

Fallingwater - La restauration d'un emblème du patrimoine américain

Autor(en): **Silman, Robert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **128 (2002)**

Heft 15/16: **Restaurer Fallingwater**

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-80298>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Fallingwater -

La restauration d'un emblème du patrimoine américain

Lorsqu'il conçoit Fallingwater en 1936, Frank Lloyd Wright voit s'achever une décennie durant laquelle il n'a réalisé aucun mandat. Sa rencontre avec Edgar Kaufmann et Herbert Johnson, deux industriels américains intéressés par son œuvre, allait le propulser à nouveau sur le devant de la scène architecturale américaine et mondiale.

C'est Edgar Kaufmann junior - fils du riche propriétaire d'un grand magasin de Pittsburgh et apprenti durant une brève période chez Wright dans l'atelier école de Taliesin - qui avait présenté son père à l'architecte, et le premier projet que celui-ci mena avec ce client fut l'agencement des bureaux de Kaufmann père dans son magasin. Il sera bientôt suivi de la conception d'une maison à Mill Run, Pennsylvanie, quelque soixante milles au sud-ouest de Pittsburgh, dans un lieu précédemment mis à la disposition des employés du magasin Kaufmann durant leurs congés estivaux.

Alors que tout le monde imaginait que la maison serait bâtie en aval de la cascade tombant à cet endroit, avec des vues sur celle-ci, Wright - dans une de ses géniales inspirations - choisit au contraire de l'implanter juste au-dessus, comme un porte-à-faux particulièrement spectaculaire dominant le cours d'eau (fig. 1). Ce parti étonnant a abouti à l'édification de ce que chacun connaît aujourd'hui sous le nom de « maison sur la cascade », une œuvre qui a été distinguée par l'*American Institute of Architects*¹ comme la meilleure réalisation architecturale américaine de tous les temps.

Depuis 1964, Fallingwater est propriété du *Western Pennsylvania Conservancy*², qui en a fait un musée ouvert au public.

¹ Société américaine des architectes (Ndt)

² Institution s'occupant de la protection du patrimoine pour la Pennsylvanie de l'ouest (Ndt)



Fig. 1 : La maison sur la cascade

Fig 2 et 3 : Fissures dans les garde-corps de la terrasse supérieure
(Photos : Robert Silman Associates)

Fig. 4 : Vue perspective de la dalle du premier étage, composée de quatre poutres maîtresses et de poutrelles en béton

Fig. 5 : Vue perspective du système porteur primaire comprenant trois éléments en béton armé et un quatrième en pierre maçonnée
(Documents : L. D. Astorino & Associates, Ltd., Architects, Pittsburgh, PA)

2



L'enjeu

Dès le décoffrage de la construction, les porte-à-faux en béton commencèrent à accuser des déplacements exagérés qui ne tardèrent pas à se traduire par une fissuration des poutres de structure soutenant le séjour, ainsi que des garde-corps fermant la terrasse de la chambre à coucher principale. Au cours du temps, ces déplacements s'accrochèrent jusqu'à atteindre 18 cm pour une portée de 4,57 m, et les fissures des garde-corps continuèrent à se rouvrir en dépit de colmatages répétés.

En 1995, le *Western Pennsylvania Conservancy (WPC)* fit appel à notre bureau afin de déterminer pourquoi les réagréages de ces fissures lâchaient au bout de quelques années seulement (fig. 2 et 3) et nous chargea ensuite d'examiner si, à court ou long terme, la sécurité de la structure et celle de ses visiteurs était d'une quelconque manière menacée.

La structure de la maison

L'articulation structurale de la maison se caractérise tout d'abord par quatre porteurs primaires, fondés sur le socle rocheux qui jouxte le lit du ruisseau. Trois de ces éléments sont en béton armé, tandis que le quatrième est en pierre maçonnée (fig. 5).

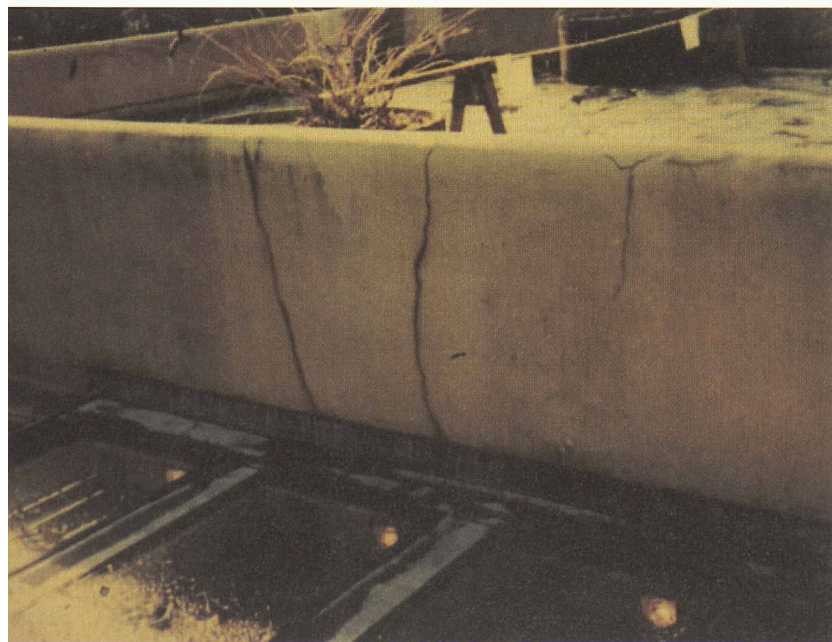
En porte-à-faux de 4,57 m sur ces porteurs primaires, le premier étage est constitué de quatre poutres principales (de 914 mm x 584 mm). Perpendiculairement à ces dernières, des poutrelles en béton de 100 mm x 584 mm espacées de 1,22 m complètent l'ossature de l'étage (fig. 4). Une dalle de 100 mm coulée entre les poutres et les poutrelles forme une surface monolithique qui se présente, vue de dessous, comme un plafond en béton brut. Ce dispositif crée un système statique en T inversé très efficace, où la dalle est placée de telle manière qu'elle travaille sur la face comprimée du porte-à-faux.

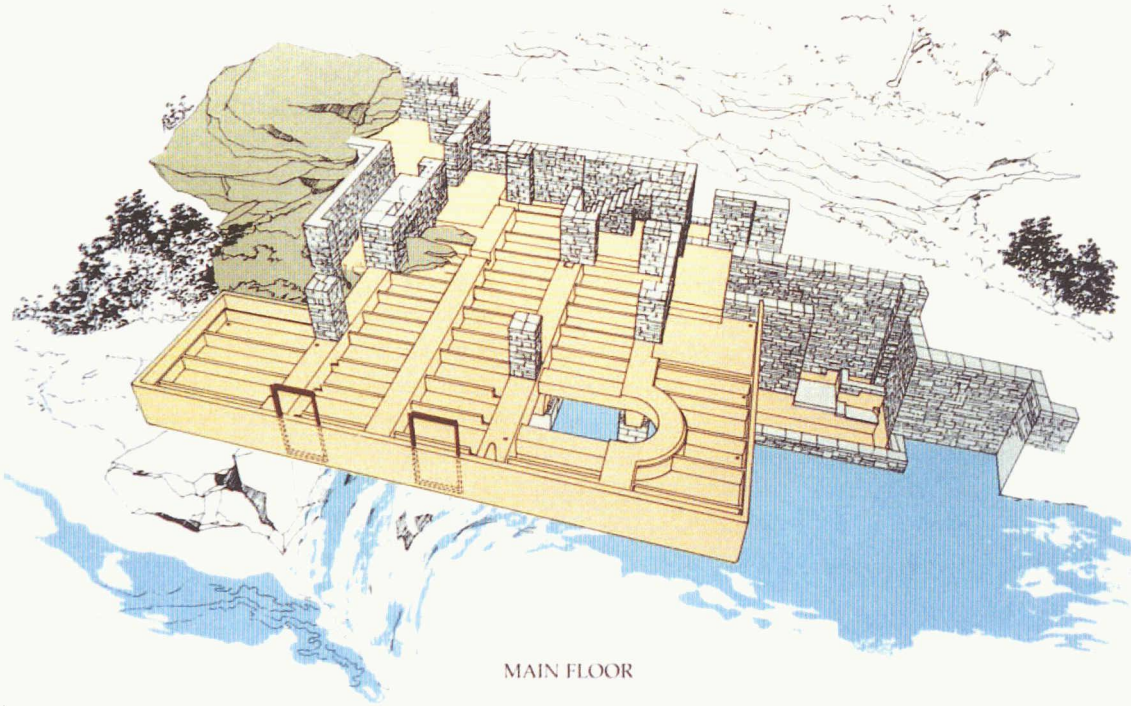
Le porte-à-faux du second étage - qui s'élanche encore de 1,83 m au-delà de celui du dessous (fig. 6) - constitue la terrasse de la chambre à coucher. Il est soutenu par deux poutres de rive principales, à nouveau reliées par un système de poutrelles dont la face inférieure est masquée par une dalle en béton.

Campagne de mesures

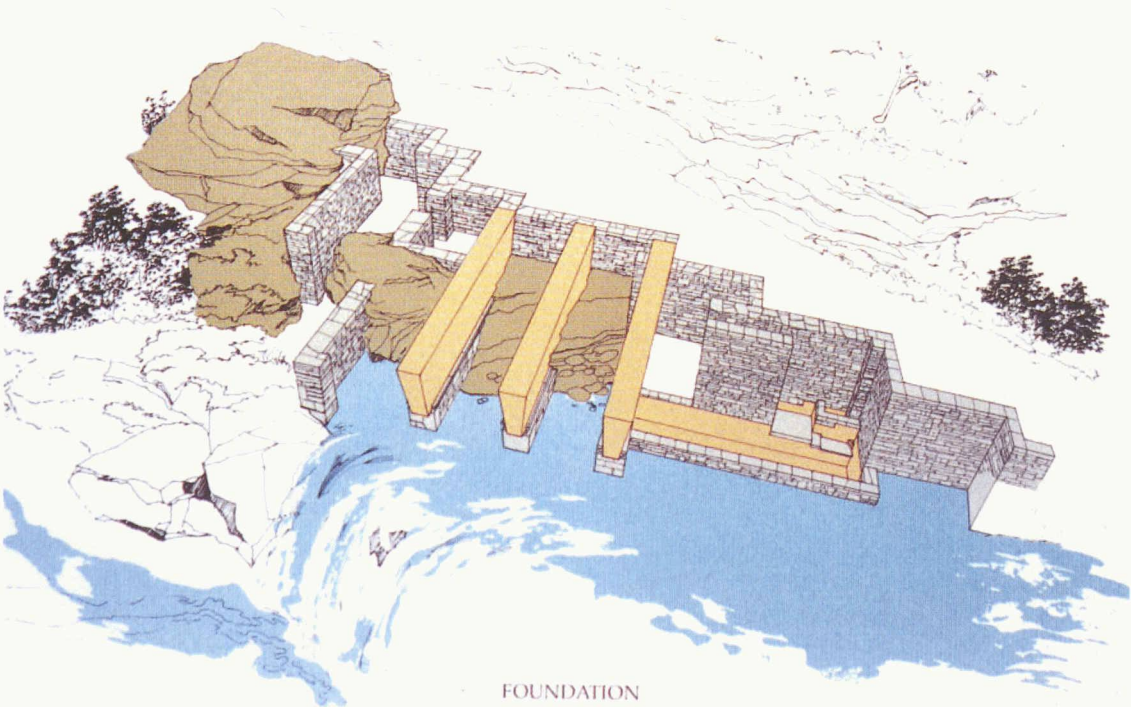
Notre première tâche fut de déterminer si les déformations des porte-à-faux continuaient à s'accroître. Les recherches montrent qu'au bout de vingt ans environ, les phénomènes de fluage dans une structure en béton armé ne devraient plus jouer de rôle et que la quasi-totalité de leurs effets se déve-

3





MAIN FLOOR

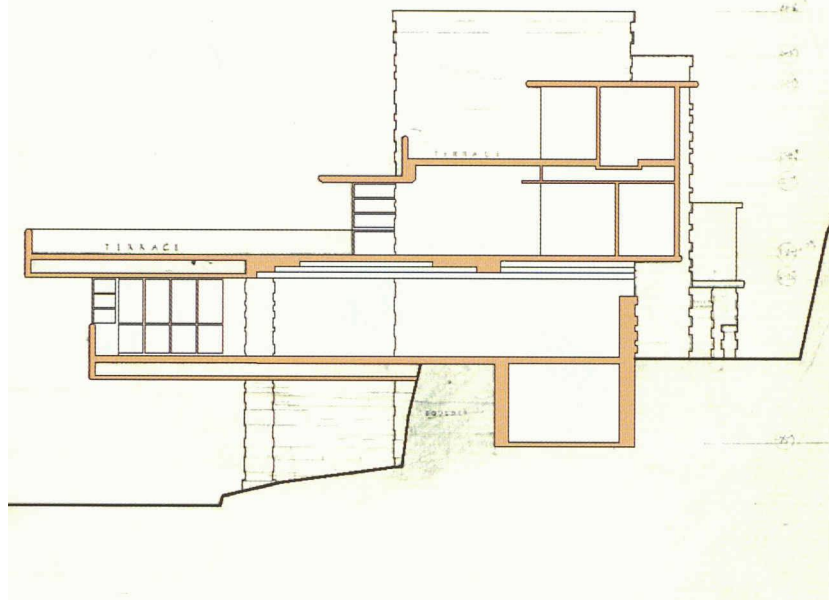


FOUNDATION

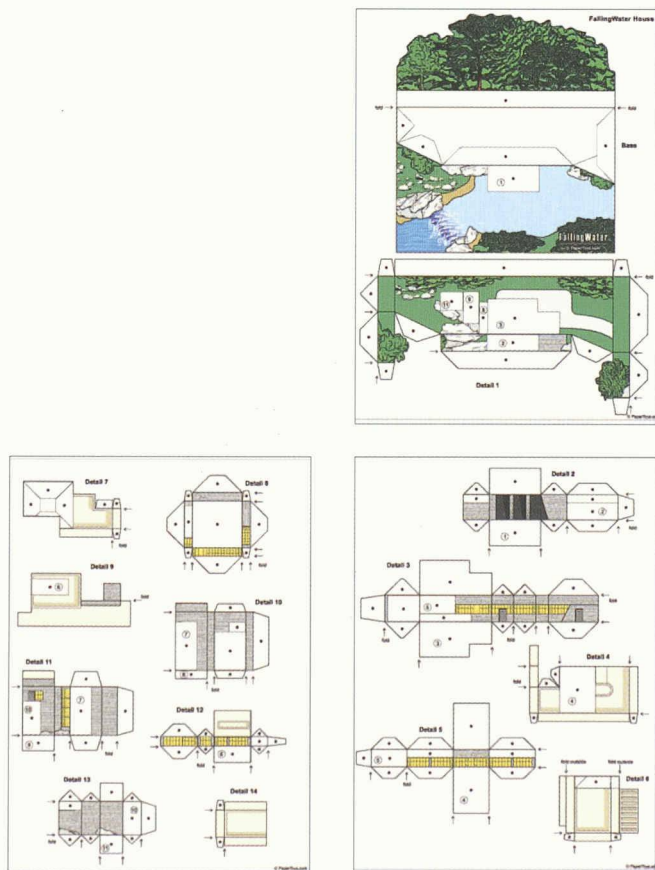
Fig. 6 : Coupe transversale de l'édifice montrant l'ampleur des éléments en porte-à-faux (Document : FDC, d'après un dessin de FLW, N° de catalogue 3602.12)

Fig. 7 : La diffusion de l'œuvre de Frank Lloyd Wright emprunte aussi des détours ludiques, comme en atteste ce jeu de construction diffusé sur Internet <<http://papertoys.com/fallingwater.htm>>

6



7



loppe très tôt, conformément à la courbe asymptotique de fluage en fonction du temps. Il n'en demeure pas moins que la réalité historique et physique attestait de la persistance des déplacements en cours à Fallingwater sans modifications de charges – les fissures des garde-corps de la terrasse supérieure se rouvraient après chaque opération de ragréage et les portes donnant sur la terrasse du séjour devaient régulièrement être réparées suite à leur voilement.

Seules des mesures sporadiques et des relevés d'état avaient été effectués par les premiers propriétaires, mais il n'existait pas de données récentes. À l'automne 1995, nous avons donc lancé un programme de mesures continues, en installant des dispositifs de contrôle de la fissuration et des inclinomètres sur la terrasse supérieure et les garde-corps de celle faisant face au séjour. Par le biais d'un système d'acquisition de données et d'un ordinateur provisoirement installés dans la salle de bains principale, mesures et relevés de température furent enregistrés 24 heures sur 24, toutes les demi-heures. Au bout de dix-sept mois de contrôle, nous pûmes prouver avec certitude que les déplacements des porte-à-faux se poursuivaient.

Evaluation

Quelles conclusions tirer de ces mesures? Nous fîmes savoir aux responsables du WPC qu'il faudrait procéder à une évaluation physique et mathématique complète de l'état de la structure, opération à laquelle ils donnèrent leur feu vert.

Bien que des plans originaux fussent disponibles dans les archives de Frank Lloyd Wright, certains documents de la correspondance conservée dans le même fonds témoignent d'un sérieux différend entre l'entrepreneur et Wright au sujet du nombre de barres d'armature à intégrer dans les poutres maîtresses des porte-à-faux. L'entrepreneur affirmait que le ferrailage indiqué sur les plans devait être doublé, ce à quoi Wright répondit très sèchement que sa conception était non seulement parfaitement appropriée, mais que des barres supplémentaires s'avèreraient trop lourdes pour la structure! Comment dès lors analyser celle-ci, sans disposer des informations cruciales concernant le nombre et les dimensions des armatures disposées dans les poutres principales?

Le bureau anglais *GB Geotechnics* à Cambridge fut mandaté pour effectuer des sondages non destructifs (par impulsions radar, ultrasons et détection magnétique à haute résolution) des poutres maîtresses et des garde-corps de la terrasse supérieure. Pour examiner les poutres, plusieurs éléments du dallage en pierres naturelles qui revêt le sol du séjour furent retirés afin d'accéder à la face supérieure de l'une d'entre elles (fig. 8). Les sondages radar révélèrent que,

Fig. 8 : Après l'enlèvement du dallage en pierre de la salle de séjour, un radar à impulsions est mis en oeuvre afin de déterminer les dimensions et la position des barres d'armature dans les poutres maîtresses en béton.

Fig. 9 : Diagramme des moments de flexion dans les éléments clés de la structure

Fig. 10 : Diagramme des moments de flexion dans les dalles obtenus selon la méthode des éléments finis (Documents : Robert Silman Associates)

heureusement, l'entrepreneur avait bel et bien ajouté de l'armature : il y avait quinze barres de section carrée de 25 mm, au lieu des huit figurant sur les plans originaux.

Une fois ce point acquis, le programme de calcul par éléments finis SAP 90 a été utilisé pour évaluer les éventuelles interactions structurales entre la terrasse supérieure et les poutres supportant le séjour. Bien que le mandat initial ne portât sur l'examen de la terrasse supérieure où la réouverture des fissures dans les garde-corps posait problème, l'étude du ferrailage indiqué dans les plans de structure originaux - corroborée par sondage non destructif - révélait l'intention d'appuyer l'extrémité sud de la terrasse supérieure sur quatre très minces montants de fenêtres de 64 mm x 100 mm, en acier profilé en T, enchâssés dans le garde-corps situé au sud du séjour. L'hypothèse de la terrasse supérieure fonctionnant comme un porte-à-faux indépendant s'avéra en effet rapidement irréaliste, dans la mesure où un tel modèle impliquait des contraintes en flexion nettement plus élevées que les résistances ultimes et prédisait des déplacements beaucoup plus importants que ceux mesurés sur place.

Poussant plus loin la modélisation par éléments finis, l'analyse a alors été effectuée en variant la rigidité, les sections fissurées et les points d'articulation dans la géométrie de base des éléments de structure en béton armé. Les principales charges proviennent du poids propre, les charges utiles étant relativement insignifiantes dans la mesure où le nombre de visiteurs admis en même temps dans la maison fait l'objet de limitations, et que les charges dues à la neige ne sont pas excessives. Si les premières modélisations basées sur des sections non fissurées ont montré une tendance à une reprise des forces par les poutres de bord et les garde-corps rigides de la terrasse supérieure, l'armature négative minimale à ces endroits ne pourrait en réalité supporter de telles charges qui se traduiraient inévitablement par des fissures importantes et une redistribution des forces en question au niveau inférieur. Le dernier cas étudié dans notre série de modélisations itératives présentait finalement une déformée et des déplacements dont l'ampleur - ajustée pour tenir compte du retrait - correspond bien aux mesures faites sur place. Quant au diagramme des moments résultant de ce modèle final - obtenu à l'issue d'une analyse tridimensionnelle selon la méthode des éléments finis, dans laquelle la participation des dalles et des poutrelles a été prise en compte -, il montre que les deux niveaux sont principalement soutenus par les poutres maîtresses en porte-à-faux sous le sol du séjour (fig. 9 et 10).

Or, en convertissant ces moments en valeurs de contrainte pour le béton et l'acier, nous découvriâmes avec stupeur

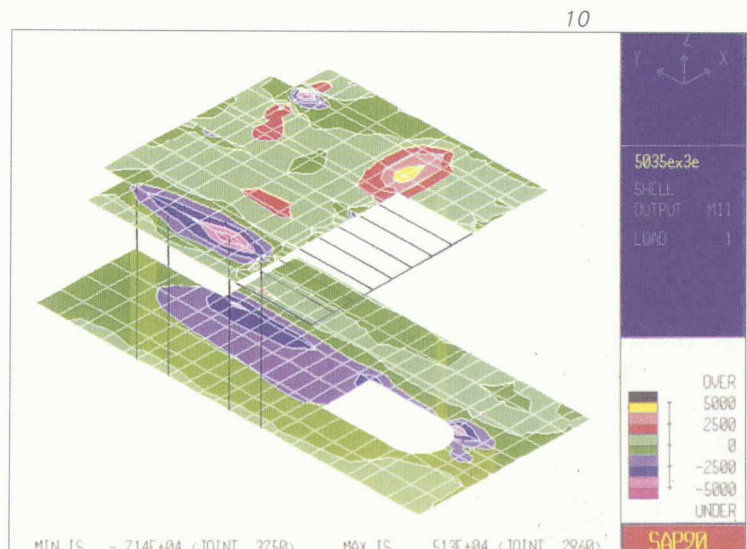
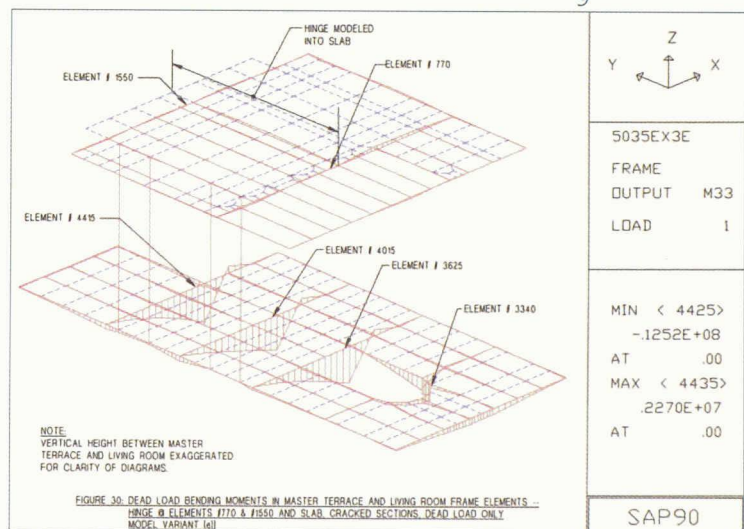


Fig. 11 : Étayage provisoire sous la dalle du premier étage

Fig. 12 : Mise en place de la précontrainte sous le sol du séjour dépourvu de son dallage : l'extrémité fixe du tirant se trouve en bas à gauche, le bloc de déviation au centre et le dispositif de mise en tension en haut de la photo.
(Photos : Robert Silman Associates)

11



12



que celles-ci s'élevaient respectivement à 30,2 MPa pour le premier et à 287,6 MPa pour le second. Les essais effectués sur les deux matériaux ayant donné une résistance ultime de 34,5 MPa pour le béton et une résistance théorique de 289,6 MPa pour l'acier, la structure se trouvait donc, d'après les calculs, à la limite de la ruine !

Etayages provisoires

Nous en avons immédiatement informé les conservateurs, qui admirent que des réparations définitives devaient être entreprises. Cela étant, il était clair qu'il faudrait non seulement un délai suffisant pour concevoir une solution de restauration respectant l'œuvre, mais qu'il s'agirait encore de réunir les moyens de la financer.

Les responsables du WPC ont alors posé la question à laquelle nous nous attendions: «La sécurité de la maison est-elle garantie, à la fois comme précieux témoignage historique et pour les personnes qui la visitent?» Notre réponse fut que, sur un plan théorique, son état actuel n'était en rien différent de celui qui existait depuis le jour où les coffrages avaient été retirés – autrement dit, si elle n'était pas sûre aujourd'hui, elle ne l'avait pas davantage été durant les soixante et quelques années de son existence. Ni les charges, ni les matériaux n'avaient été modifiés, et si l'on faisait exception des déplacements et des fissures, la maison avait apparemment plutôt bien rempli sa fonction. C'est pourquoi il nous semblait en quelque sorte difficile d'établir la crédibilité de nos résultats, selon lesquels les porte-à-faux en béton étaient mathématiquement proches de la rupture.

Nos interlocuteurs se montrèrent cependant tout à fait convaincus et ils acceptèrent notre proposition de munir l'édifice d'étais provisoires en attendant qu'une solution définitive puisse y être appliquée. C'est ainsi qu'au début du printemps 1997, une rangée d'étais de structure en acier fut mise en place, avec des treillis d'acier reposant sur des boulons d'ancrage forés directement dans la roche qui constitue le lit du ruisseau (fig. 11). Un tel étayage aurait de toute manière dû être réalisé pour exécuter des réparations définitives et, en attendant, il constituait un gage de sécurité contre tout nouveau fléchissement et permettait de poursuivre sereinement les visites guidées de la maison.

Etude de solutions conservatoires définitives

Nous avons tout de suite commencé à réfléchir à un remède permanent en examinant un grand nombre de possibilités différentes. Reconnaisant l'importance unique de cette structure parmi les édifices historiques américains, nous avons même envisagé de suivre la suggestion de certains

gardiens du patrimoine: rendre définitif l'étayage provisoire, plutôt que d'intervenir sur la maison elle-même, afin de ne pas toucher à sa substance originale. Après réflexion, nous avons toutefois acquis la conviction qu'une solution définitive devait permettre aux visiteurs de saisir la conception originale de l'ouvrage; or ce qui en faisait tout le prix, c'était précisément le principe des porte-à-faux.

Il est heureux que Wright ait choisi de placer ses dalles de béton sur la face inférieure des deux étages. En soulevant le dallage de sol qui repose sur un planchéage et des solives de bois minces, on accède en effet facilement à la face supérieure des poutres et poutrelles en béton. Les conservateurs avaient déjà procédé à l'enlèvement de dalles pour la réfection de l'étanchéité des terrasses extérieures, si bien que nous savions qu'une telle opération était sans aucun doute possible.

Une des solutions évidentes aurait consisté à renforcer, au moyen d'aciers de structure boulonnés sur leurs côtés, les poutres maîtresses soutenant le séjour. Or cette option s'avérait irréalisable en raison des poutrelles de 100 mm de largeur encastées dans ces dernières. Chaque poutrelle aurait en effet dû être étayée, puis découpée avant d'être réappliquée sur le nouveau renforcement d'acier. Par ailleurs, nous étions arrivés à la conclusion que, la maison étant une structure en béton armé, une solution faisant aussi appel au béton serait plus pertinente.

Il s'est alors agi de trouver comment ajouter suffisamment d'armature négative - ou armature supérieure - pour résister aux charges. Ayant d'abord envisagé d'appliquer des renforts supérieurs en fibres de carbone, cette approche nous a été déconseillée par des spécialistes de ce domaine, car l'augmentation proportionnelle de la résistance des poutres que nous visions équivalait à un pourcentage trop élevé de leur résistance initiale. Nous avons ensuite réfléchi à une méthode qui nous permettrait d'ajouter de l'armature, en découpant ou tailladant le béton afin d'y insérer des barres supplémentaires. Mais là encore, il nous aurait fallu tant de barres, qu'un tel choix aurait complètement détruit l'armature originale et impliqué d'importants travaux d'étayage, en violation des principes de conservation du patrimoine qui exigent qu'on préserve autant que possible la substance existante.

La meilleure solution à laquelle nous parvînmes finalement fut d'assurer le renforcement requis au moyen de câbles d'acier à haute résistance, ou tirants, fixés le long des faces latérales des poutres en béton. Ces tirants seraient ancrés sur les poutres, puis mis en tension pour offrir l'aptitude au service requise. À la grande satisfaction des conservateurs,

un tel système de contrainte externe laisse non seulement intacte la quasi-totalité de la structure originale, mais s'avère de surcroît réversible, conformément à un autre précepte qu'il est souhaitable d'observer en matière de restauration.

Notre analyse indiquait que l'une des quatre poutres maîtresses se passait de renforcement, car elle s'appuyait sur un poteau d'acier très léger faisant partie de l'escalier qui mène du séjour au bord du ruisseau. Et parmi les trois autres, celle située le plus à l'est n'appelait qu'un soutien correspondant à la moitié environ de celui nécessaire aux deux dernières.

Mise en oeuvre

Avant le démarrage des travaux, les conservateurs commencèrent par retirer tous les éléments du mobilier en bois faisant partie intégrante de la maison et les envoyèrent à un atelier pour y subir leur première restauration depuis la construction. Ensuite, leur propre équipe de maintenance spécialisée se chargea de l'enlèvement du dallage, étiquetant, photographiant et identifiant soigneusement la position de chaque pierre en vue de son remplacement ultérieur. Dans l'intervalle, les dalles furent stockées sur le site, dans des abris provisoires à proximité de la maison.

L'installation du système de post-contrainte impliquait d'abord le percement de trous dans le garde-corps sud de la salle de séjour, ainsi qu'au travers des poutrelles de 100 mm de large, afin d'y faire passer une gaine en polyéthylène haute densité de 75 mm de diamètre (fig. 12), à l'intérieur de laquelle sont disposés treize torons de 12,5 mm à sept brins (1862 MPa de résistance à la traction). Des blocs de béton ont été appliqués contre les poutres en trois points et ancrés à celles-ci au moyen de tiges et de goujons transversaux de post-contrainte.

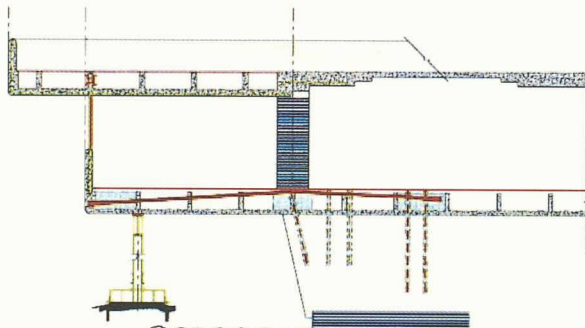
Aux extrémités fixes des tirants (au nord), tous les brins des torons ont été séparés pour être répartis dans le bloc d'ancrage, de manière à ce qu'une fois coulé autour, le béton puisse transmettre son poids à la poutre originale. Aux extrémités réservées à l'introduction de la contrainte (au sud), des dispositifs d'ancrage spéciaux pour l'acier ont été coulés dans le bloc de béton. A peu près à mi-parcours du tirant, un troisième bloc servant de déviateur a été placé de manière à le relever et à lui conférer un profil tendu, permettant de répartir correctement les forces de précontrainte dans les différentes sections transversales qui se succèdent le long de la poutre existante (fig. 12 et 13).

Lorsque les blocs eurent été coulés et que le béton eut terminé sa prise, un certain nombre de fissures apparues sur la face supérieure de quelques poutres firent l'objet d'un jointoyage à la résine époxy. On procéda également à la mise

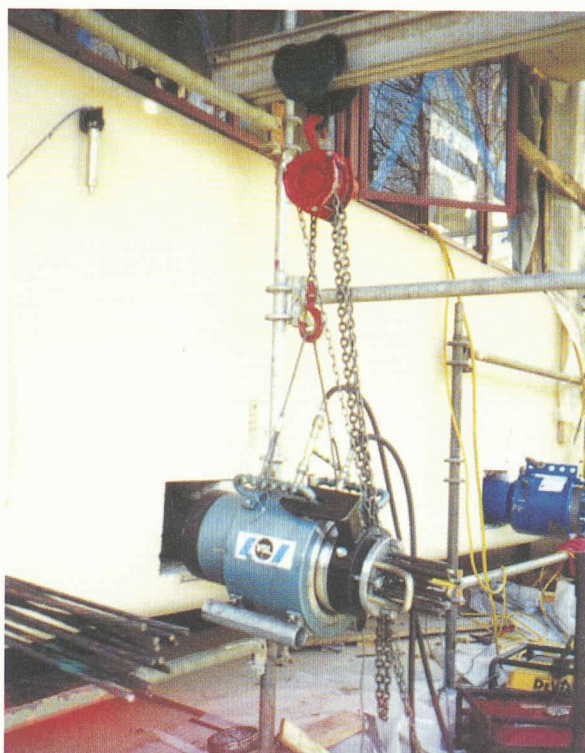
Fig. 13 : Schéma d'installation des tirants, figurés en rouge vif, à l'intérieur de la dalle du séjour
(Document : Robert Silman Associates)

Fig. 14 : Opération de mise en tension des tirants, au moyen d'un échafaudage provisoire appuyé sur le lit du ruisseau.
(Photo : Robert Silman Associates)

13



14



en place d'instruments tels que des tensiomètres et des dispositifs de mesure des déplacements.

L'«heure de vérité» arriva avec la mise en tension des tirants (fig. 14). L'entrepreneur installa vérins et cric hydraulique sur un échafaudage provisoire appuyé dans le lit du ruisseau, puis une force de 1735 kN fut appliquée sur chaque côté des deux poutres les plus sollicitées, tandis qu'une force un peu moins élevée était réservée à la troisième. Echelonnée en trois phases réparties sur deux jours, l'opération consista à introduire 20%, puis 50% et enfin 100% de la précontrainte, en alternant systématiquement l'ordre des tirants manœuvrés. A la plus grande satisfaction des concepteurs, les mouvements observés et les déformations mesurées se révélèrent parfaitement conformes aux calculs !

L'objectif n'avait jamais été de redresser la maison jusqu'aux élévations originellement prévues sur les plans afin de la mettre parfaitement à niveau. Cela aurait en effet impliqué un levage initial massif se traduisant par la destruction de nombre de finitions intérieures en plâtre ou en verre qui s'étaient adaptées aux déformations avec le temps. Finalement, la flèche du porte-à-faux s'est stabilisée à quelque 15 mm au-dessus des étais provisoires, exactement comme prévu. Les tirants ont alors été scellés à l'aide d'un ciment spécial pour prévenir la corrosion.

Outre l'application de la post-contrainte longitudinale principale au moyen de tirants multi-torons à treize éléments telle qu'elle a été décrite ci-dessus, nous avons encore jugé nécessaire d'introduire une post-contrainte plus légère dans le sens transversal. Le but était de renforcer aussi les terrasses à l'est et à l'ouest, qui forment en réalité des doubles porte-à-faux, puisqu'elles s'appuient elles-mêmes sur les poutres maîtresses soutenant la salle de séjour. Ces porte-à-faux secondaires ont été post-contraints à l'aide de paires de tirants mono-toron de 15 mm, soumis à une force de 191 kN chacun.

Une fois les travaux de bétonnage achevés, le dallage de pierre a pu être remis en place exactement comme il était avant le début du chantier, après quoi le mobilier fut également réinstallé selon l'agencement original. Aujourd'hui, la maison présente à nouveau l'aspect qui était le sien avant l'intervention, mais on lui a insufflé un nouveau souffle de vie qui, espérons-le, assurera sa longévité pour bien des années.

Les intervenants

Le projet a été dirigé par John Matteo, associé du bureau Robert Silman Associates, ingénieurs conseils en structures à New York. La société Schupack Suarez Engineering, à Ridgefield, Connecticut, a été choisie comme spécialiste de la post-contrainte et sa contribution fut capitale pour assurer la vérification de chaque détail avant toute ouverture de chantier. Les travaux de post-contrainte et de bétonnage ont été exécutés par l'entreprise VSL Corporation, de Springfield en Virginie. Le degré de planification préliminaire et le soin apporté à la réalisation des tâches se sont avérés exemplaires. Le travail de bétonnage proprement dit a débuté le 3 janvier 2002 et il s'est pour l'essentiel achevé le 29 mars, largement à temps pour la réouverture printanière habituelle de la maison, à début mai.

Robert Silman
Robert Silman Associates, P.C., Consulting Engineers
88 University Place, New York, NY 10003
<www.rsapc.com>

(Texte traduit de l'anglais par Maya Haus,
avec une relecture minutieuse d'Élodie Hanen)