtiments existants

Il existe de nombreux exemples de tels bâtiments à Toronto, qui montrent le potentiel de l'acier pour accroître la hauteur des bâtiments existants. Dans cette ville, un bâtiment de 6 étages en béton armé devait devenir une construction de 10 étages grâce à l'ajout de 4 étages en béton armé. L'abandon du béton pour une solution en acier plus légère a permis d'ajouter 8 étages supplémentaires pour donner un immeuble plus haut et donc plus rentable de quatorze étages.

Cette opération est requise lorsque l'on accroît la hauteur d'un bâtiment en lui ajoutant des étages. La difficulté principale des extensions verticales est le report du poids de la partie ajoutée dans la structure existante. Les nouvelles charges doivent être transférées dans les fondations via la structure existante. Dans beaucoup de cas, l'ajout simple n'est pas possible car la structure et/ou les fondations existantes sont incapables de supporter ces charges additives. Il faut alors concevoir un système de transfert des charges comprenant des poteaux et de nouvelles fondations (fig. 6). L'acier est très utile dans ces circonstances, ses caractéristiques sont pleinement exploitées grâce à sa légèreté et à son bon rapport poids/rigidité.

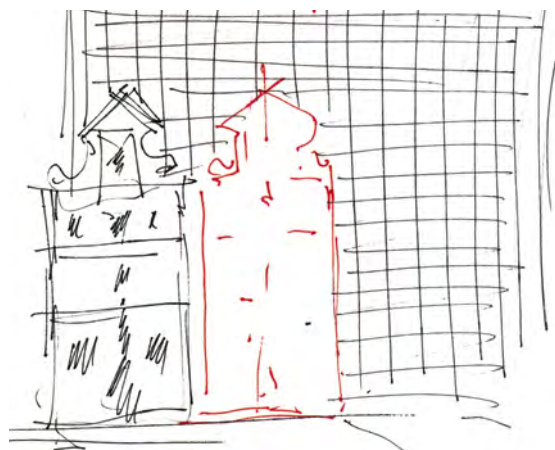
Des solutions spécifiques sont requises quand la structure existante est incapable de reprendre les charges additionnelles, comme pour l'hôtel Jolly de Caserta en Italie composé à l'origine de deux bâtiments de 6 étages en béton armé et d'un bâtiment de 3 étages en maçonnerie. Le client souhaitait accroître la hauteur de la partie intermédiaire en maçonnerie pour l'assortir aux deux autres. Les murs en maçonnerie, même consolidés, ne pouvaient soutenir une surélévation de trois étages, une solution alternative en acier a alors été utilisée. Elle consiste à construire cinq portiques pour suspendre les trois nouveaux niveaux de planchers. La nouvelle structure, placée à l'extérieur de la façade, ajoute une plus-value esthétique et améliore l'architecture de l'ensemble.



7c



8b



9a

2. Extensions horizontales

Ce type d'extension consiste à construire de nouveaux volumes le long de bâtiments existants. Dans ce cas précis, l'aspect esthétique a un rôle prépondérant sur l'aspect structurel, il doit corrélérer les différents langages architecturaux du projet. Pour les extensions horizontales, la construction métallique offre plus de choix et plus de flexibilité en terme de typologie et de formes des bâtiments. Cet exercice doit être réalisé par le concepteur avec un profond respect autant pour l'authenticité constructive et pour les matériaux, mais aussi pour l'histoire de la construction. Il appartient à l'architecte de décider pour orienter le résultat final. Un exemple est la rénovation et l'extension récente de la chapelle des Brigidines, réalisée par Andrea Bruno (fig. 9). Construite en 1665, elle est posée à un point critique dans un quartier en devenir de Bruxelles. Située entre la gare et le voisinage de Marolles, l'église apparaît dominée par un immeuble de logement devant lui qui anéantit sa monumentalité et efface sa valeur historique et artistique. En 1997, la chapelle est

- 9 Chapelle des Brigidines, Bruxelles 1981, Andrea Bruno
 a Croquis conceptuel
 b Vue de la nouvelle et de l'ancienne façade
- 10 Palazzo Carignano, Turin 1992, Andrea Bruno
 a Puits de lumière dans la cour, le point de concentration maximale des charges se confond avec le point où la lumière entre dans le sous-sol.
 b Coupe transversale du Palazzo Carignano avec la salle de conférence au sous-sol.
- 11 Las Arenas, Barcelona 2007, Richard Rogers Partnership

devenue un centre d'arts de la scène. A partir de 1999, le besoin de plus d'espace se fit sentir avec la création du Centre d'Art contemporain du Mouvement et de la voix de Bruxelles et un concours pour l'extension fut lancé. L'idée lauréate de cette compétition est basée sur la métaphore poétique du dédoublement «J'y suis encore – je me reproduis, je me dédouble».

La nouvelle extension reproduit les lignes et la géométrie de la chapelle existante. Sa structure légère contraste avec la masse et assoit l'identité du bâtiment ancien. Le double volume apparaît comme une image simplifiée de l'église où les éléments constructifs fondamentaux sont systématiquement reproduits. Entre les deux entités, un troisième élément, sculptural par nature, fonctionne comme un lien entre la matérialité originale de la façade et sa négation contemporaine. Cet espace interstitiel entre les deux constructions est l'endroit où l'on peut comprendre l'organisation complète du bâtiment. Un escalier suspendu à la toiture et un jeu d'escalators accèdent verticalement aux différentes fonctions des sept étages.

9b



La structure porteuse en acier est assurée par des portiques en profilés HEB afin de correspondre avec les entraxes du bâtiment existant. Ces portiques supportent les parois en verre des façades et de la toiture dont les meneaux sont cachés dans l'épaisseur de la structure. Le plancher repose directement sur les poutres de contreventement supprimant ainsi le besoin d'une structure secondaire qui aurait réduit la flexibilité du bâtiment. La peau en acier Corten de la façade fait référence aux briques de couleur brun foncé et à la pierre naturelle de la chapelle mais en utilisant des matériaux contemporains.

Une large surface vitrée située sur la gauche de l'entrée du bâtiment produit un reflet de la chapelle adjacente et donne naissance à une nouvelle image. Le parement en acier Corten débute à partir du coin droit de la façade et parcourt le périmètre du bâtiment. Comme dans un miroir, l'image de l'existant est reproduite sur la nouvelle construction, plusieurs découpes appliquées sur la nouvelle façade contribuent à un jeu délicat d'ombres et d'effets de lumière sur les surfaces métalliques.



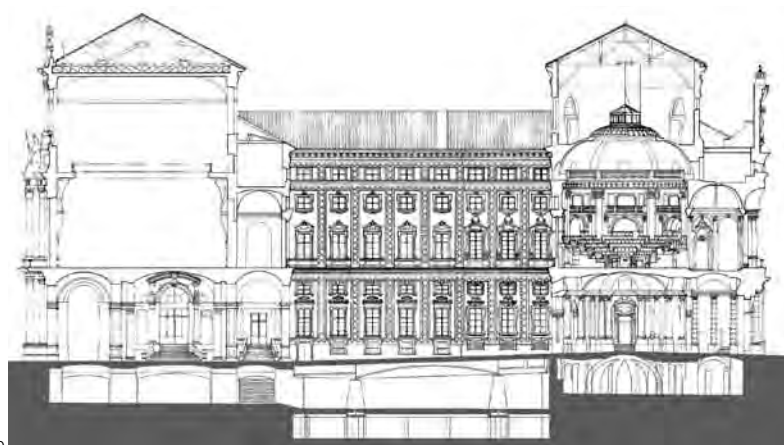
10a

La duplication place la vieille église dans un nouveau système référentiel où elle a un double. Au travers de sa sœur jumelle, le monument perd entièrement son sens sacré originel, il est ramené à sa forme pure qui est un volume utile et utilisable qui forme la base d'un geste architectural cohérent.

3. Insertions dans des bâtiments existants

La raison principale de ce type d'intervention est l'accueil d'une nouvelle fonction à l'intérieur d'un bâtiment existant. Des impératifs de sécurité plus stricts et le souhait de recevoir du public nécessitent souvent une profonde refonte des circulations. Les composantes verticales comme les escaliers et les ascenseurs ont besoin d'être adaptées aux usages contemporains. Les expériences d'insertion ou d'ajout d'une nouvelle circulation verticale à l'intérieur de murs existants ont prouvé l'avantage des structures en acier. Les techniques de préfabrication, la légèreté des éléments, leur résistance structurelle et leur valeur esthétique forment une partie du vocabulaire contemporain de l'architecte.

Un bon exemple de cette pratique est le collège des Bernardins rénové en 2008 par Jean-Michel Wilmotte. Le projet comprend une nouvelle toiture en acier remise par l'architecte au gabarit gothique d'origine et des planchers suspendus à la charpente en acier au dessus des voûtes existantes. L'ajout ou l'insertion de structures et d'escaliers en acier sont des approches qui ont été largement explorées par Andrea Bruno. Une de ces opportunités s'est présentée à lui lors de l'importante reconversion du Palais Carignano, une demeure baroque monumentale située dans le cœur de Turin. Il y a réalisé un grand hall souterrain pour des conférences et des fonctions culturelles et scientifiques de l'institution. La conception de la structure est à la fois simple et audacieuse. Quatre grands piliers en béton armé, placés aux coins d'un rectangle de 40 par 42 m soutiennent quatre poutres périphériques de 1,5 m de hauteur (fig. 10). Celles-ci sont les seuls éléments porteurs de la dalle constituée par une structure mixte acier/béton dont les axes coïncident avec quatre puits de lumière situés au niveau de la cour. Le point de concentration maximale des charges se confond ainsi avec le point où la lumière entre dans le sous-sol. Ici



10b

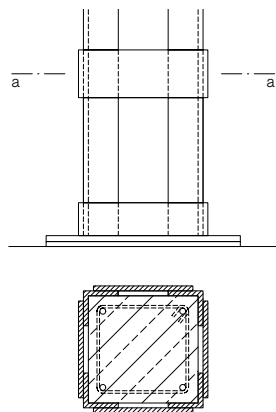
quatre sphères de 60 cm de diamètre sont placées comme des éléments de liaison entre les éléments structuraux verticaux et horizontaux. Elles confirment l'approche conceptuelle du plan et sa référence à la rigueur géométrique de la construction baroque d'origine.

4. Consolidation de sauvegarde des bâtiments

La sauvegarde est, dans l'ordre chronologique, le premier niveau de consolidation des bâtiments existants. Elle regroupe un ensemble d'interventions temporaires qui assurent un niveau adéquat de sécurité pour le public et pour le chantier pendant la phase transitoire qui précède toute opération de consolidation définitive. Un système de sauvegarde doit être rapide à mettre en œuvre, souple d'utilisation, réversible et adaptable aux espaces difficilement accessibles. Les principaux domaines d'application sont les suivants:

- Le soutien temporaire de façades lors de la reconstruction d'un nouveau bâtiment entre deux existants, au moyen de poutres volantes réticulées ou d'échafaudages.





12

- Le soutien des façades lors de la démolition de la partie intérieure de l'immeuble par des structures de maintien. Cette fonction peut être temporaire ou définitive, comme par exemple des fermes chevalets verticales internes de maintien de la façade.
- Le soutien temporaire immédiat de façades de bâtiments après un séisme par des échafaudages en acier qui maintiennent la circulation dans la rue.
- Les toitures temporaires de protection de la construction contre la pluie, la neige et aux autres aléas météorologiques durant la restauration.

5. Structures permanentes

Les caractéristiques de l'acier peuvent constituer un avantage intéressant lors de l'ajout d'éléments de structure dans des bâtiments existants. Sa grande résistance et son faible poids rendent le matériau préférable au béton armé. Comparé aux matériaux, comme le bois l'acier a un cycle de vie plus long, qui peut à terme se révéler plus économique.

Pour le projet du Palais Mazzonis à Turin, le matériau a été choisi pour sa valeur esthétique. L'insertion en sous-sol de la cour d'une nouvelle fonction du bâtiment existant n'étant pas possible, l'architecte a décidé de couvrir le patio interne de 11 m par 17 m par une verrière posée sur une ossature en acier, tout en travaillant sur la transformation intérieure de cette demeure en musée pour y abriter les collections du nouveau Musée des arts orientaux. Quatre files de quatre colonnes cruciformes portent une grille en acier faite de poutres de section en H de 200 mm de hauteur en dessous desquelles est suspendue la toiture de verre structurel. La petite taille et la légèreté des éléments structureux contribuent à l'abstraction de l'image architecturale. Les éléments en acier inoxydable sont boulonnés et laissés visibles dans le but de montrer au visiteur comment ils ont été assemblés.

La nature des structures rencontrées en réhabilitation est très variée. On peut être confronté au problème de l'accès à un amphithéâtre romain comme à Tarragone où Andrea Bruno décida de couper les murs médiévaux en maçonnerie de pierre. Une coupe étroite entre ciel et terre marque désormais le point de passage des visiteurs au travers des différentes stratifications



13

archéologiques. Ce filtre historique est encore renforcé par la construction d'une porte de 12 mètres de hauteur qui souligne la nature du nouveau passage. Le cadre en acier de l'ouvrant à noyau tubulaire porte 6 ailettes horizontales qui soutiennent le parement mince en bronze du revêtement de la porte.

6. Réparation de constructions existantes

La réparation est le deuxième niveau de la consolidation des bâtiments existants. Il englobe une série d'opérations effectuées sur le bâtiment pour restaurer les performances structurelles qu'il avait avant les dommages. La réparation contrairement à la sauvegarde représente une opération définitive. Elle est réalisée après l'apparition de dommages causés par des facteurs identifiés qui, le plus souvent, produisent leurs effets à long terme ne nécessitant pas d'intervention urgente. La réparation est un moyen simple pour rétablir l'intégrité structurelle, avec un niveau de sécurité suffisant, sans introduction de renforcement supplémentaire dans la construction de structures endommagées par les intempéries ou le vieillissement. Le corpus de la réparation comporte de nombreuses solutions de consolidation basées sur l'utilisation de l'acier pour améliorer le comportement structurel des maçonneries, du béton armé et des structures en bois. Ces réparations se font par le biais de technologies ad hoc développées pour obtenir des résultats optimum et adaptées aux exigences spécifiques (fig. 12 et 15).

7. Renforcement des structures existantes

Il s'agit ici d'améliorer les performances structurelles initiales pour permettre à la construction de répondre à des nouvelles exigences fonctionnelles ou environnementales. Ce type de consolidation ne produit pas un changement significatif du modèle structurel. Il introduit de nouveaux éléments qui sont capables de s'ajouter aux existants sans modifier sensiblement la masse et la répartition de rigidité de l'édifice. Contrairement aux travaux de réparation simple, le renforcement peut être réalisé à des niveaux de capacité variés, en fonction de l'accroissement de la résistance requise pour répondre à de nouveaux besoins ou pour pallier aux dommages existants.



14

Pour la prévention des séismes, les opérations de renforcement peuvent être séparées en deux niveaux: les améliorations simples et interventions de remise à niveau et les améliorations nécessaires pour obtenir un niveau de sécurité plus élevé. La mise à niveau sismique est caractérisée par un ensemble d'opérations qui permettent à la structure de se conformer aux nouvelles normes sismiques. Elle peut aussi exiger une révision majeure du modèle structurel, avec une modification complète du comportement global sismique. Dans un tel cas, cette intervention doit être classée du point de vue structurel dans les opérations de restructuration (fig. 16).

Le renforcement est requis dans les cas suivants:

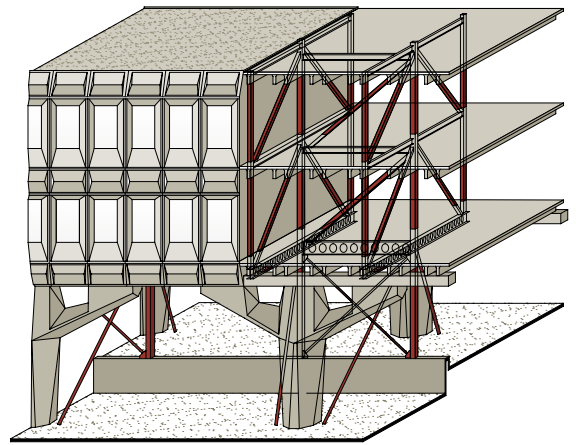
- Le bâtiment est soumis à des charges plus sévères dues à un changement d'usage impliquant l'augmentation des charges d'exploitation.
- Le bâtiment existant a été récemment inclus dans une nouvelle zone sismique et est immédiatement sujet aux séismes et donc à des conditions de chargement plus rigoureuses.

La remise à niveau sismique est obligatoire dans les cas suivants:

- Lors d'un ajout d'étages ou les augmentations du volume ou de la surface de la construction.
- Lorsque les charges sont augmentées en raison du changement d'utilisation.
- Lorsque des transformations modifient sensiblement le modèle structurel original.

Les différents niveaux de renforcement, de l'amélioration simple à la remise à niveau, peuvent être effectués en utilisant les mêmes solutions de consolidation que pour les réparations mais de manière très consistante. La construction métallique est couramment utilisée pour améliorer le comportement statique des maçonneries et des bâtiments en béton armé. Des solutions de contreventement sont souvent utilisées pour la mise à niveau sismique de ces deux types de constructions.

Les solutions innovantes de contreventements adaptés aux séismes sont basées sur l'utilisation de contreventements excentriques en acier appelés «EB eccentric



16

- 12+13 Réparation et/ou renforcement d'un poteau en béton armé par des éléments en acier
- 14 Construction de sauvegarde
- 15 Nouvelle structure en acier avec ascenseur et cage d'escalier, musée Reina Sofia, Madrid 1990, Ian Ritchie Architects
- 16 Remise à niveau de la sécurité sismique d'un bâtiment en béton armé situé à La Gaude (F), source: Engel, Pierre: Réhabiliter, renforcer, transformer et rénover avec l'acier, Art et technique de rénover les bâtiments avec l'acier. Paris 2010



15



17

- 17 Rénovation du Palais Mazzonis, Turin 2008, Andrea Bruno
 18+19 Pratiques de consolidations pour des structures en bois par le biais d'éléments en acier
 20 Renforcement autour d'une ouverture dans un mur
 21 Caixa Forum, Madrid 2008, Herzog & de Meuron
 a Bâtiment existant avant «l'intervention chirurgicale»
 b Vue extérieure après les travaux

bracing», de contreventements capables de mieux dissiper l'énergie sismique appelés «buckling restrained bracing (BRB)» ou encore de panneaux de cisaillement ayant une capacité de plastification suffisante.

8. Restructuration de bâtiments existants

L'affectation de bâtiments à de nouveaux usages représente l'intervention la plus courante pratiquée sur des bâtiments existants. Elle consiste à modifier partiellement ou totalement les fonctions de distribution et les dimensions volumétriques couplés à d'autres changements possibles comme par exemple une modification radicale de la structure du bâtiment.

Conservation des façades, insertion de fonctions nouvelles, ajout de surfaces et allègements; il y a quatre différents types d'interventions de restructuration:

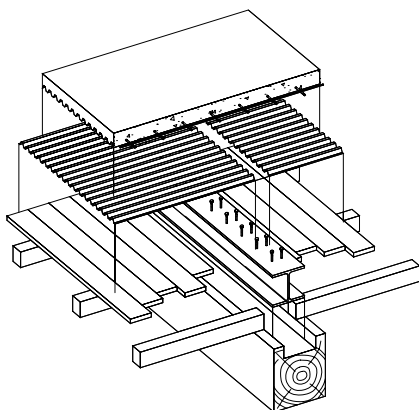
- La conservation des façades avec la dépose partielle ou complète des structures internes avec leur remplacement par des structures nouvelles de différents types.
- L'insertion représente l'introduction de nouvelles structures ou d'éléments structuraux dans le volume existant. Des étages intermédiaires ou des mezzanines sont créés afin d'augmenter la surface utile dans la limite des volumes disponibles.
- Les extensions sont réalisées pour répondre aux nouveaux besoins fonctionnels. Ils impliquent une augmentation de volume du bâtiment (fig. 15).
- A l'opposé des surélévations, les travaux d'allègement comprennent la démolition d'un ou plusieurs étages au sommet d'un immeuble afin de réduire les contraintes dans la structure. L'allègement peut éga-

lement être pratiqué par substitution, en remplaçant certains matériaux par des matériaux plus légers. Le remplacement de planchers ou de fermes de toiture en bois par des sections plus légères en acier et des bacs nervurés est très courant.

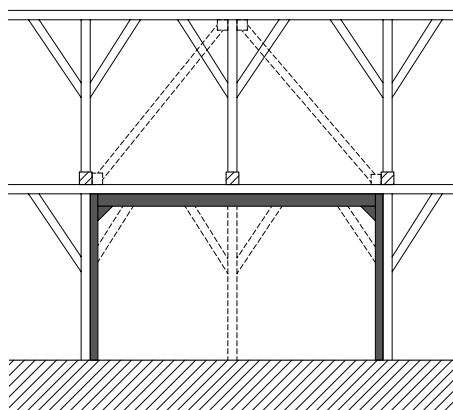
9. Consolidation des systèmes structuraux avec l'acier

La reconversion des bâtiments existants avec leur intégration dans de nouveaux ensembles, où ils sont clairement identifiables et les transformations opérées réversibles est un exercice classique qui doit être fondé sur la théorie moderne de la restauration. Une application logique de ces principes de réhabilitation montre que l'acier et ses technologies possèdent, sans aucun doute, les qualités nécessaires qui en font un matériau contemporain avec des caractéristiques «réversibles» particulièrement adaptées à l'association harmonieuse avec les matériaux anciens pour former des systèmes de structure intégrés.

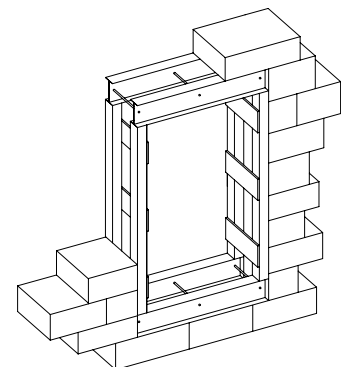
L'acier est un moyen approprié pour consolider les maçonneries. Endommagées, celles-ci sont généralement réparées au moyen de cerclages (fig. 12). L'action de retenue latérale des arceaux augmente de manière notable la capacité portante verticale. Dans le cas de poteaux circulaires les carcans sont exécutés en utilisant des barres verticales de section rectangulaire, qui sont plaquées sur le poteau par des cerclages horizontaux en acier. Autrefois, la précontrainte était mise en œuvre en chauffant les cerclages pour utiliser le



18



19



20



21a

b

raccourcissement et appliquer une force radiale sur la colonne au refroidissement de l'acier. Aujourd'hui, les anneaux sont précontraints avec précision par un système de vis. Dans le cas de poteaux de section carrée ou rectangulaire, on utilise 4 cornières verticales aux angles. Elles sont connectées entre-elles de différentes manières par des plats soudés, par des U ou encore par des cerclages façonnés à la forme du poteau. Une autre solution pour consolider les poteaux consiste à ajouter des barres en acier laminé verticales puis horizontales, attachées entre elles et reliées à un cadre périphérique. Ce cadre en U, en cornières ou en plats, assemblé et précontraint constitue une structure intégrée efficace dont les propriétés permettent d'accroître la résistance à la compression du poteau existant.

Lorsqu'il est nécessaire de transférer une partie importante de charges appliquées sur une maçonnerie à une nouvelle structure en acier, des colonnes peuvent être insérées dans des saignées ou directement attachées à la maçonnerie. Dans le cas où l'on pratique des ouvertures, la résistante manquante peut être compensée en installant des éléments de renfort autour de l'ouverture (fig. 20). Les arcs et les voûtes en maçonnerie peuvent aussi être renforcés avec de l'acier. Dans les bâtiments les plus anciens les extrémités des poutres sont généralement insérées dans les murs. Il est souvent nécessaire de renforcer ces poutres aux appuis à cause des détériorations dus au pourrissement ou aux insectes. De nombreux systèmes ont été proposés pour améliorer la résistance à la flexion des poutres. Deux solutions sont possibles qui dépendent de l'accessibilité de la partie supérieure ou inférieure de la poutre. Dans le premier cas l'acier peut être ajouté de plusieurs manières, par de simples plaques, par des laminés à chaud ou par des profils formés à froid, qui peuvent être conçus pour répondre aux particularités de la structure à consolider (fig. 18).

Si la partie inférieure doit être préservée pour des raisons historiques, on peut alors renforcer la poutre par le haut. Quelle que soit la solution employée, le résultat final est toujours un système composite bois-acier qui accroît considérablement la résistance et la rigidité de la structure d'origine. Dans tous les cas l'action composite entre le nouveau et l'ancien maté-

riau doit être garantie par des solutions de fixations appropriées qui peuvent aller du simple tire-fond aux connecteurs les plus sophistiqués. Les fermes en bois ne durent pas éternellement et peuvent se dégrader au fil des ans. Dans certains cas, elles peuvent être réparées en ajoutant des plaques d'acier au niveau des assemblages ou le long des éléments. Dans de nombreux cas, il n'est pas commode de faire ce genre de réparation et la meilleure solution est de remplacer la ferme complète par une nouvelle structure en profilés métalliques.

Le renforcement ou la réparation des assemblages poteaux poutres en béton armé est généralement assuré en fixant des plaques ou des profilés en acier autour de l'assemblage. Ces structures de confortement en acier sont soudées ou parfois collées à la surface du béton sur le site. Les dimensions et le nombre des éléments supplémentaires ajoutés dépendent de l'accroissement de la capacité de flexion et de cisaillement requise.

Les mêmes solutions peuvent être utilisées pour renforcer les planchers à hourdis. Ces planchers peuvent être renforcés par les méthodes suivantes:

- Mise en œuvre de plats sur la face inférieure de la poutre sans rompre les armatures horizontales.
- Renforcement individuel des poutres au moyen de profilés en acier.
- Renforcement par insertion de poutres de type en H entre les poutres en béton armé.
- Renforcement par mise en place de poutres H de doublage parallèles placées sous les poutres en béton.

La capacité d'une structure en béton armé à résister aux efforts horizontaux peut être améliorée en insérant des contreventements en acier dans sa trame. Un mur résistant au cisaillement, une poutre au vent composite peuvent être créés en insérant des sections de contreventement en acier dans la structure existante en béton armé. La liaison entre les deux matériaux est réalisée par des moyens d'assemblages classiques ou liant les barres diagonales en acier à un cadre périphérique. Cette solution a l'avantage d'être facilement constructible et autorise les ouvertures comme les portes et les fenêtres en utilisant des modes de contreventement appropriés.



22a



b

10. Réhabilitation de l'enveloppe des bâtiments

Lorsqu'il considère l'apparence externe de son projet de réhabilitation, le concepteur est toujours confronté au problème de la relation entre le nouveau et l'ancien. Il n'y a pas de règles universelles pour résoudre cette équation, car chaque cas est différent. On peut cependant recommander que l'intervention contemporaine soit facilement reconnaissable, elle doit avoir sa propre justification architecturale. Utilisé en enveloppe, l'acier a des propriétés intéressantes. Les feuilles d'acier minces sont découpées précisément en atelier et livrées sur le chantier.

22c



La facilité avec laquelle les tôles en acier sont posées, mais aussi démontées, lorsque cela s'avère nécessaire, est une raison supplémentaire d'utiliser ce matériau. En outre, ces revêtements soulignent également les additions contemporaines. Enfin, en marge de la mode actuelle d'employer l'acier auto-patinable pour les projets de réhabilitation, il est important de mentionner que la décision d'utiliser ce matériau est souvent motivée par son authenticité naturelle, comme le cuivre dans le passé. Le zinc, le marbre, la pierre et la brique sont des matériaux de construction de base, ils sont marqués par le temps et ils méritent une réflexion attentive sur la façon de les mettre en œuvre.

Les portes conduisant au Château de Rivoli, les portes des remparts de Tarragone et l'entrée principale du Palais Mazzonis sont toutes recouvertes de métal. Ces projets s'étalent sur 25 années durant lesquelles les techniques de découpe laser et de perforation des métaux ont significativement évolué. Cependant, l'idée est la même, qu'elles soient en cuivre, en bronze ou naturellement rouillé, c'est toujours le détail qui décide de l'approche originale même lorsque l'on emploie les technologies les plus avancées. La nouvelle fonction du bâtiment est visible dès l'entrée, un signal à tous les utilisateurs que quelque chose a changé dans la vie de la construction existante. L'enveloppe en acier est adaptée pour effectuer cette tâche.

11. Façades architectoniques rapportées en acier

L'acier dans ses nombreuses déclinaisons offre aux concepteurs des solutions d'enveloppes multiples comme le montre le projet de Francis Soler. Pour uni-

- 22 Ministère de la Culture et de la Communication, Paris 2005, Francis Soler
 a La résille de façade vue de près
 b Un des éléments de la résille
 c Aspect final de la nouvelle façade
- 23 Extension du Theater 11 à Zurich-Oerlikon, 2006, EM2N Architekten



23

fier deux bâtiments d'époques différentes, situés dans le quartier du Palais Royal à Paris, destinés à devenir le siège du ministère de la culture, Francis Soler a imaginé une résille unificatrice en acier inoxydable qui recouvre la totalité des façades situées en périphérie de l'îlot des Bons Enfants (fig. 22). Dernière phase d'une réhabilitation lourde, cette intervention montre une autre facette de l'utilisation de l'acier en rénovation de façade. Cette opération de «lissage» et de réécriture générale donne au nouvel ensemble une lecture architecturale homogène. Francis Soler en parle ainsi: «Toute la lumière qui pénètre dans les bâtiments est découpée et dessinée par la résille de façade. Elle percute des sols en résine, dont la couleur noisette s'apparente à celle d'un sol sablonneux. La résine de superficie, transparente et uniforme, favorise les reflets et conduit la lumière très loin dans des couloirs recouverts, sur toute leur longueur, par un tapis bordé, couleur framboise.» Les éléments de la résille sont découpés au laser dans des tôles d'acier inoxydable duplex Uranus 35N de 3020 x 3800 12 mm d'épaisseur, soudées à des cadres raidisseurs. Ils ont un taux de perforation de 60 % pour un poids moyen de 30 kg/m² et sont composés à partir de six motifs inspirés de fresques de Giulio Romano déformées à l'ordinateur.

La maille en acier inoxydable est accrochée aux façades existantes en pierre par des consoles articulées suspendues par une série de tirants formant triangulation. Liées au support par des platines fixées au moyen de chevilles chimiques, elles sont articulées pour transmettre uniquement des efforts de traction et cisaillement formant un assemblage simple et résistant. La nature du matériau confère à la façade une grande pérennité avec un entretien qui est restreint. L'aspect satiné de l'acier inoxydable donne une lecture changeante à la façade dont la couleur et les reflets varient avec la couleur du ciel et l'intensité lumineuse du moment (fig. 22).

12. Ajout d'une peau isolante sur un bâtiment

La mise en place d'une enveloppe complémentaire sur une façade existante est motivée par plusieurs raisons. D'une part, l'esthétique architecturale et/ou l'étanchéité altérée justifient à elles seules cette démarche. D'autre part, l'isolation de l'immeuble souvent en

deçà des performances thermiques souhaitées est une autre raison valable pour amortir ces travaux. La mise en œuvre de cette technique d'enveloppe appelée aussi «mur manteau» implique une étude de redéfinition architecturale de la façade et une étude technique qui comprend le volet thermique et celui de la résistance et de la pose de l'enveloppe. La nouvelle peau est liée à la façade ancienne par le biais de lisses en acier galvanisé pliées en «Z». Lorsque le gros œuvre est régulier, on utilise des chevilles et des cales d'épaisseur, lorsqu'il y a des différences d'aplomb notoires on utilise des lisses réglables. Les entourages des ouvertures comme les jambages, linteaux et autres tablettes doivent être soigneusement étudiés pour que l'isolation et l'étanchéité soient efficaces et ne constituent pas le point faible. Les isolants mis en œuvre sont variés. La laine de roche et les polystyrènes expansés ou extrudés sont directement fixés sur le support à rénover au moyen de vis et de rondelles larges. Contrairement aux laines minérales, ils présentent l'avantage de ne pas glisser et d'être hydrofuges.

Beaucoup plus qu'un simple ravalement, la rénovation des façades est une opération qui inclut souvent des phases de restructuration interne importantes complétées par la pose d'une nouvelle peau isolante qui améliore sensiblement les caractéristiques d'isolation thermique. Deux techniques peuvent être employées à cet effet: On peut poser une enveloppe complémentaire sur des lisses de réglage pour ménager un espace où l'on glissera un isolant ou plus simplement employer un panneau sandwich isolant posé directement sur le gros œuvre par l'intermédiaire d'écarteurs métalliques en acier galvanisé.

13. Rénovation des toitures avec de l'acier

Depuis la construction du Chrysler building dans les années 1920, l'acier inoxydable a acquis ses lettres de noblesse dans la construction des toitures et des façades. Utilisé en feuilles d'épaisseur de 5 ou 7/10^e de millimètre dans une qualité ferritique, l'acier inoxydable utilisé pour les toitures se met en forme et se soude comme les autres matériaux métalliques de toiture, le zinc ou le cuivre. D'une masse volumique peu différente de ces matériaux, l'acier inoxydable est plus résistant avec un coefficient de dilatation inférieur.



24

Ces paramètres favorables expliquent la plus grande longévité de l'acier inoxydable par rapport aux autres produits traditionnels en toiture et en façade. Compte tenu de son module de résistance élevé, la mise en œuvre de l'acier inoxydable peut également se faire par le biais de tôles profilées. Les bacs aciers profilés à nervures trapézoïdales présentent l'avantage de la rigidité et évitent la mise en place de voligeage en autorisant des franchissements de panne à panne sur des distances voisines de 2,5 mètres. Les toitures à tasseaux ou à joints debout en acier inoxydable dont les montages spécifiques remplacent avantageusement les toitures traditionnelles en zinc sont mises en œuvre de manière conventionnelle par les couvreurs. La réhabilitation des toitures traditionnelles en tuiles ou en ardoises par une substitution de profils nervurés en acier inoxydable présente de réels avantages. D'une part les supports primaires d'origine comme les poutres et les chevrons peuvent être conservés et recalés si besoin, d'autre part, le poids propre de ce type de couverture (80 N/m^2) est souvent inférieur à celui des matériaux de couverture existant. Les tôles profilées en acier inoxydable sont disponibles jusqu'à une longueur de 12 mètres. Ces bacs permettent de mettre en œuvre des couvertures étanches, proches de la couleur du zinc et de la texture des couvertures à tasseaux. La mise en place d'une isolation complémentaire d'épaisseur variable est un atout supplémentaire lors ce type d'intervention de rénovation.

14. Systèmes de surtoiture en acier prélaqué

La rénovation des toitures en amiante ciment est toujours un problème délicat à résoudre. D'une part, les règles drastiques sur l'amiante forcent à mettre les gravois dans une décharge habilitée, d'autre part la dépose, en plus de son coût et des précautions particulières relatives à l'amiante, forcent à l'arrêt du fonctionnement du bâtiment avec les pertes d'exploitation afférentes. Une solution consiste à recouvrir la toiture existante d'une surtoiture en acier prélaqué en profitant de l'opération pour y intercaler une couche d'isolant. Elle garantit une isolation conforme aux exigences techniques qui ont été revues à la hausse avec les nouvelles réglementations thermiques qui émergent dans la plupart des pays afin d'économiser



25

l'énergie pour des raisons pécuniaires et environnementales.

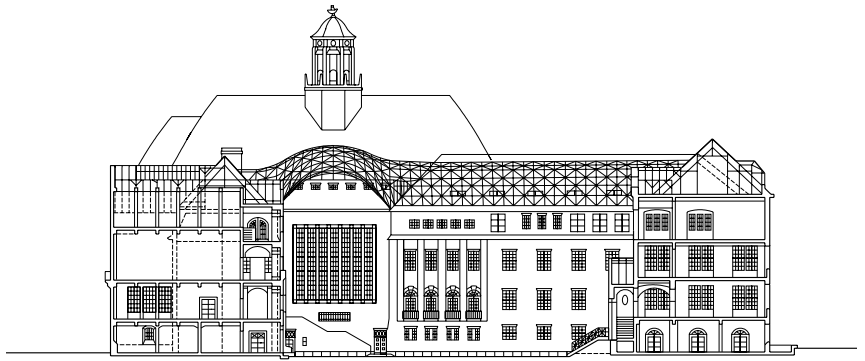
15. Verrières rajoutées lors de réhabilitation

Les bâtiments du patrimoine présentent souvent des espaces résiduels à ciel ouvert comme les patios ou les cours intérieures. La rareté des surfaces disponibles et l'impossibilité d'étendre ces bâtiments par des ajouts de constructions complémentaires (extensions et/ou surélévations) forcent les concepteurs à imaginer l'utilisation astucieuse de ces surfaces.

Contrairement aux reprises en sous œuvre ou aux creusements de sous-sols supplémentaires très lourds à mettre en œuvre, la couverture des espaces résiduels par des verrières est une solution aisée pour créer des surfaces nouvelles. La mise en place de ces couvertures est de loin la plus facile de ces interventions. Son ancêtre est sans doute le passage couvert parisien, exercice typique de l'architecture du 19^e siècle qui amène lumière et protection contre les intempéries. Les exemples de ce genre d'intervention ne manquent pas, patios d'hôtels, réceptions de bâtiments de bureaux. Les plus célèbres d'entre elles ont été effectuées pour des musées comme au Louvre pour les cours Puget, Marly et Khorsabad par l'architecte Ieoh Ming Pei, pour le British Muséum de Londres par Norman Foster, le musée d'histoire de la ville de Hambourg par les architectes allemands von Gerkan, Marg und Partner (fig. 26).



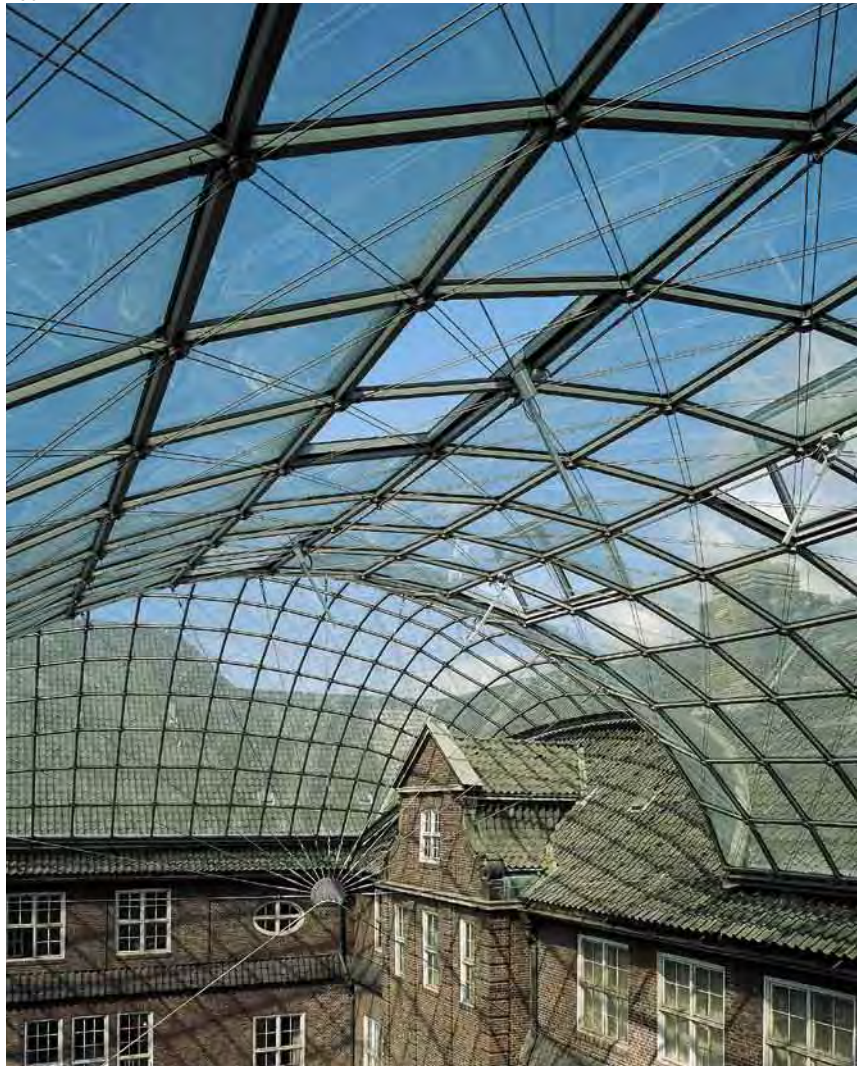
26a



26b

- 24 Couverture d'un toit conventionnel avec des tôles profilées en acier inoxydable
- 25 Détail d'une nouvelle surtoiture en acier prélaqué sur une toiture en amiante ciment
- 26 Musée d'histoire de la ville de Hambourg, Hambourg 1989, von Gerkan, Marg und Partner
 - a Verrière de toiture
 - b Coupe
 - c Structure de grille en fers plats

26c



Sources

Cet article a été réédité et retravaillé sur la base anglaise du chapitre «Steel and Refurbishment» dans «Featuring Steel», ArcelorMittal et éditions Detail, Munich 2009.

Photos

1 Christophe Nouri, Boutigny-sur-Essonnes; 3, 4, 13, 24, 25: Pierre Engel, Paris; 7b, 7c ff.: Géraldine Bruneel, Paris; 9b: Christophe Urbain; 23: Hannes Henz, Zurich

Références

- 1 Créer dans le créé, Milan-Paris 1986
- 2 Engel, Pierre: Réhabiliter, renforcer, transformer et rénover avec l'acier, Art et technique de rénover les bâtiments avec l'acier, Paris 2010
- 3 World Commission on Environmental and Development (WCED): Our common future (Brundtland Report). Suffolk 1987

Impressum

steeldoc 03+04/10, décembre 2010
Construire en acier
Rénover et réinvestir l'existant
Documentation du Centre suisse de la construction métallique

Editeur:
SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich
Evelyn C. Frisch, Directrice

Rédaction et mise en page:
Evelyn C. Frisch, arch. dipl. EPFZ, Zurich

Textes:
Introduction: voir article
Textes basés sur les informations des concepteurs
Evelyn C. Frisch (ef)
Virginia Rabitsch (vra): Collège des Bernardins
Frank P. Jäger (fpj): Andel's Hotel Lodz

Traductions:
Léo Biétry, Lausanne (allemand-français)
Virginia Rabitsch, Zofingen (français-allemand)

Photos:
Titre: Andel's Hotel, Lodz: Wallphotex
Editorial: Theater 11, Zurich: Hannes Henz, Zurich
Introduction: voir article
Theater 11: Hannes Henz, Zurich; Roger Frei, Zurich (p. 20)
Collège des Bernardins: Geraldine Bruneel, Paris; Pascal
Tournaire (p. 33 en haut 2x); J.M. Wilmotte (chantier)
Musée Moritzburg: Roland Halbe, Berlin
Andel's Hotel, Lodz: Wallphotex, OP Architekten, Vienne;
W. Poplawski (p. 45)
Loft en attique, Genève: Walter Mair, Zurich

Sources:
Featuring Steel, ArcelorMittal et DETAIL, 2009.
Les informations sur les projets nous parviennent des architectes
et ingénieurs. Plans détaillés retravaillés par Deck 4 GmbH,
Zurich

Conception graphique:
Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Administration et abonnements:
Giesshübel-Office, Zurich pour SZS

Impression:
Kalt-Zehnder-Druck AG, Zoug

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 48.- / étranger CHF 60.-
Numéros isolés CHF 15.- / doubles numéros CHF 25.-
Sous réserve de changements de prix.
A commander sur www.steeldoc.ch

Construire en acier/steeldoc® est la documentation d'architec-
ture du SZS Centre suisse de la construction métallique et paraît
quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du
SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les informations tech-
niques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes,
le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. Une
reproduction et la traduction même partielle de cette édition n'est
autorisée qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication
de la source.

**Abonnement annuel à Steeldoc pour CHF 48.-
(étudiants gratuit) sur www.steeldoc.ch**