

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

SUJET

METHODE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT
D'UN BARRAGE VOUTE

1 PLANCHE
+ ANNEXE

Proposé Par :

M^r FARKAS G.

Etudié par :

M^r CHAMA Med

Dirigé par :

M^r FARKAS G.

M^{lle} ZERFA

PROMOTION : Juin 1988

Matériau:HYDRAULIQUE.....
Auteur:Mr. FARKAS. et. Melle. ZEBBA
Ingénieur: ..CHAMA. MOHAMED.....

مصلحة ج. الري
هوجو - زرفه. ف. ذ. وفر كاس
تلميذ مهندس: محمد. ضامو.

- طريقة عملية من ايجاد الخصائص
الهندسية - لسد عقدي -
- المدف هو انشاء طريقة عديدة من أجل تعيين
الشكل الأمثل - لسد عقدي - وذلك بتقليل ثقله. (M 24)

- الموضوع
- الملخص

Sujet: METHODE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES BARRAGES VOUTES.....

Résumé: Le but de ce travail est de programmer un méthode de dimensionnement des barrages voûtes. Nous avons proposé dans ce sujet une procédure itérative pour déterminer la forme convenable du corps du barrage . La méthode a été programmée sur l'ordinateur M 24

Subject: ... A PARTICULAR METHOD OF DESIGNING OF ARCH DAMS.....

Abstract: The main objective of this work is to prepare a computer programme for designing arch dams . In this thesis an iterative procedure for determining a suitable form for the body of the dam is proposed . This method was verified on oliveti - M 24 computer

" \square) E D I C A C E S "



Je dédie ce modeste travail :

- A ma mère qui a tant attendu ce jour.
- A mon père pour son aide morale et matérielle.
- A mes frères et soeurs.
- A ma famille
- A tous mes frères dans l'Islam.

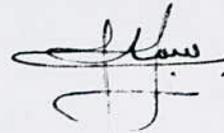
EMERCIEMENTS

*

Je tiens à remercier :

- Tous les professeurs et responsables ayant contribué à ma formation.
- Mr FARKAS et Melle ZERFA F.Z. pour leurs judicieux conseils tout au long de l'élaboration de cette thèse ainsi que toutes les personnes, si nombreuses pour les citer toutes, ayant contribué de près ou de loin, moralement ou matériellement, à l'élaboration de ce projet.

CHAMA Med



	<u>Pages</u>
Introduction.	
I. Généralités	2
I.1. Travaux précédents :	2
La construction des barrages de retenue et centrale.	
I.2. Définition du barrage	3
I.3. Buts du barrage	3
I.4. L'implacement du barrage	4
I.5. La hauteur du barrage	4
I.6. Conditions à imposer au sol de fondation du barrage	5
I.7. Types de barrages	6
I.8. Le choix du type du barrage.	8
II- Barrage-voûte	10
II-1. Caractéristique du barrage-voûte	11
II-1-1. Conditions indispensables pour pouvoir envisager un barrage-voûte	12
II-1-2. Avantage d'un barrage-voûte	13
II-2. Comportement d'un barrage-voûte	14
II-2-1. Effet de l'encastrement à la base	14
III- Influence de la poussée de l'eau d'un barrage-voûte.	15
III-1. Définition	15
III-2. Répartition de la poussée de l'eau entre éléments horizontaux et verticaux	15
III-3. Répartition de la poussée de l'eau entre arcs et murs.	17
III-4. Calcul de la poussée de l'eau d'un barrage-voûte.	18

IV. Influence de la variation de la température d'un barrage-voûte	19
IV-1. Effet de la température	
V. Détermination de la force hyperstatique d'un barrage-voûte	25
V-1. La force hyperstatique due à la pression de l'eau uniforme	25
V-2. Phases du calcul	26
V-4. Calcul de la force hyperstatique	28
VI. Orientation de la réaction des appuis d'un barrage-voûte	34
VI-1. Valeurs optimales de β_{opt} correspond à l'angle au centre 2α	36
VI-2. Epaissement des arcs aux naissances	37
VII. Détermination de la forme optimale d'un barrage-voûte par approximation successives.	38
VII-1. Schéma et mode de calcul	38
VII-2. Manière de projeter un barrage-voûte	43
VII-2-1. Choix de forme et calcul préliminaire par approximation successive	43
VII-2-2. Conditions de stabilité d'un barrage-voûte	48
VII-3. Présentation du programme et l'organigramme	53
VIII. Exemple numérique	61

Conclusion

Programme du Calcul.

I N T R O D U C T I O N

Qu'elles soient superficielles ou souterraines; les ressources en eau dans notre pays sont largement suffisantes pour répondre aux besoins des différents secteurs:

Alimentation en eau potable; Agriculture (irrigation)
et industrie etc....

Cependant et en l'absence d'études approfondies du milieu sur une grande partie; il s'avère encore difficile de localiser et de mobiliser la totalité de ces ressources naturelles.

Notre sujet consiste à étudier une méthode pratique pour la détermination des caractéristiques géométriques (dimensionnements) d'un barrage-voûte.

1017
1018

1019
1020

1021
1022
1023

1024
1025

1026
1027

CHAPITRE I

I. GENERALITES

I.1. TRAVAUX PRECEDENTS :

Construction des barrages de retenue et centrale

La construction d'un barrage de retenue en rivière ou d'un barrage de vallée, généralement conjuguée à une centrale; présuppose entre autres des enquêtes approfondies.

- Hydrologique; hydrographiques, et géologiques (concernant en particulier le sol de fondation)
- d'économie hydraulique
- d'économie de la construction

Dans ces enquêtes, il est nécessaire de réunir des données sur l'importance des précipitations et leur répartition dans le temps

- 1° - La capacité de la retenue du bassin versant
- 2- La compensation dans le temps
- 3- Le débit
- 4- L'évaporation
- 5- L'infiltration
- 6- L'influence de la région et la grandeur, la forme, la nature et la situation du bassin versant superficiel.

Les caractères principaux géologiques morphologiques hydrologiques et hydrographiques du bassin versant doivent en tout cas être parfaitement connus de déterminer l'emplacement des barrages de retenue.

Lorsque les enquêtes précitées sont effectuées, que certains emplacements sont envisagés pour le barrage considéré, il faut immédiatement et conjointement passer aux considérations économiques (exécution et études) et effectuer les études juridiques importantes

I.2. Définition du barrage :

Un barrage est un ouvrage destiné à retenir l'eau contre l'une de ses faces (face amont) à un niveau supérieur à celui qui règne sur l'autre face (face aval). IL doit fermer complètement la vallée et réaliser un bassin de retenue utilisé comme réservoir.

I-3. Les buts du barrage

Le but principal du barrage est l'accumulation qui sert à compenser l'irrégularité des apports de la rivière et à adapter l'utilisation et la consommation de l'eau aux besoins.

Aujourd'hui un barrage est généralement utilisé dans plusieurs buts.

- a - pour l'alimentation en eau potable (après épuration, si nécessaire)
- b- pour l'amélioration de la navigation en élevant le niveau d'étage
- c- pour la dilution des eaux usées
- d- pour l'alimentation des canaux
- e- pour les besoins industriels et la production énergétique
- f- pour l'agriculture en vue de l'irrigation

I-4. L'emplacement du barrage

L'emplacement du barrage dépend dans l'ensemble de :

- la possibilité d'établissement d'un bassin de retenue de la grandeur nécessaire
- conditions du sol de fondation
- l'étroitesse du barrage, la forme de la vallée peuvent être déterminants (est le sol de fondation qui est déterminant en premier lieu)

Il faut en particulier dresser et comparer pour les emplacements de retenue en question; des plans d'économie hydraulique qui tiennent compte des possibilités de puissance de chaque installation et de leur influence basée sur une période de temps assez long.

1° Etudes des apports et leur influence sur les sites environnants

Il faut également étudier l'emplacement de point de vue des possibilités de construction des ouvrages.

- Il faut examiner l'adjonction ultérieure d'autres bassins versants, l'utilisation complète de plus grandes hauteurs de chute, la situation des barrages existants ou envisagés en amont et en aval, l'action et l'influence du barrage à tout les points de vue.

2° Etudes des conditions et besoins particuliers locaux liés au site.

Il faut aussi étudier si l'ouvrage de retenue peut être menacé par des glaciers, avalanches, éboulis, Travaux de mine etc...

I-5. La Hauteur du barrage.

La hauteur du barrage doit être déterminé par le degré d'équipement maximal possible localement et défendable des points de vue de l'économie hydraulique et de l'économie pure (du point de vue hydrologique aussi et surtout).

Il est fréquent qu'un barrage ne soit porté qu'ultérieurement à sa hauteur totale.

Il faut donc dans la mesure du possible tenir compte de la hauteur dès le commencement de la construction du barrage. de la surélévation ultérieure maximale possible de façon que cette surélévation et éventuellement l'augmentation d'épaisseur nécessaire puissent facilement s'exécuter.

I.6.

Les conditions à imposer au sol de fondation du barrage.

Il faut examiner par une étude géologique approfondie; si le site convient à un barrage, non seulement pour l'ouvrage lui-même mais encore pour le bassin.

Pour le bassin, l'étanchéité et la stabilité des pentes est nécessaire.

Dans les régions marécageuses il faut également faire attention lors de la mise en eau car il peut se produire une surélévation du plan d'eau de certains marécages.

L'étude géologique et les méthodes d'exploration utilisées, dynamiques, sismiques, géotechniques etc.... doivent être complétées par des renseignements directs donnés par des fouilles galeries et sondages avec des études locales approfondies sur l'étanchéité et la compressibilité. Des études de paramètres physiques du sol doivent déterminer le comportement de ce dernier lors de la mise en eau. Il faut déterminer la profondeur et la constitution du rocher de fondation et étudier les moyens permettant d'obtenir économiquement une amélioration de la force portante et de l'étanchéité du sol de fondation.

Lorsque l'ouvrage du barrage se raccorde au rocher fissuré, il faut déterminer si les failles peuvent être étanchées par injections de coulis de ciment, de produits chimiques ou d'émulsions de bitume ou autres moyens. Il faut assurer en particulier que les fissures longitudinales de la vallée s'ils en existent peuvent être sûrement étanchées.

La surface de fondation doit être constituée de manière à ce qu'elle puisse supporter la pression exercée par le barrage avec la sécurité nécessaire et sans détérioration de la structure de la roche.

En outre cette dernière doit être aussi régulière que possible de façon à constituer un sol de fondation homogène.

La surface de fondation doit présenter une roche fraîche et ferme.

En ce qui concerne les contraintes du sol de fondation des barrages, l'importance de la contrainte de compression due au poids de l'ouvrage cède le pas à d'autres sollicitations du sol de fondation en particulier par l'eau retenue.

Il faut baser les calculs sur la modalité d'élasticité du sol de fondation.

Ce n'est qu'après une étude approfondie du sol de fondation que l'on peut entreprendre l'étude du projet. Un rocher qu'on peut atteindre à une profondeur économique, qui n'est pas coupé de fissures de failles ou de diaclases ou n'en a que de facilement étanchables et qui ne présente pas de possibilité de mouvements dans les sujets, convient à n'importe quel type de barrages. Le choix de ce dernier dépend alors de la forme de la vallée, de la hauteur de l'ouvrage, ainsi que des conditions locales et économiques.

Les barrages-voûtes ne peuvent être exécutés que sur de la bonne roche.

Car l'effet de voûte dépend de la stabilité des culés pour ce type de barrage, des conditions très dures doivent être imposées à la constitution de ces barrages. Ceci s'applique particulièrement dans le cas où les appuis sont constitués par des éperons rocheux saillants du flanc de la vallée.

1.7. Types de barrages et leurs applications

Les barrages sont construits en moellons, en béton, on distingue d'après leur forme :

- 1 - barrage-poids
- 2 - barrages à contre forts
- 3 - barrages poids-voûtes
- 4 - Barrages-voûtes
- 5 - barrages-coques et barrages coupoles

Selon les caractéristiques locales et les conditions imposées spécialement dans chaque cas. L'une des formes précédentes sera la plus économique et la plus judicieuse.

I-7-1. Barrages-poids :

Les barrages-poids sont construits généralement en moellons, et en béton.

Les barrages-poids sont construits en moellons sans joints; si leur hauteur n'est pas trop grande.

Les barrages-poids construits en béton sont donc tantôt rectilignes, tantôt avec axebrisé selon les données topographiques locales.

La section droite du barrage-poids est supposée être un triangle avec parement amont aussi vertical que possible.

Les barrages-poids ne doivent toutefois pas être construits pour une hauteur supérieure à 100m car le risque de fissures et particulièrement de fissures longitudinales croît rapidement avec la hauteur.

I-7-2 : Barrages à contre-forts :

Ils sont en béton, et ils sont plus légers que les barrages-poids, et ont donc une tendance plus forte à glisser vers l'aval. On incline souvent le parement amont pour bénéficier d'une composante verticale de la poussée de l'eau.

Chaque élément est séparé de ses voisins par un joint vertical, comme dans le barrage-poids.

I-7-3. Barrages coques et barrages-coupôles:

Il sont des cas particuliers des barrages-voûtes non seulement pour les vallées à flancs abrupts, les gorges, ainsi que les vallées triangulaires (ou en V) moins encore pour d'autres formes de vallées lorsque les conditions du rocher sont suffisantes.

Le calcul ainsi que le dimensionnement des barrages coques et des barrages-coupôles; pour lesquels il faut étudier les mêmes cas que pour les barrages-voûtes) sont similaires à ceux des barrages-voûtes.

I-7-4. Barrage-voûte : Un barrage-voûte réporte la plus grande partie de la poussée exercée par l'eau sur les rives par un effet d'arc.

I-8. Le choix du type de barrage.

Le choix du type de barrage s'effectue en fonction des caractéristiques locales et en particulier:

- le sol de fondation
- la forme de la vallée
- les facteurs hydrauliques
- climat
- les possibilités en matériels et en main-d'oeuvre
- l'extraction des matériaux de construction et des conditions

économiques.

Les conditions principales que doit remplir un barrage en fonction de tous ces buts et de constituer l'ouvrage le plus sûr, le plus stable et le plus économique.

I-8-1. Les caractéristiques géologiques et topographiques

sont également déterminantes pour le choix de la nature de l'ouvrage barrage et aussi l'importance des débits à évacuer au-dessus du mur de retenue. Enfin d'autres considérations particulières telles que les déplacements de routes et de chenaux de navigation peuvent avoir également une influence sur le choix.

I-8-2. Object du travail

L'objet de notre travail c'est l'établissement d'une méthode numérique pour trouver une forme idéale d'un barrage-voûte en minimisant son poids (voûte mince) avec ouverture constante.

I-8-3. Importance de l'économie dans le projet d'un barrage.

A cause de sa grande surface, en diminuant par exemple l'épaisseur du barrage par quelques dizaines de cm, on peut économiser une quantité considérable du béton.

CHAPITRE II

Chapitre II. BARRAGE-VOÛTE

II-1 Caractéristiques des Barrages-voûtes

Dispositifs généraux d'un barrage-voûte :

Conformément à l'expérience; on peut difficilement envisager le type du barrage-poids pour les barrages élevés, étant donné sa faible utilisation de la résistance du béton, sa grande masse entraîne des frais élevés et de grands risques.

Selon les conditions géologiques topographiques, et morphologiques ou autres, il faut chercher la meilleure solution parmi les nombreuses autres sortes ou formes de construction.

L'insensibilité aux irrégularités de forme et de charge croît avec l'effet de voûte élastique.

Définition du Barrage-voûte :

Le barrage-voûte (en béton) est fortement incurvé en plan, réporte la plus grande partie de la poussée exercée par l'eau sur les rives par un effet d'arc de voûte.

Un arc est une poutre courbe, dont la courbure est telle que les moments fléchissants soient réduits le plus possible. Son épaisseur à la base est de 15%, (vallée étroite) de sa hauteur. Il est donc à priori plus économique que le barrage-poids pour lequel $B/H = 75\% \text{ à } 80\%$. Mais les conditions d'appui sont plus sévères.

Les flancs de la vallée doivent être résistants et peu déformables.

Les courbes de niveau du rocher sain doivent être sensiblement parallèles à l'axe de la vallée et le rapport L/H (longueur développée du couronnement sur hauteur) ne doit pas dépasser 4 ou 5 exceptionnellement 6.

Il y a en principe deux types de barrages-voûtes

- barrage-voûte de rayon constant

- barrage-voûte d'angle d'ouverture presque constante.

et pour notre étude on choisit le type de barrage-voûte d'angle d'ouverture presque constant par ce que ce type présente vers le bas de faibles rayons et offre ainsi dans la partie inférieure un meilleur effet d'arc, du fait de la plus forte courbure.

Il permet aussi d'économiser du poids par rapport au barrage à rayon constant, le barrage devient ainsi nettement plus élastique de sorte qu'en même temps qu'une économie de matériaux, il présente une plus grande sécurité. et le choix de ce type représente la solution la plus économique et la meilleure du point de vue constructif.

II-1-1 Conditions indispensables pour pouvoir envisager un barrage-voûte.

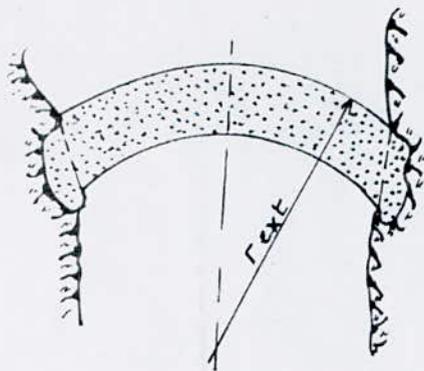
Il ne faut toutefois construire des barrages-voûtes que lorsque :

- la vallée est relativement étroite ($\frac{L}{H} = 3,4 \text{ à } 5$)

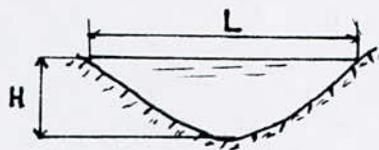
- Les appuis latéraux sont topographiquement favorables

- les appuis latéraux présentent une bonne résistance; le rocher doit être capable de supporter les efforts et les moments qu'impliquent la poussée de l'eau et lorsque la vallée et les culées à construire éventuellement permettent un angle d'ouverture suffisamment grand pour assurer un effort de voûte suffisant :

D'après l'expérience antérieure, compte tenu du sol de fondation rocheux et sa stratification, les culées doivent être aussi symétriquement que possible par rapport à l'axe de voûte.



Coupe horizontale d'un barrage-voûte



Elévation d'un barrage-voûte

II-1-2.

Avantages des barrages-voûtes :

- Le volume est inférieur à celui d'un barrage-poids et le m^3 de béton ne coûte pas plus cher, ni le m^2 de coffrage. L'épaisseur de la base est égale à 15 -25% de la hauteur (barrage-poids, environ 75%)
- on a une grande sécurité à cause de l'hyperstacité du système.
- La diminution des contraintes de retrait et de la poussée des eaux souterraines liée à la diminution de l'épaisseur du forage.
- des économies de matériaux peuvent atteindre jusqu'à 60% par rapport à un barrage-poids.

Enfin la possibilité de réduire le temps de construction, joue un rôle important.

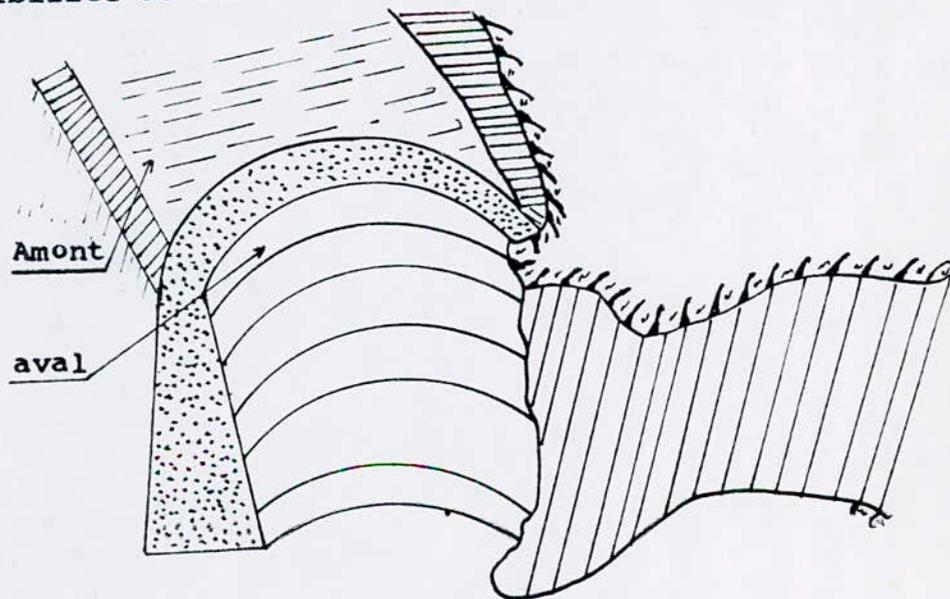


Schéma d'un barrage-voûte -vue de coupe

Chapitre II - 2

Comportement d'un barrage-voûte.

La structure d'un barrage en voûte est hyperstatique en phase fissurée.

Les éléments porteurs horizontaux sont maintenant des arcs encastrés plus ou moins élastiques aux deux extrémités, ne s'appuyant que très peu sur les éléments verticaux (murs) qui sont minces et encastrés seulement à leur base.

Donc on considère le barrage-voûte comme un assemblage d'arcs horizontaux et de consoles verticales.

effet de voûte :

Si la largeur de la vallée est faible

c'est à dire L/H varie entre 2 à 4; les éléments horizontaux interviennent plus activement. Mais si ces éléments sont en outre cintrés (angle au centre : 80° à 120°), leur rigidité augmente considérablement.

Ils prennent alors une part élevée de la charge de l'eau d'autant plus que les éléments verticaux sont de moindre épaisseur, donc plus faibles et moins chargés; on a en quelque sorte affaire à une succession d'arc), de portée diminuant vers le bas, liés entre eux dans le sens vertical (murs)

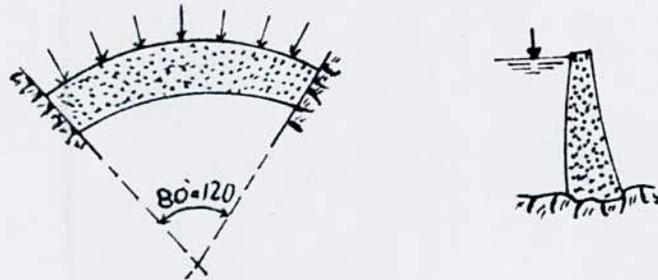


Fig: effet de voûte.

Ecartement des flancs de la vallée

Cet effet est comparable à celui d'un abaissement de température. L'arc ne change pas de longueur, mais il est plaqué par la poussée de l'eau contre ses appuis qui s'écartent, ce qui engendre des efforts intérieurs supplémentaires.



l'encastrement s'écarte

Effet de l'écartement des flancs de la vallée

II-2-1.

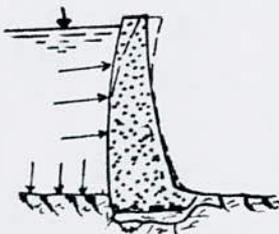
Effet de l'encastrement à la base.

Sous la pression de l'eau, la partie supérieure de la voûte se déforme vers l'aval.

Cette déformation diminue considérablement à la base qui est encastree.

Cette liaison provoque des flexions dans les éléments verticaux (les murs).

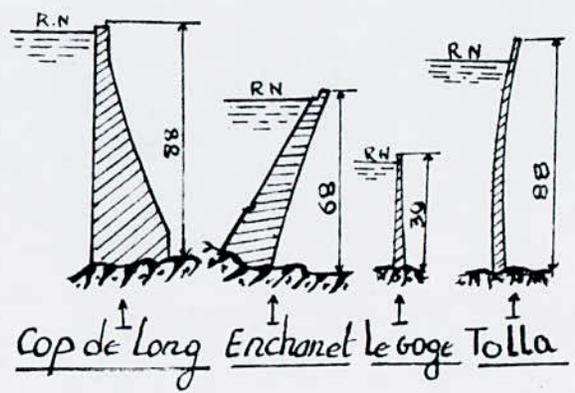
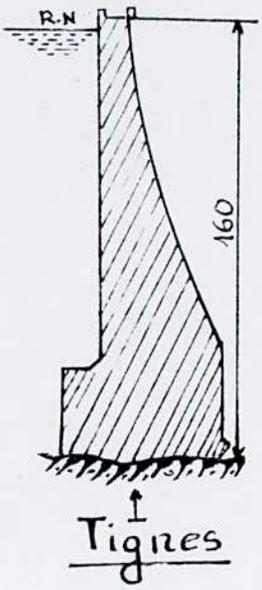
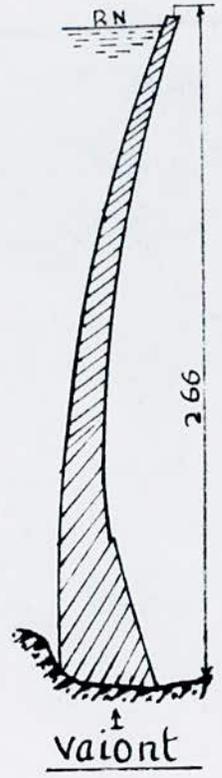
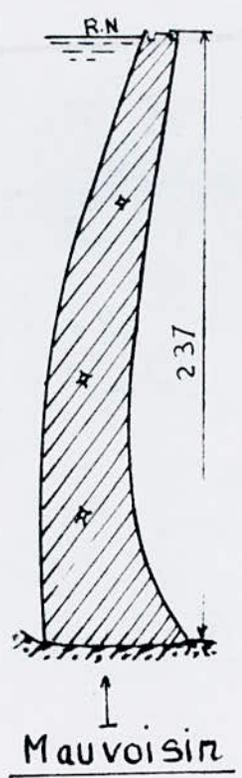
Il en résulte des tractions verticales sur le parement amont qui réduisent les compressions dues au poids propre. Ces tractions sont encore accentuées par la déformation de la cuvette car l'angle entre le parement et le rocher tend à s'ouvrir.



Effet de l'encastrement
à la base.

Différentes types de barrages voûtes
Remarquables

Profils en travers des barrages voûtes Remarquables.



CHAPITRE III

III) Influence de la poussée d'eau

III-1 Définition :

La poussée de l'eau sur le parement amont d'un barrage-voûte se traduit notamment par des efforts normaux de compression dans les arcs, donc des réactions sur les rives. Figure (II-1)

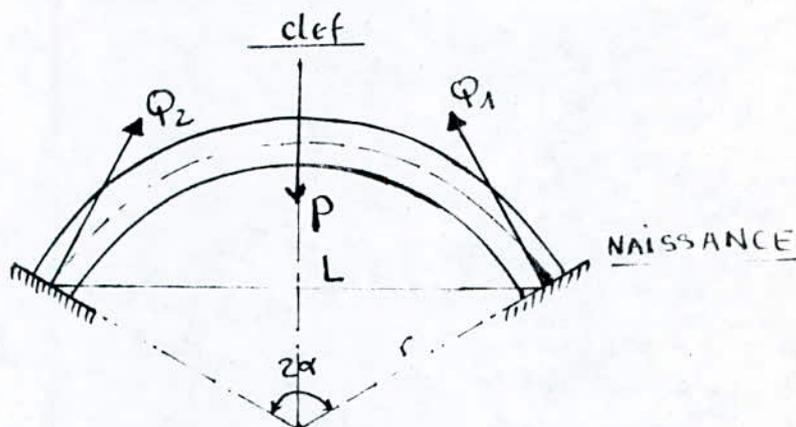


Figure (II-1)

Les réactions sur les rivés du barrage.

Ces réactions augmentent presque proportionnellement avec la pression de l'eau.

Dans un barrage-poids le rapport du poids du béton sur la poussée de l'eau est le facteur de stabilité qui favorise la stabilité du barrage. Cette stabilité est rapidement atteinte en cas de surélévation accidentelle du plan d'eau. Par contre un barrage-voûte peut supporter une pression bien supérieure à celle pour laquelle il a été conçu si la fondation est de bonne qualité.

III-2. Répartition de la poussée de l'eau entre éléments horizontaux et verticaux.

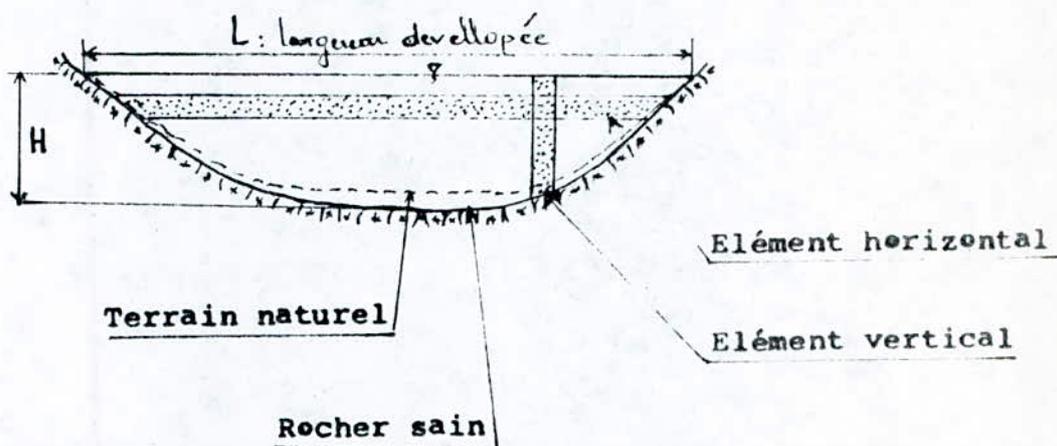
Un barrage-voûte achevé est un mur et arc, d'épaisseur variable au contour compliqué avec un bord libre, et le reste du contour encastré plus ou moins élastique dans une fondation.

Cet ouvrage est soumis tantôt à son poids propre seul, tantôt à son poids et à la poussée de l'eau, qui croît du haut vers le bas.

Donc les barrages voûtes ne sont pas un objet isolé, mais très compliquée .

Un calcul exact est impossible.

Dans ce cas une simplification importante consiste à découper le barrage en éléments porteurs horizontaux et verticaux (voir la figure (II-2)).



(Fig.-II-2)

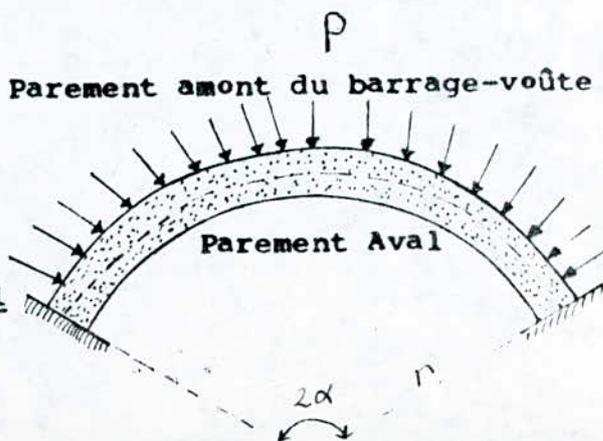
Décomposition en éléments porteurs horizontaux et verticaux

Dans les barrages-poids chaque tranche verticale de l'ouvrage reporte la poussée de l'eau, sur le sol de fondation.

Par contre dans les barrages-voûtes chaque tranche horizontale reporte la poussée de l'eau sur les rives latérales. (Fig. II-3)

-Répartition de la
poussée de l'eau sur
un élément horizontal

(Fig. II-3)



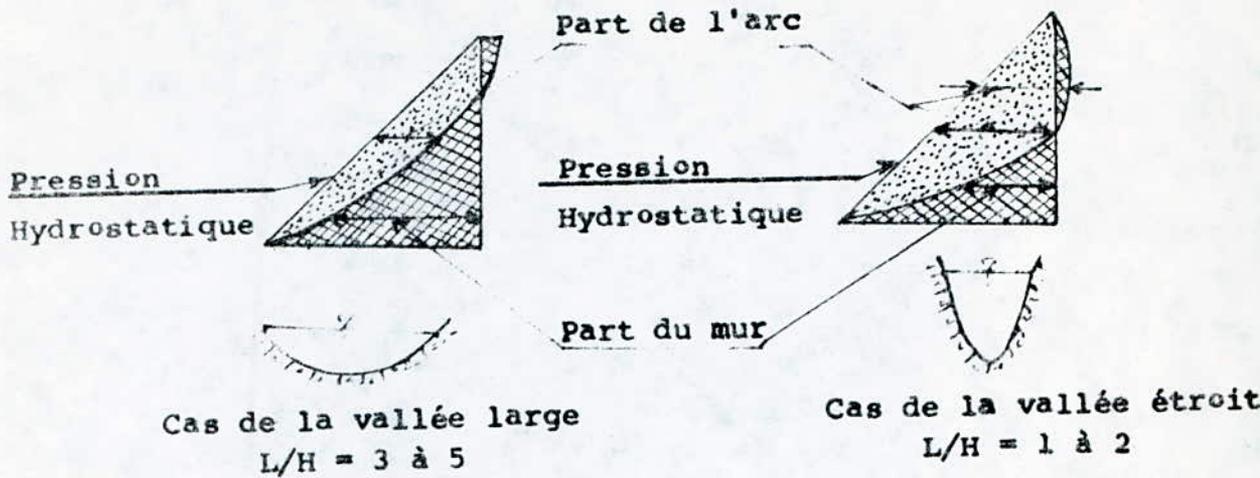
III-3. Répartition de la poussée de l'eau et entre arcs et murs.

L'ensemble du système "arcs-murs" est hyperstatique, on calcule simultanément les efforts et les contraintes sur les éléments horizontaux et verticaux, en posant comme condition que les déformations des deux systèmes sont identiques.

La pression hydrostatique due au lac est ainsi réportée entre les deux systèmes en fonction de leurs rigidités respectives.

Les diagrammes suivants de cette figure donnent l'allure de la répartition de la pression hydrostatique, entre les deux systèmes porteurs (part des arcs et part des murs) dans le cas d'une vallée large et dans celui d'une vallée étroite.

Du fait de l'encastrement à la base, les arcs inférieurs sont soulagés, inversement, les arcs situés au voisinage du couronnement sont surchargés, en effet, ils ont une rigidité relativement élevée (par rapport aux murs) et les murs ou consoles s'appuient en quelque sorte sur eux.



Effet "Arcs -murs"

Répartition de la poussée de l'eau

II-4. Calcul de la poussée de l'eau :

La pression agit perpendiculairement aux surfaces. Le poids spécifique de l'eau propre est :

$$\gamma_{eau} = 1 \text{ t/m}^3$$

On choisit le niveau du lac le plus élevé qui puisse se produire (par exemple lors de la crue maximum), en revanche, sauf cas exceptionnel on ne tient pas compte des vagues. donc la poussée de l'eau de chaque tranche est donnée par la formule générale suivante :

$$P (J) = P (0) + J \cdot \frac{H}{n} \quad \text{Voir le programme}$$

Avec :

P (J) : la force de la poussée de l'eau de chaque tranche, en (t/m²)

P (0) : la force de la poussée de l'eau à la surface libre en (t/m²)

H : la hauteur totale du barrage-voûte en (m)

N : Nombre des tranches

CHAPITRE IV

IV. Influence de la variation de la température

IV-1 : Effet de la température :

L'effet de la température se calcule généralement en admettant que les arcs sont indépendants, mais encastrés à leurs extrémités. Soit dans un rocher indéformable (pour le cas théorique), soit dans un rocher déformable (le cas réel).

Ce calcul est complexe, non pas à cause du calcul des contraintes proprement dit, mais à cause de la difficulté qu'il y a à déterminer l'état thermique d'une grande masse de béton.

En réalité, cette difficulté est plus ou moins compensée par le fait que les contraintes dues à la température sont nettement plus faibles, en valeur absolue que celles dues à la poussée de l'eau. Ce sont donc ces dernières qui, généralement priment dans l'appréciation de l'état de contrainte d'un barrage-voûte. Ce qui nous intéresse, ce sont les variations de température que subit l'ouvrage en service c'est-à-dire une fois que les joints ont été injectés de ciment, on peut les décomposer en deux catégories.

1- Variation uniforme de température :

de toute la masse d'une époque d'origine à une autre (t).

La date d'origine est celle du clavage des joints par injection de lait de ciment c'est-à-dire celle qui correspond au moment où les arcs deviennent hypostatique.

On considère la déformation d'une succession d'éléments d'arcs "ds" et on suppose que la température diminue

$$ds = \Delta t \cdot \gamma \cdot ds \quad \gamma \text{ (coefficient de dilatation thermique du béton)}$$

$$ds \cdot \cos \phi = \Delta t \cdot \gamma \cdot ds \cdot \cos \phi$$

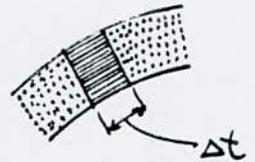
Tous ces déplacements cumulés donnent le déplacement du point A, de A en A'

$$\delta_{At} = \Delta t \cdot \gamma \cdot \int_{-\alpha}^{+\alpha} ds \cdot \cos \phi = \Delta t \cdot \gamma \cdot L$$

$$\text{où : } r \cdot \sin(2\alpha) = L$$

On peut assimiler ce déplacement à celui engendré par une force fictive R_t qui provoquerait le même déplacement

$$\delta_{AR_t} = \delta_{At} \text{ , c'est-à-dire}$$



$$\frac{L \cdot R_t}{E \cdot e} = \Delta t \cdot \gamma \cdot L \text{ d'où}$$

$$R_t = \Delta t \cdot \gamma \cdot E \cdot e$$

effet d'une augmentation
ou diminution de tempé-
rature Δt sur un arc
libre de se déformer.

(La contrainte est nulle)

Il en résulte qu'une variation de température uniforme donne naissance à la même hyperstaticité $\Delta X_t = K_t \cdot R_t$.

qu'une poussée R_t égale à $\Delta t \cdot \gamma \cdot E \cdot e$

$$R_t = t \cdot \gamma \cdot E \cdot e$$

Ce n'est variable que pour une fondation indéformable, $k_t = k$

$$\Delta X_t = K \cdot \Delta t \cdot \gamma \cdot E \cdot e$$

Δt : la date du clavage . (t)

γ : Coef. de dilatation thermique du béton

E : Module d'élasticité

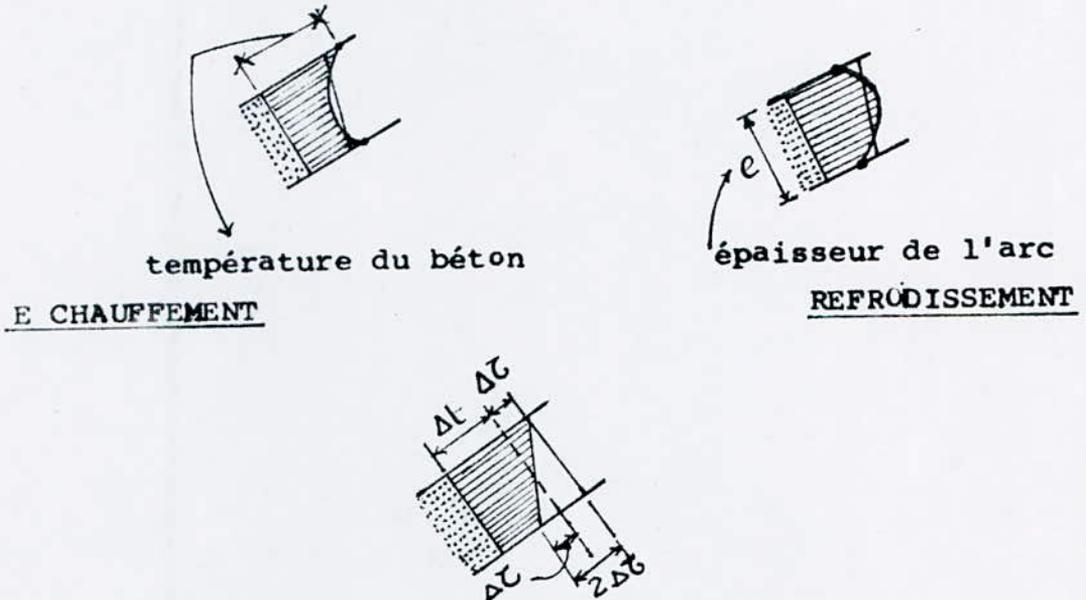
e : L'épaisseur (m)

donc $\Delta X_t = K. R_t$

Nous pouvons donc utiliser les mêmes valeurs de K que pour la poussée de l'eau.

2. Différence de température linéaire entre les parements $\pm \Delta T$

à un instant donné $2\Delta T$.



Etat de température du béton d'un arc soumis à un échauffement et un refroidissement simultanés.

Diagramme simplifiée de températures.

La température du parement aval, exposé à l'air, peut varier de -6 à 14°C . Le parement amont est exposé tantôt à l'air (lac vide) tantôt à l'eau dont la température est relativement constante, voisine de 4°C .

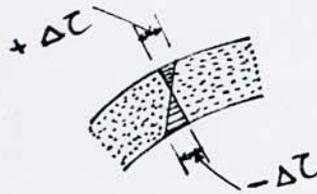
Il faut donc choisir des époques caractéristiques, par exemple entre l'été et l'hiver, suivant l'orientation des parements.

Ayant ainsi schématisé les températures extérieures, on peut déterminer, pour différentes époques, la répartition des températures le long d'une section à l'intérieur du barrage en admettant qu'elle est linéaire pour simplifier les calculs d'après la figure du dessus.

la forme du trapèze est choisie de telle sorte, par rapport à la surface réelle du diagramme

- les surfaces soient égales
- les moments statiques sont égaux.

Le trapèze ainsi obtenu est alors décomposé en un rectangle (variation uniforme de température, à partir d'une époque origine); la hauteur Δt , et deux triangles égaux (différence de température entre les deux parements) de hauteur $\pm \Delta \zeta$. Figure



Effet d'une différence de température entre les deux parements sur un arc libre de se déformer.

Il en résulte une contrainte qui est la même que si l'arc était encastré.

La fibre moyenne de l'arc ne change pas de longueur, mais la fibre extérieure s'allonge et la fibre intérieure se raccourcit.

Les sections de l'arc, qui ne peuvent pas tourner, sont sollicitées par un moment de flexion uniforme dont l'effet est d'annuler les rotations relatives que tend à provoquer la différence d'allongement des deux parements.

En effet, si les sections pouvaient se déplacer librement les unes par rapport aux autres, la rotation de deux sections voisines distantes aurait pour valeur

$$\Delta w = \frac{2 \cdot \Delta \zeta \cdot \gamma}{\dots}$$

Δw : la rotation entre deux sections voisines

le moment de flexion, uniforme dans l'arc entier, qui annule cette rotation a pour expression

$$M = \Delta w \cdot I \cdot E$$

ou $I = \frac{1 \cdot e^3}{12}$ est moment d'inertie

E : module d'élasticité du béton.

$$M = \frac{2 \cdot \Delta T \cdot \gamma}{e} \cdot \frac{1 \cdot e^3}{12} \cdot E = 1/6 \cdot \Delta T \cdot \gamma \cdot e^2 \cdot E$$

Les contraintes normales sur les parements, dues à ce moment M, auront pour valeur

$$\sigma_{0T} = \pm \frac{M}{W} = \pm 1/6 \cdot \Delta T \cdot \gamma \cdot E^2 \cdot E \cdot \frac{6}{e^2}$$

$$\boxed{\sigma_{0T} = \pm \gamma \cdot \Delta T \cdot E}$$

en revanche,
l'arc ne se raccourcit pas
↓

Req :

Dans ce cas particulier, cette expression

$$\boxed{\Delta r_t = 0}$$

est la même que celle valable pour les arcs encastés.

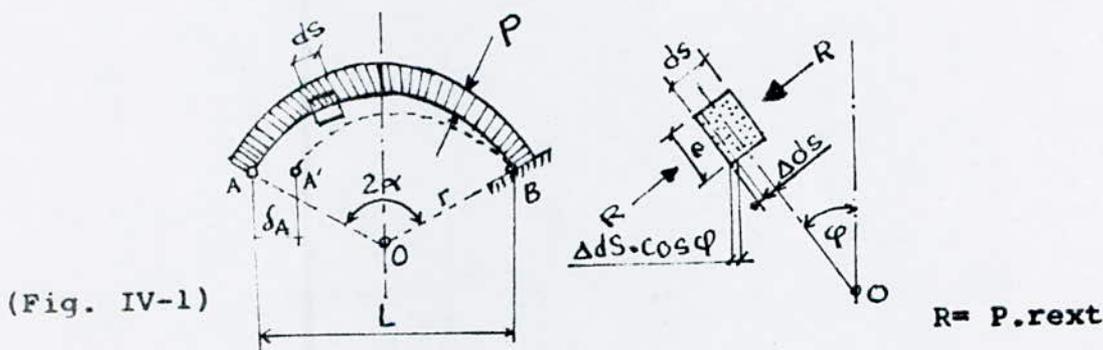
V) Détermination de la force hyperstatique d'un barrage-voûte.

V -1.

Recherche de la force hyperstatique due à la (pression d'eau uniforme):

Sous l'effet de cette pression l'arc tend à se raccourcir, mais il ne le peut pas, à cause des liaisons, les sections extrêmes restent fixes.

Nous étudierons le problème par la théorie des arcs élastiques minces que nous rappelons brièvement ci-après (Voir la figure IV-1)



Recherche de la force hyperstatique due à la poussée uniforme de l'eau.

Nous calculons d'abord quel serait le déplacement des sections extrêmes si la liaison n'existait pas, puis nous cherchons la force hyperstatique nécessaire à la ramener dans leur position primitive.

Ensuite nous pourrions calculer les contraintes dues aux charges extérieures (pression de l'eau) et celles dues à la force hyperstatique, ce qui nous permettra de juger de l'importance des unes et des autres.

CHAPITRE V

V-2. Phasés du calcul:

On distingue deux phases de calcul :

V-2-1. Première phase du calcul:

Selon la figure (IV-1), soit l'arc A-B encastré en B, mais libéré de son encastrement en A.

A va se déplacer d'une quantité δ_A , dans la direction de B jusqu'en A' pour connaître la valeur de δ_A , on considère une succession d'élément ds dont la position définie par l'angle variable ϕ

Chaque élément subit une compression qui se traduit par un raccourcissement Δds .

$$\Delta ds = \frac{R \cdot ds}{e \cdot E} = \sigma_0 \cdot \frac{ds}{E}$$

ou : σ_0 : est la contrainte obtenue par la formule du tube, en (t/m^2)

e : L'épaisseur en (m)

R : force qui dépend de la pression de la poussée de l'eau et le rayon extérieur du barrage en (t/m) .

E : module d'élasticité en (t/m^2)

La projection "horizontale" de $\Delta ds = \frac{R}{e \cdot E} \cdot ds \cdot \cos \phi$ et δ_A est la somme des projections "horizontales" de ds : est :

$$\delta_A = \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{R}{e \cdot E} \cdot ds \cdot \cos \phi = \frac{R}{e \cdot E} \cdot L$$

En effet $ds = r \cdot d\phi$, d'où :

$$\delta_A = \frac{R \cdot r}{e \cdot E} \int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos \phi \cdot d\phi = \frac{R \cdot r}{e \cdot E} \cdot 2 \sin \alpha,$$

avec $r \cdot 2 \cdot \sin \alpha = L$

Notons en passant que dans une direction prépendiculaire à la droite A - B, le mouvement de A serait nul. puisque

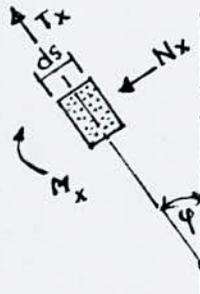
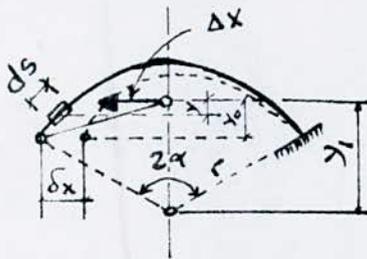
$$\delta_A^{\text{ (Verticale) }} = \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{R}{e \cdot E} \cdot ds \cdot \sin \phi = 0$$

V- 2 -2 Deuxième phase du calcul : voir la figure (IV -3) . La force hyperstatique ΔX doit ramener pour cela , il suffit de l'appliquer au centre élastique de l'arc qui est le centre de gravité des éléments

$$\frac{ds}{E \cdot I}$$

I : moment d'inertie

La position de la force hyperstatique Δx ne dépend que du rayon de l'arc et de l'angle α .



Position et valeur de la force hyperstatique due à la poussée de l'eau uniforme

$$y_0 = r \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right)$$

$$y_1 = r \cdot \xi = \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot r$$

V-3 - Calcul de la valeur de la force hyperstatique :

Sur chaque élément ds , la force ΔX engendre ~~par~~ :-

- un effort normal : $N_x = \Delta X \cdot \cos \phi$
- un effort tranchant : $T_x = \Delta X \cdot \sin \phi$
- un moment fléchissant : $M_x = \Delta X \cdot Y$

Y est le bras de levier (variable) de ΔX par rapport au centre de gravité des éléments successifs



fig. (IV -3)

Efforts engendrés par la force hyperstatique

La résistance des matériaux nous permet d'écrire quel est le déplacement δ_X du point A' jusqu'en A, sous l'effet de N_x , T_x , et M_x à savoir

$$\delta_X = \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{N_x}{E \cdot e} \cdot \cos \phi \cdot ds + \mu \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{T_x}{G \cdot e} \cdot \sin \phi \cdot ds + \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{M_x}{E \cdot I} \cdot ds$$

$$\delta_X = \Delta X \left[\int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{\cos \phi}{E \cdot e} \cdot ds \cdot \cos \phi + \mu \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{\sin \phi}{G \cdot e} \cdot ds \cdot \sin \phi + \int_{-\alpha}^{+\alpha} \frac{Y \cdot ds}{I \cdot E} \cdot Y \right]$$

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{E.e} \left[\int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos^2 \phi . ds + u \frac{E}{G} \int_{-\alpha}^{+\alpha} \sin^2 \phi . ds + \frac{e}{I} \int_{-\alpha}^{+\alpha} Y^2 ds \right] - (2)$$

Savons que $\delta_A = \frac{R.L}{E.e}$ et nous voulons que

$$\boxed{\delta_x = \delta_A}$$

Il suffit donc d'égaliser les expressions (1) et (2) nous obtenons :

$$\Delta x = \frac{- R . L}{\int_{-\alpha}^{+\alpha} \cos^2 \phi . ds + u \frac{E}{G} \int_{-\alpha}^{+\alpha} \sin^2 \phi . ds + \frac{e}{I} \int_{-\alpha}^{+\alpha} Y^2 . ds.}$$

et

$$\boxed{R = P. \text{ext}}$$

L : distance entre les centres de gravité des deux sections d'encastrement de l'arc en (m)

E : Module d'élasticité du béton de l'arc (t/m^2)

G : Module d'élasticité "transversal" du béton de l'arc en (t/m^2)

e : épaisseur de l'arc, en (m)

I : moment d'inertie de la section de l'arc

$$I = \frac{L.e^3}{12} ; \text{ en (m)}^4$$

$ds = r . d\phi$, avec $L = r . 2 \sin \alpha$.

ds : Surface élémentaire en (m^2)

Y : position du centre de gravité des éléments ds, par rapport à ΔX . en (m)

μ : coefficient sans dimension qui dépend de la forme de la section, dans le cas particulier, elle est rectangulaire. d'ou $\mu = 6/5$

$$G = \frac{E \cdot m}{2m + 2}$$

où m est le coefficient de poisson ou bien

$$\frac{E}{G} = 2 \left(1 + \frac{1}{m} \right)$$

Pour le béton, m est approximativement égal à 4

$$\boxed{m = 4}$$

donc $\boxed{\frac{E}{G} = \frac{5}{2}}$ et

$$\boxed{\mu = \frac{E}{G} = 3}$$

Alors

Δx peut s'écrire d'une manière schématique

$$\boxed{\Delta x = - R \cdot \frac{L}{\int + \int + \int}}$$

$$\boxed{\Delta x = - R \cdot K}$$

$$\text{ou } k = \frac{L}{\int + \int + \int} \quad (*)$$

Alors;

Le terme k : dépend uniquement des caractéristiques géométriques et physiques de l'arc.

et on peut le calculer une fois pour toutes (puisque on a des arcs circulaires et en choisissant par exemple les valeurs - ci dessus pour les coefficients μ et m)

Le terme R est une force qui dépend de la pression de l'eau (P) et du rayon extérieur de l'arc (r_e)

En résumé :

$$\boxed{\Delta x = - K \cdot R} =$$

Δx : la force hyperstatique en (t/m^2)

et le signe de Δx est contraire de celui de R

V -4 Calcul la valeur de k :

En calculant les trois intégrales, on obtient :-

$$k = \frac{1}{2 \sin \alpha \left[\left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) + \mu \frac{E}{G} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) + \frac{r_e^2}{I} \left(\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2 \sin \alpha}{\alpha} \right) \right]}$$

et si l'on pose

$$C_1 = 6 \left[\frac{\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha - \frac{2 \sin \alpha}{\alpha} \right]$$

$$C_2 = \frac{\cos \alpha}{2} \left(1 - \mu \frac{E}{G} \right) + \frac{\alpha}{2 \sin \alpha} \left(1 + \mu \frac{E}{G} \right)$$

$$(*) \frac{L}{\int + \int + \int} = \frac{L}{\int_{-\alpha}^{\alpha} \cos^2 \phi \cdot ds + \mu \frac{E}{G} \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin \phi \cdot ds + \frac{e}{I} \int_{-\alpha}^{\alpha} Y^2 \cdot ds.}$$

Donc, d'après les valeurs de ces coefficients on a

$$C_1 = 6 \cdot \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha - \frac{2 \sin \alpha}{\alpha} \right)$$

et

$$C_2 = \frac{2 \alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha$$

avec α : $1/2$ de l'angle de l'ouverture de l'arc en (degré)

$$\text{et } I = \frac{e^3 \cdot 1}{12}, \quad r^2 \frac{e}{I} = 12 \frac{r^2}{e^2} = 12 - \lambda^2$$

$$\text{donc } -\lambda^2 = \frac{rm}{e}$$

λ : c'est l'élanement de l'arc
sans dimension.

rm : rayon de l'arc en (m)

donc, le terme k défini par la formule suivante :

$$K = \frac{1}{\lambda^2 C_1 + C_2}$$

On peut donc facilement déterminer C_1 , C_2 et K .
puis la force hyperstatique

$$\Delta x = - R. K$$

pour un programme informatique (voir la fin de l'étude)

k : est d'autant plus petit que C_1 et C_2 sont plus grands.

Comme on a intérêt à réduire la force hyperstatique Δx , on choisira donc des angles au centre, plutôt grands et des élancements aussi grands que possible.

Toutefois, la nécessité de choisir aux appuis, une angle d'incidence des arcs convenables limite la valeur maximum des angles au centre 2α .

CHAPITRE VI

VY. ORIENTATION DE LA REACTION DES APPUIS.

Nous avons vu dans la figure (II-1) la réaction des appuis sur la rive du barrage. Dans le cas d'un rocher indéformable, la pression de l'eau donnée une contrainte

$$\sigma = \frac{R}{e} \left(1 \pm \frac{6.K.YK}{e} \right)$$

σ : est la contrainte qui donnée par la pression de l'eau en (t/ m²)

Le cas idéal consisterait à avoir des contraintes intra_dos et extra_dos égales.

Il faudrait donc que le second terme soit aussi petit que possible.

Si YK diminue, l'arc s'applatit.

Mais au contraire, pour que K soit petit, l'arc doit être courbé

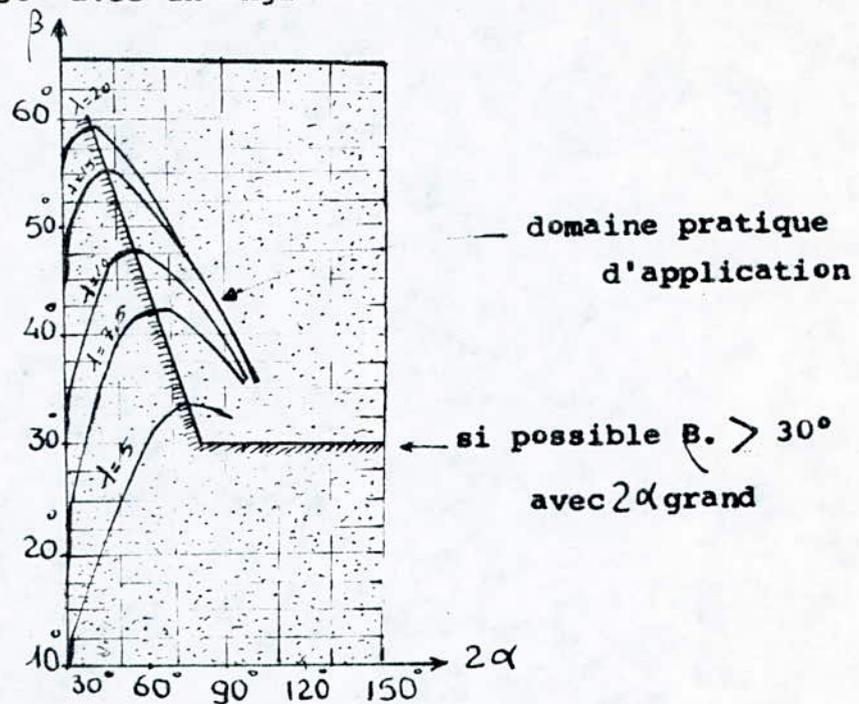
Il existe ainsi deux effets antagonistes, mais l'influence de K est prépondérante.

Or la sécurité d'un barrage-voûte dépend non seulement des contraintes de compression effectives et de la résistance du béton (le rapport des deux étant le coefficient de sécurité).

Mais elle dépend tout autant de la bonne direction des réactions. Si elles ^{sont} presque parallèles aux rives- la sécurité des appuis est compromise.

Cette nouvelle condition est très importante, elle limite donc la grandeur de l'angle au centre (voir figure (V-1))

Dans la pratique, on choisira des appuis tels que l'angle β soit égal au supérieur à 30° avec un angle au centre aussi grande que possible.



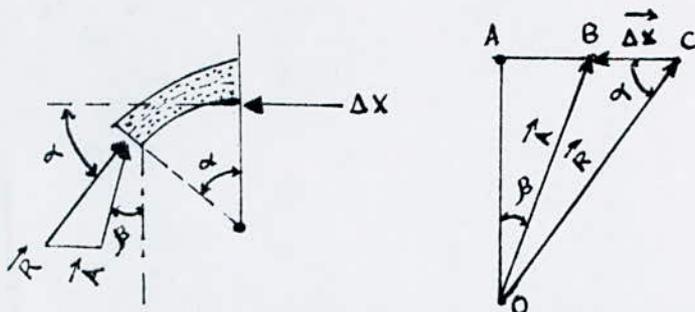
Valeurs de l'angle d'incidence de la réaction des appuis β en fonction de l'angle au centre 2α , et de l'élanement des arcs. λ

Vj - 1 :

EPAISSISSEMENT DES ARCS AUX NAISSANCES :

Nous avons aux naissances un risque d'apparition des contraintes de compression assez élevées à l'aval incompatible avec une qualité normale du rocher de fondation, ou des tractions inadmissibles à l'amont.

On peut y remédier par un artifice qui consiste à épaissir localement l'arc à l'aval, en faisant l'hypothèse qu'on ne change pas sa rigidité (c'est - à - dire en admettant que ni la valeur, ni la position de l'hyperstatique Δx sont affectées par épaississement)



L'orientation des appuis d'un barrage-voûte (β)

On sait que si K est grand, Δx l'est aussi grande, et, ainsi qu'en le voit sur la fig. l'angle β diminue.

Or pour la sécurité des appuis, on devrait avoir β aussi grand que possible.

Mais la fig. montre aussi que si α augmente (ce qui serait souhaitable pour diminuer Δx): β diminue à son tour, on a deux effets contraires.

La valeur optimum de β correspond à une valeur intermédiaire de 2 α

$$\Delta x = K R = BC'$$

$$AC = R \cdot \cos \alpha$$

$$AO = R \cdot \sin \alpha$$

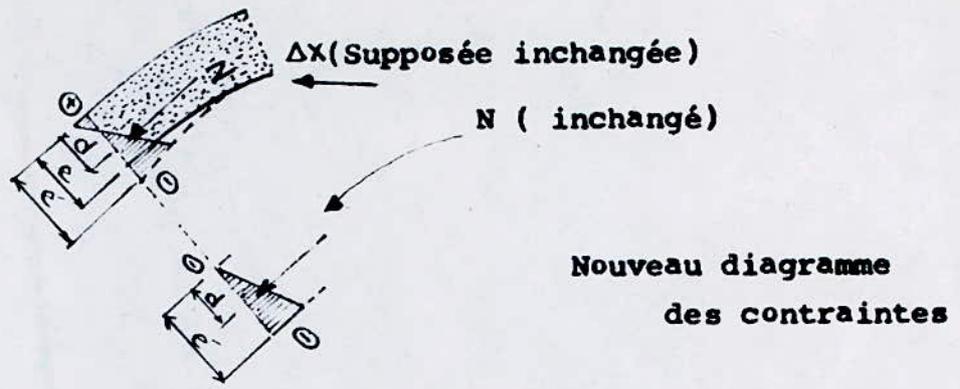
$$AB = R \cdot \cos \alpha - K \cdot R = R (\cos \alpha - K)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \alpha - K}{\sin \alpha}$$

donc

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left(\frac{\cos \alpha - K}{\sin \alpha} \right)$$

Enfin : lorsqu'on doit choisir les formes d'un barrage-voûte. On bute sur différentes conditions qui sont souvent contradictoires on sera donc obligé de procéder par tâtonnements successifs.



EPAISSISSEMENT DES ARCS AUX NAISSANCES.

CHAPITRE VII

VII. Détermination de la forme optimale
d'un barrage-voûte
par approximations successives.

Pour la recherche d'une forme optimale d'un barrage-voûte le recours à la méthode des approximations successives s'avère la plus utile.

Lorsque la vallée est étroite, les formes sont relativement simples ; elles se rapprochent d'un cylindre de révolution, par contre, si la vallée est large, on doit adapter les formes à la courbure, d'épaisseurs variables.

Dans la pratique, la vallée est souvent dissymétrique, et on doit tenir compte de la déformation du rocher et des effets thermiques.

Le calcul devient long et compliqué :

On procède alors comme suit :

- Estimation par expérience les formes les plus convenables
- Calcul sommaire, avec des hypothèses simplificatrices.
- Correction et amélioration des formes.

La forme définitive résulte donc d'approximations successives.

VII-I Schéma et mode de calcul

VII-I-1. Remarque préliminaire:

Conformément au schéma des opérations successives. On commence par dessiner les formes générales du barrage-voûte, puis on vérifie par le calcul si elles sont convenables, c'est à dire si les contraintes correspondent aux différents cas de charge sont admissibles.

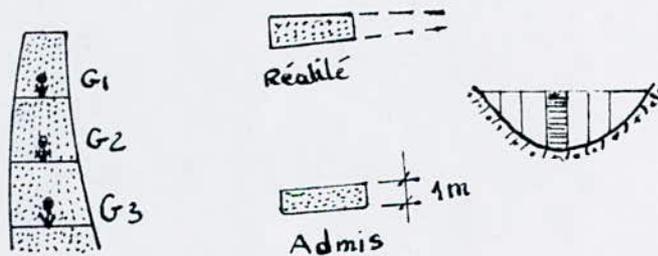
Au dessous des titres qui suivent on indique les charges pour lesquelles on choisit en général le mode de calcul correspondant.

VI-1-2. Tranches verticales indépendantes : Sous l'effet du poids propre du barrage.

Un barrage-voûte se construit par tranches verticales indépendantes qui ne sont soudées entre elle. Qui à la fin des travaux, par injections d'un coulis de ciment dans les joints. Cette opération s'appelle le "clavage de la voûte"; c'est précisément ce qui la rend hyperstatique.

Le poids propre augmente donc peu à peu, mais agit toujours sur les mêmes sections horizontales. Il est donc logique de calculer l'effet du poids propre dans cette hypothèse - (c'est -à - dire comme pour un barrage-poids).

Pour simplifier, on admet que les bases ou sections horizontales, sont des rectangles de largeur L (Voir Figure VI-1)



Détermination de l'effet du poids propre par tranches verticales

(Comme pour un barrage poids)

En ce qui concerne la forme et l'inclinaison des tranches verticales (mur), il existe deux conceptions opposés :

- Les partisans de la première exigent que le poids propre s'oppose aux tractions (ou en tous les cas qu'il s'oppose en partie aux tractions) dûes à la part de la poussée de l'eau supportée par le mur.

Il faut donc ^{le} cas échéant incliner le mur vers l'amont on risque que des tractions se manifestent à l'aval. A lac vide.

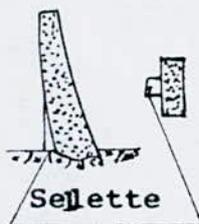
Si ces tractions paraissent inadmissibles, on peut alors buter le mur par des sellettes à l'amont figure (VI-2).

- Les partisans de la seconde ne s'occupent pas des tractions à l'amont du mur, puisque le poids (à lac vide) ou le poids et la poussée de l'eau (à lac plein) sont de toutes façons reportés (mais alors complétement) sur les arcs.

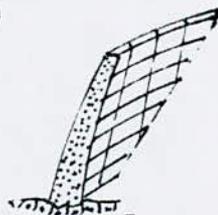
Cette transmission des charges aux arcs seuls, n'est possible que si les joints verticaux sont bien clavés par l'injection.

Malgré toutes ces précautions, des fissures à l'amont sont inévitables. Il est alors préférable de prévoir d'emblée un joint avec dispositif d'étanchéité.

(Voir figure VI-3)



(Fig. VI-2)



Le mur s'appuie entièrement sur les arcs

(Fig. VI-3)

Forme et inclinaison des tranches verticales (deux conceptions)

VI-1-3. Arcs indépendants et libres : Sous l'effet de la poussée de l'eau. (Formule du tube).

On découpe le barrage-voûte en tranches horizontales supposées libres de se déformer dans un plan horizontal. (Autrement dit, les arcs peuvent glisser les uns sur les autres). Pour simplifier, on admet que ces arcs ont une épaisseur constante, et on applique une poussée d'eau uniforme. La forme logique de l'arc est un cercle d'où on peut appliquer la "formule" du tube.

VI-f-4.

PRINCIPE DE LA FORMULE DU TUBE :

Soit une conduite circulaire a paroi mince, sur laquelle agit une pression extérieure P.

$$P. \text{ ext} = e. 1. \sigma$$

d'ou

$$e = \frac{P. r_e}{\sigma_{\text{tube}}}$$

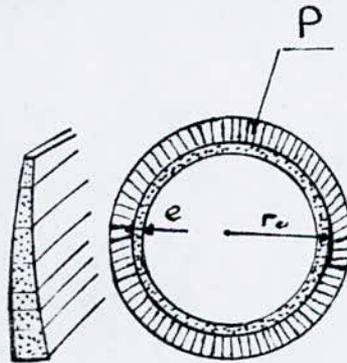
e : épaisseur constante de l'arc : [m]

r_e : rayon extérieur : (m)

p : pression uniforme de l'eau (t/m²)

σ : Contrainte moyenne (sur l'ensemble de la section) admissible (t/m²)

(Fig.VI-4)



arc indépendant et libre formule du tube.

Ce procédé n'est évidemment par rigoureux, puisqu'il néglige toutes les liaisons, mais il donne très rapidement une première idée des dimensions nécessaires. On sait par expérience que les contraintes ainsi calculées devront être majorées dans certaines zones.

VI-1-5

Arcs indépendants, mais encastrés à leur extrémité : - sous l'effet de la poussée de l'eau et de la température.

On distingue deux cas : -

1- cas .

Appuis indéformables : $n = \frac{E_r}{E_b} = \infty$

E_r : module d'élasticité du Rocher. en $\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$
 E_b : n° " du béton . en $\left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right)$

On considère toujours des tranches horizontales, mais on étudie les arcs par la théorie des arcs élastiques minces, les appuis étant supposés indéformables.

Nous verrons que, par rapport à la formule du tube, les contraintes résultant de ce calcul sont majorées dans certaines zones, mais elles le sont dans une limite raisonnable (au maximum de 50 à 60%).

2 Cas :

Appuis déformables : -

$$0,5 \leq n \leq 1$$

Quelle que soit sa qualité, le rocher se déforme sous la poussée des arcs.

Les fondations des arcs s'enfoncent un peu dans les massifs de rives par suite de l'effort normal, elles glissent et pivotent sous l'effet de l'effort tranchant et du moment flechissant.

Les liaisons étant moins rigides, les contraintes diminuent aux naissances, mais augmentent à la clé.

En général, cette augmentation n'est pas gênante, car on peut agir, le cas échéant, sur la qualité du béton. Aux naissances, où l'on ne peut pratiquement pas améliorer la qualité du rocher, la diminution des contraintes est même souhaitable.



$$h = \infty$$

$$0,5 < n < 1 \text{ (favorable)}$$

Arcs indépendants, mais encastés à leur extrémités.

VII-1.

Manière de projeter un barrage-voûte.

Comme on l'a remarqué plus haut la topographie et la géologie du canyon jouent un rôle prédominant dans la construction d'un barrage-voûte, une fois que l'on dispose d'un bon relevé topographique du terrain, il faut encore déterminer la position du rocher sain (qui est souvent recouvert d'éboulis ou d'alluvions), ce qui permettra de fixer la profondeur des excavations.

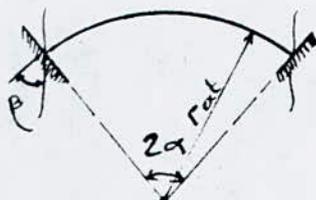
La détermination de cette profondeur se fait par sondages.

VIII-1.

Choix des formes et Calcul préliminaire par approximations successives:

Pour le choix des formes on commence par tracer quelques arcs sur toute la hauteur du barrage (du haut vers le bas), en veillant à ce que leur orientation soit convenable par rapport au rocher sain,

Soit $\beta \geq 30^\circ$, et en conséquent les angles d'ouverture 2α varie de 80 à 100° (voir fig. VI-5)



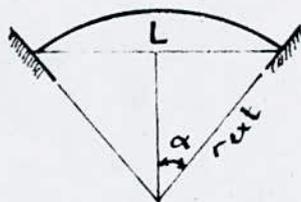
Dessin de quelques arcs (du haut vers le bas)

On calcule les rayons de ces différents arcs par le principe triangulaire:

Soit L la largeur de l'arc du barrage; (2α) l'angle d'ouverture et (r_{ext}) le rayon extérieur, on aura par l'application de la règle triangulaire (fig.) VI-6).

$$\sin \alpha = \frac{L/2}{R_{ext}} \Rightarrow$$

$$R_{ext} = \frac{L}{2 \sin \alpha}$$



L : largeur de l'arc en (m).

R_{ext} : Rayon extérieur en m.

— On calcule l'épaisseur de ces différents arcs par la formule du tube qui est définie par :

$$e (I) = \frac{P(J) \cdot r_{ext} (J)}{\sigma_{tube} (J)}$$



Avec la pression hydrostatique totale, mais un σ_{tube} égal à 30 ou 50 kg/cm² seulement, on choisit une épaisseur du couronnement entre 3 et 7 m environ.

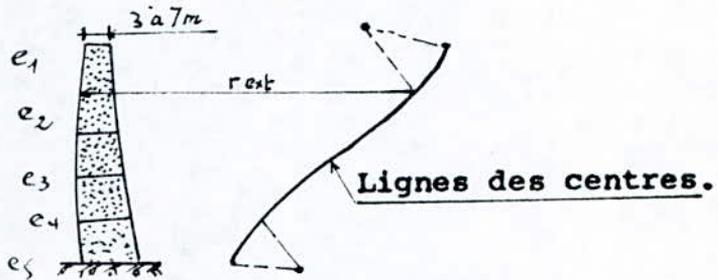
On sait d'avance que dans la partie inférieure du barrage la contrainte moyenne de compression sera plus faible, puisque la "part de l'arc" est inférieure à la pression hydrostatique totale, au voisinage du couronnement, l'épaisseur est suffisante, puisqu'on la choisit plutôt d'après des considérations pratiques.

On sait surtout que la contrainte moyenne de compression (apparemment faible) sera modifiée de ± 50 à 60% sur les bords de la section, du fait que l'arc est en réalité encasté et qu'elle sera en outre modifiée par les effets de la température (\pm).

C'est donc pour toutes ces raisons que l'on choisit à priori un tube faible (précisément compris entre 30 et 50kg/cm²)

Une fois les épaisseurs pour chaque tranche du barrage connues, on place correctement les arcs les uns sur les autres, en s'assurant que la ligne des centres est simple. Se faisant, on sera peut-être amené à corriger un peu les épaisseurs par souci de continuité (fig. VI-6).

(f VI-6)



Dessin de la ligne des centres.

La ligne des centres doit être simple et composée, par exemple, d'éléments de droites et d'arcs de cercle (ou de parallèles°);

Elle doit se trouver si possible dans un plan vertical (c'est faisable lorsque la vallée est symétrique).

Pour le calcul de la force hyperstatique du corps du barrage nous avons :

$$C_1 = 6 \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha - \frac{2 \sin \alpha}{\alpha} \right)$$

$$C_2 = \frac{2 \alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha$$

- L'allongement λ est $\lambda = \frac{rm}{e}$

le terme K = $\frac{1}{C_1 \lambda^2 + C_2}$

$R = P \cdot r_{ext}$: c'est force qui dépend de la pousse de l'eau et le r_{ext} de l'arc.

Donc :

la force hyperstatique ΔX est pour chaque tranche du barrage est donnée par :

$$\Delta X (J) = -K(J) \cdot R (J) \quad \text{en. (t/m}^2 \text{)}$$

$\Delta X (J)$: la force hyperstatique de chaque tranche en (t/m²).

K : paramètre qui dépend des caractéristiques géométriques et physiques du barrage.

R : C'est une force qui dépend de la poussée de l'eau et du rayon extérieur r est (t/m).

VI-II-2.

Conditions de stabilité d'un barrage-voûte:

Les calculs sont effectués, en général, en décomposant le barrage en arcs horizontaux supposés indépendants les uns des autres.

A chaque arc, les forces appliquées sont :

- le poids propre G
- la poussée de l'eau P
- les réactions des surfaces d'appui
- les forces des sous-pressions.

Les sous-pressions dans l'ouvrage peut être négligées, en ce qui concerne la stabilité pour les raisons suivantes :

- les fissures horizontales sont sans gravité car chacun des arcs horizontaux est calculé indépendamment des arcs contigus.

- les fissures verticales ne présentent pas trop d'inconvénients, car le ~~par~~ment amont est, en général, comprimé ; s'il ne l'est pas près des appuis. Il se forme une voûte active qui travaille en compression.

IL est cependant nécessaire d'éliminer les sous-pressions dans les massifs rocheux, par drainage (galeries et forages) car les appuis rocheux se comportent comme des barrages-poids.

Les conditions de stabilité peuvent être décomposés en deux groupes.

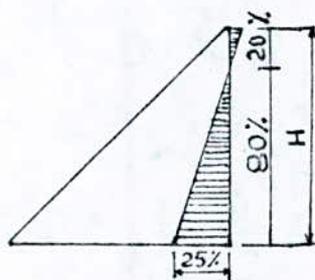
- équilibre statique ;
- équilibre élastique.

VI-II-3.

- Equilibre statique :

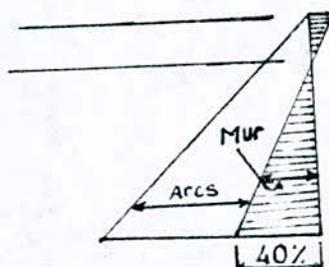
On s'assure en même temps que le "mur central est stable" à lac vide" (poids propre) et à lac plein. Dans le deuxième cas, nous devons connaître la "part" de la pression hydrostatique qui agit sur le mur.

On admet à priori une répartition provisoire schématisée comme suit :



VALLEE ETROITE (B.mince)

$$L/H = 1,5 \text{ à } 2.$$



VALLEE LARGE

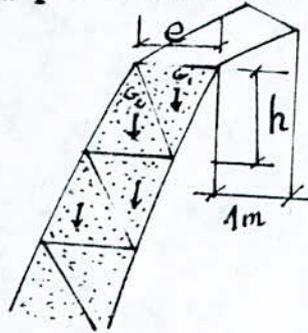
$$(B.\text{épais})L/H = 3 \text{ à } 4$$

Contrôle de la S. du mur central (Rep.Schématique de p.de l'eau)

Equilibre statique :

Poids propre (G).

On calcule le volume de chaque tranche, en divisant chaque tranche en deux triangles à peu près similaires : de $1m$ de la largeur.



La surface du triangle est : $S = \frac{1}{2} h . e$

S : la surface du triangle en (m^2)

h : la hauteur d'une seule tranche en (m).

E : l'épaisseur de cette tranche en (m)

$$\text{d'où : } V (J) = \frac{1}{2} h . e (J) . l$$

$V (J)$: le volume de chaque tranche en (m^3) avec $1 m$ de largeur.

Le volume total, est la somme des $V (J)$

$$V = \sum V (J)$$

On calcule le poids du barrage :

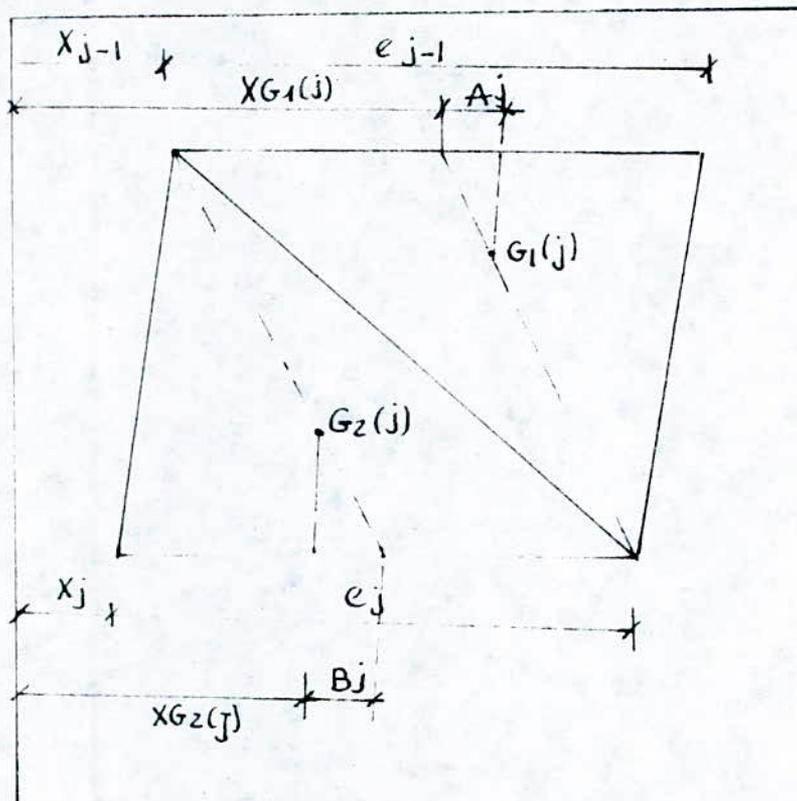
$$G (J) = V (J) . \delta b.$$

$G (J)$: le poids de chaque tranche en (t)

δb : le poids spécifique du béton qui varie en $2,4$ à $2,5$ (t/m^3)

Le poids total $G = \sum G(j)$ - en (t)

On détermine le centre de gravité de chaque tranche; en divisant celle-ci en deux triangles :



d'après la figure.

On détermine les paramètres A et B

$$\text{d'ou : } A(j) = \left[x_j + c_j - (x_{(j-1)} + \frac{e_{(j-1)}}{2}) \right]$$

$$\text{et } B(j) = \left[x_{(j)} + \frac{e_j}{2} - x_{j-1} \right]$$

Donc le centre de gravité de chaque tranche est :

$$\begin{aligned} X_{G_1}(J) &= X(J-1) + \frac{e(j-1)}{2} + A(J). \\ X_{G_2}(J) &= X(J) + \frac{ej}{2} - B(J) \end{aligned}$$

On calcule le moment statique de chaque tranche est

$$eG(J) = \frac{G_1(J) \cdot X_{G_1}(J) + G_2(J) \cdot X_{G_2}(J)}{G_t.}$$

Le moment statique total à la base du barrage est :

$$X_G = \frac{\sum_1^n eG(J)}{\sum_1^n G(J)}$$

d'après le calcul du moment statique n

calcule la contrainte . qui est égale à

$$\sigma = \frac{+M}{\frac{e^2(6)}{6}} - \frac{G}{e(6).1}$$

- On vérifiera ensuite la stabilité d'un ou deux murs latéraux à lac vide et à lac plein.

L'idéal serait que pour tous les murs, la compression au pied amont soit (à lac plein) égal à 50 ou 75% de la hauteur.

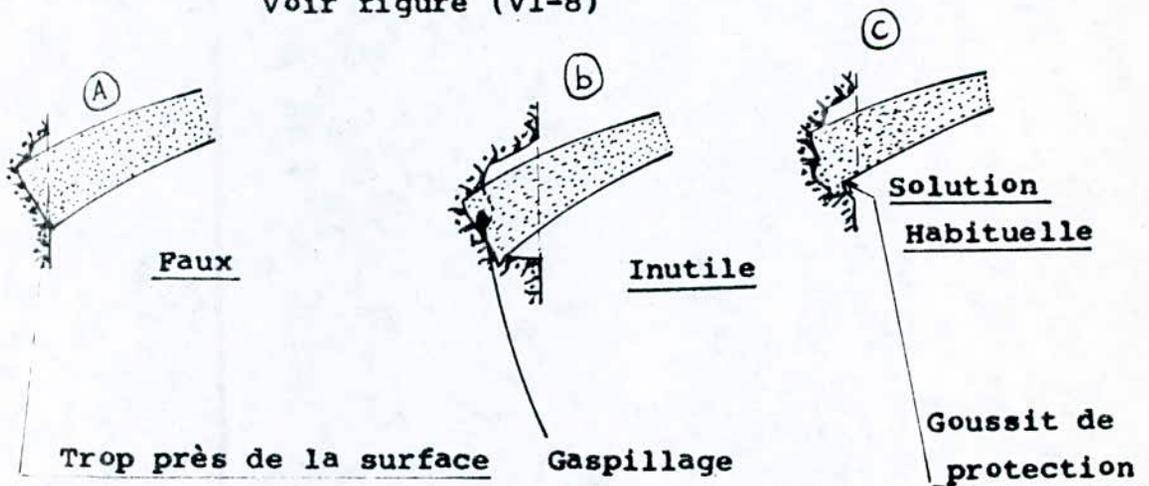
Mais c'est rarement possible. Si les tractions sont inévitables, elles ne doivent pas dépasser une valeur absolue, le tiers (1/3) des compressions qui règnent sur la face opposée.

Au besoin, on corrige de nouveau les formes et les épaisseurs. On s'occupe de "donner une bonne forme aux naissances et on veille à ce la surface des fondations soit continue.

L'idéal serait que la section d'encastrement aux naissances soit perpendiculaire aux réactions de l'arc. Pour cela il faut approfondir les fouilles (b), on choisit de préférence une solution du type (c) pour économiser des excavations et surtout du béton (qui est environ 5 fois plus cher).

La perte en économie n'est pas négligeable lorsque les arcs sont épais

Voir figure (VI-8)



Forme des excavations aux naissances.

Solution usuelle (c).

PRESENTATION DU PROGRAMME

BUT : On part d'un schéma de base qu'on optimise, en vérifiant les conditions de stabilité, et la forme.

Pour ce faire, il est nécessaire d'introduire les données suivantes :

- la hauteur du barrage H en (m)
- on divise le barrage par des tranches horizontales, N pour simplifier les calculs.
- l'angle d'orientation de l'arc par rapport au rocher sain doit être convenable ($\beta \geq 30^\circ$)
- angle d'ouverture au centre de chaque tranche 2α
- la largeur L de la vallée de chaque tranche
- la contrainte moyenne selon tube de chaque tranche (σ_{tube})
- le poids spécifique de l'eau γ_{eau}
- le poids spécifique du béton $\gamma_{\text{béton}}$

D'après ces données on peut calculer les paramètres suivants :

- Rayon extérieur (amont) de chaque tranche par la formule suivante.

$$R_{\text{ext}}(J) = \frac{L(J)}{2 \sin \alpha(J)}$$

- la poussée de l'eau qui est supposée uniforme pour tout l'arc de chaque tranche.

$$P(J) = (P(0) + J \cdot \frac{H}{N}) \times \gamma E$$

P (J) : la poussée de l'eau de chaque tranche en t/m²

J : numéro de tranche

P (0) : la poussée à la surface libre

N : nombre de tranche

H : la hauteur totale du barrage en (m)

γ_E : poids spécifique de l'eau qui est égale à (lt/m³)

- L'épaisseur e de chaque tranche selon la formule du tube avec une contrainte moyenne par la formule suivante.

$$e (J) = \frac{P(J) \cdot R_{ext}(J)}{\sigma_{tube} (J)}$$

e : l'épaisseur en (m)

P : la poussée de l'eau en (t/m²)

R_{ext} : Rayon extérieur (amont) en (m)

σ_{tube} : contrainte moyenne selon tube (t/m²)

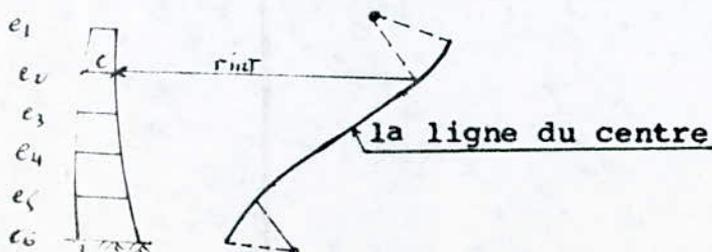
- Rayon moyen de chaque tranche par la formule suivante :

$$R_{moy} (J) = R_{ext} (J) - \frac{e (J)}{2} \quad \text{en (m)}$$

- Rayon intérieur (aval) de chaque tranche par la formule suivante :

$$R_{int} (J) = R_{ext} - e (J) \quad \text{en m}$$

D'après ces calculs, on vérifie que la somme de l'épaisseur et du rayon intérieur (R_{int}) donne une valeur qui coïncide avec la ligne du centre, si non on apporte des corrections sur l'épaisseur (e):



On calcule la force hyperstatique de chaque tranche et leur position par rapport à l'encastrement pour déterminer la contrainte de l'arc.

$$\Delta X (J) = -K (J) \cdot R (J)$$

ΔX : force hyperstatique en (Hm')

K : terme qui dépend uniquement des caractéristiques géométriques et physique de l'arc.

R. c'est une force qui dépend de la pression de l'eau (P) et du rayon extérieur de l'arc (r_{ext})

D'après ces calculs :

Connaissant la part de la pression prise par les différents arcs et les différents murs, il est maintenant facile de calculer les efforts et les contraintes.

On distingue deux cas pour la stabilité :

- 1er cas : stabilité du mur

On calcule la stabilité du mur par les méthodes classiques, c'est-à-dire comme pour un barrage-poids, la charge étant due à la "part du mur" au lieu d'être totale, son effet doit être cumulé avec celui du poids propre (et celui de la poussée verticale de l'eau puisqu'en principe le mur n'a pas un parement vertical)

d'où

On détermine :

- le volume du mur V en (m^3)
- le poids du mur G en t
- le moment M qui est égal :

$$M = -P_1 \cdot e_{P_1} + P_2 \cdot e_{P_2} - G \cdot X_G$$

e_{P_i}, X_G : le bras de levier

G : le poids du mur
exg : le bras de levier

- la contrainte

$$\sigma_{mur} = \frac{G}{e} + \frac{M}{\frac{e^2}{6}}$$

il faut que σ_{mur} admet pour les murs

si non on change l'épaisseur.

2ème cas :

Stabilité des arcs :

Dans les arcs on calcule par les méthodes des paragraphes précédents, à savoir celle des arcs indépendants sur appuis indéformables ou sur appuis déformables, mais sous l'effet de la "pression réduite" de l'eau "c'est à dire la part de l'arc).

On calcule les moments sous l'effet de la force hyperstatique ΔX .

$$M = \Delta X \cdot Y_0$$

Y_0 : la position de la force hyperstatique par rapport en encastrement qui est égale.

$$Y_0 : Rext \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right)$$

On calcule les contraintes des arcs :

$$\sigma_{arc} = \frac{P \times Rext}{e} + \frac{M}{\frac{e^2}{6}}$$

Il faut que

$$\sigma_{are} < \sigma_{admi}$$

Si non, on augmente l'épaisseur (e) au niveau des naissances par l'équation suivante :

$$e^2 \sigma_{ad} = P.Rext. e + 6M$$

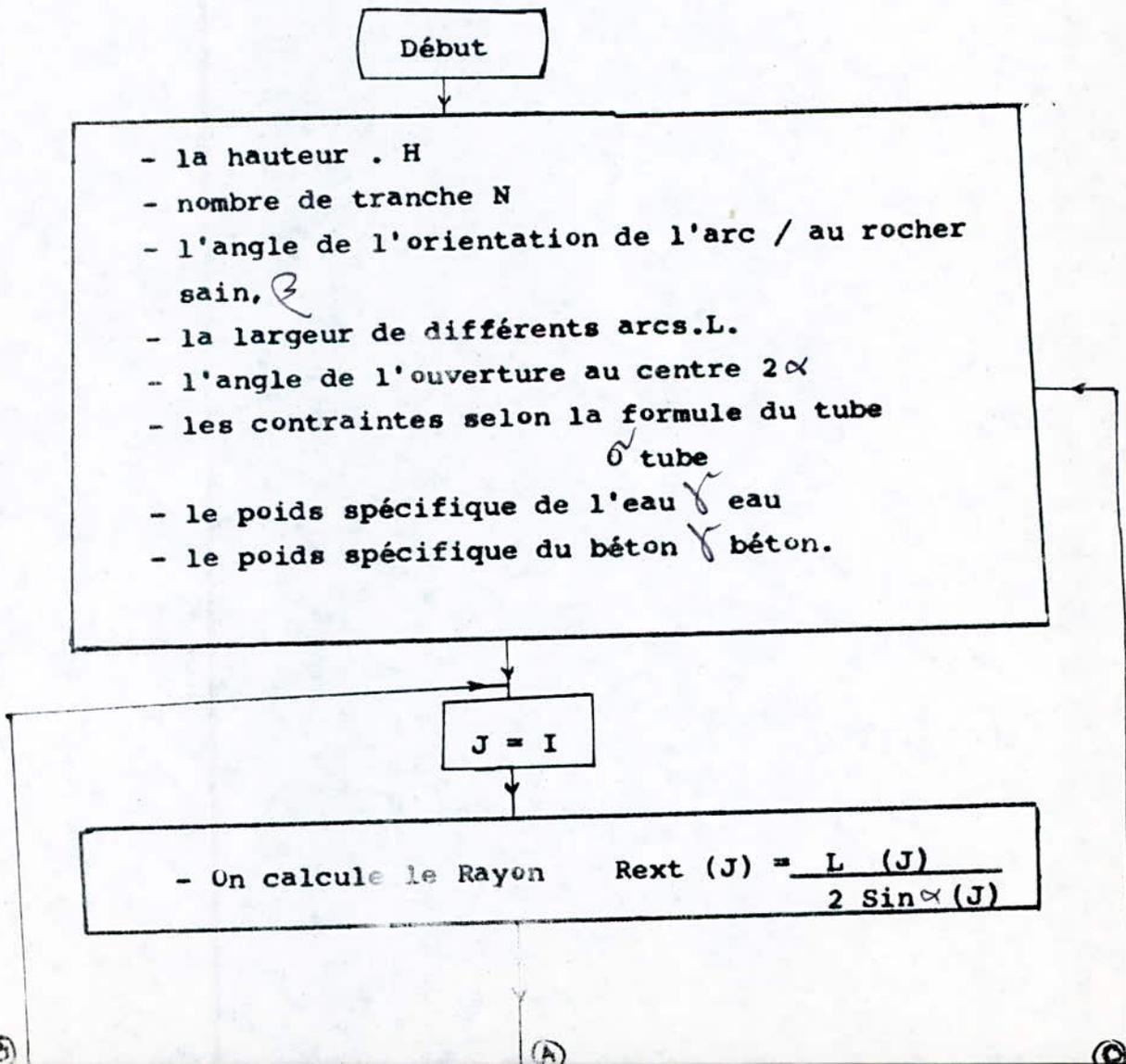
Enfin d'après les deux cas

Nous avons la stabilité de la forme du barrage-voûte.

ORGANIGRAMME

Pour la présente étude le calcul a été fait sur ordinateur OLIVETTI M.24 au centre de Calcul de l'école. Donc le programme établi est en langage Basic et il a été préférable de présenter l'organigramme.

A partir de cet organigramme on peut concevoir des programmes dans tous les langages et par la suite applicables sur différents types de machine.



(A)
 Calcul l'épaisseur selon tube $e(J) = \frac{P(J) \cdot R_{ext}(J)}{\sigma_t(J)}$

Calcul du Rint (J) = $R_{ext}(J) - e(J)$

Calcul du Rmoy (J) = $\frac{R_{ext}(J) + R_{int}(J)}{2}$

Calcul $\alpha(J) = \frac{R_{moy}(J)}{e(J)}$

$C_1(J) = 6 \left(\frac{\alpha}{\sin \alpha} + \cos \alpha - \frac{2 \sin \alpha}{\alpha} \right)$

$C_2(J) = \frac{2 \alpha}{\sin \alpha} - \cos \alpha$

$K(J) = \frac{C_1(J)}{C_2(J) + C_1(J)}$

$R(J) = P(J) \cdot R_{ext}(J)$

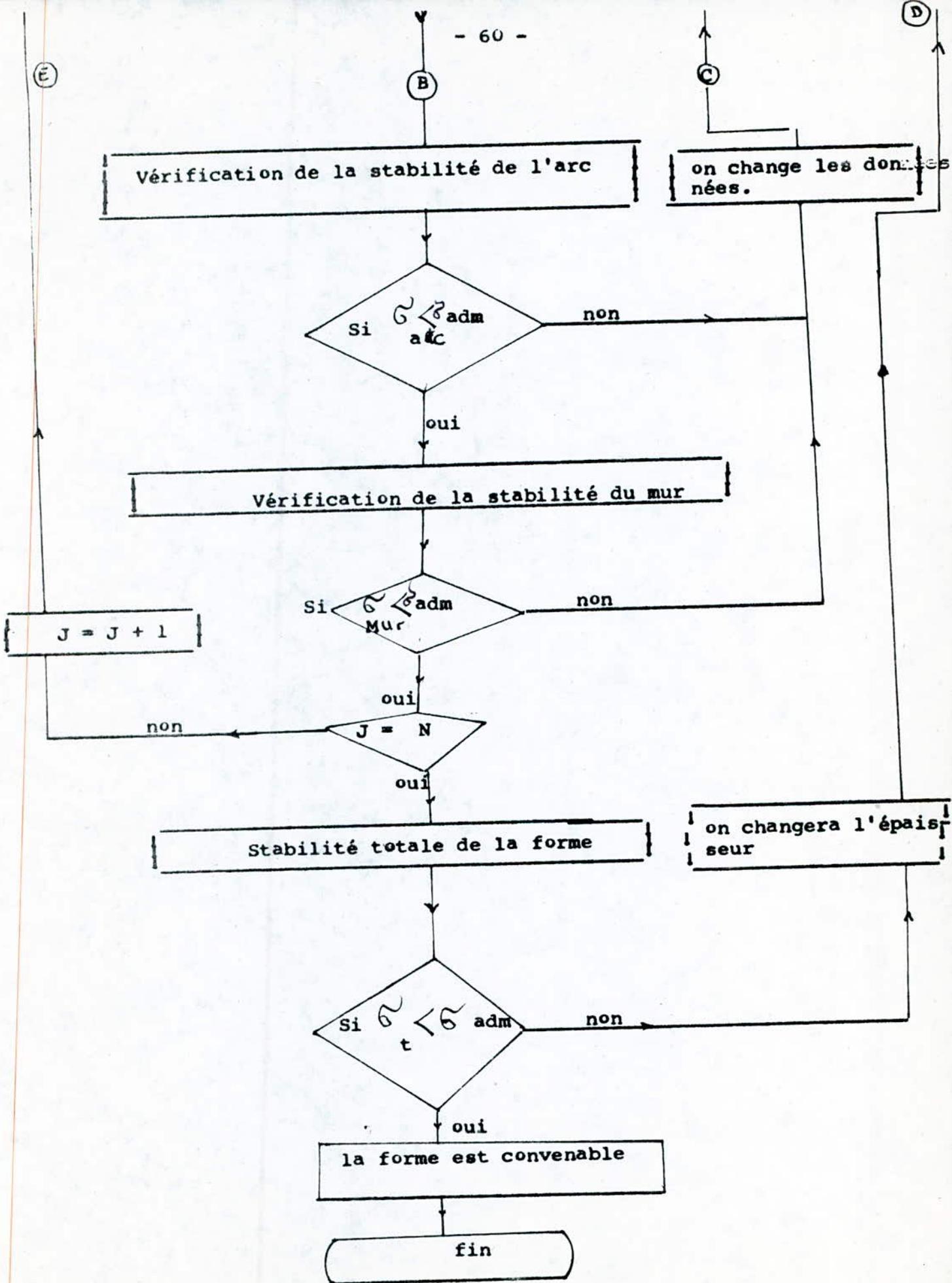
Calcul de la $\Delta X(J) = -K(J) \cdot R(J)$

la forme du J^{enc} -console

(B)

(D)

(E)



CHAPITRE VIII

VIII EXEMPLE NUMERIQUE

Données :

- l'angle de l'orientation de l'arc par rapport au rocher sain ($\beta = 30^\circ$)
- la hauteur du barrage $H = 100\text{m}$
- nombre de tranche $N = 5$
- le poids spécifique de l'eau $\gamma_{\text{eau}} = 1\text{t/m}^3$
- le poids spécifique du béton $\gamma_{\text{b}} = 2,4\text{t/m}^3$
- l'angle de l'ouverture au centre (2α) en ($^\circ$)

2α ($^\circ$)	L (m)	σ_{tube} (t/m^2)
94	219,406	0
97	210,157	330
95	183,139	428
92	153,507	448
91	124,533	434
81	91,053	375

- la largeur de la vallée L (m)

on a la contrainte de compression admissible

$$\sigma_{\text{admi}} \approx 1000 \text{ t/m}^2$$

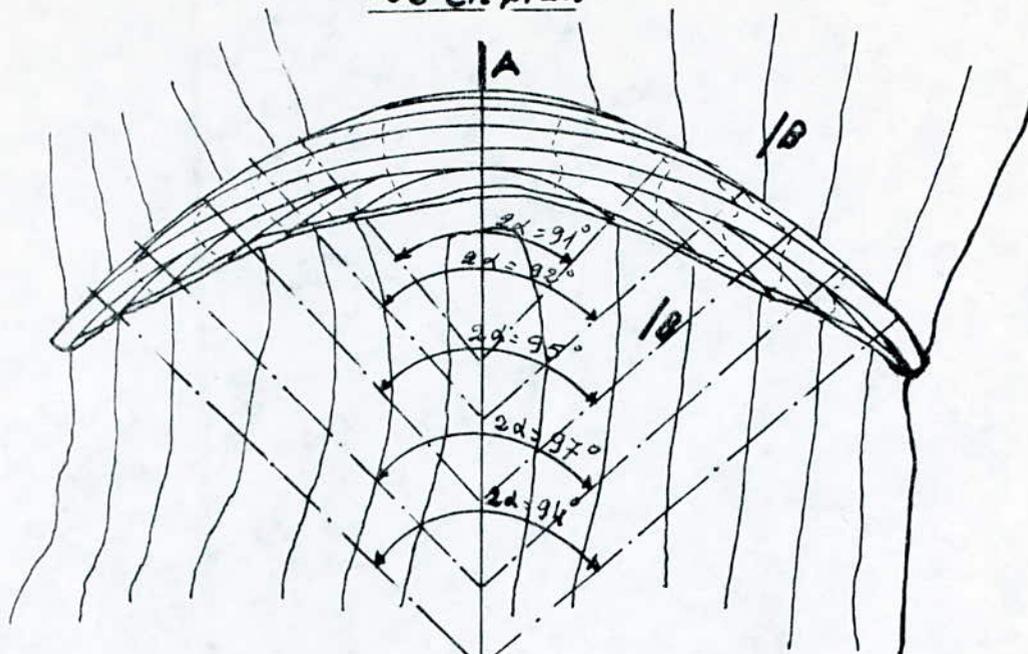
d'où la contrainte moyenne selon tube

$$\sigma_{\text{tube}} \leq \frac{\sigma_{\text{admi}}}{2}$$

RESULTATS DE CALCUL

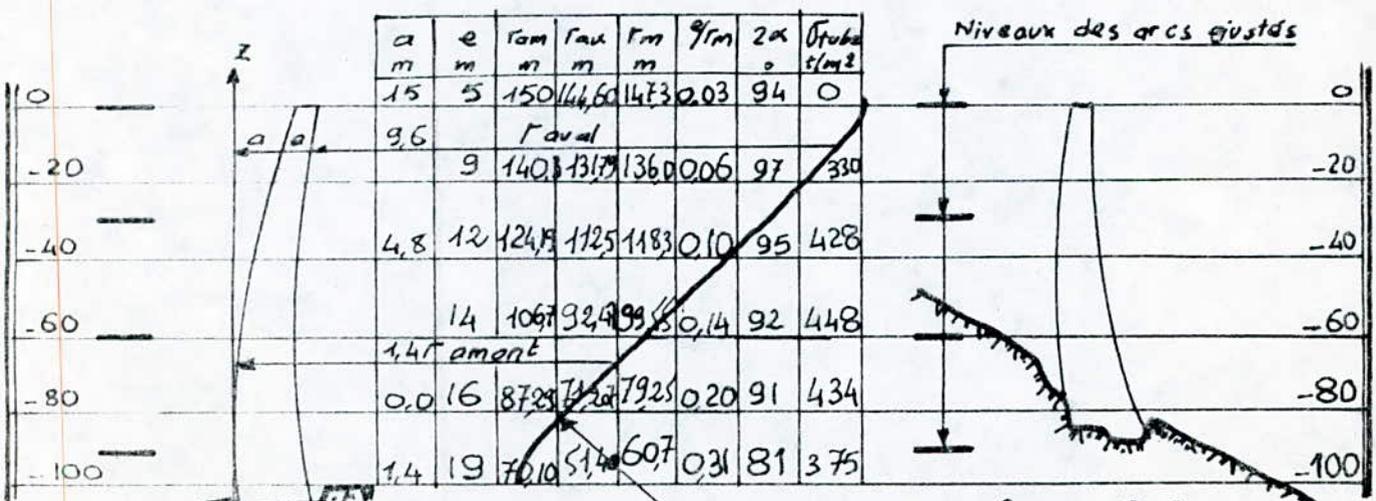
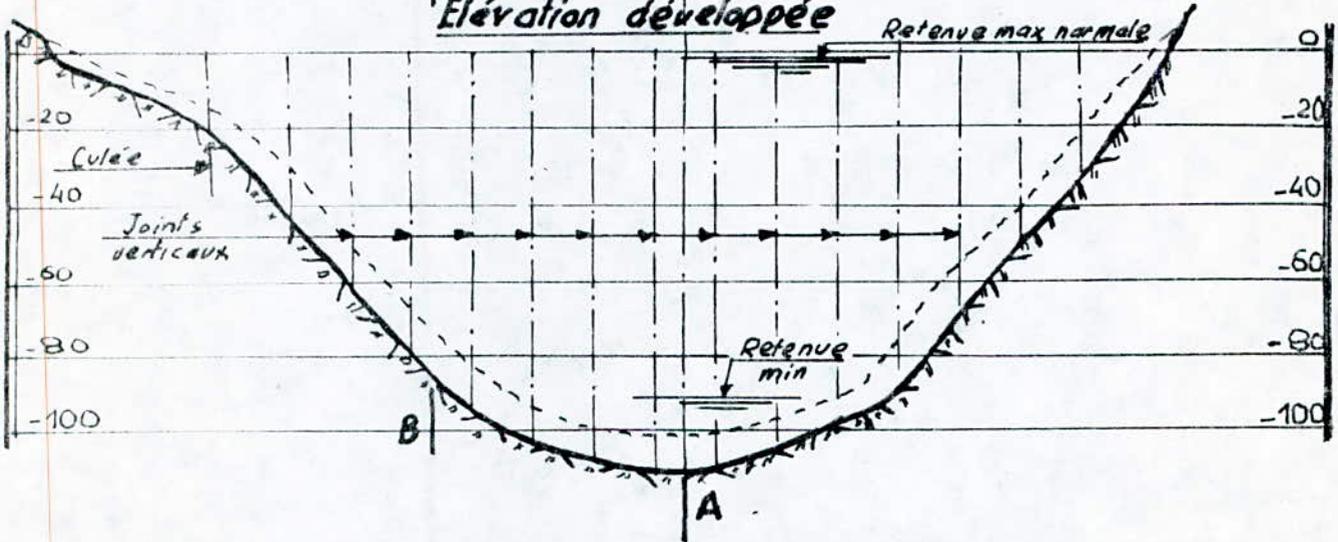
N	(m) R _{amont}	(m) E	(m) R _{aval}	(m) R _{may}	(t/m ²) Press	(t/m) R	(t/m') -ΔX	(m ³) V	(t) G	(m) EXG	σ _{arc} (kg/cm ²)		σ _{mur} (t/m ²)	
											trac- tion	compres- sion	trac- tion	compres- sion
0	150	5	145,00	147,30	---	-----	----	----	----	---	--	---	----	---
1	140,3	9	131,3	136,048	20	2806,9	75,1361	139,016	340,59	15,63	0,1	512,57	0	42,98
2	124,199	12	112,199	118,39	40	4191,7	280,80	201,104	492,70	12,14	0,12	662,0	0,81	43,28
3	106,7	14	92,71	99,555	60	5068,23	723,04	258,976	634,49	9,53	0,28	749,9	0,22	124,22
4	87,29	16	71,29	79,293	80	5347,09	1290,7	303,82	744,36	8,29	0,47	752,35	0,39	254,24
5	70,10	19	51,1	60,735	100	5257,48	2469,61	347,854	852,24	10,6	0,86	626,49	0,51	341,00

Vue en plan



Echelle : 1:2000

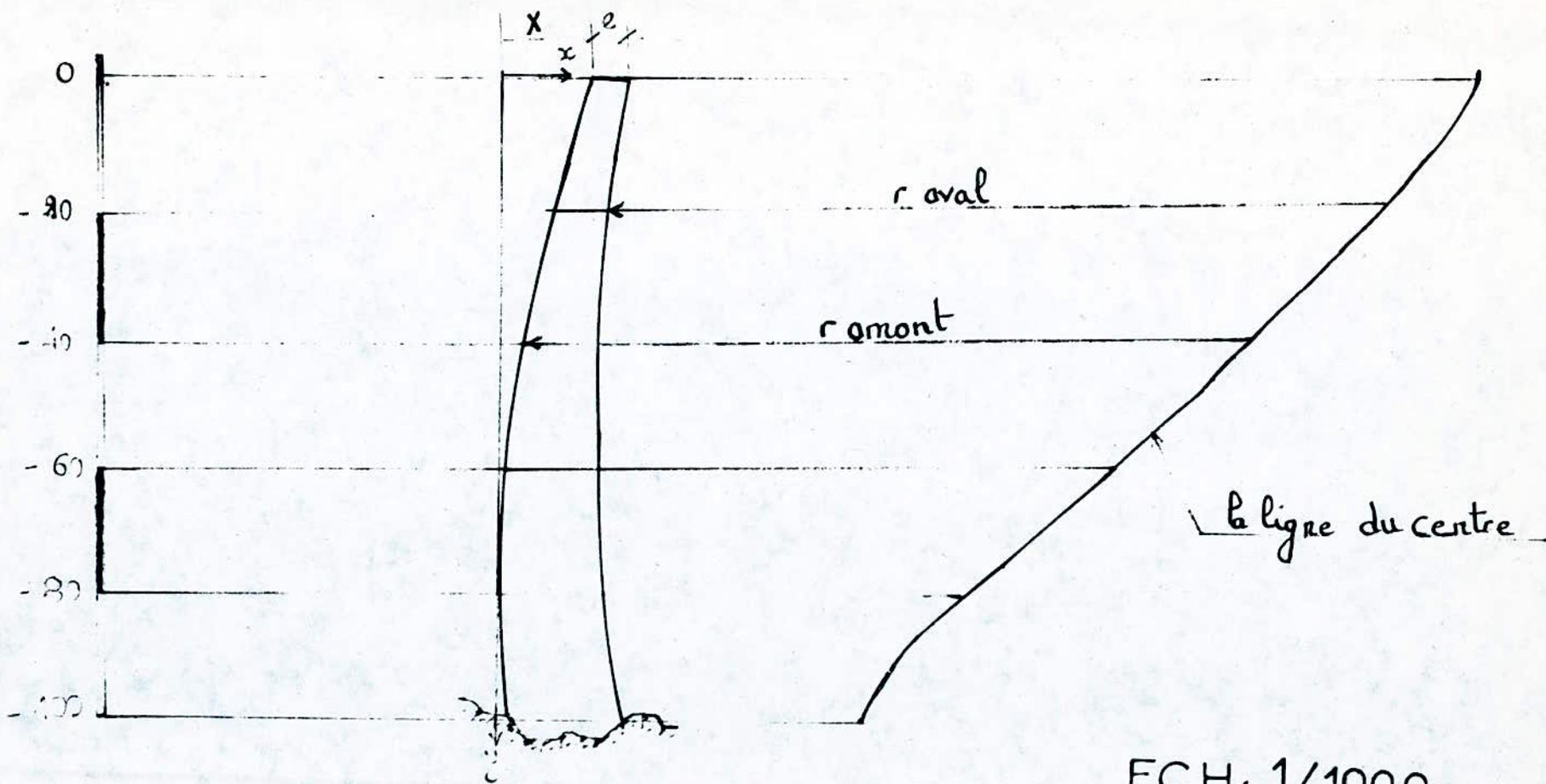
Elévation développée



Coupe centrale A-A

Ligne des centres

Coupe B-B



ECH: 1/1000

COUPE DU CENTRE

DANS L'EXEMPLE :

Etant donné qu'on trouve des contraintes de traction il faut augmenter l'épaisseur , de barrage pour n'avoir que des compressions . (à la contrainte de compression admissible) dans toutes les sections.

$$\text{ép} = \frac{6. M}{P(\sigma_c) \times R_{ext}}$$

C O N C L U S I O N

Notre étude s'est intéressée à la détermination des caractéristiques géométriques d'un barrage-voûte, qui peut être à la fois rentable et moins coûteux qu'un barrage-poids; toutefois, si les conditions géologiques et topographiques sont favorables.

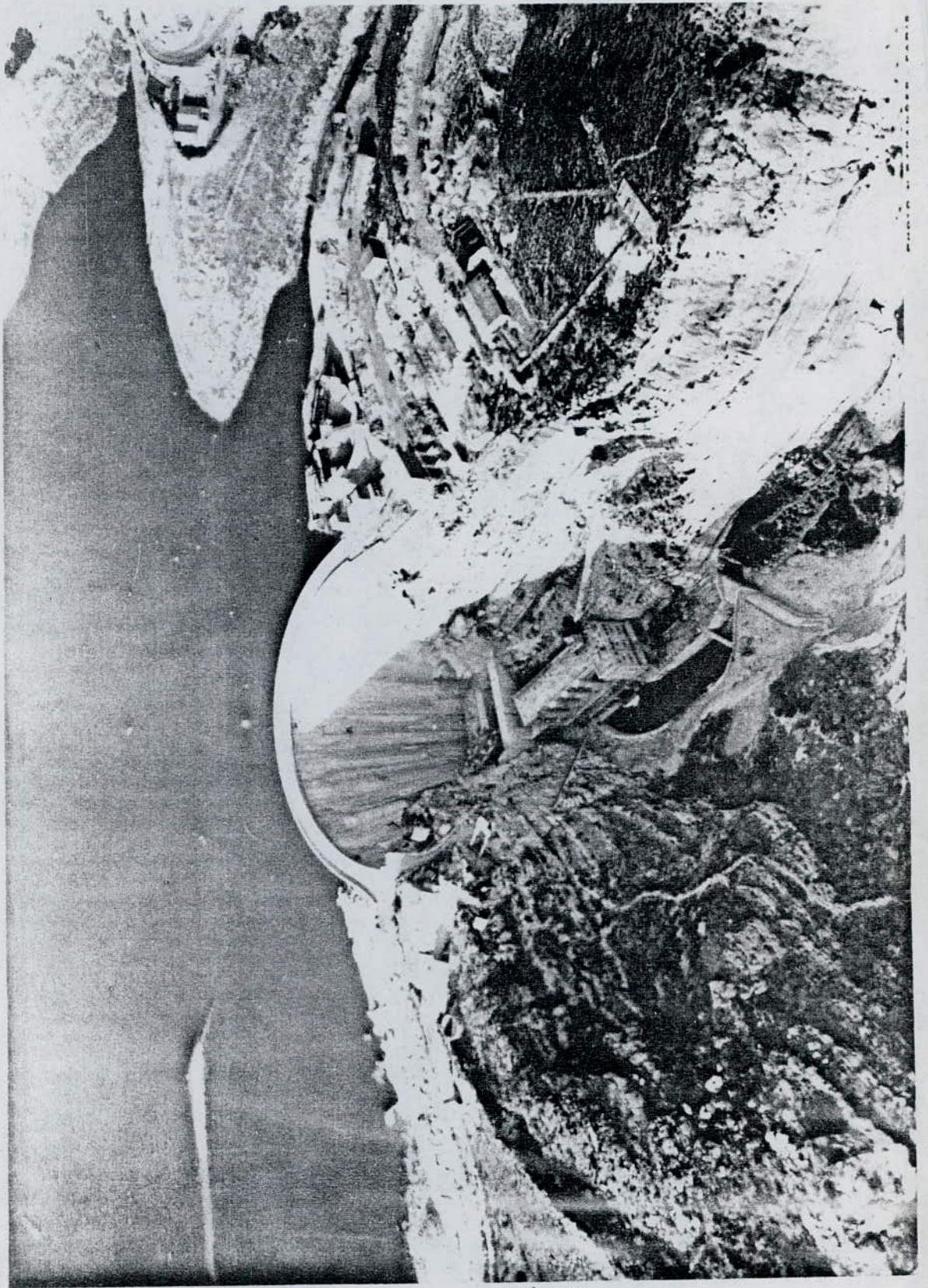
Enfin nous pensons que ce modeste travail peut être amélioré pour une formelle contribution aux travaux d'études de réalisation d'un barrage voûte.

B I B L I O G R A P H I E

**

*

- 1 - H- PRESS : Les barrages de vallée.
Dunod (Paris) 1958.
- 2 - LOMBARDI : Barrages en voûte mince
Dunod (Paris) 1955.
- 3 - STUCKY : Calcul des barrages en béton, Polycopié de E.P.F.L.
Lausanne 1986.
- 4 - H. VARLET Tome II EYROLLES (Paris) 1966
- 5 - R. GINOCCHIO : L'énergie Hydraulique
Eyrolles (Paris) 1978.



Barrage voûte en-CASTILLON
H = 100 m
L (crête) = 200 m .

