

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 95 (1969)  
**Heft:** 18: 50e Comptoir Suisse, Lausanne, 13-28 septembre 1969

**Artikel:** Aperçu sur la contribution des méthodes analogiques à l'étude des écoulements de filtration (suite et fin)  
**Autor:** Renard, G.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-70247>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

## ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes  
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)  
de la Section genevoise de la SIA  
de l'Association des anciens élèves de l'EPFL (Ecole polytechnique  
fédérale de Lausanne)  
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPFZ (Ecole poly-  
technique fédérale de Zurich)

## COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève  
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne  
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève  
Membres:  
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.  
Genève: G. Bovet, ing.; M. Mozer, arch.; J.-C. Ott, ing.  
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.  
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.  
Vaud: A. Chevallay, ing.; A. Gardel, ing.;  
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »  
Président: D. Bonnard, ing.  
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosan-  
dey, ing.; A. Métraux, ing.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky,  
ing.  
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

## RÉDACTION

F. Vermeille, rédacteur en chef; E. Schnitzler, ingénieur, et  
M. Bevilacqua, architecte, rédacteurs  
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »  
Tirés à part, renseignements  
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

## ABONNEMENTS

1 an . . . . .	Suisse Fr. 46.—	Etranger Fr. 50.—
Sociétaires . . . . .	» » 38.—	» » 46.—
Prix du numéro . . . . .	» » 2.30	» » 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »  
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au  
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie  
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

## ANNONCES

Tarif des annonces:  
1/1 page . . . . . Fr. 495.—  
1/2 » . . . . . » 260.—  
1/4 » . . . . . » 132.—  
1/8 » . . . . . » 68.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.  
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



## SOMMAIRE

Aperçu sur la contribution des méthodes analogiques à l'étude des écoulements de filtration (suite et fin), par G. Renard, Dr ing.  
Divers.  
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

## APERÇU SUR LA CONTRIBUTION DES MÉTHODES ANALOGIQUES À L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS DE FILTRATION (Suite et fin)<sup>1</sup>

par G. RENARD, Dr ing.

### 6. La méthode des réseaux de résistance

Les méthodes qui viennent d'être décrites ont une caractéristique commune qui leur confère un intérêt indéniable: c'est la continuité de la représentation. A part les contours à conditions variables, qui nécessitent un affichage discontinu par petites électrodes, l'ensemble du modèle reproduit continûment le domaine étudié et il y a bien identité des équations aux dérivées partielles. Mais le champ d'application reste limité aux problèmes laplaciens et à ceux qui s'y ramènent.

Si l'on accepte de perdre cet avantage de la continuité, donc d'une réelle fidélité de la représentation, autrement dit si l'on consent à une discréttisation qui apporte inévitablement un facteur supplémentaire d'erreur, alors on peut étendre considérablement le domaine d'application tout en conservant le même principe de l'analogie de conduction.

Si l'on considère en effet dans notre conducteur un

cube élémentaire, il présente une certaine résistance entre deux faces opposées, résistance identique quelle que soit la paire de faces. Il est donc possible de remplacer l'ensemble des cubes élémentaires par un réseau maillé de résistances. Il est même possible de choisir pour ces résistances des valeurs différentes, conférant ainsi au conducteur une résistivité variable, qui le fait dépendre d'une équation plus générale que l'équation de Laplace. Le gain obtenu est important et il n'est pour s'en convaincre qu'à penser à la représentation des milieux hétérogènes et anisotropes.

Dans ces milieux les composantes de la vitesse d'infiltration sont proportionnelles aux perméabilités principales, soit par exemple  $k$  et  $k'$  pour un problème plan. Comme l'indique la figure 24, ces perméabilités interviennent dans l'expression développée de l'équation de continuité.

Maillons le domaine au moyen d'un réseau de lignes et de colonnes et considérons un nœud 0 entouré des nœuds 1, 2, 3, 4. A cette croix dont les nœuds portent

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* n° 17 du 23 août 1969.

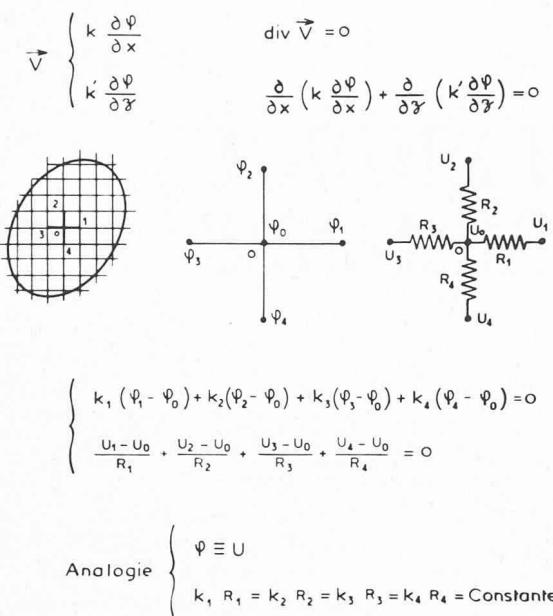


Fig. 24. — Réseaux résistifs. Principe de la méthode.

les valeurs  $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$  de la fonction piézométrique, faisons correspondre une croix de résistances  $R_1, R_2, R_3, R_4$  dont les nœuds sont aux potentiels électriques  $U_0, U_1, U_2, U_3, U_4$ . Transformée en équation aux différences finies au point 0, l'équation de continuité est analogue à la relation de Kirchhoff écrite au nœud électrique 0. Autrement dit, pour identifier  $\phi$  à  $U$ , il suffit de prendre des résistances  $R$  inversement proportionnelles aux perméabilités  $k$ , et d'imposer au contour du réseau des conditions électriques analogues aux conditions aux limites en  $\phi$ . Tout ce qui vient d'être dit s'étend sans peine à des représentations spatiales : la croix devient une étoile à six branches et les équations comportent deux différences supplémentaires. Nous avons d'autre part supposé les mailles de largeur égale, ce qui n'est nullement un impératif : il est ainsi possible de serrer telle ou telle partie du domaine, suivant l'importance du gradient.

La technique des réseaux de résistances a été utilisée par de nombreux auteurs et largement développée dans divers ouvrages [4], [5], [2]. Les réseaux les plus couramment utilisés sont constitués de grands panneaux munis de douilles, sur lesquels on vient enficher des boîtiers contenant des résistances (fig. 25) : ainsi le modèle est-il réalisé très rapidement pour le problème à résoudre et peut être modifié à volonté. L'alimentation électrique est du même type que pour la cuve, à ceci près qu'une alimentation en courant continu est

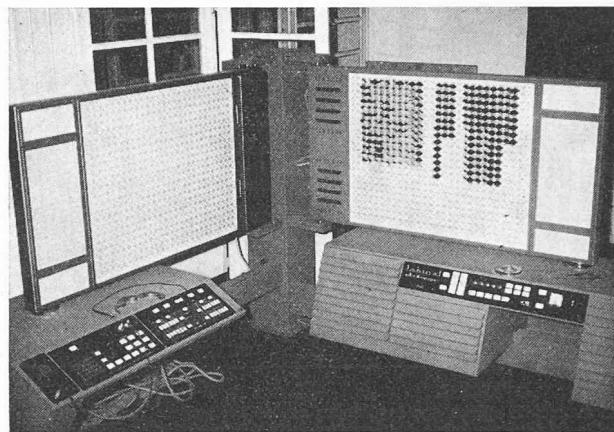


Fig. 25. — Réseaux résistifs. Vue d'un ensemble.

cette fois possible avec l'avantage que procure l'emploi d'un voltmètre digital sans convertisseur de tensions.

La définition des contours et l'imposition des conditions aux limites posent parfois des problèmes lorsque la géométrie n'est pas simple. Diverses solutions ont été proposées par Huard [5]. Pour un contour sinueux, il est parfois préférable de resserrer le maillage.

La recherche d'une surface libre se fait par approximations successives, suivant le principe exposé pour le papier conducteur. Mais ici la découpe du modèle ne peut se faire de manière aussi simple qu'au papier, car il y a peu de chances que les approximations passent exactement par des nœuds du réseau. On peut cependant s'arranger pour être pratiquement dans cette situation si l'on prend la précaution de serrer le maillage dans la région de la surface libre : les approximations s'obtiennent alors simplement en retirant les résistances des mailles devenues inutiles. La convergence est très rapide, car aucune alimentation électrique ( $\frac{d\phi}{dn} = 0$ ) n'est à imposer sur cette frontière. Si le maillage n'a pas été resserré dans la région de la surface libre, il est alors nécessaire de remplacer les résistances de bordure par des résistances proportionnelles aux longueurs des brins restants en calculant celles-ci par interpolation entre les nœuds. Cette méthode est plus longue, mais le réseau est plus léger et la précision peut être plus grande.

Une troisième méthode, dite *par injections*, ne nécessite aucun remaniement du réseau tout en étant très précise. Elle consiste à injecter en chaque nœud de la frontière des intensités qui tiennent compte à la fois de la condition  $\frac{d\phi}{dn} = 0$ , de la pente de la frontière et de la disposition actuelle des résistances. Les inten-

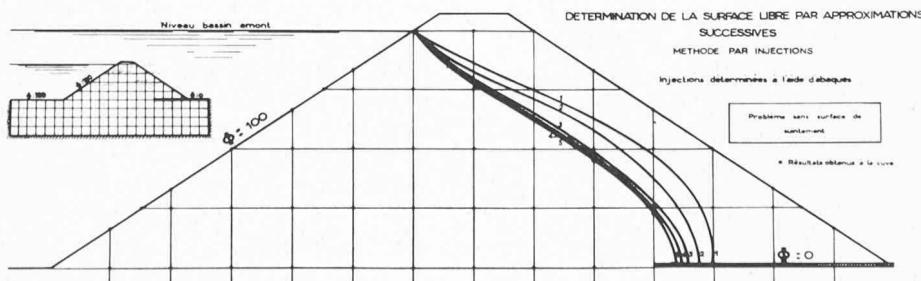


Fig. 26. — Réseaux résistifs. Recherche d'une surface libre par injections.

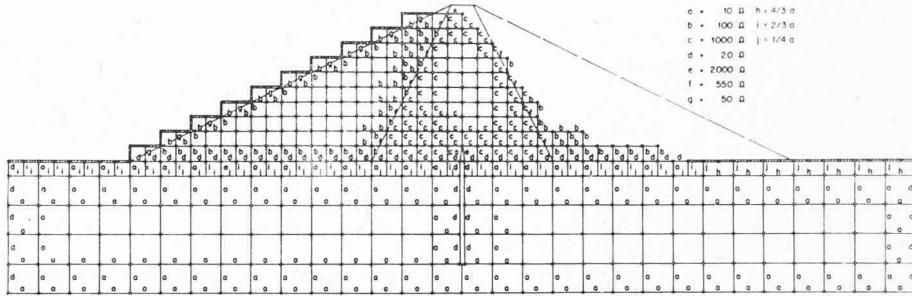


Fig. 27. — Massif zoné. Maillage.

sités ne sont généralement pas connues, car elles sont fonctions des potentiels aux nœuds correspondants. Mais les itérations sont rapides, et une fois imposées peu importe que le réseau soit prolongé au-delà de la surface libre. La figure 26 montre un exemple d'emploi de cette méthode pour un barrage plan, homogène et isotrope, muni d'un drain aval : on voit que le maillage est assez lâche et cependant la précision finale est excellente, comme l'a montré une confrontation avec le papier conducteur.

L'intérêt essentiel de la méthode des réseaux réside, nous l'avons dit, dans la représentation des milieux hétérogènes. En général les massifs poreux sont homogènes par zones : chacune d'elles sera donc représentée par des résistances de valeurs inversement proportionnelles aux perméabilités. L'anisotropie se représente de même en jouant sur le rapport des valeurs entre résistances horizontales et verticales. La figure 27 donne un exemple de maillage avec valeurs de résistances pour un massif poreux plan constitué de trois zones principales : un noyau central de perméabilité  $k$ , les parements de perméabilité  $10k$  et un socle de perméabilité  $100k$ . De plus, un puits imperméable crée un obstacle à la progression de l'écoulement dans le socle. Les deux champs orthogonaux sont reproduits sur la figure 28.

Un autre exemple de barrage bidimensionnel hétérogène est donné sur les figures 29 et 30. Il représente un ouvrage réalisé en Inde. Il repose sur un socle anisotrope qui comportait une faille perméable. Malgré un drain de grande longueur à l'aval, la surface libre conservait une forme dangereuse pour la tenue du massif (fig. 29). En injectant dans la faille un rideau de même perméabilité que le massif, la répartition des courants est sensiblement améliorée (fig. 30).

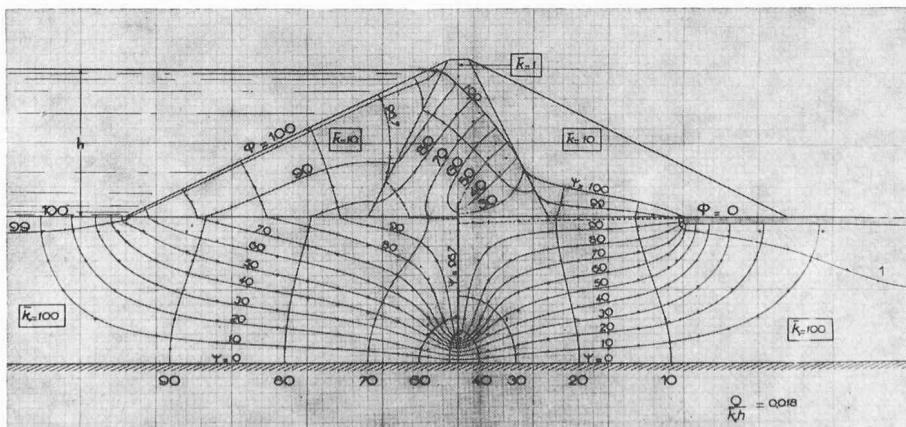


Fig. 28. — Massif zoné. Champs.

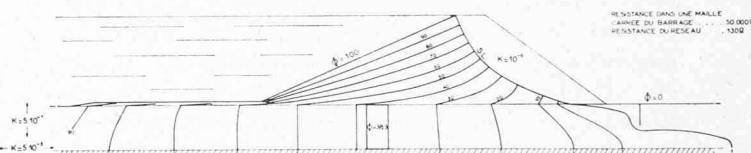


Fig. 29. — Barrage Kotah. Champ sans rideau d'injection.

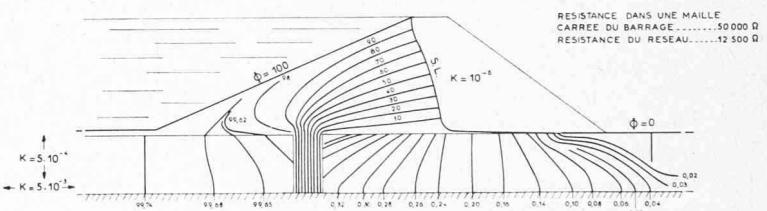


Fig. 30. — Barrage Kotah. Champ avec rideau d'injection.

La méthode des réseaux est utilisée avec profit pour les problèmes à trois dimensions. Il suffit de faire des coupes suivant les trois plans de coordonnées. Mais dans la plupart des problèmes d'infiltrations, il existe une direction privilégiée suivant laquelle les gradients sont faibles : c'est d'ailleurs ce qui incite les ingénieurs à considérer l'écoulement comme plan en première approximation. Il est clair par exemple que pour un barrage, l'écoulement prépondérant a lieu de l'amont vers l'aval et qu'une coupe dans cette direction suffit bien souvent à fournir des résultats valables. Ce n'est pas le cas lorsque le profil de la vallée n'est plus quasi rectangulaire (fig. 31), mais la direction perpendiculaire à l'écoulement général reste cependant privilégiée. On

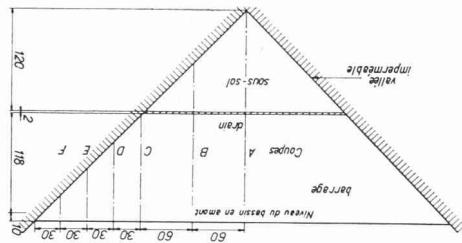


Fig. 31. — Barrage tridimensionnel. Profil de vallée.

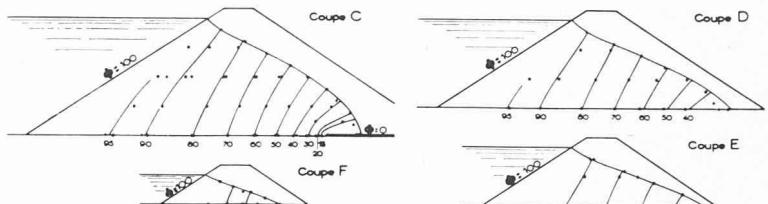


Fig. 33. — Barrage tridimensionnel. Champs pour quatre coupes.

peut alors considérer un petit nombre de coupes dans cette direction et prendre pour elles un maillage serré. Dans l'exemple de la figure 31, on étudie un barrage isotrope sur sous-sol perméable, placé dans une vallée imperméable en forme de dièdre rectangle. Six coupes ont été choisies : leurs maillages apparaissent sur la figure 32 et les champs équipotentiels sont donnés pour quatre d'entre elles sur la figure 33.

Un exemple de résolution par réseau d'un écoulement tridimensionnel est fourni par l'étude d'un tronçon du canal principal du Rhône entre Fourques et Pichegu. Les terrains que traverse le canal sont peu homogènes : ils reposent sur un lit de sables et graviers et sont constitués de matériaux cohérents de faible perméabilité entre lesquels sont intercalées des lentilles perméables de sable dont la situation et l'épaisseur sont assez variables tout au long du canal. Ces alluvions sont alimentées par le fond en eau d'infiltration, dont la nappe a même niveau que celui du canal plein (fig. 34).

Le problème posé est celui de la stabilité du revêtement du canal, dans le cas défavorable où une vidange totale vient d'avoir lieu et où l'écoulement de la nappe vers le canal peut être à l'origine de phénomènes d'érosion par suite de la présence des lentilles de sable faisant

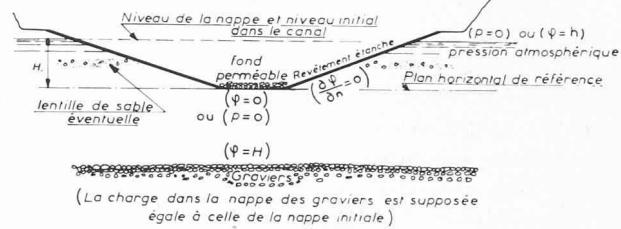


Fig. 34. — Canal du Rhône. Coupe du domaine.

office de drains. Il s'agit donc de déterminer le champ de la charge hydraulique pour diverses configurations : présence ou non de bancs de sable dans des zones différentes et de perméabilités différentes, localisations et dimensions diverses des drains. On suppose que la vidange est assez rapide pour que la nappe soit restée à son niveau initial. Le revêtement constitue une limite imperméable de l'écoulement.

Le modèle est constitué par trois coupes transversales du canal, l'axe de celui-ci constituant une direction privilégiée où le gradient est faible. La figure 35 reproduit le réseau correspondant (le panneau de droite porte les liaisons entre coupes) et la figure 36 montre

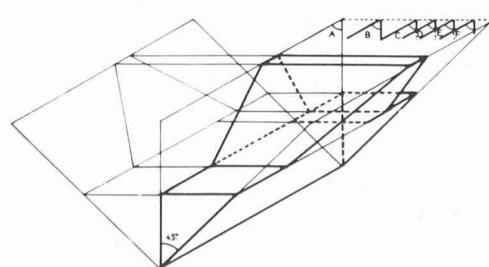
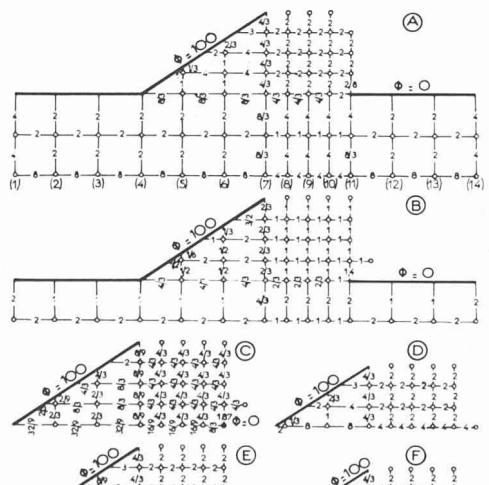
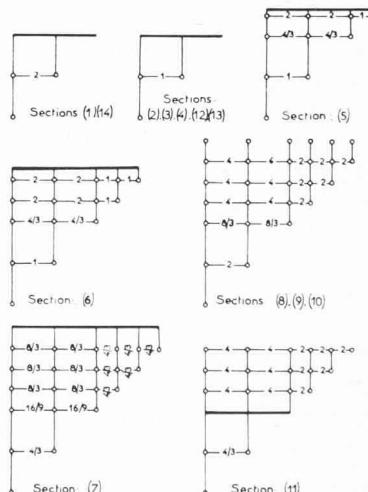


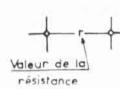
Fig. 32. — Barrage tridimensionnel. Maillage des six coupes.



#### MODELE ANALOGIQUE AU RESEAU

#### D'UN BARRAGE

#### A TROIS DIMENSIONS



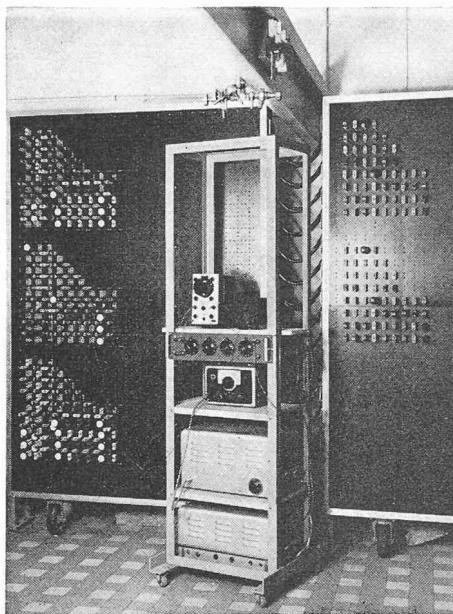


Fig. 35. — Canal du Rhône. Vue du réseau.

le champ pour l'une des dix-huit configurations étudiées (bane de sable au fond du canal, sable 1000 fois plus perméable que les terrains argileux drainés tous les 4 m au moyen de drains de 1 m situés au fond du talus). Le champ est complété par le relevé des sous-pressions sur le revêtement.

#### 7. La détermination des écoulements non permanents

Une autre possibilité offerte par les méthodes analogiques concerne la recherche des écoulements non permanents. On peut admettre en effet pour ces écoulements que par suite des faibles valeurs des vitesses et des accélérations, les effets d'inertie sont négligeables et que tout se passe comme si on avait affaire à une succession d'écoulements permanents vérifiant la loi de Darcy. En conséquence, aussi bien la méthode du papier conducteur pour les milieux plans homogènes que la méthode des réseaux de résistance pour tous milieux peuvent permettre la détermination de tels écoulements.

Plusieurs des exemples que nous avons donnés peuvent concerner des régimes transitoires : il en est ainsi pour la vidange d'une retenue (barrage, canal) ou l'abaissement d'une nappe phréatique ou le drainage d'un terrain après une pluie. Les résultats obtenus seraient représentatifs si l'on avait tenu compte du temps dans les conditions aux limites. En fait, c'est surtout la détermination de la surface libre qui est affectée par la variable temps, car cette frontière n'est plus ligne de courant ( $d\phi/dn \neq 0$ ) : le flux qui la traverse provoque son mouvement.

Une relation simple donne pour tout point de la surface libre l'expression de la dérivée de la cote par rapport au temps. En négligeant les variations de cette dérivée pendant le court intervalle de temps servant de pas de discrétisation, il est possible de déterminer les positions successives de la surface libre. Cette détermination est réalisable au papier conducteur pour les problèmes plans homogènes, mais la surface libre comporte cette fois des électrodes où l'on impose le flux.

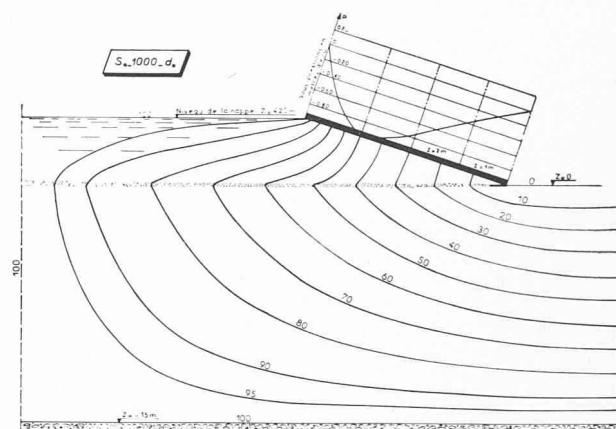


Fig. 36. — Canal du Rhône. Champ pour une configuration.

Cette petite complication incite souvent les utilisateurs à employer carrément le réseau, ce qui leur permet de faire intervenir immédiatement les hétérogénéités et la troisième dimension.

A titre d'exemple, la figure 37 montre les positions successives de la surface libre au cours du temps dans le drainage d'un massif rectangulaire.

#### 8. Autres méthodes analogiques

L'analogie de conduction électrique n'est pas la seule à permettre la détermination d'écoulements à surface libre. On peut citer par exemple l'analogie par réseaux hydrauliques, dont le principe est strictement équivalent à celui des réseaux de résistances. Dans le cas de problèmes plans, de tels réseaux peuvent être constitués simplement au moyen de deux plaques de plexiglas collées, l'une comportant de fins sillons suivant un maillage régulier. L'avantage de ces réseaux capillaires est qu'ils permettent la visualisation du déplacement de la surface libre dans un écoulement non permanent.

Une autre analogie utilisée est celle de Hele-Shaw, qui met en œuvre l'écoulement d'un fluide visqueux entre deux plaques verticales rapprochées et parallèles. Avec certaines hypothèses sur les lignes de courant et les vitesses, on démontre que la fonction piézométrique, somme de la pression statique et du terme de pesanteur,

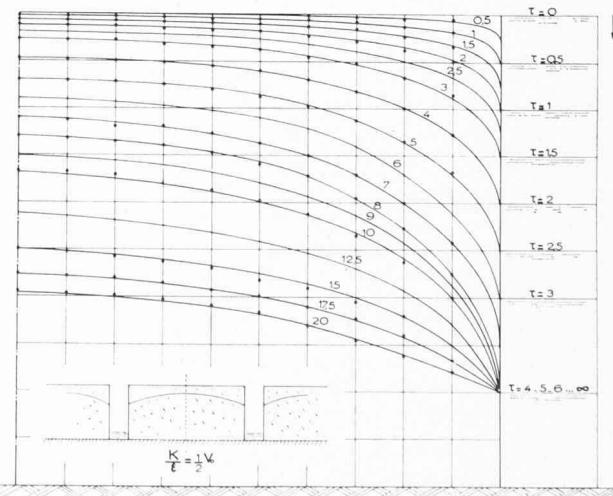


Fig. 37. — Drainage d'un massif rectangulaire.

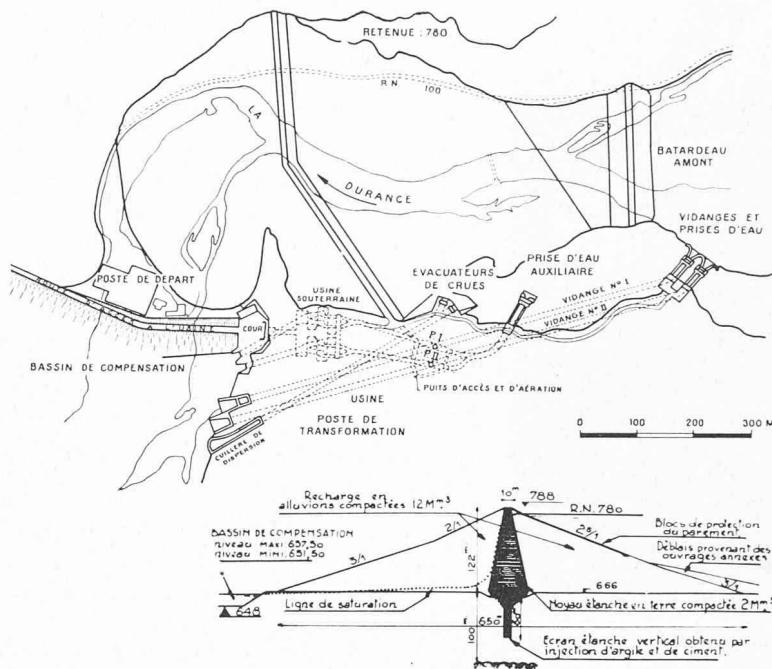


Fig. 38. — Digue de Serre-Ponçon. Site et coupe.

est harmonique et que la vitesse moyenne suit une loi analogue à celle de Darcy. Divers auteurs ont utilisé cette analogie, notamment pour l'étude des drains d'assainissement ou d'interception [6]. Elle nécessite un appareillage assez précis comportant des réservoirs et des circuits de circulation d'huile ainsi qu'un système de pompage. On peut ainsi visualiser les diverses positions de la surface libre de l'huile entre les deux plaques et les enregistrer par photographies.

#### 9. Une application intéressante : la digue de Serre-Ponçon

Parmi tous les projets qui ont nécessité une étude d'écoulements de filtration à laquelle le Centre de calcul analogique du CNRS a pris une part active, le plus intéressant concerne la digue de Serre-Ponçon.

Ce barrage en alluvions compactées est situé au confluent de la Durance et de l'Ubaye (fig. 38). Il a nécessité 2 millions de m<sup>3</sup> de terres pour le noyau imperméable, 12 millions pour les recharges et 100 000 pour le revêtement de protection. Les quelques chiffres suivants, extraits de la référence [7], permettent de se faire une idée de l'importance de cet ouvrage :

Cote de retenue : 780 m  
Bassin versant : 3600 km<sup>2</sup>  
Apports moyens annuels : 2770 Mm<sup>3</sup>  
Réserve totale : 1200 Mm<sup>3</sup>  
Réserve utile : 900 Mm<sup>3</sup>  
Débit d'équipement usine : 300 m<sup>3</sup>/s  
Hauteur de chute équipée : 125 m  
Puissance installée : 320 000 kW  
Énergie moyenne annuelle : 700 MkWh

Une première étude analogique a consisté en la détermination du champ des équivalences, en supposant le problème plan et permanent. Le massif est zoné et

comporte cinq perméabilités différentes, dont les extrêmes sont dans le rapport 10 000. Le champ a été obtenu par la méthode des réseaux de résistances (fig. 39).

Une seconde étude, également aux réseaux, a permis l'obtention des lignes équipotentialles et des positions successives de la surface libre dans le cas d'une vidange lente de la retenue (fig. 40), toujours à deux dimensions.

Mais pour avoir des résultats précis concernant le débit de fuite et l'importance des sous-pressions sous la partie aval du barrage, il s'est avéré nécessaire de faire une étude à trois dimensions en reproduisant le profil exact de la vallée. Cet essai a pu être fait au moyen de la cuve en ne considérant à l'aval que le soubassement du barrage et le drain. Les essais bidimensionnels avaient en effet prouvé que la surface libre suivait pra-

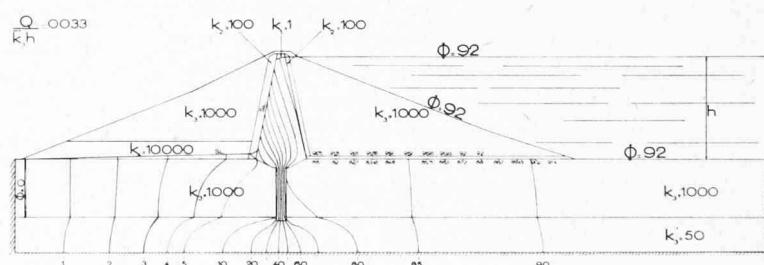


Fig. 39. — Digue de Serre-Ponçon. Champ permanent.

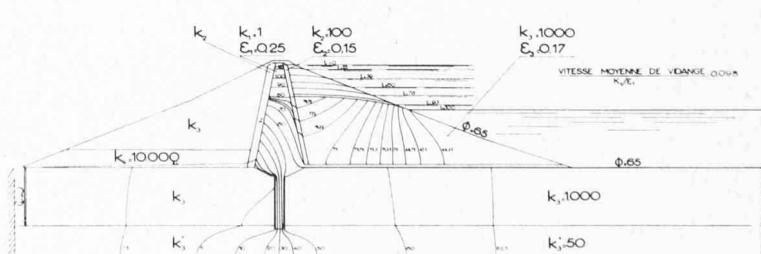


Fig. 40. — Digue de Serre-Ponçon. Vidange lente de la retenue.

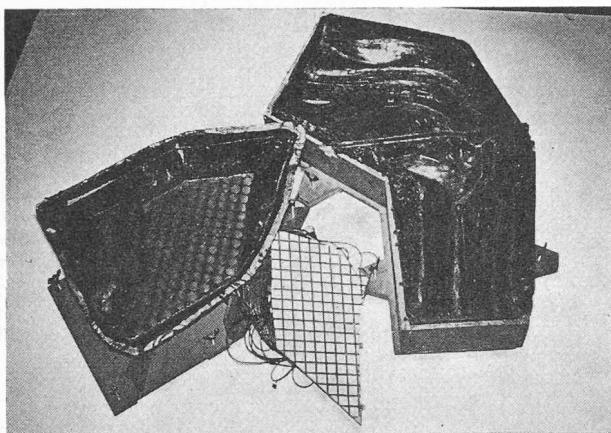


Fig. 41. — Digue de Serre-Ponçon. Vue des bassins tridimensionnels.

tiquement la paroi aval du noyau étanche, puis la surface du soubassement : il était donc inutile de représenter la partie aval du barrage. Par contre la partie amont a dû être reproduite, et ce au moyen d'un bassin spécial raccordé électriquement au bassin figurant le soubassement, comme l'indique la figure 41. Ces bassins ont été réalisés en matière plastique moulée. Le fond du bassin amont comporte des électrodes qui permettent le report des potentiels à la surface du bassin de soubassement, par l'intermédiaire d'une plaque ayant des électrodes analogues et venant recouvrir la partie amont de ce bassin. Le bassin amont, une fois rempli, est recouvert d'une plaque de laiton figurant le parement amont de la digue (fig. 42). A l'aval du bassin de soubassement, le drain est représenté au moyen d'un grillage de laiton.

Quelques vues du barrage actuel sont données pour illustrer cette description : une vue du parement amont (fig. 43), une autre du parement aval (fig. 44).

#### 10. Le calcul hybride

Quelle que soit la puissance des ordinateurs actuels ou futurs, les modèles analogiques gardent tout leur intérêt, surtout parce qu'ils visualisent les solutions des problèmes d'écoulements en milieu poreux, et parce qu'ils sont à même, par de légères et rapides modifica-

tions, de s'adapter à toutes variations de paramètres et à toutes recherches d'optimum.

Il n'est cependant pas inutile de chercher à les améliorer pour en tirer tout le bénéfice qu'ils sont susceptibles de fournir. Il est évident par exemple que la recherche d'une frontière inconnue à trois dimensions nécessite parfois de fastidieuses itérations mettant en œuvre d'une part le réglage d'injections d'intensités, d'autre part des calculs auxiliaires que l'on cherche très vite à simplifier au détriment de la précision.

A cet égard, les efforts accomplis actuellement par le CCA pour réaliser un calculateur hybride par association d'un réseau et d'un ordinateur, devraient prochainement être profitables à l'étude des écoulements de filtration.

Le principe d'un tel calculateur est simple : il a d'ailleurs été exposé dans plusieurs publications [8], [9], [10]. Le réseau ayant été monté pour le problème à résoudre, c'est-à-dire avec les résistances correspondant aux diverses perméabilités, chaque nœud doit pouvoir recevoir une injection d'intensité et la valeur de son potentiel doit pouvoir être lue. Ainsi la chaîne hybride (fig. 45) comprend-elle tout d'abord un ordinateur qui possède en mémoire les conditions d'injection des nœuds et délivre les ordres correspondant à des injecteurs par l'intermédiaire d'un convertisseur numérique-analogique et d'une commutation d'affichage. Les injecteurs, une

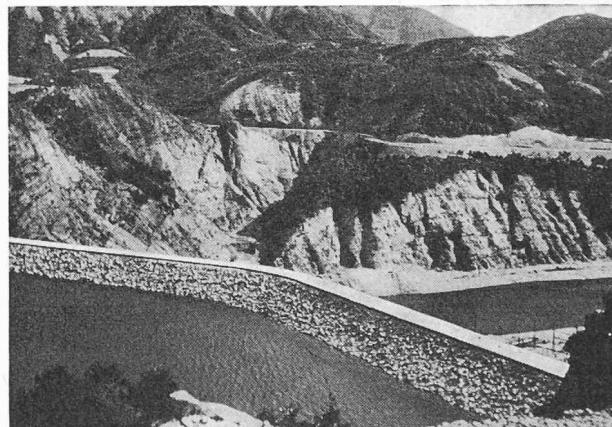


Fig. 43. — Digue de Serre-Ponçon. Vue du parement amont.

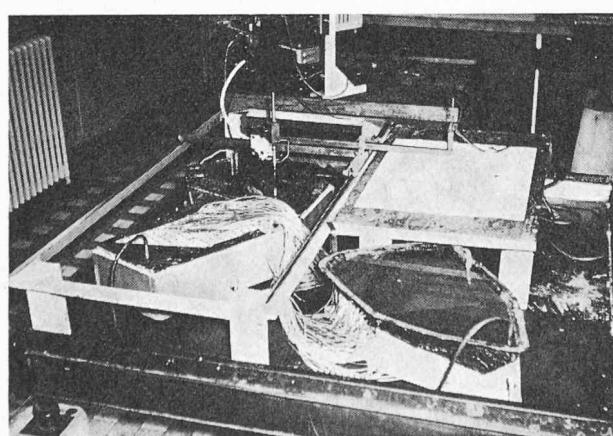


Fig. 42. — Digue de Serre-Ponçon. Bassin tridimensionnel en essai.



Fig. 44. — Digue de Serre-Ponçon. Vue du parement aval.

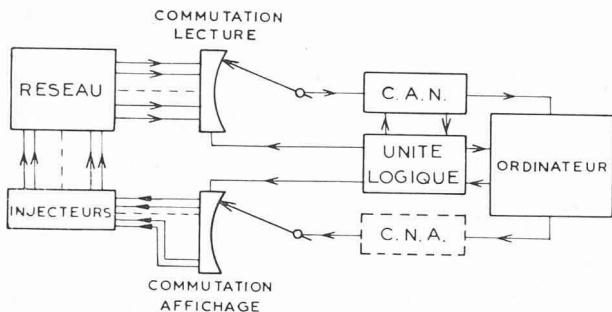


Fig. 45. — Principe du calcul hybride par réseaux.

fois réglés, envoient les intensités aux nœuds du réseau dont les potentiels peuvent alors être lus et mis en mémoire de l'ordinateur grâce à une commutation de lecture et à un convertisseur analogique-numérique. Une unité logique assure la commande de ces diverses unités et la marche séquentielle de la boucle.

L'idée originale qui a prévalu dans la première chaîne réalisée par le CCA et qui a été conservée dans la conception du modèle probatoire en cours de réalisation, est basée sur le principe de superposition d'effets élémentaires. L'excitation du réseau peut se faire en plusieurs étapes, les réponses successives étant mémorisées et cumulées pour fournir la solution. Le choix du type d'effets élémentaires a été fait dans un souci de simplification et de fiabilité technologiques. Il consiste à injecter les intensités par poids successifs en partant des valeurs digitalisées écrites en mémoire d'ordinateur. Ainsi, dans un premier passage, les nœuds reçoivent ou non une intensité suivant que le bit de poids le plus élevé est 1 ou 0 (fig. 46). La réponse du réseau est alors recueillie et mémorisée. Dans un deuxième passage, le poids suivant est pris en compte, et ainsi de suite jusqu'à épuisement des poids, chaque passage impliquant une réponse du réseau qui est lue et cumulée aux précédentes.

De ce fait, l'excitation du réseau ayant lieu par des ordres « tout ou rien » en provenance de l'ordinateur, le rôle du convertisseur numérique-analogique disparaît et cet organe peut être supprimé. D'autre part, les injections étant unitaires, les injecteurs peuvent être des organes simples, sans électronique, et par conséquent fiables et peu onéreux.

La première réalisation, appelée CHR 100, fut un modèle d'essai. Elle correspondait à la liaison d'un réseau

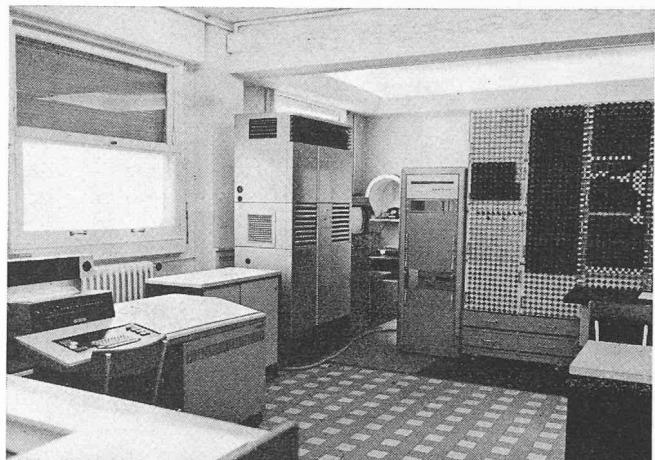


Fig. 48. — Vue d'ensemble du C.H.R. 10 000.

d'une centaine de nœuds à un petit ordinateur CAB 500 (fig. 47). Les commutations d'affichage et de lecture fonctionnaient à un coup par seconde. Cette petite chaîne a permis de jeter les bases d'un modèle probatoire et de mettre au point les premiers éléments d'un software hybride.

La seconde réalisation, appelée CHR 10 000 et qui est actuellement en fin de construction, doit être un modèle probatoire comportant 1000 voies d'injections et 1000 voies de lecture avec un ordinateur IBM 1130. La scrutation de lecture aura lieu à une cadence comprise entre 10 et 20 KHz. La figure 48 montre une vue de l'ensemble, non comprise l'armoire de commutation de lecture : à droite se trouvent l'imprimante et l'unité centrale, à gauche le réseau et l'armoire d'injection et de commutation d'affichage.

L'utilisation de cette chaîne pour la détermination des écoulements de filtration est assez prometteuse à priori. Ainsi la méthode dite *par injections* pour la recherche des surfaces libres pourra être utilisée avec facilité : le réseau n'a pas à être limité au domaine d'étude. Il peut s'étendre au-delà, puisque par injections d'intensités aux nœuds du contour du problème physique toutes conditions aux limites pourront être imposées. Il est même possible d'envisager l'emploi de réseaux à résistances toutes égales, qui représenteront le terme laplacien de l'équation, le reste étant imposé à chaque nœud par injection d'intensités. On voit d'autre part tout le profit qu'il y a à tirer d'un tel calcu-

Nœuds	Valeurs à injecter
0	1 0 1 0 0 0 1
1	1 1 0 0 1 1 0
2	0 1 0 1 1 0 0
⋮	⋮
n	1 0 0 0 1 1 0

Fig. 46. — Digitalisation des injections.

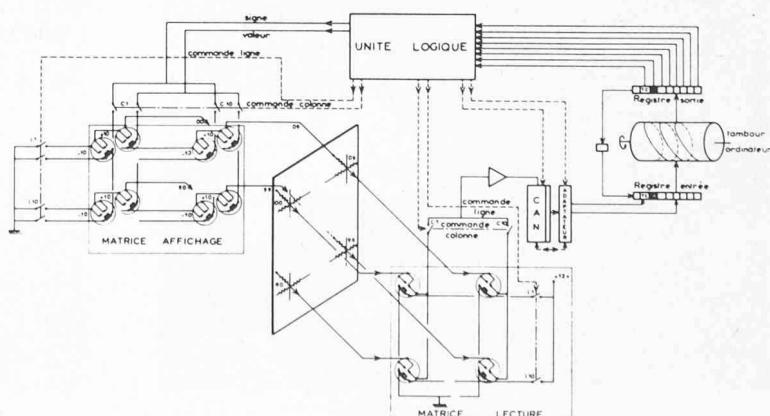


Fig. 47. — Schéma du C.H.R. 100.

lateur pour la détermination des écoulements non permanents : la vitesse de fonctionnement est telle qu'il sera possible de diminuer considérablement le pas de temps, jusqu'à obtenir une très bonne précision.

Cette perspective, jointe au fait que les méthodes traditionnelles peuvent apporter encore une contribution très importante à la résolution des problèmes d'infiltration, incitent à formuler le vœu que les techniques analogiques et hybrides soient mieux connues pour être plus souvent et mieux utilisées.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] L. MALAVARD et G. RENARD : *La technique des analogies rhéoélectriques*. Techniques générales du laboratoire de physique, vol. II, ch. 12, CNRS, 1962.
- [2] P. HUARD DE LA MARRE : *Résolution de problèmes d'infiltrations à surface libre au moyen d'analogies électriques*. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, n° 340, Paris, 1958.
- [3] E. D'OLIVEIRA E SOUSA : *O Enxugo das Terras pelo Drenos*. Annales de l'Institut supérieur d'agronomie, vol. XVIII, Lisbonne, 1951.
- [4] G. LIEBMAN : *Solution of partial differential equations with a resistance network analogue*. Brit. Journ. Appl. Phys., 1, 1950.
- [5] HUARD DE LA MARRE : *Sur l'imposition des conditions aux limites dans les réseaux de conductances*. Premières Journées internationales de calcul analogique, Bruxelles, 1955.
- [6] A. DAS GUPTA : *Contribution à l'étude des drains d'infiltration en milieu poreux*. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, n° 438, Paris, 1967.
- [7] M. GUELTON et R. MAIGRE : *Le barrage de Serre-Ponçon*. Ve Congrès international des Grands Barrages. Supplément à la Revue travaux, n° 247, 1955.
- [8] L. MALAVARD et G. RENARD : *Principe d'un calculateur à réseaux d'impédances*. Note aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences, tome 265, Série A, août 1967, n° 6.
- [9] G. RENARD et J. QUINIO : *Réalisation et essai d'un calculateur hybride à réseau résistif*. Note aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences, tome 265, Série A, août 1967, n° 9.
- [10] L. MALAVARD et G. RENARD : *Un calculateur hybride à réseaux d'impédances pour la résolution d'équations aux dérivées partielles*. V<sup>e</sup> Journées internationales de calcul analogique, Lausanne, septembre 1967.

Adresse de l'auteur :

G. Renard, Dr ing., Centre de calcul analogique, 29, avenue de la Division-Leclerc, 92 Châtillon-sous-Bagnolet (Hauts-de-Seine)

## DIVERS

### Enquête sur l'activité de la branche du bâtiment en 1968 et les constructions projetées pour 1969 (résultats provisoires<sup>1</sup>)

Exécutée avec le concours des cantons, des communes et des services fédéraux compétents, l'enquête du délégué aux possibilités de travail sur l'activité de la branche du bâtiment en 1968 et les constructions projetées pour 1969 a donné les résultats provisoires que voici :

Les constructions réalisées en 1968 ont presque totalisé 12,6 milliards de francs, soit 550 millions ou 4,6 % de plus qu'en 1967, année où le taux de progression n'avait atteint que 1,1 %. Etant donné qu'en 1968, le coût de la construction n'a pas ou que très peu augmenté, le volume des constructions en termes réels s'est accru approximativement dans la même proportion que leur valeur. Quant à l'indice de l'emploi dans la branche du bâtiment, il a baissé de quelque 3 % par rapport à 1967 ; il en résulte que la productivité du travail s'est notamment améliorée.

Les projets de construction dont l'exécution est envisagée cette année représentent 15,4 milliards de francs, soit un accroissement de 1,8 milliard ou de 13 % au regard de 1968. Au cours des quatre dernières années, les constructions projetées avaient en revanche marqué une légère baisse ou étaient demeurées stationnaires. La forte reprise que l'on enregistre maintenant reflète le redressement conjoncturel noté dès le second semestre de 1968.

L'écart entre les constructions annoncées pour 1968 et les travaux exécutés cette même année s'est réduit à près de 1 milliard de francs. Il était deux fois plus élevé il y a quatre ans. Ce fléchissement est un indice évident de la détente et de la normalisation qui se sont produites depuis lors sur le marché des constructions.

<sup>1</sup> Au moment de mettre sous presse, nous apprenons que les résultats définitifs viennent d'être publiés. (Réd.).

La considérable progression des constructions projetées donne cependant à penser que cette phase est arrivée à son terme. L'année en cours sera à nouveau placée sous le signe d'une sensible intensification de la construction. Le problème du financement ne sera vraisemblablement pas de nature à entraver cette évolution. La tension sur le marché du travail exercera toutefois un effet modérateur.

En considérant l'activité de la branche du bâtiment en 1968 selon les principaux adjudicateurs, il apparaît que la part des travaux publics à l'ensemble des constructions s'est encore accrue — quoique dans une faible mesure — pour s'inscrire à 37,9 %. Au demeurant, tant dans le secteur privé que public, les projets annoncés n'ont pas été entièrement réalisés. Les pouvoirs publics ont exécuté en 1968 des travaux pour 4,74 milliards de francs comparativement à 4,54 milliards l'année précédente. Comme en 1967, l'accroissement a été de 200 millions de francs ou de 4,4 %. Le taux de progression n'a donc plus dépassé de beaucoup celui de l'ensemble des constructions. La Confédération a participé à ce développement à raison de 7 %, la contribution des communes — le plus important adjudicateur public en chiffres absolus — s'établissant à 5 % et celle des cantons à 3 %. Proportionnellement, cette expansion s'est répartie à parts égales entre l'édition de bâtiments et le génie civil.

Portant sur 3,75 milliards de francs (7,51 milliards en 1967), les constructions privées ont, pour la première fois depuis 1964, accusé une augmentation ; elle a été de 240 millions de francs ou de 3,2 %. Elle est due essentiellement à la construction de logements qui a progressé de 150 millions de francs pour atteindre 4,4 milliards. Dans ce domaine, la plus-value de 3,5 % a été à peu près du même ordre de grandeur que celle du volume global des constructions. Quant aux constructions industrielles, elles se sont maintenues au même niveau qu'en 1966 (quelque 2,4 milliards de francs). Leur part au volume global — 19,3 % — a donc encore subi un léger recul.