

Réparation de la couverture en voile mince d'un bâtiment

Autor(en): **Xercavins, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte**

Band (Jahr): **46 (1983)**

PDF erstellt am: **23.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-35867>

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.

Réparation de la couverture en voile mince d'un bâtiment

Instandsetzung eines Schalendaches

Repair of a Shell Roof Structure

Pierre XERCAVINS

Ing.-conseil
Freyssinet Int.
Boulogne, France



RESUME

La couverture en voile mince du bâtiment de l'émetteur d'Europe 1 au Felsberg (Sarre) a subi dès sa construction en 1954 un accident d'où sont résultées des dispositions assez originales pour la précontrainte. Une nouvelle précontrainte vient d'être effectuée, se substituant entièrement à la précontrainte d'origine, ce qui a permis de voir l'état de conservation des câbles et de montrer les infinies ressources de la précontrainte en matière de réparation.

ZUSAMMENFASSUNG

Schon bei der Errichtung des Schalendaches der Rundfunksendestation «Europe 1» auf dem Felsberg (Saarland) 1954 ereignete sich ein Missgeschick. Dies führte zu einer ziemlich eigenartigen Auslage der Vorspannung. Im Zusammenhang mit vor kurzem durchgeführten Reparaturarbeiten ist die Vorspannung völlig ausgewechselt worden, wobei der Zustand der Kabel genau erkennbar wurde. Die Arbeiten haben ferner die fast unbegrenzten Möglichkeiten der Vorspannung für Baureparaturen nochmals gezeigt.

SUMMARY

The shell roof of the broadcasting station Europe 1 building, on Felsberg suffered an accident during erection in 1954 which led to a quite unusual prestressing arrangement. During recent repair works new prestressing has been introduced in order to replace entirely the original. The replacement has fully disclosed the state of conservation of the original tendons and has once more demonstrated the versatility of prestressing for structural repairs.



Les émetteurs d'EUROPE N° 1 sont disposés dans un bâtiment couvert par un voile mince en béton précontraint, construit en 1954. Une faute de conception, sur laquelle nous reviendrons plus loin, devait entraîner la déchirure du voile encore sur cintre, lors des opérations de précontrainte initiale, en juillet 1954 ... d'où une première réparation sous la direction d'Eugène FREYSSINET et d'Yves GUYON.

Depuis cette intervention, la couverture s'est bien comportée et sans doute n'aurait-elle pas encore attirée l'attention sans un accident survenu en 1980, à Berlin, sur un voile mince présentant quelque analogie avec celui du Felsberg. Ceci est à l'origine des travaux de réparation que nous allons décrire, sur une structure riche d'enseignements, car la réparation a permis de mesurer les limites des techniques utilisées en 1954.

Le bâtiment est constitué par une série de poteaux supportant une ceinture en béton armé à laquelle est fixé un voile de couverture en béton précontraint, de 5 cm d'épaisseur. Les poteaux limitent une aire en forme de coeur, inscrite dans un rectangle de 86.50 m x 46 m. Entre les poteaux, les parois sont uniquement constituées par des vitrages (fig.1).

La ligne moyenne de la ceinture coiffant les poteaux est contenue dans deux plans symétriques par rapport à l'axe et inclinés de 20 % sur l'horizontale : l'arête du dièdre formé par ces deux plans est inclinée, les niveaux de cette arête étant à une hauteur de 4.50 m à une extrémité de l'axe et de 9.50 m à l'autre. Dans l'ensemble, cette ligne moyenne a la forme d'un coeur tracé sur un plan qu'on aurait plié par son milieu.

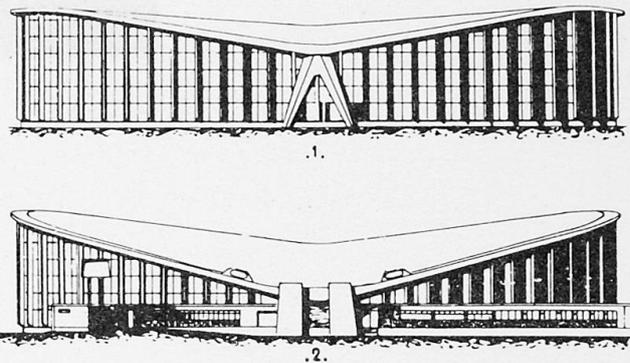


Fig.1 Façades du bâtiment

Le voile est précontraint par des câbles disposés perpendiculairement à son axe. La surface du voile est générée par des paraboles correspondant au tracé des câbles, tandis que les coupes parallèles à l'axe de symétrie du bâtiment présentent une courbure inversée très variable en raison de la forme de la ceinture. Les efforts divers s'exerçant sur cette ceinture sont équilibrés grâce à 6 tirants disposés en éventail à partir de la pointe du coeur (fig.2).

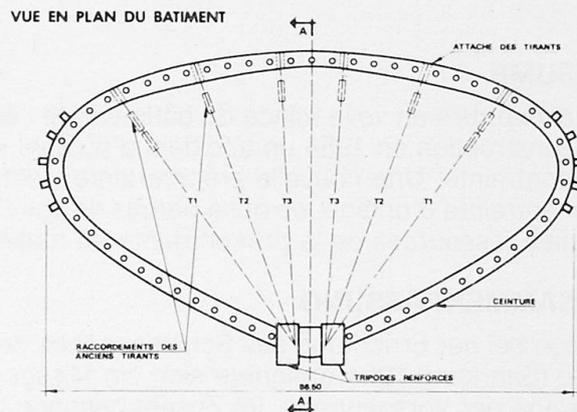


Fig.2 Disposition des tirants

1. ACCIDENT ET REPARATION DE 1954

Dans le projet initial, les tirants étaient passifs. De ce fait, lors du décintrement du voile par mise en précontrainte des câbles longitudinaux, le voile s'est déchiré parallèlement aux câbles, en raison de la déformation de la ceinture sous l'effet de la précontrainte : les tirants non tendus ne pouvant s'y opposer sans déformation excessive pour le voile.

Après cet accident, les tirants d'origine, constitués de 120 à 340 fils $\varnothing 5$, ont été raccordés à l'une de leurs extrémités par des épissures injectées au mortier, sur des câbles bouclés en U sur selles en béton. Celles-ci, prenant appui sur la ceinture, à l'extérieur du bâtiment, ont été écartées de 10 cm environ par l'action de 4 couches de vérins plats, afin de conférer la tension requise, de l'ordre de 500 MPa (pour des aciers de résistance à rupture 1400 MPa à cette époque). Rappelons qu'il s'agissait de câbles libres qui seraient donc soumis aux variations de contraintes consécutives aux variations de charges sur la couverture.

Quant aux câbles longitudinaux, des 12 $\varnothing 5$ à entr'axe moyen 0.30 m, on devait les inclure dans des nervures non prévues au projet initial, nervures obtenues par écartement des panneaux de fibres agglomérées sur lesquelles le voile était bétonné (une lère couche de panneaux jointifs assurant une isolation thermique générale, cachant entièrement le voile en béton). Le logement des câbles longitudinaux dans les nervures laissait la place dans le voile mince de 5 cm pour un ferrailage de répartition assez dense. Les panneaux de fibres étaient suspendus au voile par des épingles en acier galvanisé $\varnothing 3$ mm (fig.3).

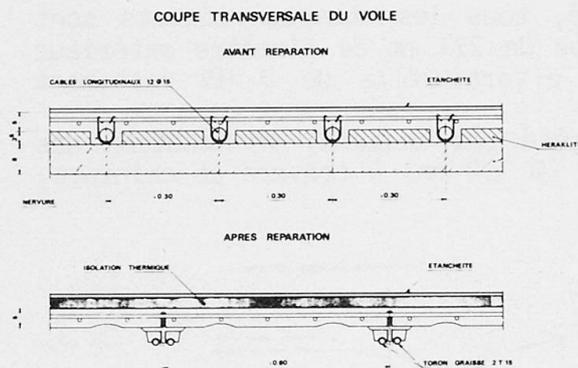


Fig. 3

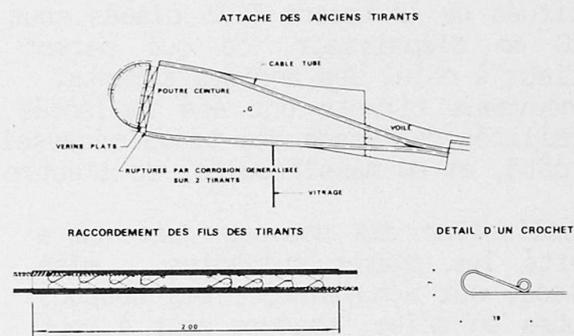


Fig.4

2. ETAT DE LA COUVERTURE EN 1980

Les premiers examens faits ont décelé une corrosion avancée avec rupture d'un certain nombre de fils d'un tirant, en partie basse du joint, côté selle de traction (fig.4). Par contre, quelques sondages faits en intrados de la voûte donnaient une vue rassurante des câbles longitudinaux, laissant à penser qu'il y aurait tout au plus à réinjecter ces câbles, opération maintenant supposée classique.

Toutefois, nous avons fait des investigations complémentaires nécessitant la dépose de quelques panneaux de fibres avant de fixer le détail des réparations, et voici ce que nous avons trouvé :

- corrosion avancée des épingles supportant les panneaux de fibres,
- aspect médiocre des nervures d'enrobage des câbles de précontrainte,
- corrosion des gaines apparentes en fond de nervure,
- corrosion superficielle mais assez généralisée des fils de précontrainte.

Par contre, le voile du béton s'est révélé très sain.

Le client ayant manifesté le désir d'une véritable "remise à neuf" de la structure, il a été décidé une substitution complète des câbles de précontrainte et des tirants, et l'exécution d'une protection thermique au-dessus du voile, afin de réduire les risques de condensation interne.



Tous ces travaux devaient se faire au-dessus des émetteurs en exploitation, avec des consignes strictes de sécurité imposant la mise en place d'un échafaudage général de protection et de travail, la sous-face de la voûte étant à une hauteur variable de 5 à 17 m.

3. SUBSTITUTION DES TIRANTS

Cette opération comportait nécessairement, de façon transitoire, des efforts complémentaires sur la couverture, faute de pouvoir synchroniser précontrainte des nouveaux tirants et suppression des anciens.

Aussi pour limiter les sollicitations parasites liées à cette phase des travaux, nous avons retenu des "tirants précontraints", nettement moins déformables que des tirants ordinaires, et pour réduire leur encombrement et leur poids, la section comprimée est celle d'un tube en acier rempli de béton.

Dans ce système, une partie T de l'effort de précontrainte P est appliquée à la ceinture, tandis que le tirant est comprimé par $P-T$: la répartition de la précontrainte dépendant de la flèche de construction du tirant, des raideurs relatives de la ceinture associées au voile, et du tirant, enfin de son poids propre équilibré par la réaction de courbure sous l'action de la traction T .

Par souci de simplification et de sécurité, tous les nouveaux tirants sont constitués de 19 torons T 15 placés sous tube de 273 mm de diamètre extérieur et 10 mm d'épaisseur, ce qui permet un effort utile de 3 MN nettement supérieur à celui des anciens tirants.

Les nouveaux tirants ont été implantés à côté des anciens, en fonction des possibilités de forage des trous nécessaires (\varnothing 100 mm) à travers la ceinture, d'un côté, et du massif culée, de l'autre.

La réalisation des nouveaux tirants a comporté les phases suivantes : mise en place, sur échafaudage, des coupons de tubes en acier, soudure bout à bout de ces tubes, enfilage de la gaine centrale placée sur des supports assurant sa bonne position, bétonnage par injection entre tube et gaine, enfilage des câbles, mise en tension par paire de façon sensiblement symétrique.

Pour les tirants les plus longs (1 et 6 longueur = 45 m), la flèche était de 51 cm à la construction, et 26 cm au décintrement, variation de flèche accompagnée d'une rotation importante, 2 %, à la liaison avec la ceinture. Déformation maximale en plan de la ceinture 3 cm.

Aussi a-t-on réalisé cette liaison sous forme d'articulation (fig.5). Les articulations métalliques devenues inutiles en service ont toutes été bloquées par bétonnage.

L'opération de démontage des anciens tirants, libres vis-à-vis de la structure, semblait présenter quelques risques inhérents à l'importance de l'énergie élastique accumulée.

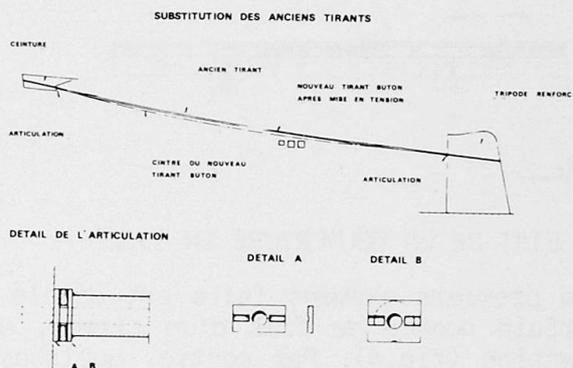


Fig.5



Fig.6 Eclatement du mortier à la coupe des tirants

En l'absence d'enrobage permettant des reports d'efforts entre fils, le tirant se comporte comme un paquet de fils pouvant être coupés successivement, et il suffit de "canaliser" le fouettement individuel des fils afin de protéger le personnel. Par contre, en cas de bonne adhérence des fils au mortier d'enrobage, celui-ci se met progressivement en compression par adhérence des fils coupés tandis qu'il y a surtension des autres fils. Deux instabilités peuvent apparaître : par compression, puis éclatement du mortier, ou par rupture simultanée du faisceau des fils non coupés.

Pour éviter ce dernier risque jugé le plus dangereux, nous avons dégagé le tirant de son mortier d'enrobage sur une longueur de 5 m, suffisante pour résorber si besoin par déformation plastique l'allongement élastique de 10 cm donné à la construction des tirants. La rétraction observée des premiers fils coupés, de l'ordre de 1,5 cm, correspond bien à la déformation élastique de ces fils sur la longueur libre. Cette rétraction est allée en croissant avec le report de compression par adhérence sur les parties latérales du tirant provoquant en fin de coupe un éclatement progressif du mortier (fig.6).

On a coupé les fils au disque de tronçonneuse et au chalumeau. Cette solution qui s'est avérée très pratique a été retenue après comparaison des 2 méthodes. La coupe des fils a permis de "retrouver" l'accourcissement élastique correspondant à l'allongement communiqué au tirant il y a 28 ans, à la précision des mesures.

4. SUBSTITUTION DES CABLES DU VOILE

La dépose, d'abord partielle de la lère couche de fibres agglomérées, montrait qu'on ne pouvait pas proposer une réparation valant neuf, et pouvant être garantie comme telle par les assurances, basée sur la pérénité de la précontrainte ancienne, quand bien même aucune rupture n'était constatée sur ces câbles. En effet, les barrières de protection de ces câbles étaient devenues illusoires : (fig.7)

- l'enrobage des câbles était souvent pratiquement nul, ce qui ne se voyait pas sous les panneaux de fibres,
- ou avaient disparu : la gaine en feuillard mince aggrafé de 0.2 mm était réduite à l'état de dentelle, par corrosion,
- Quant à l'injection, elle était très fragmentaire, et il nous semblait impossible de rétablir une protection efficace sur des câbles soumis à une corrosion encore superficielle, mais assez généralisée, sauf zones correctement injectées.

Le mauvais état du béton constituant les nervures - plus semblable à un mortier qu'à du béton - nous incita, pour examen plus approfondi, à couper une de ces nervures, avec son câble : la nervure, bétonnée en une lère phase entre les panneaux de fibres de la lère couche, était peu adhérente au voile lui-même, et pouvait assez facilement être détachée de façon progressive en profitant du plan de reprise.



Fig.7 Vue d'un câble bien injecté après dépose du 1er panneau de fibres



Comme au-dessus le voile béton lui-même était parfaitement sain, son épaisseur contrôlée par forage assez régulière, à savoir $5 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$, nous avons réalisé la substitution totale de la précontrainte comme suit.

La force de calcul des anciens câbles $12 \text{ } \varnothing 5 \text{ mm}$ était $F = 0.2 \text{ MN}$. Mais, pour des raisons diverses, dont essentiellement le frottement, leur "efficacité" était bien moindre, et les calculs refaits montraient qu'une précontrainte de 0.15 MN environ par nervure était bien suffisante, ce qu'on obtient actuellement avec un seul toron de 15 mm .

La substitution a consisté à déposer une nervure sur 4, puis à disposer en précontrainte externe sous la couverture 2 torons de 15 mm graissés sous gaine plastique aux emplacements disponibles, puis dépose de 2 anciennes nervures, remplacées par un nouvel ensemble de 2 T 15 sous l'une d'entre-elles, et enfin, dépose du dernier quart des anciennes nervures. En phase finale, nous avons maintenant un espacement de "bandes porteuses" sous la dalle double de l'ancien entr'axe, soit $2 \times 0.30 \text{ m}$, compatible avec la résistance locale de la voûte.

Chaque bande est ainsi appuyée sur 2 torons T 15, que les réactions de courbure appuient sur le voile par l'intermédiaire de petites cales en béton de fibres régulièrement distribuées tous les 1.50 m , cette distribution ayant été retenue parce qu'il était impossible de créer un appui continu propre en intrados du voile, ne risquant pas de blesser la protection des torons (fig.3).

Une grande précision de pose a dû être recherchée afin d'obtenir un tracé effectivement régulier, tant en plan qu'en élévation : les déviations en plan risquant de créer des poussées transversales faisant glisser les cales, et les erreurs en élévation pouvant annuler la portance de certains patins.

Des forages ont dû être pratiqués dans les ceintures afin d'y ancrer les câbles porteurs au plus près possible des fibres extrêmes. Compte-tenu de la géométrie du voile, cette condition a nécessité, selon les cas, un seul forage avec ancrage en extrados, ou 2 forages avec une zone de raccordement en extrados de ceinture (fig.8).

Compte-tenu d'une géométrie à la fois complexe et mal définie, ceci a nécessité des relevés préalables aux forages, convertis sur ordinateur en instructions numériques avec sorties graphiques, câble par câble.

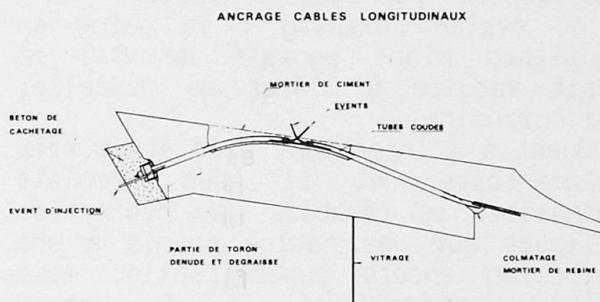


Fig.8

5. MODE DE CALCUL

Alors que la première réparation de 1954 avait fait appel à l'expérience des plus éminents ingénieurs de l'époque pour atteindre par des approches quelque peu intuitives l'état de la structure, la nouvelle étude a été conduite en utilisant les énormes possibilités de l'Informatique, d'abord pour les problèmes de géométrie déjà évoqués, mais aussi pour réétudier la stabilité de la coque mince de 5 cm , grâce à des calculs précis de déformabilité, tenant compte des effets du second ordre, et de quelconques défauts de géométrie.

Le modèle de calcul (fig.9) utilisant le programme HERCULE a donné des résultats bien vérifiés par les mesures in situ, partout où l'importance des déformations a permis ce type de contrôle, par exemple lors du décintrement des tirants. Ces calculs ont montré que la structure était finalement très saine, malgré sa très grande légèreté, et justifiait pleinement la "remise à neuf" de la précontrainte.

DEMI VUE EN PERSPECTIVE DU MAILLAGE ELECTRONIQUE

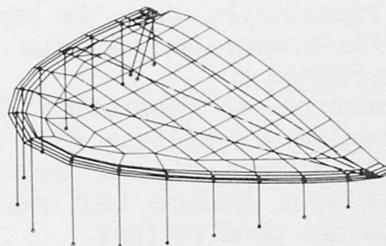


Fig.9

6. PERENNITE DE LA PRECONTRAINTTE

Le premier accident, lors de la construction, avait conduit les intervenants de l'époque à "faire de leur mieux" lors de la réparation, en particulier au niveau des injections, opération que l'on savait déjà délicate. Aussi les tirants avaient été "bétonnés" en rigole en leur partie courante, interne au bâtiment : protection qui s'est révélée parfaitement efficace.

Le premier examen n'avait fait apparaître qu'un défaut grave de protection des câbles d'un tirant à sa pénétration en intrados de la ceinture, au droit du joint de vérinage : absence d'injection en une zone exposée en façade, d'où corrosion ordinaire, mais généralisée, des fils en acier \varnothing 5 mm, avec rupture d'un certain nombre d'entre-eux.

La dépose complète des tirants a montré qu'à un moindre degré ce défaut existait sur d'autres tirants, mais toujours au même endroit, particulièrement exposé quant aux venues d'eau, à la limite basse du joint et de la traversée de ceinture mal injectée.

Quant aux câbles longitudinaux, leur injection avait été faite avec de multiples événements, facile à mettre dans un voile aussi mince, ce qui aurait dû suffire à assurer la qualité de l'injection.

Au bout de 28 ans, nous n'avons pas trouvé de fils rompus malgré une corrosion plus ou moins généralisée, et bien sûr l'absence de corrosion dans les zones injectées (fig.10).

L'absence d'injection locale, mais fréquente, est essentiellement due à la non-étanchéité des gaines en feuillard très mince utilisées à l'époque (0.2 mm), et à l'enrobage souvent quasi inexistant des gaines, au contact des panneaux de fibres entre lesquels elles avaient été disposées : des plaques de mortier très analogues au "coulis" d'injection ont été trouvées en effet un peu partout entre les 2 couches de panneaux de fibres, mortier qui certainement a contribué à éviter la chute des panneaux malgré la corrosion des épingles de suspension, mais qui n'était plus où on supposait l'avoir injecté ...

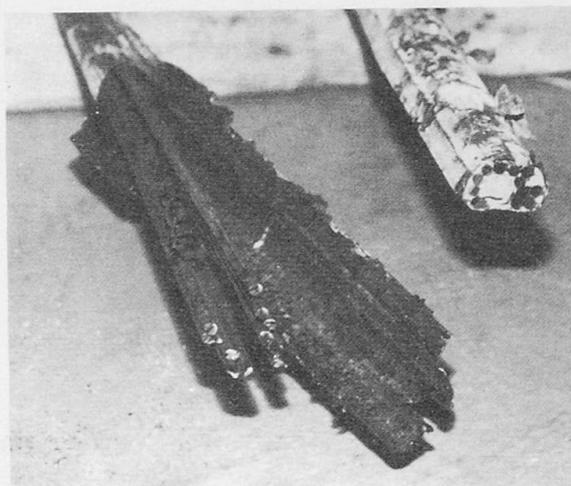


Fig.10 Etat des câbles 12 \varnothing 5 selon injection après 28 ans



On peut conclure qu'on a sans doute eu la chance d'avoir des aciers non sensibles à la corrosion fissurante.

Mais faut-il dire "la chance", ou au contraire, à la lumière de tous les incidents répertoriés dans le monde, dire que le phénomène inquiétant de corrosion fissurante ne concerne que certains aciers qui ont été très peu utilisés en France ?

Et, en l'absence de "corrosion fissurante", il faut du temps pour que la corrosion banale accomplisse son oeuvre destructive, du moins dès que l'on a pris les précautions d'usage pour éviter les venues d'eau, précautions qui, bien sûr, doivent inclure tout particulièrement l'examen des points singuliers au voisinage des pénétrations.

7. INTERVENANTS

Les travaux ont été confiés par EUROPE N° 1 à FREYSSINET INTERNATIONAL. Ils ont été réalisés par l'agence régionale de Nancy (STUP-FRANCE).

Le contrôle technique a été assuré conjointement par SOCOTEC et CEP (contrôle des études et des travaux), et par le Dr. Ing. Rudolf KUHN, de Sarrebrück, plus spécialement chargé de la sécurité du travail.

La réétude de la voûte a été faite par EUROPE-ETUDES-GECTI, en utilisant le programme aux éléments finis "Hercule", développé par SOCOTEC.

Je tiens à remercier l'ensemble de ces intervenants et les exploitants de la station pour leur participation active à la recherche des meilleures solutions, participation qui a permis de définir les méthodes, puis de les mettre en oeuvre en guère plus d'un an, l'ensemble des travaux ayant été faits au-dessus des émetteurs en exploitation.

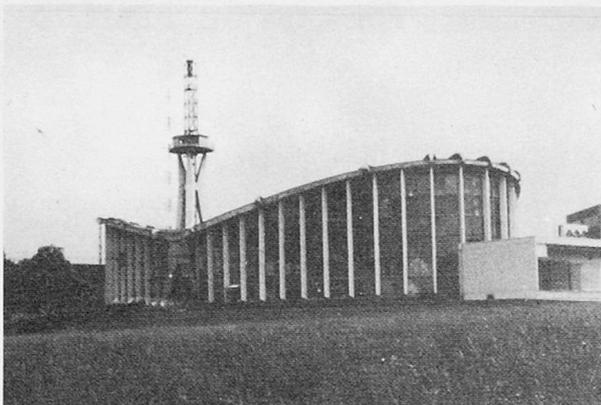


Fig.11 Vue extérieure

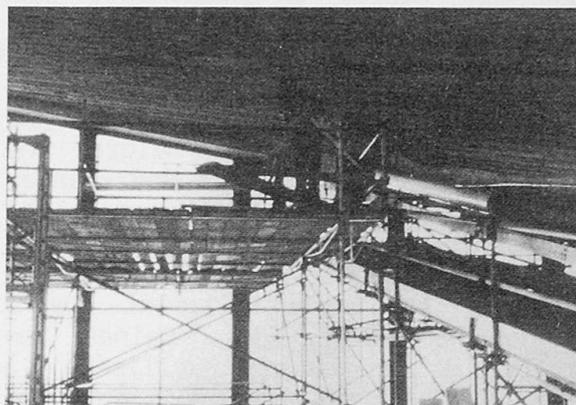


Fig.12 Vue intérieure partielle en cours de travaux

BIBLIOGRAPHIE

1. E. FREYSSINET, Incidents survenus au cours de la construction du bâtiment des émetteurs du FELSBERG (EUROPE N° 1) - TRAVAUX, février 1956.