

LE BARRAGE D'ESCH-SUR-SURE

Les raisons de la vidange du Lac et les travaux d'assainissement du Barrage

par Monsieur Georges MOLITOR,
ingénieur-chef de division de l'Administration des Ponts et Chaussées, Préposé à la Division des Eaux

LE BARRAGE D'ESCH-SUR-SÛRE

Les raisons de la vidange du Lac et les travaux d'assainissement du Barrage

par Monsieur Georges MOLITOR,

ingénieur-chef de division de l'Administration des Ponts et Chaussées, Préposé à la Division des Eaux

I. INTRODUCTION

En 1989 le Ministère des Travaux Publics va procéder à la vidange complète du barrage d'Esch-sur-Sûre, pour pouvoir faire certains travaux de réparation sur la voûte de l'ouvrage. Le présent article essaie d'expliquer les raisons qui ont amené les responsables à décider cette mesure exceptionnelle, et présente les travaux nécessaires pour assainir le barrage d'une façon définitive.

II. PRESENTATION DU BARRAGE

Le barrage de la Haute-Sûre se situe au nord du pays à 1,2 km en amont de la localité d'Esch-sur-Sûre. Son bassin versant, situé entièrement dans les roches primaires des Ardennes, a une superficie de 428 km², dont 64% se trouvent en Belgique et seulement 36% en territoire luxembourgeois.

Remplie jusqu'à la cote maximale de 322, la retenue a une capacité d'emménagement de 60 millions de m³; son plan d'eau s'étend sur 19 km et inonde 380 ha de terrains.

Le mur du barrage est du type à voûte mince à double courbure. En coupe verticale, il se présente avec un surplomb vers l'aval; en plan horizontal, il a un rayon de courbure de 80 mètres (Figure 1). En clé de la voûte, l'épaisseur est de seulement 1,50 mètre en haut et s'élargit jusqu'à 4,30 mètres à son pied.

A chaque extrémité la voûte s'appuie sur des culées massives d'un poids de ca 6 000 tonnes cha-

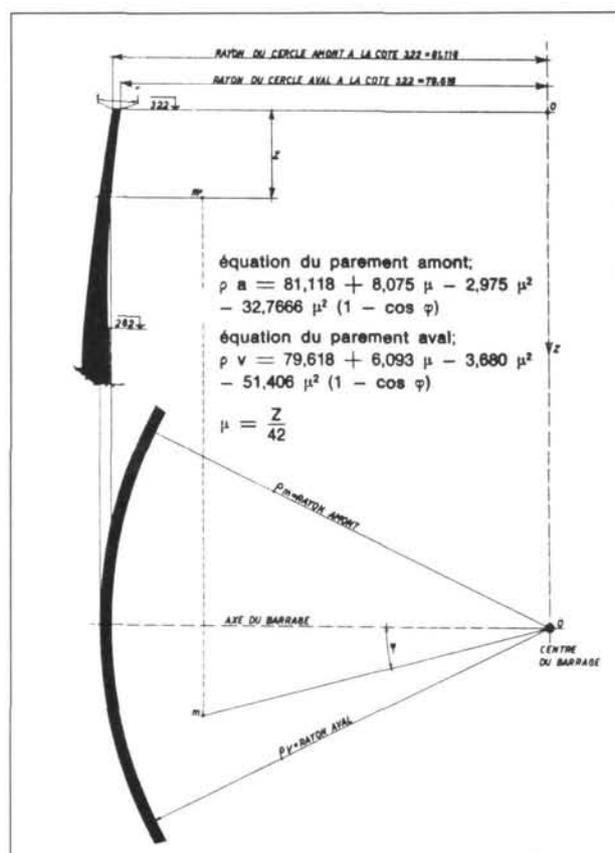


Figure 1: Eléments géométriques du barrage.

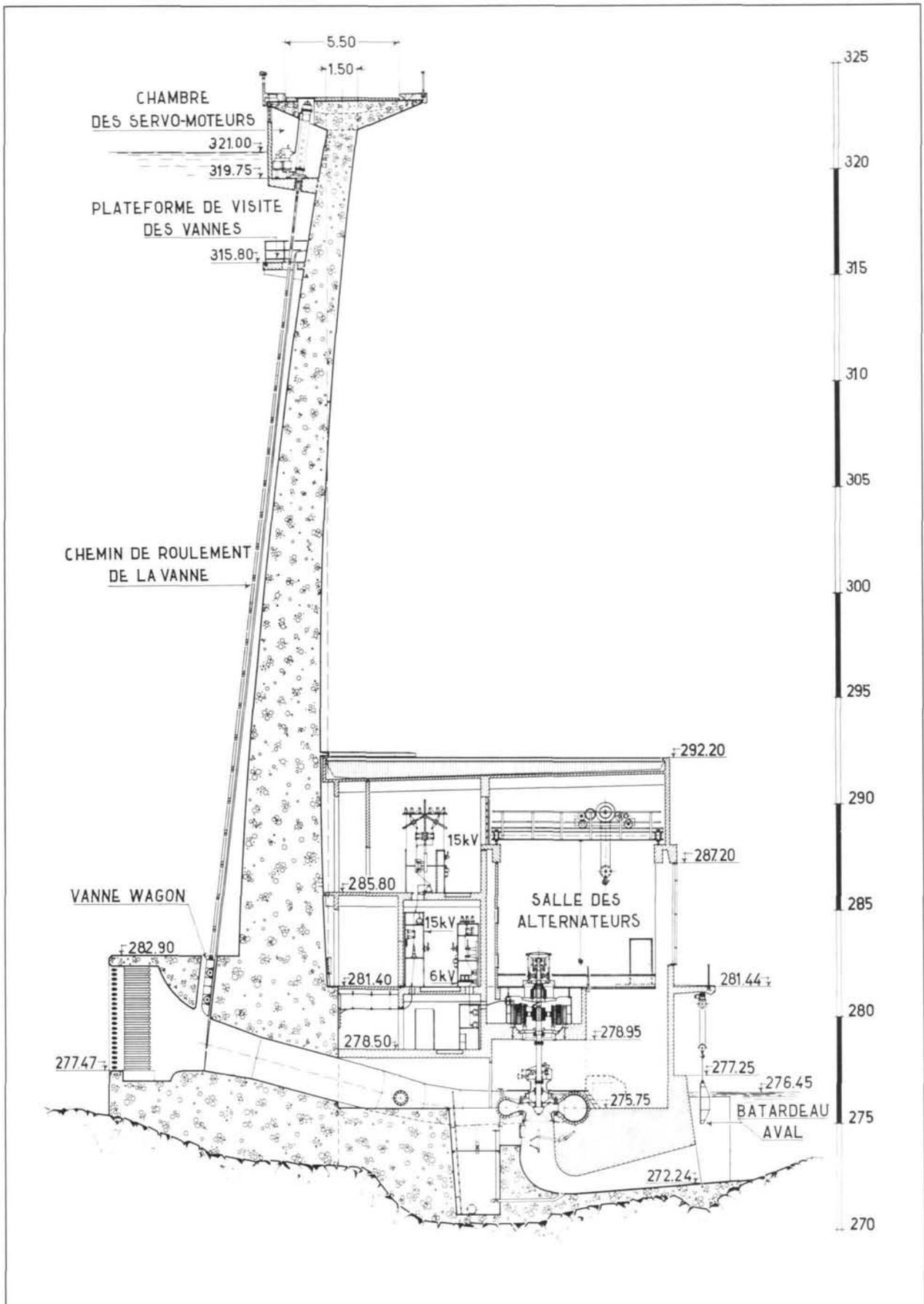


Figure 3: Coupe par le barrage, une prise d'eau et un groupe.

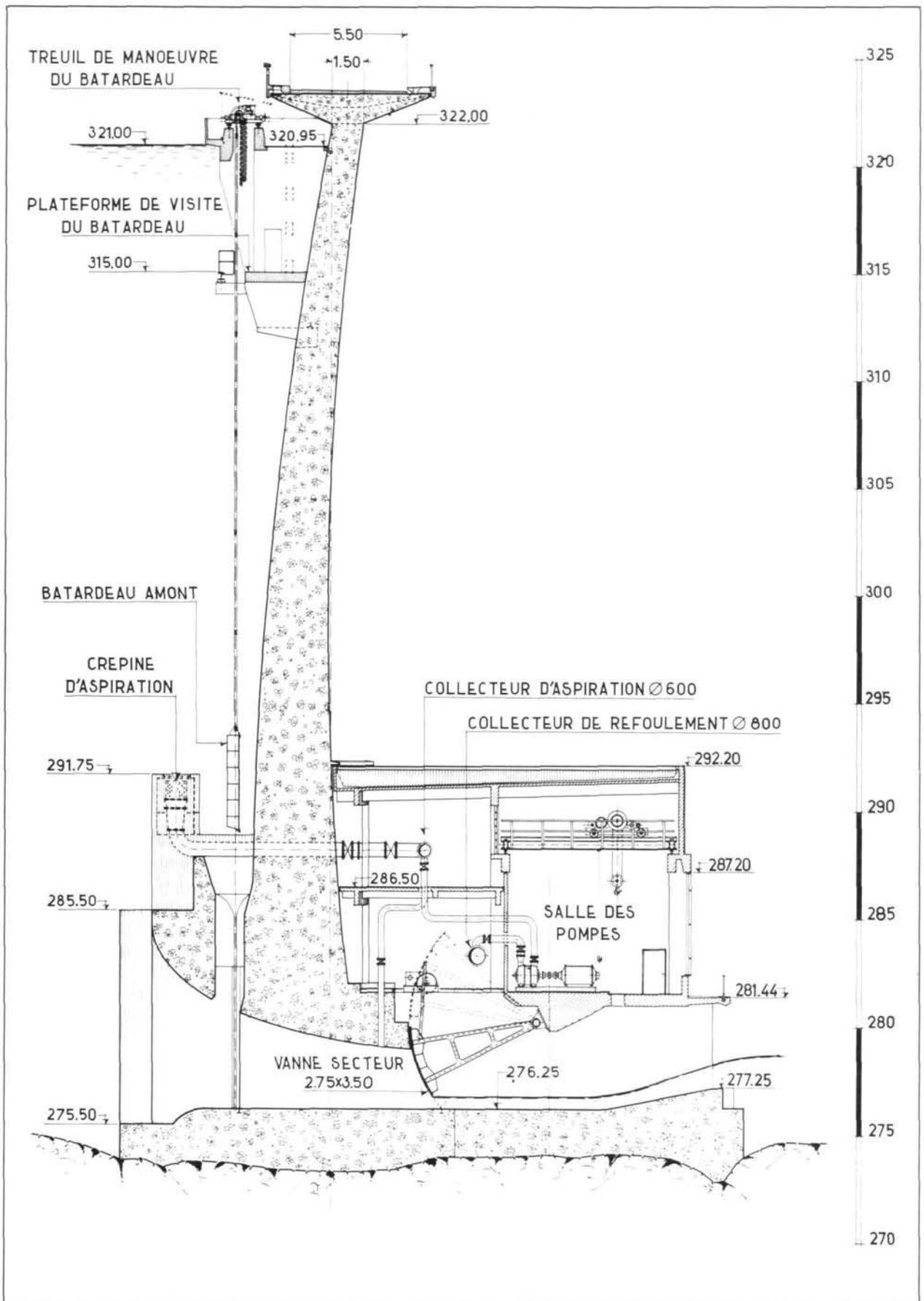


Figure 4: Coupe par le barrage, un évacuateur de crues et la salle des pompes.

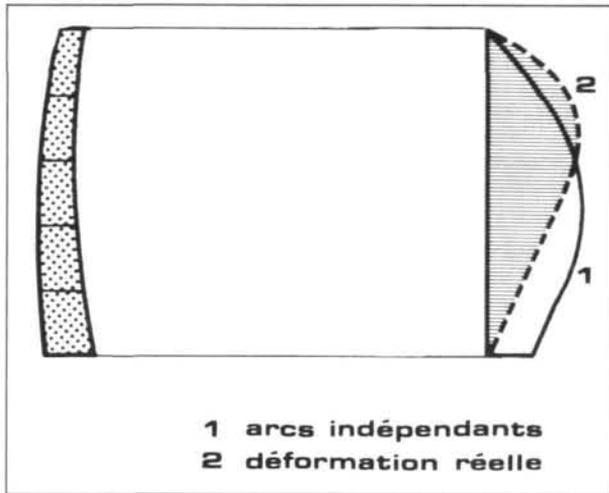


Figure 5: Déformations en clé de la voûte.

sant sur les consoles déforme ces dernières, de sorte qu'en chaque point de la voûte, il y ait équilibre dans les déformations. Une force P agissant en un point donné est décomposée en une force P_a sollicitant l'arc et une force P_c sollicitant la console (Figure 6). La déformation du plot hachuré par tous les efforts ($P_a(i)$) agissant sur l'arc, doit être égale à la déformation de cette même zone sous l'action de tous les efforts ($P_c(j)$) sollicitant la console.

La figure 7 montre le résultat d'un tel ajustement des déformations en clé d'une voûte. En bas de la voûte, l'arc est soulagé par la présence de la console, alors qu'en haut, la console a tendance à se déformer très fortement, de sorte qu'elle charge de son côté les arcs, qui s'opposent à cette déformation.

Le dessin au milieu de la figure représente un cas de charge typique pour une console d'un barrage voûte, et celui à droite montre la ligne de déformation y correspondante. On se rend compte que les arcs supérieurs sont plus libres à travailler que ceux du bas de la voûte. La raideur de l'encastrement du pied entraîne d'inévitables tractions au pied amont des consoles centrales.

Comme résultante du fonctionnement en coque, on obtient des arcs actifs qui, en haut de la voûte, où les arcs travaillent, sont plus horizontaux et, en bas de la voûte, où les consoles travaillent, deviennent de plus en plus plongeants.

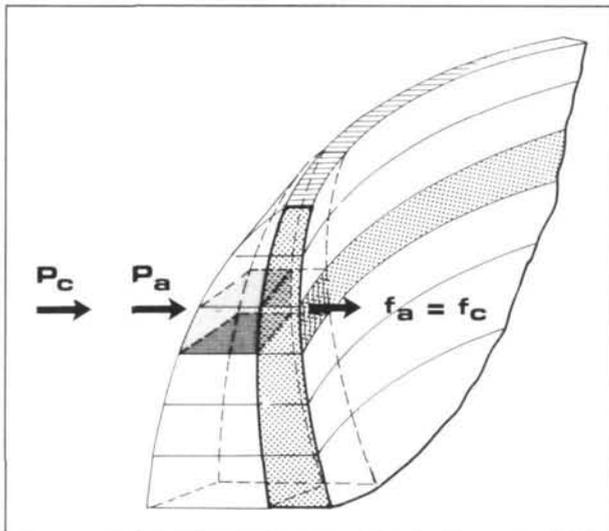


Figure 6: Principe de la méthode de calcul.

2) L'étanchéité du barrage

a) Les reprises de bétonnage

La voûte du barrage a été bétonnée en 16 plots d'une largeur de 10 mètres chacun, réalisés par coffrage grim pant à un rythme de un élément de 1,50 mètre de hauteur tous les trois jours. Malgré ce cycle très court, le joint de reprise horizontal a subi un traitement spécial. Après le début de prise, la surface du béton fut lavée au jet d'eau à haute pression pour enlever la laitance entre les granulats; avant la mise en place du béton de l'élément suivant, la surface ainsi nettoyée a été recouverte d'une couche de mortier 0/6 à dosage de ciment élevé sur une épaisseur moyenne

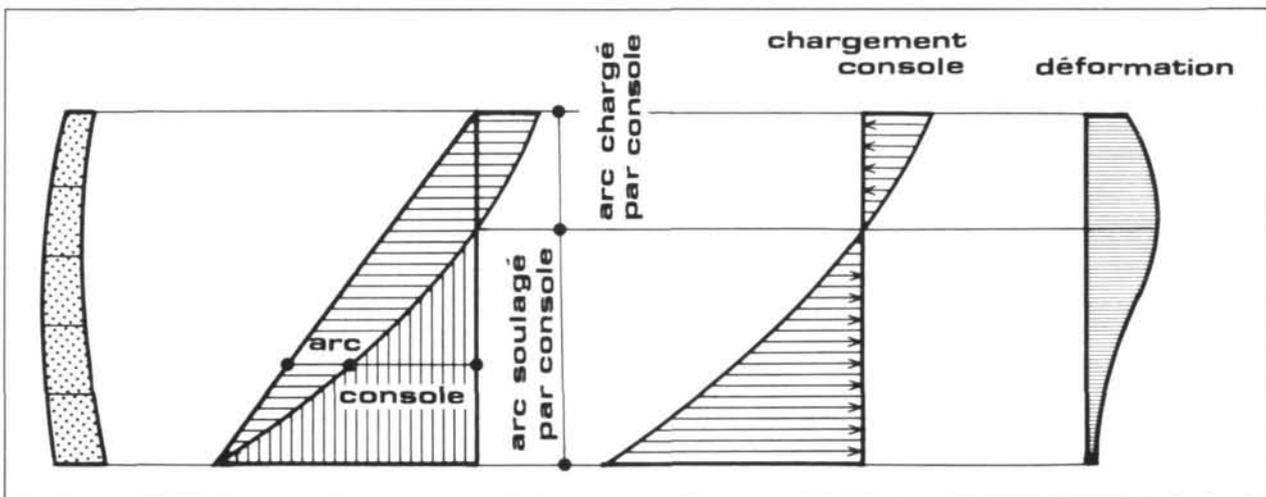


Figure 7: Résultat d'un ajustement des déformations en clé d'une voûte.



Photo 1: Bétonnage de la voûte.

de 3 cm. Cette façon de procéder permettait d'avoir assez de constituants fins au droit du joint de reprise pour en garantir l'étanchéité (Photo 1).

L'étanchéité du joint vertical entre deux consoles adjacentes a été réalisée à l'aide de lames métalliques en forme de Z ancrées de part et d'autre dans le béton. Sur la face amont, cette lame est en cuivre et sur la face aval, elle est en tôle. Ces lames, qui avaient une longueur de 4 mètres, furent assemblées par soudage avec un recouvrement d'une dizaine de centimètres seulement. Ce point de liaison constitue éventuellement un point faible dans le système d'étanchéité. Pour départager les compartiments permettant le clavage entre les plots, les lames placées verticalement ont été combinées avec d'autres lames, mises en place horizontalement. Le clavage qui, rappelons le, sert uniquement à combler les vides dus au retrait et au fluage du béton et non pas à mettre la voûte en compression, a été réalisé en deux étapes: une première intervention a été faite en 1958 suivie d'une deuxième pendant l'hiver 1959/60 (Figure 8).

b) L'étanchéité du sous-sol

Pour empêcher les eaux du barrage de contourner le mur par le rocher de fondation, mais également

pour éviter des sous-pressions sous l'ouvrage, le sous-sol a été étanché du côté amont de la voûte par un rideau d'injection conventionnel à l'aide de forages espacés de 5 mètres et poussés jusqu'à une profondeur de 30 mètres.

Pour régénérer la roche ébranlée par les explosifs et pour assurer en même temps une jonction parfaite du béton au rocher, la zone de contact a été traitée par des injections de collage. Des trous très courts dirigés de l'aval vers l'amont et de l'amont vers l'aval et descendant jusqu'à 5 mètres en-dessous de l'interface béton-rocher ont été injectés au ciment sous une pression de 5 bars (Figure 9).

Pour mettre les culées à l'abri de poussées hydrauliques directes et de sous-pressions, la fonction d'étanchéité est retournée aux deux culées de la voûte vers les rives par des murs en aile (Figure 10).

c) La protection de la voûte

Pour terminer ce chapitre et pour compléter l'énumération des mesures d'étanchement, il faut encore relever que le parement amont de la voûte a été revêtu d'un enduit spécial renforcé par une toile de verre, jouant certes un rôle d'étanchéité, mais servant surtout à protéger le béton contre l'agressivité de l'eau de la retenue (Photo 2).

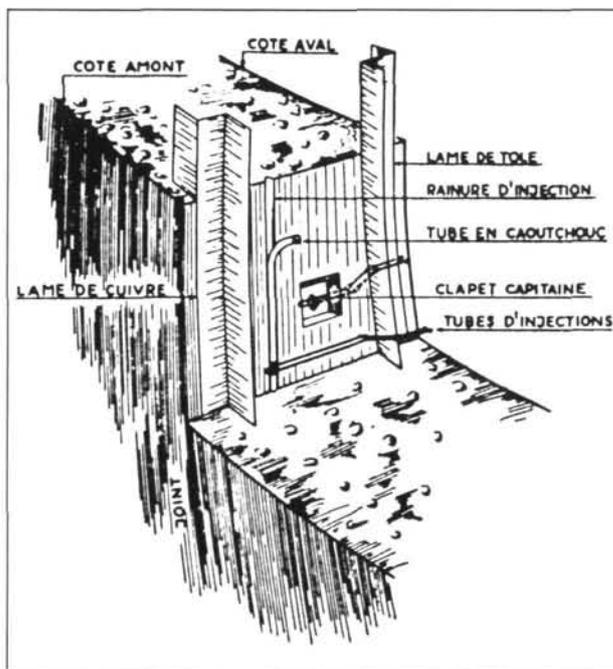


Figure 8: L'étanchéité des joints verticaux.

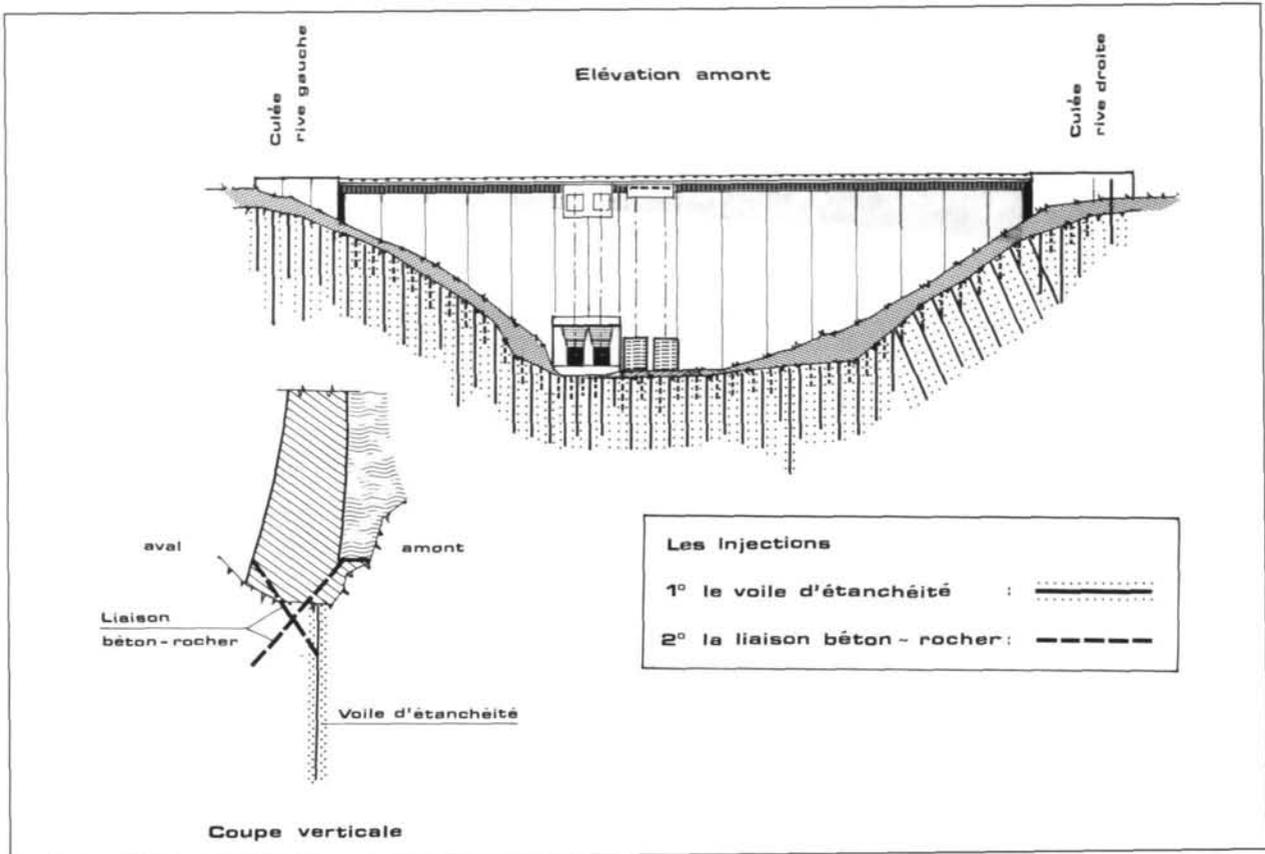


Figure 9: Ecran d'étanchéité du sous-sol.

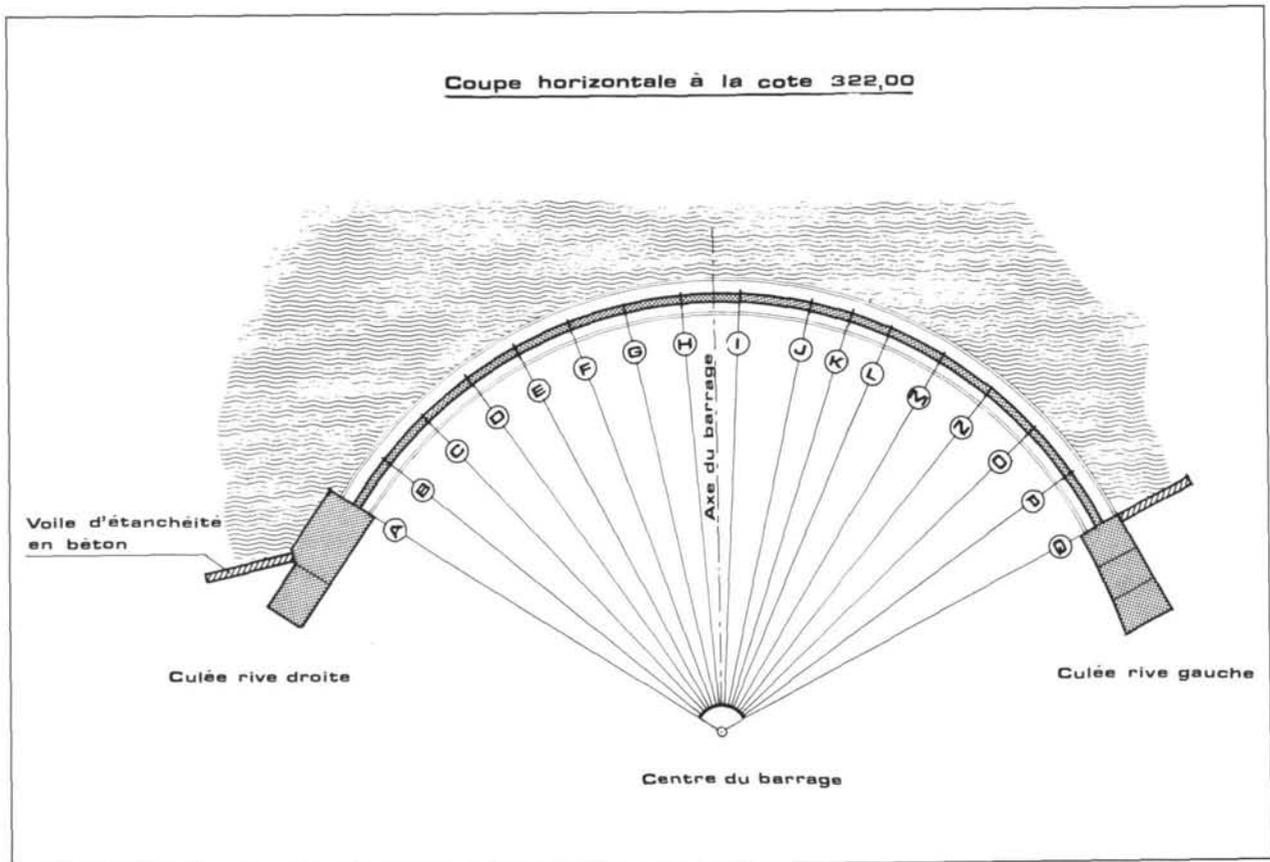


Figure 10: Voile d'étanchéité des culées.



Photo 2:
Enduit de protection du
parement amont de la voûte.

III. LES RESULTATS DE 25 ANS D'AUSCULTATION

Le barrage est équipé de plusieurs systèmes d'auscultation, qui représentent des moyens de contrôle absolument indispensables pour assurer la sécurité de l'ouvrage. Ils permettent de détecter des désordres et donnent aux ingénieurs responsables la possibilité d'intervenir à temps pour y remédier.

Si on dit auscultation, on dit déformation, fuites et pressions d'eau. Ce chapitre montre les déformations caractéristiques de la voûte et fait le bilan des fuites. Pour arrêter les venues d'eau à travers le mur du barrage, plusieurs compagnes d'injections ont dû être faites au fil des années; les principales interventions sont présentées à la fin de ce chapitre.

1) Contrôle des déformations

La voûte du barrage se déforme notamment sous la charge hydrostatique et sous les effets des variations thermiques saisonnières. La mesure des déplacements est faite à l'aide d'instruments géodésiques régulièrement depuis la construction de l'ouvrage.

Malheureusement la partie inférieure de l'ouvrage, qui est d'un intérêt particulier parce qu'elle est le siège des désordres, est cachée par l'usine et ne peut pas être observée par des instruments optiques (Figure 11). Pour cette raison, une instrumentation spécifique a été installée il y a quelques années, avec notamment un clinomètre contre le parement aval de la voûte, dans l'usine. On s'apprête en complément à rajouter quelques pendules inversés, (fils verticaux ancrés en fond de forages profonds d'une vingtaine de mètres) pour surveiller finement les mouvements du pied de la voûte, qui, précisions-le, sont millimétriques.

Comme déjà dit les déplacements ont été enregistrés dès le début, c'est-à-dire depuis la première mise en eau du barrage, de sorte qu'on dispose d'une grande quantité de données. L'analyse de ces données met en évidence des déformations normales de

la voûte, maximales dans la partie supérieure de l'ouvrage au centre de la vallée.

La figure 12 montre quelques flèches caractéristiques prises par la console de clé. On y voit:

- l'effet du réchauffement estival (représenté entre l'hiver et l'été 1959, à retenue vide, mais que l'on retrouve systématiquement les années suivantes, à retenue pleine, avec une amplitude équivalente),
- l'effet élastique du remplissage,
- la déformation inélastique constatée sur les premières années de la vie de l'ouvrage, (attribuable à une part d'irréversibilité dans la compression des appuis)
 - entre l'état initial vide 1959, et le seul état vide connu ensuite, (vidange complète de 1966)
 - entre le premier remplissage en hiver 1960, et l'état de l'hiver 1965,
- une certaine dérive sur une période de 20 ans, entre les années 65 et les années 85 (attribuable au fluage du béton).

La figure 13 montre, en fonction du temps, la flèche prise par le repère médian (C) de la console de clé. Les très nombreuses mesures disponibles ont été l'objet d'une analyse statistique permettant de dégager sur la période d'exploitation régulière de 1970-1984, pendant laquelle la retenue a peu fluctué en dessous de son niveau maximum,

- l'effet saisonnier, qui fait osciller la clé de la voûte de 15 à 20 millimètres entre l'été et l'hiver,
- l'effet hydrostatique différentiel sur les derniers mètres de remplissage, qui représente à peu près 1 mm par mètre de variation de la retenue,
- un terme de dérive, de l'ordre de 3 mm tous les 10 ans.

La voûte d'Esch-sur-Sûre, comme tous les autres ouvrages de ce type, est presque autant sensible à la

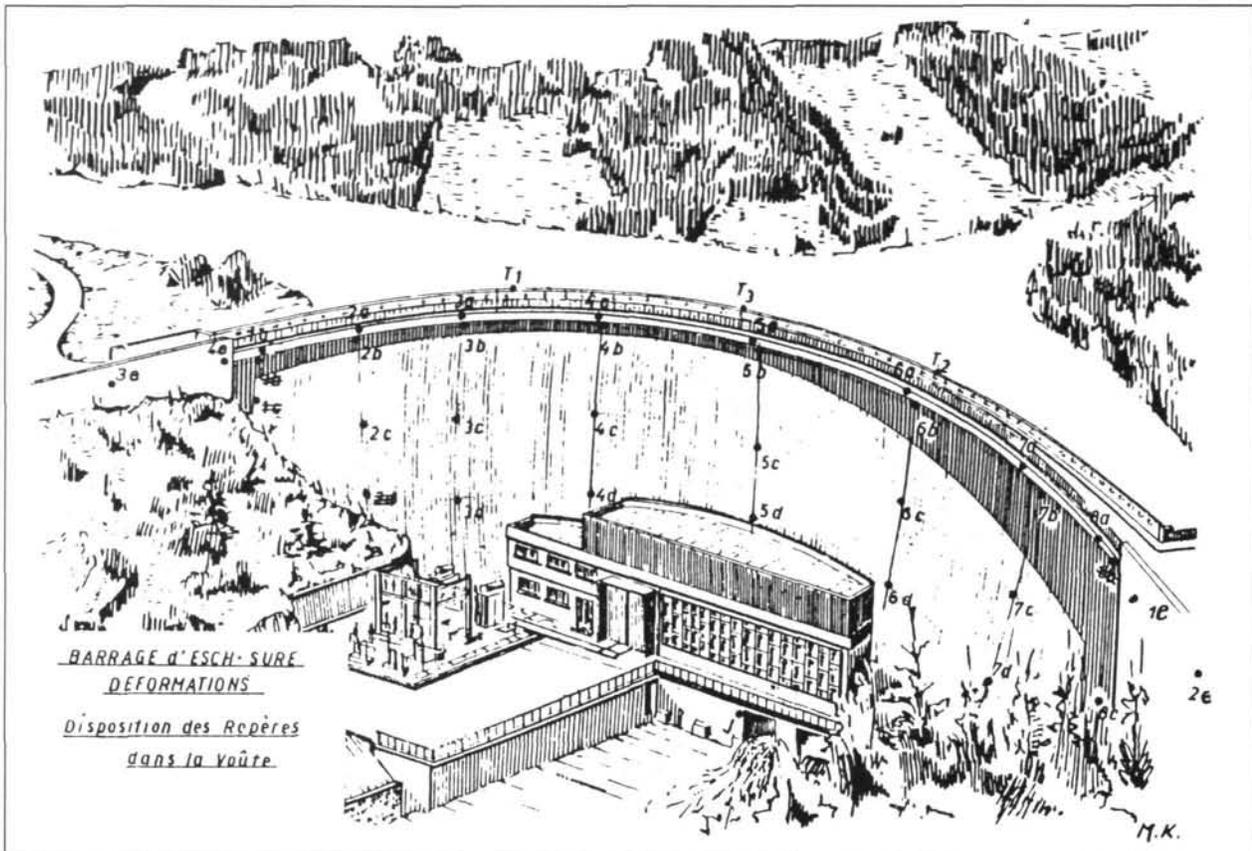


Figure 11: Position des repères sur la voûte.

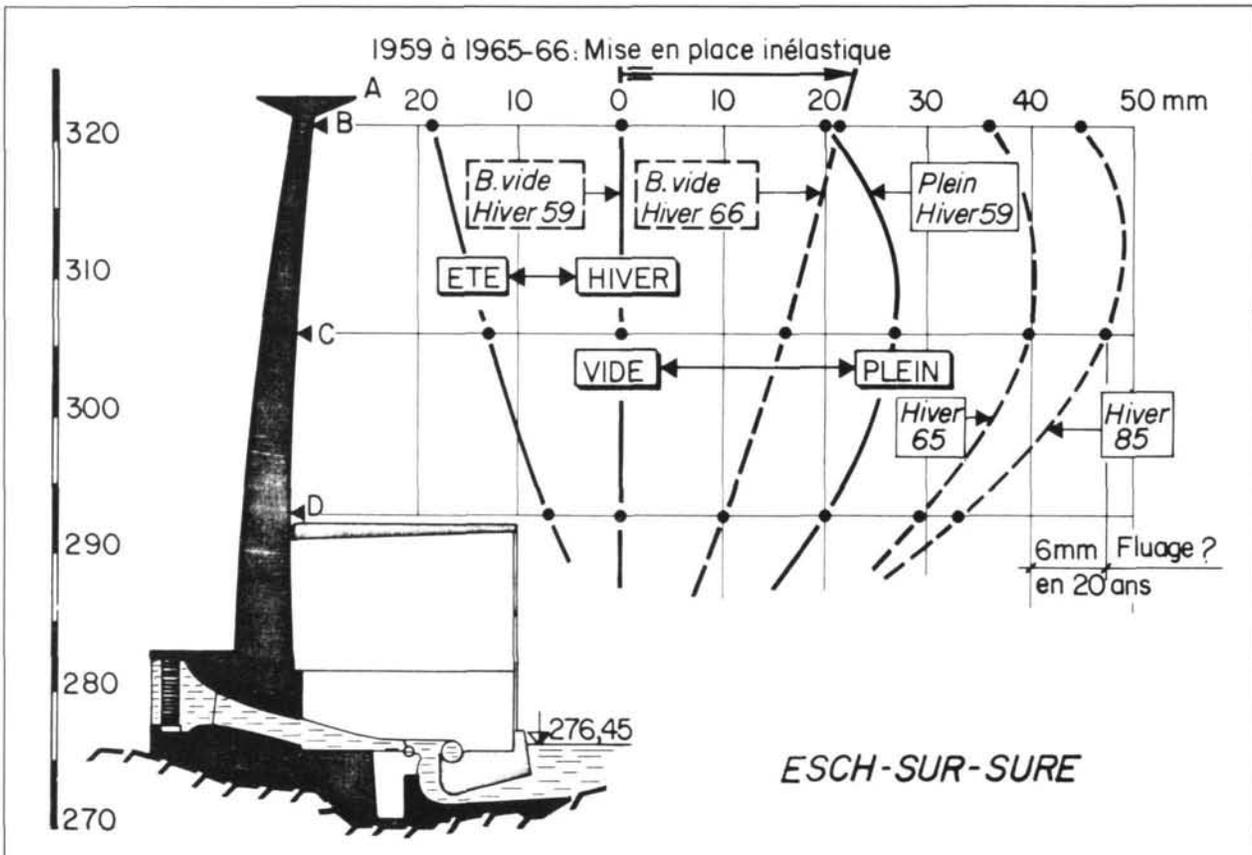


Figure 12: Lignes de déformation de la console de clé.

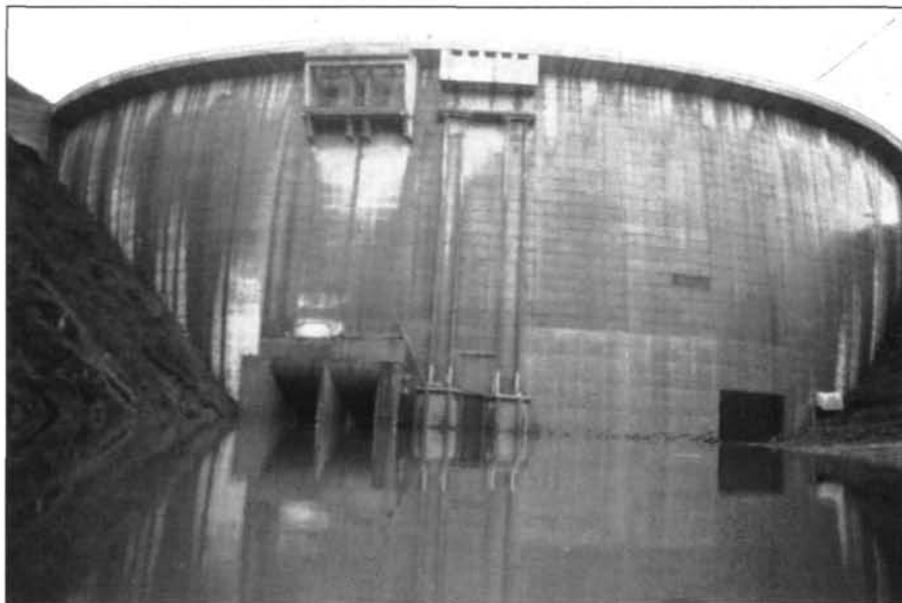


Photo 3:
Parement amont:
zone fissurée.

température moyenne des dernières semaines, qu'à son état de remplissage. Si le niveau de la retenue varie peu, elle se comporte comme un véritable thermomètre saisonnier.

2) Le bilan des fuites

Au pied de la voûte, au droit des plots centraux F-G-H-I, certains joints de reprise n'ont pas résisté aux sollicitations de traction et aux déformations de la voûte et se sont fissurés. Chaque année en période hivernale, lorsque la voûte se penche vers l'aval et que s'ouvrent les fissures sur le parement amont, des fuites se manifestent et déversent leurs eaux principalement dans la galerie des câbles de l'usine électrique.

Cette situation est illustrée par les figures 14 et 15 et par la photo 3 prise avant le remplissage de la retenue. La figure 14 montre un croquis schématisé de la zone affectée, qui s'étend des pertuis de fond jusqu'aux massifs de blocage de la rive droite. On y a indiqué les fissures et les joints de reprise ouverts. Pour pouvoir contrôler la fréquence des mouvements alternatifs et l'amplitude des ouvertures, trois fissuromètres ont été placés à cheval sur ces joints (F1, F2, F3). L'emplacement de la galerie des câbles de l'usine est marqué en tireté.

Est également représentée sur cette figure la position du limnimètre qui enregistre en permanence les variations du plan d'eau de la retenue.

La figure 15 montre la même partie de l'ouvrage vue du côté aval, donc de l'intérieur de l'usine. On reconnaît très bien le blocage solidaire à la voûte et les bétonnages de deuxième phase faisant partie de l'usine. On voit sur la galerie des câbles où les suintements d'eau sortent au niveau 280 par un joint entre un élément de la voûte et un élément de cachetage supportant la structure de l'usine. A partir de cette galerie des câbles, deux séries de drains furent aménagées. Une première, placée dans le coin, descend

avec une légère inclinaison vers l'amont jusqu'au joint de reprise 277 complètement fissuré. Une deuxième série de drains, aménagée dans le plancher de la galerie, descend verticalement jusqu'à plusieurs mètres de profondeur dans le rocher sous le pied aval de l'ouvrage.

Date	Plan d'eau	Débit
01.03.78	317.14	8
02.01.79	320.04	21
07.02.80	320.73	143
17.03.81	320.21	102
26.02.82	318.87	288
17.02.83	317.46	540
09.02.84	321.57	478
23.02.84	319.08	202
14.01.85	317.62	163
11.02.86	315.56	23

Figure 16: Bilan des fuites d'eau (litres/minute).

Le tableau de la figure 16 montre l'évolution des fuites au fil des dernières années; est représenté le total des débits, c'est-à-dire la somme de ceux recueillis par les deux séries de drains et de ceux dus aux suintements diffus.

Sur ce tableau on voit que:

- Pendant les années 81, 82 et 83, le débit des fuites a sensiblement augmenté, quoiqu'en même temps le niveau de la retenue a été de plus en plus abaissé.
- Le débit des fuites dépend notamment du niveau du plan d'eau; lorsque celui-ci est abaissé, le débit chute immédiatement (09.02.84-23.02.84).
- Après l'abaissement du plan d'eau de cinq mètres, le débit des fuites est devenu insignifiant (11.02.86).

En analysant plus finement toutes les mesures faites jusqu'à présent, les conclusions suivantes se laissent dégager:

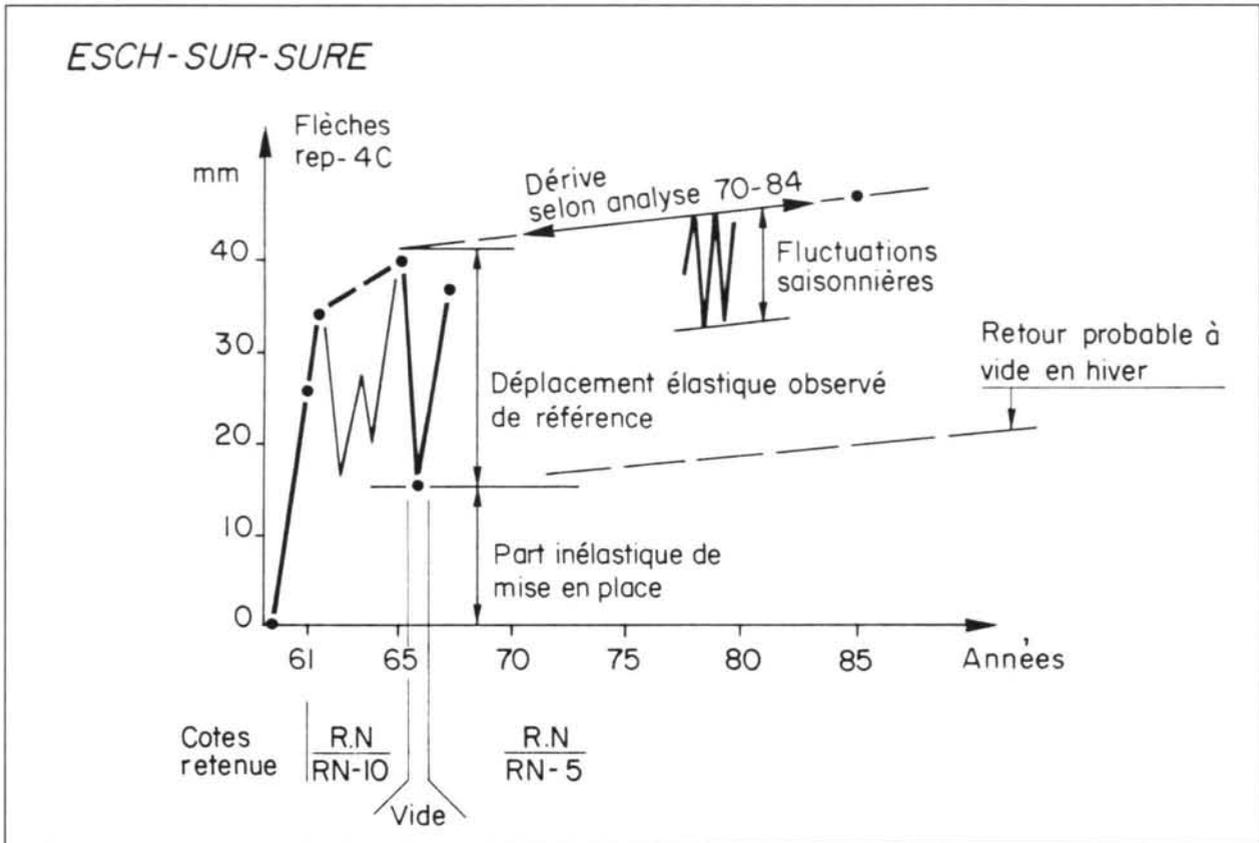


Figure 13: Déformation du repère 4C dans le temps.

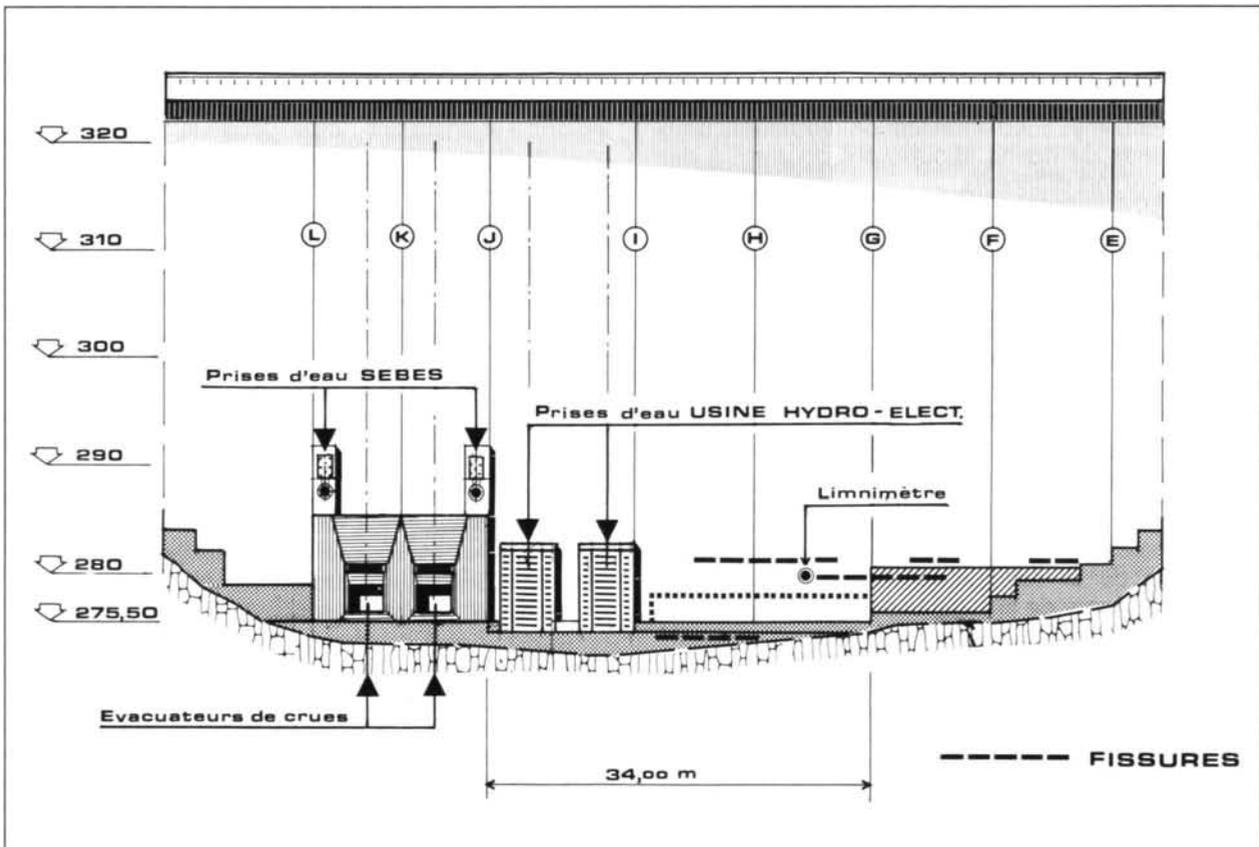


Figure 14: Parement amont: repérage des fissures.

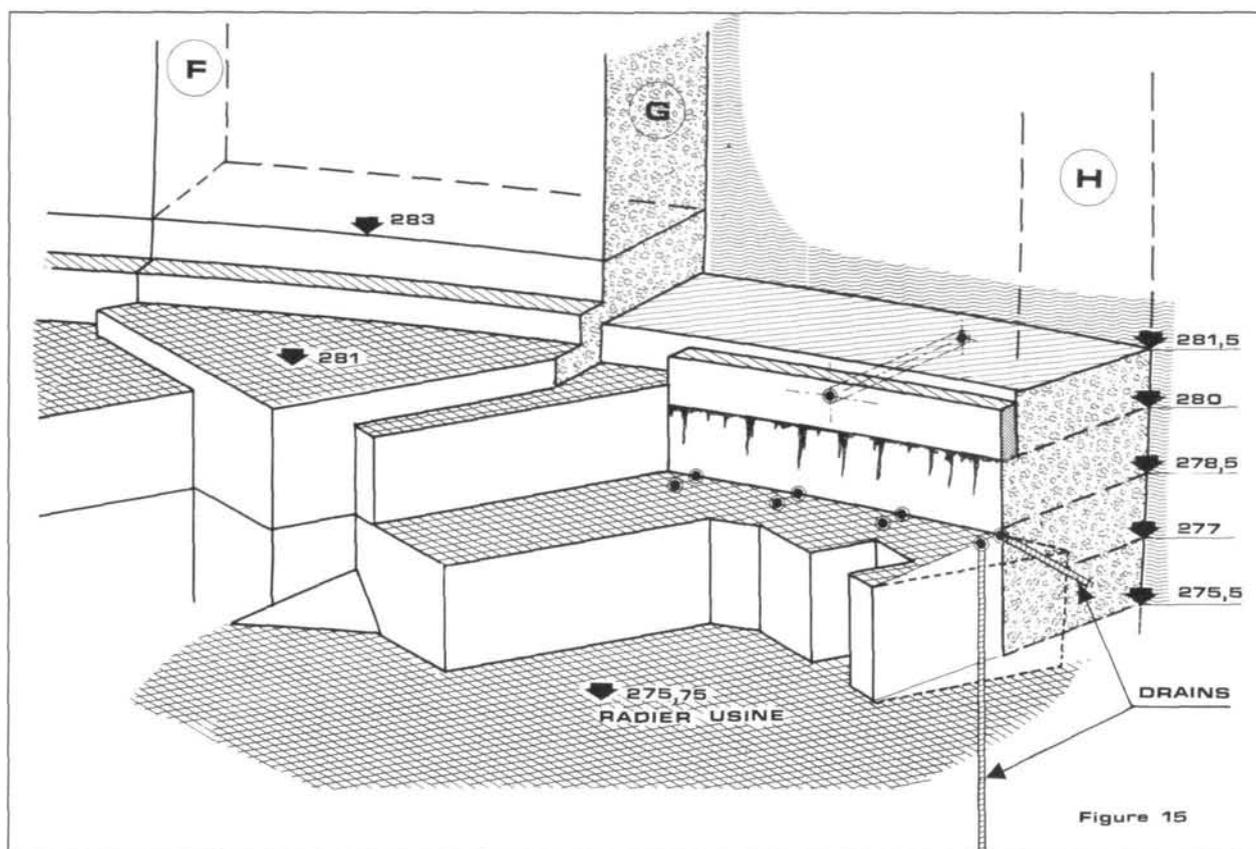


Figure 15: Structure intérieure de l'usine.

- En fermant la ligne des drains amonts qui déchargent la pression dans la reprise 277, on voit se renforcer le débit sur les drains verticaux de sorte qu'il y a communication entre les deux systèmes de drains aboutissant pourtant à des endroits fort différents.
- Les suintements diffus jaillissant des joints de reprise ont tendance à s'intensifier ce qui est signe d'une dégradation locale au droit des reprises de bétonnage.
- Le cheminement à travers la voûte est très complexe et échappe totalement à une figuration bidimensionnelle comme l'a montré une expérience faite avec coloration de l'eau à l'aide de fluorescine.
- Il apparaît clairement que le débit des fuites hivernales est très sensible aux variations du niveau de la retenue et moins sensible aux changements de la température. Ce phénomène peut s'expliquer par l'inertie thermique de la voûte qui prend un certain temps pour s'adapter à la température ambiante.

Naturellement il faut bien différencier entre les suintements diffus, sortant de façon incontrôlable par les joints de reprise, et les débits évacués par les drains. Ces derniers sont des fuites voulues qui servent à diminuer les pressions de percolation dans l'ouvrage, alors que les premiers sont signe d'une

dégradation accentuée des reprises de bétonnage et d'une progression inquiétante des fissures.

3) Le bilan des injections

La figure 17 retrace les 26 ans de la vie du barrage et montre les différentes interventions faites durant ces années. Sur ce graphique est représentée la ligne de variation des niveaux du plan d'eau en fonction du temps.

- La voûte du barrage d'Esch-sur-Sûre a été bétonnée du 24 mai 1956 jusqu'au 14 octobre 1967.
- Le clavage primaire de la voûte a été fait de février à mars 1958.
- Le clavage secondaire a suivi en hiver 1959-1960, donc avec une retenue déjà remplie jusqu'à la cote 300 (ce qui correspond à un volume de 11 millions de m³).
- Après le premier remplissage complet en hiver 60/61, des fuites importantes, atteignant déjà à l'époque plusieurs centaines de litres par minute, se sont manifestées. Pour les arrêter, on a été amené à faire un traitement d'injections de collage complémentaire en forant 37 trous dans le rocher à partir de la galerie des câbles et du sous-sol de l'usine.
- En hiver 64/65, les fuites ont recommencé et ont dépassé le seuil de 200 l/min.

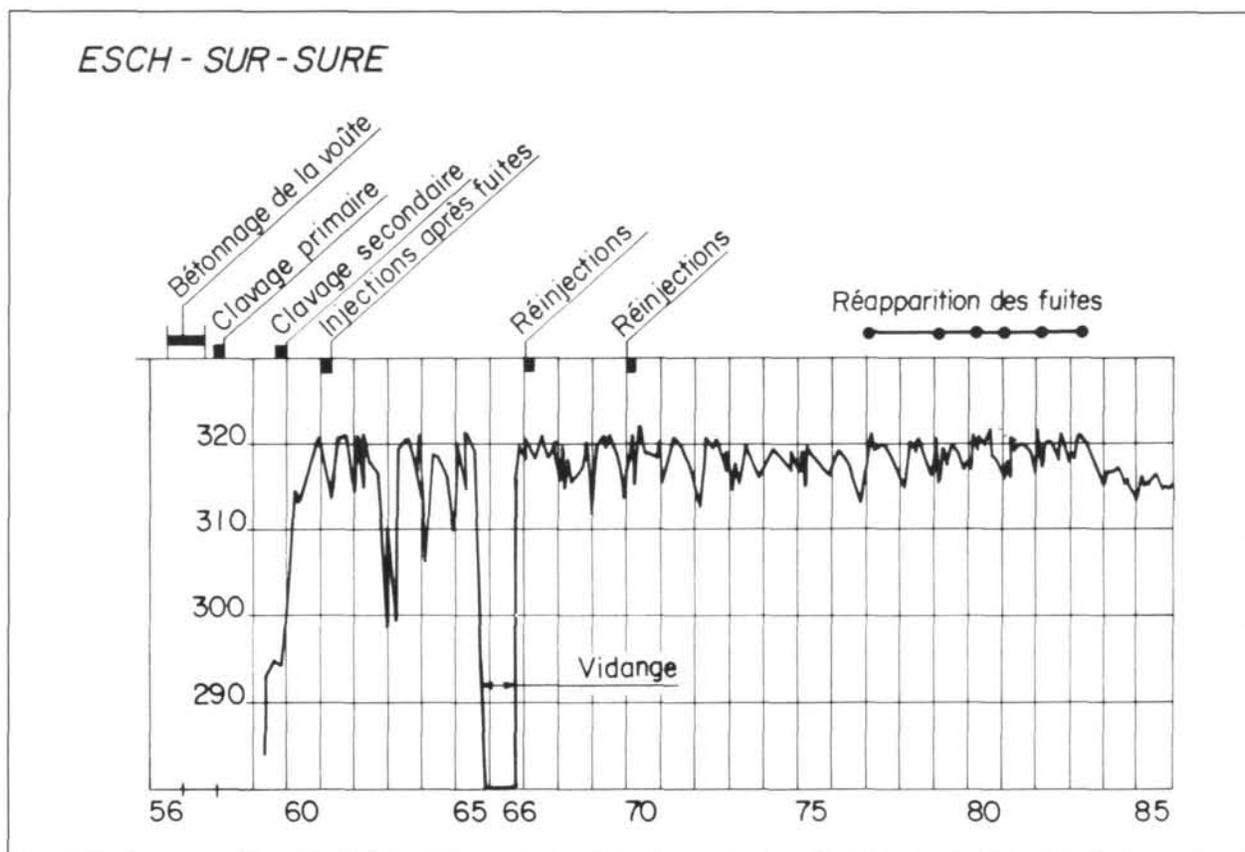


Figure 17: Le bilan des injections.

- En automne 65, la retenue a été vidangée pour la première fois et restait vide pendant toute une année. On profitait de cette occasion pour renouveler complètement l'écran d'étanchéité principal sur une profondeur de 20 mètres sous la face amont de la voûte et pour refaire le collage béton-rocher. Comme on s'attendait à un phénomène d'apparition de fuites analogues à celui constaté lors du premier remplissage, on avait prévu des trous d'injection descendant dans le sol de fondation et la possibilité de les injecter par plongeurs après la remise en eau.
- Après cette deuxième remise en eau, les fuites ont recommencé de plus belle, débitant jusqu'à 600 l/min de sorte qu'on a effectivement dû injecter sous l'eau par plongeurs les forages prévus à cet effet. Ces injections furent accompagnées par un collage supplémentaire à partir de l'aval et par le bourrage de certains joints de reprise. Elles eurent une efficacité immédiate parfaitement nette.
- Pendant la décennie suivante, seul un traitement des joints de reprise en 1970 s'est avéré nécessaire; après cette intervention, les fuites ne se sont plus manifestées, ce qui toutefois est surtout reductible au faible taux de remplissage de la retenue en hiver.
- A partir de 1977, les joints de reprise se sont de nouveau mis à débiter et les fuites se sont accen-

tuées d'année en année comme montré précédemment. Pour limiter les venues d'eau à une valeur acceptable, le niveau du plan d'eau a été abaissé de cinq mètres en automne 1985.

Naturellement le barrage est équipé encore d'autres dispositifs d'auscultation comme les fissuromètres et les piézomètres, et muni d'autres systèmes de drainage que celui décrit ci-dessus. Ainsi, en automne 1985, une nouvelle série de piézomètres et de drains a été mise en place pour vérifier l'état des pressions d'eau au pied de la voûte et pour évacuer les eaux d'infiltration au contact béton-rocher aux endroits particulièrement sensibles près des culées et sur les versants, dans le but d'orienter en profondeur les poussées de percolation dans la roche. Toutefois la présentation de ces investigations dépasserait le cadre du présent article.

III. LA NOTE DE CALCUL

En 1985, le Ministère des Travaux Publics a confié au concepteur d'antan, à savoir au bureau d'ingénieurs conseils Coyne & Bellier de Paris, la mission de contrôler la stabilité du barrage d'Esch-sur-Sûre et d'établir une note de calcul moderne de la voûte par la méthode des éléments finis tridimensionnels en comportement non linéaire, qui est présentée dans ce chapitre.

1) Description du maillage

Le barrage en béton et sa fondation rocheuse sont modélisés par un maillage constitué d'hexaèdres et de prismes. La longueur d'un élément est de 9 mètres, sa hauteur varie entre 6,50 mètres et 8,00 mètres et son épaisseur entre 1,50 mètres et 3,00 mètres. Au sommet de la voûte, il y a un élément dans l'épaisseur alors qu'au pied de la voûte, il y a trois éléments dans l'épaisseur (Figure 18).

Le rocher est représenté par une première couche d'éléments assez grossiers assurant à bonne distance les conditions aux limites du modèle et par une deuxième couche plus finement modélisée assurant la transition entre la fondation profonde et le rocher (Figures 19 et 20).

Les blocages formés en rive gauche par les puits de vidange et constitués en rive droite par des massifs en béton solidaires liés à la voûte ont été représentés avec quelques simplifications, pour aboutir à un maillage harmonieux et équilibré.

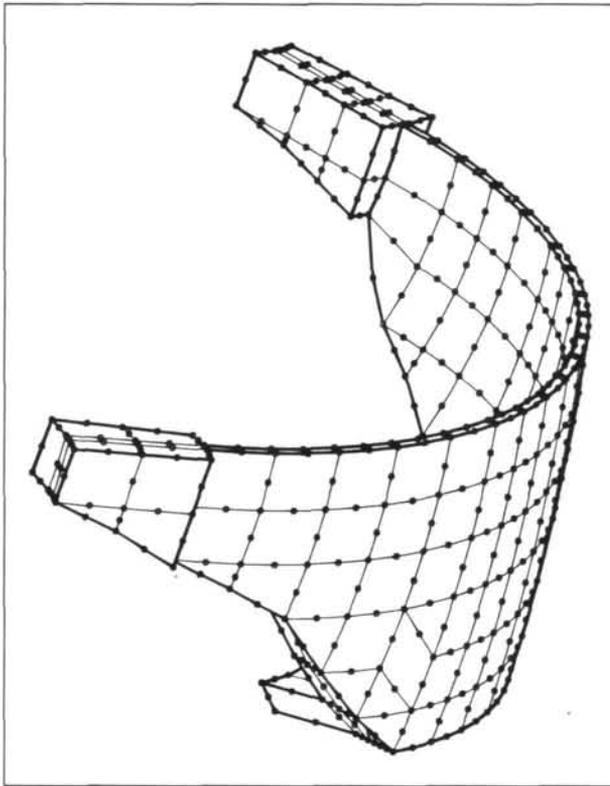


Figure 18: Le maillage du modèle mathématique.

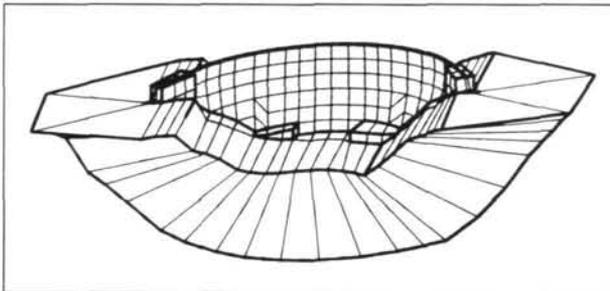


Figure 19: Modélisation du barrage: vue de l'aval.

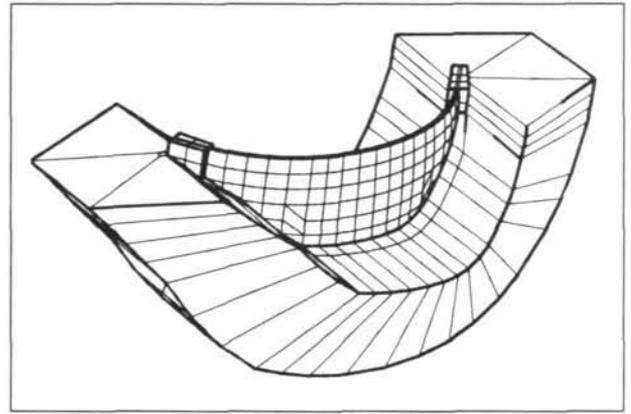


Figure 20: Modélisation du barrage: vue de l'amont.

Entre les éléments de volume de la fondation et ceux du barrage ont été interposés des éléments joints d'une épaisseur de seulement 20 centimètres, destinés à modéliser la fissuration horizontale. Ces éléments joints ont permis de simuler les conditions suivantes:

- Relâchement des contraintes de traction au pied de la voûte au contact béton-rocher.
- Dégradation du résidu comprimé au pied aval, correspondant à la libération en cisaillement de la partie située entre les blocages.
- Libération complémentaire de la résistance résiduelle dans le pied aval comprimé, en y faisant disparaître toute résistance à la compression.

2) Les cas de charge étudiés

- Le poids propre de la voûte.
- La pression hydrostatique.
- Les sous-pressions sous la voûte.
- Le cas de charge thermique avec notamment les variations saisonnières.

3) Le tarage du modèle de calcul

Le tarage du modèle de calcul consiste à ajuster les paramètres de raideur, c'est-à-dire les modules élastiques du béton et du rocher, afin de retrouver les déformations observées. Comme déjà dit, les déformations de la voûte sont mesurées et interprétées tous les mois de sorte qu'on dispose d'un grand nombre de données.

On fait en quelque sorte un calcul à rebours. En effet on détermine d'abord les déformations et on cherche à obtenir une bonne concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées. Après ce calage du modèle mathématique, on détermine les contraintes dans la voûte et puis, dans une dernière étape, on calcule les efforts exercés par l'ouvrage sur le rocher de fondation.

4) Les résultats du calcul

Le résultat principal est le fait que la stabilité générale de l'ouvrage n'est pas menacée. Il suffit

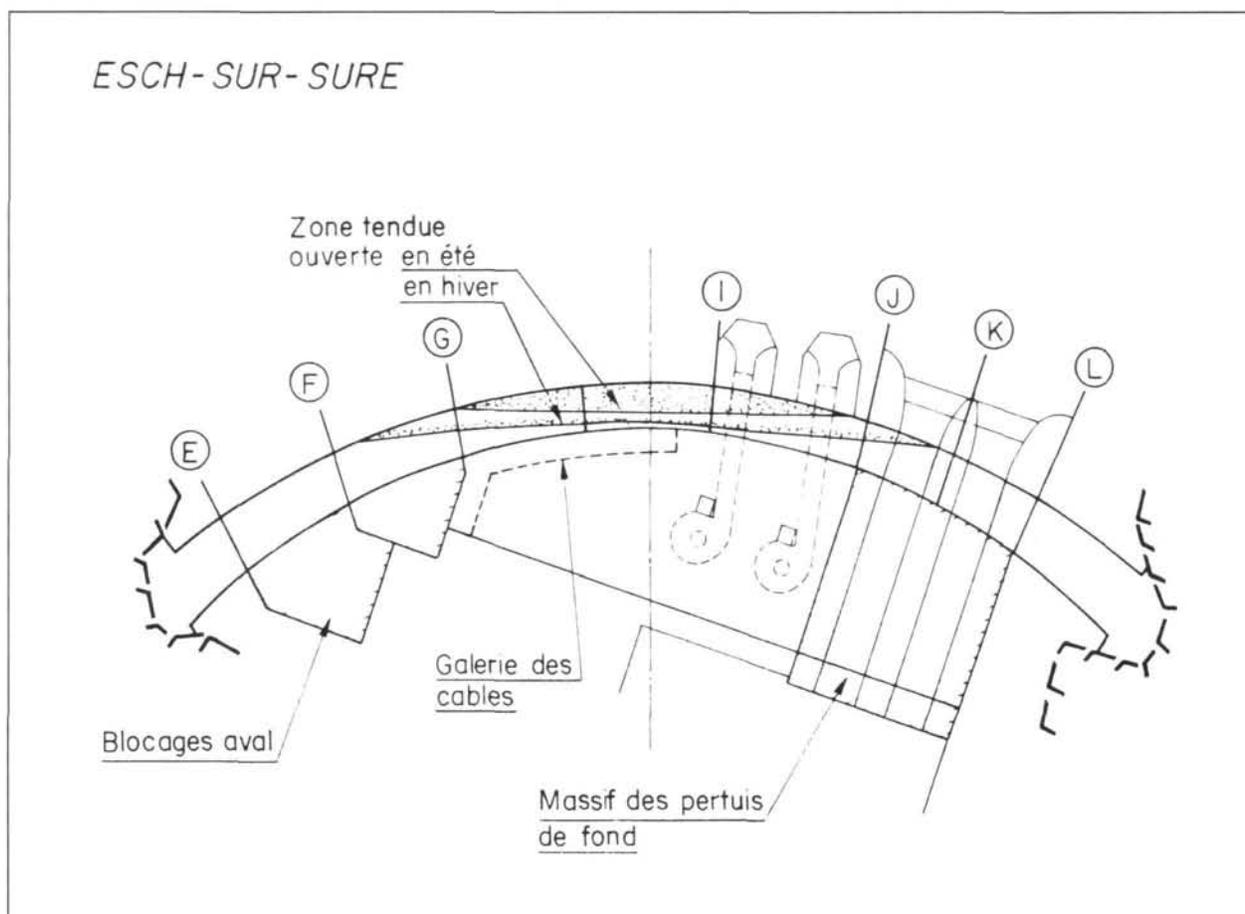


Figure 21: Résultat de la note de calcul: étendue horizontale de la zone tendue.

d'assainir la zone de charnière du barrage constituée par le bas de la voûte et les premiers mètres de rocher sous l'ouvrage pour se mettre à l'abri d'instabilités locales.

En analysant plus en détail les résultats de la note de calcul, on remarque qu'on a affaire avec une voûte qui en hiver travaille avec 70 bars de traction au pied amont, ce qui veut dire que dès sa conception, l'ouverture de fissures a été acceptée d'avance. On sait en effet que le béton ne tolère pas de telles tractions, mises en évidence par le calcul effectué en régime élastique. Ce n'est que dans les toutes dernières années qu'on est parvenu à prendre en considération dans les calculs la non-résistance à la traction du béton; ceci est fait par le biais de calculs itératifs relativement longs, qui permettent de simuler l'ouverture des zones tendues. Après relâchement des tractions, la section comprimée au pied de la voûte se réduit au dixième de l'épaisseur: les fissures ouvertes du côté amont sont presque traversantes, et atteignent localement 90% de l'épaisseur du barrage.

On s'est naturellement posé la question si, et de combien cette fissuration se referme en été lors du réchauffement de la voûte et de son basculement vers l'amont. Le calcul a montré que l'ouverture en été n'atteint plus que 60% contre les 90% constatés pour l'hiver. En ce qui concerne l'étendue en plan de la

zone ouverte, elle se rétrécit et reste localisée entre les joints J et G. Le volume de l'ouverture, pouvant atteindre une amplitude de 2 mm en hiver, descend en dessous de 1 mm en été (Figures 21 et 22).

En poursuivant le calcul et en libérant le joint en cisaillements et en déplacements, on a testé la capacité d'adaptation de la voûte face à une éventuelle dégradation complète de son pied fissuré. Il apparaît qu'un déplacement vers l'aval du pied de la voûte de seulement 2,0 mm suffit pour réorganiser complètement le travail d'ensemble de la voûte. Les efforts s'organisent en arcs comprimés horizontalement et aucun efforts ne descend plus par les consoles. Dans ces conditions, les contraintes dans le béton restent encore fort admissibles et ne dépassent pas 86 bars en compression à la face amont en clé des arcs les plus chargés.

Dans un complément de calcul, l'effet des sous-pressions au pied de la voûte a été analysé. On pourrait effectivement s'imaginer que l'eau, qui pénètre dans les reprises de bétonnage ou au contact béton-rocher, agit comme un vérin plat déchargeant la voûte d'une partie de son poids propre.

Les vérifications ont cependant montré que l'influence des sous-pressions sur les résultats du calcul est marginale et négligeable, ce qui est bien compréhensible pour un ouvrage mince.

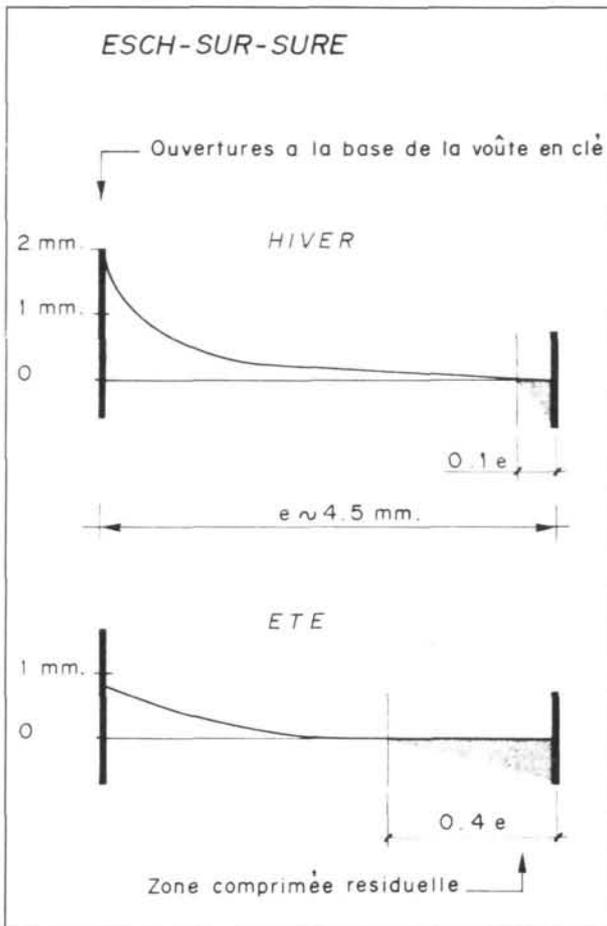


Figure 22: Résultat de la note de calcul: coupe verticale de la zone tendue.

IV. TRAVAUX DE CONSOLIDATION DE LA VOÛTE

Après la présentation de la note de calcul, il faut trouver une réponse aux deux questions qui font l'objet du présent article, à savoir:

Quelles sont les raisons qui ont amené les responsables à décider la vidange du lac?

Quels travaux faut-il entreprendre pour assainir la voûte?

Comme conclusion de la note de calcul, on peut retenir que certes la stabilité générale de la voûte n'est pas mise en doute, mais qu'il faut toutefois envisager des travaux de réparation à court terme pour pallier à des dégradations locales. Pour supprimer les infiltrations des eaux de percolation à travers le pied de l'ouvrage et le sol de fondation, il faut étancher la voûte et rétablir le rideau d'injection du sous-sol.

Ces problèmes ne sont pas nouveaux, mais bien au contraire, l'histoire pathologique du barrage a commencé à être écrite dès la première mise en eau, et on est toujours à la recherche de la thérapie appropriée. Aujourd'hui, après 26 ans d'exploitation, il faut toutefois reconnaître qu'on est arrivé au bout des possibilités d'interventions conventionnelles, qui en

fait ne sont que des palliatifs et qu'il faut trouver une solution de consolidation définitive.

Le passé a montré les limites du traitement des fissures par injection. Le seul but d'une telle injection est de diminuer ou d'arrêter le débit des fuites. Pour être efficace, elle doit être réalisée pendant la période des plus grandes fuites, c'est-à-dire en hiver lorsque la voûte se penche vers l'aval et que l'ouverture des fissures est maximale. En été, lorsque la voûte a tendance à revenir vers l'amont, l'espace libre pour se remettre en place lui manque à cause de la présence du matériau d'injection. Ceci a pour conséquence qu'une nouvelle fissure, positionnée cette fois-ci sur la face amont, a tendance à se créer. Un traitement de cette dernière fissure engendrerait une nouvelle fissure en hiver du côté amont et ainsi de suite.

Ceci démontre que le traitement d'une fissure active par injection n'est pas une mesure appropriée sur un barrage à voûte mince comme celui d'Esch-sur-Sûre, parce qu'il est soumis à des déformations saisonnières trop importantes.

De même les injections répétées dans le sol de fondation de l'ouvrage n'ont pas conduit au résultat escompté qui était de rétablir l'écran d'étanchéité sous l'ouvrage. Comme d'un côté, la position exacte des points de cassure de l'écran, qui se trouvent quelque part dans les premiers mètres en-dessous de l'interface béton-rocher, n'est pas repérable et vu que d'un autre côté, ces travaux d'injection doivent se faire par forages obliques à partir du côté aval où les lieux sont très limités à cause de la présence de l'usine, il faut reconnaître qu'il s'agit d'une opération difficile à réussir (Figure 23).

Pour trouver une solution valable et durable au problème énoncé, il faut considérer encore une fois ce qui se passe au pied de la voûte dans la partie centrale de l'ouvrage:

Comme on sait de la note de calcul, la zone comprimée est réduite en hiver à seulement 10% de la section. Si les efforts peuvent se réorganiser en faisant travailler davantage les arcs, l'étanchéité doit toutefois être garantie par la zone comprimée restante, fortement sollicitée. Dans cette zone résiduelle

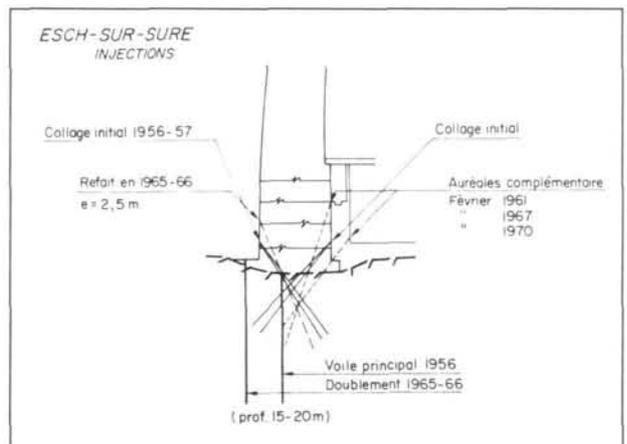


Figure 23: Campagnes d'injections.

peuvent se créer sous l'effet de ces fortes pressions des fissures verticales, dans lesquelles l'eau pénètre et agit comme un vérin poussant sur le béton. Des écailllements ou éclatements superficiels, pouvant atteindre une épaisseur de quelques centimètres, peuvent se produire sous l'action de ces efforts, et seraient accompagnés d'une augmentation sensible du débit des fuites. Pour se mettre à l'abri d'un tel incident, il est recommandable d'abaisser, surtout en hiver, le plan d'eau de quelques mètres.

La seule solution efficace pour venir à bout de ces problèmes réside dans un déplacement radical de la fonction d'étanchéité. Pour le bas de la voûte, elle sera déplacée sur le parement amont et pour l'encastrement de l'ouvrage dans la roche, elle sera carrément dissociée du fond de la voûte, en se servant d'une plinthe en béton armé, placée au pied amont du barrage et ancrée dans la roche saine.

En ce qui concerne le premier point, à savoir d'assurer l'étanchéité des joints de reprise, on procédera de la façon suivante:

Les premiers mètres comptés à partir du pied de la voûte seront revêtus d'une peau étanche constituée probablement d'un enduit du type résine synthétique. Cette mesure sera accompagnée par un pontage des fissures actives ou susceptibles de s'ouvrir lors de la remise en eau du barrage. Comme solution de pontage, on peut imaginer soit un colmatage des fissures sur plusieurs centimètres de profondeur par un produit à élasticité durable, soit une feuille étanche fixée à cheval sur les deux bords de la fissure avec assez de jeu pour pouvoir suivre le mouvement cyclique annuel d'ouverture et de fermeture.

Le deuxième volet de la solution consiste à réaliser une plinthe en béton armé à placer au pied amont de la voûte (Figure 24). Cette plinthe ne sera pas fixée au barrage, mais rendue solidaire de la roche de fondation à l'aide de barres d'ancrage. Sur le contour amont de ce tapis, on placera un écran d'étanchéité constitué d'un voile d'injection. Cet écran sera combiné avec un drainage compartimenté de la sous-face de la plinthe aboutissant dans l'ancienne galerie des câbles qui sera transformée en galerie d'inspection comprenant également un caniveau d'évacuation des eaux. L'efficacité de ces mesures sera surveillée par des piézomètres mesurant la pression de l'eau sous la plinthe.

La plinthe aura une largeur maximale de 10 mètres et sera reliée à la voûte par un joint souple. Sur le versant de la rive droite, elle ne suivra pas les marches

d'escalier de la fondation, mais remontera avec une pente régulière voisine de 1V à 3H.

L'opération comprend les travaux suivants

pour la plinthe:

- la préparation soigneuse d'un fond rocheux sain et régulier,
- le bétonnage de la plinthe d'un volume de ca 800 m³,
- son raccordement élastique à la voûte, son ancrage dans la roche, ainsi que la réalisation d'un écran d'injection,
- le drainage compartimenté de la sous-face de la plinthe au contact de la voûte.

et pour la peau d'étanchéité:

- l'enlèvement de l'enduit existant par sablage,
- le nettoyage et le traitement des joints de reprise par un matériau à élasticité durable,
- l'application d'un nouvel enduit par plusieurs couches d'un produit à base de résines synthétiques.

Si on se rappelle toutes les difficultés qu'on a eues avec les plongeurs rien que pour faire le repérage des fissures ou pour mettre en injection sous l'eau des forages préparés à cet effet lors de la première vidange, il faut reconnaître que ces travaux ne peuvent pas se faire à retenue pleine, mais qu'il faudra faire une vidange complète pour réussir cette intervention. Il importe également de savoir que, pour une retenue pleine, c'est-à-dire pour une profondeur d'eau de 46 mètres, le temps d'intervention d'un plongeur se limite à ca une demie heure de travail effectif par plongée. Par ailleurs, il faut considérer que l'étanchement de la voûte se fera avec des produits chimiques très sensibles à l'humidité, de sorte que même avec une retenue complètement vide, il faut travailler avec beaucoup de précautions et de soins et, espérons-le, avoir quelques mois de beau temps pour réussir l'exécution des travaux.

Actuellement la vidange est prévue pour la saison 1989. L'abaissement du plan d'eau commencera au mois de mars et sera achevé jusqu'au premier mai. La remise en eau est prévue à partir du premier octobre de sorte qu'ils resteront cinq mois pour l'exécution des travaux de consolidation de la voûte présentés ci-dessus.

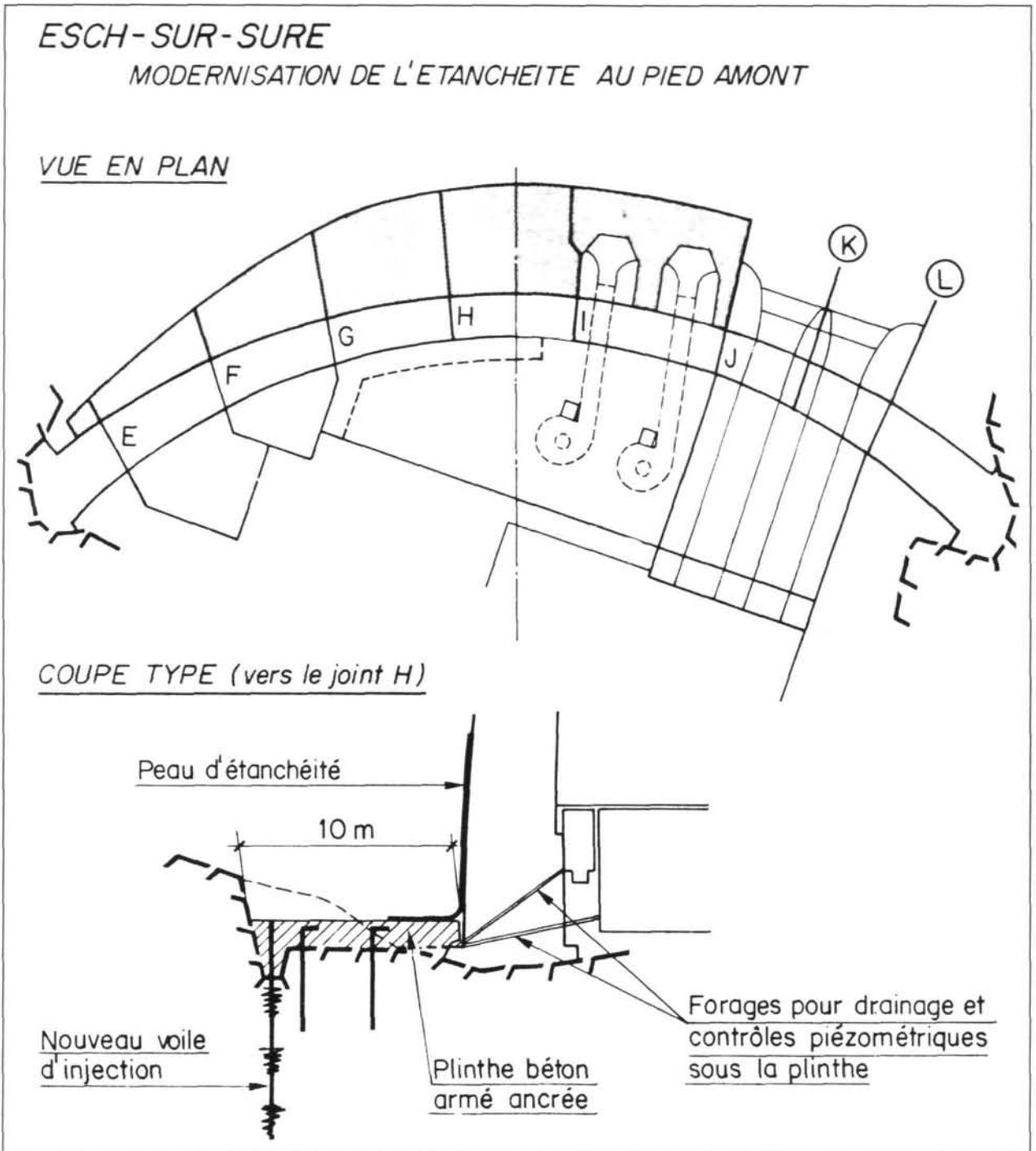


Figure 24: Modernisation de l'étanchéité du pied amont de la voûte.

BIBLIOGRAPHIE:

- (1) «L'aménagement hydro-électrique de la Haute-Sûre» par M. René Heinerscheid.
- (2) «L'alimentation en eau potable du pays à partir du barrage d'Esch-sur-Sûre», extrait d'une publication du SEBES, par M. René Heinerscheid.
- (3) Rapports techniques du bureau d'études Coyne & Bellier