

R. GUILHOT

Chef du Service des Etudes Génie civil
de la Région d'Equiptement hydraulique « Alpes I ».

R. BOURRIOT et M. LEROY

Ingénieurs civils des Ponts et Chaussées,
Ingénieurs au bureau Coyne et Bellier.

Eyraud
Monique
GIROD

Projet du barrage de Vouglans

Conception et mise au point de la voûte



Extrait de
TRAVAUX
Avril 1964

Numéro entièrement consacré au
**8^e CONGRÈS INTERNATIONAL
DES GRANDS BARRAGES**

Editions Science et Industrie
6, av. Pierre-1^{er}-de-Serbie, Paris-16^e

Projet du barrage de Vouglans

Conception et mise au point de la voûte

R. GUILHOT

*Chef du service des Etudes génie civil
de la Région d'Equipement hydraulique « Alpes I »,*

par

R. BOURRIOT et M. LEROY

*Ingénieurs civils des Ponts et Chaussées,
Ingénieurs au bureau Coyne et Bellier.*

Photo montage du site du barrage et de l'usine.

(Photo Monchanin et Périchon.)



I. Avant-propos.

IL n'est pas dans le but de notre propos de décrire en détail l'aménagement de Vouglans. Ceci fera l'objet d'articles ultérieurs. Nous voulons simplement exposer ici l'évolution des idées et des études qui ont conduit au type de barrage choisi en définitive. Nous préciserons ensuite les caractéristiques de cet ouvrage.

Caractéristiques principales de l'aménagement.

Le barrage de Vouglans sur l'Ain, d'une hauteur de 125 m au-dessus des fondations, de largeur au couronnement 340 m mesurée selon la corde, créera à la cote (429,00) une retenue de plus de 600 millions de m³. Les eaux seront utilisées dans une usine semi-souterraine implantée sur la rive droite de l'Ain, à l'aval immédiat du barrage.

Cette usine comprendra en première étape 2 groupes verticaux de 62 000 kW chacun (75 m³/s sous 90 m de chute nette) produisant annuellement 220 millions de kWh. En deuxième étape, 2 autres groupes identiques pourront être installés.

Les fouilles du barrage ont été commencées à la fin de l'été 1963 et la mise en service de l'aménagement est prévue pour l'hiver 1967-1968.

Site du barrage.

Le barrage est implanté dans une gorge assez étroite profondément creusée dans des bancs calcaires subhorizontaux (pendage de 3° vers l'aval) appartenant au Jurassique supérieur.

La vallée apparaît comme sensiblement symétrique après déblaiement de la terrasse alluviale qui recouvre le bas de la rive gauche sur une quarantaine de mètres de hauteur environ.

Les bancs calcaires constituant l'appui de l'ouvrage sont très compacts à l'exception de quelques passages dolomités qui sont délités en surface. Ils ne sont coupés par aucune faille sur toute l'emprise du barrage, tout au plus peut-on remarquer des fissures verticales appartenant à deux familles distinctes formant un quadrillage oblique par rapport à l'axe de la vallée. En deux endroits seulement ces fissures sont assez importantes pour constituer des zones fracturées d'une dizaine de centimètres de large au maximum en surface.

Des essais aux vérins effectués sur la roche en place dans diverses galeries ont confirmé l'excellente qualité de ce rocher dont le module d'élasticité statique est de l'ordre de 400 à 600 000 kg/cm².

Les bancs dolomités eux-mêmes ont révélé en profondeur des qualités mécaniques remarquables.

II. Genèse de l'idée de barrage non circulaire.

Depuis toujours les projeteurs ont eu l'ambition de construire des barrages-voûtes où la matière soit répartie aussi idéalement que possible. Le béton, comme on sait, est un matériau destiné à être utilisé en compression, mais il n'est guère possible, sauf dans des voûtes très minces, de le faire travailler de façon à peu près uniforme. Dès que les arcs ont une certaine épaisseur des moments fléchissants apparaissent à l'encastrement et les contraintes augmentent sensiblement. On a donc commencé par chercher à se débarrasser des bétons qui travaillent en extension, ce qui a conduit aux formes de barrages à double courbure réalisées depuis longtemps avec des arcs circulaires.

Il est un autre progrès auquel on pense en observant qu'en se rapprochant des appuis les consoles deviennent plus courtes et plus raides, déchargeant progressivement les arcs horizontaux de deux façons :

— dans le sens radial elles transmettent directement au terrain une part croissante de la charge hydrostatique ;

— dans le sens transversal elles encaissent partiellement l'effort normal des arcs horizontaux qui diminue de la clé aux naissances ; cet effet est nettement mis en évidence par la plongée des lignes isostatiques sur le parement aval (bien que celle-ci soit due en partie aux effets de la torsion).

On est ainsi logiquement conduit à s'écarter des arcs circulaires et à rechercher une meilleure distribution de la matière en utilisant des arcs horizontaux à courbure variable pour adapter en chaque point la courbure à la charge réellement prise par les arcs ; cette amélioration doit entraîner non seulement un gain de volume mais aussi d'autres avantages souvent plus intéressants.

Cette idée de faire varier les courbures le long d'une section horizontale préoccupe les projeteurs depuis longtemps et des réalisations importantes existent déjà à l'étranger, proposées et mises en œuvre par des spécialistes suisses, portugais et italiens. Mais jusqu'ici elle n'avait pas encore pris corps en France sur de grands ouvrages, soit que les sites équipés au cours des dernières décades ne s'y prêtent pas particulièrement, soit que la pressante demande d'énergie n'ait pas permis d'entreprendre de longues études.

Le site de Vouglans a semblé de prime abord être favorable à un ouvrage non circulaire. En effet, son rapport $\frac{\text{longueur en crête}}{\text{hauteur}}$ est de l'ordre de 3,5, chiffre tout à fait

classique ; une voûte circulaire aurait eu un rayon de couronnement dépassant 200 m, pour un développement de plus de 400 m. Or il ne fallait pas songer à réaliser des économies de béton par une augmentation du taux moyen de travail qui a crû régulièrement depuis une trentaine d'années de telle sorte que l'on a abouti à une limite de fait, située aux environs de 60 à 70 kg/cm², les barrages plus hardis ressortant du type expérimental.

Par contre on pouvait se demander si le volume de béton ne serait pas mieux réparti le long d'arcs à courbure variable et si ce ne serait pas vers une modification des formes qu'il pourrait être intéressant de s'orienter.

III. Recherche de la forme.

Définition des arcs.

Les fibres moyennes des arcs horizontaux du barrage de Vouglans sont des spirales logarithmiques. Pourquoi s'est-on orienté vers une courbe de ce genre plutôt que vers des paraboles qui ont eu en général jusqu'ici la faveur des projeteurs ? Les raisons sont de deux ordres, théorique et pratique.

Théorique d'abord : le profil en travers de la vallée rocheuse est un triangle particulièrement régulier (voir fig. 1). Dans ces conditions, il semblait bon d'avoir des courbures décroissant de façon très régulière de la clé aux naissances. Ce n'est pas le cas de la parabole qui a des rayons de courbure dont la croissance est de plus en plus rapide au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe. Il valait mieux se cantonner a priori dans des tracés dont la courbure varie régulièrement. C'est le cas de la clothoïde, courbe classique dans les raccordements routiers, pour laquelle la courbure est une fonction linéaire de l'abscisse curviligne ; à la suite d'une étude approfondie de ses propriétés, cette courbe n'a pas été retenue. C'est également le cas de la spirale logarithmique pour laquelle le rayon de courbure est une fonction linéaire de l'abscisse curviligne. Il se trouve aussi que le cercle est un cas particulier de cette spirale ; l'avantage de cette propriété apparaîtra plus loin quand on verra la généralité de l'outil mathématique qui a été mis au point à cette occasion. Il faut ajouter qu'en compulsant les résultats obtenus sur de précédents ouvrages

A ces raisons théoriques s'ajoute un sérieux avantage pratique car la spirale logarithmique a des propriétés géométriques simples qui facilitent considérablement les expressions mathématiques figurant dans les calculs et qui sont communes avec le cercle.

2

— une diminution des contraintes dans l'ouvrage par réduction des moments fléchissants en adaptant en chaque point la courbure horizontale de l'ouvrage à la charge réellement prise par les arcs.

Pour explorer ces deux voies par modèle on opéra de la façon suivante :

a) On exécuta un premier modèle non circulaire (spiraloïde n° 1) dans lequel le souci majeur était d'avoir partout des incidences du parement aval sur le terrain excellentes (pratiquement les lignes de niveau sont parallèles à l'axe du barrage). Ces incidences sont représentées figure 2 ; on peut voir qu'elles sont très fortes si l'on songe que beaucoup d'ouvrages existants ont, tout au moins au voisinage du couronnement, des incidences de l'ordre d'une trentaine de degrés. Ce modèle était dessiné en se servant des résultats obtenus sur le modèle circulaire ; on avait constaté une décroissance considérable de la clé aux naissances de l'effort normal dans la partie supérieure du barrage, ce phénomène diminuant progressivement pour disparaître vers le tiers inférieur de l'ouvrage et changer de sens dans la partie basse du barrage.

On décida donc d'adapter la variation de courbure à la variation d'effort normal, qui est elle-même une bonne image de la variation des charges prises par les arcs, et on dessina un ouvrage qui avait les caractéristiques suivantes :

— l'arc de couronnement avait un rayon de courbure croissant régulièrement le long de l'arc dans le rapport de 1 en clé à 2,5 aux naissances ;

— ce rapport diminuait progressivement pour devenir égal à 1 au tiers inférieur où l'on avait donc un cercle.

Enfin, au-dessous, le rayon de courbure décroissait de la clé aux naissances, relativement peu toutefois, par suite de la faible longueur des arcs.

En résumé, les arcs avaient une allure parabolique dans les deux tiers supérieurs de l'ouvrage, circulaire au tiers inférieur, elliptique (de petit axe parallèle à l'axe du barrage) en dessous, cette évolution se faisant bien entendu de façon très continue.

Les résultats de ce premier modèle non circulaire (spiraloïde n° 1), où les contraintes étaient plutôt inférieures à celles de l'ouvrage circulaire, furent extrêmement instructifs ; ils montrèrent :

1° que l'adaptation de la courbure aux charges correspondait bien à une meilleure utilisation de la matière et à une répartition de contraintes plus uniforme ;

2° que les contraintes étaient effectivement plus faibles là où les courbures étaient plus grandes ;

3° que l'on avait eu tort de prévoir, à la base, des arcs d'allure elliptique qui, plus plats en clé, y donnaient de légères tractions aval horizontales qu'on n'avait pas trouvées dans l'ouvrage initial circulaire. (On se gardera bien entendu de généraliser ce dernier résultat.)

b) Les deux premières constatations concrétisaient les espérances du départ et, au vu de ce premier résultat encourageant, on décida de poursuivre. On s'engagea alors dans la seconde voie possible, celle d'un gain sur les contraintes par diminution des rayons de courbure ; on dessina un second modèle non circulaire (spiraloïde n° 2) où l'on cherchait systématiquement à réduire au maximum les rayons de courbure (voir fig. 3) en conservant toujours la même coupe en clé et la même loi de variation des épaisseurs des arcs : il avait donc toujours le même volume que celui du barrage circulaire de référence (1). Cependant on traça cette fois sur toute la hauteur du barrage des arcs à rayons de courbure croissant de la clé aux naissances.

Les résultats obtenus confirmèrent entièrement ceux du premier modèle non circulaire :

(1) En fait un peu plus grand en raison de l'augmentation de longueur des arcs.

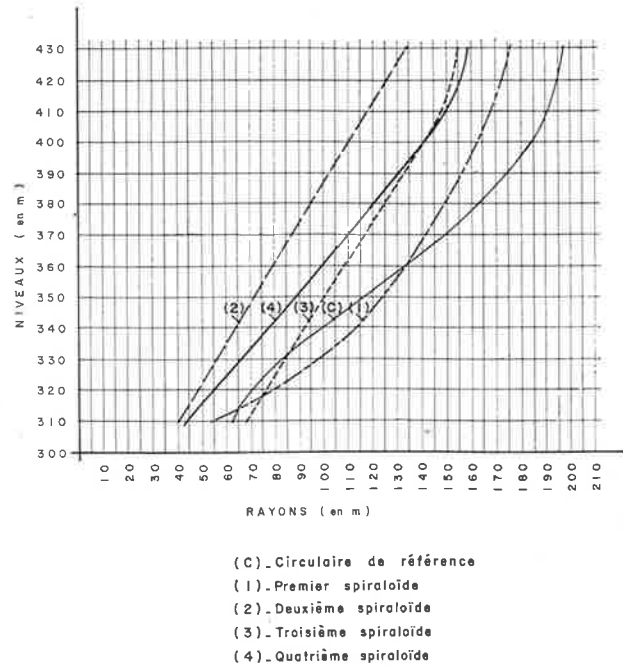


Fig. 3. — Rayons de courbure en clé.

1° La répartition des contraintes était encore plus uniforme que dans le premier modèle non circulaire ;

2° La réduction des contraintes était approximativement proportionnelle à la réduction des rayons de courbure ;

3° On avait supprimé les tractions horizontales en clé dans la partie basse.

c) Une erreur instructive.

Les deux modèles non circulaires ayant mis en évidence l'avantage qu'il y avait à adopter des arcs horizontaux dont le rayon de courbure augmente en allant de la clé aux naissances, on réalisa une troisième forme non circulaire (spiraloïde n° 3) qui, aux yeux des projeteurs, devrait, à quelques retouches de détail près, être définitive. Cette forme venait se placer entre les deux solutions extrêmes précédentes. Tout en adaptant cette troisième forme à la topographie exacte du rocher, dont on venait d'avoir une connaissance plus précise sous l'épaisse terrasse alluviale de la rive gauche, on crut possible d'apporter une amélioration supplémentaire en abandonnant le profil en clé commun aux essais précédents pour l'amincir là où l'augmentation de courbure avait donné un gain notable sur les contraintes ; cette matière était reportée aux naissances des arcs qui se trouvaient donc considérablement épaissis au contact avec la fondation.

Les résultats des modèles montrèrent que l'on avait cette fois-ci fait fausse route ; en effet, la raideur des naissances de la voûte ayant augmenté les efforts s'y concentrèrent, provoquant des contraintes notables qui détruisaient la bonne uniformité obtenue dans les deux formes précédentes ; de plus, la raideur de l'encastrement des pieds de console étant plus importante, on avait, à l'amont, des tractions verticales trop grandes pour être annulées complètement par le poids propre de la voûte. Un certain nombre de retouches effectuées sur ce modèle confirmèrent l'exactitude de ce point de vue et montrèrent qu'il fallait amincir les naissances de l'ouvrage.

V. Le calcul remplace le modèle.

Pendant que les études sur modèles avançaient, on s'ingéniait parallèlement à mettre au point un procédé rapide de calcul des barrages-voûtes non circulaires, basé sur la « Trial

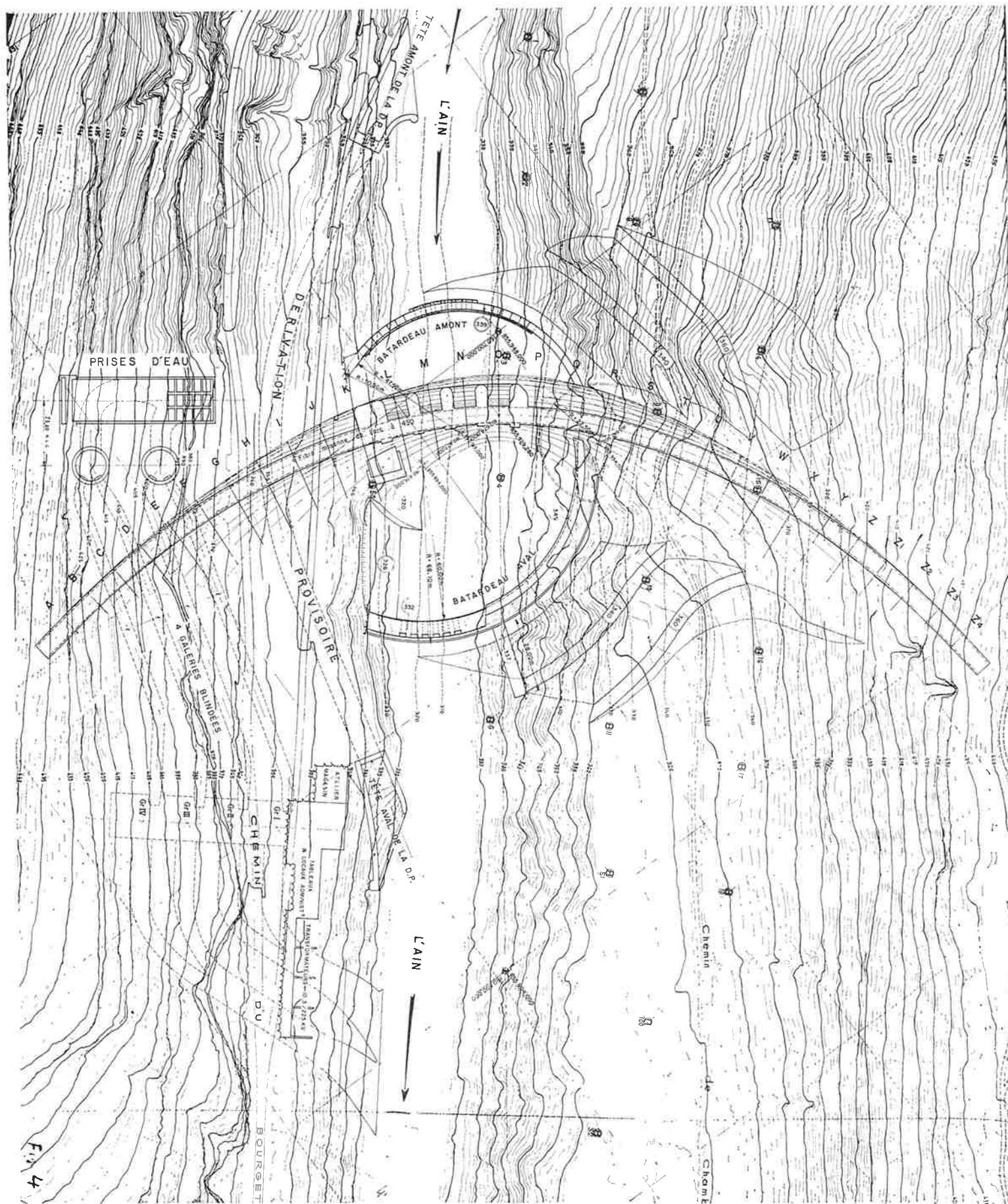


Fig. 4. — Vue en plan du barrage de Vouglans.

Load Method » dont le principe bien connu consiste à ajuster au moyen de liaisons intérieures les déplacements de tous les nœuds d'un réseau d'arcs horizontaux et de consoles verticales considérés comme éléments indépendants.

Dans le cas des voûtes à arcs horizontaux circulaires ce calcul est considérablement facilité par l'utilisation de tables numériques publiées par le « United States Bureau of Reclamation » ; malgré cela dans le cas d'un barrage symétrique, il demande environ six mois à un calculateur très entraîné. A Vouglans, où les tables de l'U. S. B. R. n'étaient pas utilisables, le calcul était difficilement accessible par des méthodes classiques car il aurait probablement duré des années ; on imagine mal la conduite qu'il aurait fallu tenir si, à la fin d'un travail aussi considérable, les résultats obtenus avaient différé notablement de ceux que l'on escomptait.

Heureusement les ordinateurs électroniques modernes mettent au service de l'ingénieur un instrument nouveau, d'une énorme puissance, qui a permis de surmonter toutes les difficultés inhérentes à la lourdeur du calcul par la « Trial Load Method ».

entre l'amont et l'aval peuvent également être différentes à chaque nœud arc-console.

Pour effectuer une « Trial Load » en utilisant ce programme, il suffit maintenant de remplir un tableau de données définissant les dimensions géométriques de l'ouvrage, hypothèses de fondation et de température ainsi que les différents niveaux de retenue à considérer. Un ingénieur peut remplir un tel tableau en quelques heures sans qu'il ait besoin d'avoir une connaissance approfondie de la « Trial Load ».

On conçoit que la rapidité d'un tel calcul — qui n'était autrefois qu'un instrument de contrôle a posteriori — lui permette de devenir un puissant instrument de mise au point ; par une succession de calculs et de retouches des formes de l'ouvrage, on peut arriver très vite à une distribution satisfaisante des contraintes. Ce nouvel outil, infiniment plus rapide que le modèle, arriva juste au moment où il fallait sortir de la mauvaise voie où l'on s'était engagé avec le modèle spiraloïde n° 3.

On calcula d'abord avec ce programme cette dernière solution et deux formes dérivées obtenues par retaille, ce qui

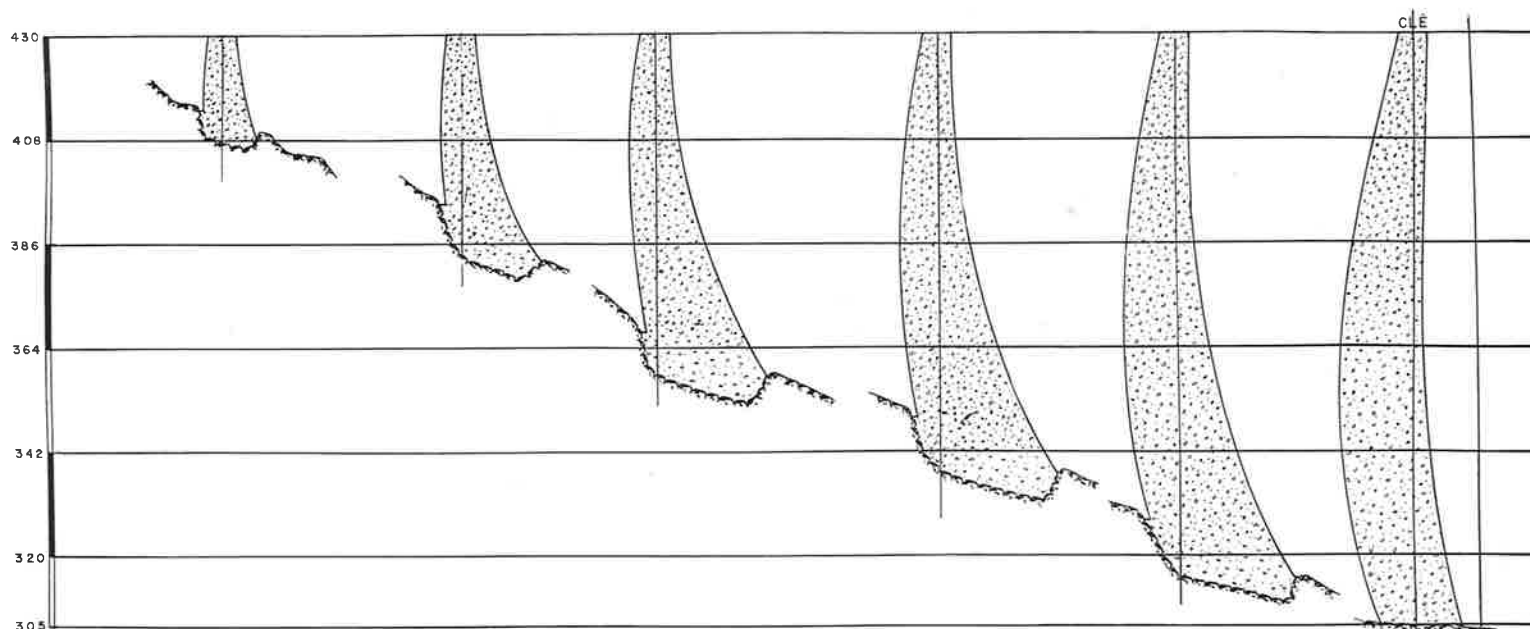


Fig. 5. — Coupes verticales du barrage.

A l'occasion des études du barrage de Vouglans, on a mis au point un programme de calcul sur ordinateur « I.B.M. 7094 » qui permet d'effectuer de façon entièrement automatique, sans aucune intervention intermédiaire et en quelques instants, un calcul de « Trial Load » jusqu'à la détermination des contraintes principales en grandeur et en direction. Ce programme prend en compte l'ajustement des 4 déformations suivantes :

- déformations radiales ;
- déformations tangentielles ;
- déformations angulaires ;
- et déformations de torsions longitudinales des arcs.

Il est prévu pour un barrage dissymétrique à arcs circulaires ou à courbure variable, pour différentes hypothèses concernant l'élasticité des fondations, le niveau de la retenue et la température. Il s'applique à un réseau de 6 arcs et 11 consoles. On peut introduire à chaque niveau et sur chaque rive des coefficients d'élasticité du terrain différents au nombre de 2 en chaque point (pour tenir compte éventuellement d'une anisotropie du terrain entre le sens horizontal et le sens vertical). Les températures et les différences de température

permet de s'assurer que la correspondance entre calcul et modèle était satisfaisante.

Une rapide série de 7 « Trial Load », sur des tracés de plus en plus satisfaisants, permit de donner naissance à la forme non circulaire qui a été définitivement retenue (spiraloïde n° 4). On trouvera (fig. 4 et 5) la vue en plan et les différentes coupes verticales de cet ouvrage. Les figures 6 et 7 donnent les résultats du calcul.

Inversant la façon de procéder initiale, c'est le modèle qui, après coup, servit à confirmer la bonne représentativité du calcul : ses résultats sont reportés sur la figure 8.

Comment se situe donc la forme définitive par rapport aux trois solutions précédemment étudiées ? On peut voir sur la figure 3 que les rayons de courbure en clé sont compris entre ceux des spiraloïdes n° 1 et 2 et que dans la partie haute ils sont pratiquement confondus avec ceux du spiraloïde n° 3 ; dans la partie basse par contre ils sont nettement plus petits. Autrement dit le spiraloïde n° 4 dérive du n° 3 en courbant plus fortement le barrage dans la partie basse. La surface moyenne de spiraloïde n° 3 était dans l'ensemble plus satisfaisante que ce que les résultats obtenus laissaient présager, l'erreur étant uniquement due à un épaississement

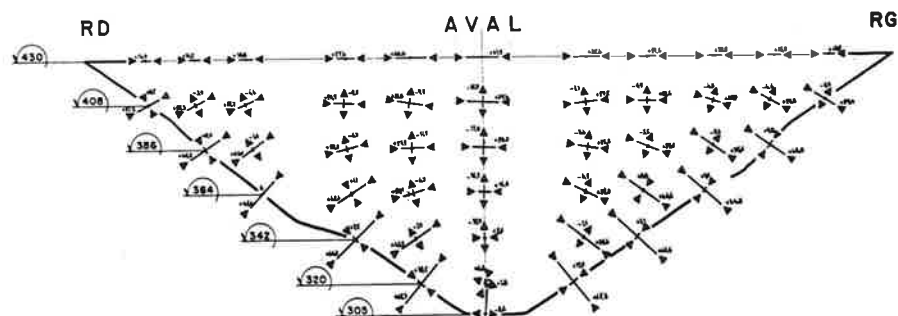


Fig. 6. — Résultats du calcul automatique sous l'effet de la pression hydrostatique seule.

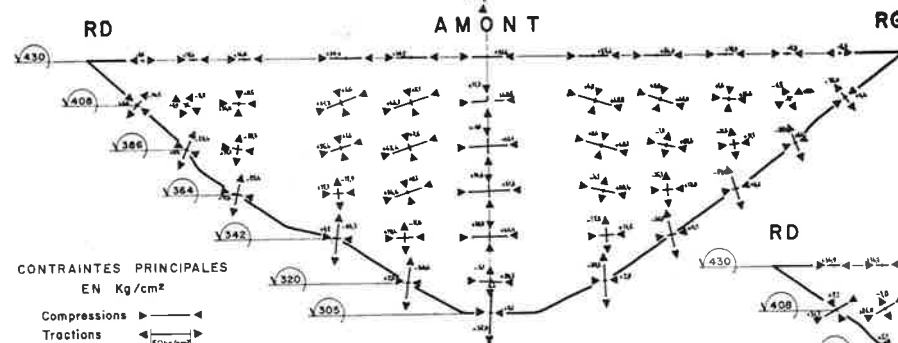


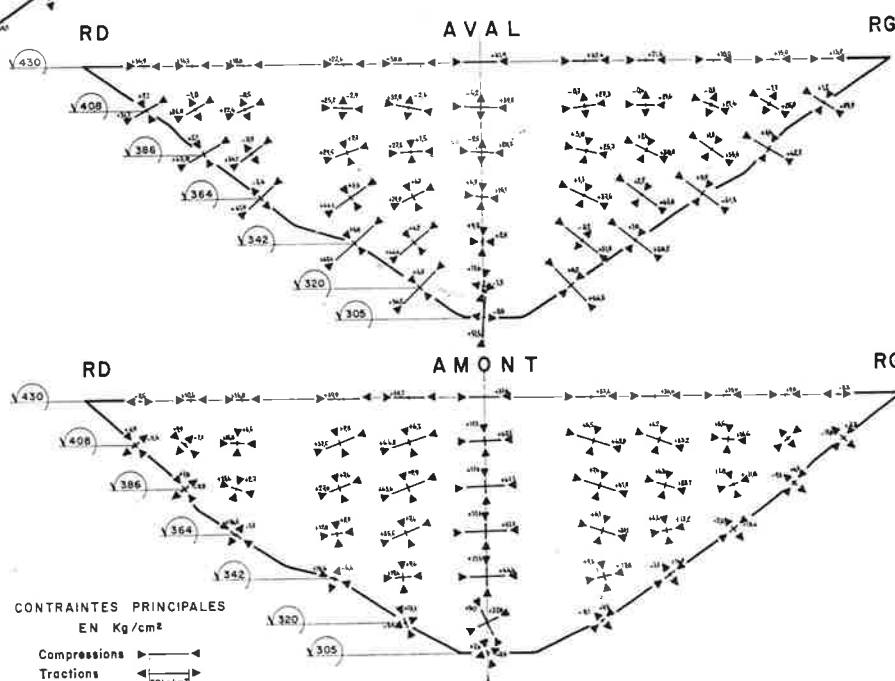
Fig. 7. — Résultats du calcul automatique sous l'effet combiné de la pression hydrostatique et du poids propre.

excessif des arcs aux naissances ; en supprimant les surépaisseurs il a été possible à la fois d'arquer plus nettement la surface moyenne à la base de l'ouvrage et d'améliorer les incidences du parement aval sur le terrain (voir fig. 2).

La matière ainsi gagnée a été utilisée pour épaissir l'ouvrage vers le tiers supérieur, ce qui a permis de soulager les consoles en les appuyant sur des arcs plus raides ; cette retouche a provoqué une nouvelle diminution des tractions verticales au pied amont des consoles.

A cette étape des études, deux vérifications complémentaires ont paru utiles :

- 1° On s'assura qu'en découpant le barrage en anneaux horizontaux indépendants, hypothèse exagérément pessimiste, sa stabilité était encore assurée ;
- 2° On vérifia qu'il en était de même en articulant



les consoles à leur pied, image d'un barrage dont toutes les consoles seraient totalement fissurées à leur base, ce qui est également extrêmement pessimiste. C'est néanmoins un cas qu'il était prudent d'imaginer dans cet ouvrage où l'on compte sur un effet important d'encastrement en pied.

VI. Comparaison avec l'ouvrage circulaire.

Enfin et à titre d'ultime contrôle on dessina un barrage à arcs horizontaux circulaires de même volume et de mêmes incidences sur le terrain que le barrage non circulaire définitif et l'on exécuta une « Trial Load » automatique de cet ouvrage.

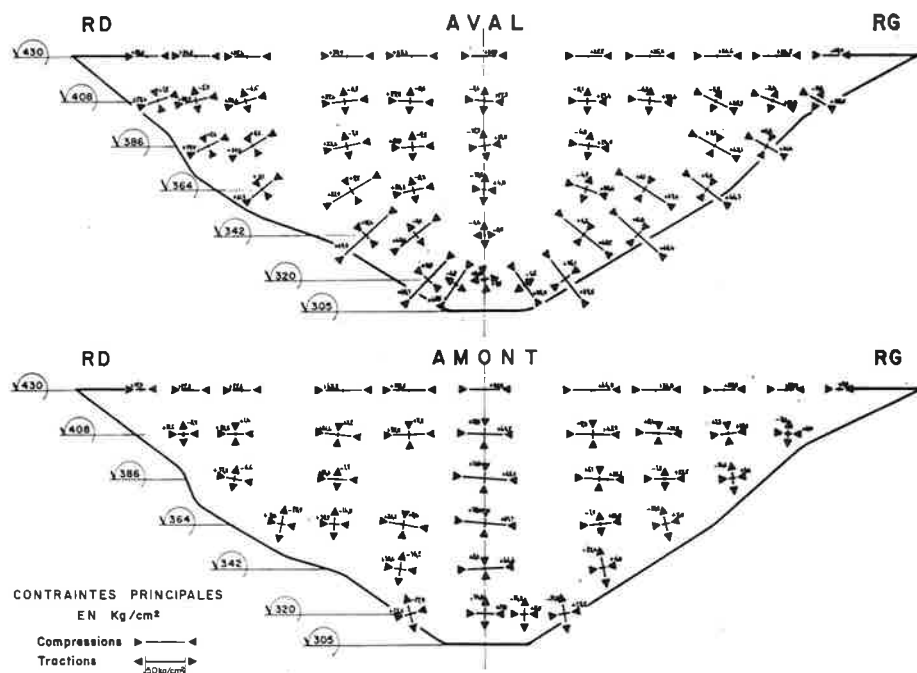


Fig. 8. Résultats du modèle sous l'effet de la pression hydrostatique seule.

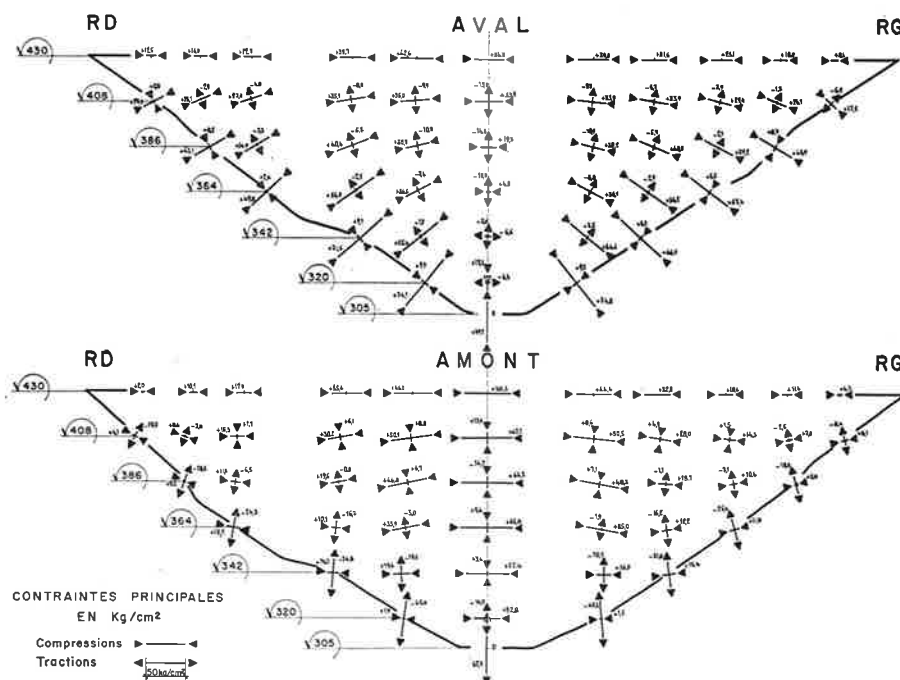


Fig. 9. — Barrage circulaire de même volume et de mêmes incidences. Résultats du calcul automatique sous l'effet de la pression hydrostatique seule.

Fig. 10. — Courbes des moments fléchissants comparés.

Les résultats de ce calcul sont indiqués à la figure 9, on peut constater, en comparant ces résultats à ceux de la figure 6, que les contraintes maximum sont sensiblement plus élevées dans le barrage circulaire : à l'amont, en clé les différences sont de l'ordre de 25 p. 100 et à l'aval, aux naissances, de l'ordre de 15 p. 100. Mais on remarquera surtout que les lignes de pression sont mieux centrées dans l'ouvrage spiraloïde ; le simple examen des contraintes principales horizontales montre que les moments fléchissants en clé au niveau des deux arcs supérieurs sont presque nuls dans le barrage spiraloïde alors qu'ils sont notables dans le barrage circulaire.

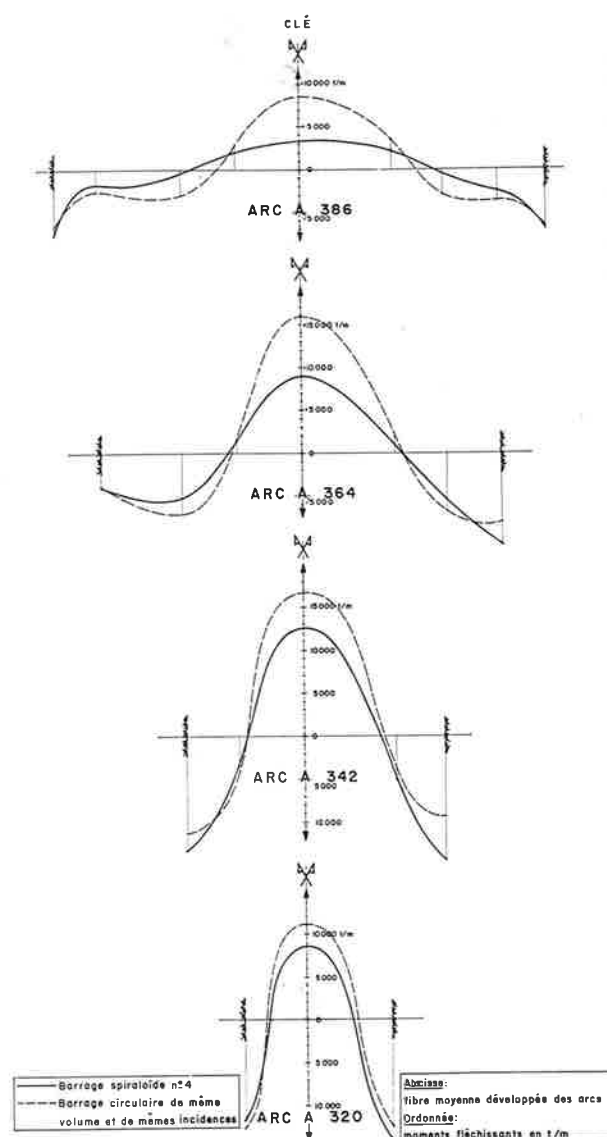
La figure 10 donne les moments fléchissants comparés dans les arcs des deux ouvrages ; l'avantage du spiraloïde est nettement marqué surtout en clé.

VII. Conclusion.

Au terme de la mise au point des formes du barrage de Vouglans il est salutaire de se demander ce qu'il reste en fin de compte des idées du début.

On a vu par quel cheminement ces formes ont été déterminées et comment, au système des modèles qui avait servi au départ à confirmer les idées d'origine en les précisant, le calcul a finalement été substitué en raison de la rapidité de l'outil mathématique forgé à cette occasion.

Les conclusions auxquelles on est arrivé ne sont valables que si l'on a affaire à un ouvrage monolithique, hypothèse admise aussi bien dans le modèle que dans le calcul. Qu'il en soit ainsi dans la réalité, on en est sûr puisque mêmes des voûtes très minces traduisent leur monolithisme en s'organisant en arcs inclinés, indépendamment des joints et des reprises. A Vouglans il en ira de même, et on y a veillé en imposant par surcroît un certain nombre de dispositions constructives, notamment l'imbrication des reprises de béton et la présence de boîtes de liaison dans les joints verticaux entre plots, tandis que la suppression presque complète des extensions élimine le risque de fissuration locale.



Les avantages des formes spiraloïdes sont de deux ordres :

— elles donnent un meilleur centrage des poussées dans les arcs et une meilleure répartition des contraintes dans l'ouvrage ;

— et surtout elles permettent d'améliorer les incidences de la voûte sur ses appuis.

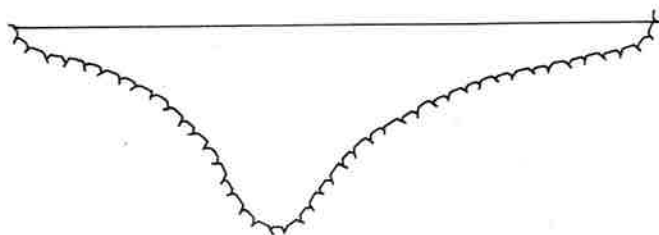
Le paramètre supplémentaire dont on dispose au départ en abandonnant le cercle donne tout d'abord au projeteur l'impression d'une trop grande liberté mais il permet, quand on le maîtrise bien, d'adapter partout les formes pour obtenir à chaque niveau l'incidence qui convient le mieux aux impératifs topographiques et géologiques locaux. Quand les arcs sont minces et longs, l'incidence géométrique reste voisine de l'incidence des poussées et on voit tout le parti qu'on peut en tirer lorsqu'on désire éviter de pousser obliquement sur un massif, en raison par exemple d'une orientation peu propice d'un réseau de diaclases ou d'une faille. Par contre quand ils sont courts et épais il faut bien se rappeler que la direction réelle des poussées diffère notablement de la tangente aux arcs.

Cette propriété d'attaquer plus franchement les rives est particulièrement précieuse lorsque le rocher sain est recouvert d'une épaisse zone altérée ; les formes à courbure variable, en permettant de donner aux arcs de larges incidences, sont susceptibles de s'accommoder de surprises possibles de fondation si on doit aller chercher un appui plus profondément que prévu. C'est certainement un cas où elles sont à retenir mais ce n'est pas le seul.

Quand doit-on avoir recours aux arcs à courbure variable ?

Il semble bien que la forme triangulaire de la vallée ne soit pas la seule pour laquelle ils soient souhaitables ; leurs avantages sont notables, mais il est probable qu'ils seraient encore plus déterminants dans une vallée dont le profil en travers est schématisé sur la figure 11 où les versants ont une allure nettement convexe et où l'effet d'augmentation de raideur des consoles serait encore plus marqué.

Fig. 11.



Dans le cas des vallées assez étroites, où le rapport de la longueur en crête à la hauteur est faible (inférieur à 2), il ne

semble pas qu'il y ait grand avantage à s'écarter des formes circulaires classiques.

Il en est de même pour des vallées larges en forme de rectangle où les consoles varient peu sur presque tout l'ouvrage. La constance de leur rôle conduit au maintien d'un même rayon de courbure de la clé aux naissances (ou tout au moins à une variation assez faible).

Reste enfin le cas des vallées larges, concaves, pour lequel on peut augmenter les rayons de courbure des arcs de la clé aux naissances pourvu que le fond ne soit pas plat sur une excessive largeur.

Mais il faut toujours pouvoir compter sur des appuis solides et sûrs jusqu'au niveau de la crête. Dans bien des sites, usés par l'érosion, pourris en surface par l'action répétée des agents atmosphériques : eau, gel, soleil, chaleur, on est obligé, pour tirer le parti maximum de la cuvette de retenue, de fixer la cote du couronnement à un niveau voisin de celui du sommet des rives et on ne peut alors compter sur un appui satisfaisant des arcs supérieurs, sauf en reconstituant la rive artificiellement, avec une culée par exemple. Dans de telles vallées si une forme spiraloïde est retenue, il ne faut pas oublier qu'on augmente les charges appliquées aux parties hautes des berges.

Et à travers cette réflexion on en revient à la considération de la qualité de l'ensemble des appuis. Mal armé jusqu'à présent — et sans doute encore pour très longtemps — pour déterminer scientifiquement à coup sûr la qualité des fondations d'une voûte, l'ingénieur devra toujours faire appel à l'appréciation personnelle pour juger un rocher avec ses propriétés intrinsèques, ses faiblesses, ses diaclases. La chance de Vouglans, c'est tout d'abord l'homogénéité de son calcaire, l'uniformité de la qualité de ses appuis, cette géologie calme qui, jointe à une topographie régulière, a permis de sortir en toute confiance des marques habituelles.

A-t-on retrouvé au terme de l'étude tous les avantages qu'on espérait retirer d'une forme spiraloïde ? On a uniformisé les contraintes et réduit leur maximum. Sans doute ainsi a-t-on mieux distribué la matière et par là même l'a-t-on économisée. Moins peut-être qu'on aurait pu le faire dans une vallée plus ouverte, mais très suffisamment pour que le bilan de l'étude soit largement positif, maintenant que la complexité des formes et la longueur des calculs ne sont plus un obstacle, grâce à l'emploi systématique des puissants ordinateurs électroniques.

Enfin, on a gagné beaucoup sur les incidences, et l'amélioration sensible de l'assise de l'ouvrage sur sa fondation qui en résulte justifie certainement, à elle seule, le choix qui a été fait à Vouglans.

R. GUILHOT, R. BOURRIOT et M. LEROY.