

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 135 (2009)
Heft: 12: Fin de chantier

Artikel: Réalisation et suivi de la grande coque
Autor: Bihan, Hugues / Capron, Michel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99762>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 13.01.2026

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

Réalisation et **suivi** de la grande coque

GÉNIE CIVIL

Le bétonnage de la grande coque du Rolex Learning Center aura indéniablement constitué le point fort du chantier. L'estimation et la maîtrise à long terme des déformations de cet élément central jouera un rôle déterminant sur la qualité et la durabilité du projet.

La réussite d'une opération de l'envergure du projet du Rolex Learning Center passe par une bonne réflexion dans les processus qualité devant garantir le suivi des points critiques. Le système mis en place pour la réalisation de la grande coque est basé sur un plan de contrôle global intégrant les tâches du gros œuvre et celles en interaction avec lui.



Tours d'étaie et coffrage

L'audit qualité réalisé au sein de l'entreprise responsable des tables de coffrage a avant tout servi à coordonner les plannings d'approvisionnement, d'assemblage et de livraison des fournitures (en flux tendu) avec leur pose sur chantier. Cet audit a aussi permis d'avoir un aperçu de l'infrastructure du fournisseur, des plans de contrôle interne utilisés, du conditionnement des différents matériaux et des tables assemblées et, enfin, de fixer les tolérances de fabrication.

Parallèlement à la production des tables, le centre de chacune des tours d'étaie a été relevé en Z sur l'arase supérieure de la dalle sur sous sol, et chaque pied de tour a été implanté en X et Y. Ce travail a permis d'assurer le positionnement préalable des tours assemblées, puis de régler l'altimétrie des têtes de fourches afin de compenser

les erreurs dues aux tolérances de bétonnage de la dalle. Une fois la table positionnée sur sa tour d'étaie, un géomètre reconstrôlait sa position en trois dimensions. A noter aussi que les tables ont été liées entre elles puis haubanées pour assurer la stabilité du coffrage au cours des 4 mois et demi d'activité nécessaires à la réalisation de la grande coque.

Ferraillage des coques

Réalisées avant le bétonnage principal, les amorces sont les zones les plus fortement ferraillées de la grande coque, avec un taux dépassant les 500 kg/m^3 (fig. 4). Elles accueillent en effet des câbles de précontrainte, des aciers de 50 mm de diamètre munis de plaque d'ancrage, des gabarits de support, les nappes supérieure et inférieure des armatures de la dalle ainsi que de nombreux étriers. Servant de base





2

aux voûtes, elles ont été l'objet d'un suivi particulier pour le positionnement des aciers avant le bétonnage : la plupart de ces éléments ont été implantés au théodolite et mis en place selon un ordre défini. Les gabarits de support des barres de 50 mm (deux appuis par barre) ont été soudés sur lit inférieur de la dalle et vérifiés par le géomètre afin de garantir la stabilité et l'orientation des attentes. Avant de donner son feu vert pour le bétonnage des amorces, le bureau *INGPHI*, mandaté pour le contrôle de l'exécution de la structure béton, s'assurait une dernière fois de la bonne mise en œuvre des aciers dans cette zone.

Pour les deux coques, ce sont au total 820 tonnes de barres de 50 mm, d'une longueur comprise entre 12 et 21 m, qui ont été livrées. La logistique mise en place a limité leur manutention à leur déchargement (dans quatre zones de stockage situées sous chacune des grues) et à leur pose une à une à la grue. Plus de 1 800 soudures structurelles en compression devaient offrir 30 % de la résistance à la traction et plus de 900 travaillant en traction devaient offrir 100 % de résistance

à la traction. En terme de main d'œuvre, cela s'est traduit, au cours du dernier mois de l'opération de ferrailage, par la présence six jours sur sept de dix soudeurs certifiés. Pour confirmer la certification accordée par l'EMPA aux barres de 50 mm, toutes les soudures à 100 % ont été l'objet d'un contrôle magnétoscopique, alors que les autres faisaient l'objet d'un simple contrôle visuel. En cas de microfissuration superficielle, la soudure était meulée pour la rendre homogène. Si la microfissuration était généralisée, la barre était sciée et à nouveau assemblée.

Afin de prévenir les risques liés à une dilatation excessive des barres de 50 mm lors des pics de chaleur, l'ensemble du ferrailage a été arrosé. Sans cet arrosage, les barres soudées le matin se seraient allongées aux heures de température élevée, puis rétractées pendant les heures froides. Elles auraient ainsi vraisemblablement provoqué l'écrasement des écarteurs en béton destinés à garantir les quatre cm d'enrobage ainsi que l'endommagement de la peau de coffrage.

Fig. 2 : Bétonnage de la grande coque (Photo Alain Herzog)

Fig. 3 : Organisation du chantier pendant le bétonnage de la grande coque

Fig. 4 : Ferrailage des amorces

Point d'arrêt avant bétonnage

Pour la grande voûte, on a décidé d'imposer un « point d'arrêt avant bétonnage ». Celui-ci devait marquer la fin des études et le bon achèvement des travaux préparatoires, avant de donner le « Bon Pour Exécution » pour le bétonnage de la dalle. Cet « arrêt » était indispensable avant une opération de cette envergure pour entériner formellement l'ensemble des contrôles.

Cela concernait d'abord la validation des notes de calculs du bureau *Bollinger & Grohmann/Walter Mory Maier* par le bureau *Bonnard & Gardel*, mandaté pour un contrôle externe. Il s'agissait ensuite de s'assurer de l'achèvement des travaux préparatoires et de regrouper les validations des bureaux de contrôle et des conducteurs de travaux : reprises en sous œuvre, mise en œuvre du ferrailage et des incorporés, précontrainte, réserves interne ou externe, nivellement du coffrage et des arasés, étanchéité et propreté du coffrage, etc.

Il fallait aussi garantir la stabilité des coffrages et de leur étalement, y compris les contreventements (par des mesures de la tension des haubans et contrôle des liaisons entre les tables) et le sous étayage au sous-sol. Le matériel et les matériaux de bétonnage devaient être prêts : réservation des centrales, des camions pompe et du béton, inspection des centrales avec contrôle de l'état des stocks et derniers essais pour régler la recette, disponibilité des produits de cure, matériel de rechange, éclairage, etc.

D'un point de vue logistique et humain, tous les intervenants ont été informés du déroulement général de l'opération et des mesures de sécurité. Ils ont été spécifiquement formés pour leur tâche, chaque participant recevant un planning nominatif incluant aussi son ravitaillement. On s'est encore assuré du bon fonctionnement et de l'étalonnage des instruments de mesures, des dernières mesures enregistrées « avant bétonnage » et de la bonne planification des contrôles et essais (laboratoire béton, tension des haubans, variation altimétrique coque, dalle et radier, charge sur étayage, thermomètre). La dernière contrainte à lever avant de délivrer le « Bon Pour Exécution » concernait la météorologie.

Mise en œuvre du béton

Le choix de bétonner en continu visait en premier lieu à obtenir une finition homogène de l'intrados de la coque. Afin de ne pas bloquer les autres chantiers de la région, le bétonnage s'est effectué sur un week-end (du 11 juillet 2008 à 5h au 13 juillet 2008 à 3h). Le pari de bétonner jours et nuits

durant près de 48 heures a imposé de travailler avec deux centrales (situées respectivement à Bussigny et Morges), ce qui permettait d'assurer la continuité de la livraison du béton en décalant le cycle de nettoyage des malaxeurs.

La plasticité et la résistance du béton jouaient un rôle fondamental pour la réussite de l'opération¹. Une vérification systématique de l'étalement du béton à son arrivée sur le chantier a été effectuée : la valeur visée de 500 mm était le résultat d'un compromis entre les impératifs liés à la mise en place dans des zones très fortement armées et la nécessité que le béton puisse respecter la forme des coques. Parallèlement, trois laborantins étaient chargés de confectionner les éprouvettes pour les futurs essais sur béton durci : au total ce ne sont pas loin de 300 essais et cubes de réserve qui ont été réalisés. Un relevé régulier de la température du béton à la sortie des pompes validait son ouvrabilité.

Le succès du bétonnage passait aussi par le maintien d'une cadence susceptible de garantir un coulage frais sur frais. L'organisation de l'accès au chantier des camions (fig. 3) et leur dispatching jusqu'à leur zone de pompage étaient pré-



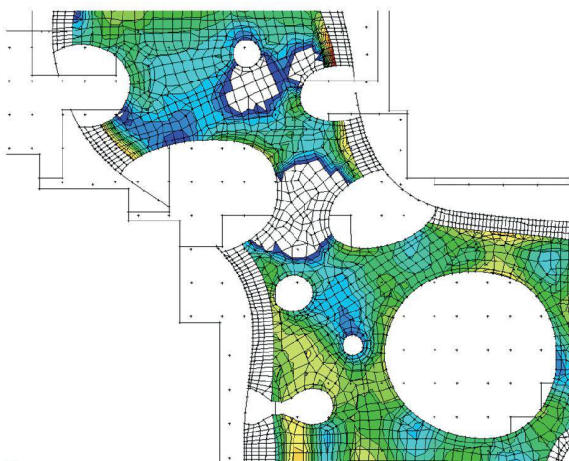
3



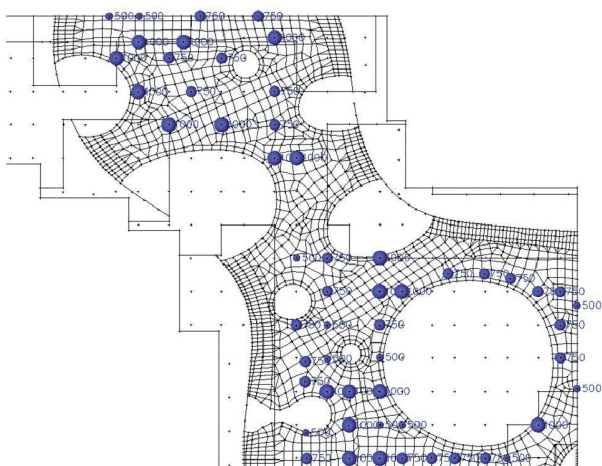
4

¹ La recette définitive du béton a été développée par *Holcim* en collaboration avec M. Ferté de la direction technique de *Bouygues Entreprise France Europe* et M. Burdin, expert béton indépendant.

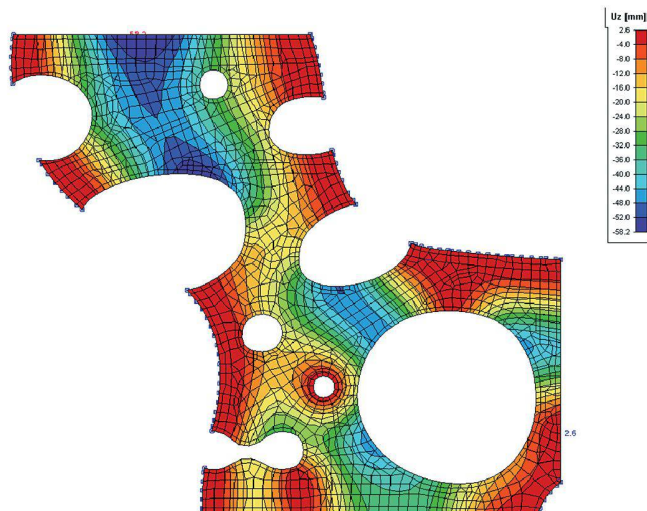
5



6



7



pondérants. La cadence de bétonnage estimée, le temps de prise du béton ainsi que la forme géométrique de la coque ont amené à segmenter la surface de 6 000 m² en 42 bandes. Chaque division correspondait à une quantité équivalente de béton d'environ 100 m³. Leurs frontières étaient matérialisées par des lambourdes en bois, fixées au ferrailage, au niveau fini (fig. 2). La distance entre les lambourdes a été définie pour qu'à chaque passe, le béton mis en place puisse s'incorporer avec celui de la passe précédente et assurer ainsi une prise continue. Ces lambourdes permettaient également le réglage du béton à la courbe théorique de l'extrados des voûtes. Chaque surface ainsi délimitée était numérotée afin de suivre l'avancement du bétonnage.

Pour neutraliser les efforts horizontaux dus au poids propre du béton lors de sa mise en œuvre et pour faciliter le tirage du béton par les ouvriers, les bandes ont été bétonnées de bas en haut avec deux fronts d'attaque (deux équipes de bétonnage alimentées par deux voire trois camions pompe). Tout au long de l'exécution, la tension des haubans et la pression en pied de tour étaient contrôlés pour assurer la sécurité.

En tout, ce sont 4 086 m³ de béton qui ont été coulés en 48h, soit une cadence moyenne de 85 m³/h. Le plus haut rendement a été de 130 m³/h. Les vingt camions qui se sont relayés ont parcouru l'équivalent d'un tour du monde pour effectuer 577 livraisons. Aucun accident n'a été enregistré au cours des 6 000 heures de travail accomplies.

A noter encore que la direction de chantier se retrouvait toutes les deux heures pour superviser les opérations en passant en revue la météo, la logistique, la sécurité, la qualité du béton et les cadences de bétonnage.

Prise et montée en résistance du béton

Tout d'abord, les températures estivales lors du bétonnage ont imposé une cure pour éviter le phénomène de retrait de dessiccation (lié à l'évaporation de l'eau présente dans le béton). Des toiles de jute, mises en place au fur et à mesure de l'avancement du bétonnage, ont été humidifiées continuellement par un arrosage automatique au cours des 15 premiers jours de prise du béton. Les bords de patio ont eux été enduits d'un produit jouant le même rôle.

Il s'agissait ensuite de suivre la prise du béton en suivant l'évolution de sa température au fil du temps. Les résultats obtenus (des pics de température compris entre 40 et 55 °C quelque 20 à 30 heures après le bétonnage) ont confirmé le bon déroulement de la réaction chimique, offrant ainsi une première indication favorable quant à la qualité de la mise en œuvre du béton.

Fig. 5 à 7 : Modélisation de la grande coque : efforts durant le décintrage, positionnement des vérins et déformations verticales instantanées

Fig. 8 : Sous une coque (Photo Alain Herzog)

Les essais de compression (réalisés à 7, 14, 28, et 90 jours) ont donné des résultats compris entre 70 et 80 N/mm² pour les valeurs à 90 jours, confirmant ainsi la classe visée du béton (C50/60 à 90 jours).

L'élément déterminant pour la mise en tension des câbles de précontraintes était le respect des valeurs de module d'élasticité : l'objectif de 36 500 N/mm² à 28 jours a été aisément atteint puisque, après 21 jours seulement, les valeurs étaient déjà de 36 700 N/mm². Les premiers câbles ont donc pu être mis en tension 22 jours après le bétonnage.

Mise en tension de la précontrainte

La phase de mise en tension consistait à sous tendre les arcs intégrés dans la structure de la coque à l'aide des câbles situés dans la dalle sur sous sol à l'aplomb des arcs et à assurer le frettage des zones d'appui des coques.

Cette technique a exigé l'ordonnancement de la mise en tension pour assurer la compression progressive et homogène de la structure. Le séquençage s'est fait par la mise en tension d'une gaine sur deux du frettage (longitudinal au pied de voûte), puis de celles de retenue reliant les pieds de l'arc (11 gaines de frettage comprenant 19 torons T15S cha-

cune et 60 gaines de retenue comprenant 31 torons T15S). Sur chaque arc, la mise en tension a été effectuée depuis les gaines centrales vers celles des extrémités pour éviter les efforts différentiels dans les arcs.

Les câbles tendus lors de la première phase ont été vérifiés après la mise en tension de la deuxième moitié afin de s'assurer qu'aucun relâchement intermédiaire n'avait eu lieu.

Décintrage de la grande coque

Pour entamer le décintrage, la résistance à la compression du béton des niches coulées après mise en tension de la précontrainte devait être supérieure à 45 N/mm². Avec du béton à prise rapide, cette valeur a pu être obtenue trois jours seulement après le bétonnage (valeurs relevées de 45,6 N/mm² et 49,6 N/mm²).

Le décintrage des coques constituait une des opérations les plus délicates du chantier. En effet, même en procédant par étapes, un démontage successif des 1 100 tourelles d'étaieement aurait inmanquablement entraîné une surcharge des tourelles voisines pouvant entraîner un effondrement en chaîne de l'ensemble du système.



8



9

L'opération a donc consisté à remplacer les 4 400 pieds des tourelles de coffrage par 56 vérins plats de 50 à 100 tonnes, disposés au pied de colonnes métalliques provisoires de type *Megasteel* puis à activer la coque en pilotant la descente simultanée de ces 56 vérins selon les trois phases :

- soulèvement de la coque par élévation de la pression des vérins à 130 bars ;
- abaissement simultané des 4 400 pieds de tourelles et appui de la coque sur les vérins ;
- libération de la coque par une réduction progressive de la pression dans les vérins.

Grâce à cette procédure, le décintrage s'est effectué en douceur, en quelques heures seulement. Le nombre et la position des vérins ont été optimisés avec un modèle non-linéaire 3D complet (fig. 5 à 7) simulant les étapes suivantes :

- modélisation des 1 100 tourelles de coffrage par des appuis surfaciques à ressorts non-linéaires dont la rigidité varie en fonction de la hauteur des tourelles,
- calcul de la pression sur les tourelles et de leur déformation sous l'effet du poids propre du béton et de la forte précontrainte (câbles type 31T15s) mise en tension dans la dalle après bétonnage de la coque,

- répartition d'un nombre minimal de vérins (disposés au droit des piliers du sous-sol) de manière à annuler la pression sur les tourelles de coffrages. Les vérins ont été modélisés par des forces ponctuelles appliquées sous la coque.

Les déformations mesurées en cours de décintrage ont révélé un soulèvement de la coque à la suite de la montée en pression des vérins allant jusqu'à 5 mm et un abaissement jusqu'à 4 cm de la coque lors de la réduction de la pression dans les vérins ; des valeurs qui s'avèrent conformes aux prévisions des calculs.

Les variations de pression observées dans les vérins durant le démontage des tourelles a définitivement convaincu les personnes présentes qu'un décintrage sans vérins n'aurait pas été possible. Le décintrage a laissé apparaître une structure extraordinairement élancée d'une très grande esthétique.

Suivi des déformations des coques

La figure 7 illustre la déformation verticale instantanée de la grande coque juste après son décoffrage. A ce jour, les résultats des calculs de déformations instantanées et différées ont été confirmés par les mesures de nivellement

Fig. 9 : Façades vitrées (Photo Alain Herzog)

Fig. 10 : Suivi des déformations après le décintrage

Fig. 11 : Mesures des fréquences propres de la grande coque

Fig. 12 : Forme très irrégulière des chapes sur les deux coques

Fig. 13 : Modèle de calcul des chapes sur coques

qui sont régulièrement effectuées sur place en fonction du temps, des charges et de la température.

La figure 10 compare mesures et calculs pour 49 points répartis sous la grande coque, avec :

- les mesures du géomètre (sous forme d'histogrammes),
- les valeurs calculées (sous forme de courbes) en tenant compte, pour chaque période de calcul, de l'augmentation progressive des charges permanentes en cours de chantier (charpente métallique, chape, plateformes, bureaux, etc) et de la température régnant lors des mesures.

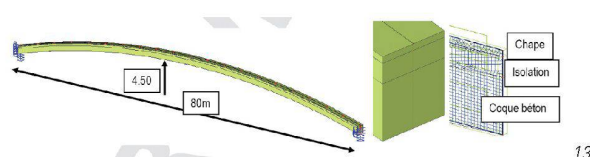
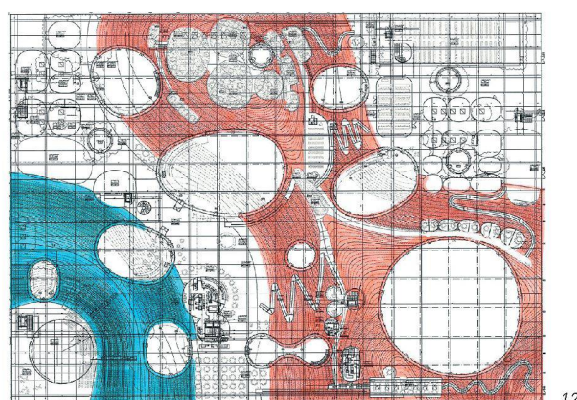
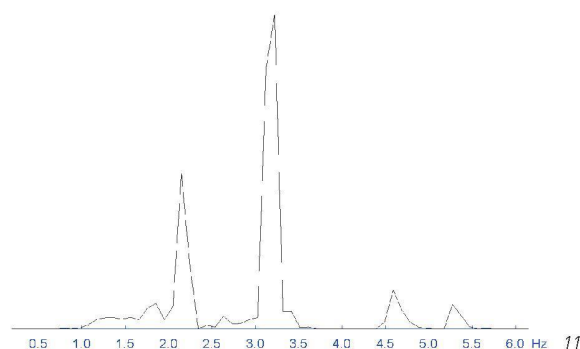
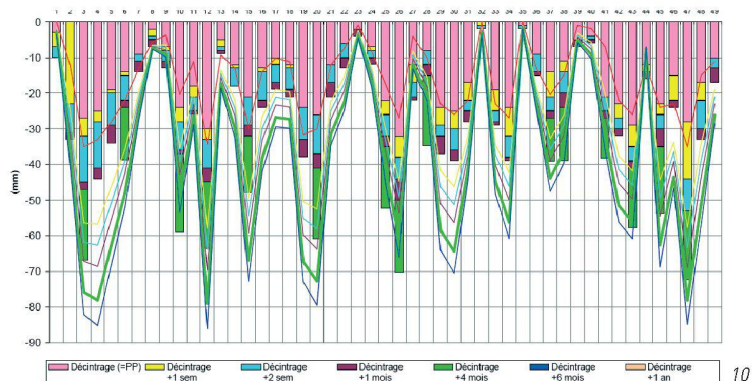
Selon les calculs, la déformation verticale à long terme (après retrait, fluage et fissuration) sera de l'ordre de 15 cm dans les zones les plus défavorables. Cette forte déformation prévue a été prise en compte pour la réalisation de la charpente métallique et du second œuvre (façades, chapes, etc). Le comportement dynamique des coques a été contrôlé par des mesures de vibrations effectuées sur place.

Les fréquences propres mesurées (fig. 11) ont confirmé les valeurs calculées et ont permis de déterminer la rigidité équivalente de ce béton fortement armé, soit un module élastique équivalent supérieur à 50 000 N/mm² qui varie selon le taux d'armature des différentes zones. Les mesures ont également montré que, bien que les fréquences propres se situent dans le domaine excité par les piétons, les accélérations sous vibrations induites par les utilisateurs sont faibles et largement inférieures à la limite de confort de 500 mm/s².

A noter encore que les modèles 3D complets ont aussi été utilisés pour procéder à une analyse sismique spectrale complète de l'ouvrage.

Chapes sur les coques

Alors qu'en général l'ingénieur n'est pas impliqué dans la réalisation des chapes, les spécificités exceptionnelles du Rolex Learning Center ont imposé des études et essais qui ont conduit à une solution inhabituelle. Il s'agit d'une chape mince de 8 cm d'épaisseur intégrant des serpentins de chauffage de 2 cm de diamètre et posée sur une isolation épaisse intégrant de nombreuses conduites de gros diamètre. Par opposition à des projets de bâtiments classiques, la chape est ici exécutée sur une coque arrondie qui subira de fortes déformations à long terme pouvant atteindre plus de 10 cm localement. Cette chape est en outre morcelée de manière très irrégulière par les patios, des plateformes, bulles et cheminements (fig. 12). L'application de la norme SIA 251 conduirait à un concept de chape découpée en champs réguliers avec de nombreux joints de dilatation équipés de goujons. Dans le cas présent, ces joints de dilatation poseraient de sérieux problèmes, parmi lesquels on peut citer :



- une délimitation difficile du découpage en raison de la forme irrégulière,
- un risque de glissement sur les champs en pente,
- un coût important pour les joints goujonnés et l'éclatement de leurs lèvres au droit des goujons en raison d'importantes déformations à long terme de la coque et de la qualité peu favorable du support (instabilité des blocs d'isolation posés sur la courbure des coques, nombreuses conduites noyées, etc).
- la difficulté d'assurer la continuité des serpentins de chauffage à travers les joints de dilatation,
- la nécessité de marquer les joints dans la moquette (coûteux, inesthétique et durabilité limitée)

Un découpage en champs selon la norme SIA 251 aurait donc été compliqué et coûteux tout en ne garantissant pas l'absence de fissures.

Un concept « intuitif » totalement opposé a donc été développé. Il consiste à :

- accepter une fissuration de la chape,
- répartir le mieux possible cette fissuration en disposant une armature en treillis dans la chape et en utilisant un mortier fibré,
- cacher la fissuration sous la moquette.

La faisabilité et les avantages de ce concept ont été évalués par des calculs numériques, des chapes d'essai et des essais en laboratoire. Quatre chapes d'essais ont été réalisées en faisant varier le type de ciment et la quantité de fibres métalliques. Les essais en laboratoire ont permis de comparer les valeurs de résistance à la compression, à la traction par flexion, ainsi que le retrait et le module d'élasticité. Une comparaison numérique des variantes avec et sans joints a été effectuée à l'aide d'un modèle de calcul sandwich intégrant la chape, l'isolation et la coque en béton armé (fig. 13).

Le modèle a permis de comparer l'influence de différents cas de charge – déformation différée de la coque, charge utile répartie ou localisée, retrait de la chape, gradient de température dans l'épaisseur de la chape, retrait et température du béton de la coque – sur les contraintes dans la chape (en particulier autour de goujons) et sur les déformations (déformation verticale de la chape, ouverture des joints et déplacement vertical relatif des lèvres des joints).

Le concept ainsi retenu constitue un compromis technico-économique combinant l'utilisation de treillis et de fibres métalliques (plus efficaces que les fibres synthétiques). Il consiste à réaliser une chape monolithique sans joints de dilatation et à la laisser en contact direct avec les piliers de



Fig. 14 : Intérieur d'un patio (Photo Alain Herzog)

Fig. 15 : Réalisation de la chape dans une zone en pente
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

la charpente métallique qui servent de « goujons » d'ancrage selon une trame de 9x9m. Il a été décidé de limiter la quantité de fibres métalliques à 20 kg/m³ de manière à éviter de boucher les tuyaux de pompage. Un treillis (ø 2 mm e=50 mm) a en outre été rajouté dans les joints de travail et dans les zones plates de clé de voûte de manière à renforcer ces zones en traction, bloquer l'effet des variations de température dans les serpentins et servir de goujon à travers les fissures. Un treillis plus gros et généralisé aurait permis une meilleure répartition des fissures, mais aurait causé une délamination de la chape en deux couches, en particulier dans les zones arrondies. Finalement on a prévu de coller à la résine époxy les joints de travail ainsi que les fissures inévitables situées dans les zones trop défavorables.

Hugues Bihan, ing. civil IUP Lorient
Losinger Construction SA
Ch. de Rente 26, CH – 1030 Bussigny-près-Lausanne

Michel Capron, ing. civil expert
BG ingénieurs-conseils SA
Av. de Cour 61, CH – 1001 Lausanne



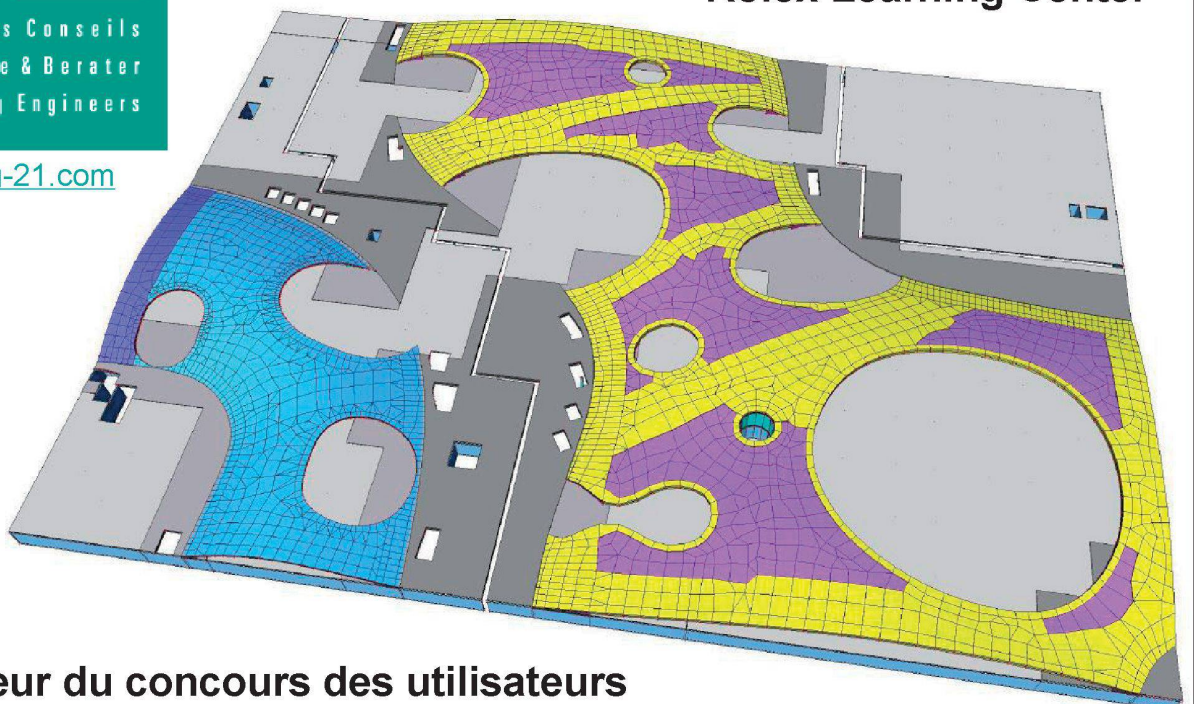
15

BG

Ingénieurs Conseils
Ingenieure & Berater
Consulting Engineers

www.bg-21.com

**Bureau expert et consultant
de l'entreprise totale du
Rolex Learning Center**



**Vainqueur du concours des utilisateurs
du logiciel de calculs de structures ESA-Scia-Nemetschek**