

auscultation de la digue de Lavours (aménagement du Haut-Rhône)

lavours - monitoring of a bund built on very soft ground

A. COMTET

Ingénieur à la Compagnie Nationale du Rhône*

B. MEMIER

Ingénieur géotechnicien au B.R.G.M. de Lyon**

Résumé

Dans le cadre de l'aménagement hydroélectrique du Haut-Rhône, la Compagnie Nationale du Rhône a édifié une digue de 5 m de hauteur, 1 700 m de long, reposant sur une épaisse couche de matériaux compressibles (tourbe).

Afin d'apprécier le comportement réel de ces matériaux, le B.R.G.M. a conçu, mis en place et suivi pendant plus d'un an, un dispositif d'auscultation comprenant piézomètres, capteurs de pression interstitielle, tassomètres et inclinomètres. Les résultats ont permis de mettre principalement en évidence :

- des déformations latérales des niveaux tourbeux ;
- la lenteur de la dissipation des pressions interstitielles ;
- et un tassement réel nettement inférieur au tassement théorique.

Abstract

As part of the hydroelectric equipment of the upper Rhone, the C.N.R. has built a 5 m high and 1 700 m long bund, founded on a thick layer of very soft ground (peat).

In order to evaluate the behaviour of this soil, the B.R.G.M. has developed, installed and followed over a period of more than a year, a monitoring system including piezometers, pore-pressure cells, tassometers and inclinometers.

After interpretation of the results, this study has shown mainly that :

- lateral displacements occured in the peat layers ;*
- pore-pressures dissipated very slowly ;*
- the actual settlements were much smaller than expected from theoretical calculations.*

* 2, rue André Bonin, 69316 Lyon cedex 04. Bureau de Recherches géologiques et minières.

** Service géologique régional Rhône-Alpes - B.P. 6083, 69604 Villeurbanne cedex.

1. GÉNÉRALITÉS

Dans le cadre de l'équipement hydroélectrique de la vallée du Haut-Rhône, la Compagnie Nationale du Rhône a réalisé l'aménagement de la chute de Belley, dont la mise en service a eu lieu à la fin de l'année 1981.

L'aménagement, d'une longueur de 22 km environ (fig. 1) comprend, de l'amont vers l'aval:

— une retenue de 4,5 km dans le lit du fleuve, dont les travaux comportent essentiellement:

- sur les deux rives, le recalibrage du lit mineur par dérasement et rescindement des berges;

- en rive gauche, un aménagement de berge submersible de 2 km, suivi d'une digue insubmersible de 2,5 km;

— un barrage de retenue situé en rive droite du Rhône, face au débouché du canal de Savières;

— un barrage et un seuil rétablis au débouché du canal de Savières;

— une écluse implantée dans la digue de rive gauche, permettant le passage de la navigation de plaisance entre la retenue et le lac du Bourget;

— un canal d'aménée de 13,5 km de longueur, qui emprunte la dépression du marais de «Cressin», le passage rocheux du «Lit-du-Roi», la vallée de l'Ousson. Le canal est établi pour partie en déblai et pour partie en remblai au-dessus du terrain naturel, la hauteur maximale des digues atteignant 13 m;

— une usine hydroélectrique;

— un canal de fuite de 1,6 km de longueur, creusé dans la molasse gréseuse et les alluvions sablo-graveleuses du Rhône.

L'ensemble des ouvrages a nécessité l'exécution de 14,6 millions de m³ de terrassement et de 140 000 m³ de béton.

2. DESCRIPTION GÉOLOGIQUE SOMMAIRE DU SITE DE L'AMÉNAGEMENT

Au départ de l'aménagement, la vallée est large et bordée en rive droite par la plaine de Lavours, très marécageuse, puis est enserrée entre l'extrémité nord du dernier chaînon subalpin qui sépare la vallée du Rhône du lac du Bourget d'une part, et, d'autre part, le premier chaînon jurassien qui se développe au Nord de Belley. Le fond de cette zone, tectoniquement complexe, est probablement occupé par de la molasse qui affleure plus au Sud vers Massignieu, mais qui est masquée ailleurs par les alluvions. Dans la partie aval de cette zone, se développent les marais de Cressin, submergés par l'aménagement.

A l'aval de ces marais en suivant le canal de déviation, on rencontre le verrou rocheux du Lit-du-Roi, où le canal est entaillé dans le calcaire, puis deux vallées marécageuses qui marquent vraisemblablement le tracé

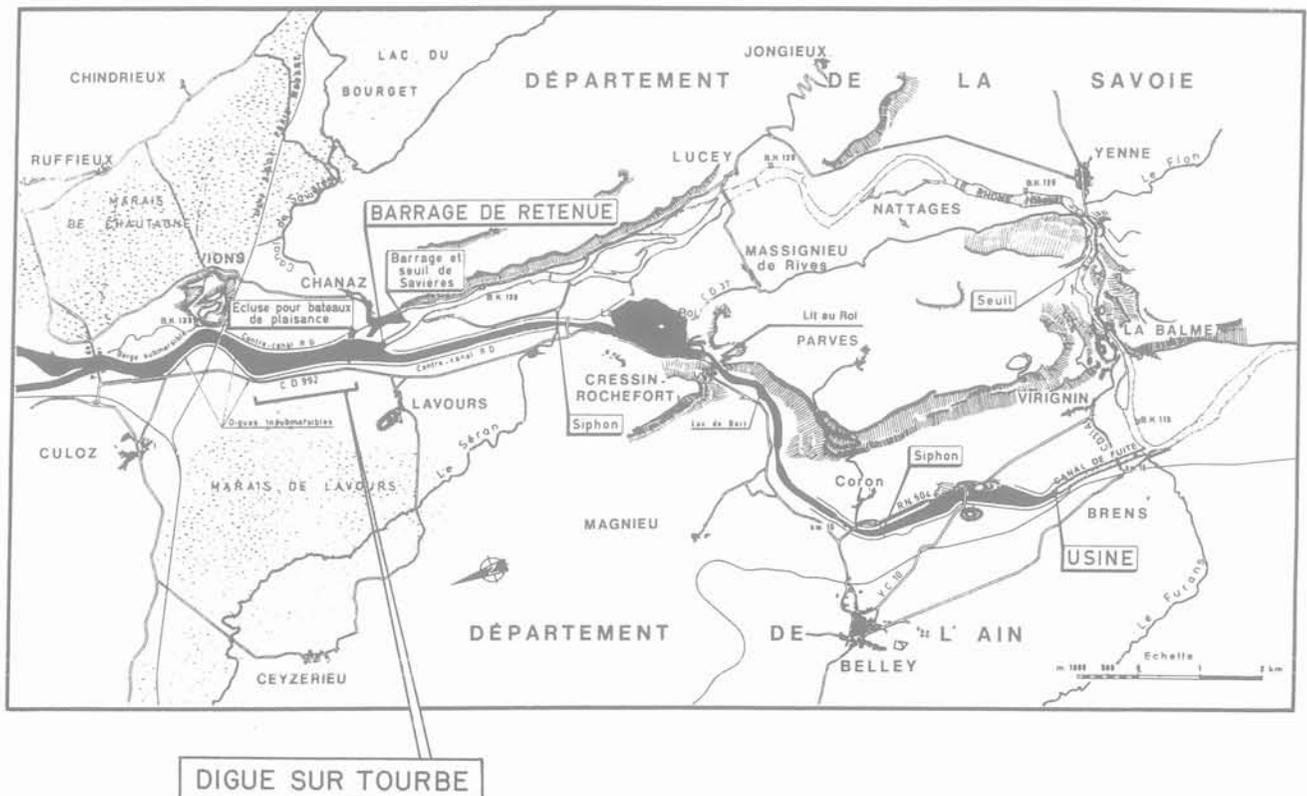


Fig. 1. — Plan d'ensemble de l'aménagement.

d'un ancien lit du fleuve: celle dite de Bart-Coron et celle de l'Ousson. Toute cette zone est occupée par des terrains quaternaires divers plus ou moins récents: tourbes, moraines würmiennes, terrasses d'alluvions anciennes et plaines d'alluvions modernes, qui surmontent un substratum généralement molassique.

3. Description du site et de l'ouvrage

Afin de limiter au maximum les emprises nécessaires à la réalisation des ouvrages, ceux-ci ont été conçus de

façon à s'adapter aux conditions du site. La digue de retenue de rive droite (fig. 2) a été implantée en bordure du Rhône naturel, en limite du marais de Lavours. Elle a dû être fondée sur un remplissage formé de tourbes et de limons argileux plastiques, pouvant entraîner des déformations importantes de l'ouvrage, ce qui a justifié une conception particulière de la digue, de son processus d'exécution et de sa surveillance.

L'ouvrage, d'une longueur de 800 m environ, d'une hauteur de 3 m au-dessus du terrain naturel, est bordé par un contre-canal de 3 m de profondeur (fig. 3).

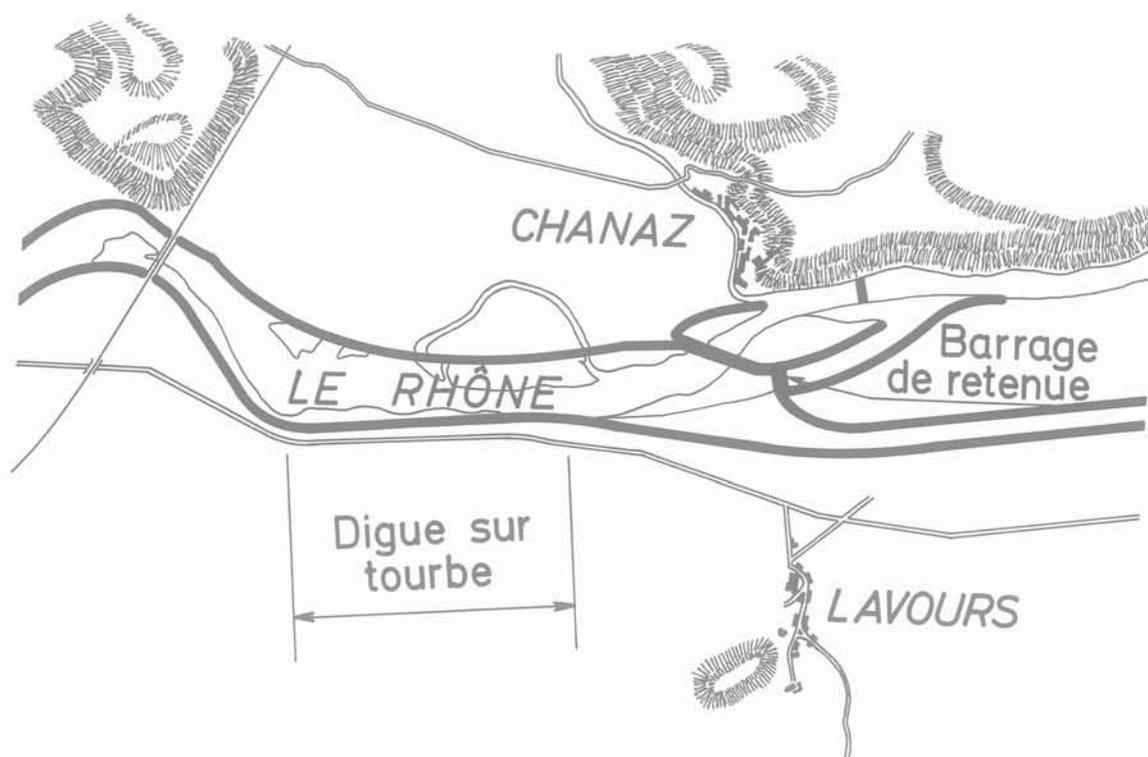


Fig. 2. — Aménagement de Belley, digue sur tourbe.
Plan de situation.

4. CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DU SOL DE FONDATION ET ÉTUDES PRÉLIMINAIRES

Les caractéristiques mécaniques moyennes des matériaux en place sont indiquées sur la figure 4, qui représente le profil en long dans l'axe de la digue.

Les calculs de stabilité ont tout d'abord mis en évidence la nécessité d'éloigner la digue d'une dizaine

de mètres du bord du Rhône, pour assurer une butée suffisante du talus amont.

Les calculs ont ensuite laissé prévoir un tassement de l'ordre de 0,70 m et ont conduit tout d'abord à concevoir un remblai de digue entièrement en graviers, mieux adaptés pour absorber les tassements différentiels, puis à prévoir une réalisation par phases des travaux d'excavations et de remblaiements.

Enfin, ces études ont conduit à prévoir la mise en place d'un appareillage pour suivre l'évolution des déformations des matériaux sous-jacents et des pressions interstitielles (voir chap. 7 et 8).

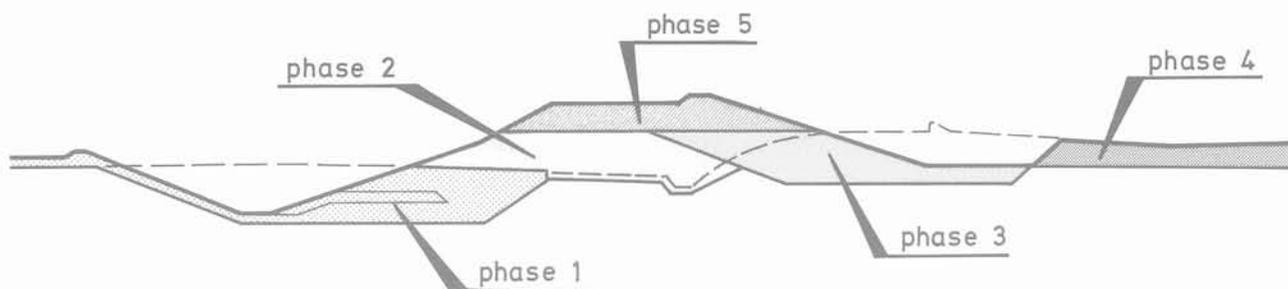


Fig. 5. — Profil principal.

6. APPAREILLAGE ET DESCRIPTION SOMMAIRE

Pour contrôler le comportement du sol de fondation vis-à-vis des grandes déformations et de la dissipation des pressions interstitielles dans la tourbe, il a été nécessaire de mettre en œuvre une instrumentation spécifique de la surveillance (fig. 6).

L'appareillage a été disposé sur sept profils répartis sur toute la longueur de la digue. Un profil a été plus particulièrement étudié (profil PK 133,30). Il a été équipé de deux inclinomètres, avec bagues tassométriques magnétiques, d'un tassomètre profond type L.C.P.C., de six tassomètres de surface (type L.C.P.C.) placés juste sous le remblai, de huit capteurs de pression interstitielle répartis sous la digue dans les différentes couches de fondation, et enfin d'un piézomètre ouvert.

Les profils courants ont été équipés d'un inclinomètre avec bagues tassométriques côté Rhône, et d'un capteur de pression interstitielle dans l'axe de la digue.

6.1. Capteurs de pression interstitielle

Il s'agit de cellules à contre-pression d'air, du type Glötzl P4 SF 10, permettant une mesure directe de la pression interstitielle au moyen d'un manomètre. La résolution est de l'ordre de 0,5 kPa.

Ces cellules ont été mises en place par fonçage au pénétromètre statique, après réalisation d'une substitution sur environ 0,5 m correspondant au profil d'assise définitif de la digue.

Les canalisations plastiques d'alimentation et d'échappement remontent à la surface par le tube-guide de fonçage. A la sortie de terre, ces canalisations sont amenées jusqu'au point de lecture aménagé sur la digue, par un tube isorange de protection.

6.2. Tassomètres de surface

Il s'agit de tassomètres ponctuels L.C.P.C., mis en place dans une tranchée transversale. L'ensemble des cellules est relié à un boîtier de distribution, installé sur un socle en béton. Le principe de la mesure est différentiel, par comparaison d'une charge hydraulique induite par une pression étalon, propre à chaque point de mesure. La résolution est centimétrique.

6.3. Tassomètre continu

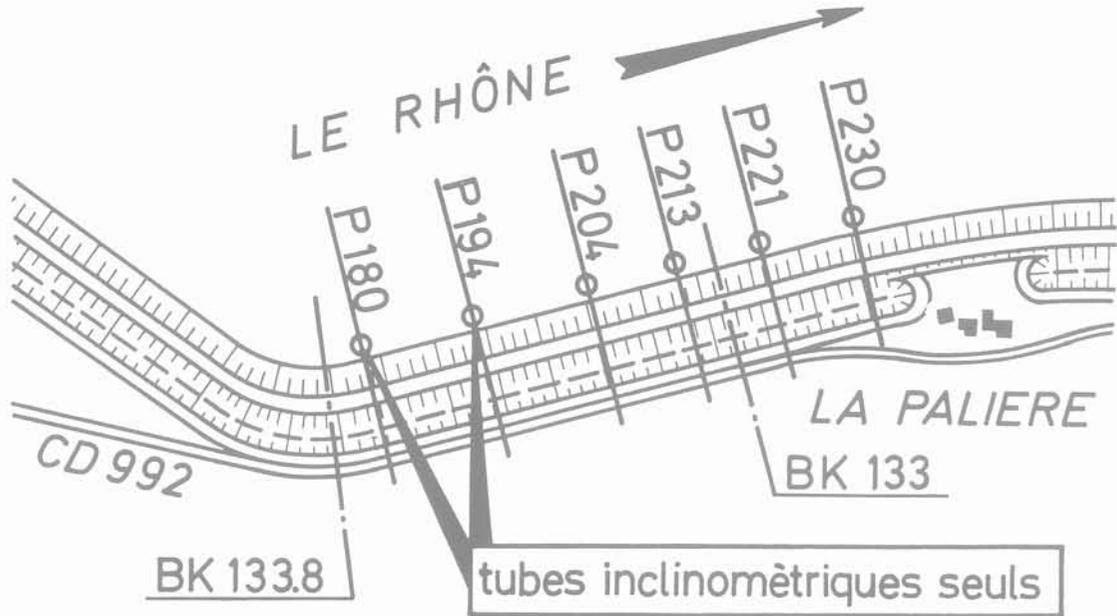
Il s'agit d'un tassomètre prototype L.C.P.C. confié au B.R.G.M. par le C.E.T.E. de Toulouse, chargé de sa mise au point: un tuyau plastique muni de bagues de tassement est mis en place dans un forage, et cimenté au terrain à l'aide d'un coulis plastique. La position des bagues de tassement est décelée à l'aide d'une sonde, avec une résolution infracentimétrique.

6.4. Tubes inclinométriques Tassomètres magnétiques

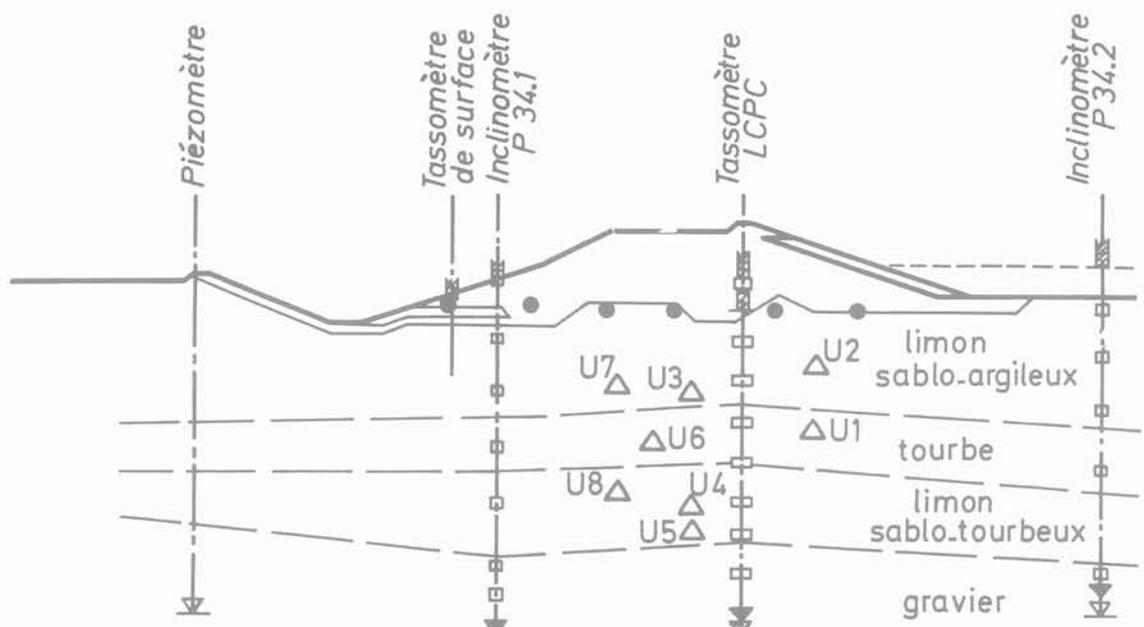
Il s'agit de tubes métalliques rainurés, mis en place dans des avant-trous tubés, et fixés au terrain à l'aide d'un coulis de ciment. Les mouvements horizontaux du terrain sont transmis au tube dont les variations de forme sont détectées à l'aide d'une sonde (type Soil Instrument MK3). Pour connaître le vecteur déplacement horizontal à chaque niveau, les mesures sont faites selon les deux directions perpendiculaires des rainures du tube. Le grand nombre de lectures impose un traitement numérique, ainsi que du graphisme automatique (programme INCLINO du B.R.G.M.).

Les tubes inclinométriques ont été équipés à l'extérieur d'anneaux magnétiques libres de suivre le tassement du terrain. La position de ces anneaux est décelée avec une précision inférieure au centimètre, à l'aide d'une sonde magnétique.

6.5. Mesures topographiques de surface (XYZ): citées ici pour mémoire.



SITUATION DES PROFILS EQUIPES



- LEGENDE**
- tassomètre de surface
 - bague tassométrique magnétique
 - ▽ fin de sondage
 - ▼ pied de l'inclinomètre
 - △ cellule de pression interstitielle
 - manchon (tassomètre de profondeur LCPC)
 - ▨ tête bétonnée

Fig. 6. — Dispositif d'auscultation de la digue sur tourbe.

7. EXÉCUTION DES MESURES, ALÉAS, PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les appareils de mesures ont été mis en place entre janvier et février 1981. L'ensemble des forages a permis d'affiner la connaissance du site:

— essais de laboratoire sur des échantillons prélevés dans les sondages carottés:

W, γ_h , γ_d

C, ϕ

C_c , C_v , indice de fluage.

Sans entrer dans le détail, il faut noter que les résultats des essais mécaniques ont été légèrement plus favorables que les valeurs moyennes retenues pour les calculs de stabilité préliminaires.

Par contre, les courbes de compressibilité ont montré qu'il est difficile de distinguer la consolidation primaire de la consolidation secondaire. Par ailleurs, le fluage se poursuit d'une manière remarquablement linéaire en fonction du temps, lors des essais prolongés qui ont duré plus de 2 mois et demi sous contrainte verticale de 2 bars.

— Détermination du toit des sables et graviers, qui a toujours été rencontré à une cote supérieure à celle donnée par les sondages préliminaires sous la crête de la digue (de zéro à deux mètres).

Les mesures se sont poursuivies plus d'un an après la pose des appareils: des conclusions suffisamment précises ont pu être formulées et le contrôle, qui continue actuellement, se limite à une surveillance topographique de surface.

7.1. Aléas

Sur l'ensemble de cette campagne d'auscultation, les défaillances suivantes ont été observées:

• Plusieurs capteurs de pression interstitielles n'ont pas fonctionné correctement. Ils ont tous pu être réparés ou changés. Les causes ont été:

— l'endommagement dû aux travaux de terrassement (tuyaux de liaison);

— l'endommagement suite au fonçage (capteurs, et/ou tuyaux de liaison).

• Un inclinomètre a été cisailé entre 8 et 9 m de profondeur, suite à une déformation horizontale du sol trop importante. Il a été remplacé par trois inclinomètres rustiques.

• Trois inclinomètres ont souffert de crues du Rhône, vers la fin de la campagne de surveillance rapprochée.

• Le tassomètre continu (prototype L.C.P.C.) n'a plus fonctionné à partir d'août, par suite de la défaillance de la sonde expérimentale.

La remarque importante est que ces aléas n'ont nullement remis en cause ni l'intérêt de la campagne d'auscultation, ni les résultats obtenus, et ceci grâce:

— d'une part, aux recoupements possibles de l'ensemble des mesures;

— et d'autre part, au remplacement (si possible) immédiatement des éléments défectueux.

7.2. Principaux résultats

Les principaux résultats sont donnés figures 7 à 12.

• Fig. 7: évolution dans le temps des tassements totaux

On remarque que la stabilisation est bonne après la première phase de chargement, mais qu'elle a duré plusieurs mois. Les tassements induits par la deuxième phase du chargement apparaissent très bien et on note que la stabilisation n'est pas atteinte en janvier 1982. *Nota:* la dispersion des mesures est assez importante; ceci est vraisemblablement dû à une imprécision au niveau de la pression hydrostatique étalon, qu'il y aurait lieu de mieux contrôler.

• Fig. 8: profil en travers des tassements totaux

Compte tenu de l'amplitude des tassements, la précision modeste des mesures ne pénalise pas la distribution des tassements. Une petite critique peut par contre être faite sur le nombre de points de mesure qui aurait pu être augmenté d'une ou deux unités.

• Fig. 9: évolution des tassements en fonction du temps et de la profondeur

Le schéma de droite, représentant les tassements différentiels entre deux bagues, met très bien en évidence dans quelle zone le tassement se produit: la quasi totalité du tassement total (en surface) a lieu dans la couche de tourbe.

La question qui peut être posée est de savoir dans quelle mesure les bagues tassométriques couplées à un tube inclinométrique suivent fidèlement les mouvements du sol.

• Fig. 10 et 11: mesures inclinométriques sur le profil principal

P. 34-1: mouvement important jusqu'à 4 m de profondeur (interface remblai-limons supérieurs), apparu rapidement et atteignant plusieurs centimètres.

— petits mouvements d'amplitude millimétrique et d'orientation variable, jusqu'à la limite tourbe-tourbe argileuse.

— cisaillement du tube en septembre 81 vers 8,5 m de profondeur, correspondant à un déplacement horizontal local multacentimétrique.

P. 34-2: aucun mouvement très significatif.

• Fig. 12: évolution de la pression interstitielle U1

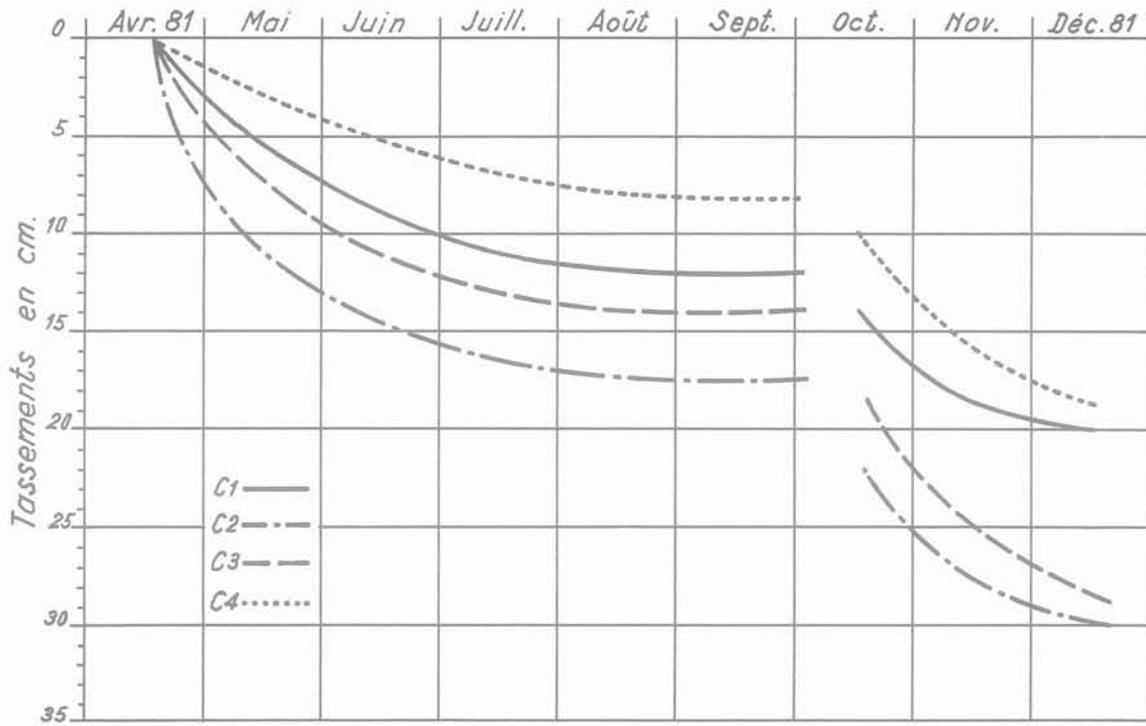


Fig. 7. — Evolution dans le temps des tassements totaux.

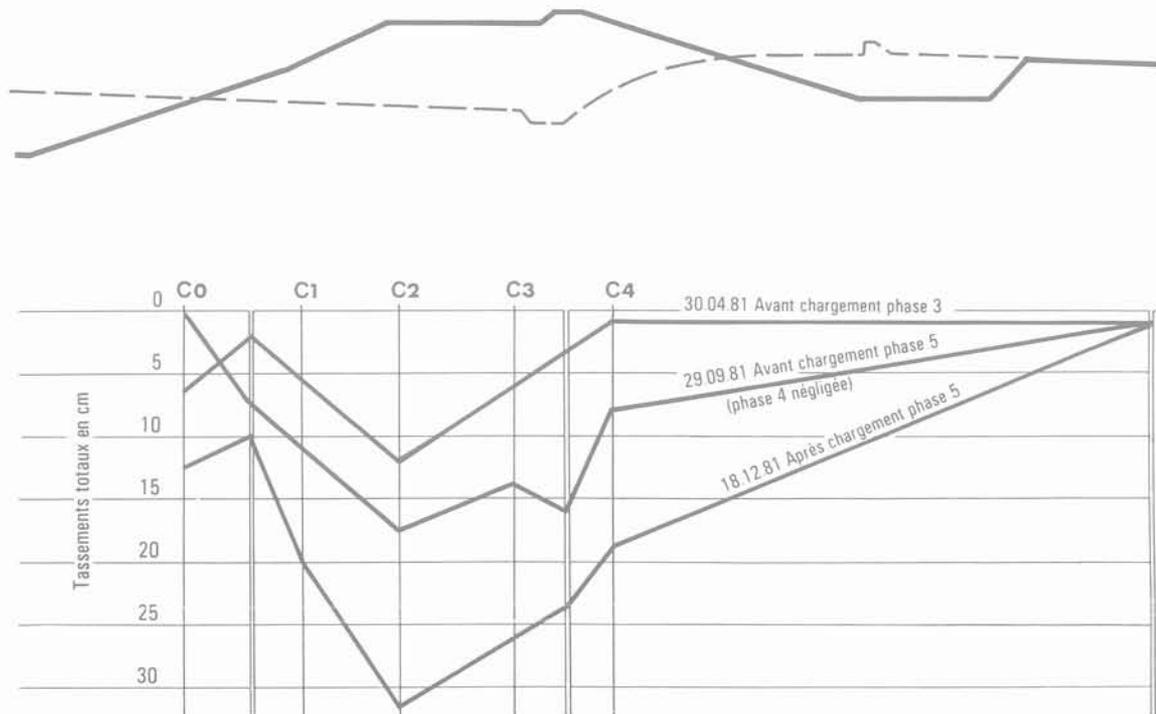


Fig. 8. — Profil en travers des tassements totaux.

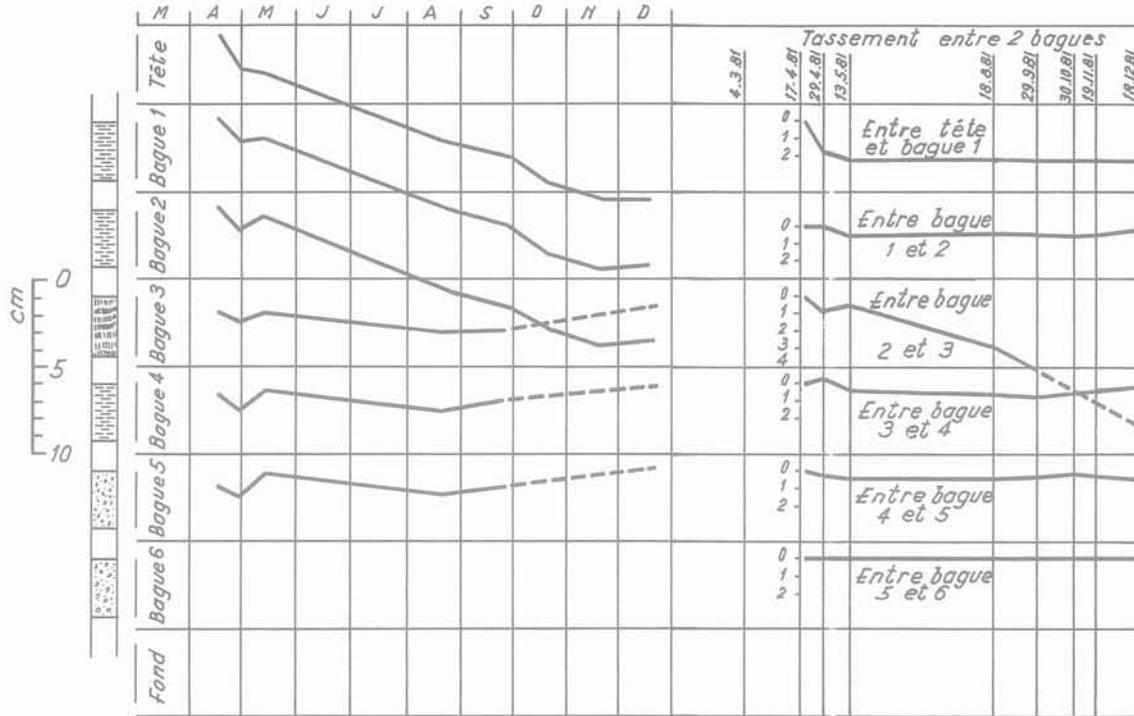


Fig. 9. — Evolution des bagues tassométriques magnétiques.

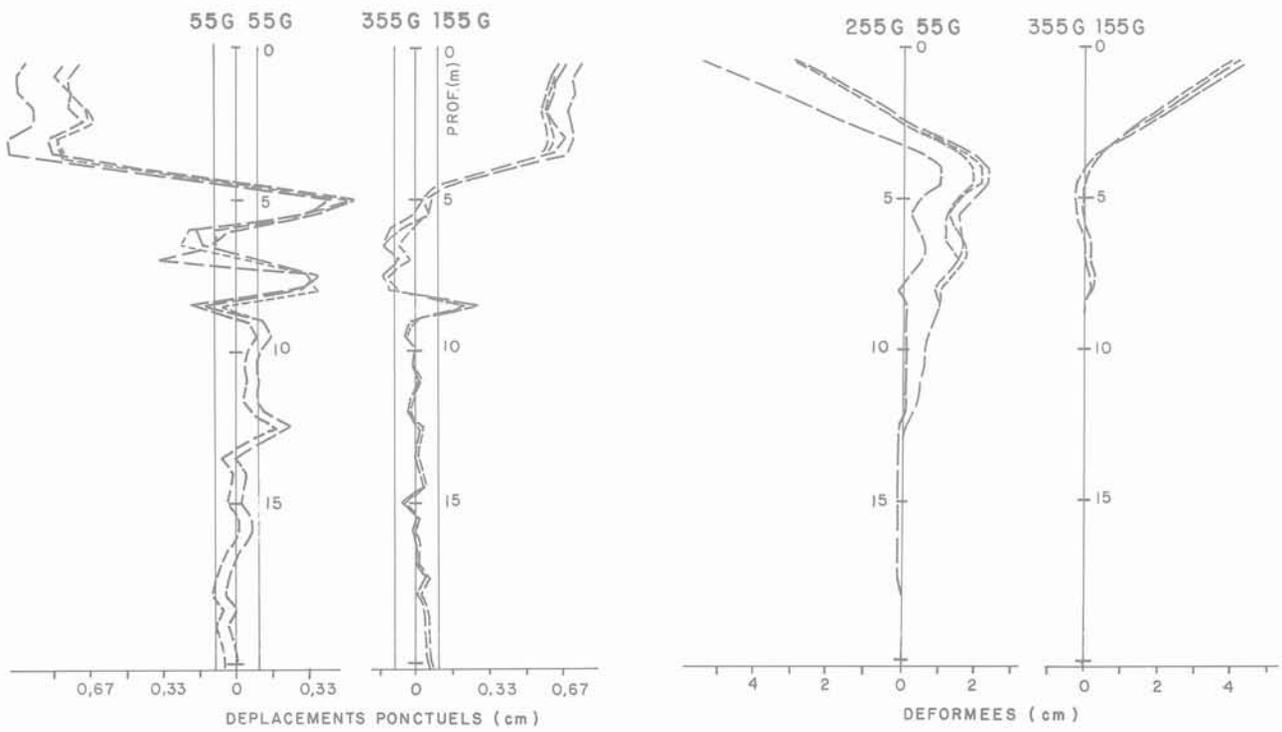


Fig. 10. — Accroissement de déformation entre le 10.4.81 et le 17.9.81 - 29.9.81 - 1.10.81 - 9.11.81.

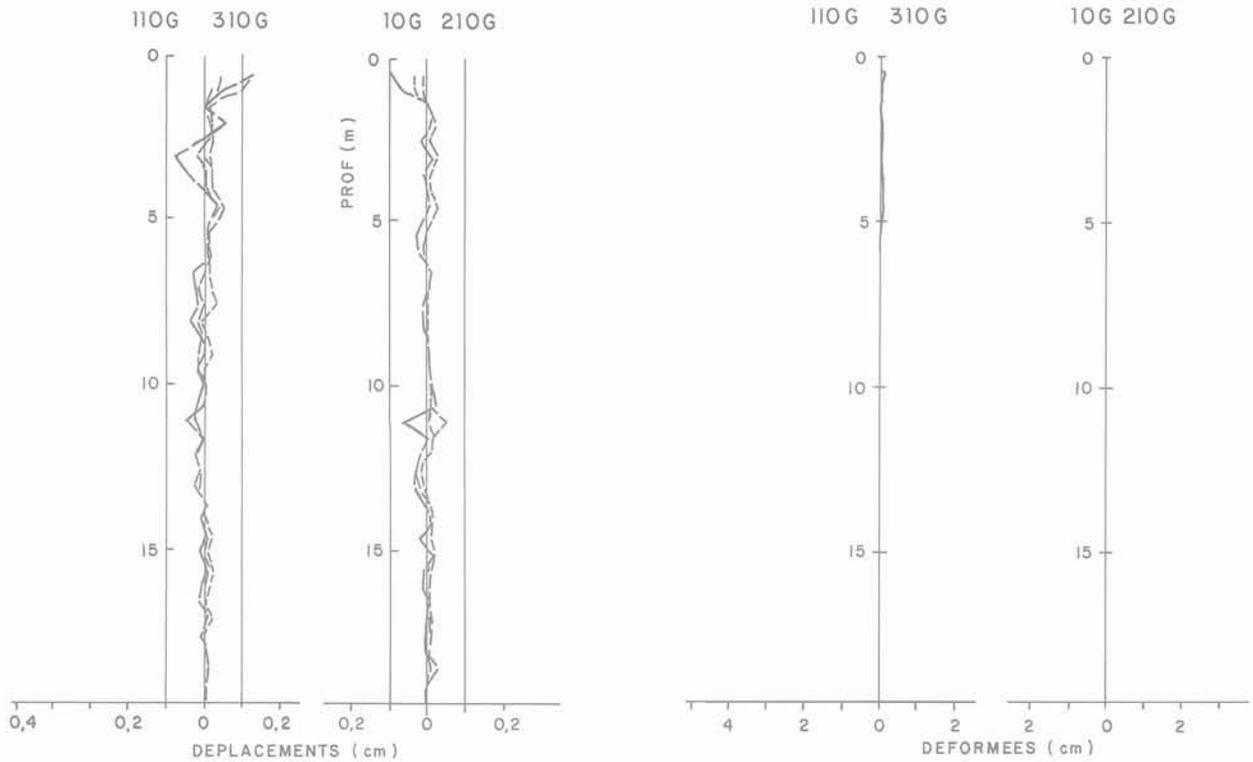


Fig. 11. — Accroissement de déformation entre le 10.4.81 et le 17.4.81 - 29.4.81 - 13.5.81 - 17.8.81.

L'interprétation fine des courbes de pressions interstitielles est apparue difficile pour trois raisons essentielles :

- absence de mesures suffisamment fréquentes ;
- absence de relevés piézométriques de la nappe ;
- absence d'un chronogramme précis du chargement.

Quoi qu'il en soit, il a été observé que :

- les sous-pressions dues au chargement se dissi-

paient assez vite dans les limons et beaucoup plus lentement dans les tourbes ;

- la consolidation primaire ne dépassait pas 50 % dans les tourbes.

Le relatif échec de ces mesures de pression tend à montrer qu'il faut densifier les points de mesure dans le temps (et dans l'espace), et donc s'orienter vers une acquisition automatique de ces grandeurs.

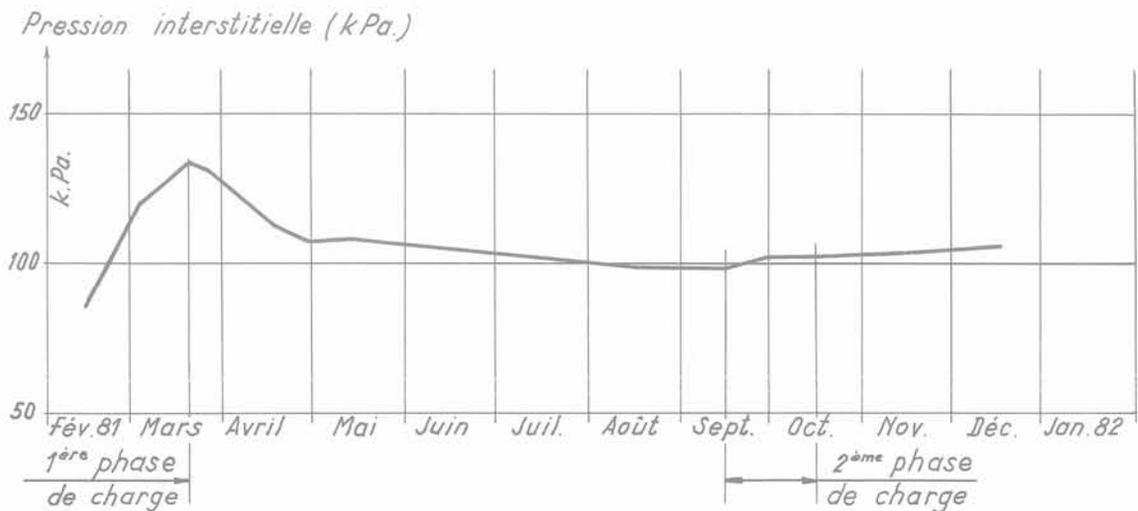


Fig. 12. — Capteur U1.

**8. COMPORTEMENT DES FONDATIONS
RÉSULTATS DE L'ANALYSE**

A l'issue des phases de chargement, en décembre 1981, le suivi des mesures de contrôle a montré :

— que les sous-pressions dues au chargement se dissipaient assez vite dans les limons et beaucoup plus lentement dans les tourbes ;

— que la consolidation primaire était pratiquement terminée dans les limons et ne dépassait pas 50% dans les tourbes : le tassement était alors de 35 cm, il a pu être inclus dans la constitution de l'ouvrage ;

— que les déformations latérales des horizons tourbeux étaient d'ordre centimétrique.

Ces mesures ont permis de conclure que la consolidation primaire de la tourbe n'était pas terminée et pourrait conduire à des tassements complémentaires de 25 à 30 centimètres en dix ans, si l'on prend en compte la consolidation secondaire de ce matériau.

L'évolution des tassements complémentaires fait l'objet de mesures topographiques régulières. Un stock de matériaux graveleux a été constitué à proximité, pour recharger la crête de digue dans les années à venir.

9. CONCLUSION

● **A propos de l'ouvrage**

Cette réalisation montre qu'il est possible de fonder une digue gravier sur de fortes épaisseurs de matériaux tourbeux, tout en concevant une sécurité suffisante vis-à-vis de la stabilité de l'ouvrage et sans contraintes excessives pour la réalisation des terrassements.

● **A propos de l'auscultation**

— Quelles que soient les précautions que l'on puisse prendre, les appareils de mesures ne fonctionneront pas tous et il y aura des défaillances de certains éléments, dues principalement aux conditions difficiles du chantier. Ceci montre que le recoupement des informations doit être pris en compte dans la conception d'une campagne d'auscultation.

— Deux rôles importants peuvent être demandés à l'auscultation : d'une part, d'assurer la sécurité ; d'autre part, de comprendre certains phénomènes. Le deuxième point paraît parfois a priori coûteux vis-à-vis de son intérêt immédiat ; il est fréquent cependant qu'il permette ultérieurement une réduction sensible des coûts de surveillance des ouvrages et par exemple, pour la Compagnie Nationale du Rhône, la construction d'une nouvelle digue dans des conditions semblables.

