

WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

II

L. inw.

2740

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000297473

THE
BIBLIOTHEQUE

X
100

EXTRAIT DU BULLETIN TECHNOLOGIQUE
de la Société des Anciens Élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers.
(Décembre 1897)

RUPTURE
EU
BARRAGE DE BOUZEY

PAR
Léon LANGLOIS

INGÉNIEUR CIVIL
EXPERT DANS LE PROCÈS DES RESPONSABILITÉS

*Conférences faites à la Société
des Anciens Élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers,
les 19 et 26 juin 1897*

F. No. 21944

PARIS

P. VICQ-DUNOD ET C^{ie}, Éditeurs

LIBRAIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES CHEMINS DE FER

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS

—
1898



49.45.
67

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

119740

Akc. Nr. 2085/49

RUPTURE

DU

BARRAGE DE BOUZEY

Conférences faites au siège de la Société
des Anciens Élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers,
les 19 et 26 juin 1897,
par M. LÉON LANGLOIS (Ang. 1863-66).

AVANT-PROPOS

Historique sommaire du barrage de Bouzey.

La guerre de 1870 ayant interrompu la communication intérieure entre l'Océan et la Méditerranée, le gouvernement s'empessa de mettre à l'étude le rétablissement de cette communication.

Les ingénieurs de 1872 présentèrent un avant-projet dans lequel :

1° Le canal prévu, dénommé canal de l'Est, reliait le canal de la Marne au Rhin à la Saône canalisée, avec un plan d'eau situé à la cote 361,50 au-dessus du niveau de la mer ;

2° L'alimentation de cette nouvelle voie navigable était assurée :

a) Par l'exhaussement du plan d'eau des lacs de Gérardmer,

(1) L'étude technique des conséquences de l'accident de Bouzey a été présentée par M. Langlois à la Société des Ingénieurs civils.

Dans une série de communications, M. Langlois a groupé un certain nombre de règles à suivre dans la construction des barrages; et il les a fait suivre d'un calcul rationnel des barrages courbes, à une ou plusieurs branches.

Longemer et Retourner, qui permettait de jeter chaque année dans la Vologne, affluent de la Moselle, 10 millions de mètres cubes d'eau ;

b) Par la création d'un réservoir dans la vallée de l'Avière, à la hauteur du hameau de Bouzey.

Destiné à capter les eaux du bassin de cette rivière, le réservoir projeté avait une retenue de 4.120.000^{m³}, à la cote 368,50 (7^m,50 en contre-haut du plan d'eau du canal).

Après enquêtes et déclaration d'utilité publique, une étude nouvelle fut faite par d'autres ingénieurs :

M. Pugnière, ingénieur en chef; MM. Thoux et Cahen, ingénieurs ordinaires; sous la haute direction de M. Frécot, inspecteur général, directeur du canal de l'Est.

Le nouveau projet, présenté en 1876, conservait presque sans variation le tracé initial du canal; mais il en transformait radicalement le mode d'alimentation.

On abandonnait l'idée d'exhausser le plan d'eau des lacs vosgiens; et, d'accessoire qu'il était d'abord, le réservoir de Bouzey devenait l'engin principal de l'alimentation.

De 4.120.000^{m³}, son volume était porté à 7.073.000^{m³}, avec retenue à la cote 371,50.

L'eau nécessaire était empruntée : d'une part, à la vallée de l'Avière; d'autre part, à la Moselle, à l'aide d'une rigole alimentaire de 43^{km}, partant de Remiremont.

Le volume maximum prévu n'étant considéré comme nécessaire que dans un avenir lointain, quand le trafic du canal aurait atteint 10 millions de tonnes par an, les ingénieurs de 1876 proposaient :

D'arrêter provisoirement la retenue à la cote 369,50 (volume correspondant à 4.768.000^{m³}), tant que le trafic n'aurait pas atteint 600.000^t;

De ne construire le mur que pour cette retenue provisoire;

De ne le relever de 2^m, pour la retenue définitive de 371,50, qu'au moment où un trafic de 600.000^t aurait été atteint.

Le mur du réservoir devait, d'ailleurs, être établi initialement pour satisfaire, par un simple exhaussement, aux charges correspondant à la retenue maxima.

On construisit le barrage de Bouzey dans ces conditions; mais en 1880, après une visite du ministre des Travaux publics, M. Varroy, l'exhaussement immédiat fut ordonné.

Terminé à la fin de 1880, le réservoir de Bouzey fut mis en service fin novembre 1881; mais, pendant deux ans, il ne reçut que les eaux du bassin de l'Avière (volume maximum atteint : 1.400.000^{m³}).

Le 4 décembre 1883, la rigole de Remiremont étant terminée, l'eau de la Moselle pénétra dans le réservoir de Bouzey, qui entra dès lors dans la période normale de remplissage.

Les 14-15 mars 1884, l'eau étant à la cote 368,80, à 2^m,70 en contre-bas de la retenue maxima, le mur se bomba vers l'aval, en prenant, au centre de l'inflexion, une flèche de 0^m,34 environ, et en se fissurant transversalement.

M. Denys, ingénieur en chef ayant succédé à M. Pugnière, et M. Hausser, sous-ingénieur faisant fonction d'ingénieur ordinaire en remplacement de M. Cahen, proposèrent à l'Administration supérieure d'exécuter des sondages d'exploration à l'aval de la digue.

Ces sondages furent exécutés en 1884-1885, le réservoir restant en charge, et ils fournirent sur la nature du terrain de fondation des renseignements peu favorables.

En conséquence, les ingénieurs demandèrent l'autorisation de vider le réservoir et de faire de nouveaux sondages, à l'amont de la digue et sous cet ouvrage, ce qui leur fut accordé.

MM. Denys et Hausser rendirent compte des résultats généraux de ces différentes explorations dans un volumineux rapport portant les dates des 26 et 28 avril 1887.

Leurs constatations les avaient fixés sur les points suivants :

a) La digue avait besoin d'être mieux fixée sur le sol de fondation ;

b) Cet ouvrage avait, dans sa partie médiane, des points de grande fatigue qu'il était nécessaire de consolider.

L'inspecteur général de la IV^e division, M. Gauckler, n'ayant pas épousé les moyens présentés par les ingénieurs pour résoudre la question, le Conseil général des Ponts et Chaussées nomma une Commission de cinq membres, en fin d'examen.

Dans un rapport très détaillé, la Commission nommée par le Conseil exposa :

c) Les appréciations diverses de ses membres ;

d) Les propositions qu'elle présentait comme solution du problème.

La principale consistait à élargir le pied de la digue par une maçonnerie nouvelle, à partir de la cote 360, 50, correspondant à peu près au milieu de sa hauteur maxima.

L'ingénieur en chef, M. Denys, ayant présenté des observations à la suite d'une étude faite dans le sens indiqué par la Commission, le projet fut remanié par M. Dupuy, inspecteur général ayant succédé à M. Gauckler dans la IV^e division.

Mais M. Dupuy ne tint qu'imparfaitement compte des remarques, pourtant importantes, de M. Denys ; et la modification proposée par lui n'était qu'un remaniement incomplet du projet initial de la Commission.

Ce remaniement ayant été accepté par le Conseil général des Ponts et Chaussées, l'Administration supérieure enjoignit aux ingénieurs d'établir un projet définitif dans le sens indiqué, et cela, dans un délai de quinze jours.

On exécuta les travaux imposés de 1888 à 1889 ; et, après la réception du mur de renforcement, en novembre 1889, le remplissage commença.

Il fut mené d'une façon active ; à telles enseignes que l'on atteignit successivement :

En 1890, la cote 371 ;

En 1891, 1892, 1893 et 1894, la cote maxima, 371, 50.

On se trouvait presque à cette dernière cote le 27 avril 1895.

au matin, quand la digue se rompit, causant la mort de quatre-vingt-cinq personnes et des dommages matériels considérables.

L'Administration supérieure chargea immédiatement M. Mallez, inspecteur général de la IV^e division, d'un examen provisoire de la catastrophe; et, le 8 juin 1895, M. Mallez déposa son rapport.

Nous le désignerons ultérieurement sous le nom de Rapport Mallez.

Presque en même temps, l'Administration chargeait une Commission d'enquête administrative de l'examen des causes de la catastrophe; et, le 31 juillet 1895, cette Commission déposait un rapport que nous désignerons sous la dénomination : « Rapport de la Commission d'enquête administrative. »

CHAPITRE PREMIER

Expertise.

§ 1^{er}. — PREMIERS RAPPORTS D'EXPERTISES.

I. — *Nomination des experts.*

Une poursuite correctionnelle avait été intentée par le tribunal d'Épinal pour homicides par imprudence.

M. Poirson, juge d'instruction, nomma experts :

M. Brüll, ancien élève de l'école Polytechnique, ancien président de la Société des Ingénieurs civils, chevalier de la Légion d'honneur ;

M. Fleury, ancien élève de l'école des Mines, alors vice-président de la Société des Ingénieurs civils, chevalier de la Légion d'honneur ;

M. Langlois, ingénieur civil, Ancien Élève de l'École d'Arts et Métiers d'Angers.

II. — *Établissement et dépôt de nos premiers rapports d'expertise.*

Après un examen, long et attentif, de l'affaire de Bouzey, nous ne pûmes nous entendre sur un certain nombre de points; et, le 20 janvier 1896, mes collègues déposèrent un rapport signé d'eux seuls.

Obligé de greffer mon rapport sur celui de MM. Brüll et Fleury, je proposai au Parquet de me rendre à Epinal, ce qui fut accepté; et, le 20 février suivant, je déposai mon rapport personnel entre les mains de M. le juge d'instruction (M. Bour, qui avait succédé à M. Poirson).

III. — *Nos conclusions respectives.*

Nous concluons tous les trois à la responsabilité :

a) Des ingénieurs qui avaient dirigé l'exploitation du réservoir;

b) Des inspecteurs généraux de la IV^e division, chargés, croyions-nous, du contrôle des ingénieurs;

Mes collègues, sans aucune atténuation;

Moi, avec une très large atténuation, résultant de ce que, avant 1895, l'on connaissait mal les effets destructeurs de la dilatation dans un barrage droit de grande longueur, mal orienté comme celui de Bouzey.

§ 2. — SECOND RAPPORT D'EXPERTISE.

IV. — *Cause de notre second rapport.*

Les conclusions de nos premiers rapports motivèrent une dépêche du ministre des Travaux publics, du 18 mars 1896, protestant contre notre interprétation des attributions des inspecteurs généraux.

A la suite de cette protestation, M. le juge d'instruction nous ordonna un supplément d'expertise; ce qui nous conduisit à l'établissement d'un nouveau rapport, collectif cette fois, portant la date du 15 janvier 1897.

§ 3. — AFFAIRE CORRECTIONNELLE DU 7 MAI 1897.

V. — *Exposé.*

A la suite de notre rapport supplémentaire, le tribunal d'Épinal, jugeant correctionnellement, s'est réuni le 7 mai 1897.

Ont comparu en ces audiences :

M. Denys, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, actuellement en congé;

M. Hausser, sous-ingénieur, faisant fonctions d'ingénieur ordinaire, toujours à Épinal;

M. Holz, inspecteur général des Ponts et Chaussées, chargé de la IV^e division de 1891 à 1893;

M. Henry, inspecteur général, chargé de la 4^e division de 1893 à 1894.

La responsabilité, en l'espèce, ne pouvant remonter à plus de trois ans avant l'accident, tous les auteurs des projets de construction et de reconstruction du barrage bénéficiaient de la prescription triennale.

CHAPITRE II

Objet et mode d'établissement de cette communication.

§ 4. — EXPOSÉ.

VI. — *Objet de ma communication.*

Elle a pour but de présenter :

1^o Les opinions émises par moi, dans mon rapport et dans ma déposition;

2^o Les objections qui m'ont été présentées à l'audience, tant par les inculpés que par les témoins à décharge, parmi lesquels il y a lieu de citer en première ligne M. Maurice Lévy, inspecteur général des Ponts et Chaussées, membre de l'Institut;

3^o Les réponses que j'ai faites au tribunal, sur les points principaux controversés.

VII. — *Division de ma communication.*

Elle comprendra les parties suivantes :

Première partie. — Construction initiale du barrage ;

Deuxième partie. — Première mise en service du réservoir, et accident de 1884 ;

Troisième partie. — Restauration du barrage après l'accident de 1884 ;

Quatrième partie. — Deuxième mise en service du réservoir et accident final ;

Cinquième partie. — Conclusions de mon premier rapport et jugement du tribunal d'Épinal ;

Sixième partie. — Pièces annexes.

PREMIÈRE PARTIE

Construction initiale du barrage.

CHAPITRE III

Subdivisions de la première partie.§ 5. — **Exposé.**

VIII. — *Dans la construction initiale du barrage de Bouzey, nous allons examiner successivement :*

1° La valeur du sol de fondation ;

2° Celle des matériaux constitutifs ;

3° Les effets produits par la forme rectiligne de l'ouvrage ;

4° Les conditions de stabilité et de résistance présentées par le profil adopté.

CHAPITRE IV

Valeur du sol de fondation.

§ 6. — CONDITIONS A REMPLIR PAR LE TERRAIN
DE FONDATION D'UN BARRAGE.IX. — *Exposé.*

Avant 1876, il était de règle de ne fonder un barrage que sur un sol incompressible, inaffouillable et imperméable.

Ainsi, dans son *Cours de navigation intérieure*, publié en 1872, M. de Lagrenée disait, parlant du barrage de Furens :

« Ce barrage repose sur le roc vif, tant par le bas que sur les côtés. C'est là une condition *sine qua non* pour un ouvrage de ce genre; et si, pour une raison quelconque, on ne pouvait la remplir, il faudrait renoncer à la construction, réduire la hauteur des ouvrages, ou même remplacer les murs en maçonnerie par des digues en terre. »

L'auteur rappelle l'accident survenu au barrage de Puentès (Espagne), construit sur pilotis, et dont la rupture coûta la vie à plus de six cents personnes.

§ 7. — APPRÉCIATION DU TERRAIN DE FONDATION
PAR LES INGÉNIEURS DE 1876.X. — *Rapports de 1876.*

Dans l'avant-projet du 5 mai 1876, et dans le projet définitif du 28 novembre de la même année, les ingénieurs disaient :

« La digue sera fondée sur la couche supérieure du grès bigarré, légèrement fissuré, mais parfaitement inaffouillable et incompressible.

» L'étanchéité sera obtenue au moyen d'un mur de garde ou masque en maçonnerie de 2^m d'épaisseur, descendu jusqu'aux

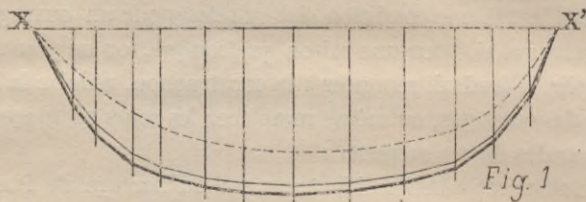
bancs inférieurs et imperméables du rocher compact, dans lequel il sera, en outre, encastré de 4^m.

Malheureusement, les ingénieurs ajoutaient :

« Si des infiltrations venaient à se produire, malgré le mur de garde, il n'y aurait pas lieu de s'en inquiéter, puisqu'on doit fournir 50^l par seconde à l'Avière, sous peine d'indemnité aux riverains. »

Les ingénieurs perdaient de vue la sous-pression produite par les eaux d'infiltration, laquelle, ainsi que nous le verrons plus loin, modifie complètement les conditions de stabilité de l'ouvrage.

Cette insuffisante appréciation de l'importance des infiltrations devait amener l'accident de 1884, lequel a probable-



ment eu une répercussion sur la rupture finale de 1895.

Les renseignements généraux ci-dessus étaient accompagnés d'un plan figuratif du sol, dont la *figure 1* reproduit les détails caractéristiques.

Sur une ligne d'abscisse XX' , représentant la partie supérieure du barrage, s'élevaient 12 ordonnées correspondant, croyons-nous, aux axes des puits de sondage.

A ces ordonnées venaient aboutir trois lignes brisées représentant :

Celle du haut (trait pointillé), le niveau supérieur des couches de grès fissuré ;

Celle médiane (trait fin), le niveau des roches présumées compactes ;

Celle inférieure (trait fort), le niveau auquel on devait fonder

la maçonnerie, pour que celle-ci pénètre de 1^m environ dans la roche compacte.

Des teintes conventionnelles indiquaient, en outre, la nature du sol exploré.

XI. — *Constatations faites lors des fouilles de 1878.*

Ces constatations nous ont été révélées par MM. Denys et Hausser, dans leur rapport des 26 et 28 avril 1887.

On y lit :

« Ce qu'on avait pris pour un roc vif et compact était, au contraire, fissuré et peu résistant.

» En creusant la fouille destinée au mur de garde, on s'est bientôt aperçu que les couches de grès se présentaient dans des conditions de compacité extrêmement variables. Sous un bloc vif et très dur, on retrouvait des parties fissurées, des bancs très tendres, souvent même de petits dépôts argileux ou sableux.

» Quant au massif principal de la digue, on l'établit en général sur un rocher fissuré qui paraissait assez dur ; sur certains points, on se contenta même de s'arrêter sur des couches lamelleuses ou en plaquettes. »

§ 8. — APPRÉCIATION DU TERRAIN DE FONDATION PAR MM. DENYS ET HAUSSER.

XII. — *Leur rapport des 26-28 avril 1887.*

Dans ce document, les successeurs de MM. Pugnère, Thoux et Cahen exposent les constatations faites par eux lors des sondages d'exploration dont il a été question à l'avant-propos.

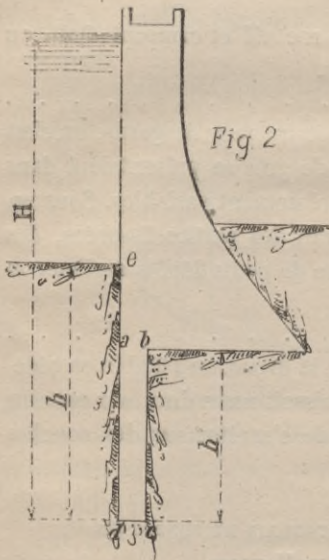
Nous reprendrons (troisième partie) l'examen de cette question, et il nous suffira de dire ici que le sol de fondation apparut à MM. Denys et Hausser bien inférieur à ce qu'en avaient pensé les ingénieurs de 1876.

§ 9. — ÉTUDE CRITIQUE DU MUR DE GARDE

XIII. — *Exposé.*

Tel qu'il a été établi, le mur de garde était incapable de combattre efficacement les infiltrations; et cela, pour les raisons suivantes :

1° Il est toujours difficile de bien relier un mur mince avec un épais massif. La jonction *ab* (fig. 2) constituait donc un point faible.



2° Sous l'action de la poussée de l'eau, la digue oscille légèrement sur sa base, par suite de la compressibilité du sol et de la maçonnerie. Il peut donc y avoir fissuration en *ab*, par voie de décollement.

3° La poussée de l'eau doit, en outre, produire un léger glissement de la base sur le sol d'appui, par suite de ce que j'appellerai le tassement transversal. Un fissuration est donc possible en *ab*, comme consé-

quence de ce glissement, auquel ne peut participer le mur de garde.

4° De plus, la maçonnerie de Bouzey étant très perméable, l'eau a dû traverser en quantité appréciable un mur de faible épaisseur et de grande surface. (*h'* atteint 12^m en certains points.)

5° Enfin, et surtout, les précautions prises pour assurer la pénétration du mur de garde dans la partie absolument étanche du terrain paraissent avoir été insuffisantes.

Lors de l'exécution de la fouille nécessitée par l'établissement du mur de garde, de nombreuses sources ont jailli sur la paroi d'amont, *ed.*

On les a aveuglées au fur et à mesure, et on a arrêté la fouille en contre-bas des dernières sources constatées.

Or, les infiltrations avaient alors pour cause la pression de l'eau en suspension dans le sol de la vallée, pression mesurée au maximum par la hauteur h . Quand le réservoir a été rempli, la pression a été fournie par la hauteur H , double ou triple de la hauteur primitive.

Les conditions se sont donc trouvées complètement modifiées; et le sol, imperméable dans le premier cas, ne l'a plus été dans le second. Dans ces conditions, de nombreuses et importantes infiltrations ont trouvé jour sous le mur de garde, lequel a constitué une très mauvaise solution du problème.

§ 10. — SUPPRESSION DES ENRACINEMENTS DE LA BASE DE LA DIGUE.

XIV. — *Prévision initiale de ces enracinements.*

Dans l'avant-projet et le projet définitif de 1876, les ingénieurs avaient prévu, pour la partie centrale de la digue, des parafouilles ayant les dimensions suivantes (*fig. 3*) :

Au milieu de la base : 1^m de largeur sur 0^m,50 de hauteur;

A l'arête aval :

Dans la région médiane : 2^m × 1^m;

Sur les côtés : 1^m × 0^m,50.

Ces massifs d'enracinement avaient l'avantage de relier, conjointement avec le mur de garde, toute la base du mur au sol de fondation.

Ils auraient donc eu pour effet immédiat de s'opposer au glissement de 1884, au moins dans une certaine mesure.

Malheureusement, le rapport du 28 novembre 1876 (projet

définitif) disait, après la description des enracinements de la figure 3 :

« Ces appendices seront d'ailleurs supprimés, en totalité ou en partie, si la surface de la fondation est assez irrégulière pour assurer une liaison complète des maçonneries avec le terrain naturel. »

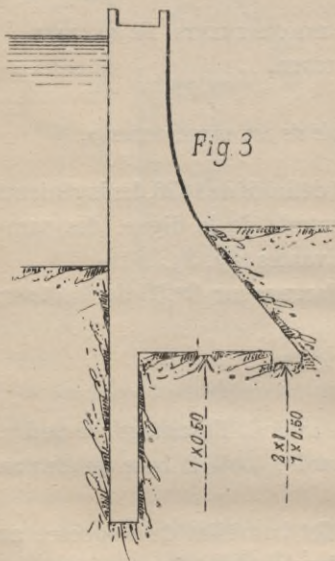
Et, lors de l'exécution, les enracinements en question furent supprimés; ce qui priva la base de la digue d'une bonne liaison avec le terrain de fondation.

Décidément, les remarques finales des rapports de 1876 ne furent pas heureuses, et elles ont eu une influence fâcheuse sur la destinée du barrage de Bouzey.

§ 11. — CONCLUSIONS DU CHAPITRE IV.

XV. — Terrain de fondation.

Les ingénieurs de 1876 se sont trompés sur la nature réelle du terrain de fondation.



du terrain de fondation.

Ils le disaient inaffouillable et incompressible, tandis que les dépôts argileux et sableux, contenus dans sa masse, lui enlevaient ces deux qualités, au moins dans une certaine mesure.

Le terrain a donc été imparfaitement reconnu par MM. Pugnière, Thoux et Cahen.

Les travaux de sondage constituent, il est vrai, la partie délicate et aléatoire d'un ouvrage d'art, quel qu'il soit; et on a beau prendre toutes ses

précautions l'on n'est jamais certain de parer à toute éventualité.

Mais, dans l'espèce, j'estime que les ingénieurs n'ont pas fait tout ce qu'il fallait pour s'édifier sur la vraie nature du sol; et, surtout, pour renseigner comme il convient l'Administration supérieure.

A mon avis, ils auraient dû, pour un travail aussi important et aussi dangereux :

- a) Établir un plan d'ensemble indiquant clairement la position et la profondeur des puits d'exploration;
- b) Représenter les coupes longitudinales de ces puits, avec indications teintées des différentes couches du terrain traversé;
- c) Prendre des témoins, dans les parties caractéristiques de ces couches.

Moins les témoins de l'article c, c'est d'ailleurs ce qui a été imposé aux ingénieurs de 1885, lors des sondages qui ont suivi l'accident de 1884.

Or, les seuls renseignements fournis par les ingénieurs de 1876 ont été :

- d) Un profil en long (*fig. 1*), ne donnant même pas la position des puits d'une façon précise;
- e) Une indication générale de la nature du terrain.

On doit reconnaître que les renseignements étaient maigres.

Aussi, en présence des mécomptes ultérieurs dus au terrain de fondation, je n'hésite pas à dire que les ingénieurs de 1876 n'ont pas fait tout le nécessaire.

XVI. — *Mur de garde.*

La perméabilité du sol avait été reconnue par les ingénieurs de 1876; et ils comptaient la combattre par le mur de garde.

Nous avons fait voir comment ce mur de garde, établi dans les conditions exposées, n'avait, en somme, rien gardé du tout.

XVII. — *Enracinements de la base de la digue.*

La suppression de ces enracinements a facilité le mouvement de 1884, lequel a placé la digue dans des conditions de résis-

tance moindre, ce qui a peut-être contribué à sa destruction finale.

XVIII. — *Résumé du chapitre IV.*

On eût dû placer la digue dans un autre endroit, ou modifier le système d'alimentation du canal.

On se fût trouvé, en agissant ainsi, dans les conditions généralement admises en 1876; et on eût obéi aux prescriptions des auteurs faisant, dès cette époque, autorité dans la construction des barrages.

CHAPITRE V

Qualités des matériaux constitutifs du barrage.

§ 12. — SUBDIVISION DE CE CHAPITRE.

XIX. — *Exposé.*

J'ai étudié la question de la qualité des matériaux aux deux point de vue suivants :

1° J'ai examiné d'abord quelle était leur valeur initiale, au moment de la construction du barrage, et les développements de cette partie de la question se liront au chapitre V_a .

2° Je me suis occupé ensuite des effets du temps sur les qualités initiales en question, ce qui fait l'objet du chapitre V_b .

CHAPITRE V_a

Qualités initiales des matériaux.

§ 13. — MOELLONS.

XX. — *Renseignements fournis par les rapports de 1876.*

Les ingénieurs donnaient, dans leurs rapports, comme coefficients des moellons :

Compression : 300 à 600^{kg} ;

Tension : 0^{kg} environ.

Mais il n'a pu nous être fourni aucun procès-verbal d'essais officiels, faits avant la construction du barrage.

XXI. — *Essais des moellons à l'arsenal de Malines.*

Dans le mur primitif, nous avons prélevé quatre échantillons variés, que nous avons fait essayer à l'arsenal de Malines.

Le procès-verbal qui nous a été envoyé donnait les renseignements suivants :

Eau douce absorbée, après huit jours d'immersion :

En poids : 3,7 à 20,9 0/0.

Essais à la compression, après imbibition :

223^{kg},5 à 396^{kg}.

Essais à la traction longitudinale, après imbibition :

2^{kg},3 à 10^{kg},6.

Essais à la traction transversale, après imbibition :

2^{kg},4 à 5^{kg},5.

Ces coefficients sont donc bien inférieurs à ceux fournis par les ingénieurs, dans les rapports de 1876.

De plus, on voit que les pierres du barrage sont très avides d'eau.

Nous avons pu nous rendre compte, ainsi que l'avaient fait avant nous MM. Denys et Hausser, que l'imbibition enlevait aux moellons une partie, quelquefois importante, de leur faculté de résistance.

XXII. — *Ciment argileux des moellons.*

Une pulvérisation et des lévignations successives nous ont montré aussi que l'argile était le ciment agglomérant du grès bigarré.

La proportion d'argile constatée a été de 14 à 33 0/0.

XXIII. — *Poli des surfaces.*

Le grand poli des surfaces devait nuire beaucoup à l'adhérence du mortier avec les moellons ; adhérence dont les ingénieurs ne se sont jamais ni occupés, ni préoccupés.

XXIV. — *Mica emprisonné dans la masse.*

De nombreux grains de mica, répandus dans la masse des moellons, entre les lits successifs, venaient encore nuire à l'adhérence.

Ces grains se détachaient, en effet, avec une grande facilité; et le mortier, en se séparant des moellons, en entraînait une assez grande proportion.

XXV. — *Observation de MM. les inspecteurs généraux Holtz et Henry, et réponse de M. Langlois.*

a) *Observation.* — On a employé les moellons du pays, ce qui s'imposait.

Quand on se trouve en présence de matériaux de médiocre qualité, on en est quitte pour forcer les dimensions de l'ouvrage.

Réponse. — D'accord, mais l'a-t-on fait à Bouzey? Tout au contraire, le barrage dont nous nous occupons est le plus faible de tous ceux (au nombre de vingt-cinq) auxquels on l'a comparé.

XXVI. — *Résumé.*

Les moellons employés à Bouzey étaient de qualité médiocre et les ingénieurs avaient fourni, sur leur résistance, des renseignements pris je ne sais où, sans qu'aucun essai préalable paraisse avoir été fait pour justifier les chiffres produits.

§ 14. — MORTIER.

XXVII. — *Constitution et dosage du mortier.*

Dans le mur primitif et dans le mur de renforcement, on a employé 390^{kg} de chaux du Theil par mètre cube de sable.

Mais, tandis que le sable du contrefort, pris dans la Moselle, et par conséquent bien délavé, était constitué de grains inégaux, parmi lesquels se trouvait un assez grand nombre de gros grains,

celui du mur primitif, pris dans la carrière des Brûlées, était argileux, très fin et surtout très régulièrement fin.

Il y a donc une différence notable entre la qualité du mortier dans le mur primitif et dans le mur de renforcement.

Comme, en somme, c'est le premier mur qui a cédé, nous allons examiner spécialement et exclusivement le mortier du barrage construit en 1879-1880.

XXVIII. — *Opinion des entrepreneurs que nous avons consultés.*

J'avais été chargé, par mes collègues, de présenter différents échantillons du mortier en question à plusieurs entrepreneurs (1), et de recueillir les opinions qui pourraient être émises en la circonstance.

Toutes les personnes consultées ont été d'accord pour trouver le mortier qui leur a été soumis de très médiocre qualité.

Je vais présenter successivement les différentes critiques que nous avons faites du mortier, d'après les renseignements qui nous ont été fournis et d'après nos propres observations.

XXIX. — *Influence de l'argile.*

L'argile des moellons de grès bigarré est la cause de la diminution de résistance constatée dans ces pierres, après imbibition.

Le sable argileux dérivant du grès bigarré donne donc un mortier susceptible de se ramollir aussi, dans une certaine mesure, quand l'eau l'a pénétré.

D'un autre côté, la présence de l'argile nuit à la propriété adhérente du mortier.

XXX. — *Perméabilité.*

Le malaxage de la chaux avec un sable fin n'est jamais parfait, tout en exigeant plus d'eau que dans le cas du sable normal.

(1) Parmi ces entrepreneurs se trouvait M. Soleville, ancien vice-président de la Société des Anciens Élèves des Écoles d'Arts et Métiers.

Or, en s'évaporant, cette eau rend le mortier fait avec du sable fin plus poreux que le mortier établi dans de bonnes conditions.

La perméabilité du mortier employé dans le barrage primitif était donc considérable.

XXXI. — *Diminution de la résistance.*

La finesse des grains entraîne d'elle-même à une diminution très sensible de la résistance du mortier.

Dans leur ouvrage autographié ayant pour titre: *Expériences sur les matériaux des maçonneries*, MM. Souleyre et Anglade fournissent les renseignements suivants :

Du mortier de deux ans d'âge, fait avec 400^{kg} de chaux du Theil et du sable de même qualité, mais de grosseurs différentes, a donné les résultats suivants à la traction :

Sable passé au crible de 9^{mm} : 14^{kg},700 ;

Sable passé au crible de 6^{mm}, mais refusé par celui de 1^{mm} : 14^{kg},710 ;

Sable passé au crible de 1^{mm} 1/2 : 10^{kg},500.

Or, il y a loin entre le sable du mur primitif de Bouzey et celui passé au crible de 1^{mm} 1/2. Le mortier enlevé à une fissure, ayant perdu près de 50 0/0 de sa chaux, se réduisait, en effet, en une poudre fine comparable à de la farine.

La diminution de 4^{kg}, constatée par MM. Souleyre et Anglade, aurait donc été beaucoup plus considérable dans le mortier de Bouzey, par le fait de la finesse exceptionnelle du sable ; et cela, sans préjudice de l'affaiblissement supplémentaire résultant de l'argile en suspension.

XXXII. — *Appréciation de la résistance probable du mortier de la digue de Bouzey.*

a) *Essais de M. Cahen.* — On nous a communiqué un procès-verbal d'essais de traction faits par M. Cahen, le 31 juillet 1877. sur un certain nombre d'échantillons de mortier.

Nous y lisons qu'un mortier au dosage de 230^{kg} de chaux du Theil par mètre cube de sable de carrière a donné, après deux cent soixante-sept jours (environ neuf mois), un coefficient moyen de 2^{kg},97.

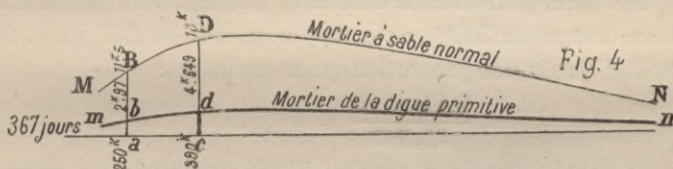
J'exprime, avant toute chose, les regrets suivants :

D'abord, que ces essais n'aient pas été faits au dosage de la digue, 390^{kg} par mètre cube ;

Ensuite, que le coefficient de 2^{kg},97, dont la faiblesse sautait aux yeux, n'ait pas fait faire à M. Cahen des réflexions judicieuses sur la médiocre qualité du sable employé ;

Enfin, que M. Cahen ne se soit préoccupé que de la traction, sans songer à vérifier les conditions de résistance à la compression et à l'adhérence.

Il y a là une série de lacunes qui ont rendu absolument inu-



tiles les essais, d'ailleurs incomplets, des ingénieurs de 1876.

b) *Appréciation des coefficients de travail du mortier de la digue primitive.* — Ceci posé, je me suis demandé s'il était possible, en partant du coefficient moyen, 2^{kg},97, d'établir approximativement les coefficients de traction et de compression du mortier de la digue primitive.

Voici comment j'ai opéré, pour arriver à ce résultat désirable :

Dans le rapport de juillet 1890, de la Commission des chaux et ciments, j'ai pris les coefficients de traction fournis par le plus faible des échantillons de mortier, pour différents dosages allant de 200^{kg} à 1.300^{kg} de chaux du Theil par mètre cube de sable normal.

Ramenés à des briquettes de deux cent soixante-sept jours d'âge, ces coefficients peuvent être représentés par les ordonnées

de la courbe MBDN (*fig. 4*), les abscisses correspondant aux différents dosages.

Traçons les ordonnées *aB*, *cD*, correspondant aux dosages de 250^{kg} et 390^{kg}.

Nous voyons qu'elles représentent des tractions de 41^{kg},500 et 18^{kg}.

Ainsi donc, avant d'aller plus loin, on peut dire que le coefficient moyen, 2^{kg},97, trouvé par M. Cahen pour un dosage de 250^{kg}, était très faible; puisque celui du mortier à sable normal est, dans ces conditions, de 41^{kg},500.

Le mortier employé à la digue primitive était donc indubitablement de médiocre résistance. Tous les raisonnements que l'on tiendra pour prouver le contraire ne pourront affaiblir cette conclusion immédiate.

Ceci posé, pour avoir le coefficient de traction correspondant à un dosage de 390^{kg}, avec des briquettes de 267 jours, il suffit d'établir une proportion qui nous donne :

$$\frac{2,97 \times 18}{41,500} = 4^{\text{kg}},649.$$

En somme, les deux courbes MBDN, *mbdn* (*fig. 4*) représentent les résistances respectives des deux mortiers que nous comparons; et l'examen de ces deux courbes montre mieux que tout raisonnement l'infériorité du mortier de Bouzey.

Remarquons maintenant que les coefficients de compression de la Commission des essais sont égaux, en moyenne, à ceux de traction multipliés par 8,2. Nous aurons alors, pour coefficient de compression des briquettes de 267 jours,

$$4,649 \times 8,2 = 40^{\text{kg}}.$$

Or : 1° le coefficient de travail constaté à l'aide d'éprouvettes exécutées avec soin est toujours supérieur à celui du mortier employé dans les travaux;

2° Le mortier du barrage de Bouzey, qui a séché à l'air, doit avoir, par cela même, un coefficient plus faible que celui de briquettes conservées dans l'eau.

Pour ces raisons, je pense qu'il faut réduire beaucoup les coefficients trouvés ci-dessus, et que le mortier de la digue primitive ne pouvait guère résister qu'aux coefficients suivants :

Traction 3^{kg},500;

Compression 30^{kg}.

Quant à l'adhérence, il m'a été impossible de me fixer sur sa valeur, même approximativement. Tout ce que je puis dire, avec une quasi-certitude, c'est que le coefficient d'adhérence du mortier avec les moellons était inférieur au coefficient de traction, 3^{kg},500.

XXXIII. — *Observations de M. Maurice Lévy
et réponses de M. Langlois.*

a) *Première observation.* — M. M. Lévy a reproché aux experts de n'avoir pas reconstitué le mortier du barrage primitif, avec la chaux du Theil, toujours pareille à elle-même, et le sable de la carrière des Brûlées.

Première réponse. — Les carrières ont :

Un commencement, pendant lequel le sable est médiocre.

Une période d'exploitation normale, qui fournit le meilleur sable;

Une fin, correspondant à un sable redevenu médiocre.

Où en est la carrière des Brûlées?

D'ailleurs, en supposant que nous ayons opéré comme le dit M. M. Lévy, eût-on accepté sans protestation les résultats que nous eussions produits?

En résumé, il nous a paru impossible de reconstituer, à vingt ans de distance, le mortier de la digue primitive de Bouzey.

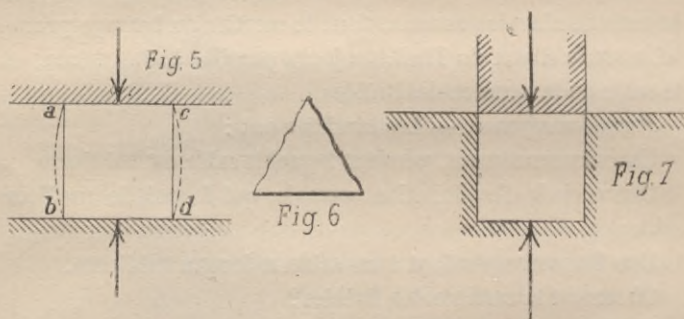
b) *Deuxième observation.* — On a employé du sable fin pour obtenir un mortier moins perméable.

Deuxième réponse. — J'ai expliqué plus haut que le sable fin avait précisément pour résultat immédiat de rendre le mortier plus perméable, à cause de la plus grande quantité d'eau

qu'il nécessite. Il me paraît donc absolument inutile de revenir sur cette question, que l'examen des échantillons de mortier, apportés à l'audience, permettait d'ailleurs d'apprécier matériellement.

c) *Troisième observation.* — M. M. Lévy admet le coefficient de $4^{\text{kg}},649$, trouvé par moi pour le mortier du barrage primitif, supposé essayé sur des éprouvettes de 267 jours d'âge; mais il estime que les raisons qui me font abaisser ce coefficient à $3^{\text{kg}},500$, dans le mur lui-même, sont précisément celles qu'il faudrait invoquer pour le relever.

D'abord, au lieu de s'abaisser, dans un gros mur, les coefficients des éprouvettes subissent une augmentation, ainsi qu'il résulte des expériences à la compression de M. Bouvier.



Ensuite, bien loin que du mortier conservé à l'air ait moins de résistance que du mortier conservé dans l'eau, c'est tout le contraire qui se présente; témoin les résultats consignés dans un ouvrage de M. Candlot : *Ciments et chaux hydrauliques*.

Troisième réponse. — Les expériences de M. Bouvier n'ont rien que de très rationnel.

Prenons, en effet, un cube d'essai, de 12 à 15^{cm} de côté.

Si nous le soumettons à une compression (*fig. 5*), les faces *ab*, *cd* se bomberont sous l'effort, par suite de ce que les Allemands nomment « la fluidité de la matière »; et la rupture

s'opérera par décollement latéral, au lieu de se produire par écrasement transversal.

On obtiendra ainsi des blocs pyramidaux (*fig. 6*), et des éclats ayant pour bases les faces latérales.

Au lieu de laisser le cube en liberté, si nous l'emprisonnons dans un moule très solide (*fig. 7*), il résistera à des charges beaucoup plus grandes que précédemment, car la rupture ne pourra plus se produire que par l'écrasement transversal.

Enfin, si vous tirez sur le cube de la *figure 7*, sa fluidité le fera s'amincir, et l'appui latéral du moule extérieur sera sans utilité.

En résumé, un mortier emprisonné dans un gros mur peut fort bien, comme l'a constaté M. Bouvier, voir sa résistance à l'écrasement augmenter considérablement.

Mais si on tire sur le mortier, l'avantage de l'emprisonnement disparaît; et il ne reste plus que l'infériorité indiscutable d'un mortier manufacturé sur un échantillon de laboratoire.

Or, je n'ai jamais dit que le mortier de Bouzey avait cédé par compression, puisque c'est à une traction de l'amont que j'attribue la catastrophe.

Ma première raison de diminuer le coefficient 4^k,649 se trouve donc justifiée.

Quant à la seconde, je l'ai puisée en examinant les résultats d'expériences consignés dans l'ouvrage de MM. Souleyre et Anglade.

On lit, en effet, à la page 11 de cet ouvrage :

« En pays exposés aux sécheresses, le rapport des résistances des briquettes conservées à l'air libre et des briquettes conservées dans l'eau peut varier entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{9}{10}$. »

Il y a évidente contradiction entre les chiffres ci-dessus et ceux invoqués par M. Maurice Lévy.

Mais je m'en tiens à l'avis exprimé par MM. Souleyre et Anglade, car leurs essais ont été exécutés avec beaucoup de

soin et de méthode, et cela, pendant sept années consécutives.

M. Souleyre est ingénieur des Ponts et Chaussées, M. Anglade, conducteur; et leur ouvrage a été jugé digne d'intérêt par M. Lévy lui-même, puisqu'il en a cité des extraits dans son mémoire imprimé et dans sa déposition verbale.

Quatrième observation. — M. Maurice Lévy m'a reproché d'avoir attribué au mortier du barrage, en les réduisant, les coefficients trouvés pour des briquettes de neuf mois d'âge, tandis que le mortier atteint son maximum de résistance à deux ans.

Quatrième réponse. — Je n'ai pas du tout commis l'erreur que me reproche M. M. Lévy.

J'ai dit (n° 32) que les coefficients des briquettes de neuf mois, $4^{\text{kg}},649$ et 40^{kg} , devaient être beaucoup réduits; et que, d'après mon estimation :

« Le mortier de la digue de Bouzey ne devait pas avoir de coefficients supérieurs à $3^{\text{kg}},500$ et 30^{kg} . »

Le mortier de la digue de Bouzey n'a jamais été, que je sache, un mortier de neuf mois d'âge.

On peut donc discuter les chiffres de $3^{\text{kg}},500$, 30^{kg} , que je présente comme il vient d'être dit; mais il ne faut pas interpréter mes paroles dans un sens qu'elles n'ont jamais eu.

Cinquième observation. — M. Maurice Lévy, ainsi que les ingénieurs en cause, concluent du fait suivant à l'excellence du mortier de Bouzey.

Les blocs détachés de la digue, en 1895, ont conservé dans leur chute un volume important; et ils se seraient nécessairement brisés en tombant si leur mortier n'avait pas été de bonne qualité.

Cinquième réponse. — La brèche la plus élevée est à la cote moyenne 361,50; et le sol d'aval avait une hauteur moyenne mesurée par la cote 359.

Les blocs de la brèche la plus élevée ne sont donc tombés que d'une hauteur de $2^{\text{m}},50$.

De plus, le sol d'aval était gazonné, et tenu en un état d'humidité constante par les infiltrations.

Enfin, avant le bris final du barrage, une certaine quantité d'eau s'était déversée à l'aval par une brèche formée à la partie supérieure de l'ouvrage, par suite d'un égrènement initial du sommet.

La faible hauteur de chute, l'état particulier du sol d'aval et l'eau dont le sol était recouvert lors de la rupture des blocs expliquent donc surabondamment pourquoi ceux-ci ne se sont pas brisés en tombant, malgré la médiocre qualité du mortier.

XXXIV. — *Résumé du chapitre V_a.*

Le mortier de la digue de Bouzey n'a pas été essayé au dosage définitivement adopté, ce qui a été une faute grave.

On ne s'est pas même rendu compte de sa faible résistance, lors des essais exécutés au dosage de 250^{kg}; et la comparaison entre 2^{kg},97, coefficient moyen obtenu dans ces essais, et 11^{kg},50, chiffre correspondant du mortier à sable normal, montre combien le mortier fait avec du sable de carrière était médiocre.

Les ingénieurs de 1887 l'ont d'ailleurs reconnu eux-mêmes, puisqu'ils ont employé, pour le mur de renforcement, du sable délavé de Moselle, bien plus coûteux, quand ils avaient sous la main le sable de carrière de la digue primitive.

En somme, je maintiens les chiffres établis par moi :

Traction	3 ^{kg} ,500;
Compression	30 ^{kg} ;

en faisant observer que le coefficient d'adhérence devait même être inférieur à 3^{kg},500.

CHAPITRE V_b**Effets du temps sur la qualité initiale des matériaux.**

§ 15. — INFILTRATIONS A TRAVERS LE BARRAGE.

XXXV. — *Affaiblissement résultant de ces infiltrations.*

Malgré l'enduit en ciment dont on avait tapissé l'amont, l'eau a pénétré activement dans le corps de la digue; ainsi qu'en témoignaient les suintements de l'aval, dont le niveau correspondait à celui du réservoir, avec, toutefois, une certaine diminution résultant de la perte de charge.

Ces infiltrations à travers le barrage ont produit :

a) Dans les moellons, un affaiblissement immédiat et, peut-être, légèrement progressif, dû à la nature du ciment argileux du grès bigarré;

b) Dans le mortier, un affaiblissement progressif, lent, il est vrai, résultant du délavage de la chaux.

L'aval de la digue était, en effet, tapissé de concrétions blanchâtres ayant fourni à l'analyse 36,5 0/0 de chaux, tandis que le mortier n'en contenait que 45 0/0 environ.

§ 16. — EFFETS DE LA DILATATION SUR LE BARRAGE DE BOUZEY.

XXXVI. — *Considérations générales.*

Peu de temps après sa construction, la digue de Bouzey a subi des ruptures transversales en un certain nombre de points, et il en est de même pour toutes les digues droites de longueurs un peu importantes.

Les fissures de ce genre, dénommées avec raison fissures de température, s'ouvrent pendant l'hiver et se ferment pendant l'été.

J'ai été conduit à étudier d'une façon spéciale le mécanisme des efforts susceptibles de produire des résultats aussi carac-

téristiques, et j'ai établi la théorie suivante, que j'ai développée dans mon rapport d'expertise.

XXXVII. — *Importance générale de la dilatation.*

Prenons une barre de fer droite, de section et de longueur quelconques, et encastrons-la d'une façon rigoureuse en ses deux extrémités, après l'avoir chauffée à la température de 165° .

Si on la laisse refroidir à 0° , elle se brise transversalement; et cela, quelle que soit l'importance de sa section transversale.

Ce fait, résultant de formules très précises, montre l'importance des effets de la dilatation, lorsque celle-ci ne peut s'effectuer librement.

XXXVIII. — *Effets de la dilatation dans la maçonnerie du barrage de Bouzey, avant le bouchage des fissures.*

A. *Période ayant précédé la formation des fissures.* — Représentons (*fig. 8*) le profil de la digue; et, par des plans verticaux et horizontaux, découpons le barrage en files carrées ou rectangulaires, telles que *pqrs*.

Nous pourrions examiner ce qui se passe dans les files en question, prises isolément, en remplaçant l'action des files voisines par les forces qu'elles développent dans leurs plans de contact avec celles considérées.

Ceci posé, prenons deux files consécutives quelconques, ABCD, BEFC (*fig. 9*); et supposons qu'elles soient soumises à des diminutions de température inégales, celle de gauche étant plus impressionnée que celle de droite.

Si ces files étaient libres, elles se raccourciraient inégalement: ABCD viendrait en A'B'C'D'; et BEFC prendrait la forme B₁E₁F₁C₁ (*fig. 10*).

Mais, comme les files en question sont soudées l'une à l'autre, et que, de plus, elles sont astreintes à rester droites dans la masse du barrage, elles prendront, en définitive, la forme A''B''C''F''C''D'' (*fig. 11*).

Dans ces conditions, les réactions moléculaires ont produit :

- a) Un allongement de la file de gauche;
- b) Un raccourcissement de la file de droite.

Il est facile de voir que ces deux résultats ont été causés :

- a') Le premier, par l'action que la file BEFC a exercée sur ABCD, dans le plan de jonction BC;
- b') Le second, par la réaction de la file de gauche sur la file

de droite, dans le même plan BC.

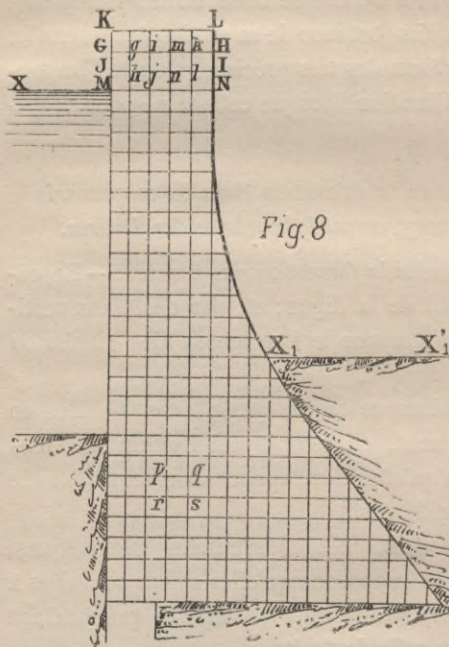
Si les files étaient homogènes, de même température de pose, les efforts développés en BC seraient symétriques par rapport au plan normal médian YY' .

Ceci posé, coupons les files $A''B''C''D''$, $B''E''F''C''$ (fig. 11) par un plan normal $Y_1Y'_1$; et examinons ce qui se passe dans les deux éléments $abcd$, $befc$.

L'élément de droite exerce en bc un effort tranchant longitudinal $+k$, qui se traduit, au centre o_1 de la section transversale ab , par une traction : $+t = +k$ (fig. 12).

Réciproquement, l'élément de gauche provoque en bc une réaction $-k$, transmettant en o_2 , centre de be , une compression : $-t = -k$ (fig. 13).

Ainsi donc :

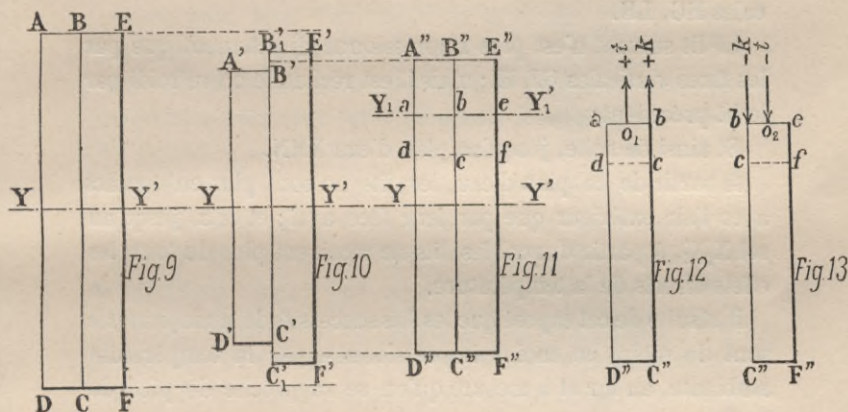


Quand deux files consécutives sont soumises à des variations inégales de température, il se développe :

c) Dans leur plan de jonction, des efforts tranchants longitudinaux k ;

d) Dans leurs sections transversales, des tensions ou compressions t , égales à k .

Il est facile de voir que ces efforts k et t prennent naissance aux extrémités des files et vont en se totalisant de ces extrémités vers un point de plus grande fatigue, qui est le milieu des



barres lorsqu'elles sont homogènes et de même température de pose.

Il nous reste à examiner si des dilatations inégales n'impressionnent pas, dans les conditions ci-dessus exposées, les files de la digue représentée *figure 8*.

Considérons successivement :

- 1° Les files juxtaposées, d'une même tranche horizontale;
- 2° Les files superposées, d'une tranche verticale.

1° *Files juxtaposées.* — Soit une tranche horizontale, GHIJ, située au-dessus du plan d'eau MX (*fig. 8*).

Les files extérieures, GghJ, Hllk, subissent directement l'action de l'air ambiant. Elles seront donc impressionnées avant

les secondes, *gijh*, *klmn*, par les variations de la température extérieure.

Celles-ci recevront, avant les troisièmes, les effets de ces variations; et cela, par l'intermédiaire des premières.

Et ainsi de suite, de proche en proche, en allant vers le centre de la tranche horizontale considérée.

2° *Files superposées*. — Le lit supérieur, KLHG, reçoit l'action de l'air sur ses trois faces: KG, KL, LH; celle KL ayant une importance considérable, par rapport aux faces verticales HG, LH.

Le lit suivant n'est plus impressionné directement que par les faces verticales GJ, HI; mais il est réchauffé ou refroidi par le lit précédent;

Et ainsi de suite, jusqu'au plan d'eau XMN.

A partir de ce plan d'eau, les lits ne sont plus en contact avec l'air extérieur que par leur face aval; et cela, jusqu'au sol $X_1X'_1$, à partir duquel les lits ne reçoivent plus du tout les effets directs de la température.

Il résulte de cet exposé que les lits successifs de la maçonnerie sont de moins en moins impressionnés, par la température ambiante, au fur et à mesure qu'on se rapproche du pied de la digue.

Une file quelconque, d'une tranche verticale, est donc moins influencée par les variations de la température que celle située au-dessus, et plus impressionnée que celle située au-dessous.

En résumé :

Deux files successives, soit juxtaposées, soit superposées, arrivent à subir des variations de température inégales; et, par conséquent, il se développe, dans les sections transversales et dans les plans de jonction, des efforts *t* et *k* analogues à ceux dont nous avons parlé dans l'étude de deux files isolées.

L'intensité de ces efforts, dans la digue de Bouzey, a atteint le coefficient de rupture, puisqu'il s'est produit des fissures transversales.

Cela est d'autant plus important que, dans tout barrage droit, le plan d'eau et le sol de fondation d'aval tracent des lignes de démarcation très caractéristiques, divisant des rangées qui peuvent être exposées à des températures très différentes. La chose est d'autant plus importante pour l'amont, que le plan d'eau varie constamment, exposant successivement différentes régions à des efforts très intenses.

Enfin, les efforts t et k avaient la fâcheuse propriété de changer de sens avec les variations de température.

D'une part, pour l'ensemble de la digue, deux variations importantes sont à signaler :

Les efforts t constituant des tensions pendant l'hiver, et des compressions pendant l'été; les efforts k subissant une variation de même sens.

D'autre part, l'écorce du barrage (qui a commencé par céder avant l'accident final, ce qui a entraîné ultérieurement la rupture) était soumise à des variations journalières, conséquence de variations correspondantes de la température extérieure.

Or, on sait que tous les corps, même les métaux, se comportent mal quand ils ont à subir des efforts passant alternativement d'une valeur positive à une valeur négative et réciproquement.

L'effet destructeur de ces efforts alternatifs est encore beaucoup plus accentué dans les agglomérés, tels que les maçonneries.

On peut donc dire, en général, que la dilatation est très dangereuse, dans un barrage droit, surtout s'il est de grande longueur.

La question s'aggravait encore à Bouzey pour les raisons suivantes :

e) Le barrage était orienté presque rigoureusement de l'est à l'ouest; de sorte que toute la partie découverte de l'amont recevait l'action du soleil pendant toute la journée.

Il y avait donc, au plan XMN, une jonction de lits horizon-

taux particulièrement atteinte par les différences de température.

f) Ainsi que nous le verrons plus loin, le profil était tellement maigre que des tensions importantes se développaient à l'amont, à partir de la cote 360,50.

Les différences de température avaient donc un effet très intense, et partant très nuisible, à l'amont du barrage de Bouzey; et la combinaison des cisaillements longitudinaux k avec les tensions transversales résultant de la flexion ont certainement, d'après moi du moins, produit le décollement des joints horizontaux de la maçonnerie et causé la rupture finale.

B. *Période ayant suivi la formation des fissures.* — La rupture de la digue, en plusieurs points, a naturellement soulagé l'ouvrage, en diminuant l'importance des efforts développés par la dilatation.

Mais :

D'une part, les fissures se refermant pendant l'été, les effets produits par la dilatation proprement dite n'ont pas été diminués;

D'autre part, les fractions de longueur entre deux fissures consécutives étaient assez importantes pour que les contractions y jouent encore un rôle très appréciable.

Donc, les fissures de température, tout en soulageant la digue dans une certaine mesure, n'ont pas enlevé complètement l'action destructive de la température.

Nous allons voir, à l'article suivant, que le bouchage des fissures a aggravé la situation dans les couches d'amont et d'aval, dont l'affaiblissement progressif a entraîné la ruine du barrage.

XXXIX. — *Effets du bouchage des fissures.*

Supposons qu'une fissure, AB, se forme en hiver, sous l'action du froid (*fig. 14*).

Si on n'y touche pas, elle se refermera en été (*fig. 15*).

Mais on n'a pas laissé les fissures intactes, parce que les fuites auraient pris une importance trop considérable.

Après avoir essayé, sans succès, des coulis de ciment préconisés par le Conseil général des Ponts et Chaussées, on en est arrivé à la disposition suivante :

1° On ouvrait les joints, à l'amont et à l'aval, sur environ

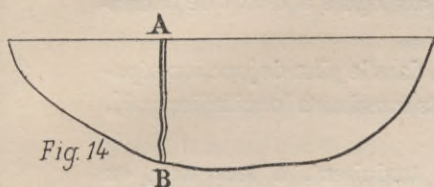


Fig. 14

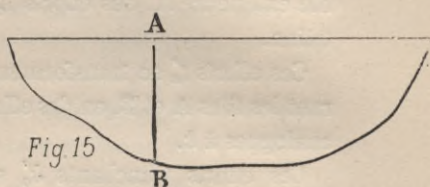


Fig. 15

15^{cm} de profondeur et sur 4 à 12^{cm} de largeur (fig. 16);

2° On introduisait, dans le fond de ces échancrures, des torons de chanvre goudronné, que l'on mâtait;

3° On chassait fortement des coins en sapin, trempés dans du goudron flambé;

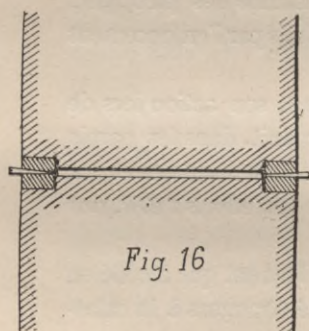


Fig. 16

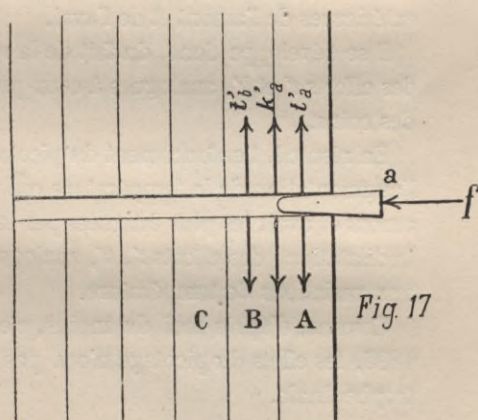


Fig. 17

4° On chassait de nouveaux coins en bois dur, dans l'intérieur des coins de sapin, refendus en leur milieu pour la circonstance; et cela, afin de les mieux serrer latéralement contre les parois des échancrures.

En résumé, les effets produits sur l'écorce de la digue étaient

identiques à ceux qui résulteraient de l'enfoncement de coins ordinaires (*fig. 47*).

Or, il est facile de comprendre qu'un morceau de bois a , sous l'action des efforts f d'enfoncement, développe, dans la file extérieure A, des efforts t'_a , analogues à ceux t de la dilatation.

Ces efforts t'_a se transforment, dans le plan de jonction séparant les files A et B, en des efforts tranchants longitudinaux k'_a , analogues à k .

Ces efforts tranchants k'_a se traduisent, à leur tour, en efforts t'_b , dans la file suivante B; et ainsi de suite, de proche en proche, jusqu'à une certaine profondeur qu'il est impossible de préciser.

Si nous considérons maintenant la fissure ainsi bouchée, quand elle tend à se refermer pendant l'été, on voit que le coin a s'oppose à cette fermeture, au moins dans les parties extérieures de l'amont et de l'aval.

Il se développe donc, du fait de la résistance des picotages, des efforts t' et k' , analogues à ceux produits par l'enfoncement des coins.

En résumé, l'enfoncement du picotage et son action lors de l'augmentation de la température ont produit, dans les parois amont et aval, les plus fatiguées par les efforts normaux et par la dilatation, des efforts t' , k' , analogues aux efforts t et k , dus aux variations de température.

Comme, d'après moi du moins, c'est l'amont qui a cédé en 1895, les effets du picotage n'ont pas été étrangers à la catastrophe finale.

XL. — *Observations des ingénieurs et du tribunal.*

Réponses de M. Langlois.

Première observation. — M. Denys prétend que les picotages, exécutés pendant l'été, n'ont pu être soumis, l'été suivant, à une pression supérieure à celle de la pose.

Première réponse. — J'estime que M. Denys est mal servi par ses souvenirs.

Dans ses interrogatoires, il dit lui-même que le premier picotage d'essai a été pratiqué, à l'aval, en janvier 1886.

De plus, les rapports hebdomadaires des conducteurs, du 13 novembre 1887 au 7 janvier 1888, parlent de picotages exécutés à l'amont.

D'ailleurs, il serait singulier que des picotages, ayant pour but de boucher des fissures, aient été établis au moment même où ces fissures n'existaient pas.

Deuxième observation. — M. le président du tribunal m'a demandé si le bouchage au ciment, préconisé par le Conseil général, eût produit de meilleurs résultats que les picotages en bois.

Deuxième réponse. — Tout obstacle à la fermeture des fissures, pendant l'été, constituait une cause de désagrégation.

Mieux valait même, selon moi, l'interposition d'un corps élastique, comme le bois, sous une épaisseur d'une dizaine de centimètres, que celle d'un corps incompressible comme le ciment.

Mes critiques s'appliquent à tout bouchage des fissures, quel qu'il soit; mais, malheureusement, ce bouchage s'imposait.

Troisième observation. — M. Hausser proteste contre ma théorie des efforts t' et k' , attendu, dit-il, que les parements amont et aval ne présentaient aucune trace d'épaissures.

M. M. Lévy traduit cette observation autrement, en disant que j'ai tort de croire que les coins en bois aient pu écraser la pierre.

Troisième réponse. — J'ai dit que les picotages avaient développé des efforts t' et k' ; mais je n'ai jamais insinué que ces efforts étaient capables d'écraser la pierre. Ils existaient, voilà tout ce que j'ai affirmé; et leur action est venue s'ajouter aux charges normales et de dilatation.

XLI. — *Opinion de l'Administration des Ponts et Chaussées, avant 1895, sur les effets de la dilatation dans le barrage de Bouzey.*

1° Dans leurs rapports, les ingénieurs se contentent de dire :

« L'on attribue ces fissures à la contraction des maçonneries par le froid. En fait, elles se sont toujours, depuis leur formation, fermées pendant l'été et rouvertes pendant l'hiver.

2° Dans ses rapports du 19 novembre 1886 et du 5 juillet 1887, M. l'inspecteur général Gauckler déclare que le tracé rectiligne du barrage lui paraît vicieux ; et il va même jusqu'à attribuer l'accident de 1884 à une grande fissure horizontale de la base, résultant de la dilatation.

3° Dans le rapport de la Commission spéciale de 1887, un membre non désigné nominativement (probablement M. Gauckler) dit que :

« Ces crevasses ou dislocations se produisent fatalement dans un mur de grande longueur, orienté comme le barrage de Bouzey, et subissant d'énormes variations de température.

» Sans doute, on peut dire que toute partie du mur est susceptible de résister isolément puisqu'on la calcule dans ce but ; mais la partie centrale, la plus fatiguée, détachée en fait des parties extrêmes, se trouvait dans les plus mauvaises conditions. »

Un autre membre croit que : « les fissures ont eu une faible influence sur l'accident de 1884, et qu'il ne faut pas s'en occuper outre mesure pour l'avenir ».

Dans les discussions de la Commission, un membre préconise le remblai d'aval, demandé par les ingénieurs : « pour soustraire le parement à l'influence des variations de température, beaucoup plus funestes qu'on ne se l'imagine, et beaucoup trop négligées jusqu'ici ».

Dans les discussions du Conseil, le membre qui a signalé les effets de la température (probablement M. Gauckler) revient

sur ce sujet, sans arguments nouveaux tendant à prouver sa complète connaissance du problème.

D'autres membres, sans nier l'influence fâcheuse de la dilatation, estiment qu'il n'y a pas lieu de s'en préoccuper; et la majorité se rend à cet avis optimiste.

Ainsi donc :

L'Administration des Ponts et Chaussées connaissait mal, avant 1895, le mécanisme des efforts développés par la dilatation dans le barrage de Bouzey.

Quelques ingénieurs redoutaient ces effets, mais sans les bien connaître et sans pouvoir, par suite, en apprécier l'importance et le danger avec parfaite connaissance de cause.

Dans tous les cas, on ne trouve nulle trace de préoccupation au sujet des efforts tranchants longitudinaux k et k' , qui ont, d'après moi, joué un si grand rôle dans la destruction de la digue de Bouzey.

§ 17. — RÉSUMÉ DU CHAPITRE V_b.

XLII. — *Exposé.*

Les infiltrations à travers les moellons ont produit un affaiblissement immédiat et, peut-être aussi, lentement progressif de leur résistance.

Les infiltrations à travers le mortier ont causé, par voie de délavage, un affaiblissement lentement progressif de la faculté de résistance et d'adhérence.

La dilatation a fait subir à la digue des efforts t et k , ayant atteint, aux parties fissurées, les coefficients de rupture. Ces efforts avaient, en outre, le grand inconvénient de changer de sens avec les variations de la température.

Aux efforts normaux, t et k , de la dilatation, sont venus s'ajouter d'autres de même nature, t' et k' , produits par les picotages introduits dans les fissures, et intéressant surtout les parois amont et aval.

Ces différents efforts ont pris, à Bouzey, une importance exceptionnelle, pour les causes suivantes :

- a) Le barrage était de grande longueur (520^m) ;
- b) Il était mal orienté ;
- c) Les matériaux étaient de qualité médiocre, avec de faibles coefficients de traction, de compression et d'adhérence ;
- d) Enfin, le profil était trop maigre, ce qui entraînait, ainsi que nous le verrons plus loin, à des tractions importantes de l'amont.

Ces tractions, normales aux lits de la maçonnerie et tendant à les ouvrir, se combinaient avec les efforts tranchants longitudinaux k et k' , ce qui en augmentait considérablement les effets.

Rappelons enfin que l'Administration des Ponts et Chaussées n'avait pas de religion bien établie au sujet des effets de la dilatation et du picotage.

CHAPITRE VI

Tracé rectiligne du barrage.

§ 18. — HISTORIQUE.

XLIII. — *Exposé.*

Dans leur avant-projet du 5 mai 1876, les ingénieurs présentèrent une digue droite, de 520^m de longueur en couronne.

M. Rozat de Mandres, inspecteur général de la IV^e division, émit l'avis qu'il y avait lieu de donner au mur un léger bombement vers l'amont.

Le Conseil adopta cette manière de voir, et le ministre invita les ingénieurs à refaire une étude dans ce sens.

Dans le projet définitif, du 28 novembre 1876, les ingénieurs maintinrent le tracé rectiligne, en faisant valoir les raisons suivantes, que j'ai qualifiées d'arguments spécieux dans mes conclusions (V^e partie).

Comme cela m'a valu une observation assez aigre de M. Maurice Lévy, je me suis contenté, pour y répondre, de reproduire les arguments eux-mêmes, en les faisant suivre des réflexions qu'on va lire.

1° Les enracinements du barrage dans les flancs de la vallée n'étant pas susceptibles d'être reculés vers l'aval, le bombement vers l'amont enlèverait 60.000m^3 à la contenance du réservoir.

Argument spécieux, car il eût suffi de relever le plan d'eau de 4cm pour récupérer les 60.000m^3 en question.

2° L'exécution en courbe du mur de garde serait plus difficile que celle du mur droit.

Argument spécieux, car on fait couramment des constructions courbes, que les fondations doivent supporter; tandis que le mur de garde était un simple écran ne jouant aucun rôle dans la résistance propre du barrage.

3° La digue n'avait pas besoin d'un supplément de résistance.

Argument plus que spécieux, puisqu'il a été démontré absolument faux par la rupture de 1895.

4° La supériorité d'aspect résultant d'une forme courbe est plus ou moins contestable.

Argument tout simplement puéril.

Tels étaient les motifs que développaient les ingénieurs de 1876, pour justifier le maintien du tracé rectiligne.

M. Rozat de Mandres s'en contenta, émit l'avis que les ingénieurs « faisaient valoir en faveur du tracé rectiligne une série d'arguments qui paraissaient équivaloir à ceux qu'on pourrait faire valoir en faveur du tracé courbe;

» Et qu'il y avait lieu d'adopter le projet, ce qui fut fait. »

§ 19. — INCONVÉNIENTS DU TRACÉ RECTILIGNE.

XLIV. — *Exposé.*

Tous les inconvénients du tracé rectiligne ont été mis en lumière au chapitre V_b, et ils peuvent se résumer de la façon suivante :

La forme droite du barrage de Bouzey, étant données la grande longueur et la mauvaise orientation de l'ouvrage, a fait naître dans la masse des efforts parasites assez intenses pour amener le fissurage transversal en plusieurs points.

Ces efforts particuliers se sont combinés avec les charges normales et ont ainsi considérablement accru la fatigue générale, surtout dans la partie amont, menacée déjà par les tensions résultant de la maigreur du profil.

§ 20. — AVANTAGES D'UN TRACÉ COURBE.

XLV. — Rôle du tracé courbe, au point de vue de la dilatation.

Prenons (fig. 18) un barrage de profil ABCD.

Par le fait de son élasticité transversale, ce mur peut prendre les formes $A'B'CD$, $A''B''CD$, sans que la cohésion en soit altérée, pourvu que les flèches AA' , AA'' ne dépassent pas certaines limites.

Si donc, le barrage considéré est disposé en forme d'arc :

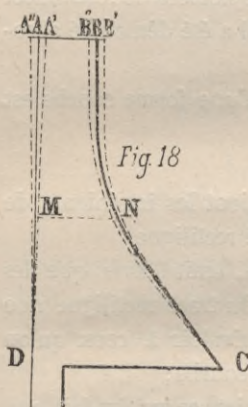
a) La partie supérieure, AB, pourra se raccourcir ou s'allonger, en vertu de l'élasticité transversale;

b) La partie inférieure, CD, devra rester invariable, puisqu'elle est fixée au sol.

c) Les parties intermédiaires, telles que MN, pourront se raccourcir ou s'allonger de quantités d'autant plus considérables qu'elles seront plus près du couronnement.

Or, d'après ce qui a été dit au chapitre V_b, nous savons que les variations de température :

a') Ont leur action maxima au sommet du barrage;



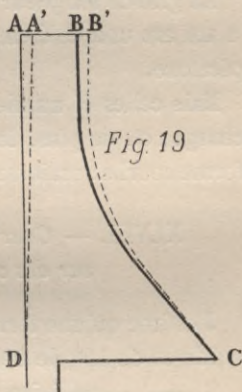
b') Ont une action nulle sur la base, recouverte de terre et d'eau;

c') Agissent de plus en plus sur le mur, au fur et à mesure qu'on se rapproche du couronnement.

Les allongements et les raccourcissements demandés par les variations de température sont donc gradués, sur la digue, comme les déformations analogues permises par l'élasticité transversale.

Pour une digue située dans des conditions climatiques déterminées, il y a donc une forme en arc dont les dimensions sont susceptibles d'empêcher la formation des fissures de température.

Mais, pour cela, il est nécessaire que le réservoir reste en charge suffisante pendant les hivers rigoureux. Si le réservoir était vide, en effet, à l'époque des grandes contractions, les efforts moléculaires qui en résultent pourraient ne pas suffire pour produire l'oscillation transversale AA' (fig. 19); et il pourrait résulter de cela un fissurage plus ou moins accentué.



Toutefois, la forme courbe, judicieusement établie, assurerait au moins le bouchage en service des fissures formées dans ces conditions.

XLVI. — Rôle du tracé courbe, au point de vue de la résistance à la poussée de l'eau.

Dans un barrage courbe, les sections transversales ont d'abord leur résistance propre, tant à la flexion qu'au glissement sur la base, absolument comme dans un barrage rectiligne (fig. 19).

Mais tout l'ensemble, constituant un arc appuyé énergiquement sur les culées E, F (fig. 20), les résistances à la flexion

transversale et au glissement sur la base se trouvent accrues dans des proportions qui peuvent être fort importantes.

Ainsi, la section ABCD (*fig. 19*) ne peut venir en A'B'CD qu'après compression longitudinale en E, F (*fig. 20*).

§ 21. — ÉTUDE DE LA QUESTION, AU POINT DE VUE DU BARRAGE DE BOUZEY.

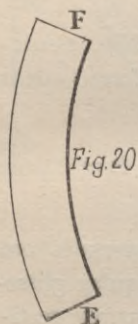
XLVII. — *Arc unique, proposé par M. Rozat de Mandres.*

La grande longueur du barrage de Bouzey n'eût pas permis à un arc unique d'empêcher la formation des fissures de température.

Mais celles-ci auraient eu des tendances à se fermer sous charge; et, de plus, la consolidation générale résultant de la forme courbe aurait sans doute empêché le mouvement de 1884.

XLVIII. — *Courbe à plusieurs branches, appuyées sur des contreforts intermédiaires.*

J'estime qu'une forme constituée par cinq arcs de 100^m de corde et de 10^m de flèche, appuyés sur des contreforts intermédiaires (*fig. 21*), eût été, à Bouzey, une solution rationnelle de la question.



J'ai déterminé, à l'annexe n° 1 (VI^e partie) :

a) Le raccourcissement du sommet, pour une inflexion transversale mesurée au couronnement par 20^{mm}, ce qui n'a rien d'excessif;

b) Le raccourcissement nécessaire pour empêcher la formation des fissures constatées dans la digue droite.

J'ai fait observer que, le second raccourcissement étant à peine la moitié du premier, le danger des fissures se trouvait ainsi écarté.

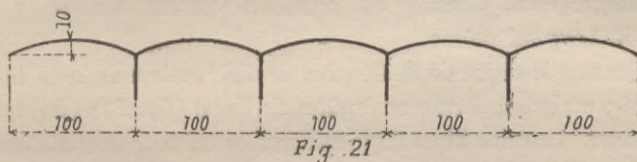
XLIX. — *Observations de M. M. Lévy et réponses de M. Langlois.*

Première observation. — Tous les barrages de grande longueur sont droits :

Lampy, 126^m, datant de 1770 ;

Couzon, 220^m, datant de 1811 ;

Grosbois, 550^m, datant de 1838 ;



Chazilly, semblable à Grosbois et de même date ;

La Mouche, 420^m, datant de 1890.

On se trouvait donc, lors de la construction de Bouzey, en présence de précédents parfaitement précis, lesquels justifient complètement la disposition adoptée.

Première réponse. — Examinons les barrages droits dont a parlé M. M. Lévy.

Lampy, malgré sa faible longueur, 126^m (Bouzey a 520^m), a été fissuré en six endroits par le fait des variations de température.

On a dû l'épauler en son travers par dix contreforts.

Couzon est un ouvrage mixte, composé d'un écran en maçonnerie, de 220^m, épaulé en amont et en l'aval par des remblais en terre (fig. 22).



De cette façon, quand le réservoir est en pleine charge, les variations de température ne peuvent influencer que le couronnement du barrage.

Malgré les avantages de cette disposition, la digue de Couzon

a deux fissures transversales; et, de plus, on a constaté des mouvements à la base de cet ouvrage.

Bref, malgré de nombreuses restaurations, le barrage de Couzon est loin d'inspirer une grande confiance.

Les barrages de Grosbois et de Chazilly, les seuls qui soient vraiment comparables à Bouzey, ont dû être consolidés par neuf puissants contreforts.

Malgré cela, Chazilly est considéré comme malade, par M. M. Lévy lui-même.

Quant à la digue de la Mouche, de 420^m, elle a déjà six fissures; malgré sa forme en voûtes de l'aval (*fig. 23 et 24*) qui atténue, dans une assez large mesure, les effets de la dilatation.

Bref, l'histoire des barrages droits de grande longueur, en

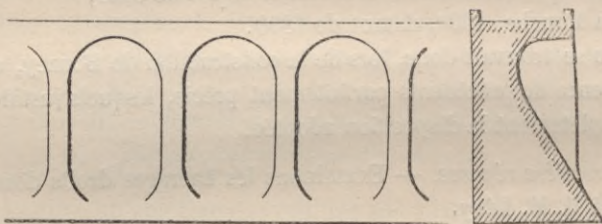


Fig. 23

Fig. 24

France, n'est qu'un long martyrologe; et il est à peine croyable que les résultats fâcheux, constatés en si grand nombre, n'aient pas ouvert les yeux de l'Administration des Ponts et Chaussées.

Deuxième observation. — M. M. Lévy m'a reproché d'avoir osé indiquer une forme en arc à plusieurs branches (*fig. 21*) comme étant la solution qu'on eût dû adopter à Bouzey.

Deuxième réponse. — Je ne me serais pas permis de donner une indication de ce genre, dans un rapport d'expertise, si je ne l'avais puisée à une source de tout premier choix.

C'est, en effet, M. M. Lévy lui-même qui m'a fourni l'idée en question; et cela, dans un mémoire à l'Académie des Sciences,

présenté par lui quelque temps après la catastrophe de Bouzey.

M. M. Lévy dit, dans sa communication :

« Dans ce but, on pourrait constituer en plan un barrage par une série de voûtes cylindriques, à génératrices verticales, de 15 à 30^m de flèche, avec contreforts aux extrémités de chaque voûte. »

J'ai simplement dit cela sous une autre forme; et la disposition préconisée, en 1895, par M. M. Lévy, n'est autre chose que celle représentée *figure 21*, abstraction faite des dimensions.

L. — Résumé du chapitre VI.

La forme rectiligne donnée au barrage de Bouzey a constitué une faute de construction; et il eût fallu employer le tracé de la *figure 21*.

Mais, cette forme n'ayant pas encore été appliquée, on ne peut faire un grief aux ingénieurs de ne l'avoir pas imaginée en 1876.

Tout ce que l'on peut leur reprocher, c'est de n'avoir pas donné au mur de Bouzey la forme d'un seul arc, attendu que cette disposition eût :

- a) Atténué le mal résultant des fissures;
- b) Consolidé la digue, tant dans sa résistance transversale que dans sa fixation au sol de fondation.

Il est probable, pour ne pas dire certain, qu'une forme courbe eût empêché le mouvement de 1884.

Pour moi, la forme rectiligne employée à Bouzey a constitué la plus lourde de toutes les fautes commises dans la construction du barrage primitif.

CHAPITRE VII

Conditions de stabilité et de résistance du profil
adopté à Bouzey.

§ 22. — STABILITÉ DE LA DIGUE PRIMITIVE.

LI. — Deux conditions à remplir.

Pour qu'une digue soit stable, il faut :
 D'abord, qu'elle ne puisse osciller autour de l'aval ;
 Ensuite, qu'elle ne puisse glisser sur la base.
 Il y a donc à étudier :
 1° La stabilité au renversement ;
 2° La stabilité au glissement.

LII. — Stabilité au renversement.

Pour déterminer cette stabilité, mes collègues avaient appliqué la méthode professée, consistant à établir l'équation d'équilibre par rapport à l'arête aval C (*fig. 25*).

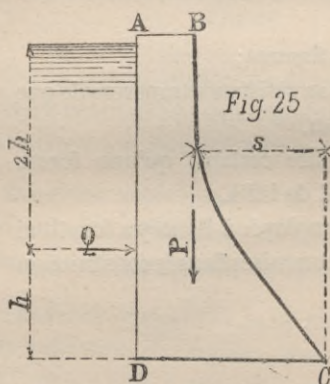


Fig. 25

P, désignant le poids du mur ;
 s, son bras de levier par rapport à C ;
 Q, la résultante de la poussée de l'eau ;
 h, son bras de levier par rapport à C ;
 L'équation en question est la suivante :

$$(1) \quad P_s > Qh.$$

Or, cette expression est nécessaire, mais insuffisante.

Si elle n'est pas remplie, il n'y a certainement pas équilibre ; mais elle peut être satisfaite sans que, pour cela, l'équilibre soit assuré.

Supposons, en effet, que la digue se renverse, sous l'action de la poussée Q.

L'oscillation n'aura pas lieu autour de l'arête aval C, laquelle s'écraserait sous la charge verticale P, mais bien autour d'une surface CE, pouvant résister au poids P (fig. 26).

Nous appellerons CE la surface d'oscillation du barrage dans laquelle les différents points travaillent suivant les ordonnées d'une droite EM.

Le point C est donc celui de plus grande fatigue; et, pour qu'il y ait équilibre, c'est-à-dire pour que le mouvement de la figure 26 ne puisse se produire, il faut que le travail maximum du point C ne dépasse jamais le coefficient de rupture de la maçonnerie par compression.

Cette condition est à la fois nécessaire et suffisante; et j'ai donné, annexe n° 2 (VI^e partie), les calculs relatifs à la digue de Bouzey.

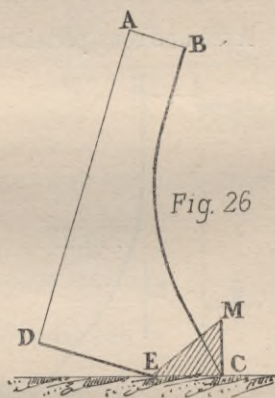
On tire de cette annexe les conclusions suivantes :

1° L'équilibre au renversement était assuré, s'il n'y avait pas eu de sous-pression ;

2° Il ne l'était plus en cas de sous-pression totale ;

3° La sous-pression maxima que pouvait supporter la digue, sans rompre l'équilibre, n'était que les 0,50 de la sous-pression totale.

Or, la sous-pression véritable pouvant être appréciée aux 0,80 de la sous-pression totale, l'équilibre au renversement n'était pas assuré en cas de sous-pression.



LIII. — Équilibre au glissement transversal.

On met de côté la résistance résultant de l'adhérence de la

base de la digue avec le sol de fondation et on suppose que le frottement s'oppose seul au glissement.

Dans ces conditions, appelant :

P , le poids d'une tranche de barrage;

f , le coefficient de frottement;

Q , la poussée de l'eau;

l'équation d'équilibre au glissement, quand il n'y a pas de sous-pression, est la suivante (*fig. 27*) :

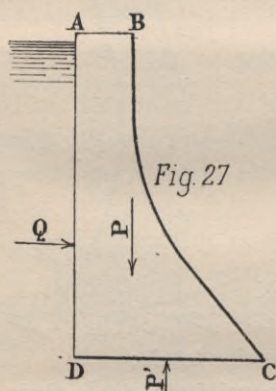
$$Pf > Q;$$

ou

$$(2) \quad f > \frac{Q}{P}.$$

Avec une sous-pression P' , cette expression devient (*fig. 27*) :

$$(3) \quad f > \frac{Q}{P - P'}.$$



On admet généralement que le coefficient f , quand il n'y a pas de sous-pression, ne doit pas dépasser 0,70.

Avec une sous-pression, il devrait être encore inférieur à ce chiffre, car l'eau d'infiltration forme lubrifiant.

Or, dans la digue de Bouzey, le coefficient f , sans sous-pression, est égal à 0,806, pour une densité de la maçonnerie estimée à 2000^{kg}.

L'équilibre n'était donc pas assuré, même sans sous-pression; à plus forte raison avec la sous-pression constatée.

LIV. — Résumé du § 22.

Il résulte de nos calculs :

1° Qu'au point de vue de la stabilité au renversement,

LVI. — *Méthode usuelle.*

Présentée par nous, à l'annexe n° 3 (VI^e partie), d'une façon simple et rationnelle, la méthode nouvelle (loi du trapèze) se résume de la façon suivante :

Soient, *figure 28* :

ABCD, une tranche de barrage, de 1^m de longueur ;

MN, une section horizontale quelconque ;

P, le poids de la tranche située au-dessus de MN ;

Q, la poussée de l'eau sur la partie AM.

Prolongeons la force Q en EF, en portant successivement :

$$EF = Q ;$$

$$EH = P .$$

Le parallélogramme EFGH nous donne la direction, EG, de la résultante des forces P et Q, intéressant la section MN ; laquelle direction coupe MN au point I.

Transportons la résultante EG au point I (*fig. 29*), en supprimant la partie supérieure du barrage ; et décomposons cette résultante en :

a) Une force horizontale, Q ;

b) Une force verticale, P.

La méthode usuelle consiste à calculer la section MN comme soumise séparément aux forces Q et P.

a) *Poussée Q.* — Le frottement est considéré comme intervenant seul dans la résistance à cette poussée.

L'équilibre exige que l'on ait :

$$(2) \quad f > \frac{Q}{P} ;$$

et il est admis que f ne doit pas dépasser 0,70 à 0,75.

A Bouzey, il variait, du sommet à la base, de 0 à 0,806. Il était donc un peu fort, dans la partie inférieure du barrage.

b) *Charge verticale P.* — Traitée comme il est dit à l'annexe 3 (VI^e partie), cette charge a donné, pour la digue de Bouzey :

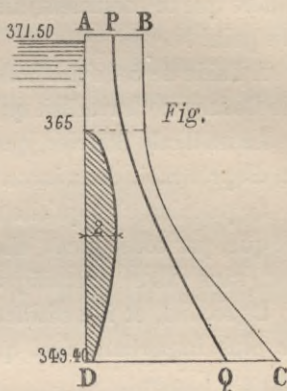
Des compressions à l'aval ne dépassant pas $5^k,600$ (le maximum admis est 6^k pour les bons matériaux);

Des compressions à l'amont, entre le sommet et la cote 365;

Des tensions dans cette région, au-dessous de 365; tensions atteignant $1^k,500$ vers la cote 358 (partie hachurée de la *figure 30*).

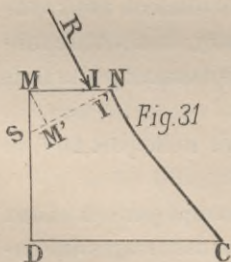
Cela tenait à ce que la courbe des pressions (*annexe n° 3*) sortait du tiers médian des sections horizontales, à partir de la cote 365 (*fig. 30*).

Si l'on avait employé la méthode usuelle, on se fût donc renseigné sur l'existence des tensions à l'amont; tensions toujours dangereuse dans un ouvrage contenant de l'eau; et dont l'importance, dans l'espèce, était hors de proportion avec la faculté de résistance des matériaux constitutifs du barrage.



LVII. — Méthode de M. Bouvier.

Au lieu de décomposer la résultante R en deux forces P et Q ,



M. Bouvier l'applique telle qu'elle au point I ; et il cherche, de la façon suivante, l'action oblique de cette résultante sur l'extrémité aval, N , de la section considérée MN (*fig. 31*).

M. Bouvier abaisse NS , perpendiculaire à R ; il prolonge R en II' ; et il mène MM' , parallèle à II' .

Il suppose ensuite :

a) Que la résultante R est appliquée au point I' , de la section oblique NMS ;

b) Qu'elle intéresse seulement la partie NM' de la section oblique considérée.

Appliquant alors, à cette partie de section, la formule de la méthode usuelle donnant le coefficient de travail en N, il considère que ce coefficient, ainsi obtenu, indique le travail oblique du point N.

A l'aide de cette méthode, on a trouvé que l'aval de la digue de Bouzey ne travaillait qu'à des coefficients inférieurs à 10^{kg}.

La méthode Bouvier, que je viens de décrire sommairement, a, d'après moi, deux inconvénients graves :

Le premier, c'est qu'elle ne repose sur aucune théorie admise, et que, par conséquent, elle constitue un simple artifice de calcul, sans valeur scientifique ;

Le second, et il a malheureusement constitué pour Bouzey le plus important, c'est qu'il ne renseigne pas sur ce qui se passe à l'amont.

On peut, il est vrai, se rendre compte de cela à l'aide de la courbe des pressions (*annexe n° 3*) ; mais, ainsi que nous le verrons par la suite, on ne l'a pas fait à Bouzey.

LVIII. — *Calculs des ingénieurs de 1876, pour la digue de Bouzey.*

Dans les projets de 1876, les ingénieurs disaient avoir employé, pour les calculs du barrage de Bouzey, la nouvelle méthode de M. Bouvier, donnant des résultats beaucoup plus forts que la méthode ordinaire.

La pression trouvée à l'aval ne dépassait nulle part 10^{kg}, ce qui leur permettait de dire :

« 1° Résultat rassurant, puisque nous employons la chaux du Theil au même dosage que dans les grands barrages de l'Ar-dèche et de la Haute-Loire, et que les moellons de grès bigarré ont une résistance de 300 à 600^{kg}.

» 2° On eût pu aller jusqu'à 14^{kg}, comme à Ternay ; mais

l'économie n'eût pas été très considérable, car celle-ci ne s'accuse sérieusement que dans les barrages très élevés.

» 3^o D'ailleurs, avec cette réduction de coefficient à 10^{kg}, on aura l'avantage d'exhausser plus tard, si besoin est, le niveau de la retenue de 1^m, sans que la pression dépasse 14^{kg}. »

Aucune observation n'a été présentée au sujet des tensions de l'amont, dont on ne s'est préoccupé, ni dans les calculs de 1876, ni dans ceux qui ont précédé la restauration de 1888-1889.

LIX. — *Observations de MM. Lévy et réponses de M. Langlois.*

Première observation. — En se basant sur des observations que j'ai combattues à l'article « Mortier », M. M. Lévy estime :

a) Que le coefficient de travail à la traction du mortier, dans la digue, était de 11^{kg},400; en partant de 4^{kg},649, chiffre des éprouvettes de neuf mois;

b) Que le coefficient 1^{kg},500, trouvé pour certaine région centrale de l'amont, n'était que le $\frac{1}{7,6}$ de 11^{kg},400, proportion absolument normale.

Il en conclut que la traction de 1^{kg},500 n'avait rien d'excessif.

Première réponse. — D'abord, et pour les raisons développées par moi au § 14, je récusé catégoriquement le chiffre de 11^{kg},400 donné par M. Lévy.

Ensuite, ce coefficient fût-il exact, 1^{kg},500 serait encore trop fort, et voici pourquoi :

Avec le fer, on prend généralement le 1/6 du coefficient de rupture.

Or, le fer travaille dans les mêmes conditions : quand il est assemblé dans un ouvrage quelconque et lorsqu'on l'essaie en éprouvettes;

Ce métal est homogène, bien connu des praticiens;

Les méthodes de calcul ont pu être vérifiées par de nombreuses expériences.

Tandis que les maçonneries n'ont jamais un coefficient pratique égal au coefficient des éprouvettes ;

Elles sont essentiellement hétérogènes ;

Enfin, les méthodes de calcul qu'on leur applique sont loin d'avoir été vérifiées par des essais suffisamment concluants.

Pour toutes ces raisons, il est indispensable, si on se résout à faire subir des tensions à des maçonneries contenant de l'eau, de ne donner aux coefficients de traction qu'une très faible portion des coefficients constatés dans les éprouvettes.

Donc, dans tous les cas, le rapport $\frac{1}{7,6}$ serait beaucoup trop considérable.

Il va sans dire que si l'on veut bien admettre le chiffre de $3^{\text{kg}},500$, déduit de mes appréciations, le rapport donne $\frac{1,5}{3,5} = \frac{1}{2,33}$, c'est-à-dire une proportion absolument inacceptable.

Deuxième observation. — M. M. Lévy fait remarquer qu'au barrage exhaussé de Ternay, le coefficient atteint presque $4^{\text{kg}},900$. Il est donc supérieur au coefficient de Bouzey, ce qui explique et justifie ce dernier.

Deuxième réponse. — Le barrage de Ternay a été construit avec des matériaux de premier choix : moellons de granit et excellent mortier. Tel n'était pas, malheureusement, le cas du barrage de Bouzey.

De plus, la digue de Ternay est courbe, avec une corde de 163^{m} ; et, dans ces conditions, elle ne se fatigue pas comme l'indique le calcul, puisque, avec les méthodes actuelles, on considère l'ouvrage comme droit. Au lieu de $4^{\text{kg}},900$ de traction à l'amont, le calcul rigoureux indiquerait peut-être des compressions.

Pour ces deux raisons, l'observation relative au barrage de Ternay ne se trouve pas justifiée.

LX. — *Résumé du § 23.*

Le profil du barrage de Bouzey était beaucoup trop maigre ; surtout si on considère sa forme rectiligne de 520^m en couronne et la médiocre qualité de ses matériaux constitutifs.

Comparé, par M. Denys, à vingt-cinq barrages existant en France et à l'étranger, il a été reconnu le plus faible de tous ; et, dans certains cas, la surface de sa section transversale n'égalait pas la moitié de la partie correspondante des sections sur lesquelles on l'appliquait.

Il est résulté de cette gracilité du profil des tensions importantes à l'amont, dont on ne s'est jamais ni préoccupé, ni même occupé.

La courbe des pressions, trouvée par les ingénieurs, eût dû pourtant les éclairer sur ce point ; car, à défaut des renseignements fournis par la méthode ordinaire de calcul, malheureusement mise de côté, la théorie ancienne du noyau central (Bresse, 2^e édition, 1866) présentait comme corollaire le principe du tiers médian.

Les tensions de l'amont, se combinant avec les efforts k et k' (dilatation et picotage), ont permis l'ouverture des joints de l'amont ; ce qui, ainsi que nous le verrons plus loin, a finalement amené la rupture.

DEUXIÈME PARTIE

Première mise en service du réservoir
et accident de 1884.

CHAPITRE VIII

Subdivisions de la deuxième partie.

§ 24. — EXPOSÉ.

LXI. — *Dans cette seconde partie, nous examinerons successivement :*

- 1° La construction du barrage;
- 2° Sa mise en service après achèvement;
- 3° L'accident de 1884.

CHAPITRE IX

Construction du barrage.

§ 25. — HISTORIQUE.

LXII. — *Construction à la retenue provisoire, 369,50.*

Projeté dans les conditions exposées (première partie), le barrage de Bouzey fut exécuté dans les années 1879-80; mais les travaux furent malheureusement scindés par un hiver assez rigoureux.

Au printemps de 1880, on prit bien la précaution de dégrader les lits supérieurs de l'ancienne maçonnerie, avant d'y souder la nouvelle; mais il paraît établi que cette jonction ne s'opéra pas d'une façon parfaite.

La grande cassure de 1893 se trouve, en effet, juste à la cote de suture de 1880.

Or, cette cote, 361,50, ne correspond pas au point de plus grande fatigue de la digue, lequel se trouvait 3^m,50 plus bas (358).

La reprise des maçonneries ne s'est donc pas effectuée d'une façon convenable, malgré les précautions prises.

LXIII. — *Exhaussement du barrage à sa retenue définitive,*
374,50.

Ainsi que nous l'avons exposé succinctement à l'avant-propos, l'exhaussement de la digue, à sa hauteur définitive, fut décidé après une visite sur les lieux de M. Varroy, ingénieur des Ponts et Chaussées, alors ministre des Travaux publics.

Lors de cette visite, le ministre engagea les ingénieurs à faire de suite un rapport sur la question de l'exhaussement immédiat.

Après examen de ce rapport, le Conseil émit l'avis qu'il n'y avait pas lieu de donner suite à la proposition qu'il contenait, les besoins du canal ne l'exigeant pas.

M. Varroy, appréciant la chose au point de vue de l'économie qui en résulterait par suite de l'utilisation des chantiers installés, passa outre et ordonna l'exhaussement immédiat.

Or, le Conseil général des Ponts et Chaussées, à la suite du rapport de la Commission d'enquête administrative, considère que l'exhaussement du barrage a été une des causes principales de la catastrophe de 1893; et, par suite, tend à en faire retomber la responsabilité sur M. Varroy.

Cela pourrait être admis si le Conseil, dans son avis, avait invoqué la question de sécurité. Or, il en est tout autrement; et M. Varroy n'a pas outrepassé ses droits et a même montré un grand sens administratif en ordonnant, par mesure d'économie, la construction à sa cote définitive d'un ouvrage que rien ne lui indiquait comme devant subir un essai préalable de résistance.

CHAPITRE X

Mise en service du barrage après achèvement.

§ 26. — HISTORIQUE.

LXIV. — *Exposé.*

Terminé à la fin de 1880, le réservoir fut mis en service à la fin de 1881; mais, pendant deux ans, il ne reçut que les eaux du bassin de l'Avière, et le niveau n'atteignit même pas la cote 365 (Volume maximum : 1.400.000^{m³}).

Durant cette période transitoire, on fit les constatations suivantes :

LXV. — *Fissures de température.*

A la fin de 1882, deux fissures se déclarèrent aux points 221, 303, et on les attribua, ainsi qu'il a été dit, aux contractions des maçonneries par le froid.

D'autres fissures survinrent plus tard.

LXVI. — *Fuites à l'aval du barrage.*

Dès les premiers mois de 1882, l'eau étant à la cote 362, des fuites furent constatées à l'aval; et elles allèrent en augmentant à mesure que l'eau montait dans le réservoir.

On constata :

A la cote 362, des fuites évaluées à 56^l par seconde;

A la cote 363, des fuites évaluées à 60^l;

A la cote 364, des fuites évaluées à 65^l.

LXVII. — *Arrivée de l'eau par la rigole de Remiremont.*

Le 4 décembre 1883, le niveau de l'eau n'étant qu'à la cote 364,90, l'eau de la Moselle pénétra dans le réservoir, qui entra dès lors dans sa période d'exploitation normale.

L'eau monta rapidement aux cotes 366, 367, 368; et on

constata, non sans satisfaction, que les fuites de l'aval ne progressaient pas comme elles l'avaient fait craindre pendant la période transitoire de 1881 à 1883.

En mars 1884, l'eau ayant dépassé la cote 368, ces fuites ne se chiffraient que par 70^l par seconde environ.

CHAPITRE XI

Accident de 1884.

§ 27. — HISTORIQUE DE L'ACCIDENT DE 1884.

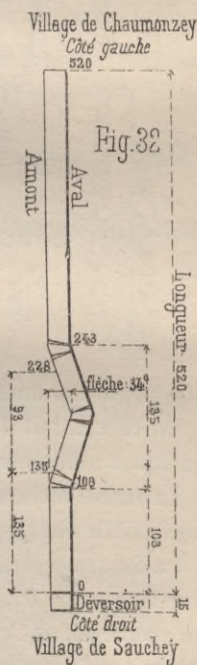
LXVIII. — Exposé.

Le 14 mars 1884, vers midi, l'eau atteignant la cote 368,80, à 2,70 en contre-bas de la retenue maxima, on aperçut, à quelques mètres de l'aval, des jaillissements d'eau assez importants, lesquels prirent, vers minuit, une teinte louche très accentuée.

A ce moment, un véritable jet d'eau, de 0^m,15 de diamètre environ, surgit tout à coup à 5 ou 6^m de la digue.

De 70^l, les fuites passèrent brusquement à 232^l; et le lendemain matin, 15 mars, on constata que la digue s'était avancée vers l'aval, entre les points 108 et 243, sur une longueur de 135^m environ (fig. 32).

La flèche maxima fut appréciée à 0^m,34 environ; et on s'aperçut que trois groupes de fissures nouvelles s'étaient formées au centre et aux extrémités de l'inflexion: les premières, plus ouvertes à l'aval qu'à l'amont; les secondes, plus ouvertes à l'amont qu'à l'aval.



On ne vida pas le réservoir, et on y laissa même monter l'eau à 0^m,20 en contre-haut de la cote 368,80.

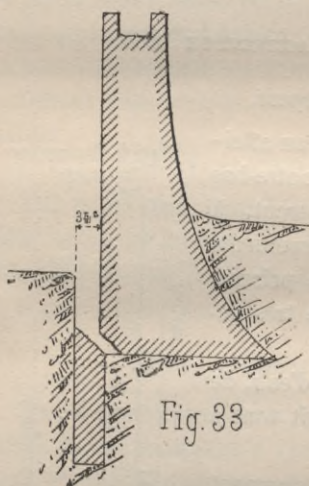
§ 28. — SONDAGES DE RECONNAISSANCE.

LXIX. — *Historique des sondages.*

MM. Denys et Hausser (qui avaient succédé à MM. Pugnière et Cahen) proposèrent à l'Administration supérieure d'exécuter un sondage, à l'aval de la digue, afin de reconnaître les effets du mouvement sur le terrain de fondation.

Décidé en novembre 1884, ce sondage fut exécuté en 1885 et fournit sur la nature du terrain des révélations singulières.

Alternance irrégulière : de roches très dures, ne pouvant s'enlever qu'au pic; de roches plus tendres, se détachant à la pioche; de parties tout à fait tendres, que l'on prenait à la truelle. Dans quelques bancs, les déblais se transformaient, sous la simple pression des



doigts, en une farine siliceuse.

On rencontrait des poches d'argile, de forme lenticulaire, de quelques millimètres d'épaisseur.

La masse rocheuse paraissait comme broyée par une poussée horizontale énergique.

La fissure centrale de l'inflexion avait, au pied de la digue, une largeur de 0^m,33; et au-dessous, dans le sol de fondation, on apercevait une crevasse de 0^m,40 de largeur, dans laquelle on pouvait enfoncer une tringle de 4^m de longueur.

Une source de 60^l environ sortait de cette crevasse.

En présence de ces constatations, les ingénieurs demandèrent l'autorisation de vider le réservoir et d'exécuter un sondage d'amont, pour reconnaître les effets du mouvement sur le mur de garde.

Ces propositions furent adoptées, et ce sondage d'amont fut terminé fin février 1887, en même temps qu'un autre sondage traversant le sol, sous la digue.

Le sondage d'amont montra que le barrage s'était séparé du mur de garde entre les points 135, 228, sur 93^m de longueur (*fig. 32*); la rupture ayant la forme de la *figure 33*.

§ 29. — CAUSES DU MOUVEMENT DE 1884.

LXX. — *Opinion de MM. Denys et Hausser.*

Ces ingénieurs estiment que :

« L'eau a contourné le mur de garde et exercé sous la digue une sous-pression énergique, tendant à soulever le mur et à diminuer la cohésion déjà faible du sous-sol.

» La poussée horizontale est devenue prépondérante et toute la masse s'est avancée parallèlement à elle-même. »

La cause du mouvement est donc la diminution du poids adhérent, par le fait de la sous-pression.

LXXI. — *Opinion de la Commission spéciale de 1887.*

Identique à celle des ingénieurs.

LXXII. — *Opinion de M. Dupuy, inspecteur général de la IV^e division, en 1888.*

La même que celle des ingénieurs.

LXXIII. — *Opinion de mes collègues.*

Dans leur rapport, MM. Brüll et Fleury nient que la sous-pression ait pour effet de diminuer le poids adhérent, « c'est-à-dire, disent-ils, la charge que le mur impose au terrain.

» En somme, si un mur de poids P repose sur le sol et qu'il

se produise une sous-pression p , le poids du mur devient bien $P - p$, mais la charge du terrain se compose :

- » Du nouveau poids $P - p$ du mur;
- » Plus de la pression p de l'eau, qui rend au terrain ce qu'elle reçoit du mur.

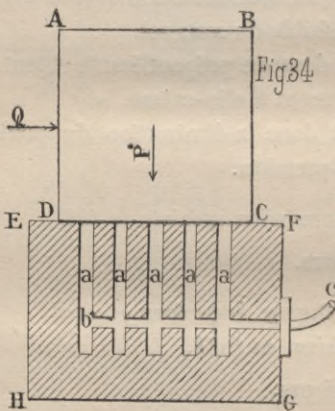
» La charge du terrain reste donc :

$$P = P - p + p. »$$

En conséquence, mes collègues cherchent une autre cause au mouvement de 1884, et pensent l'avoir trouvée dans la diminution du coefficient de frottement de la base sur le sol, par suite des lubrifiants argileux entraînés par l'eau d'infiltration.

LXXIV. — *Mon opinion personnelle.*

En présence de cette divergence de vues, j'ai cherché une solution personnelle de la question, solution que je puis résumer comme suit :



Les causes du mouvement de 1884 sont :

- a) La diminution du poids adhérent;
- b) La distribution différente des forces sur la base d'appui.

Je vais étudier séparément ces deux points.

- a) La première cause du mouvement de 1884 a été la diminution du poids adhérent.

Figure 34, considérons un

corps ABCD, reposant sur un socle en fonte EFGH, dans lequel sont ménagés une série de petits canaux a , débouchant à la surface EF, sans traverser la masse de l'appui.

Réunissons ces canaux par un conduit b , communiquant avec le refoulement c d'une presse hydraulique.

Supposons d'abord que l'eau n'ait pas encore été envoyée dans les conduits a .

Le corps ABCD porte sur la base de tout son poids P , lequel est alors le poids adhérent, c'est-à-dire celui produisant frottement entre les parties solides en contact.

De sorte que, si l'on désigne par :

f , le coefficient de frottement;

Q , une poussée horizontale exercée sur le corps ABCD la condition d'équilibre est la suivante :

$$(4) \quad Q \leq fP.$$

Mettons maintenant la pression dans les tuyaux a , en admettant d'abord que le contact en CD assure parfaitement les joints.

Appelons P' la sous-pression totale exercée par l'eau sous le bloc ABCD.

L'eau ne pouvant s'infiltrer entre les surfaces en contact, le coefficient f reste le même; et, comme le poids qui appuie le corps ABCD sur sa base CD (poids adhérent) est devenu $P - P'$, l'équation (4) s'écrit :

$$(5) \quad Q \leq f(P - P').$$

Enfin, si l'eau peut lubrifier les surfaces en contact, le coefficient devient $f' < f$; et l'expression (5) se transforme comme suit :

$$(6) \quad Q \leq f'(P - P').$$

La comparaison entre ces trois équations montre que la force Q doit être plus faible dans la seconde que dans la première, dans la troisième que dans la seconde.

Le corps ABCD pourra donc glisser plus facilement sur sa base dans les deux derniers cas que dans le premier.

Cela tient :

Pour l'équation (5), à la diminution du poids adhérent, devenu $P - P'$;

Pour l'équation (6), aux diminutions du poids adhérent et du coefficient de frottement.

En résumé, une sous-pression P' transforme le mode d'action du poids P sur son support; en transportant la partie P' au fond des canaux a , absolument comme le feraient des ressorts à boudin appuyés au fond de ces canaux et exerçant un effort P' sous la base CD.

Ceci posé, il nous reste à établir que les choses se passaient de la même façon sous la digue de Bouzey.

La base de cet ouvrage reposait sur un terrain perméable, entre les molécules duquel existaient des intervalles plus ou moins considérables.

Une suite d'intervalles de ce genre constituait un conduit analogue aux canaux a dont nous avons parlé tout à l'heure, mais ayant une forme contournée.

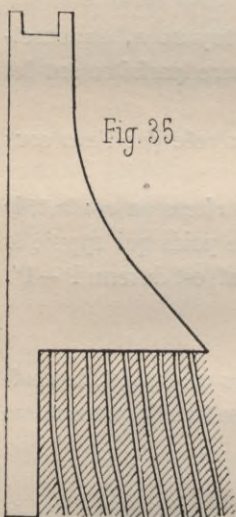
L'ensemble de ces conduits est indiqué *figure 35*; avec, toutefois, une régularité qui n'existait pas réellement.

L'eau d'infiltration s'introduisait dans ces conduits et exerçait une sous-pression sous la digue, absolument comme l'eau de la presse hydraulique sous la base CD, du corps ABCD (*fig. 34*).

Cette sous-pression trouvait son appui dans les couches profondes et imperméables du sous-sol, absolument comme celle fournie par la presse hydraulique trouvait le sien au fond des canaux a .

Comme, de plus, l'eau d'infiltration entraînait avec elle des lubrifiants argileux, et que le contact de la base avec le sol ne fournissait pas un joint parfait, il y avait diminution du coefficient de frottement.

L'équation d'équilibre était donc l'expression (6), la plus faible de toutes celles auxquelles a conduit l'étude précédente.



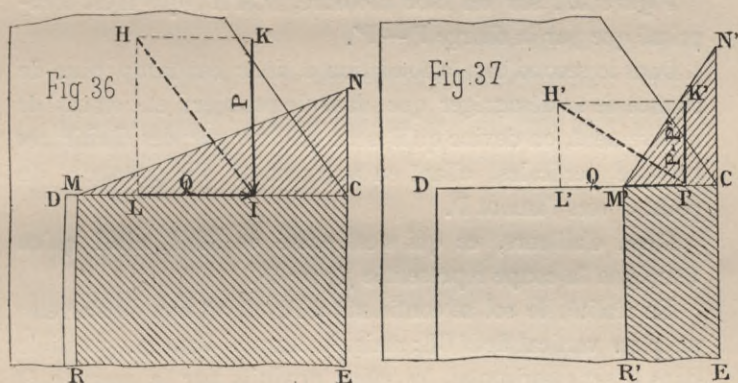
Nous pouvons donc conclure, comme les ingénieurs, que le mouvement de 1884 a eu pour cause première la diminution du poids adhérent, par le fait de la sous-pression.

b) La seconde cause du mouvement de 1884 a été un changement fâcheux dans la distribution des forces sur la base.

Soient les figures 36 et 37, représentant le pied de la digue.

Supposons que le sol, au lieu de se prolonger vers l'aval, soit arrêté par un plan vertical CE, mené par l'arrête aval C.

Figure 36, traçons la résultante HI des forces normales P et Q, intéressant la base CD; et figure 37, la résultante H'I' des forces



P, Q et P', quand il y a une sous-pression.

Décomposons ces résultantes en deux autres :

Figure 36 : KI = P, appliquée en I; LI = Q;

Figure 37 : K'I' = P - P', agissant en I'; L'I' = Q.

Portons :

Figure 36 : CM = 3 × CI;

Figure 37 : CM' = 3 × C'I'.

Les forces KI = P, K'I' = P - P', attaquent la base CD sur les longueurs CM, CM'; et le travail de compression de ces régions est représenté par les ordonnées des droites MN, M'N'.

Le bloc parallépipédique que nous supposons constituer la fondation est donc, dans les deux cas, attaqué par une poussée horizontale constante Q ; tandis qu'il est comprimé :

Figure 36, par un poids P , que l'on pourrait représenter par le triangle CMN ;

Figure 37, par un poids $P - P'$, que figurerait très bien le triangle $CM'N'$.

La poussée Q agit donc :

Figure 36, sur un bloc de fondation $ECMR$, très pressé verticalement par le poids P ;

Figure 37, sur un bloc moindre, $ECM'R'$, qui n'est comprimé que par la charge $P - P'$.

Dans le second cas, la fondation a donc beaucoup plus de chance de se désagréger que dans le premier; et, en cas de mouvement, on devine qu'il sera produit par des déchirures presque verticales, allant en augmentant d'importance, du point C vers l'amont D .

C'est, d'ailleurs, ce qui s'est passé en 1884, ainsi qu'en témoigne la coupe représentée *figure 38*.

En réalité, le sol se continuait à l'aval, au lieu de s'arrêter au plan vertical fictif CE ; mais, le terrain étant compressible dans le sens horizontal, les effets produits par la poussée Q ont été analogues à ceux que fait prévoir le raisonnement ci-dessus.

La distribution des charges sur la base a donc été une seconde cause du mouvement de 1884, et je ne suis pas éloigné de croire que cette seconde cause a eu plus d'importance que la première.

§ 30. — CAUSE DE L'ARRÊT DU MUR.

LXXV. — *Opinion des ingénieurs.*

MM. Denys et Hausser estiment que le mur s'est arrêté quand la sous-pression est venue à diminuer, ce qui a augmenté la valeur du poids adhérent.

La dislocation du sol d'aval avait, en effet, ouvert des voies à l'écoulement des eaux d'infiltration, ainsi qu'en témoignait l'augmentation énorme des fuites.

LXXVI. — *Opinion de M. Dupuy.*

Cet inspecteur général croit que le mouvement s'est arrêté par suite du tassement des roches broyées contre un bloc d'aval plus résistant.

LXXVII. — *Opinion de mes collègues.*

MM. Brüll et Fleury apprécient que l'augmentation du coefficient de frottement a été la cause de l'arrêt.

LXXVIII. — *Mon opinion personnelle.*

Elle participe de celle des ingénieurs et de celle de M. Dupuy.

Je pense, en effet, que les arrêts successifs qui se sont produits pendant le mouvement des 14 et 15 mars 1884, ont eu pour cause une diminution de la sous-pression, par le fait de l'augmentation des fuites d'aval; mais que l'arrêt définitif a été fourni par le tassement du terrain d'aval.

§ 31. — MANIÈRE DONT S'EST EFFECTUÉ LE MOUVEMENT DE 1884.

LXXIX. — *Opinion des ingénieurs.*

MM. Denys et Hausser disent qu'il n'y a pas eu glissement de la base du mur sur le sol de fondation, ni glissement des feuillettes du terrain les uns sur les autres.

D'après eux, tout le système a marché parallèlement, en comprimant les roches d'aval.

LXXX. — *Mon opinion personnelle.*

Prenons une des coupes sous la digue, établies par MM. Denys et Hausser eux-mêmes, lors de leurs sondages d'exploration; et reproduisons-la (*fig. 38*) dans ses parties essentielles.

Nous faisons successivement les constatations suivantes :

1° L'arête D de la base est venue en D', tandis que le même point du terrain de fondation s'est arrêté en D". La base du mur a donc glissé, sur la partie amont du sol d'appui, d'une quantité D"D'.

2° Les points *a, b, c, d*, des feuillettes supérieures du terrain, sont venus respectivement en *a', b', c', d'*. Il y a donc eu glissement des feuillettes du terrain les uns sur les autres.

§ 32. — EFFETS DU MOUVEMENT DE 1884 SUR LA MAÇONNERIE DE LA DIGUE.

LXXXI. — *Exposé.*

Les fissures représentées *figure 32*, causées par la flexion transversale, indiquent que les tensions ont atteint le coefficient de rupture, au centre et aux extrémités de la partie infléchie.

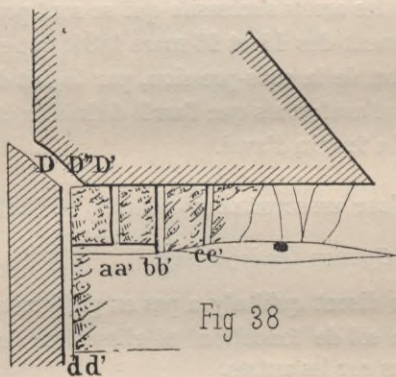


Fig 38

Il y a eu aussi des compressions importantes, comme dans toute flexion; ainsi, d'ailleurs, que des efforts tranchants longitudinaux, analogues à ceux *k* et *k'*, de la dilatation.

Ces effets ne se sont pas localisés simplement dans la partie infléchie, et ils ont eu leur répercussion dans la région restée intacte.

Le mouvement de 1884 a donc produit, en résumé, un affaiblissement permanent du barrage; et, par suite, n'a pas été étranger à l'accident du 27 avril 1895.

TROISIÈME PARTIE

Restauration du barrage après l'accident de 1884.

CHAPITRE XII

Subdivisions de la troisième partie.

§ 33. — EXPOSÉ.

LXXXII. — *Dans cette troisième partie, nous présenterons successivement :*

- 1° L'historique de la restauration du barrage;
- 2° L'examen critique de ce travail.

CHAPITRE XIII

Historique de la restauration du barrage.

§ 34. — EXPOSÉ.

LXXXIII. — *Rapport des ingénieurs, des 26, 28 avril 1887.*

Dans ce volumineux document, MM. Denys et Hausser présentaient :

- a) L'historique de la construction et de l'exploitation du réservoir;
- b) La description des sondages d'exploration, après l'accident de 1884;
- c) Différents projets de consolidation.

Les ingénieurs avaient établi, par des calculs et des tracés graphiques :

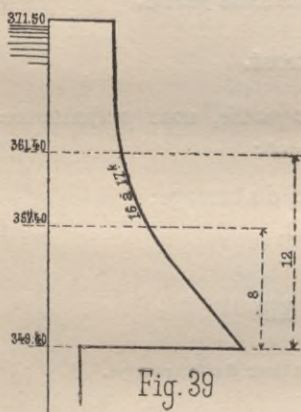
1° Qu'avec ou sans sous-pression, le coefficient de compression à l'aval atteignait une valeur de 16 à 17^{kg} aux hauteurs

comprises entre 8 à 12^m, au-dessus de la base (soit entre les cotes 357,40 et 361,40, *fig. 39*);

2° Que sans sous-pression, l'arête aval de la base travaillait à 11^{kg}, avec une résultante inclinée à 50° sur l'horizon;

3° Qu'avec sous-pression, la résultante ne faisait plus qu'un angle de 12° et elle sortait complètement de la base.

En conséquence, les différents projets présentés renfermaient tous un remblai d'aval (*fig. 40*), destiné :



- d) A une consolidation du corps de la digue;
- e) Au redressement de la résultante sur la base.

LXXXIV. — *Rapport de M. l'inspecteur général Gauckler, du 5 juillet 1887.*

M. Gauckler critiquait le remblai d'aval, qui masquerait la maçonnerie, et proposait d'épauler la digue par des contreforts, comme à Grosbois et à Chazilly.

LXXXV. — *Commission de 1887.*

En présence de cette divergence de vues, le Conseil général nomma, pour examiner la question, une Commission de cinq membres qui se rendit presque immédiatement à Bouzey.

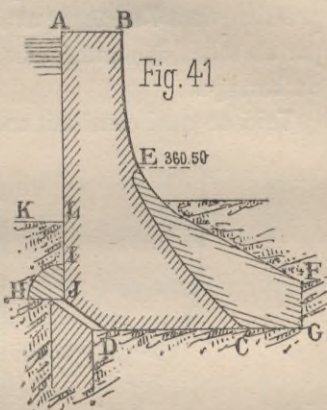
LXXXVI. — *Rapport de la Commission de 1887.*

Le 22 décembre 1887, cette Commission déposait un volumineux rapport, dans lequel elle critiquait le remblai de MM. Denys et Hausser et les contreforts de M. Gauckler.

La majorité de la Commission proposait les moyens de consolidation suivants :

1° Le pied de la digue sera renforcé par un fort massif de buttée, EFGC, s'appuyant sur la roche mise à vif et convenablement drainé (*fig. 41*);

2° Un solin, HIJ, sera établi à l'amont, pour masquer la cassure du mur de garde; et ce solin sera lui-même recouvert d'un remblai, KL, d'argile corroyée, de 3^m de hauteur.

LXXXVII. — *Avis du Conseil et décision ministérielle.*

Le Conseil général approuva les propositions de sa Commission et le ministre notifia cette décision aux ingénieurs, en les invitant à refaire une nouvelle étude dans ce sens.

LXXXVIII. — *Rapport des 28 et 30 mars 1887, de MM. Denys et Hausser.*

M. Hausser établit un projet dans le sens indiqué; et il le présenta, dans un rapport du 28 mars.

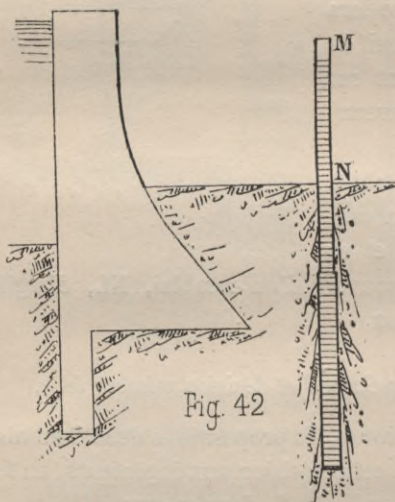
Dans son avis du 30 mars, M. Denys commença par calculer le massif nouveau, ABFGD, en supposant que l'ensemble constituait un tout analogue à ce qu'il aurait été si le profil avait été construit d'un seul jet.

Il fit voir que :

1° Même sans sous-pression, la résultante restait inclinée à 52° sur la base, ce qui était beaucoup, puisque, dans quinze barrages français, l'inclinaison analogue varie entre 59° et 78° .

2° L'inclinaison est bien plus accentuée encore avec la sous-pression, dont l'existence avait été révélée d'une façon précise par un tube, dénommé tube piézométrique, installé à l'aval du barrage.

Voici en quoi consistait cet appareil d'observation :



Préoccupé de renforcer la digue par des contre-forts, M. Gauckler avait invité les ingénieurs à jeter des coups de sonde pour reconnaître le terrain jusqu'à une grande profondeur.

En exécutant ce travail, on s'aperçut que l'eau jaillissait par un des trous de sondage.

On ajouta, au-dessus du sol, un tube MN, et on constata alors que le niveau de l'eau, dans ce

tube, montait et descendait, avec une certaine perte de charge, en même temps que le niveau de l'eau dans le réservoir (fig. 42).

La sous-pression se trouvait alors matériellement démontrée, et les constatations faites à ce tube piézométrique permirent de l'apprécier aux 0,80 de la sous-pression totale.

Introduisant cette sous-pression dans ses calculs, M. l'ingénieur en chef montra que la résultante s'inclinait à 30° , et que l'arête aval du mur de renforcement travaillait à 23^{kg} .

Aussi, concluait-il à la conservation du remblai d'aval de ses avant-projets primitifs.

LXXXIX. — *Rapport du 25 mai 1888, de M. l'inspecteur général Dupuy.*

M. Dupuy, qui avait succédé à M. Gauckler dans la IV^e division, fut frappé par l'exposé de M. Denys.

Il proposa, en conséquence :

1^o De donner plus d'ampleur au mur de renforcement (*fig. 43*) ;

2^o De le souder au mur primitif par voie d'arrachements exécutés parallèlement et normalement à l'ancienne surface aval de la digue ;

3^o D'appuyer ce mur de renforcement à un fort sommier en maçonnerie, présentant 5 à 6^m de hauteur verticale d'appui contre le terrain d'aval ;

4^o De débarrasser la base de la digue de l'eau d'infiltration par un système de dalots et de puisarts ;

Le solin et le corroi d'argile de l'amont étant, d'ailleurs, conservés.

Ceci établi, M. Dupuy déclara qu'on pourrait se dispenser, au moins momentanément, d'établir un remblai d'aval, lequel coûterait 160.000 francs et masquerait la maçonnerie.

XC. — *Avis du Conseil et décision ministérielle.*

Le Conseil général émit un avis conforme aux conclusions de M. Dupuy, et la décision ministérielle enjoignit aux ingénieurs d'avoir à présenter, dans un délai de quinze jours, un projet définitif établi dans le sens indiqué.

XCI. — *Construction du mur de renforcement.*

MM. Denys et Hausser obéirent aux instructions ministérielles ; et, dans le rapport accompagnant le projet définitif M. Denys s'exprimait ainsi :

« Les dispositions sont entièrement conformes à celles qui ont été présentées; nous n'avons donc pas à les justifier. »

Les fouilles d'aval furent exécutées entre le 12 septembre 1888 et le 15 avril 1889. Elles confirmèrent M. Denys sur l'appréciation qu'il avait formulée du terrain de fondation, lors des sondages de reconnaissance; et, le 30 mars 1889, il invitait M. Dupuy à venir se rendre compte par lui-même de la nature du sol.

A la suite de sa visite à Bouzey, M. Dupuy renseigne l'Administration supérieure sur ses constatations; et, après discussion en Conseil, ordre fut donné d'avoir à poursuivre l'exécution du projet approuvé.

On exécuta les maçonneries, du 15 avril au 14 septembre 1889, et le travail fut fait avec le plus grand soin.

Les ingénieurs prirent même la sage précaution de remplacer le médiocre sable de carrière, employé dans la digue primitive, par du sable délavé de Moselle, de bien meilleure qualité.

Ils relièrent le massif de butée à l'ancienne digue en bourrant du mortier pulvérulent entre les redans normaux à la paroi aval (*fig. 43*).

CHAPITRE XIV

Examen critique de la restauration du barrage.

§ 35. — RÔLE DU MUR DE RENFORCEMENT.

XII. — *La hauteur de ce mur était insuffisante.*

En partant de la cote 360,50, on laissait sans soutien :

1° Une partie de l'aval, comprise entre les cotes 360,50 et 361,40 (*fig. 39*), dans laquelle les compressions étaient considérables (16 à 17^{kg} suivant les calculs de M. Denys);

2° Une partie de l'amont, comprise entre les cotes 360,50 et 365 (*fig. 30*), dans laquelle des tensions importantes étaient provoquées par la poussée de l'eau.

En admettant même que le mur ait véritablement renforcé la digue, dans la partie comprise entre la base et la cote 360,50, cet ouvrage supplémentaire était sans action sur la partie moyenne du barrage, qui avait pourtant besoin d'être consolidée.

XCIII. — *Arrachements pratiqués dans la paroi aval de l'ancienne digue.*

Ces arrachements ont eu pour effet de fatiguer la paroi aval de la digue primitive, surtout avec la forme en dents de scie qu'on a été amené à leur donner.

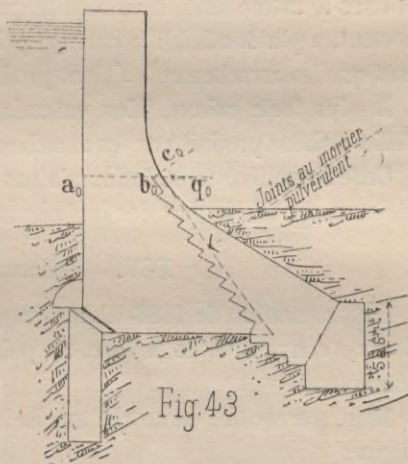
XCIV. — *Le mur, dit de renforcement, a plutôt affaibli la partie intérieure de la digue.*

Il convient d'abord de faire observer que le contrefort n'était pas lié d'une façon intime avec l'ancien mur.

Quand nous avons examiné la brèche, nous avons constaté, en effet :

a) Un décollement de 0^m,02 à 0^m,03 dans la partie brisée du mur de renforcement ;

b) Dans la partie restante, des gonflements formant des espèces de rides sur la surface courbe de l'aval.



Si la liaison avait été réelle, il est certain que ces effets ne se fussent pas produits.

En fait, le mur de renforcement était accolé à l'ancien ouvrage et jouait simplement le rôle d'un étai.

Ceci posé, je me suis demandé quel avait été le rôle véritable de cet étau.

Pour arriver à une solution de cette question importante, j'ai calculé (annexe n° 4, VI^e partie):

1° Les coefficients de travail de la section brisée $a_0b_0c_0$ (fig. 43), en supposant successivement:

- a) Que le mur de renforcement était un étau nul;
- b) Qu'il constituait un soutien aussi parfait que possible.

2° Les coefficients de la section correspondante $a_0b_0q_0$, dans l'ancienne digue.

Le tableau du n° 159 m'a montré alors que, même dans l'hypothèse du soutien parfait, les coefficients de travail étaient plus grands dans la section $a_0b_0c_0$ que dans celle correspondante $a_0b_0q_0$.

Pour les raisons indiquées annexe n° 4, les sections inférieures devaient fournir des différences plus accentuées encore, et dans le même sens. Il en résulte que le mur, dit de renforcement, a plutôt affaibli le barrage primitif, même en admettant que les arrachements n'aient produit aucune détérioration.

A plus forte raison, bien entendu, si on tient compte de l'effet fâcheux produit par les arrachements en question.

Cette singulière constatation n'a pas soulevé de protestation sérieuse, tant de la part des ingénieurs que de M. M. Lévy.

XCV. — *Résumé.*

La restauration de 1888-89 n'a produit, en somme, qu'une fixation convenable de la base, au point de vue du glissement transversal.

Mais, par contre, en ce qui touche la résistance propre de la digue:

1° Le mur supplémentaire a laissé en l'état la moitié supérieure du barrage, dont la région comprise entre les points 360,50 et 363 était d'une faiblesse indiscutable;

2° Ce contrefort a même affaibli l'ancien mur, dans la

partie où il a été établi; et il est regrettable que les auteurs du projet définitif ne s'en soient pas aperçus par un calcul préalable.

Il est bon de remarquer, à ce propos :

a) Que M. Denys, quand il a fait des calculs sur le premier projet de la Commission de 1887, a considéré l'ensemble de l'ancien barrage et du nouveau mur comme formant un tout analogue à ce que l'on eût obtenu en exécutant le nouveau profil en une seule fois;

b) Que la Commission d'enquête administrative de 1895 a commis la même erreur.

En somme, ce procédé de calcul était absolument erroné; et j'ai, je crois, traité la question comme il convenait, avec mes hypothèses d'étaï nul et de soutien parfait.

L'œuvre médiocre que nous venons d'examiner ayant été inspirée par la Commission de 1887 et par M. l'inspecteur général Dupuy, les ingénieurs, MM. Denys et Hausser, sont déchargés de toute responsabilité à ce sujet.

QUATRIÈME PARTIE

Deuxième mise en service du réservoir et accident final.

CHAPITRE XV

Subdivisions de la quatrième partie.

§ 36. — EXPOSÉ.

XCVI. — *Nous allons présenter successivement :*

- 1° L'historique de la deuxième mise en service du réservoir;
- 2° L'examen des mesures de surveillance organisées autour de la digue;

- 3° La critique du remplissage au complet du réservoir;
 4° L'étude de la catastrophe finale.

CHAPITRE XVI

Deuxième mise en service du réservoir de Bouzey.

§ 37. — HISTORIQUE.

XCVII. — *Exposé.*

Après avoir organisé autour de la digue des mesures de surveillance sur lesquelles nous reviendrons au chapitre suivant, on commença le remplissage le 18 novembre 1889, peu de temps après la réception des travaux de consolidation.

Le 17 février 1890, la retenue ayant dépassé la cote 368,80 à laquelle s'était produit le mouvement de 1884, M. Denys informa M. Dupuy des constatations faites à la digue de Bouzey.

M. Dupuy communiqua la lettre de M. Denys à l'Administration, en la faisant suivre d'observations personnelles pouvant se résumer comme suit :

Déplacement maxima du sommet : 0^m,015 ;

Fuites : 70^l environ ;

Situation normale.

M. Dupuy disait :

« Je ne vois pas d'inconvénient à laisser monter les eaux jusqu'à 370 ; mais il me paraît utile d'arrêter alors le remplissage, afin de voir si les mouvements qui ont continué pendant l'opération cessent après l'arrêt. »

En conséquence, on continua le remplissage jusqu'au 10 avril, date à laquelle fut atteinte la cote 370.

On l'y maintint jusqu'au 16, même mois ; et on recommença à monter jusqu'à la cote 371, à laquelle on arriva le 15 mai.

A cette date, un accident survenu à la rigole de Remiremont

interrompt l'alimentation du réservoir; et la cote 371 (0^m,5 en contre-bas de la retenue maxima) fut la plus élevée de l'année 1890.

On atteignit la cote 371,50 les années suivantes; et pendant 53 jours en 1893, durant 167 jours en 1894, on se tint entre les cotes 371 et 371,50.

L'hiver de 1894-95 fut particulièrement long et rigoureux, ce qui se traduisit par un agrandissement très accusé des fissures et une augmentation sérieuse des fuites à travers le barrage.

Enfin, le 27 avril 1895, à 5 h. 45 m. du matin, la cote 371,50 étant sur le point d'être atteinte, la digue se rompaît.

CHAPITRE XVII

Mesures de surveillance de la digue.

§ 38. — DESCRIPTION DES PREMIÈRES MESURES DE SURVEILLANCE.

XCVIII. — *Alignement.*

L'alignement du sommet de la digue fut initialement vérifié à l'aide des deux moyens suivants :

Premier moyen. — Des voyants en tôle galvanisée furent installés sur le parapet aval, et servirent à des vérifications à l'œil nu, exécutées plusieurs fois par jour par le garde Claudon.

Deuxième moyen. — Au point 25 (origine, côté Sanchev), on installa une lunette méridienne prêtée au service local par le laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées

Cette lunette visait une mire fixée au point 325 (près de la tourelle de prise d'eau), et on rapportait les points intermédiaires à cette ligne fictive, ce qui permettait de mesurer la

courbe prise par le sommet de la digue, mais avec une inexactitude résultant de la mobilité du point 325.

Ces constatations furent faites, un jour sur deux, par le conducteur Husser.

XCIX. — *Sous-pression.*

L'importance de la sous-pression était mesurée au tube piézométrique, dont l'installation avait été maintenue dans ce but.

C. — *Fuites de l'aval.*

Elles étaient recueillies dans un canal qui se déversait dans un bassin collecteur.

Au déversoir était installé un appareil enregistreur automatique donnant, d'une façon continue, l'épaisseur de la tranche, ce qui permettait d'apprécier la valeur du débit.

§ 39. — RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS SUR LE RÉGIME
DU RÉSERVOIR.

CI. — *Renseignements fournis par le personnel chargé
de la surveillance du réservoir.*

On adressait à l'ingénieur ordinaire, qui les communiquait à l'ingénieur en chef :

Des rapports quotidiens ;

Des rapports hebdomadaires (du conducteur) ;

Relatant :

La cote de la retenue, à midi ;

La hauteur des vagues ;

L'épaisseur de la glace ;

Les volumes entrés et sortis ;

La hauteur du tube piézométrique ;

Les fuites ;

Et fournissait, en outre, des renseignements relatifs à l'alignement, aux fissures, etc.

CII. — *Renseignements transmis par les ingénieurs à l'Administration supérieure.*

Les renseignements fournis par le service local, au sujet du réservoir de Bouzey, étaient relatés dans :

a) Les comptes moraux, communiqués à l'inspecteur de la division, et qui ont cessé de parler de Bouzey à la fin de 1891, les comptes de la restauration du barrage étant apurés ;

b) Les états de navigabilité, adressés directement à l'Administration supérieure.

Ces documents relataient les renseignements principaux fournis par les rapports journaliers et hebdomadaires ; et l'on y voyait, notamment, la retenue du réservoir, avec rappel de la retenue maxima, 371,50.

L'Administration supérieure a donc été régulièrement renseignée sur le régime imposé au réservoir.

§ 40. — SURVEILLANCE PERSONNELLE DES INGÉNIEURS.

CIII. — *Livres de tournées.*

Dans des registres appelés livres de tournées, l'ingénieur en chef et l'ingénieur ordinaire relataient les visites qu'ils faisaient sur les chantiers et aux ouvrages en exploitation.

Nous avons relevé celles faites à Bouzey, depuis leur nomination à Épinal, par MM. Denys et Hausser, et nous avons constaté :

a) Que, lors des travaux de reconnaissance et lors de la construction du mur de renforcement, le nombre des tournées à Bouzey a été très considérable, ce qui indique une surveillance attentive des travaux en question ;

b) Qu'après la mise en service, le nombre des tournées avait été en diminuant de plus en plus.

J'estime, pour mon compte, que cela est sans importance ; car ce n'est pas la vue du barrage qui eût pu inspirer des craintes salutaires aux ingénieurs.

CIV. — *Observation de MM. Denys et Hausser
et réponse des experts.*

MM. Denys et Hausser ont fait observer que toutes leurs tournées à Bouzey n'ont pas été consignées dans leurs registres, attendu qu'en allant à d'autres chantiers du voisinage, ou en revenant, ils s'arrêtaient toujours au barrage.

Réponse. — Comme il nous est impossible de vérifier cette assertion, nous nous en tenons à la lettre même des registres de tournées.

§ 41. — RELACHEMENT DES MESURES DE SURVEILLANCE DE LA
DIGUE, VERS LA FIN DE LA PÉRIODE D'EXPLOITATION.

CV. — *Suppression de la grande lunette méridienne.*

En septembre 1893, le conducteur Husser, chargé des constatations à la grande lunette, tomba malade et mourut quelque temps après.

De plus, le laboratoire de l'École des Ponts et Chaussées réclama la lunette méridienne.

On la rendit; et, à partir de septembre 1893, on ne fut plus renseigné sur l'alignement du sommet de la digue que par les visées sur les jalonnets, moyen manquant nécessairement de précision.

CVI. — *Fonctionnement intermittent du tube piézométrique,*

Quand le froid atteignait quelques degrés au-dessous de zéro, l'eau gelait dans le tube piézométrique, ce qui détériorait cet instrument.

On l'enlevait, et on le remettait en place, après réparation, quand le froid avait cessé.

Quelquefois même, la gelée avait été assez intense pour détériorer complètement le tube en question, que l'on remplaçait alors par un appareil neuf.

L'hiver long et rigoureux de 1894-95 avait naturellement

conduit à l'enlèvement du tube piézométrique, de sorte qu'il n'était pas encore remplacé à la date de l'accident.

CVII. — *Résumé.*

Sur les quatre moyens de surveillance employés à l'origine, deux, et non des moins importants, avaient disparu à la date du 27 avril 1895.

§ 42. — CONSÉQUENCES DU RELACHEMENT DES MESURES DE SURVEILLANCE DE LA DIGUE.

CVIII. — *La rupture finale a-t-elle été précédée de signes précurseurs?*

Des témoins ont affirmé que les jets d'eau sortant des fissures transversales avaient pris, à la fin, une importance considérable.

Cela n'a rien que de tout à fait naturel, les fissures s'étant très ouvertes pendant l'hiver exceptionnel de 1894-95.

D'autres témoins ont prétendu que le mur avait, avant la catastrophe, une courbe vers l'aval plus accentuée que dans les années précédentes.

On a fait les observations aux jalonnets jusqu'au dernier jour; et, malgré l'insuffisance de ce moyen de contrôle, il est certain qu'un homme expérimenté comme Claudon eût perçu un changement de forme assez appréciable pour frapper un passant.

Il est néanmoins regrettable que les visées à la grande lunette aient disparu; car, si on ne peut affirmer avec certitude que ce contrôle eût pu renseigner convenablement et complètement sur un mouvement supplémentaire du sommet, il est clair qu'il eût été plus précis que les observations à l'œil nu.

Quant aux fuites de l'aval, elles ont été jaugées jusqu'au dernier jour, sans présenter rien d'anormal.

Enfin, la base n'ayant pas bougé en 1895, il était peu inté-

ressant de se renseigner sur la sous-pression ; et la suppression momentanée du tube piézométrique ne peut être retenue comme ayant été opérante dans la catastrophe.

En somme, il n'est pas prouvé que l'accident du 27 avril 1895 ait été précédé de signes précurseurs. Mais la suppression de la grande lunette doit être considérée, néanmoins, comme très regrettable.

CIX. — *Observations de M. Holtz et de M. M. Lévy.*

Réponse de M. Langlois.

M. Holtz, et, après lui, M. M. Lévy, ont fait observer qu'une fissure horizontale de l'amont devait forcément entraîner à une augmentation de flèche du sommet, augmentation dont la lunette méridienne eût pu indiquer l'importance. J'ai été absolument stupéfait en présence de l'observation de M. M. Holtz et M. Lévy.

Elle constituait, en somme, le reproche singulier (dans la bouche de M. Holtz surtout) d'avoir mis de côté le fait de négligence, dans mon appréciation de la conduite des inculpés.

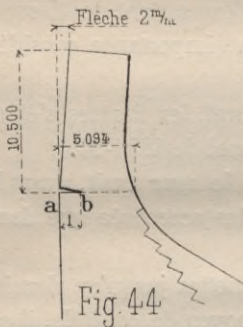


Fig. 44

Réponse. — Comme j'attribue la rupture finale à une ouverture des joints de l'amont, produite avant le 27 avril 1895, il est certain que j'ai dû me préoccuper de l'augmentation résultante des flèches du sommet.

Aussi, ai-je calculé l'augmentation en question, pour une fissure horizontale *ab* (fig. 44) pénétrant de 1^m dans la masse. J'ai trouvé environ 2^{mm}.

Or, la ligne de visée *EF* (fig. 45 et 46), à laquelle on rapportait les différents points du parapet d'aval, était variable, le point *F* (325) participant au mouvement général d'infléchissement.

Ce point F pouvait donc, par le fait de la fissure *ab*, s'incliner davantage qu'avant la formation de cette fissure.

La flèche *mn* (*fig. 46*) ne donnait donc, comme supplément résultant de *ab*, qu'une partie, peut-être peu importante, des 2^{mm} trouvés ci-dessus.

Les constatations à la grande lunette n'auraient donc renseigné qu'imparfaitement et incomplètement sur l'augmentation de flèche résultant de la fissure *ab*.

Or, les courbes telles que *EnF*, tracées jusqu'en 1893, présentèrent l'anomalie apparente que voici :

Une augmentation de la hauteur de l'eau dans le réservoir coïncidait quelquefois avec une diminution de flèche, et inversement, par suite de l'action de la dilatation.

Les faibles augmentations de flèche, que la grande lunette eût permis de constater, auraient donc pu passer inaperçues ; et, dans tous les cas, n'auraient pas présenté le caractère d'un renseignement précis, susceptible d'éclairer de suite la question.

Après les judicieuses réflexions que je viens de relater, il ne m'a pas été possible de conclure à une négligence ayant contribué à la catastrophe.

En résumé, les ingénieurs bénéficient, en l'espèce, du doute dans lequel je suis ; et je ne puis qu'exprimer mon regret de la suppression de l'engin d'observation dont il s'agit.

§ 43. — RÉSUMÉ DU CHAPITRE XVII.

CX. — *Exposé.*

Récapitulons ce que nous venons de dire :

a) Sur les moyens de contrôle de la digue :

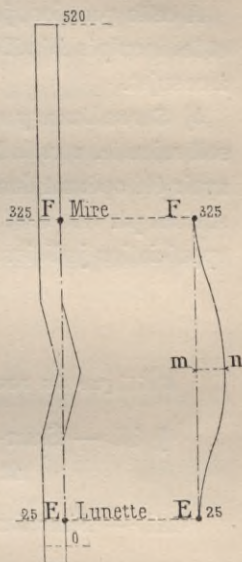


Fig 45

Fig 46

b) Sur la surveillance personnelle des ingénieurs.

a) *Moyens de contrôle de la digue.* — Ils ont diminué, avec le temps, en nombre et en importance; ce qui a constitué, nécessairement, une négligence regrettable.

Cette faute a-t-elle, dans une certaine mesure, contribué à la catastrophe, en privant les ingénieurs de renseignements capables de les éclairer sur l'état du barrage?

A cette question, je n'ai pu répondre d'une façon affirmative; et les inculpés bénéficient, naturellement, de mes incertitudes à ce sujet.

b) *Surveillance personnelle des ingénieurs.* — Bien qu'elle se soit ralentie, vers la fin de l'exploitation, cela ne me paraît pas avoir été opérant dans la catastrophe, étant entendu que c'est surtout par une étude de cabinet qu'on eût pu arriver à une appréciation judicieuse de la question.

CHAPITRE XVIII

Critique du remplissage au complet du réservoir.

§ 44. — ÉTAIT-IL PRUDENT DE REMPLIR AU COMPLET LE RÉSERVOIR DE BOUZEY?

CXI. — *Situation réelle de la digue, au commencement du remplissage.*

D'après ce que nous avons vu antérieurement :

1^o Le barrage de Bouzey avait un maigre profil, entraînant des tensions importantes à l'amont; tensions toujours dangereuses, dans un ouvrage appelé à retenir de l'eau.

2^o Cette situation s'aggravait à Bouzey du fait de la médiocre qualité des matériaux.

3^o Elle était rendue plus dangereuse encore par les conséquences du profil rectiligne, sur une grande longueur de 520^m en couronné, surtout avec cette situation particulièrement dangereuse résultant de la mauvaise orientation du barrage.

Il en résultait d'importants efforts tranchants longitudinaux k , qui se combinaient avec les tensions transversales dues à la poussée de l'eau, de façon à rendre inévitable la formation de fissures longitudinales à l'amont (ouverture des joints de la maçonnerie).

L'hiver absolument exceptionnel de 1894-95 a dû produire, dans ce sens, des effets absolument désastreux.

4° Le bouchage des fissures a introduit, dans les parois amont et aval, des efforts parasites k' , analogues à k , lesquels sont venus joindre leur action à celle de la dilatation.

5° En provoquant le mouvement de 1884, la mauvaise qualité du terrain de fondation a produit un affaiblissement permanent du barrage, non seulement dans la partie infléchie, mais encore dans le reste de l'ouvrage.

6° Le mur, dit de renforcement, avait laissé intacte la partie située au-dessus de la cote 360,50, partie dans laquelle d'importantes tensions s'exerçaient encore à l'amont, et qui avait été fatiguée par le mouvement de 1884. Le mur en question avait, en outre, affaibli la partie du barrage située au-dessous de la cote 360,50.

7° Quand on a commencé le remplissage, la maçonnerie du mur de renforcement était encore fraîche, ce qui eût dû imposer une grande lenteur dans l'opération.

CXII. — *Situation de la digue telle que l'avaient antérieurement reconnue les ingénieurs.*

1° La maigreur du profil n'apparaissait pas à MM. Denys et Hausser avec la netteté que donnent nos calculs actuels.

Ils ne s'étaient jamais, en effet, occupés des tensions de l'amont; pas plus, du reste, que leurs devanciers.

Mais ils savaient, au moins, que le maximum de compression se présentait jusqu'à la cote 361,40, c'est-à-dire au-dessus du contrefort.

Ils auraient donc dû se rappeler cette circonstance, et craindre

pour la partie médiane de la digue, que la consolidation n'avait pas intéressée.

2° La médiocre qualité du mortier n'était pas un secret pour MM. Denys et Hausser, puisqu'ils avaient cru devoir, dans les travaux de consolidation, remplacer le mauvais sable de carrière par du sable délavé de la Moselle.

3° Les effets de la dilatation n'étaient pas bien connus des ingénieurs; mais, en fait, un mur qui se fendille transversalement doit toujours être considéré comme fatigué.

4° Les ingénieurs ne pouvaient se rendre compte des effets fâcheux produits par le bouchage des fissures.

5° L'affaiblissement du mur, produit par le mouvement de 1884, était par contre très appréciable, sinon en quantité, du moins en principe.

Il y avait donc là un point particulier qui eût dû attirer l'attention de MM. Denys et Hausser.

6° Le mur de renforcement avait laissé en l'état la partie située au-dessus de la cote 360,50, fatiguée par le mouvement de 1884.

Les tensions de l'amont, entre 360,50 et 365, étaient ignorées des Ingénieurs; mais ils savaient qu'entre 360,50 et 361,40, l'aval travaillait à 16 et 17^{kg}.

C'étaient là des raisons pour craindre les effets d'un remplissage au complet du réservoir.

7° Enfin, MM. Denys et Hausser n'ignoraient pas qu'on doit laisser les maçonneries prendre une bonne résistance avant de les charger au maximum.

CXIII. — *Conclusion.*

Il y a eu imprudence dans le remplissage au complet du réservoir, imprudence dont les ingénieurs devaient apprécier une partie des causes.

On ne s'explique leur audace, car c'en était une, qu'en raisonnant de la façon suivante :

L'intervention active de M. Dupuy, auteur du projet définitif de consolidation, a fini par faire perdre de vue à MM. Denys et Hausser les motifs de crainte qu'ils avaient initialement présentés.

A force de s'entendre dire « cela tiendra », par leur chef hiérarchique, ils ont eu le grand tort de finir par admettre cela comme indiscutable.

§ 45. — LE REMPLISSAGE AU COMPLET ÉTAIT-IL UTILE?

CXIV. — *Exposé.*

Pour rechercher s'il y avait véritablement utilité à remplir complètement le réservoir de Bouzey, MM. Brüll et Fleury s'étaient livrés à un travail important ayant pour but de les édifier :

- a) Sur les besoins réels du canal de l'Est;
- b) Sur les lois et règlements réglant l'alimentation de cette voie navigable.

J'ai accepté les conclusions de mes collègues, en les utilisant même, dans un cas particulier, d'une façon plus catégoriquement démonstrative; et il a été reconnu à l'audience que certaines erreurs avaient été commises. Mais, comme la conservation du barrage dominait la question, il ne faut pas perdre cela de vue, ainsi que je l'expose à la cinquième partie, en citant une phrase caractéristique servant d'exorde aux développements du chapitre « Utilité », dans le rapport Brüll-Fleury (n° 129, V^e partie).

En résumé :

1° Si on s'était contenté d'un mouillage de 2^m dans le canal, la navigation n'en eût pas souffert sensiblement (les états de navigabilité n'indiquent de retards appréciables que pour une cote inférieure).

2° On eût pu alors s'arrêter, dans le réservoir, à la cote 370,

pour laquelle la poussée de l'eau provoquait des compressions à l'aval.

Les joints de maçonnerie n'ayant de tendances à s'ouvrir que si une force tend à séparer les lits, une compression, même faible, suffisait, d'après moi, à empêcher la formation des fissures longitudinales de l'amont, cause à laquelle j'attribue la catastrophe.

§ 46. — LE REMPLISSAGE AU COMPLET ÉTAIT-IL PRESCRIT
PAR UNE DÉCISION MINISTÉRIELLE?

CXV. — *Exposé.*

Aucune décision spéciale n'a réglé le régime qu'il convenait de donner au réservoir de Bouzey, après la restauration de 1888-89.

Mais, en fait, l'Administration a toujours été tenue au courant du remplissage complet adopté par les ingénieurs.

D'un autre côté, M. Denys avait reçu officieusement, sur sa demande, d'ailleurs, une copie du rapport de la Commission de 1887, dans lequel on lit :

« Dans ces nouvelles conditions (restauration par voie de renforcement de la base), il n'est pas téméraire d'espérer que l'on pourra gagner 1^m, 2^m et peut-être même 2^m,70, c'est-à-dire la cote de retenue normale.

» Hâtons-nous de dire qu'il conviendrait d'agir avec la plus grande prudence, et de n'essayer la pleine charge qu'au moment où les maçonneries auront acquis toute leur résistance et où les corrois auront fait preuve de leur étanchéité.

» Ce n'est pas que la restauration ainsi faite donne au mur la valeur d'un ouvrage neuf et bien fondé; loin de là. Mais l'amélioration sera certainement suffisante pour que l'on puisse utiliser le réservoir dans une large mesure.

» Si on ne peut arriver au succès complet, on cherchera, dans la création de nouvelles réserves, le complément de res-

sources nécessaires; mais il serait regrettable de ne pas tenter une expérience qui peut réussir et qui n'exige qu'un sacrifice relativement modéré. »

Cela donne, sur la valeur de la restauration proposée, l'avis très important de l'auteur lui-même; et les réserves que contient cette opinion, ainsi exprimée, étaient de nature à maintenir les ingénieurs dans leurs craintes initiales.

Comment se fait-il que la confiance soit venue aux exécutants? Nous l'avons déjà exposé :

M. Dupuy a communiqué aux ingénieurs sa contagieuse confiance; ce qui explique leur conduite, sans l'excuser.

§ 47. — RÉSUMÉ DU CHAPITRE XVIII.

CXVI. — *Exposé.*

Sans ordres directs, mais aussi sans protestations de la part de l'Administration supérieure, les ingénieurs ont rempli le réservoir de Bouzey :

a) Immédiatement après la terminaison du renforcement, à 0^m,50 en contre-bas de la retenue maxima ;

b) A cette retenue maxima elle-même, dans les années suivantes.

Ils ont opéré de cette façon :

c) Malgré leur connaissance de la précarité du barrage; connaissance incomplète, c'est vrai, mais devant toutefois imposer la prudence;

d) Malgré les réserves expresses formulées dans le rapport de la Commission de 1887, réserves qui avaient été, officieusement, portées à la connaissance de M. Denys.

Cause directe de la catastrophe, cette faute lourde serait sans excuses, si les ingénieurs avaient bien connu, avant 1895, les effets destructeurs de la température dans le barrage de Bouzey.

Cette ignorance générale excuse les ingénieurs dans une très large mesure.

Examinons successivement les formes particulières de la cassure, dans le sens transversal.

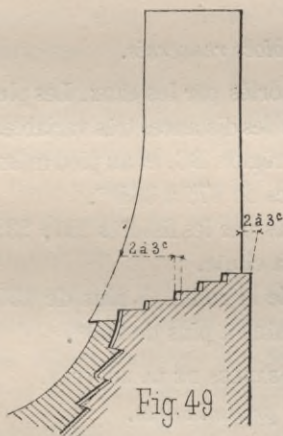
a) Région BC (brèche profonde). — Coupons la digue par un plan vertical $Y_1Y'_1$ (fig. 47).

Nous voyons (fig. 48) que la surface de rupture a la forme d'un escalier, descendant de l'amont vers l'aval; escalier dont on devine les marches plutôt qu'on ne les constate véritablement, à cause du bouleversement des moellons.



Coupe suivant $Y_1Y'_1$ (Fig.47)

Si nous coupons le mur en A ($Y_2Y'_2$, fig. 47), nous voyons que la partie restée debout, à droite de A, a glissé sur la partie inférieure, en présentant une cassure en escalier descendant, analogue au seuil de la brèche BC (fig. 47).



Coupe suivant $Y_2Y'_2$ (Fig.47)

Nous trouvons donc, sur la brèche de la digue :

Un cisaillement transversal en formation (fig. 49);

Un cisaillement analogue, terminé, celui-là (fig. 48).

On peut donc en conclure, avec une quasi-certitude que la partie BC a cédé par cisaillement transversal, la partie supérieure ayant glissé sur sa base, en bouleversant les moellons.

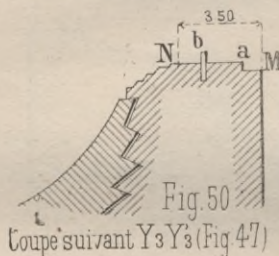
b) Régions AB, CD (grande cassure). — Représentons (fig. 50) une coupe transversale faite suivant $Y_3Y'_3$ (fig. 47), dans les parties AB, CD de la brèche.

On voit que, sur une largeur d'environ 3^m,50 à partir de

l'amont, la cassure, très nette d'ailleurs, est presque horizontale; tandis qu'elle est arrondie et fortement bouleversée à l'aval.

On remarque, en outre, dans la partie MN :

D'une part, des redans *a*, formant marches d'escalier ascendant, contrairement à ce qui se présente dans la brèche BC;



D'autre part, des bornes non brisées *b*, à côté d'autres cassées au niveau du plan de rupture. Ces bornes, semées en quinconce, ont été mises pour s'opposer au cisaillement.

Dans les parties AB, CD, il semble donc s'être produit un renversement de la partie supérieure autour d'une bande de l'aval, que les compressions et un glissement final ont tout à fait désagrégée.

CXIX. — Position des blocs renversés.

Les petits fragments ont été emportés par les eaux. Les plus gros sont restés près de la digue, à des distances très variables.

Au droit de la brèche profonde, région BC, et au pied même du barrage, se trouvent quatre blocs de 175 à 384^{m³}.

Ce sont les deux morceaux limités par les fissures 221, 232, 243, cassés horizontalement dans la chute.

Huit blocs se trouvent au bord de la route, à plus de 150^m de la digue; et un autre a été entraîné à plus de 200^m.

§ 49. — ÉTUDE DES CAUSES PROBABLES DE LA RUPTURE.

CXX. — Observations préliminaires.

a) M^e Poincaré m'a demandé si je comptais présenter une explication certaine, indéniable, de l'accident, ou s'il ne s'agissait que d'hypothèses plus ou moins bien déduites.

J'ai répondu que tout n'était que conjectures dans les théories et explications de ce paragraphe, et que Dieu le Père, seul,

pourrait renseigner exactement sur la façon dont la digue s'était rompue.

M. Poincaré a exprimé le regret qu'on ne pût citer Dieu le Père comme témoin.

Cette observation préliminaire était indispensable pour donner à ces explications la physionomie qu'elles comportent; et aussi, un peu, pour bien préciser le sens de ma réponse à M. Poincaré, car on a fait à cette réponse un sort auquel j'étais loin de m'attendre.

En deux mots, tout n'est qu'hypothèse dans les explications du mécanisme de l'accident; mais l'accident lui-même n'est malheureusement pas hypothétique; et, ce qui ne l'est pas non plus, c'est l'état précaire de la digue avant la catastrophe, et l'incohérence de l'exploitation finale du réservoir.

b) Il y a, dans les explications que je vais fournir, deux parties distinctes :

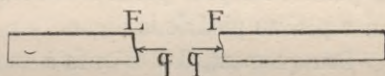


Fig. 51

Premièrement. — La

recherche du mode de rupture des différentes régions.

Deuxièmement. — Celle du point qui a cédé le premier.

Cette seconde partie du problème est très importante, si on veut se rendre un compte à peu près exact des causes de la catastrophe.

Quand une brèche initiale (EF, *fig. 51*) a été produite, les parties restées debout se sont trouvées, de ce chef, soumises à des efforts statiques supplémentaires (poussées latérales q); ainsi qu'à des effets dynamiques considérables, résultant du mouvement de la masse liquide.

L'égrènement consécutif a donc été produit dans des conditions plus mauvaises que la séparation initiale des parties qui ont cédé en premier lieu.

c) Ceci posé, je vais successivement :

Rappeler d'abord les dépositions des témoins de la catastrophe.

Ensuite, fournir les explications présentées par la Commission d'enquête administrative de 1895; celles données par mes collègues; les miennes; et, enfin, celles que M. Maurice Lévy a présentées à l'audience.

Je ferai suivre ces dernières des observations qu'elles m'ont conduit à développer au tribunal.

CXXI. — *Dépositions des témoins de l'accident.*

a) *Déposition de l'ouvrier Thiriat, qui se trouvait sur le couronnement de la digue au moment de la rupture.* — Dans son rapport du 8 juin 1895, M. Mallez relate ainsi l'incident :

« Le 27 avril, un ouvrier venait de suivre le haut de la digue, de la rive gauche vers la rive droite, et s'était arrêté au point 160, pour parler à un maçon travaillant en bas, et qui a péri au pied de la digue.

» Brusquement, il a entendu à sa gauche, *vers le centre du barrage, un fracas énorme, tandis qu'une lézarde, d'environ 0^m,10 s'ouvrait à sa droite.*

» Il a eu le temps de la franchir et d'atteindre la rive, d'où il a vu, à l'emplacement de la digue, un nuage de poussière et d'eau qui masquait tout le reste. »

J'ai souligné le paysage caractéristique de cette déposition, que je commenterai plus loin.

b) *Déposition de M. Gihin, cabaretier à Bouzey.* — M. Gihin habitait la vallée de Bouzey, sur le flanc droit, à 300^m environ du barrage.

Il a fait aux experts la déclaration suivante, qu'il a confirmée dans sa déposition (Procès-verbal du rapport Brüll-Fleury) :

« Il sortait de son écurie, menant boire son cheval, quand il entendit un craquement du côté de la digue.

» Au même moment, il a vu se détacher du sommet de la digue une brèche de maçonnerie ayant une longueur d'une vingtaine de mètres et une hauteur d'à peu près 1^m.

» Par la brèche ainsi formée, une nappe d'eau d'environ 0^m,40 s'est mise à se déverser à l'aval de la digue.

» Quelques secondes après ce commencement de rupture, il a entendu un nouveau craquement et il a vu s'écrouler tout un pan de la muraille, à côté de la brèche supérieure, primitivement formée.

» Il a vu ensuite les blocs se détacher partiellement, la brèche s'élargissant à la fois des deux côtés, par une espèce d'égrènement du mur du barrage.

» Il s'est occupé ensuite du sauvetage de sa famille et de sa propre conservation. »

Interrogé par les experts sur la position approximative des brèches successives produites dans le barrage, M. Gihin a complété sa déclaration de la façon suivante :

« Habitant Bouzey depuis longtemps, il connaissait parfaitement la digue, dont toutes les parties lui étaient familières.

» De plus, il avait comme repère la tourelle, qui se trouvait dans le voisinage du point de rupture initial.

» Il peut donc affirmer, à 10 ou 15^m près, à droite et à gauche, que :

» La première brèche, de 20^m de longueur sur 1^m de hauteur, s'est produite au-dessus de la bonde de fond, en une place qu'il indique aux experts, et que ceux-ci notent être comprise entre les piquets 260 et 280 ;

» La seconde brèche, de grande hauteur, correspond à une région que les experts parcourent avec le témoin, et qui se trouve limitée par les piquets 200-260. »

Ainsi donc, il y a eu, d'après M. Gihin :

Un égrènement du sommet, entre les points 260-280 ;

Un renversement d'un grand pan de mur, entre les piquets 200-260 ;

Un égrènement final, sur grande hauteur, à droite et à gauche de cette grande cassure de 60^m.

CXXII. — *Opinion de la Commission d'enquête administrative de 1895.*

La Commission d'enquête s'exprime ainsi :

« Ces fissures verticales ne sont pas dangereuses; mais la fissure 243, qui, comme les autres, se fermait en été et s'ouvrait en hiver, était une de celles qui donnaient le plus d'eau; sa largeur était de 7^{mm} en janvier 1895, et l'eau à laquelle elle livrait passage a pu pénétrer dans la fissure oblique qui

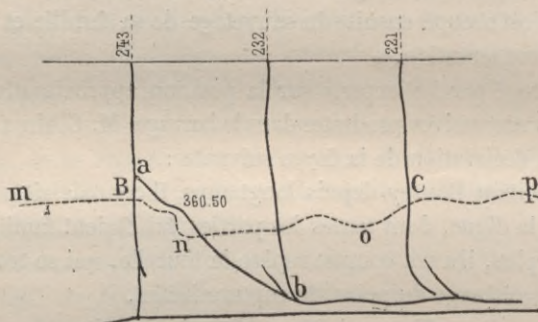


Fig. 52 (Vue d'amont)

Légende:

ab : Fissure oblique préexistante
 mBnoCp : Cassure finale

s'en détachait (*ab*, fig. 52), et y déterminer des sous-pressions dangereuses.

» Si on se reporte à la figure 52, on voit, de toute évidence, que la digue s'est rompue suivant la fissure oblique *ab*.

» Cette fissure présentait, dans la partie de la digue emportée, une petite partie horizontale, à la cote moyenne de 360,50 environ, et l'épure faite par la Commission montre que :

» 1° Si la fissure avait eu 1^m,50 de profondeur, le travail de la maçonnerie aurait été porté au maximum à 19^{kg},79, sur le joint 360,50; et le rapport de la poussée au poids ($f = \frac{Q}{P}$) se

serait élevé à 0,768, chiffre légèrement supérieur à la limite généralement adoptée de 0,76.

» 2° Si la fissure avait eu une profondeur de 3^m, la courbe des pressions serait sortie du massif, entre les points 360,50 et 359,50 ; il y aurait eu écrasement des maçonneries et, en même temps, glissement ; car le rapport de la poussée au poids ($f = \frac{Q}{P}$) se serait élevé à 0,90.

» La fissure oblique du point 243 pouvait donc, et elle devait, si elle avait une profondeur suffisante, déterminer la rupture de la digue, sur quelques mètres de longueur.

» Mais la présence de cette fissure ne suffit pas pour expliquer la rupture de la digue, puisqu'elle a résisté pendant cinq ans. Elle ne suffit pas non plus pour expliquer que la digue se soit rompue sur une longueur de 170^m ; et, pour que ces 170^m aient été emportés en même temps et presque simultanément, il a fallu qu'ils fussent également dans une situation critique.

.....
 » Ces flèches n'ont pu s'y produire sans déterminer dans la maçonnerie des efforts de tension ; et ces efforts ont pu, s'ils étaient supérieurs à la résistance de la maçonnerie, amener l'ouverture de certains joints. »

.....
 Après le calcul comparatif des tensions et compressions aux joints 360,50 et 361,50, le rapport ajoute :

« C'était donc, quel que soit le point de vue auquel on se place, le joint 360,50 qui fatiguait le plus ; et, si la rupture s'est produite 1^m plus haut, c'est qu'il existait en ce point une cause particulière de faiblesse.

» Or, les maçonneries ont été faites en deux campagnes ; pendant la première, elles avaient été élevées à la cote 362 environ.

» L'année suivante, on ne s'est pas borné à mettre à vif les maçonneries déjà exécutées, et on les a démolies et refaites sur

une épaisseur correspondant en général à deux assises, soit sur 0^m,40 à 0^m,50.

» Le point où la digue a cédé correspond donc exactement au point de reprise des maçonneries. Il y a là une coïncidence frappante ; et on doit présumer que, malgré les précautions prises, car les maçonneries ont été très bien exécutées, les nouvelles maçonneries ne se sont pas liées aux anciennes.

» Ce défaut de liaison a dû amener, dès le premier remplissage du réservoir, l'ouverture dans le joint 361,50 d'une fissure qui est allée ensuite en s'agrandissant, par l'effet même des sous-pressions qu'elles déterminait.

» L'action de cette nouvelle fissure est venue s'ajouter à celle de la fissure oblique voisine de la fissure 243 ; et on comprend que ce joint, étant le plus fatigué, soit parti le premier, entraînant avec lui tout le reste de la digue.

Il semble que c'est bien ainsi que les choses se sont passées, et cette explication cadre bien avec le témoignage du seul témoin qui a assisté à la catastrophe, ainsi qu'avec l'état des maçonneries, constaté après la rupture. »

Je dirai, à l'article CXXIV, mon avis sur l'opinion exprimée ci-dessus par la Commission d'enquête administrative.

CXXIII. — *Opinion de mes collègues.*

Mes collègues estiment que la partie BC est partie la première, le reste s'étant ensuite égrené par le fait des efforts statiques et dynamiques résultant de la formation d'une brèche initiale.

Ils en donnent pour raisons :

a) Que la partie en question (BC, *fig. 47*) était la plus fatiguée, ainsi qu'en témoignent les fissures 221, 232, 243, qui la limitaient et la partageaient en deux parties à peu près égales.

b) Que la rupture s'est produite suivant la section de moindre résistance au cisaillement, ainsi qu'en témoignent des calculs très savants fournis à l'une de leurs annexes.

Ils considèrent comme une preuve indéniable de ce mode de rupture la position, au pied même de la digue, des blocs détachées de la partie BC considérée.

MM. Brüll et Fleury admettent, d'ailleurs, qu'il a pu se produire, dans la région BC, un soulèvement initial de l'amont; mais ils considèrent que le mouvement final a été un glissement de la partie emportée sur celle qui est restée debout.

CXXIV. — *Mon opinion personnelle.*

1° *Examen critique des opinions antérieures.* — La Commission d'enquête administrative de 1895 émet, en résumé, l'avis suivant :

C'est, « de toute évidence », la partie BC qui a cédé la première, à cause de la fissure oblique *ab* (*fig. 52*). Je répondrai à cette affirmation à l'article 2°; mais remarquons, en passant, que la Commission d'enquête administrative joue un peu au « Père éternel ».

Mes collègues partagent la même opinion, exprimée toutefois d'une façon moins affirmative.

Examinons d'abord les raisons fournies par eux, à l'appui de leur assertion.

a') La région BC était très fatiguée, ainsi qu'en témoignent les fissures 221, 232, 243.

De plus, ces fissures, ainsi que celle oblique *ab* (*fig. 52*), étaient une cause d'affaiblissement progressif, en permettant aux infiltrations d'exercer un délavage du mortier.

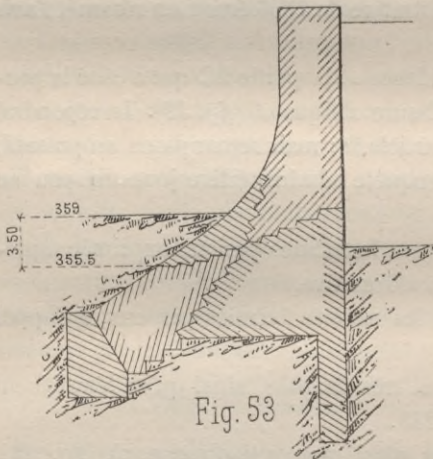
Mais il est nécessaire de remarquer que, précisément à cause des fissures verticales en question, la partie BC se trouvait presque complètement à l'abri des contractions de l'hiver.

Composée de deux blocs de faible longueur (environ 11^m), isolée du reste du barrage, cette région a fort peu souffert de l'hiver exceptionnel de 1894-95.

La raison *a)*, fournie par MM. Brüll et Fleury, ne me paraît donc pas péremptoire.

b') C'est bien suivant la plus faible résistance au cisaillement que s'est rompue la partie BC ; et, en somme, il ne saurait en être autrement. Mais cela ne prouve pas du tout que le bloc 241-243 soit parti le premier. Il a pu, en effet, être cisailé dans l'effondrement général. Cela prouve que le bloc BC était plus résistant que le reste à la cote 361,50 ; et la raison qu'on en peut produire est précisément celle résultant d'une moindre atigue par le fait des contractions.

Passons maintenant à la critique de ce que mes collègues considèrent comme une preuve indiscutable de ce qu'ils avancent.



Je présenterai successivement :

c) Un argument fourni par moi, dans mon rapport de 1896 ;

d) Une explication très plausible, donnée par l'ingénieur en chef Denys.

c) *Argument personnel.* — Si la section de rupture de la partie BC avait été au-dessus du sol

d'aval, la position du bloc au pied de la digue eût pu constituer un argument sérieux pour prouver que la région BC avait bien cédé la première.

Mais il n'en était pas ainsi, puisque :

D'une part, le seuil aval de la brèche est à la cote moyenne de 355,50 (fig. 53) ; d'autre part, le niveau du sol d'aval avait été amené, par des remblais successifs, à la cote 359.

Le pied de la digue se trouvait donc appuyé par le sol d'aval, sur une hauteur de 3^m,50 environ.

Or, la digue a été emportée presque instantanément, sur une longueur de 180^m.

Si elle s'est rompue à un autre endroit que BC, l'eau n'a pas eu le temps de raviner sérieusement le sol d'aval avant le glissement de BC; et d'enlever, par suite, une partie notable de la terre qui épaulait la partie inférieure du bloc considéré.

Dans son glissement transversal, la partie BC a donc dû labourer une forte épaisseur du terrain d'aval (fig. 54); opération qui l'a arrêté forcément, et qui explique la position du bloc au pied du barrage.

d) *Explication de M. Denys.* — Elle est beaucoup plus catégorique que la mienne; et je ne l'ai pas fournie moi-même par la raison fort simple que je l'ignorais.

Les blocs en question sont arrimés parfaitement côte à côte, et se sont protégés mutuellement contre la poussée de l'eau.

Leur volume est bien plus considérable que celui des autres blocs, puisque, avant de se briser en tombant, chaque tronçon présentait de 750 à 800^m³.

Or, à la mer, dans les travaux de jetées, les blocs de 10, 15, 20^m³ sont souvent roulés par les vagues; mais ceux de 40 à 50^m³ résistent généralement aux plus violents coups de mer.

Cela explique surabondamment la position des blocs détachés de BC, au pied de la digue.

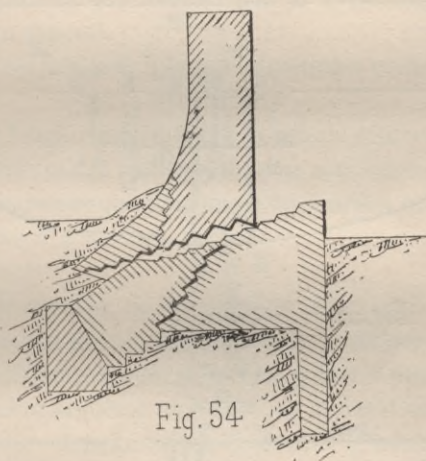


Fig. 54

En résumé, cette position spéciale n'est pas une preuve que la partie BC a cédé la première.

2° *Mon explication de la catastrophe.* — Avant toute autre argumentation, je crois devoir revenir sur les points suivants :

e) Les contractions excessives, provoquées par l'hiver long et rigoureux de 1894-95, ont dû être la cause finale de la catastrophe.

f) La partie BC était à l'abri des efforts de contraction, par

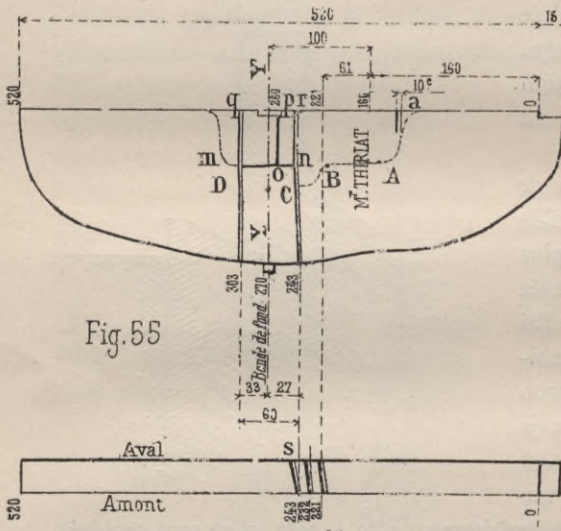
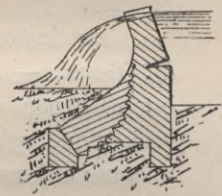
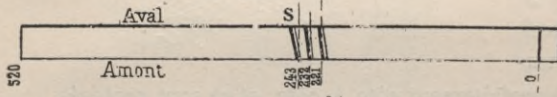


Fig. 55

Fig. 55^{ter}
Coupe suivant YY'Fig. 55^{bis}

suite de sa faible longueur et de son isolement du reste de l'ouvrage.

En somme, je crois qu'il existe, entre les grands froids de l'hiver précité et la rupture du barrage, une relation de cause à effet, relation qui disparaît si l'on suppose que la partie BC a été enlevée avant le reste.

Or, entre les piquets 243 et 303, au-dessus de la bande de fond, située au piquet 270, la partie détruite de la digue se trouvait, avant l'accident, dans des conditions très défavorables (fig. 55).

g) Cette bande avait une longueur assez grande (60^m) pour que les effets de la contraction s'y fassent sentir d'une façon fort appréciable.

h) Elle était terminée :

A gauche, par la fissure 303, qui avait toujours donné beaucoup d'eau ;

A droite, par la fissure 243, extrémité de l'inflexion de 1884.

i) La région considérée constituait le milieu de la digue, beaucoup plus impressionné que le reste par la dilatation, considérée dans un sens général.

Pour toutes ces raisons, je pense que la destruction a commencé par là.

L'amont s'est fissuré longitudinalement, à la cote de reprise des maçonneries en 1880 ; et des sous-pressions se sont développées, avec les conséquences qui sont mises en lumière au tableau final de l'annexe n° 5 (sixième partie).

Il résulte de mes calculs :

Que les coefficients de traction, de compression et de cisaillement croissent rapidement avec la profondeur de la fissure.

On en conclut immédiatement que si tous les points d'une section horizontale avaient la même résistance, au moment de la formation d'une fissure longitudinale, il devrait y avoir rupture d'équilibre et renversement immédiat de la partie supérieure.

Mais il n'en était pas tout à fait ainsi, pour les raisons suivantes :

j) La paroi amont était la plus fatiguée par la poussée de l'eau ; et cela, par suite des variations d'intensité et de sens des efforts développés. On sait, en effet, que l'amont était tantôt comprimé, tantôt tendu ; et qu'il suffisait, pour arriver à cette variation, que le niveau de l'eau monte au-dessus de la cote 370 ou descende au-dessous de cette cote.

k) Les parois amont et aval étaient les plus fatiguées par le fait des variations de température et du picotage.

1) Enfin, ces régions avaient supporté les plus grands efforts de tension et de compression, lors de la flexion de 1884.

Pour toutes ces raisons, une fissure de l'amont a très bien pu se produire antérieurement à l'accident de 1895.

L'eau, pénétrant dans cette fissure, a alors délavé activement le mortier, en affaiblissant de plus en plus l'arête amont de la section résistante.

Celle-ci a progressivement cédé, augmentant ainsi la largeur de la fissure; et le joint a fini par s'ouvrir complètement, la

partie supérieure culbutant autour d'une bande de l'aval, et finissant par glisser transversalement par suite de l'augmentation du coefficient de cisaillement.

On trouve l'indication que c'est bien ainsi que la rupture s'est produite dans le fait suivant :

Dans les blocs tombés au pied de la digue, en face de la grande cassure,

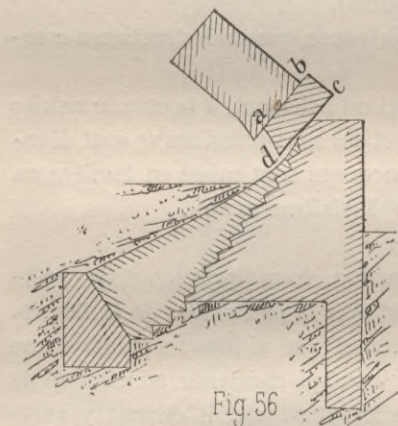


Fig. 56

on a constaté qu'il manquait à la base une épaisseur qui n'a pu être retrouvée.

Or, si l'on admet le culbutement ci-dessus décrit, la chose s'explique d'elle-même. La partie inférieure *abcd* (fig. 56) des blocs enlevés a, en effet, frotté sur la surface d'oscillation de l'aval, et on conçoit quelle se soit désagrégée. Les débris ont été ensuite emportés par les eaux.

Une autre preuve de la préexistence d'une fissure de l'amont à la cote 361,50, se tire de l'examen de la partie restée debout, sur la rive droite (côté Sanchev).

Entre les points A, M (fig. 57), se trouve une destruction du

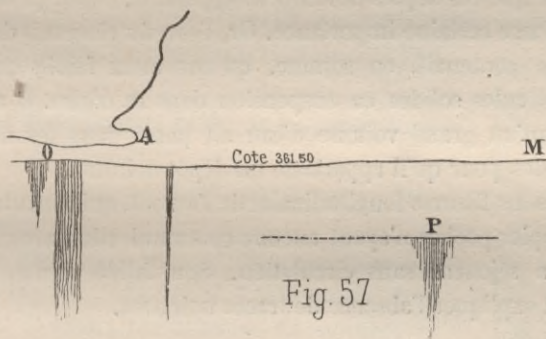
joint, provenant du mouvement d'avancement, vers l'aval, de la partie restée debout (coupe de la *figure 49*).

Ce glissement prolonge exactement la grande cassure AB (cote 361,50); et on voit, en O, une tache blanchâtre, qui s'est déposée sur l'enduit d'amont.

Un peu au-dessous, en P, une tache analogue apparaît.

D'après moi, ces taches ont été produites par l'eau qui a pénétré dans les joints ouverts de la maçonnerie.

Cette eau, une fois introduite, a séjourné dans la fissure; s'est chargée de chaux par voie de délavage du mortier; et, lorsque les joints se sont refermés, après la vidange du résér-



voir, la pression a expulsé l'eau, dont la trace est restée à cause de la chaux qu'elle tenait en suspension.

m) J'avais fait prendre une photographie de cette région de la digue reproduite, *figure 57*, dans ses parties essentielles; et des discussions ont suivi la production de ce document à l'audience. Je vais donner un résumé des observations présentées et des réponses que j'y ai faites.

Première observation, de M. Denys. — Dans les fissures verticales, résultant des contractions ou du mouvement de 1884, on a constaté la présence de sédiments noirâtres, déposés par l'eau. Rien de pareil n'a été vu :

D'une part, sur le seuil de la cassure;

D'autre part, dans des explorations qui ont été faites au décollement AM (*fig. 57*).

Or, ces sédiments sont déposés par l'eau.

Par conséquent, si aucune trace de ce genre ne se trouve, ni sur le seuil de la cassure, ni dans la région AM (*fig. 57*), on doit en conclure que l'eau n'a pas pénétré entre les joints de la maçonnerie, comme le croit M. Langlois.

Première réponse. — Les sédiments dont parle M. Denys sont constitués par des dépôts de molécules solides, en suspension dans l'eau.

Pour que ces dépôts deviennent apparents, il faut qu'ils aient acquis une certaine importance. Or, l'eau du réservoir de Bouzey ne contenait, en somme, qu'une assez faible quantité de molécules solides en suspension dans sa masse. Il a donc fallu qu'un grand volume d'eau ait passé dans les fissures verticales pour qu'il apparaisse un dépôt noirâtre.

Dans les fissures longitudinales de l'amont, qui constituaient de simples poches n'ayant aucune communication avec l'aval, l'eau a séjourné sans circulation. Son faible volume suffit alors à expliquer l'absence de traces noirâtres.

Deuxième observation, de M^e Poincaré. — On a constaté des sédiments, non seulement dans les fissures verticales, mais encore dans la fissure oblique *ab* (*fig. 52*), reliant les fissures verticales 232 et 243. On aurait donc dû en voir aussi dans les fissures longitudinales de l'amont, qui se trouvaient dans la même situation que la fissure oblique *ab*.

Deuxième réponse. — C'est une erreur de croire que la situation de la fissure oblique *ab* et celle des fissures longitudinales de l'amont étaient identiques.

La fissure oblique communiquait avec l'aval par l'intermédiaire des fissures verticales 232 et 243, dans lesquelles elle débouchait. L'eau qui s'introduisait dans la fissure *ab* s'écou-

lait donc au dehors, absolument comme celle qui pénétrait directement dans les fissures verticales.

Il y a donc eu circulation de l'eau dans la fissure oblique *ab*, ce qui explique les sédiments constatés.

L'eau était, au contraire, absolument immobile dans les poches fournies par l'ouverture des joints de l'amont; ce qui, ainsi que je l'ai déjà dit, fait parfaitement comprendre l'absence d'un dépôt apparent.

Troisième observation, de M. Denys. — L'eau chargée de chaux pouvait fort bien provenir du décollement de l'enduit d'amont.

Troisième réponse. — Supposons que, sous l'action de la poussée de l'eau du réservoir, il se soit produit simultanément :

Une fissure longitudinale de l'amont, EKL
(*fig. 58*);

Un décollement, EFG, de la partie supérieure de l'enduit;

Un décollement, LMN, de la partie inférieure;

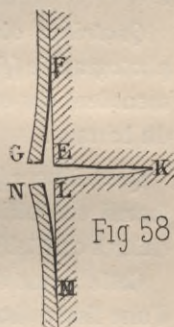
Et que l'eau ait pu séjourner dans ces trois espaces, EKL, EFG, LMN, en s'y chargeant de chaux par délavage du mortier.

Nous allons examiner successivement ce qu'a dû produire l'eau des trois espaces considérés, lors de la vidange du réservoir, après l'accident de 1893.

1° Eau de la fissure horizontale EKL. — Cette fissure s'est matériellement refermée quand la poussée de l'eau a disparu. L'eau qu'elle contenait a donc été expulsée presque instantanément, ce qui explique surabondamment la forme des jets blanchâtres, en cascade, représentés en O (*fig. 57*).

2° Eau emprisonnée dans l'espace EFG. — A partir du moment où l'eau du réservoir est descendue au niveau du point F, l'eau emprisonnée dans l'espace EFG a baissé dans ce milieu, en même temps que l'eau du lac artificiel.

Il y a donc eu mélange entre les deux eaux; et la chaux con-



tenue dans celle de l'espace EFG s'est diluée dans la masse. Elle n'a donc pu laisser sur l'enduit, au-dessous de la fissure EKL, une trace blanchâtre apparente.

3° Eau emprisonnée dans l'espace EMM. — Lors de la fermeture de la fissure EKL, par suite de l'oscillation du mur vers l'amont, l'espace LMN a eu plutôt des tendances à s'ouvrir davantage, et, par suite, à augmenter de volume.

L'eau que contenait cet espace a donc pu y séjourner en totalité; et ce n'est, par suite, pas elle qui a laissé la trace blanchâtre O (*fig. 57*).

En résumé, les jets en question ne peuvent s'expliquer que par la fermeture de la fissure longitudinale EKL.

Quatrième observation, de M. Denys. — Les taches de la photographie (*fig. 57*) peuvent fort bien provenir de l'écoulement lent des eaux d'infiltration dont était imprégnée la masse du barrage.

Quatrième réponse. — Un écoulement de ce genre aurait fourni une série de traits isolés; tandis que les nappes blanchâtres constatées ont un air de cascade très caractéristique.

Cette forme s'explique très bien avec la fermeture brusque d'une fissure horizontale; tandis qu'elle est incompréhensible si l'on admet l'hypothèse de l'écoulement lent des eaux d'infiltration.

Cinquième observation, de M. M. Lévy. — A la fin de sa déposition, M. M. Lévy est revenu sur ce sujet.

D'après lui, mon raisonnement est sans valeur, puisqu'il y a des taches blanchâtres au-dessous de la cote de cassure 361,50.

Cinquième réponse. — Cela prouve que le joint 361,50 n'a pas été le seul à céder, et que l'amont était fendillé en plusieurs endroits.

En résumé, la digue s'est rompue au point où l'amont avait subi la dislocation la plus accentuée.

n) Enfin, pour en terminer avec mon appréciation, je crois

devoir faire remarquer qu'elle concorde parfaitement avec les témoignages des personnes qui ont assisté à la catastrophe.

L'ouvrier Thiriat, dont parle M. Mallez, placé au point 160, a entendu un fort craquement vers le milieu de la digue.

Or, le milieu, point 260, est à 100^m de la position occupée par cet ouvrier, tandis que la brèche profonde BC n'est qu'à 60^m (*fig. 55*).

Pour cet ouvrier, pêcheur habituel du lac de Bouzey et connaissant parfaitement la digue, la confusion n'est pas possible.

D'un autre côté, l'ébranlement a été assez considérable pour ouvrir, à la droite du point 160, une crevasse *a* (*fig. 55*), de 0^m,40 de largeur.

Cela ne s'expliquerait pas avec l'hypothèse du glissement initial de la partie BC; car, ainsi que le montre la *figure 55^{bis}*, la fissure 243 s'ouvrirait vers l'aval, les fissures 221 et 232 étaient presque normales à l'amont. Dans ces conditions, le bloc BC aurait pu glisser sur sa section de cisaillement sans attaquer sérieusement le reste du barrage; et il serait alors impossible d'expliquer la réaction de droite fournissant, à plus de 60^m de la fissure 221, un bris de 0^m,40 de largeur.

Donc la déposition du témoin dont il s'agit correspond bien avec l'hypothèse d'une rupture centrale de la digue, et ne cadre pas avec celle du glissement initial du bloc BC, quoi qu'en dise M. Mallez dans son rapport.

Si nous examinons maintenant la déposition beaucoup plus explicite de M. Gihin, mieux placé pour bien voir, la chose se précise encore mieux; et cette déposition, absolument intéressante, va me permettre de formuler nettement ma pensée.

D'abord, parlons de l'égrènement du sommet.

La digue s'est ouverte à l'amont, dans la partie centrale *mn*; et il en est résulté un soulèvement de cette région, lequel a entraîné la brisure transversale *op* (*fig. 55*).

C'est là le premier craquement entendu par les deux té-

moins, dont la répercussion a produit, à plus de 400^m de là, la crevasse *a*.

Or, le sommet *qr* était fortement dégradé par les dilatations et contractions : parce qu'il constituait le milieu de la digue et celui de la région comprise entre les fissures 243 et 303; et aussi parce que le couronnement est la partie d'un barrage la plus exposée aux variations de température.

Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que la brusque rupture de l'équilibre, coïncidant avec une oscillation rapide vers l'aval, ait projeté comme une fronde la partie supérieure *qr* (*figures 55 et 55^{ter}*); d'autant plus que la masse d'eau mise également en mouvement est venue faire béliet.

C'est ce qui explique la première phase de l'accident; et j'ajouterai même que cette partie de la déposition de M. Gihin est ce qui me fait croire en sa sincérité.

On n'invente pas ces choses-là.

Après cela, la partie droite, comprise entre *op* et la fissure 243, a été renversée en oscillant autour de l'arête *s* (*fig. 55^{bis}*).

On a la preuve de cette oscillation dans l'écrasement du point *s*, tant dans la partie haute de la brèche (CD) que dans la partie basse (BC).

La poussée imprimée par le bloc en question sur la fissure 243 a détaché la partie BC; en transmettant l'effort reçu à la partie droite, qui s'est égrenée presque en même temps jusqu'au point 200.

Le reste a suivi.

Telles sont, en résumé, les réflexions que m'inspirent :

D'une part, l'étude théorique de la question ;

D'autre part, l'examen judicieux des témoignages.

CXXV. — *Opinion émise à l'audience par M. M. Lévy.*

1^o M. M. Lévy déclare d'abord que la rupture a commencé au milieu du barrage. Il rappelle, comme preuve à l'appui, les dépositions des témoins oculaires.

2° Il n'admet pas que les parties AB, CD (*fig. 47*) aient cédé par basculement, par suite d'une déchirure de l'amont.

Il a remplacé la méthode dont se sont servis MM. Buil et Fleury, pour le calcul du cisaillement de la partie BC, par une autre méthode, exposée dans sa communication de 1895 à l'Académie des Sciences. Le résultat a été de déterminer théoriquement la courbe de rupture par cisaillement des parties AB, CD; et le tracé, ainsi obtenu, coïncide avec la cassure véritable.

3° Ce n'est donc pas par une traction de l'amont que la digue a péri, mais bien par cisaillement; ce qui, d'après les calculs de M. M. Lévy, n'entraînait à aucun effort de la région amont.

En conséquence, la maigreur du profil n'entre pour rien dans la rupture du barrage.

4° Comme dernière observation, M. M. Lévy présente la suivante :

On reproche aux ingénieurs de n'avoir pas modéré le remplissage; eh bien! l'abaissement du plan d'eau à la cote 370 n'eût pas sensiblement modifié les conditions de travail de la section de rupture, à la cote 361,50.

Un abaissement de ce genre, quand bien même les besoins du canal eussent permis de le réaliser, n'eût donc pas empêché la catastrophe.

CXXVI. — Réponse de M. Langlois.

1° Je prends acte de la déclaration de M. M. Lévy, au sujet de la région qui a dû céder la première. Sur ce point spécial, nous sommes d'accord.

2° M. M. Lévy nous a présenté seulement les résultats de ses calculs, sans nous en fournir les détails. Je lui ai fait observer que si nous avions opéré de cette façon, dans nos rapports, il eût été en droit de récuser nos conclusions.

Toutefois, admettant que M. M. Lévy a fait des calculs judi-

cieux, je lui ferai remarquer que la courbe théorique à laquelle ils le conduisent (*abc*, *fig. 59*) ne coïncide pas autant qu'il paraît le croire avec la courbe réelle (*abde*, *fig. 59*).

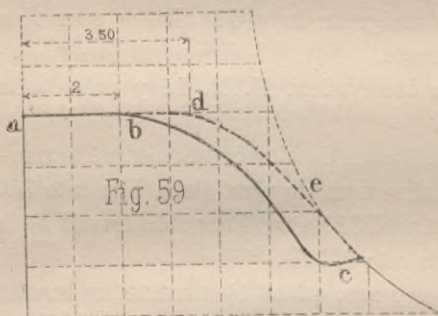
La courbe de M. M. Lévy n'a, en effet, qu'environ 2^m de partie à peu près horizontale; tandis que la courbe réelle, d'après le rapport de M. Mallez et celui de la Commission d'enquête, a une partie droite, *abd*, de 3^m,50.

Je n'appelle pas cela de la coïncidence, la section horizontale à la cote 361,50, n'ayant que 5,094 de longueur totale.

3° M. M. Lévy estime que la rupture des parties AB, CD (*fig. 47*) a eu lieu par cisaillement.

Comparons ces brèches :

D'une part, avec la brèche profonde, qui présente un cisaillement effectué (*fig. 48*);



D'autre part, avec le décollement de la partie restée debout, côté Sanchev, lequel donne un cisaillement pris sur le vif (*fig. 49*).

Nous constatons des différences très caractéristiques, mises en lumière par nos explications de l'article CXVIII, et sur lesquelles, par suite, il est inutile de revenir.

M. M. Lévy conclut en affirmant que les tensions de l'amont ne sont pour rien dans la rupture, et que, par suite, le profil n'était pas trop maigre.

Je lui ai fait observer qu'il n'avait pas toujours été du même avis.

Dans sa communication de 1895, à l'Académie des Sciences, M. M. Lévy concluait, en effet, à la nécessité de donner, à l'amont des barrages, des compressions équivalant à celles

que développerait l'eau dans une fissure horizontale, s'il venait, pour une raison quelconque, à s'en former une.

En d'autres termes, il faudrait, d'après M. M. Lévy :

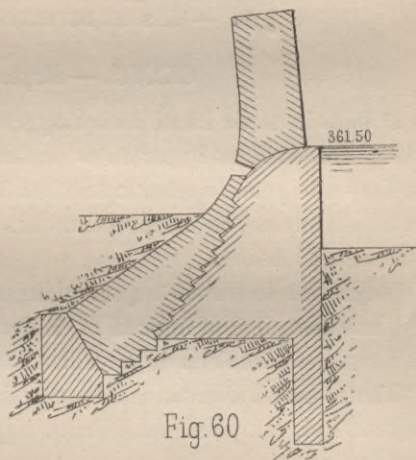
Une compression de 1^{kg}, pour un point situé à 10^m au-dessous de la retenue normale; une compression de 2^{kg}, pour une hauteur de 20^m; de 3^{kg}, pour 30^m, etc.

Je ne suis pas si exigeant, puisqu'une compression même faible me suffit, pourvu qu'elle soit bien assurée.

Dans une circulaire qui a suivi de près la communication dont je parle, le ministre des Travaux publics enjoint aux ingénieurs de refaire des calculs pour les digues de France, en s'inspirant des travaux de M. M. Lévy.

Il ajoute, à l'article suivant :

Si vous trouvez qu'une digue subit des tensions à l'amont, abaissez le plan d'eau et proposez-moi les moyens de consolidation appropriés.



A la lecture de son mémoire, j'avais pensé que M. M. Lévy attribuait à une fissure de l'amont la rupture du barrage de Bouzey; et je m'aperçois que le ministre des Travaux publics avait eu la même impression.

Maintenant, il ne s'agit plus de tout cela, et le cisaillement seul en est cause.

M. M. Lévy serait bien aimable s'il voulait nous indiquer quand et comment il a été amené à changer d'avis.

4^o Quant à la quatrième observation de M. M. Lévy, j'avoue ne pas la comprendre.

Qu'il s'agisse de basculement ou de cisaillement, il faut toujours admettre que la rupture a été produite par la poussée de l'eau. Par conséquent, plus cette poussée est grande, plus il y a de chances de rupture, quel qu'en puisse être le mode.

S'il en était autrement pour le cisaillement, on en arriverait à cette conclusion absurde :

Si l'eau n'avait pas dépassé la cote 361,50, le mur se fût, à cette même cote, cisailé tout aussi bien qu'avec la retenue normale (*fig. 60*).

§ 50. — RÉSUMÉ DU CHAPITRE XIX.

CXXVII. — *Exposé.*

1° Dans la partie haute du barrage, son maigre profil entraînait à des tensions importantes de l'amont, quand le niveau de l'eau atteignait la retenue maxima 371,50; et ces tensions se transformaient en compressions lorsque le niveau du réservoir venait à baisser.

Conditions de travail toujours dangereuses, puisque :

D'une part, il était imprudent de demander à des maçonneries contenant de l'eau de travailler à la traction;

D'autre part, l'alternance fréquente dans les efforts, tensions aujourd'hui, compressions demain, aggravait singulièrement la situation.

2° Les matériaux constitutifs du barrage primitif, surtout le mortier, étaient de médiocre qualité.

Le coefficient de rupture par traction du mortier, 3^{kg},500 environ, n'était pas égal à trois fois le coefficient de travail, 1^{kg},500, qu'imposait en certains points la retenue maxima.

Son coefficient d'adhérence devait aussi être inférieur à celui de traction, 3^{kg},500.

Quant au coefficient de compression, il ne dépassait pas 30^{kg}, chiffre très faible aussi.

La maçonnerie était donc peu faite pour résister aux efforts

de traction dont il a été question plus haut ; et cette infériorité devait encore s'accroître avec le temps, par suite de l'appauvrissement du mortier dû au délavage par infiltration ;

3° Le tracé rectiligne du mur de Bouzey, sur une longueur considérable de 520^m en couronne, venait ajouter encore des effets fâcheux importants à ceux énumérés plus haut.

La dilatation a fatigué beaucoup, en effet, toute la maçonnerie ; surtout dans les parois amont et aval, les premières atteintes par les variations de température.

De nombreuses fissures transversales se sont déclarées dans la digue, mesurant l'importance des efforts moléculaires subis par la masse.

Le bouchage de ces fissures, imposé par les circonstances, est venu encore, dans une mesure très appréciable, augmenter la fatigue des parties superficielles.

Les efforts tranchants et transversaux développés dans les files de la maçonnerie par la dilatation, efforts considérables puisqu'ils ont presque atteint la limite extrême (rupture) dans le voisinage des fissures, avaient en outre la fâcheuse propriété de changer de sens ou de nature avec les saisons.

Tensions pendant l'hiver, les efforts transversaux devenaient des compressions pendant l'été ; dirigés dans un sens durant la saison froide, les efforts tranchants se trouvaient dirigés en sens contraire à l'époque des grandes chaleurs.

Situation absolument et exceptionnellement dangereuse, qui, d'après moi, devait amener fatalement une catastrophe.

4° L'accident de 1884, dû à la mauvaise qualité du terrain de fondation, a provoqué, dans la partie de la digue infléchie transversalement, une fatigue s'accusant par de nouvelles fissures transversales.

Les efforts développés alors dans la maçonnerie, analogues à ceux qu'occasionne la dilatation, ont produit un affaiblissement permanent du barrage, surtout dans les régions amont et aval.

5° Les travaux de consolidation, exécutés après 1884, paraissent avoir bien empêché tout mouvement de translation transversale ultérieur de la digue; mais ils n'ont pas amélioré les conditions de résistance de cet ouvrage, bien au contraire.

Laissant en l'état la partie située au-dessus de la cote 360,50, le mur de renforcement a affaibli, en effet, la partie située au-dessous de cette cote.

De sorte que le barrage de Bouzey était, en réalité, après les travaux de consolidation, moins solide qu'auparavant.

6° C'est dans des conditions aussi précaires que le réservoir a été remis en service, de 1890 à 1895.

Au lieu d'en modérer le remplissage, quitte à être gêné en certains cas exceptionnels pour l'alimentation du canal, on l'a rempli au maximum, fatiguant ainsi à l'extrême un ouvrage de médiocre résistance initiale, affaibli par l'accident de 1884 et la réparation qui l'a suivi, miné sourdement par les infiltrations, et, surtout, par les dilatations et contractions dues aux variations de température.

7° Dans ces conditions, le barrage de Bouzey était à la merci du moindre événement défavorable, lequel s'est présenté, en l'espèce, sous la forme d'un hiver particulièrement long et rigoureux.

CINQUIÈME PARTIE

Conclusions de mon rapport de 1896
et jugement de 1897.

CHAPITRE XX

Conclusions de mon rapport de 1896.

§ 51. — OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES.

CXXVIII. — *Classification de mes conclusions.*

J'ai divisé mon appréciation finale en deux parties distinctes :

- a) *Période de construction et de réparation du barrage ;*
- b) *Période d'exploitation du réservoir.*

CXXIX. — *Suppressions dans le texte relatif à la période d'exploitation du réservoir.*

J'ai déjà exposé comment j'avais été amené à dresser mon rapport de 1896 à Épinal, pour pouvoir le souder à celui de mes collègues.

Or, MM. Brüll et Fleury avaient examiné la question de l'exploitation du réservoir au double point de vue :

- c) *De l'imprudence commise dans le remplissage au complet de cet engin d'alimentation ;*
- d) *De l'inutilité de cette imprudence ;*
- e) *De la question de savoir si cet emplissage intempestif avait été exécuté avec ou sans ordres directs de l'Administration supérieure.*

Sur le premier point : imprudence, je me suis rangé à l'avis de mes collègues ; et mes raisonnements des chapitres précédents viennent certainement confirmer cette appréciation.

Sur le second : inutilité, j'ai d'autant mieux partagé l'opinion de MM. Brüll et Fleury qu'un tableau qu'ils présentaient dans leur rapport m'avait permis d'établir cette inutilité d'une façon péremptoire.

Or, quand j'ai abordé, à l'audience, l'étude particulière de cette question, M^e Poincaré m'a fait observer que les chiffres que je citais avaient été reconnus erronés, lors de l'audition de mes collègues (audition à laquelle je n'assistais pas). MM. Brüll et Fleury, présents lors de ma déposition, n'ayant pas protesté contre l'affirmation de M^e Poincaré, j'ai dû interrompre mon exposé.

Pour cette raison, j'ai supprimé, dans les conclusions relatives à la période d'exploitation, tout ce qui a trait à cette question d'inutilité, sans comprendre, d'ailleurs, n'ayant plus de documents en ma possession, le pourquoi des erreurs signalées par M^e Poincaré.

Je terminerai cette explication par la remarque suivante :

Je n'aurais pas suivi mes collègues dans leur appréciation, s'ils ne les avaient fait précéder de ces mots (rapport Brüll-Fleury) :

« Avant d'aborder cette question (utilité de l'alimentation en pleine charge), nous tenons à bien préciser sa portée. Lors même qu'on estimerait qu'il a été fait du réservoir de Bouzey un usage proportionné rigoureusement aux besoins de l'alimentation du bief, les conclusions que nous avons posées relativement à l'imprudence qu'il y a eu de faire monter l'eau à des cotes élevées subsisterait toujours. Et, à vrai dire, l'état précaire du mur domine toute la question. »

Dans ces conditions, les raisonnements basés sur la question d'utilité ou d'inutilité du remplissage au complet du réservoir ne m'apparaissaient que comme tout à fait secondaires; et la suppression des arguments tirés de l'étude de cette question n'avait pour moi aucune importance.

Tel est encore mon avis : la précarité du barrage dominait et domine encore toute la question.

C'est pour cela que mes conclusions ont été maintenues et que je les ai lues au tribunal, telles qu'elles sont reproduites ici.

Pour en finir avec ces observations préliminaires, je dirai un mot du troisième point : rôle de l'Administration dans l'exploitation du réservoir.

Il est resté établi que c'est sans ordres directs, mais aussi sans observations de l'Administration supérieure, pourtant renseignée, que les ingénieurs ont fait monter l'eau du réservoir de Bouzey jusqu'à la cote maxima 371,50.

§ 52. — PÉRIODE DE CONSTRUCTION ET DE RÉPARATION DU BARRAGE.

CXXX. — *Construction du barrage primitif.*

*a*₁. — *Mauvaise qualité du terrain de fondation.* — L'établissement du barrage de Bouzey sur un terrain perméable, affouillable et par conséquent compressible dans une certaine mesure, a constitué une faute, étant entendu que le mur de garde, sur lequel on comptait pour arrêter les infiltrations, n'a rien arrêté du tout.

Or, cette faute a occasionné l'accident de 1884, lequel a produit dans la digue un affaiblissement, surtout dans les régions amont et aval. Elle a donc eu une action, peut-être très importante, dans la catastrophe de 1895; et la responsabilité qu'elle entraîne doit être partagée entre : les ingénieurs, auteurs des projets de 1876 ; l'Administration supérieure, qui a examiné ces projets.

La faute en question s'aggrave de ce que les renseignements fournis par les ingénieurs, sur les sondages préalables, ne me paraissent pas suffisants.

Cette aggravation doit être répartie entre :

Les ingénieurs, qui n'ont pas fait ce que je considère comme nécessaire ;

L'Administration supérieure, qui s'est contentée des documents fournis par le service local.

a₂. — Suppression presque complète des enracinements de la base du barrage dans le sol de fondation. — Les parafoilles prévus au projet primitif ayant été remplacés par de simples remblais des excavations de la surface d'appui, le mur a été moins bien fixé sur le sol, dans le sens transversal, ce qui a facilité le mouvement de 1884.

Cette modification, apportée en cours de construction, a donc eu une influence indirecte sur la catastrophe.

Cette faute incombe aux ingénieurs de 1876.

a₃. — Médiocre qualité des matériaux. — Au barrage primitif, on a employé des moellons de grès bigarrés qui étaient : peu résistants à la tension et à la compression ; très perméables, et s'affaiblissant à l'humidité ; d'une adhérence assez faible.

On s'est servi de mortier fait avec de la chaux du Theil et du sable de carrière.

Ce dernier élément était argileux, très fin ; il a produit un mortier très perméable et très peu résistant :

A la traction (environ 3^{kg},500 par centimètre carré) ;

A la compression (environ 30^{kg} par centimètre carré) ;

A l'adhérence.

Cette faute a pesé sur l'ouvrage jusqu'à la rupture finale, et on doit l'imputer aux ingénieurs de 1876.

Elle s'aggrave de ce que les essais préalables des matériaux employés ne paraissent pas avoir été faits dans des conditions normales ; et l'Administration supérieure partage, de ce chef, la responsabilité qui en dérive, pour n'avoir pas exigé du servicespécial des procès-verbaux d'essais.

a₄. — Mauvaise condition du tracé rectiligne, avec une longueur de 520^m en couronne ; et effets résultants, dus à la dilatation. —

Le mur de Bouzey, tel qu'il était orienté, a souffert de la dilatation dans des conditions absolument désastreuses, étant donné :

Son profil rectiligne ;

Sa très grande longueur.

Je pense même que c'est aux contractions dues à l'hiver de 1894-95 qu'est due la catastrophe du 27 avril 1895, en tant que cause finale déterminante.

L'exécution d'un barrage droit de cette longueur exceptionnelle a donc constitué la faute la plus lourde que l'on ait commise ; faute partagée entre :

Les ingénieurs, qui ont proposé et appuyé de raisonnements spécieux le tracé rectiligne ;

L'Administration supérieure, qui a approuvé cette disposition sans longue protestation.

a₃. — Maigre profil de la digue. — Les ingénieurs de 1876 ont présenté à l'Administration un profil de barrage dans lequel la courbe des pressions sortait du tiers médian des sections transversales, dans une grande partie de la hauteur du mur ; et en ne calculant que les compressions de la paroi aval. Or :

1^o La position de cette courbe des pressions accusait des tensions à l'amont, et les ingénieurs ne paraissent pas s'en être jamais occupés, ni même préoccupés. Dans tous les cas, aucun calcul n'a été fait au préalable à ce sujet.

2^o La théorie du tiers-médian étant connue depuis longtemps, je ne m'explique pas la façon de faire ci-dessus exposée, étant entendu surtout que la faible résistance des maçonneries à la traction n'était, de son côté, un mystère pour personne.

En résumé, si la digue de Bouzey avait été construite avec des matériaux de premier choix ; si elle avait été de faible longueur, fondée sur le roc et bien orientée, le profil qu'on lui a donné eût été insuffisant.

Dans le cas actuel, il était beaucoup trop faible, puisque :

Les tensions à l'amont atteignaient 1^k,500, tandis que le coefficient de rupture ne dépassait pas 3^k,500 ;

La longueur du mur était considérable;

Le terrain de fondation était perméable, affouillable et, par conséquent, un peu compressible;

L'orientation du barrage était absolument mauvaise.

Aussi, la faiblesse du profil est-elle une des causes de la catastrophe du 27 avril 1895.

La responsabilité de cette faute grave doit se partager entre :

Les ingénieurs de 1876, qui ont fait le projet;

L'Administration supérieure, qui l'a approuvé.

a. — *Exhaussement du barrage à sa cote définitive.* — Fait pour une retenue de 371,50, le mur de Bouzey pouvait fort bien être édifié du premier coup à sa hauteur définitive, cette façon de procéder étant à la fois la plus simple et la plus économique.

Rien ne forçait, d'ailleurs, de remplir le réservoir au maximum.

Aussi, je ne vois, de ce chef, aucune responsabilité à retenir contre les ingénieurs auteurs du projet d'exhaussement, et contre le ministre qui a ordonné l'exécution de cette partie du travail.

CXXXI. — *Restauration du barrage, après l'accident de 1884.*

b. — *Insuffisante restauration du barrage.* — Le mur de renforcement, exécuté d'après les instructions du Conseil général des Ponts et Chaussées et les ordres directs de l'inspecteur général de la circonscription, n'a eu pour effet que d'empêcher tout mouvement ultérieur de translation transversale du barrage.

Il n'a pas consolidé la partie de la digue située au-dessus de la cote 360,50; et il a affaibli un peu celle située au-dessous de ce point.

La restauration du barrage, exécutée dans ces conditions, a donc été absolument insuffisante.

La responsabilité en incombe à l'Administration supérieure, les ingénieurs d'Épinal n'étant pour rien dans le projet adopté; et ayant exécuté le travail dans de bonnes conditions, en pre-

nant même la précaution de remplacer le mauvais sable de carrière, de la digue primitive, par du sable délavé de Moselle, de bien meilleure qualité.

§ 53. — PÉRIODE D'EXPLOITATION DU RÉSERVOIR.

CXXXII. — *Emplissage exagéré du réservoir.*

*c.*₁. — *Position de la question.* — De 1891 à 1895, les ingénieurs ont rempli le réservoir de Bouzey presque complètement, en lui donnant en réserve une contenance d'eau de 7 millions de mètres cubes environ.

Si nous rapportons les cotes de 371,50, 370, à celle moyenne 361,50, de la grande cassure du 27 avril 1895, nous voyons que la hauteur d'eau agissant sur cette section moyenne est :

Dans le premier cas, de 10^m;

Dans le second, de 8^m,50 seulement.

Or, les moments de renversement, qui produisent les tensions de l'amont, sont proportionnels aux cubes des hauteurs : soit, dans l'espèce, à :

$$10^3 = 1000;$$

$$8^3,5 = 614,125.$$

On voit donc que le moment correspondant à la cote 370 n'est que les 6/10^{es} de celui fourni par la retenue maxima de 371,60; et qu'un abaissement de 1^m,50 dans le niveau de l'eau du réservoir pouvait avoir une influence considérable sur les efforts développés à l'amont, à la cote moyenne du seuil de la partie importante de la brèche.

Aussi, les calculs de l'annexe n° 6 (VI^e partie) montrent que, pour une densité de 2.000^{kg}, le coefficient de - 1^{kg},145 (tension), provoqué par la retenue maxima, devient + 0^{kg},344 (compression), lorsque le niveau descend à la cote 370.

Étant donnée la faiblesse initiale de la maçonnerie et sa fatigue progressive, une tension de plus de 1^{kg} à l'amont devait forcément y produire une fissure longitudinale, entraî-

nant à la formation d'une nouvelle force de renversement; tandis qu'avec une compression, même très faible, ce danger se trouvait écarté.

c₂. — *Faute d'exploitation.* — Il résulte de ce qui précède que l'on a commis une faute lourde en emplissant le réservoir de Bouzey à sa cote maxima.

La responsabilité en incombe :

Aux ingénieurs, qui l'ont commise;

A l'inspecteur général de la circonscription, qui l'a laissée commettre.

Cette faute, selon moi, serait sans excuse, si l'Administration des Ponts et Chaussées avait parfaitement connu, avant la catastrophe, le mécanisme de la dilatation dans un barrage droit de 520^m de longueur, orienté dans d'aussi mauvaises conditions que celui de Bouzey.

Elle en eût alors redouté les effets de destruction relativement rapide, et l'on ne se fût servi du réservoir qu'avec une grande prudence, surtout pendant et après un hiver long et rigoureux comme celui de 1894-95.

Mais l'Administration supérieure appréciait mal le rôle de la dilatation; et les ingénieurs, ainsi que l'inspecteur général de la circonscription, ont pu se laisser gagner par une confiance croissant avec le temps.

A mon avis, cette considération doit atténuer, dans une très large mesure, leur responsabilité.

CXXXIII. — *Surveillance.*

d₁. — *Position de la question.* — En visitant la digue de Bouzey plus souvent qu'ils ne l'ont fait, dans la période d'exploitation précédant la catastrophe du 27 avril 1895, les ingénieurs auraient-ils pu prévoir, et par conséquent prévenir, ce douloureux événement?

A cela, je répons catégoriquement non.

Ils auraient habité Bouzey, et visité le barrage tous les jours,

qu'ils n'auraient pas été mieux renseignés sur le travail intérieur qu'y développait l'action combinée des charges et de la dilatation.

C'est l'amont de l'ouvrage, dans la partie toujours recouverte d'eau, que ce travail intérieur minait sourdement; c'est par là que la destruction a commencé; et la rupture finale, survenue avec une soudaineté remarquable, a dû se produire sans signes précurseurs appréciables.

On eût pu deviner le danger; il était impossible d'en apercevoir les prodromes.

Il n'y a donc, d'après moi, aucune responsabilité à retenir du fait de la surveillance.

CHAPITRE XXI

Jugement du 28 mai 1897.

§ 54. — EXPOSÉ.

CXXXIV. — Le tribunal correctionnel d'Epinal a rendu, le 28 mai 1897, en audience publique, le jugement suivant :

Attendu que la loi du 24 mars 1874 autorisa l'établissement d'une grande voie destinée à relier la Meuse à la Saône et à faire communiquer l'Océan à la Méditerranée;

Que l'exécution de ce travail a nécessité notamment la création du canal de l'Est dans les départements des Ardennes, de Meurthe-et-Moselle, des Vosges et de la Haute-Saône, d'un bief de partage sur les Faucilles et d'un réservoir à Bouzey;

Que, d'après le projet définitif adopté par le ministre des Travaux publics le 12 février 1887, le réservoir à la cote 371,50, qui correspond à une retenue d'eau de 7 millions de mètres cubes, mais provisoirement à la cote 369,50, avec une retenue de 4.000.768^m³, jugée suffisante pour un certain nombre d'années, la digue serait rectiligne et aurait en couronne une longueur de 520^m;

Que pendant les travaux les ingénieurs proposèrent d'élever immédiatement la digue à sa hauteur définitive, c'est-à-dire à la cote 371,50; que le Conseil général des Ponts et Chaussées signala que les besoins de la navigation n'exigeaient pas cet exhaussement, et émit l'avis qu'il n'y avait pas lieu de l'accepter; que le ministre, au contraire, l'approuva et annonça sa décision au préfet des Vosges par une dépêche du 13 septembre 1880, ainsi conçue: « En ce qui concerne l'exhaussement de la digue, MM. les ingénieurs font connaître que ce travail aurait pour résultat d'augmenter de 2.300.000^{m³}, ou de 50 0/0 la capacité actuelle du réservoir, qui est de 4.700.000^{m³}, et présenterait par suite de grands avantages au point de vue de l'alimentation. Ils ajoutent que cet exhaussement pourrait être exécuté économiquement par les entrepreneurs actuels, les sieurs Mayoux et Defuides, qui se sont engagés par une soumission, en date du 24 juillet 1880, à s'en charger aux prix et conditions de leur marché, en renonçant d'ailleurs au bénéfice de l'article 30 des clauses et conditions générales.

» La dépense qu'entraînerait ce travail est évaluée à 108.601 fr. 32 c., y compris une somme à valoir de 15.386 fr. 26.

» D'après les explications qui précèdent, j'approuve, Monsieur le Préfet, la proposition de MM. les ingénieurs »;

Que les travaux, entrepris en 1878, furent terminés en 1880 et que l'on commença le remplissage au mois de novembre 1881, un an après l'achèvement des maçonneries;

Que le 14 mars 1884, lorsque la retenue était à la cote 368,80, la digue se détacha brusquement du mur de garde et s'avança vers l'aval, sur une longueur de 135^m;

Qu'en recherchant les causes de cet accident, on découvrit que le sol des fondations était broyé et disloqué sur 2 à 3^m de hauteur; qu'il existait au pied de la digue, en amont, une fissure horizontale de 93^m de longueur; dans le corps des maçonneries, en amont et en aval, plusieurs grandes fissures, et notamment au point 243, une fissure verticale qui traversait

le mur, et une fissure oblique qui s'en détachait et qui présentait, vers la cote 360,50, une petite partie horizontale; que la digue avait pris, dans la partie centrale, une flèche de 0^m34; que plusieurs projets de consolidation furent discutés, et entre autres, celui de MM. Denys et Hausser, comportant l'établissement d'un remblai à l'aval; que le ministre approuva, le 12 juillet 1888, le plan de M. Dupuy, qui consistait dans la construction à l'amont, d'un solin, et à l'aval, d'un massif de buttée; que toutes les fissures devaient être bouchées, en ouvrant préalablement les plus étroites, à l'aide de coulis de ciment ou de mortier; que les travaux furent exécutés de 1888 à 1889, à l'exception de ceux concernant les fissures, qui, à raison de leur faible dimension, refusaient le coulis et durent être bouchées au moyen de corde goudronnée et de picots; qu'on commença le remplissage le 18 novembre 1889 et qu'on le continua jusqu'au 15 mai 1890, où les eaux atteignirent la cote 371; qu'à partir de cette époque le réservoir est entré en service normal et a servi chaque année à l'alimentation du canal de l'Est; que le niveau des eaux a toujours été porté à la cote 371,50, sauf en 1895, où il est resté à la cote 371,40;

Que les réparations de 1888-89 avaient consolidé la partie inférieure de la digue, mais laissé à découvert la partie supérieure, qui s'écroula subitement le 27 avril 1895, à 5 h. 45 m. du matin;

Que le glissement de 1884 n'a été qu'un accident; que l'écroulement de 1895 devint une catastrophe;

Que, par ordonnances des 17 mai, 5 et 12 juin 1895, le juge d'instruction commit MM. Brüll, Fleury et Langlois, ingénieurs civils à Paris, à l'effet de rechercher les causes de cette catastrophe; que les experts ont consigné le résultat de leurs opérations dans les rapports des 20 janvier 1896 et 20 février 1896;

Qu'ils ont constaté que la digue s'est brisée dans sa partie centrale vers la cote 361,50 à une hauteur moyenne de 10^m,50

et une longueur d'environ 170^m; que, d'après eux, la rupture a été occasionnée par la traction que le niveau de l'eau portée à la cote 371,50 a provoquée dans le parement amont aux abords des cotes 360,50 et 361,50 et qu'elle aurait été évitée si MM. Denys et Hausser n'avaient pas fait monter l'eau à la cote maxima immédiatement après l'achèvement des travaux de 1888-89 et ne l'y avaient pas maintenue les années suivantes;

Qu'il convenait d'autant plus, ajoutent-ils, de procéder à ces remplissages avec plus de précaution que les besoins de la navigation n'exigeaient pas un volume de 7 millions de mètres cubes d'eau et que tout le massif se trouvait dans un état de précarité des plus inquiétants;

Que le ministère public prétend en conséquence, dans son réquisitoire écrit, qu'après les travaux de 1888-89, l'exploitation et l'utilisation du réservoir de Bouzey ont été mal conduites pendant les trois années qui ont précédé la catastrophe, par MM. Denys et Hausser, ingénieur en chef et ingénieur ordinaire, du département des Vosges, et mal surveillées par MM. Holtz et Henry, inspecteurs généraux de la IV^e division; que, par leur imprudence, inattention et négligence, ces quatre prévenus se sont involontairement rendus les auteurs d'homicides sur quatre-vingt-cinq victimes, ou en ont été involontairement les causes, et encourent les dispositions de l'article 319 du Code pénal;

Que, pour que l'article 319 soit applicable, il faut :

1^o Que l'imprudence, l'inattention ou la négligence imputées aux prévenus constituent une faute, et 2^o qu'elles aient été directement ou indirectement la cause de ces homicides.

En ce qui concerne MM. Denys et Hausser :

Attendu qu'il résulte de l'instruction et des débats que MM. Denys et Hausser, en faisant remplir le réservoir jusqu'à la cote 371,50 pendant les trois années qui ont précédé la catastrophe, se sont acquittés d'une charge de leurs fonctions, qu'ils l'ont remplie avec toutes les précautions que compor-

ait le service auquel ils étaient préposés, et qu'ils n'ont, dès lors, commis aucune faute;

Que les fonctions de l'ingénieur en chef sont déterminées par l'article 13 du décret du 7 fructidor an XII;

« Qu'ils sont chargés du Service des canaux, de la direction et de l'exécution des travaux concernant l'Administration des Ponts et Chaussées »; celle de l'ingénieur ordinaire par l'article 14 d'après lequel « ils sont chargés de suivre et de faire exécuter, sous les ordres de l'ingénieur en chef, les travaux des Ponts et Chaussées »;

Que M. Denys devait, par conséquent, diriger et M. Hausser faire opérer les remplissages du réservoir de Bouzey, en vue de l'alimentation du canal de l'Est;

Que, depuis la décision ministérielle du 13 septembre 1888, qui a prescrit d'élever immédiatement la digue à sa hauteur définitive, la cote 371,50, correspondant à un volume de 7 millions de mètres cubes d'eau, est devenue la cote normale, c'est-à-dire celle que devaient viser les ingénieurs; que les experts se trompent, dès lors, en admettant que la cote primitive (369,50) était, malgré l'exhaussement de 2^m en 1880, restée la cote normale; que, s'il pouvait y avoir le moindre doute à ce sujet, il serait levé par le fait du déversoir qui se trouve à la cote 371,50, et qui prouve par un signe matériel, apparent et indiscutable, que la cote normale est bien la cote 371,50, et non plus la cote 369,50; que la cote 371,50 est d'ailleurs inscrite dans tous les actes officiels tels que comptes moraux, états de navigabilité et comptes d'inspection, comme la cote normale du réservoir;

Que les experts interrogés sur le point de savoir à quelle cote au-dessous de la cote normale les ingénieurs auraient dû s'arrêter pour conjurer tout danger, ont loyalement déclaré qu'ils ne pouvaient répondre à cette question; qu'on ne saurait donc reprocher à M. Denys d'avoir visé la seule cote qui lui était

naturellement indiquée, celle de la loi, s'il n'y avait de sécurité nulle part et du danger partout;

Attendu qu'après l'achèvement des travaux de consolidation, le 12 août 1889, M. Dupuy vint à Épinal et fixa avec M. Denys le remplissage au mois de décembre 1889; qu'il fut commencé dès le 18 novembre 1889; que la montée journalière de l'eau fut en moyenne de 0^m,18 pendant les mois de novembre et de décembre 1889, de 0^m,8 pendant le mois de janvier 1890, et ensuite de 0^m,5; que lorsque l'eau atteignit le 6 février 1890, la cote 368,80 à laquelle s'était produit l'accident de 1884, M. Denys en informa M. Dupuy par lettre et alla ensuite lui demander à Paris s'il fallait se tenir à ce niveau ou le dépasser; qu'ils furent d'avis de poursuivre le remplissage, sauf à s'arrêter une dizaine de jours, quand l'eau se trouverait à la cote 370;

Que M. Dupuy instruisit le ministre de cette résolution par une lettre du 18 février 1890 qui porte :

« Je considère, comme M. Denys, que la situation est normale, et je ne vois pas d'inconvénients à laisser monter les eaux à la cote 370 »; que le 15 mai 1890, le niveau atteignit la cote 371, inférieure de 0^m,50 seulement à la cote maxima, et qu'à cette date commença l'exploitation normale du réservoir; que le 12 juillet 1890, M. Dupuy revint à Épinal et vit l'eau à la cote 371; qu'il informa également le ministre de cette visite par une lettre du 13 juillet 1890, où il dit :

« J'ai visité Bouzey le 12 juillet 1890, les eaux se sont élevées à 0^m,50 au-dessous de la côte maxima. Le réservoir paraît donc fonctionner régulièrement »; que cette lettre est le dernier acte de M. Dupuy; que la réception définitive des travaux de Bouzey fut faite le 19 novembre 1890, et qu'à partir de cette époque le réservoir, entré, depuis le 15 mai 1890, en service normal, ne figure plus sur les comptes moraux;

Que, de 1891 à 1895, le niveau de la retenue a toujours atteint la cote maxima, sauf en 1895, où il est resté à 0^m,10

au-dessous; que M. Holtz a visité deux fois le réservoir et a trouvé l'eau, en 1891, à la cote 371,50; en 1893, à la cote 369,60; que M. Henry l'a visité en 1894 et a vu le niveau à la cote 371,50.

Qu'ainsi, avant le commencement de l'exploitation, M. Denys n'a fait procéder à aucun acte de remplissage par M. Hausser, sans être assisté ou conseillé par M. Dupuy, et sans que le ministre fût, à tout moment, soit par des lettres, soit par les comptes moraux, les états de navigabilité et les comptes d'inspection, instruit de la cote presque journalière des retenues, et qu'ensuite, durant tout le temps de son exploitation, il n'a fait que maintenir les eaux aux cotes déjà atteintes pendant quatre années consécutives, sinon avec le concours de MM. Holtz et Henry, les successeurs de M. Dupuy, du moins à leur connaissance et, dans tous les cas, avec l'approbation tacite du ministre toujours exactement renseigné par les états de navigabilité et les comptes d'inspection sur le régime des cotes du réservoir;

Attendu que, si M. Denys s'est appliqué, pendant tout le temps de son exploitation, à faire remplir le réservoir jusqu'à la cote 371,50, c'est pour satisfaire aux besoins de la navigation qui, d'après lui, exigeait une retenue d'au moins 7 millions de mètres cubes d'eau; que les ingénieurs de 1876 avaient évalué le mouvement de la navigation pour les premières années à 600.000^t, et pour les suivantes à un million et le volume d'eau nécessaire dans le premier cas à 4.768.000^{m³} à la cote 369,50. et, dans le second cas, à 7 millions à la cote 371,50;

Qu'aujourd'hui le trafic n'a pas dépassé 500.000^t et qu'il semblerait qu'un volume de 4.768.000^{m³} d'eau à la cote 369,50 suffirait pour l'alimentation du canal, mais que, lorsque les ingénieurs de 1876 ont évalué le volume d'eau nécessaire à la navigation, ni le réservoir, ni les biefs, ni la rigole d'amenée n'étaient terminés et qu'ils se sont trompés dans l'estimation des pertes par suite d'envasement, d'évaporation, d'imbibition,

de rupture de berge, de sécheresse et autres cas fortuits et de force majeure; que MM. Denys et Hausser prétendent en conséquence que, bien que le trafic reste au-dessous de 500.000^t, ils ont néanmoins besoin de 7 millions de mètres cubes d'eau pour le service du canal ;

Que les experts soutiennent, au contraire, qu'avec un volume de 4,768,000^m³ d'eau, ils subviendraient à tous les besoins, en ayant soin d'abaisser le mouillage des biefs à 2^m; que le remplissage du réservoir et le mouillage des biefs sont, en effet, deux opérations solidaires, puisque plus le mouillage est élevé, plus la consommation d'eau augmente; mais que les experts se méprennent sur les droits des ingénieurs relativement au mouillage; qu'une loi du 31 juillet 1879, qui est spécialement applicable au canal de l'Est, fixe le mouillage à 2^m,20 et que le code officiel de la navigation porte également que le mouillage du canal de l'Est est de 2^m,20; qu'en l'absence de tous cas fortuits ou de force majeure, les ingénieurs ne sont donc pas autorisés à abaisser le mouillage, sans avoir préalablement obtenu l'autorisation du ministre, et que cette autorisation aurait inévitablement été refusée à MM. Denys et Hausser, soit en 1890, soit surtout les années suivantes, alors que la digue ne présentait nulle part aucun signe d'affaiblissement; que MM. Denys et Hausser sont d'autant plus tenus d'observer le mouillage légal de 2^m,20 que toutes les voies de navigation avec lesquelles correspond le canal de l'Est ont également un mouillage de 2^m,20; qu'il faut dès lors admettre avec eux que le volume tout entier de 7 millions de mètres cubes d'eau n'est pas trop considérable pour subvenir à tous les besoins de la navigation; qu'en 1892 et 1893 ou, par l'effet de l'abaissement du niveau de la Moselle et de la rareté des pluies, le réservoir a été rempli difficilement, MM. Denys et Hausser ont été obligés de descendre exceptionnellement, et pour quelques mois seulement, le mouillage à 2^m et 1^m,90; qu'ils ont conservé, grâce à cette mesure, après une retenue de 7 mil-

lions de mètres cubes d'eau, un excédent de 2.206.000^{m³} en 1892, et un excédent de 1.528.000^{m³} en 1893. Mais qu'il est évident que, s'ils avaient maintenu, conformément à la loi, le mouillage à 2^m,20 et si un accident était survenu, ils se seraient trouvés en présence d'un déficit et que la navigation aurait été interrompue; que des bateaux d'un tirant d'eau de 1^m,60 ont, au surplus, éprouvé des retards de trente-six heures en 1893, par suite de l'abaissement du mouillage à 2^m.

Que l'expérience des années 1890 à 1895 sur lesquelles les experts s'appuient pour soutenir leur opinion, ne pouvait naturellement pas servir à MM. Denys et Hausser; qu'on ne saurait dès lors, en bonne justice, non plus la leur opposer;

Que M. Denys désirait épargner, en tous temps, des chômages à la batellerie, et des dépenses supplémentaires d'alimentation artificielle, comme celle de 1884 et 1888, à l'État, et qu'il était loin de sa pensée, qu'en faisant emmagasiner, à cet effet, le plus grand volume d'eau possible dans le réservoir, il travaillait à sa ruine et commettait la plus grande des imprudences.

Attendu que non seulement MM. Denys et Hausser ont fait procéder aux remplissages du réservoir conformément à la loi et suivant les exigences de la navigation, mais qu'ils ont multiplié autour d'eux les moyens de précaution destinés à prévenir tout danger;

Qu'à l'aide d'un tube piézométrique, ingénieusement composé par M. Denys, un agent notait tous les jours la pression des infiltrations venant du réservoir, sous la fondation du barrage; qu'une lunette méridienne et des jalonnets servaient une ou plusieurs fois par jour, à observer les mouvements de la digue; que les fissures étaient l'objet d'une surveillance toute spéciale; qu'aucune nouvelle ne s'était ouverte depuis 1884, dans la partie visible du réservoir; que le préposé de l'établissement de pisciculture disposait d'un téléphone et d'un télégraphe Morse communiquant avec les bureaux de M. Hausser, pour expédier, soit le jour, soit la nuit, toutes les dépêches

utiles; qu'on cassait régulièrement la glace le long du mur à l'aval, et qu'une barque frayait chaque matin un passage en amont qui ne se recouvrait, la nuit, que d'une couche de glace de 0^m,03 à 0^m,04 d'épaisseur; que des agents et des ouvriers circulaient journellement sur la plate-forme; que les dernières vérifications d'alignement ont été faites par M. Denys le 15 avril 1895, par M. Hausser le 23 avril 1895, c'est-à-dire cinq jours avant la catastrophe, et par le garde Claudon, le 27 avril 1895, vers cinq heures et demie, c'est-à-dire une demi-heure avant la catastrophe; que le nombre des visites faites par MM. Denys et Hausser à Bouzey a paru trop restreint aux experts. Mais que tous leurs transports n'ont pas été inscrits sur les livres, et qu'il faut ajouter à ceux qui sont mentionnés ceux qui n'ont pas eu Bouzey pour objet, et où ils ont visité le réservoir, à l'aller ou au retour d'un autre voyage.

Qu'aussi les experts reconnaissent, qu'aucun signe précurseur n'avait pu, de 1890 à 1895, révéler à MM. Denys et Hausser l'imminence d'un danger; que l'état des fissures ne s'était pas aggravé; que la fissure oblique à la cote 360,50 et la fissure horizontale à la cote 361,50 étaient, en tout temps, couvertes par les eaux, et échappaient aux regards des agents qui surveillaient la digue;

Que la fissure verticale au point 243, qui laissait passer le plus d'eau s'était déjà, comme chaque année, refermée vers le 14 avril 1895; que ni le 27 avril 1894, ni auparavant, aucun mouvement n'a été relevé dans la partie inférieure du massif, ni aucune flèche dans la partie supérieure; que M. Langlois dit même que si les ingénieurs avaient établi leur résidence sur la digue, ils n'auraient rien surpris d'anormal;

Qu'en résumé, M. Denys devait tendre à la cote 371,50 parce qu'elle était la cote normale, parce qu'avec cette cote seulement, il obtenait un volume d'eau suffisant pour assurer la navigation;

Que si, par l'effet d'une seconde vue, il avait pu seulement

concevoir quelque inquiétude sur la stabilité du massif, il eût évidemment été de son devoir de garantir les intérêts de la sécurité publique avant ceux de la navigation. Mais que rien ne lui permettait d'avoir à cet égard le moindre doute ;

Que l'on n'aurait donc pas compris qu'il hésitât, en 1891, à tenter la pleine charge, et que l'on eût bien moins compris, encore, qu'après avoir si bien réussi dans cette opération, il n'eût pas osé la continuer les années suivantes.

Attendu que les experts prétendent que la digue, lorsque le réservoir est entré en service normal, se trouvait dans un état de précarité tel que la moindre imprudence dans son exploitation devait accélérer sa ruine ;

Que ce grief n'est pas fondé ; que le terrain de fondation était perméable et non incompressible ;

Mais qu'après l'accident de 1884, les travaux exécutés en 1888 et 1889, l'ont si énergiquement consolidé qu'il n'a pas bougé dans la tourmente de 1896 ;

Que si le grès bigarré des Vosges est sujet à infiltrations, celui qu'on a employé à Bouzey était le plus résistant de la région ; que la chaux du Theil, qui a servi pour les mortiers, est estimée comme la meilleure dans tous les pays et que l'on y a mélangé du sable fin plutôt que du gros sable, pour rendre les maçonneries plus imperméables ;

Que les blocs qui gisent aujourd'hui aux endroits où la violence des eaux les a précipités attestent, de la manière la plus claire, l'excellence des maçonneries ; que la vallée de l'Avière, qui est très large, ne comportait qu'un barrage rectiligne ; que la courbe, qui aurait eu 520^m d'étendue, se serait tellement rapprochée de la ligne droite, qu'elle n'eût procuré aucun supplément de résistance aux maçonneries ; qu'il n'existe dans le monde entier, pas un seul barrage curviligne de 500^m ;

Que le plus long, celui de Gileppe, en Belgique, n'a que 235^m ;

Que le profil de la digue a été calculé d'après les méthodes

de MM. Guillemain, Delocre et Bouvier, les seules en usage en 1876; que la catastrophe de 1895 a conduit les hommes de science à découvrir de nouvelles règles, ayant une portée plus générale et déterminant avec plus de sûreté les coefficients de traction et de résistance. Mais que MM. Denys et Hausser ne connaissaient évidemment que les anciennes, et que leur valeur incontestée, jusqu'alors, ne devait pas faire de doute dans leur esprit. Que si le profil de Bouzey avait d'ailleurs été aussi précaire qu'on l'assure, surtout depuis l'effondrement de 1895, non seulement la digue n'aurait pas tenu quatre ans, mais elle se serait écroulée dans la période du premier remplissage. Que le profil du barrage de Ternay supporte des efforts à l'extension supérieurs à ceux de Bouzey et qu'il paraît des plus solides;

Qu'au cinquième Congrès de navigation intérieure de 1892, M. Denys a présenté un mémoire avec les profils et l'historique de Bouzey, et qu'aucun des ingénieurs qui assistaient aux séances n'a formulé une observation exprimant des craintes;

Que plusieurs projets ont été présentés en 1887 et 1888 pour les déformations de 1884; que M. Gauckler proposa, notamment, l'édification, à l'aval, de quatre grands contreforts; que M. Denys, insista vivement pour l'établissement, à l'aval, d'un remblai de 10^m de largeur en crête, arasé à 4^m en contre-bas du couronnement, et M. Dupuy à la construction, à l'amont, d'un solin, et à l'aval, d'un sommier et d'un massif de butée en maçonnerie. Que ce dernier projet a été adopté par le Conseil général des Ponts et Chaussées, et sanctionné par M. le ministre le 12 juillet 1888. Que les contreforts et le remblai auraient eu pour effet de renforcer la digue tout entière, de la base au sommet; mais qu'il résulte des discussions qui eurent lieu que MM. Gauckler et Denys entendaient, tout autant que M. Dupuy, consolider surtout le pied du mur qui seul avait été disloqué et prévenir un nouveau glissement des fondations.

Que, bien que M. Denys ait été ému du rejet de son projet,

il se soumit cependant à la décision ministérielle et présida loyalement à l'exécution du plan de M. Dupuy. Que les travaux qu'il dirigea ont été si bien faits que le pied de la digue n'a pas même été ébranlé dans la catastrophe du 27 avril ;

Que les experts estiment que ces opérations ont été insuffisantes puisqu'elles s'arrêtaient à la cote 360,50, vers la région où la rupture s'est produite, et que M. Denys, qui n'a jamais dû partager la confiance de M. Dupuy, a donc commis une imprudence en infligeant à la digue la pression énorme de 7 millions de mètres cubes d'eau. Que rien ne prouve que M. Denys, qui se préoccupait comme M. Dupuy du pied de la digue plutôt que de son sommet, ne s'est pas rendu compte, au fur et à mesure de l'avancement des travaux, de la supériorité du projet de son inspecteur général et qu'il n'ait pas fini par être complètement rassuré sur son efficacité.

Que la haute compétence de M. Dupuy, que ses collègues appelaient « le grand maçon », a pu sans peine opérer cette conversion. Qu'il est donc bien certain que M. Denys, lorsqu'il a prescrit en 1890, après s'être concerté avec M. Dupuy, le remplissage du réservoir jusqu'à la cote 371,50, était aussi convaincu que M. Dupuy que le massif ne courrait aucun danger, et que cette conviction s'est naturellement fortifiée au fur et à mesure qu'il constatait que la digue ne prenait pas de flèche et qu'elle ne donnait pas la plus petite marque de fatigue ; que loin de redouter le moindre péril, il devait se croire, comme il le dit, « en présence d'un succès complet » ;

Que le bouchage des fissures à l'aide de cordes goudronnées et de picots en bois, qui a été employé par M. Denys, est usité dans les bassins houillers des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Que le mode prescrit par le Conseil général des Ponts et Chaussées n'ayant pas réussi, à cause de l'étroitesse des fissures qui refusait promptement le coulis de ciment ou de mortier, M. Denys a bien été obligé de recourir à un autre

et que le picotage n'a exercé aucune influence défavorable sur la solidité de la digue.

Que, dans de pareilles conditions, le fait par MM. Denys et Hausser d'avoir porté, de 1892 à 1895, la retenue des eaux du réservoir à la cote 371,50 ne constitue évidemment pas une faute.

Sur la seconde condition :

Qu'il n'est pas établi que l'imprudence, l'inattention ou la négligence imputées à MM. Denys et Hausser aient été directement ou indirectement la cause des homicides ;

Que les opinions, soit des experts, soit des témoins, sur les causes de la catastrophe sont partagées ;

Que les experts déclarent que la digue a succombé aux sous-pressions produites par l'eau qui s'était introduite dans les fissures obliques et horizontales aux cotes 360,50 et 361,50. Que la fatigue progressive imposée à la digue par la retenue maxima du réservoir, a aggravé ces sous-pressions jusqu'au moment où la résistance du mur a été vaincue et où le massif s'est écroulé ;

Que, d'après M. Mallez, l'exhaussement de 2^m en 1880 serait la cause la plus importante de la catastrophe. Qu'à dater de cette époque, la courbe des pressions se rapprochait beaucoup du parement d'aval, au point de passer à 1^m seulement de ce parement vers la cote 361. Que les efforts d'extension qui en sont résultés ont fini par soulever la partie de mur la plus fatiguée et la culbuter ;

Que M. Maurice Lévy prétend que les mortiers du parement aval se sont désagrégés sous l'action des gelées de 1894-95, au point où s'arrêtait le massif de la buttée et où l'ancien mur n'était plus garanti contre les rigueurs de l'hiver. Que la partie du mur qui se trouvait au-dessus de ces mortiers a glissé sur sa base affaiblie, s'est abattue et a ouvert la voie au torrent. Que, dans cette explication, le remplissage du réservoir est étranger à la catastrophe qui se serait produite aussi bien avec une retenue à la cote 369,50 et au-dessous qu'à la cote 371,50 ;

Que, suivant la Commission spéciale des Ponts et Chaussées, les maçonneries de la digue étaient opposées à des efforts de traction qui ont dépassé leur force de résistance, à cause du défaut d'adhérence des maçonneries exécutées en 1880 avec celles de 1879; qu'il s'est produit, par suite de ce défaut d'adhérence, une longue fissure horizontale au point de reprise des maçonneries, et que ce sont les sous-pressions déterminées par la fissure oblique au point 360,50 et par cette longue fissure horizontale qui ont amené la catastrophe (Procès-verbal de la séance du 11 septembre 1895 relatif à un projet de loi ayant pour but l'ouverture d'un crédit de 5.200.000 francs pour les réparations des dommages résultant de la rupture du réservoir de Bouzey);

Que le Conseil général des Ponts et Chaussées conclut que c'est tout d'abord l'exhaussement de 2^m en 1880, réalisé contrairement à son avis du 1^{er} septembre 1880 et ensuite l'existence des fissures qui se sont produites postérieurement, et spécialement la fissure horizontale due au défaut de liaison des maçonneries de 1879-1880 qui sont les principales causes de la catastrophe;

Que la plus grande incertitude continue ainsi à régner sur les causes de la catastrophe et qu'elle ne paraît pas près d'être dissipée, puisque M. Langlois n'a pas craint d'affirmer « que tous ces systèmes ne sont que de pures hypothèses exclusives de toute vérité judiciaire et dont Dieu le Père seul connaît le dernier mot »;

Mais que le tribunal n'a pas à s'immiscer dans ces controverses, et qu'il peut légitimement abandonner aux hommes de science la poursuite des solutions qui font défaut. Que, puisque les faits d'imprudence, d'inattention ou de négligence relevés contre MM. Denys et Hausser ne sont pas des fautes, l'une des conditions essentielles à la constitution du délit d'homicide par imprudence manque dans l'espèce et qu'il est dès lors inutile de vérifier l'autre.

En ce qui concerne les inspecteurs généraux :

Attendu qu'il résulte de l'instruction et des débats que MM. Holtz et Henry n'ont pas commis d'actes d'imprudance, d'inattention ou de négligence dans l'exercice de leurs fonctions ;

Qu'aux termes de l'article 12 du décret du 7 fructidor an XII, les inspecteurs généraux sont chargés « d'inspecter et de surveiller, dans leur division, le matériel et le personnel de toute l'Administration. Ils font toutes les tournées générales ou particulières nécessaires à cet effet. Ils inspectent les ingénieurs en chef, les ingénieurs ordinaires et les conducteurs, visitent les travaux et contrôlent les registres et papiers relatifs à la comptabilité. Qu'en conformité de cette disposition, le service des inspecteurs généraux a été organisé comme suit : « Ils résident à Paris. Pendant neuf mois, ils prennent part à toutes les délibérations du Conseil général des Ponts et Chaussées et des Commissions. Dans le dernier trimestre, ils examinent, sur les lieux, la marche des différents services, recherchent si les règlements sont observés, si les fonds ont reçu l'emploi indiqué, si la comptabilité est régulière. Ils inspectent le personnel en vue de l'avancement, vérifient les registres, visitent les routes, les canaux, les chemins de fer, les travaux en cours et s'assurent s'ils sont exécutés selon les règles de l'art. Après les tournées, ils rendent compte au ministre, dans des rapports généraux ou spéciaux, des résultats de leurs constatations ;

Que, pour faciliter toutes ces opérations, les inspecteurs généraux reçoivent tous les mois un duplicata du compte moral que les ingénieurs en chef adressent au ministre sur la marche des différentes entreprises et la situation des dépenses des travaux neufs ; et, tous les ans, le compte d'inspection, qui contient la série entière des opérations sur lesquelles s'exercent leur contrôle, et notamment un chapitre concernant les voies fluviales avec les cotes de retenue des eaux. Que ces documents sont les seuls qui soient communiqués directement aux ins-

pecteurs généraux. Que les ingénieurs en chef envoient, en outre, tous les mois, au ministre, un état de navigabilité où les cotes journalières de la retenue des eaux sont relevées. Mais qu'aucun duplicata n'est remis aux inspecteurs généraux qui ont seulement la faculté d'en prendre connaissance au Ministère;

Qu'il résulte de la multiplicité et de la diversité de ces attributions que les inspecteurs généraux ne sont appelés à examiner que la tenue générale du service, sauf la situation financière qu'ils doivent contrôler dans tous ses détails. Qu'en ce qui concerne les grands travaux d'art, la loi ne les a évidemment pas chargés de refaire les calculs, les épures, ou les métrages des ingénieurs et des constructeurs. Qu'elle ne leur demande que d'observer sur les lieux et par eux-mêmes s'il n'existe, nulle part, un signe apparent et évident de négligence ou de danger. Que le temps aussi bien que les moyens d'investigation leur manqueraient pour se livrer à de plus minutieuses recherches;

Qu'il en est spécialement ainsi de travaux de l'importance de ceux de Bouzey;

Que la IV^e division comprend les cinq départements des Vosges, de Meurthe-et-Moselle, de la Meuse, de la Haute Marne et de la Marne. Qu'elle se compose de dix services : le service ordinaire des routes, qui ont un parcours de 2.801^{km}, et le service spécial de navigation du canal latéral à la Marne, des canaux de l'Aisne à la Marne, de la Haute-Marne, de Saint-Dizier à Vassy, de la Marne au Rhin, du canal de l'Est et de la Moselle, d'une longueur de 1.840^{km}. Que dans ce service, où les travaux d'art abondent, cinq réservoirs de navigation, indépendamment de celui de Bouzey, coûtent chaque année des sommes considérables et sont assurés par un personnel de plus de 2.000 agents;

Que MM. Holtz et Henry, qui ne disposaient que de trois mois pour l'inspection d'une division aussi étendue et chargée, n'ont évidemment pas pu reconnaître, dans une visite ou deux, le péril auquel, d'après les experts, les cotes élevées des ingénieurs d'Épinal soumettaient la digue et les inviter à les abaisser;

Que tout, d'ailleurs, contribuait à les rassurer pleinement à ce sujet; que M. Denys, qui a présidé aux réparations de 1888-89, avait une confiance absolue dans la stabilité du massif; que lorsque M. Holtz est allé à Bouzey, en 1891, et a trouvé l'eau à la cote 371,50, il n'a dû concevoir aucune crainte, puisque l'année précédente, elle était montée à la cote 371; que lorsque M. Henry y est venu à son tour, en 1894, il a vu l'eau à la cote 371,25; il a dû encore moins s'inquiéter que M. Holtz, alors que depuis quatre ans, les retenues n'avaient pas varié entre 371 et 371,50. Que la digue ne présentait nulle part le moindre signe d'affaiblissement; qu'aucune des fissures visibles ne s'étaient agrandies; que le mur n'avait pas pris de flèche nouvelle; que, selon les termes de M. Denys, on semblait se trouver « en présence d'un succès complet »; que MM. Holtz et Henry savaient que cette digue n'avait été élevée qu'après les plus longs calculs des ingénieurs de 1876 et suivant les méthodes de MM. Guillemain, Delocre et Bouvier, les plus accréditées à cette époque. Que les réparations de 1888-89 avaient été l'œuvre d'un autre inspecteur général, leur prédécesseur immédiat, et qui jouissait parmi ses collègues du meilleur renom; que, du reste, depuis le 1^{er} janvier 1891, le réservoir de Bouzey a cessé de figurer au compte moral et que, s'il en est encore question au compte d'inspection, c'est dans un article qui, par sa brièveté, n'était pas de nature à éclairer vivement les inspecteurs généraux. Que l'administration le considérait donc comme un ouvrage terminé et qui n'exigeait plus, d'une manière particulière, le contrôle des inspecteurs généraux. Qu'en supposant même que MM. Holtz et Henry eussent eu, avant ou après les tournées, les moyens de se renseigner exactement sur les conditions du réservoir et les besoins de la navigation, de manière à avoir une opinion raisonnée sur la solidité de la digue et le volume d'eau à emmagasiner, le temps leur aurait fait défaut à tous deux, puisque M. Holtz n'est resté à la tête de la IV^e division que pendant deux ans, et

M. Henry pendant un an ; qu'au surplus, d'après la loi, les inspecteurs généraux, simples examinateurs et contrôleurs, n'ont pas le droit de donner des ordres à l'ingénieur en chef, qui ne relève que du ministre; qu'ils ne sont fondés qu'à lui faire des observations, sauf à adresser un rapport au ministre si un désaccord survenait entre eux et à provoquer de cette manière l'intervention de l'autorité supérieure; que M. Henry, qui n'a passé qu'un an dans la IV^e division, a visité Bouzey et n'y a rien remarqué d'anormal: mais que M. Holtz, qui est demeuré deux ans, a si bien examiné les travaux qu'il a constaté que plusieurs des siphons de la rigole d'alimentation étaient en bois et qu'il a demandé, par un rapport adressé au ministre, le 3 octobre 1892, qu'ils soient remplacés par des siphons en fonte, ce qui a été obtenu; qu'il a aussi signalé au ministre l'absence d'un ingénieur ordinaire à Épinal, c'est-à-dire un vice d'organisation qui n'a pas encore été réparé; que les inspecteurs généraux, n'ayant ainsi aucune autorité de commandement ou de direction et pas même un droit de contrôle continu, mais intermittent et partiel, on ne saurait, suivant la judicieuse observation d'un ancien ministre, « leur faire un grand grief de n'avoir pas aperçu en quelques heures les défauts que l'assemblée la plus compétente et la plus éclairée a passé des mois à discuter et qu'elle a fini par nier »; que MM. Holtz et Henry n'ont, dès lors, commis aucune imprudence, ni aucune négligence dans l'exercice de leurs fonctions et ne sont à aucun titre la cause des homicides relevés contre eux.

Pour ces motifs, vu l'article 319 du Code pénal, dit que ni l'un ni l'autre des prévenus n'a commis le délit d'homicides par imprudence réprimé par l'article susvisé; en conséquence, les acquitte et les renvoie des fins de la poursuite sans dépens,

En foi de quoi, le présent jugement a été signé par les président et juges qui l'ont rendu et par le greffier, les jours, mois, et an susdits,

SIXIÈME PARTIE

Pièces annexes.

CHAPITRE XII

Objet de la VI^e Partie.

§ 55. — EXPOSÉ.

CXXXV. — Dans mes conférences sur la rupture du barrage de Bouzey, j'ai omis volontairement d'entrer dans le détail des calculs présentés dans mon rapport d'expertise.

Pour justifier des opinions émises par moi, et, aussi, pour

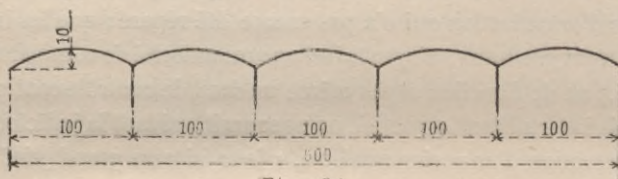


Fig. 61

fournir sur la question tous les renseignements utiles, je vais terminer par une série de pièces annexes dans lesquelles ces calculs sont présentés séparément, sans autre lien que le texte même de ma communication.

ANNEXE N^o 4.

Étude sur l'élasticité transversale des maçonneries de la digue de Bouzey, supposée constituée par cinq arcs ayant chacun 100 mètres de corde et 10 mètres de flèche (fig. 61).

§ 56. — EXPOSÉ.

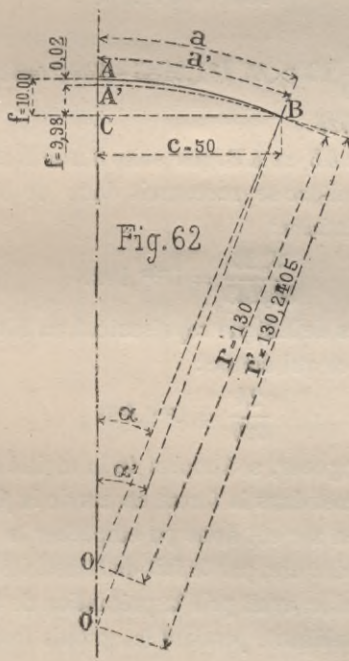
CXXXVI. — *Figure 62*, représentons un demi-arc en son couronnement ; et supposons que la maçonnerie puisse se con-

tracter sans dislocation, de façon que l'arc AB vienne en A'B' le point A s'infléchissant vers l'aval de 0^m,02.

Le triangle OBC nous donne :

$$\begin{aligned} \overline{OB}^2 &= \overline{BC}^2 + \overline{CO}^2, \\ r^2 &= c^2 + (r - f)^2, \\ r^2 &= c^2 + r^2 + f^2 - 2rf, \\ (7) \quad 2rf &= c^2 + f^2, \\ r &= \frac{c^2 + f^2}{2f}. \end{aligned}$$

Appliquée successivement aux deux arcs AB, A'B', cette for-



mule nous fournit :

$$r = \frac{50^2 + 10^2}{2 \times 10} = 130^m;$$

$$r' = \frac{50^2 + 9,980^2}{2 \times 9,980} = 130^m,2405;$$

et nous avons ensuite :

$$\sin \alpha = \frac{50}{130},$$

$$\alpha = 22^\circ 37' 11'',51485 = 81.431'',51485;$$

$$\sin \alpha' = \frac{50}{130,2405},$$

$$\alpha' = 22^\circ 34' 32'',832 = 81.272'',832.$$

Si nous remarquons que :

$$180^\circ = 648.000'',$$

il vient :

$$\alpha - \alpha' = \frac{3,1426}{648000}(130 \times 81.431,5185 - 130,2405 \times 81.272,832),$$

$$\alpha - \alpha' = 0^m,00525.$$

En passant de AB en A'B, par suite d'une flèche du sommet de 0^m,02, le demi-arc se raccourcit donc de 5^{mm},25; ce qui fait par mètre linéaire :

$$\frac{5,25}{51,233} = 0^m,102.$$

Or, les fissures de la digue représentent en hiver une largeur totale de 24^{mm}, ce qui donne :

$$\frac{24}{520} = 0^m,046$$

par mètre de longueur, soit moins de la moitié du raccourcissement du sommet dans la forme en arc de la *figure 61*.

Cette forme en arc eût donc pu empêcher la formation des fissures de température, par le fait de l'élasticité transversale de la maçonnerie, si on avait pris la précaution de laisser le réservoir en charge suffisante pendant les grands froids.

ANNEXE N° 2

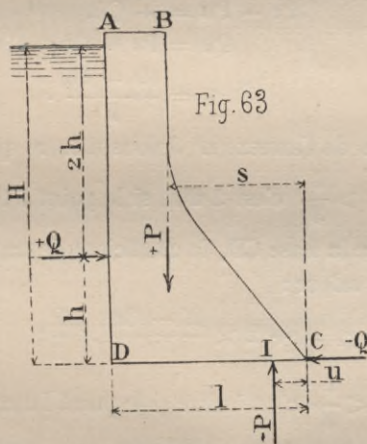
Vérification de la stabilité de la digue au renversement.
(Ma nouvelle méthode.)

§ 57. *Premier cas.* — LA BASE DE L'OUVRAGE N'EST SOUMISE A AUCUNE SOUS-PRESSION.

CXXXVII. — *Exposé théorique.*

Soit, *figure 63*, le profil de la digue, dans sa partie la plus élevée.

Considérons une tranche, de 1^m de longueur, ayant pour section le profil en question.



Les forces qui sollicitent cette tranche sont :

- Le poids P ;
- La poussée de l'eau, dont la résultante Q est appliquée au tiers de la hauteur H et a pour valeur :

$$(8) \quad Q = \frac{1000 H^2}{2}.$$

Les réactions du terrain sont :

- Une force verticale, $-P$ appliquée en un point I ;

c) Une force horizontale, $- Q$, intéressant toute la partie de la base appuyée sur le sol de fondation, par le fait des forces $+ P$ et $+ Q$.

Il faut, tout d'abord, que le point I tombe entre C et D, sur la base d'appui du barrage; et on s'assure de cela en vérifiant l'inégalité

$$(9) \quad Ps > Qh;$$

condition *sine qua non* d'équilibre.

d) Cette inégalité constatée, remarquons que les forces $+ P$, $+ Q$ forment, avec les réactions $- P$, $- Q$, deux couples en équilibre, conduisant dès lors à l'équation :

$$(10) \quad \begin{aligned} P(s - u) &= + Qh, \\ Ps - Pu &= + Qh, \\ Pu &= Ps - Qh; \\ u &= \frac{Ps - Qh}{P}. \end{aligned}$$

Or, la théorie de l'annexe n° 3 nous montre que :

e) Si l'on a $u > \frac{l}{3}$, c'est-à-dire si le point I tombe dans le tiers médian de la base CD, le coefficient de travail de l'arête aval, C, a pour valeur :

$$(17) \quad p_c = + 2 \times \frac{2l - 3u}{l} \times \frac{P}{l};$$

f) Si l'on a $u < \frac{l}{3}$, c'est-à-dire si le point I tombe en dehors du tiers médian de la base :

$$(19) \quad p_c = + \frac{2P}{3u}.$$

g) Pour que l'équilibre au renversement soit assuré, il faut et il suffit que l'on ait :

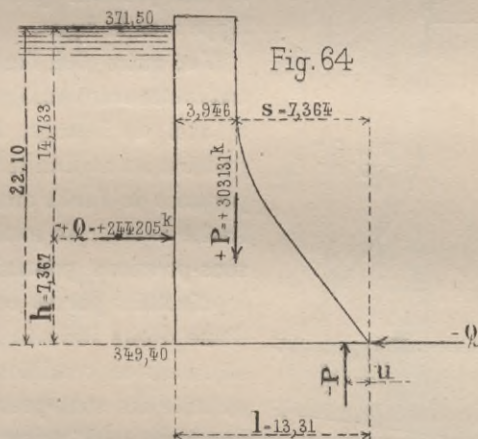
$$(11) \quad p_c < R^{max};$$

R^{max} étant le coefficient de rupture par compression de la maçonnerie du barrage.

CXXXVIII. — Application à la digue de Bouzey.

La plus haute section du barrage est représentée *figure 64*; et l'on a pour une tranche de 1^m de longueur, la maçonnerie pesant 2.000^{kg} le mètre cube :

$$\begin{aligned}
 P &= \dots\dots\dots = + 303.131 \text{ kg}, \\
 P_s &= + 303.131 \times 7,364 = \dots\dots = + 2.232.256; \\
 Q &= + \frac{1.000 \times \overline{22,10}^2}{2} = \dots\dots = + 244.205 \text{ kg}, \\
 Qh &= + 244.205 \times 7,367 = \dots\dots = + 1.798.977; \\
 &+ 2.232.256 > 1.978.977;
 \end{aligned}$$



$$u = \frac{2.232.256 - 1.798.977}{303.131} \dots = 1^m,430,$$

$$1,430 < \frac{13,31}{3} = 4,436;$$

$$p_c = + \frac{2 \times 303.131}{3 \times 1.430} = \dots\dots = + 141.319 \text{ pour } 1^m^2;$$

$$p = \dots\dots\dots = + 14,13 \text{ pour } 1^{cm^2}.$$

Or :

$$R^{max} = \dots\dots\dots = + 30 \text{ kg pour } 1^{cm^2}.$$

Donc l'on peut poser :

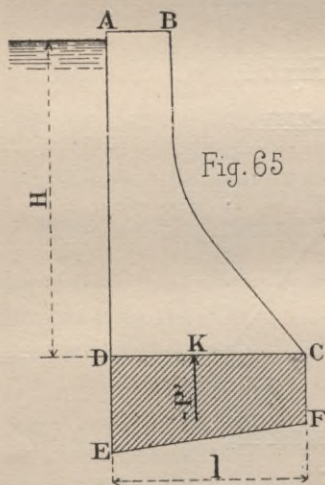
$$p_c < R^{max};$$

et l'équilibre au renversement est assuré, quand il n'y a pas de sous-pression.

§ 58. — *Deuxième cas.* — LA BASE DE L'OUVRAGE EST SOUMISE A UNE SOUS-PRESSION.

CXXXIX. — *Importance de la sous-pression et son mode d'action sous la base de la digue.*

L'eau éprouvant une certaine difficulté à circuler dans la masse du terrain, il y aura de ce fait une perte de charge dans la sous-pression qu'elle développe sous la digue.



D'un autre côté, l'eau d'infiltration trouvant un dégagement à l'aval du barrage, la sous-pression ira en diminuant d'importance de l'arête amont D à l'arête aval C; de sorte que les sous-pressions pourraient être représentées par les ordonnées d'une droite inclinée EF (*fig. 65*). Dans ces conditions, la résultante des sous-pressions est une force — P' agissant en un point K, situé de telle sorte

que l'on ait :

$$DK < \frac{l}{2},$$

$$KC > \frac{l}{2}.$$

Comme il nous est impossible d'apprécier rigoureusement :

- a) La perte de charge subie par la sous-pression P';
- b) L'inclinaison de la ligne EF;

nous prendrons la sous-pression totale et nous la répartirons uniformément sous la base CD.

Pour une tranche de 1^m de longueur, la résultante P' a pour valeur, dans ces conditions :

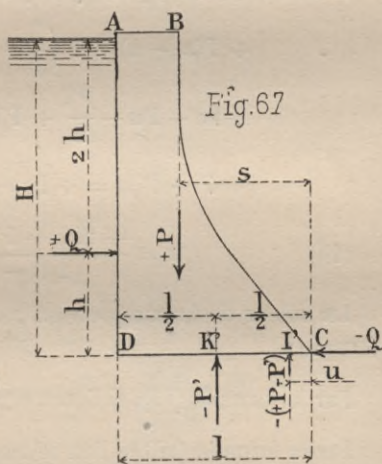
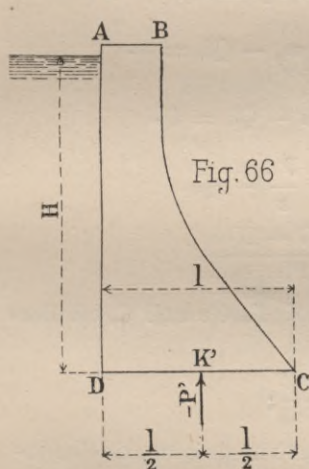
$$(12) \quad P' = 4000H;$$

et son point d'application est en K', milieu de CD (fig.66).

CXL. — Exposé théorique.

Les forces et réactions sont, dans le cas actuel (fig. 67) :

+ P, poids d'une tranche de 1^m;



— P', sous-pression totale, sous la base de la tranche considérée;

+ Q, poussée de l'eau;

— (P — P'), réaction verticale, appliquée en un point I' ;

— Q, réaction horizontale.

Il y a lieu tout d'abord, comme dans le premier cas, de vérifier à l'avance si le point I' tombe dans la base CD; car, dans la négative, ce serait une preuve immédiate qu'il n'y a pas équilibre.

Pour que I' tombe entre C et D, il faut que l'on ait :

$$(13) \quad + P s > + Q h + \frac{P' l}{2}.$$

Nous allons maintenant examiner successivement les deux hypothèses suivantes :

L'inégalité (13) existe bien ;

Cette inégalité (13) ne se trouve pas vérifiée.

Première hypothèse : L'inégalité (13) est vérifiée. — La réaction verticale $-(P, -P')$ peut se décomposer en deux forces : $-P, +P'$; ce qui constitue, avec les autres forces et réactions, trois couples en équilibre :

$$+ P, - P; - P', + P'; + Q, - Q.$$

Nous avons alors, pour qu'il y ait équilibre :

$$+ P(s - u) - P' \left(\frac{l}{2} - u \right) - Qh = 0,$$

$$+ Ps - Pu - \frac{P'l}{2} + P'u - Qh = 0,$$

$$(+ P - P')u = + Ps - \frac{P'l}{2} - Qh,$$

$$(14) \quad u = \frac{+ 2Ps - P'l - 2Qh}{2(P - P')}.$$

La valeur de la compression p_c , de l'arête aval C, est alors fournie :

Par la formule (17), si l'on a $u > \frac{l}{3}$;

Par la formule (19), si l'on se trouve en présence de l'inégalité : $u < \frac{l}{3}$.

Pour qu'il y ait équilibre, il faut toujours que l'inégalité (11) soit satisfaite.

Deuxième hypothèse : L'inégalité (13) n'est pas vérifiée. — Il n'y a pas équilibre, pour une sous-pression totale uniformément répartie sous la base.

Mais, comme la sous-pression réelle n'est qu'une fraction de la sous-pression totale, l'équilibre pourrait exister quand même ; et il peut être intéressant de se poser le problème suivant.

L'arête aval C travaillant au coefficient maximum, quelle est la sous-pression y qui produirait, dans ce cas, un équilibre instable; et quel rapport existe-t-il entre y et la sous-pression totale P' ?

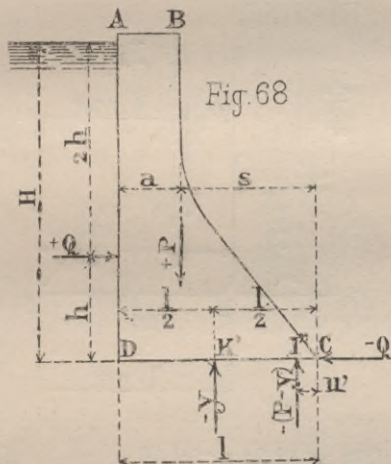
Représentons (*fig. 68*) les forces nouvelles en équilibre.

Nous avons d'abord (formule 19) :

$$p_c = R^{max} = \frac{2(P - y)}{3u'};$$

et par suite :

$$(15) \quad u' = \frac{2(P - y)}{3R^{max}};$$



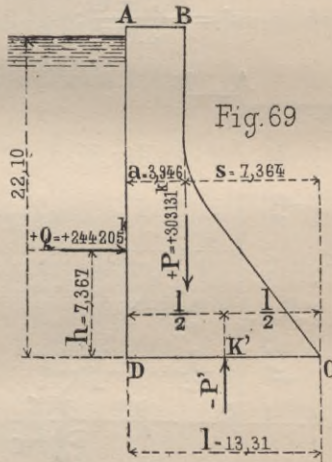
enfin, en posant l'équation d'équilibre :

$$\begin{aligned} &+ P(l - a - u') - y\left(\frac{l}{2} - u'\right) - Qh = 0, \\ &+ P\left[l - a - \frac{(2P - y)}{3R^{max}}\right] - y\left[\frac{l}{2} - \frac{2(P - y)}{3R^{max}}\right] - Qh = 0, \\ &\quad + y^2 - \frac{3R^{max}}{2}\left[+\frac{4P}{3R^{max}} - \frac{l}{2}\right] y \\ &= -\frac{3R^{max}Qh}{2} - \frac{3R^{max}P}{2}\left[+a + \frac{2P}{3R^{max}} - l\right], \end{aligned}$$

$$(16) \quad y = + \frac{3R_{max}}{4} \left[+ \frac{4P}{3R_{max}} - \frac{l}{2} \right] \\ + \sqrt{-\frac{3R_{max}Qh}{2} - \frac{3R_{max}P}{2} \left[+ a + \frac{2P}{3R_{max}} - l \right] \\ + \left\{ + \frac{3R_{max}}{4} \left[+ \frac{4P}{3R_{max}} - \frac{l}{2} \right] \right\}^2}.$$

CXLI. — Application à la digue de Bouzey.

A. — Vérification de l'inégalité (13). — La figure 69 nous



fournit :

$$\begin{aligned} P' &= 1.000 \times 13,31 \times 22,10 = 294.151 \text{ kg.} \\ + P_s &= + 303.131 \times 7,364 = + 2.232.256; \\ + Qh &= + 244.205 \times 7,367 = + 1.798.977; \\ + \frac{P'l}{2} &= + \frac{294.151 \times 13,31}{2} = + 1.957.572; \\ &+ Qh + \frac{P'l}{2} = + 3.756.549 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Nous avons donc :

$$+ P_s = + 2.232.266 < Qh + \frac{P'l}{2} = 3.756.549;$$

et l'inégalité (13) n'est pas vérifiée.

Il n'y a donc pas équilibre, pour une sous-pression totale; et il y a lieu d'appliquer à la digue de Bouzey les formules de la deuxième hypothèse.

B. — *Calcul de y.* — Pour une densité de 2.000^{kg}, il vient successivement, avec la formule (16) :

$$\begin{aligned}
 R^{max} &= 30 \times 10.000 = 300.000^{kg} \text{ pour } 1^{m^2}, \\
 &+ \frac{3R^{max}}{4} \left[+ \frac{4P}{3R^{max}} - \frac{l}{2} \right] \\
 = + \frac{3 \times 300.000}{4} &\left[+ \frac{4 \times 303.131}{3 \times 300.000} - \frac{13,31}{2} \right] = - 1.194.244; \\
 \left\{ + \frac{3R^{max}}{4} \right. &\left. \left[+ \frac{4P}{3R^{max}} - \frac{l}{2} \right] \right\}^2 = - 1.194.244^2 \\
 &= + 1.426.218.731.536; \\
 - \frac{3R^{max} Qh}{2} &= - \frac{3 \times 300.000 \times 1.798.977}{2} \\
 &= - 809.576.100.000; \\
 - \frac{3R^{max} P}{2} &\left[+ a + \frac{2P}{3R^{max}} - l \right] \\
 = - \frac{3 \times 300.000 \times 303.131}{2} &\left[+ 3,946 + \frac{2 \times 303.131}{3 \times 300.000} - 13,31 \right] \\
 &= + 1.185.393.775.500; \\
 y &= - 1.194.244 \\
 + \sqrt{- 809.576.100.000 + 1.185.393.775.500 + 1.426.218.731.536} &' \\
 y &= + 148.155^{kg}.
 \end{aligned}$$

C. — *Rapport $\frac{y}{P'}$.* — Il vient alors :

$$\frac{y}{P'} = \frac{148.155}{294.151} = 0,50.$$

La sous-pression possible, au maximum, n'est donc que la moitié de la sous-pression totale.

L'équilibre au renversement n'est donc pas assuré en cas de sous-pression, puisque, d'après les constatations au tube piézo-

métrique, M. Denys a pu apprécier la sous-pression réelle aux 80 centièmes, environ, de la sous-pression totale.

ANNEXE N° 3

Travail des maçonneries et de leur fondation.
(Loi du trapèze et nouvelle manière de la présenter.)

§ 59. — POSITION DE LA QUESTION.

CXLII. — *Exposé.*

On applique aux maçonneries des barrages le principe général de la déformation plane, base de la résistance des matériaux.

Mais ce principe a été établi pour des matériaux homogènes, et les maçonneries sont loin d'avoir cette qualité.

De plus, il s'éloigne de la réalité absolue dès qu'il s'applique à des sections transversales de fortes dimensions; et les murs de réservoirs ont tous des sections importantes.

Pour ces deux raisons, les calculs exécutés, dans ces conditions, sur des maçonneries de digues, ne doivent être pris que comme des indications dont il faut tenir compte sans considérer les résultats comme absolument positifs.

Dans les ouvrages de ce genre, on doit donc agir avec une extrême prudence, et ne se servir du calcul habituel qu'avec la plus grande réserve.

En un mot, il faut se tenir bien en dessous des résultats constatés par le calcul, sous peine de déboires ultérieurs.

§ 60. — MA NOUVELLE MANIÈRE DE PRÉSENTER
LA LOI DU TRAPÈZE.

CXLIII. — *Calcul d'une section transversale de barrage.*

Soit, *figure 70*, la plus haute section transversale de la digue.

Considérons une tranche ayant cette section transversale sur 1^m de longueur, et soient :

a) Une section horizontale, *ab*, de cette tranche;

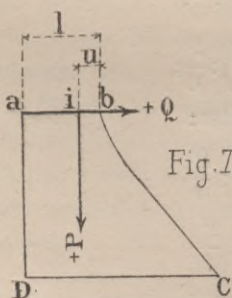
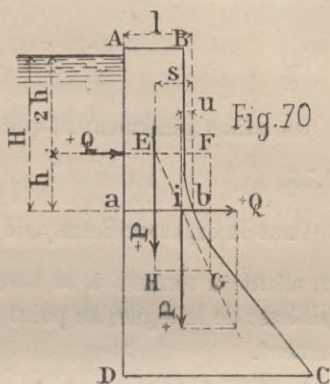
b) *P*, le poids de la partie *ABba*;

c) *Q*, la poussée de l'eau, au-dessus de *ab*; poussée fournie par la formule :

$$(8) \quad Q = \frac{1000 H^2}{2}.$$

Ces deux forces se composent en une résultante, *EG*, qui coupe *ab* au point *i*.

Transportons cette résultante en *i*, et décomposons-la en deux forces :



d) L'une verticale, *+ P*, appliquée en *i*;

e) L'autre horizontale, *+ Q*, intéressant toute la section horizontale, *ab*.

On peut supprimer toute la partie supérieure *ABba*, et remplacer l'action de cette partie sur la section *ab* par les forces définitives *+ P*, *+ Q* (fig. 71).

Nous avons alors comme au chapitre précédent :

$$(10) \quad u = \frac{Ps - Qh}{P};$$

et nous calculerons la section *ab* en établissant successivement et séparément :

f) L'action de la force *+ Q*;

g) Celle de la force *+ P*.

1° Calcul des effets de la poussée horizontale *+ Q*. — On admet que le frottement de *ABba* sur *ab* vient seul combattre

la poussée + Q; de sorte que l'on doit avoir, f étant le coefficient de frottement :

$$(2) \quad \begin{aligned} Pf &> Q; \\ f &> \frac{Q}{P}. \end{aligned}$$

On admet généralement que $\frac{Q}{P}$ ne doit pas dépasser 0,70 à 0,75.

Dans la digue de Bouzey, le rapport $\frac{Q}{P}$ varie de 0 à 0,806, en allant du sommet à la base; et cela indique une certaine faiblesse de la digue, au point de vue de la rupture par glissement.

2° *Calcul des effets de la charge verticale + P.* — Les formules ordinaires de flexion et de compression nous donnent :

$$\text{Au point } b : p_b = + \frac{P}{l} + \left(\frac{l}{2} - u \right) : \frac{l^2}{6},$$

$$\text{Au point } a : p_a = + \frac{P}{l} - P \left(\frac{l}{2} - u \right) : \frac{l^2}{6};$$

expressions qui deviennent, après réduction :

$$(17) \quad p_b = + 2 \times \frac{2l - 3u}{l} \times \frac{P}{l},$$

$$(18) \quad p_a = + 2 \times \frac{3u - l}{l} \times \frac{P}{l}.$$

Remarque. — Pour que l'équation (18) donne un résultat positif, c'est-à-dire une compression, il faut que l'on ait :

$$3u > l,$$

$$u > \frac{l}{3}.$$

Quand le contraire a lieu, la valeur de p_a est négative, et l'amont subit des tensions.

C'est là la théorie du tiers médian, qui peut se présenter de la façon suivante :

Considérons successivement un certain nombre de sections horizontales telles que ab (fig. 72); et déterminons, pour chacune d'elles, la résultante des efforts P et Q correspondants.

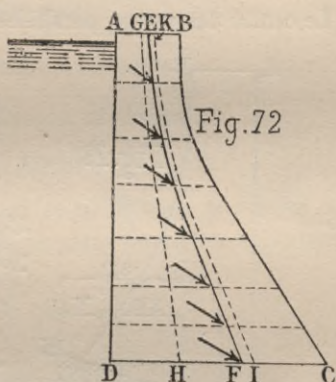
Réunissons les points de rencontre de ces résultantes avec les sections (tels que le point i , section ab) par un trait continu EF . Ce sera la courbe des pressions de la section transversale $ABCD$;

D'un autre côté, traçons les courbes GH , KL , divisant chacune des sections horizontales telles que ab en trois parties égales.

Pour que l'amont, AD , ne subisse aucune tension, il faut et il suffit que la courbe des pressions soit comprise entre les courbes GH , KL , c'est-à-dire qu'elle tombe dans le tiers médian des sections horizontales.

A Bouzey, la courbe de pressions sortait du tiers médian à partir du point 365.

Aussi, y avait-il des tensions importantes à l'amont du barrage; tensions dont le maximum atteignait $4^{\text{kg}},500$, ce qui était excessif.



CXLIV. — Calcul de la base.

Il y a deux cas à considérer :

Premier cas. — La courbe des pressions tombe dans le tiers médian de la base;

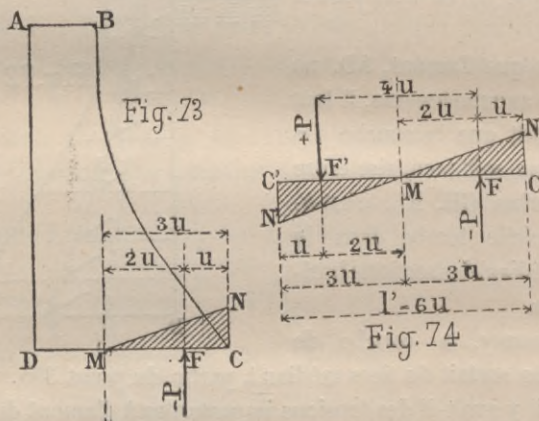
Deuxième cas. — Cette courbe tombe en dehors du tiers médian en question.

Examinons successivement ces deux cas.

Premier cas. — La courbe des pressions tombe dans le tiers médian de la base. — Tous les points de cette base sont comprimés; et les formules (17) et (18) sont applicables aux arêtes Cet D, d'aval et d'amont.

Deuxième cas. — La courbe des pressions tombe en dehors du tiers médian de la base. — La réaction verticale, — P, appliquée en F (fig. 73), comprimerà une partie CM de la base, suivant les ordonnées d'une droite MN.

Le centre des forces parallèles de compression correspond



alors au centre de gravité du triangle CMN; c'est-à-dire que l'on a :

$$CM = 3 \times CF = 3u.$$

Supposons (fig. 74) que la section CM se prolonge en $MC' = CM$; et qu'une force verticale, + P, agisse en F' à une distance

$$MF' = MF.$$

La partie MC' sera tendue dans les mêmes conditions que CM est comprimée; et on aura une section $CC' = l = 6u$, soumise à un couple de flexion de moment :

$$m = P \times 4u = 4Pu.$$

Le coefficient de travail du point C a alors pour valeur, d'après

les formules de la déformation plane :

$$p_c = m : \frac{I}{v'} = 4Pu : \frac{(6u)^2}{6} = \frac{24Pu}{36u^2},$$

$$(19) \quad p_c = \frac{2P}{3u}.$$

Telle est la formule qui donne la valeur de la compression subie par l'arête aval C, quand la courbe des pressions tombe en dehors du tiers médian de la base.

ANNEXE N° 4

Calcul du barrage restauré.

§ 61. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

CXLV. — Exposé.

Nous allons déterminer d'abord les coefficients de travail de la section $a_0b_0c_0$ (fig. 75), correspondant au redan supérieur du mur de renforcement ; et cela :

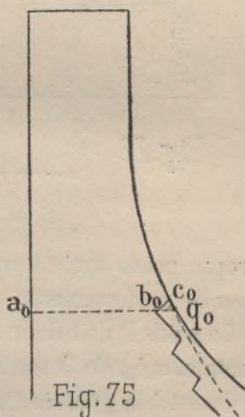
1° En supposant que le mur en question est un soutien parfait ;

2° En admettant que ce mur ne joue aucun rôle dans la résistance générale.

Comme le mur de renforcement n'est, en somme, ni un soutien parfait, ni un étai nul, les coefficients de travail réels se trouveront compris entre les deux résultats limites ainsi obtenus.

Nous calculerons ensuite les coefficients de travail de l'ancienne section, a_0q_0 , de la digue primitive ; et nous les comparerons à ceux obtenus précédemment.

Par un raisonnement très simple, nous ferons voir enfin que les constatations résultant de la comparaison ci-dessus spécifiée s'étendent, *a fortiori*, à toutes les autres sections du barrage restauré.



§ 62. — CALCUL DU COEFFICIENT DE TRAVAIL DE LA SECTION $a_0b_0c_0$
DU MUR RENFORCÉ.

CXLVI. — *Le mur de renforcement est un soutien parfait.*

A. — *Dimensions de la section $a_0b_0c_0$ et valeur des efforts P et Q qu'elle est appelée à supporter.* — Par des calculs très simples, qu'il est sans intérêt de reproduire, nous avons établi les éléments en question, représentés *figure 76*.

B. — *Division des opérations.* — La digue supportait son

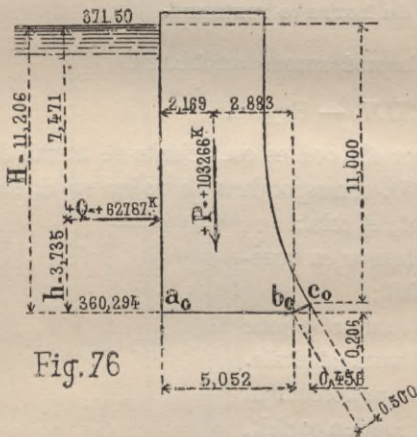


Fig. 76

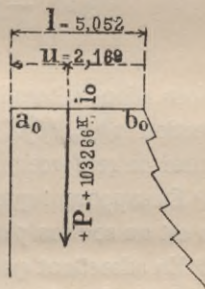


Fig. 77

propre poids après l'exécution des redans et avant celle du mur de renforcement.

Le poids P doit donc être supporté par la seule partie horizontale, a_0b_0 , de la section $a_0b_0c_0$.

Quant à la poussée Q, elle est équilibrée par l'action commune de l'ancien mur et du nouveau.

De cette double constatation préalable résulte la division suivante des opérations.

C. — Calcul des coefficients p_{1a_0} , p_{1b_0} , fournis par le poids P, supporté par la partie horizontale a_0b_0 ;

D. — Calcul des coefficients p_{2a_0} , p_{2b_0} , produits par la poussée Q , équilibrée par l'action combinée de l'ancien et du nouveau mur.

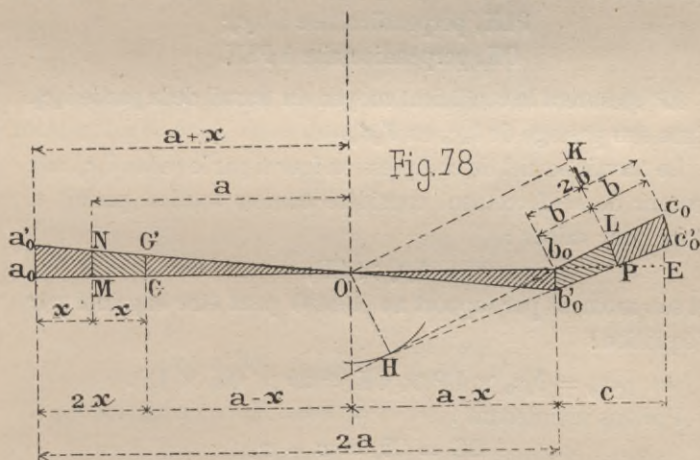
E. — Calcul des coefficients définitifs, p_{a_0} , p_{b_0} , par l'addition des coefficients partiels p_1 , p_2 .

C. — Calcul des coefficients p_{1a_0} , p_{1b_0} , dus aux poids P .

D'après ce qui vient d'être dit, les coefficients p_1 sont ceux fournis par la charge

$$P = + 103.266 \text{kg},$$

appliquée en i_0 , sur la section horizontale a_0b_0 (fig. 77).



Nous avons donc, avec les formules de l'annexe précédente:

$$p_{1a_0} = + 2 \times \frac{2 \times 5,052 - 3 \times 2,169}{5,052} \times \frac{103.266}{5,052} = + 29.121 \text{kg},$$

$$p_{1b_0} = + 2 \times \frac{3 \times 2,169 - 5,052}{5,052} \times \frac{103.266}{5,052} = + 41.779 \text{kg}.$$

D. — Calcul des coefficients p_{2a_0} , p_{2b_0} , dus à la poussée Q .

Figure 78, représentons la section $a_0b_0c_0$, qui est appelée à résister à la poussée Q .

Sous l'action du moment de flexion :

$$M_0 = Qh = 62.787 \times 3,735,$$

$$M_0 = 234.531^{\text{km}}, 188,$$

produit par Q, la section $a_0b_0c_0$ vient en $a_0'b_0'c_0'$, oscillant autour d'un point O qu'il s'agit d'abord de déterminer.

Prolongeons c_0b_0 ; abaissons OH, perpendiculaire à cette ligne; et du point O comme centre, traçons un arc de cercle avec OH comme rayon. Comme b_0c_0 , la ligne $b_0'c_0'$ sera tangente à cet arc.

Prenons maintenant le milieu L, de b_0c_0 , et traçons successivement :

PLK, perpendiculaire à b_0c_0 ;

OK, perpendiculaire à PLK.

LP mesurera le coefficient moyen du travail de la partie b_0c_0 , dans son passage de b_0c_0 en $b_0'c_0'$.

Le travail partiel de compression fourni par le redan b_0c_0 , sur le mur de renforcement considéré comme soutien parfait, a donc pour valeur :

$$b_0c_0 \times LP;$$

et son moment par rapport au point O peut être exprimé par l'équation :

$$(a) \quad m_0 = b_0c_0 \times LP \times OK = 2b \times OK \times LP.$$

Portons maintenant :

$$OG = Ob_0 = a - x,$$

$$GM = Ma_0 = x;$$

et élevons la verticale MN.

La partie a_0G , de la section $a_0b_0c_0$, fournit un travail de traction ayant pour valeur :

$$a_0G \times MN,$$

puisque MN mesure le travail moyen de cette section.

Le moment de ce travail partiel de résistance, par rapport au point O, a pour expression :

$$(b) \quad m'_0 = -a_0G \times MN \times OM = -2ax \times MN;$$

et l'on a :

$$(c) \quad m'_0 = -m_0,$$

pour la raison suivante :

Le moment des tensions, représentées par la surface $a_0a'_0O$, est égal à moins celui des compressions, correspondant à $Ob_0c_0c'_0b'_0$.

Mais, le moment de la partie $GG'O$ est égal à moins celui de la partie $Ob_0b'_0$, puisque $OG = Ob_0$.

Donc la même relation existe entre les moments de $aa'_0G'G$, $b_0c_0c'_0b'_0$; et l'équation (c) se trouve vérifiée.

Cela nous permet de poser, en valeur absolue :

$$2ax \times MN = 2b \times OK \times LP,$$

ou :

$$(d) \quad ax \times MN = b \times OK \times LP.$$

Projetons maintenant b_0c_0 sur a_0b_0 , en b_0E . Les triangles semblables, b_0c_0E , b_0OH , nous donnent :

$$\frac{Hb_0}{b_0E} = \frac{Ob_0}{b_0c_0},$$

$$(e) \quad Hb_0 = b_0E \times \frac{Ob_0}{b_0c_0} = \frac{c(a-x)}{2b};$$

ou :

$$(f) \quad OK = Hb_0 + b_0L = \frac{c(a-x)}{2b} + b;$$

ce qui permet de poser, avec (d) :

$$(d') \quad ax \times MN = b \left[\frac{c(a-x)}{2b} + b \right] \times LP = \left[\frac{c(a-x)}{2} + b^2 \right] LP.$$

De plus, les triangles semblables, HLP , MNO , nous donnent à leur tour :

$$\frac{LP}{HL} = \frac{MN}{OM},$$

$$LP = HL \times \frac{MN}{OM} = OK \times \frac{MN}{OM} = \left[\frac{c(a-x)}{2b} + b \right] \times \frac{MN}{a}$$

$$(g) \quad LP = \left[\frac{c(a-x)}{2ab} + \frac{b}{a} \right] MN.$$

Remplaçant dans (d'), il vient :

$$ax \times MN = \left[\frac{c(a-x)}{2} + b^2 \right] \left[\frac{c(a-x)}{2ab} + \frac{a}{b} \right] MN;$$

ou, en divisant les deux membres par MN :

$$(d'') \quad ax = \left[\frac{c(a-x)}{2ab} + b^2 \right] \left[\frac{c(a-x)}{2ab} + \frac{b}{a} \right].$$

On tire de cette dernière expression :

$$x^2 - \left[\frac{4a^2b + 2ac^2 + 4b^2c}{c^2} \right] x = - \left[\frac{a^2c^2 + 4b^2ac + 4b^4}{c^2} \right],$$

$$(20) \quad x = + \left[\frac{4a^2b + 2ac^2 + 4b^2c}{2c^2} \right]$$

$$- \sqrt{ - \left[\frac{a^2c^2 + 4b^2ac + 4b^4}{c^2} \right] + \left[\frac{4a^2b + 2ac^2 + 4b^2c}{2c^2} \right]^2 }.$$

Pour la section qui nous occupe (*fig. 77 et 78*), nous avons :

$$\begin{array}{l} a = \frac{5,052}{2} = 2,526, \quad \left| \quad a^2 = 6,380676; \quad \right. \\ b = \frac{0,500}{2} = 0,250, \quad \left| \quad b^2 = 0,0625, \quad \left| \quad b^4 = 0,00390625; \right. \right. \\ c = \dots = 0,456, \quad \left| \quad c^2 = 0,207936; \quad \right. \end{array}$$

et il vient successivement :

$$\begin{aligned} & + \left[\frac{4a^2b + 2ac^2 + 4b^2c}{2c^2} \right] \\ = & + \frac{4 \times 6,380676 \times 0,25 + 2 \times 2,526 \times 0,207936 + 4 \times 0,0625 \times 0,456}{2 \times 0,207936}, \\ = & + \frac{6,380676 + 1,050493 + 0,414}{0,415872}, \\ = & + 18,143; \\ + & \left[\frac{4a^2b + 2ac^2 + 4b^2c}{2c^2} \right]^2 = + \overline{18,143^2} = + 329,168449; \\ & - \left[\frac{a^2c^2 + 4b^2ac + 4b^4}{c^2} \right] \\ = & - \frac{6,380676 \times 0,207936 + 4 \times 0,0625 \times 2,526 \times 0,456 + 4 \times 0,00390625}{0,207936}, \end{aligned}$$

$$= - \frac{1,326772 + 0,287964 + 0,015625}{0,207936},$$

$$= - 7,8407;$$

$$x = + 18,143 - \sqrt{- 7,8407 + 329,168449},$$

$$x = \dots \dots \dots = 0^m,218;$$

$$2x = 0,218 \times 2 = \dots \dots \dots = 0^m,436;$$

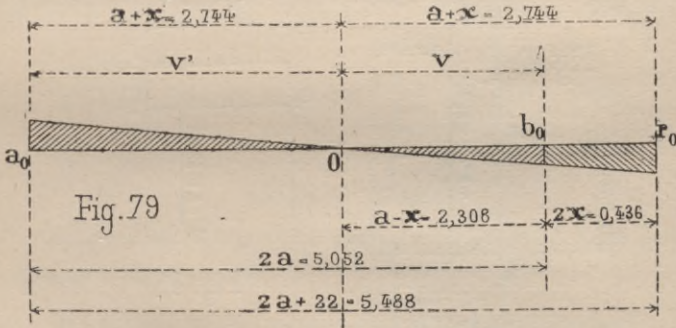
$$a - x = 2,526 - 0,218 = \dots \dots \dots = 2^m,308,$$

$$a + x = 2,526 + 0,218 = \dots \dots \dots = 2^m,744,$$

$$2a = (a - x) + (a + x) = \dots \dots \dots = 5^m,052.$$

Ceci déterminé, il nous reste à apprécier les coefficients p_{20}, p_{2b_0} , des points a_0, b_0 .

Or, la section $a_0 b_0 c_0$ travaille, dans la partie $a_0 b_0$, comme le ferait une section plane prolongée, au delà de b_0 , d'une quan-



tité égale à $2x$, soit $0,436$ (*fig. 79*); et, dans une section de ce genre, de 1^m de longueur.

Au point a_0 : $\frac{I}{v'} = \frac{1 \times 5,488^2}{6} = 5,019691;$

Au point b_0 : $\frac{I}{v} = \frac{1 \times 5,488^3}{12 \times 2,308} = 5,967951.$

Comme nous avons, d'un autre côté :

$$M_0 = Qh = 234,531^{km},188;$$

les formules générales de flexion nous fournissent :

$$p_{2a_0} = - \frac{234.531,188}{5,019691} = - 46.722^{\text{kg}},$$

$$p_{2b_0} = + \frac{234.531,188}{5,967651} = + 39.298^{\text{kg}}.$$

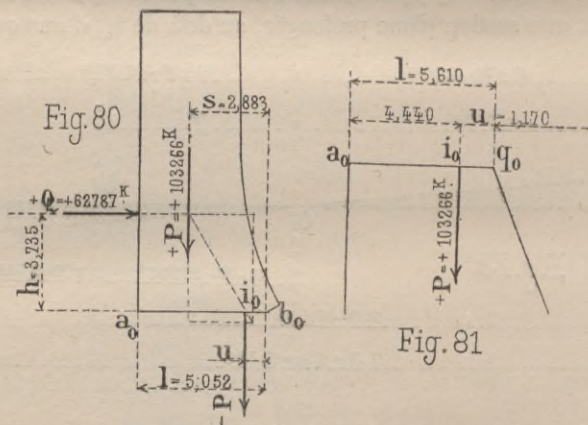
E. — *Calcul des coefficients totaux, p_{a_0}, p_{b_0} .* — Additionnant les valeurs trouvées, aux alinéas C, D, pour les coefficients p_1, p_2 , il vient, en définitive :

$$p_{a_0} = + 29.421 - 46.722 = - 17.601^{\text{kg}},$$

$$p_{b_0} = + 11.779 + 39.298 = + 51.077^{\text{kg}}.$$

CXLVII. — *Le mur de renforcement est un étai nul.*

Dans cette hypothèse, la section a_0b_0 doit supporter seule



l'action combinée du poids P et de la poussée Q (fig. 80).

Nous avons alors, avec les formules de l'annexe précédente :

$$u = \frac{P_s - Qh}{P} = \frac{103.266 \times 2,883 - 62.787 \times 3,735}{103.266},$$

$$u = 0^{\text{m}},612;$$

$$p_{a_0} = + 2 \times \frac{3 \times 0,612 - 5,032}{5,052} \times \frac{103.266}{5,052} = - 26.024^{\text{kg}},$$

$$p_{b_0} = + 2 \times \frac{2 \times 5,052 - 3 \times 0,612}{5,052} \times \frac{103.266}{5,052} = + 66.905^{\text{kg}}.$$

§ 63. — CALCUL DES COEFFICIENTS DE TRAVAIL DE LA SECTION $a_0b_0q_0$,
DE LA DIGUE PRIMITIVE.

CXLVIII. — *Détail des opérations.* — Les forces sont les mêmes que précédemment; et le point d'attaque de la résultante est i_0 , déterminé au numéro précédent.

Nous avons donc (*fig. 80*) :

$$a_0i_0 = 5,052 - 0,612 = 4^m,440;$$

et par suite (*fig. 81*) :

$$u = 5,610 - 4,440 = 1^m,170.$$

Il vient alors, avec les formules de l'annexe précédente :

$$p_{a_0} = + 2 \times \frac{3 \times 1,170 - 5,610}{5,610} \times \frac{103,266}{5,610} = - 13.781^{\text{kg}},$$

$$p_{q_0} = + 2 \times \frac{2 \times 5,610 - 3 \times 1,170}{5,610} \times \frac{103,266}{5,610} = + 50.596^{\text{kg}}.$$

§ 64. — COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS COEFFICIENTS p_{a_0} , p_{b_0} , p_{q_0} , OBTENUS CI-DESSUS.

CXLIX. — *Exposé.*

Groupons les résultats que nous avons obtenus. Nous arrivons au tableau suivant :

Coefficients limites de la section $a_0b_0c_0$, et coefficients de l'ancienne section $a_0b_0q_0$.

DÉSIGNATION GÉNÉRALE		COEFFICIENTS		
		p_{a_0}	p_{b_0}	p_{q_0}
Coefficients limites.	Le mur de renforcement est un soutien parfait.	- 1 ^{kg} , 76	+ 5 ^{kg} , 11	
	Le mur de renforcement est un étai nul.	- 2 ^{kg} , 60	+ 6 ^{kg} , 69	
Coefficients dans le mur primitif.		- 1 ^{kg} , 38		+ 5 ^{kg} , 06

Ce tableau nous montre que, dans le mur primitif, les coefficients de travail $- 1^{\text{kg}},38, + 5^{\text{kg}},06$ sont plus faibles que dans le mur renforcé; même, ce qui peut paraître singulier, dans le cas où ce mur est considéré comme soutien parfait.

Les coefficients de travail véritables, dans la section $a_0b_0c_0$ du barrage restauré, étant inférieurs certainement à ceux de l'hypothèse du soutien parfait, la différence est, en réalité, plus accentuée encore.

Or, ce que nous avons dit de la section $a_0b_0c_0$ s'applique, *a fortiori*, aux sections inférieures, puisque dans celles-ci :

D'une part, les points tels que b_0 s'écartent de $0^{\text{m}},75$ de l'ancien parement amont, tandis que le point b_0 lui-même est à $0^{\text{m}},50$ seulement de ce parement;

D'autre part, les redans tels que b_0c_0 se rapprochent davantage de la verticale.

Ces deux différences accentuent, en effet, l'affaiblissement de la résistance.

En résumé, le mur, dit de renforcement, a plutôt affaibli la digue, au point de vue de sa résistance aux charges P et Q.

ANNEXE N° 5

Étude d'une fissure longitudinale de l'amont, à la cote 361,50, moyenne de la grande cassure.

§ 65. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

CL. — But de cette étude.

Nous avons pour objectif de mettre en lumière l'affaiblissement qu'a dû produire une fissure longitudinale de l'amont.

CLI. — Division de nos opérations.

Nous allons d'abord présenter un exposé théorique préparatoire, montrant comment les poussées de l'eau, dans une fissure de l'amont, se combinent avec les charges normales P et Q.

Nous déterminerons ensuite les coefficients de travail de la section de rupture du barrage (cote moyenne, 361,50) :

a) Avant la formation de toute fissure longitudinale de l'amont;

b) Avec une fissure de 1^m de profondeur;

c) Avec une fissure de 2^m de profondeur;

d) Avec une fissure de 3^m de profondeur;

Les résultats viendront aider au raisonnement que nous avons présenté pour expliquer l'accident du 27 avril 1895.

§ 66. — COMBINAISON DES POUSSÉES DE L'EAU, DANS LA FISSURE LONGITUDINALE, AVEC LES CHARGES NORMALES P ET Q.

CLII. — *Expression des poussées de l'eau dans une fissure longitudinale.*

Soit une fissure add_1a_1 (fig. 82), de largeur l_1 , située à une distance H de la retenue normale.

Pour une longueur égale à 1^m, la lèvre supérieure ad sup-

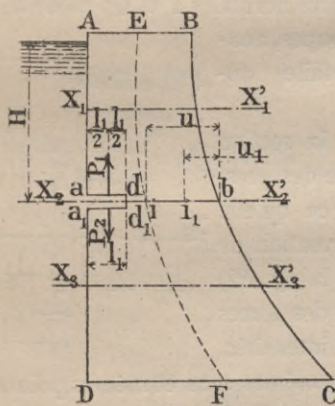


Fig. 82

porte une pression de bas en haut, P_1 , ayant pour valeur :

$$(21) \quad P_1 = 1000l_1H;$$

tandis que la lèvre inférieure est impressionnée par une pression de haut en bas :

$$(22) \quad P_2 = P_1 = 1000l_1H.$$

CLIII. — *Combinaison des poussées P_1 , P_2 avec les charges normales P et Q .*

Nous allons examiner successivement ce qui se passe :

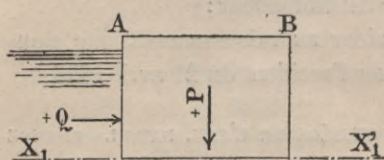


Fig. 83

1° Au-dessus du plan fissuré;

2° Dans la section fissurée;

3° Au-dessous de cette section.

1° *Forces attaquant les sections situées au-dessus du plan fissuré.* — Coupons la digue par un plan horizontal X_1X_1' (fig. 82); et reproduisons (fig. 83) la partie située au-dessus de ce plan.

Les seules forces agissant sur cette portion du barrage sont les forces extérieures normales P et Q ; et il en sera de même pour toutes les coupes, analogues à X_1X_1' , faites au-dessus de adb .

Au-dessus de la section fissurée, la courbe des pressions reste donc ce qu'elle était avant la formation de la fissure (Ei de la fig. 82) et les résultantes des forces ont mêmes intensités,

mêmes directions, mêmes sens et mêmes points d'application.

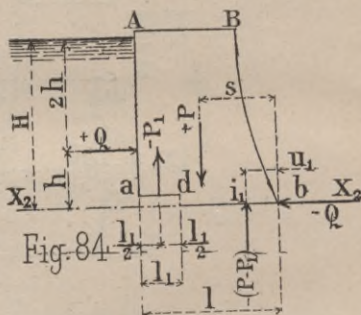


Fig. 84

2° *Forces attaquant la section fissurée.* — Coupons le mur par un plan horizontal X_2X_2' (fig. 82); et reproduisons (fig. 84) la partie supérieure du barrage.

Aux forces extérieures normales, P et Q , est venue s'ajouter la poussée $-P_1$, sur la lèvres supérieure de la fissure.

Les réactions de la section db seront alors :

Une force verticale; $-(P - P_1)$, appliquée en i_1 ;

Une force horizontale, $- Q$, intéressant toute la section db .
 Les forces et réactions forment trois couples :

$$+ P, - P; - P_1, + P_1; + Q, - Q;$$

a seconde condition d'équilibre nous donne :

$$+ P(s - u_1) - P_1 \left(l - u_1 - \frac{l_1}{2} \right) - Qh = 0,$$

$$- Ps + Pu_1 + P_1 l - P_1 u_1 - \frac{P_1 l_1}{2} + Qh = 0,$$

$$(+ P - P_1)u_1 = + Ps - P_1 l + \frac{P_1 l_1}{2} - Qh,$$

$$u_1 = \frac{+ 2Ps - P_1(2l - l_1) - 2Qh}{2(P - P_1)}.$$

Si nous portons bi_1 (*fig. 84*) en bi (*fig. 82*), nous voyons que i_1 tombe à droite du point i , point d'application de la résultante dans la section ab , supposée non fissurée.

De plus, dans cette hypothèse de la non-existence d'une fissure, la résultante agissant en i se décompose en deux forces P et Q ; au lieu qu'avec la fissure, les deux composantes sont $P - P_1$ et Q .

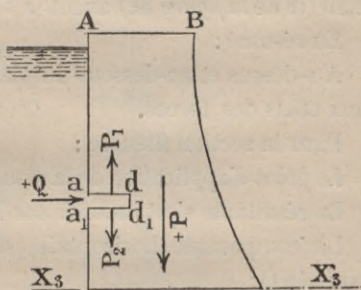


Fig. 85

La fissure de la section ab produit donc un double résultat :

D'abord, elle refoule vers l'aval le point d'application de la résultante des forces ;

Ensuite, elle modifie cette résultante dans sa composante verticale qui passe de la valeur P à celle $P - P_1$.

La composante horizontale reste égale à Q .

3° *Forces attaquant les sections situées au-dessous du plan fissuré.* — Coupons le mur par un plan horizontal $X_3 X'_3$ (*fig. 82*), et reproduisons (*fig. 85*) la partie supérieure de la digue.

Les forces qui agissent sur la section X'_3X_3 sont :

Le poids P ;

La poussée Q ;

Les poussées spéciales P_1, P_2 .

Or, dans un système de forces agissant sur une section, on peut remplacer un nombre quelconque de ces forces par leur résultante, et réciproquement.

Par conséquent, dans le système représenté *figure 85*, on peut remplacer les deux forces P_1, P_2 par leur résultante; et, comme celle-ci est égale à 0, les fissures, telles que add_1a_1 , étant forcément de faible ouverture, cela revient à dire que, pour la section $X_2X'_3$, il ne reste plus que les forces normales P et Q .

Dans ces conditions, la courbe des pressions reste ce qu'elle était (iF de la *figure 82*) avant la formation de la fissure add_1a_1 .

En résumé :

Au-dessus et au-dessous du plan fissuré, rien n'a été changé aux effets des forces.

Dans la section fissurée :

Le point d'application de la résultante s'est avancé vers l'aval ;

La résultante s'est inclinée sur l'horizon ;

La composante horizontale est toujours restée égale à la poussée Q ;

La composante verticale, primitivement égale à $+ P$, est devenue $+ P - P_1$, et s'est trouvée ainsi diminuée de la poussée spéciale P_1 .

Remarque. — Dans le rapport de la Commission d'enquête administrative, le rapporteur expose que la courbe des pressions change dans la partie inférieure de la digue, au-dessous du plan fissuré.

C'est une erreur, qui provient de ce que l'on a négligé la poussée spéciale P_2 , sur la lèvre inférieure de la fissure.

§ 67. — CALCUL DE LA SECTION 361,50, AVANT LA FORMATION DE TOUTE FISSURE.

CLIV. — *Détail des opérations.* — Les forces agissant sur la section considérée sont celles de la *figure 86* (densité 2.000^{kg}), savoir :

$$P = + 90.501^{kg},$$

$$Q = + 50.000^{kg}.$$

Nous avons alors, avec les formules de l'annexe n° 3 :

$$u = \frac{+ 90.501 \times 2,993 - 5.000 \times 3,333}{90.501} = 1^m,151$$

$$< \frac{5,094}{3} = 1^m,698;$$

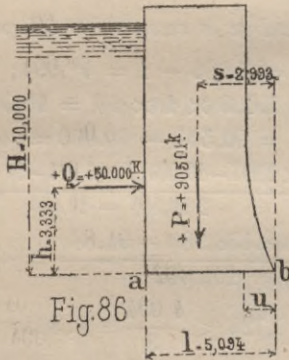


Fig.86

$$p_b = 2 \times \frac{2 \times 5,094 - 3 \times 1,151}{5,094} \times \frac{90.501}{5,094} = + 46.978^{kg},$$

$$p_a = 2 \times \frac{3 \times 1,151 - 5,094}{5,094} \times \frac{90.501}{5,094} = - 41.446^{kg};$$

et, pour coefficient de cisaillement :

$$q = \frac{50.000}{5,094} = \dots \dots \dots = + 9.815^{kg}$$

§ 68. — CALCUL DE LA SECTION 361,50, POUR DIFFÉRENTES
LARGEURS l_1 DE LA FISSURE.

CLV. — *Marche des opérations.* — Remarquons d'abord que les forces P et Q sont les mêmes qu'au paragraphe précédent.

Nous aurons à déterminer spécialement :

1° La largeur l de la section résistante, largeur donnée par l'expression :

$$(24) \quad l = 5,094 - l_1;$$

2° La poussée spéciale P_1 , fournie par la formule (21);

3° La charge verticale appliquée en i_1 :

$$(25) \quad P - P_1 = 90.501 - P_1;$$

4° La distance u_1 [formule (23)];

5° Les coefficients de travail des points b, d , à la traction et à la compression; ainsi que le coefficient q de cisaillement.

CLVI. — *Calcul de la section 361,50, pour $l_1 = 1^m$.*

$$(24) \quad l = 5,094 - 1 = 4^m,094;$$

$$(21) \quad P_1 = 1.000 \times 1 \times 10 = 10.000^{\text{kg}};$$

$$(25) \quad P - P_1 = 90.501 - 10.000 = + 80.501^{\text{kg}},$$

$$u_1 = \frac{+ 2 \times 90.501 \times 2,993 - 10.000 (2 \times 5,094 - 1) - 2 \times 50.000 \times 3,333}{2(90.501 - 10.000)}$$

$$(23) \quad u_1 = \frac{+ 208.438,986 - 91.880}{161.002} = + 0^m,724,$$

$$0,724 < \frac{4,094}{3} = 1,365;$$

$$p_b = 2 \times \frac{2 \times 4,094 - 3 \times 0,724}{4,094} \times \frac{80.501}{4,094} = + 57.791^{\text{kg}},$$

$$p_d = 2 \times \frac{3 \times 0,724 - 4,094}{4,094} \times \frac{80.501}{4,094} = - 18.655^{\text{kg}};$$

$$q = + \frac{50.000}{4,094} = \dots \dots \dots = + 12.113^{\text{kg}}.$$

CLVII. — Calcul de la section 361,50, pour $l_1 = 2^m$.

$$\begin{aligned}
 l &= 5,094 - 2 = \dots\dots\dots = 3^m,094; \\
 P_1 &= 1.000 \times 2 \times 10 = \dots\dots\dots = 20.000^{\text{kg}}; \\
 P - P_1 &= 90.501 - 20.000 = \dots\dots\dots = + 70.501^{\text{kg}}; \\
 &+ 2 \times 90.501 \times 2,993 - 20.000 (2 \times 5,094 - 2) \\
 &\quad - 2 \times 50.000 \times 3,333 \\
 u_1 &= \frac{\dots\dots\dots}{2 (90.501 - 20.000)}, \\
 u_1 &= \frac{+ 208.438,986 - 163.760}{141.002} \dots\dots\dots = + 0^m,317;
 \end{aligned}$$

$$0,317 < \frac{3,094}{3} = 1,031;$$

$$p_b = 2 \times \frac{2 \times 3,094 - 3 \times 0,317}{3,094} \times \frac{70.501}{3,094} = + 77.136^{\text{kg}},$$

$$p_d = 2 \times \frac{3 \times 0,317 - 3,094}{3,094} \times \frac{70.501}{3,094} = - 31.564^{\text{kg}};$$

$$q = + \frac{50.000}{3,094} = \dots\dots\dots = + 16.160^{\text{kg}}.$$

CLVIII. — Calcul de la section 361,50, pour $l_1 = 3^m$.

$$\begin{aligned}
 l &= 5,094 - 3 = \dots\dots\dots = 2^m,094; \\
 F_1 &= 1.000 \times 3 \times 10 = \dots\dots\dots = 30.000^{\text{kg}}; \\
 P - P_1 &= 90.501 - 30.000 = \dots\dots\dots = + 60.501^{\text{kg}}; \\
 &+ 2 \times 90.501 \times 2,993 - 30.000 (2 \times 5,094 - 3) \\
 &\quad - 2 \times 50.000 \times 3,333 \\
 u_1 &= \frac{\dots\dots\dots}{2 (90.501 - 30.000)}, \\
 u_1 &= \frac{+ 208.438,986 - 215.640}{131.002} \dots\dots\dots = - 0^m,059,
 \end{aligned}$$

(Le point i_1 tombe à droite de l'arête aval b);

$$p_b = 2 \times \frac{2 \times 2,094 - 3 (- 0,059)}{2,094} \times \frac{60.501}{2,094} = + 120.450^{\text{kg}},$$

$$p_d = 2 \times \frac{3 (- 0,059) - 2,094}{2,094} \times \frac{60.501}{2,094} = - 62.667^{\text{kg}};$$

$$q = + \frac{50.000}{2,094} = \dots\dots\dots = + 23.878^{\text{kg}}.$$

§ 69. — COMPARAISON ENTRE LES RÉSULTATS CI-DESSUS.

CLIX. — *Exposé.*

Groupons d'abord les résultats en question, dans le tableau suivant, en ramenant les coefficients au centimètre carré.

Il vient :

VALEUR DE l_1	TRACTION ET COMPRESSION		CISAILLEMENT
	TRACTION DE L'ARÊTE AMONT	COMPRESSION DE L'ARÊTE AVAL	
$l_1 = 0^m$	— 1 ^{kg} ,145	+ 4 ^{kg} ,698	+ 0 ^{kg} ,982
$l_1 = 1^m$	— 1 ^{kg} ,866	+ 5 ^{kg} ,779	+ 1 ^{kg} ,221
$l_1 = 2^m$	— 3 ^{kg} ,156	+ 7 ^{kg} ,714	+ 1 ^{kg} ,616
$l_1 = 3^m$	— 6 ^{kg} ,267	+ 12 ^{kg} ,045	+ 2 ^{kg} ,388

Et il résulte de ce tableau que les coefficients de travail de la section résistante croissent rapidement avec la largeur de la fissure horizontale.

ANNEXE N° 6

Calcul de la section 361,50, supposée non fissurée, pour une retenue de 370 (1,500 en contre-bas de la retenue maxima, 371,50).

§ 70. — OBJET DE CETTE ANNEXE.

CLX. — *Exposé.*

A l'annexe précédente, nous avons trouvé que l'arête amont de la section 361,50 travaillait à une tension de — 1^{kg},145, pour la retenue maxima, 371,50.

Dans notre rapport, nous disions que l'état précaire du barrage imposait une grande prudence dans l'alimentation du réservoir.

Nous allons examiner ici ce que serait devenu l'effort d'amont, si on s'était tenu à la cote 370, en ne donnant qu'un mouillage de 2^m dans le canal.

CLXI. — *Détail des calculs.*

Le poids P reste ce qu'il était dans le calcul de l'annexe n° 5, savoir :

$$P = + 90.150^{\text{kg}}.$$

La poussée Q et son bras de levier h deviennent :

$$Q = \frac{1000 \times 8,5^2}{2} = + 36.125^{\text{kg}};$$

$$h = 2^{\text{m}},833.$$

Nous avons alors :

$$u = \frac{+ 90.501 \times 2,993 - 36.125 \times 2,833}{90.500},$$

$$u = \frac{+ 270.869,493 - 102.342,125}{90.501},$$

$$u = 1^{\text{m}},862 > \frac{5,094}{3} = 1^{\text{m}},698;$$

$$p_b = 2 \times \frac{2 \times 5,094 - 3 \times 1,862}{5,094} \times \frac{90.501}{5,095} = + 32.101^{\text{kg}},$$

$$p^a = 2 \times \frac{3 \times 1,862 - 5,094}{5,094} \times \frac{90.501}{5,094} = + 3.422^{\text{kg}}.$$

CLXII. — *Conclusion.*

On voit que le coefficient de traction, $- 1^{\text{kg}},45$, produit par la retenue maxima, devient un coefficient de compression $+ 0^{\text{kg}},343$, lorsque la retenue est réduite à la cote 370.

On avait donc un intérêt énorme à abaisser le niveau de l'eau de $1^{\text{m}},50$.

LÉON LANGLOIS
(Ang. 1863).

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
AVANT-PROPOS : Historique sommaire du barrage de Bouzey	3
CHAPITRE I : Expertise.	7
CHAPITRE II : Objet et mode d'établissement de cette communication.	9

PREMIÈRE PARTIE

Construction initiale du barrage.

CHAPITRE III : Subdivisions de la première partie.	10
CHAPITRE IV : Valeur du sol de fondation.	11
CHAPITRE V : Qualités des matériaux constitutifs du barrage	18
CHAPITRE VI : Tracé rectiligne du barrage	42
CHAPITRE VII : Conditions de stabilité et de résistance du profil adopté à Bouzey	50

DEUXIÈME PARTIE

Première mise en service du réservoir et accident de 1884.

CHAPITRE VIII : Subdivisions de la deuxième partie.	60
CHAPITRE IX : Construction du barrage	60
CHAPITRE X : Mise en service du barrage après achèvement.	62
CHAPITRE XI : Accident de 1884	63

TROISIÈME PARTIE

Restauration du barrage après l'accident de 1884.

CHAPITRE XII : Subdivisions de la troisième partie	73
CHAPITRE XIII : Historique de la restauration du barrage.	73
CHAPITRE XIV : Examen critique de la restauration du barrage	78

QUATRIÈME PARTIE

Deuxième mise en service du réservoir et accident final.

	Pages.
CHAPITRE XV : Subdivisions de la quatrième partie	81
CHAPITRE XVI : Deuxième mise en service du réservoir de Bouzey	82
CHAPITRE XVII : Mesures de surveillance de la digue	83
CHAPITRE XVIII : Critique du remplissage au complet du réservoir	90
CHAPITRE XIX : Accident du 27 avril 1895.	96

CINQUIÈME PARTIE

Conclusions de mon rapport de 1896 et jugement de 1897.

CHAPITRE XX : Conclusions de mon rapport de 1896	123
CHAPITRE XXI : Jugement du 28 mai 1897.	131

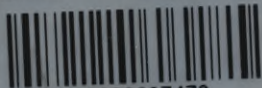
SIXIÈME PARTIE

Pièces annexes.

CHAPITRE XXII : Objet de la sixième partie	150
ANNEXE n° 1 : Étude sur l'élasticité transversale de la digue de Bouzey, supposée constituée par cinq arcs ayant chacun 100 ^m de corde et 10 ^m de flèche	150
ANNEXE n° 2 : Vérification de la stabilité de la digue au renversement. (Ma nouvelle méthode)	153
ANNEXE n° 3 : Travail des maçonneries et de leur fondation (loi du trapèze et nouvelle manière de la présenter)	162
ANNEXE n° 4 : Calcul du barrage restauré.	167
ANNEXE n° 5 : Étude d'une fissure longitudinale de l'amont, à la cote 361,50, moyenne de la grande cassure	176
ANNEXE n° 6 : Calcul de la section 361,50, supposée non fissurée, pour une retenue de 370 (1 ^m ,50 en contre-bas de la retenue maxima, 371,50)	184

S-96

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000297473