

## **Effet barométrique sur les niveaux piézométriques des forages de Chassolle**

**T. Collet\* et C. Drogue\***

Mots-clés : Pression atmosphérique, Surface piézométrique, Milieu fissuré, Puy-de-Dôme (Chassolle).

### Résumé

Les niveaux piézométriques des forages de Chassolle ne sont pas stables, mais présentent des variations de quelques centimètres. Celles-ci sont en relation avec certaines des caractéristiques du milieu aquifère fissuré recoupé par les forages. Les fluctuations ont été enregistrées pendant deux mois, conjointement sur P1 et S2. Durant cette période, l'évolution générale est une remontée du niveau piézométrique dans S2 alors que dans P1, par contre, le niveau piézométrique subit une légère baisse. Les variations de la pression atmosphérique sont responsables de la plupart des fluctuations des niveaux piézométriques. D'après les calculs de l'efficacité barométrique, il semblerait que le forage S2 soit plus sensible que le forage P1. Ceci peut être mis en regard des caractéristiques structurales de l'aquifère. Les deux forages recoupent des fissures productrices à différentes profondeurs dans un réservoir supposé unique. Aucune relation hydraulique n'a pu être mise en évidence entre les fissures profondes de S2 et les niveaux productifs de P1. Ces deux forages seraient représentatifs de deux milieux différents superposés dans un même système aquifère : un milieu semi-captif superficiel (P1) et isolé d'un second milieu, profond et captif (S2). L'information que nous fournit l'effet barométrique dans ces deux ouvrages est donc en concordance avec ce schéma.

### Abstract

*Barometric effect on the water-levels of the boreholes at Chassolle*

The piezometric levels in the boreholes at Chassolle are not stable with time, but display variations of a few centimeters in amplitude. They are related to some characteristics of the permeable network intersected by the boreholes. Water-levels in boreholes S2 and P1 were recorded continuously over a period of two months. During this time, water-levels in S2 rose while water-level in P1 fell. The water-level variations are probably complex and related to several mechanisms, such as earth-tides and aquifer recharge phenomena. Moreover, barometric pressure changes have been clearly identified as an other mechanism responsible for piezometric fluctuations. Piezometric-level fluctuations related to barometric pressure changes varied by 20 centimeters while barometric pressure varied by 40 centimeters amplitude. According to the computed barometric efficiencies, borehole S2 is probably more sensitive than borehole P1. This may be correlated to the structural characteristics of the aquifer. The boreholes reach different depths (from 100 to 188 meters for P1 and from 100-200 to 1 000 meters for S2) in the permeable network of a supposedly unique reservoir. No hydraulic relationship has been identified between the deep water-bearing levels of S2 and the productive levels of P1. The boreholes are probably representative of two different reservoirs in the aquifer. The first (P1) corresponds to a superficial-partially-confined aquifer, connected with surface. The second borehole (S2) is deeper, confined and independent of the first one. The barometric effect and the variable barometric efficiencies are in agreement with this model.

(\*) Laboratoire d'hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cédex.

Les niveaux piézométriques dans les forages de Chas-solle ne sont pas stables dans le temps, mais présentent des fluctuations tout à fait mesurables.

Ces mouvements traduisent certains caractères des réseaux perméables recoupés par les ouvrages. Leur analyse peut donc fournir des informations utiles à une meilleure connaissance de ce réservoir fissuré.

Pour cela, des enregistrements piézométriques continus sont effectués sur P1 et S2. La trop forte inclinaison du forage S1, n'a pas permis jusqu'à présent, sur celui-ci, ces mêmes enregistrements, avec le matériel actuellement disponible.

De l'examen des premières données, il apparaît que les variations piézométriques sont relativement complexes et liées à différents mécanismes. L'étude détaillée nécessite des chroniques d'observations plus longues que celles recueillies lors de la rédaction de cette note. Cependant dès-à-présent, une composante de ces mouvements a pu être identifiée sans ambiguïté : il s'agit de l'effet sur la piézométrie des variations de la pression atmosphérique. L'intérêt ici, réside dans les possibilités de comparaison entre les forages P1 et S2, qui atteignent des profondeurs différentes dans le réseau de fentes perméables de ce qui semblerait être à priori, un seul et même magasin.

## 1. — Effet barométrique sur la piézométrie d'un aquifère

L'effet des variations de la pression atmosphérique sur les niveaux piézométriques des forages, en nappe captive, est connu depuis longtemps (notamment : Robinson, 1939 ; Jacob, 1940 ; Tison, 1951 ; Tuinzaad, 1954 ; Todd, 1959 ; Besbes, 1969 et plus récemment Arditty et al., 1978). Il n'est pas nécessaire ici de détailler l'analyse de ce phénomène. Rappelons seulement l'essentiel. Sous l'effet des variations de la pression atmosphérique, l'eau souterraine peut subir des modifications de volume du fait de son élasticité. Ceci se traduit par des fluctuations des niveaux piézométriques observables dans certaines nappes captives.

On sait que dans ce type de nappe, la pression exercée par le poids des terrains de couverture  $p_t$  et la pression atmosphérique  $p_a$ , sont supportées à la fois par l'eau souterraine ( $C_e$ ) et la roche contenant cette eau ( $C_r$ ).

$$\text{soit : } p_a + p_t = C_e + C_r$$

S'il se produit une augmentation  $d p_a$  de la pression atmosphérique, celle-ci sera absorbée en partie par la roche, et de ce fait, l'augmentation de la contrainte supportée par l'eau ( $d C_e$ ) sera plus faible que l'augmentation de la pression atmosphérique :

$$d p_a > d C_e$$

Dans la même nappe, au droit d'un puits ou d'un forage, la pression atmosphérique s'applique directement sur le niveau piézométrique et les variations  $d p_a$  se transmettent intégralement à l'eau.

Mais, afin de respecter l'inégalité précédente, la variation barométrique sera compensée, nécessairement, par une modification du niveau piézométrique  $d h$  :

$$d p_a - d h = d C_e$$

Ceci signifie qu'il se produit un abaissement du niveau piézométrique dans le forage, pour une augmentation de la pression atmosphérique (et à l'inverse, un relèvement du niveau piézométrique pour une diminution de la pression atmosphérique).

Si le terrain de couverture de la nappe captive présente une certaine perméabilité à l'air, le phénomène est plus complexe, en fonction notamment de l'amplitude et de la rapidité des variations de la pression atmosphérique, et pourrait être la cause d'un déphasage dans la réponse aux variations barométriques (Besbes, 1969).

Dans le cas d'une nappe libre, les variations de la pression atmosphérique s'appliquent en tous points intégralement sur l'eau souterraine. Partout, dans la nappe :  $d p_a = d C_e$ . Dans ce cas, les variations piézométriques ne sont dues qu'à l'élasticité d'une colonne d'eau verticale, de hauteur égale à l'épaisseur moyenne de la nappe.

Cette élasticité est faible, et les variations  $d h$  en nappe libre sont donc imperceptibles.

En ce qui concerne le cas des nappes captives, qui nous intéresse ici, Jacob (1940) propose une expression qui traduit la sensibilité ou efficacité barométrique d'une nappe (« Barometric Efficiency » : BE). C'est le rapport entre la variation de niveau  $d h$  dans un forage et la variation de pression atmosphérique  $p_a$  exprimée en mètres d'eau  $d(p_a/\gamma)$  :

$$BE = \gamma d h / d p_a$$

ou encore :

$$BE = 1 / (1 + \sigma / \theta \beta) \quad (1)$$

avec

$\sigma$  : compressibilité de l'eau

$\theta$  : porosité

$\beta$  : compressibilité de la structure aquifère

$\gamma$  : poids spécifique de l'eau

Il est ensuite possible de relier l'efficacité barométrique au coefficient d'emménagement. La compressibilité  $C$  d'un aquifère est une variation de volume  $\delta V / V$  pour une variation de pression  $\delta p$  :

$$C = - (\delta V / V) / \delta p \quad (2)$$

Considérons une colonne de terrain de section unité. Pour une baisse unité de la surface piézométrique, la quantité d'eau libérée est  $S$ , le coefficient d'emménagement ; d'où  $S = \delta V$ .

Le volume d'aquifère est  $1 \text{ b} = b$ , avec  $b$  épaisseur de l'aquifère et la variation de pression est  $p = -1 = -\gamma$ .

La compressibilité s'écrit donc :

$$C = S / \gamma b \quad (3)$$

D'après (2), on peut encore écrire :

$$C = -(-dV_w/dC_e + dV_s/dC_r) \quad (4)$$

Avec  $V_s$  = volume de la matrice rocheuse

$V_w$  = volume d'eau

D'après la définition du module d'élasticité de YOUNG :

$$d(\delta V_w)/\delta V_w = -\beta dC_e$$

et  $d(\delta V)/\delta V = -\sigma dC_r$

Par conséquent :  $C = \theta/\beta + 1/\sigma$  (5)

puis d'après (1) :  $C = \theta/\beta BE$  (6)

L'égalité entre (3) et (6) donne enfin :

$$S = \gamma\theta\beta b/BE \quad (7)$$

L'accès au coefficient d'emmagasinement d'une nappe, par le biais du coefficient barométrique, nécessite donc la connaissance de la valeur de la porosité moyenne de l'aquifère ; ce qui est toujours très difficile, voire impossible à obtenir. Les mesures sur carottes, ou par diagraphies, ne fournissent que des valeurs locales, dont la représentativité par rapport au magasin, est délicate à préciser.

## 2. — Caractères des mouvements piézométriques dans les forages P1 et S2

### 2.1. — Conditions expérimentales

Les forages P1 et S2 sont équipés de limnigraphes à flotteur. Malheureusement, les enregistrements sur P1, ne sont pas de très bonne qualité. Un barographe est également installé sur le site.

Certains caractères de ces forages sont rappelés dans le tableau ci-dessous (voir également fig. 1) :

Forage	Profond. (m)	Altitude (m NGF)	Niveau piézométrique moyen (m)		Distance P1-S2 (m)
			NGF	Sous la surface	
P1	188	946,15	925,6	20,5	42,60
S2	1400	948,3	903,5	44,8	

Tabl. 1. — Caractéristiques des forages

### 2.2. — Descriptif de la piézométrie des forages S2 et P1

L'ensemble des observations communes aux deux forages pour la période étudiée, est représentée sur la fig. 2. Les deux courbes piézométriques montrent des évolutions simi-

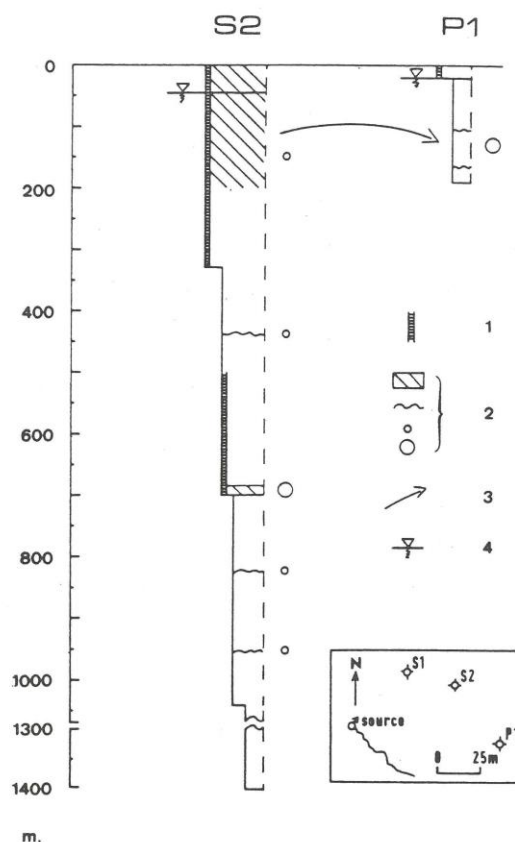


Fig. 1. — Coupe des forages et plan de situation (d'après Feuga, 1986, modifié)

1 : portion tubée ; 2 : principaux niveaux aquifères (la dimension des cercles fournit une image de leur productivité) ; 3 : liaison hydraulique entre niveaux ; 4 : niveau statique.

Cross section of the boreholes and situation chart (from Feuga, 1986, modified).

1 : cased portion ; 2 : main water-bearing levels (size of circles is proportional to their importance) ; 3 : hydraulic relations between levels ; 4 : steady-state water level.

lares en relation avec les variations de la pression atmosphérique. Néanmoins, la réponse piézométrique de S2 est pratiquement instantanée alors qu'elle présente un retard d'environ 10 heures sur P1. Ce retard tend cependant à diminuer quand l'amplitude des variations est plus importante sur peu de temps (cf. du 15-03 au 03-04, fig. 2).

Les deux courbes se distinguent à partir du 07-03 et montrent des différences qui sont détaillées ci-dessous.

### Piézométrie de S2

Aux variations liées aux fluctuations de pression atmosphérique se superposent des fluctuations diurnes et semi-diurnes probablement en relation avec les phénomènes de marée terrestre.

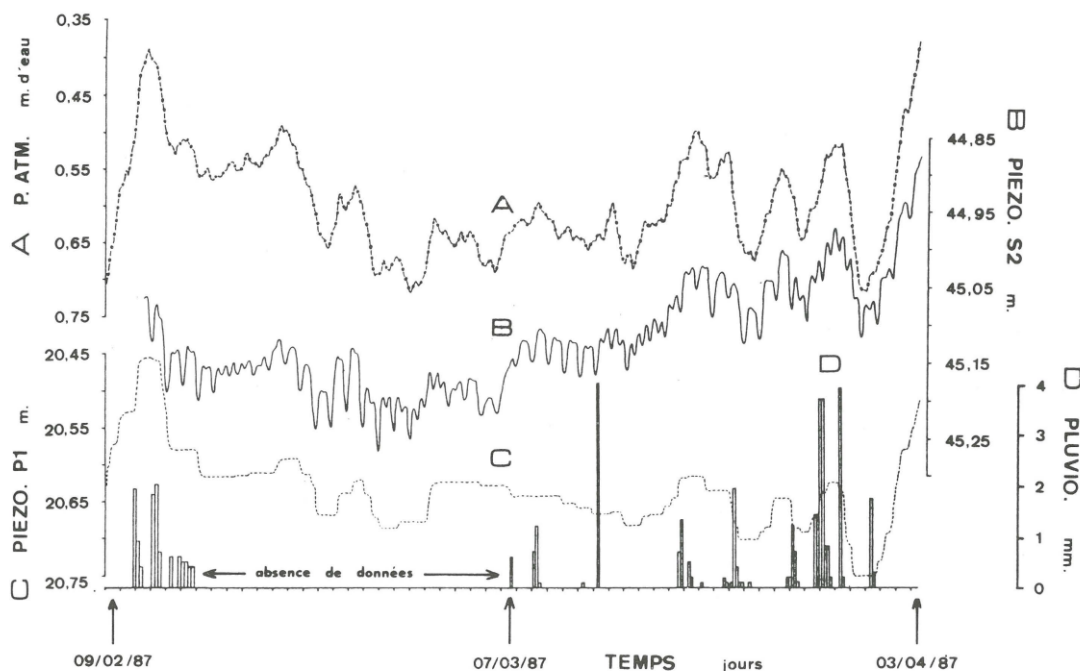


Fig. 2. — Observations barométriques (A), pluviométriques (D) et piézométriques dans les forages S2 (B) et P1 (C), du 09/02/87 au 03/04/87. Observed barometric pressure variations (A), rainfall (D) and water level fluctuations at the boreholes S2 (B) and P1 (C) from 02/09/87 au 04/03/87.

A partir du 07/03/87, l'évolution générale est une remontée du niveau piézométrique s'ajoutant aux variations barométriques. La recharge de l'aquifère, par la pluie, pourrait être une des causes de ce phénomène.

### Piézométrie de P1

La courbe a une allure « en escaliers » due au fonctionnement défectueux de l'enregistrement.

Il n'y a pas sur ce forage de remontée du niveau piézométrique moyen comme sur S2, on peut même déceler une légère baisse. Bien que les relations entre les fractures recoupées et la surface aient été mises en évidence lors d'un essai par pompage réalisé en novembre 1985 (Collet, 1986), la forte pluviosité du mois de mars n'a donc pas eu apparemment d'influence visible sur la position du niveau de l'eau.

Un puits superficiel, proche du chantier et profond d'une vingtaine de mètres, est par contre très sensible aux alimentations par la pluie. Les phénomènes de recharge au sein de cet aquifère sont donc complexes et chaque forage étudié recoupe probablement un milieu d'alimentation différent.

### 2.3. — Calcul de l'efficacité barométrique pour chaque forage

Après lissage des courbes par moyennes mobiles, décalage en tenant compte du retard et élimination de la marée

terrestre sur S2, le calcul est effectué en considérant les variations  $dh$  et  $dp$  appréciables, pendant des intervalles de temps croissants  $dt$ .

#### 2.3-1. — Résultats :

Les corrélations sont présentées sur la figure 3.

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ces corrélations effectuées sur un grand nombre de données :

Forage	Observation durée en mois	Coeff. correll. au seuil de 95 %	BE		Total
			variations		
			pos.	neg.	
P1	10 (06/86 à 03/87)	$0.94 < R < 0.95$	0.40	0.42	0.41
P1	2 (02/87 à 03/87)	$0.95 < R < 0.97$	0.45	0.54	0.49
S2	2 (02/87 à 03/87)	$0.97 < R < 0.98$	0.43	0.61	0.52

Tabl. 2. — Relations entre  $dh$  et  $dp$  : estimation de BE. Relations between water-level fluctuations and pressure changes : barometric efficiency estimations.

Les corrélations sont satisfaisantes ; le principal facteur agissant sur les variations du niveau piézométrique est donc bien la fluctuation de la pression atmosphérique. De plus, il

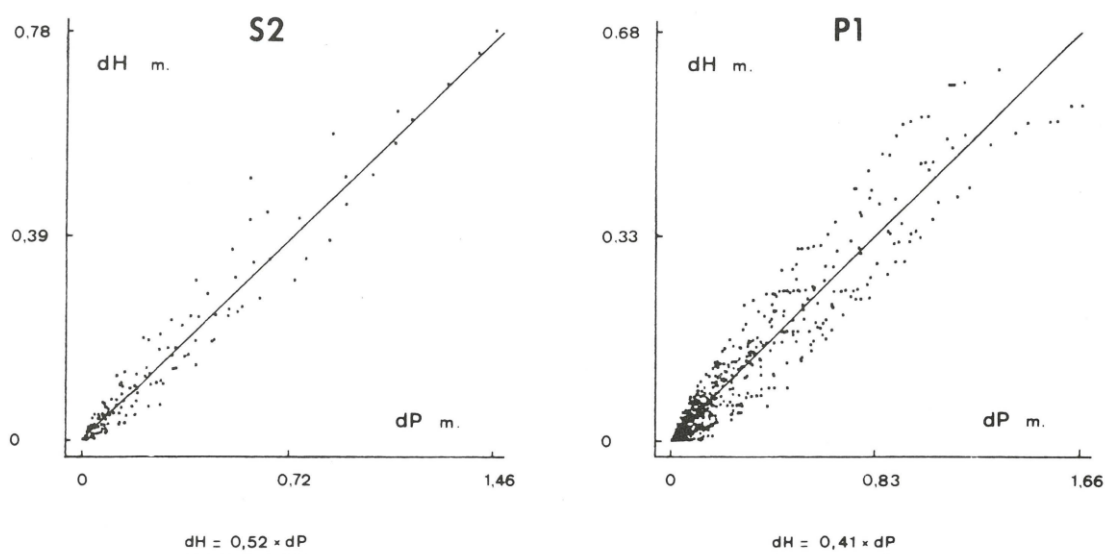


Fig. 3. — Corrélation entre les variations piézométriques  $dh$  des forages S2 et P1, et les fluctuations  $dp$  de la pression atmosphérique.  
Correlation between boreholes S2 and P1 water-level fluctuations  $dh$  and atmospheric pressure changes  $dp$ .

est possible de distinguer les variations positives des variations négatives. En effet, il semblerait que la réponse du niveau piézométrique à une augmentation de pression atmosphérique soit plus importante qu'à une diminution de même amplitude. Les phénomènes de compressibilité seraient donc prédominants devant la dilatation, au sein de l'aquifère.

On note que le nombre d'observations est un facteur déterminant de la corrélation. La valeur du BE calculée sur le forage P1 diminue légèrement avec le nombre de couples de points.

Il a été examiné l'influence de certains facteurs, sur la valeur de BE :

a) pas de temps :

Le calcul du BE a été réalisé par comparaison entre  $dh$  et  $dp$  selon des pas de temps croissants, de 24 heures à plus d'un mois.

L'évolution de l'efficacité barométrique avec le temps montre que l'effet d'échelle est très important (fig. 4 A). Pour des pas de temps petits, les valeurs de BE sont très dispersées autour d'une valeur moyenne.

b) amplitude de la pression atmosphérique :

Les variations d'amplitude de la pression atmosphérique n'ont pas été retenues dans le calcul du coefficient barométrique, mais leur influence sur ce dernier est certaine (fig. 4 B). Plus l'amplitude est grande, plus la valeur du BE est représentative de la réponse moyenne de variation de la piézométrie. Ceci avait été également observé lors d'une étude effectuée en milieu poreux, captif et profond (Thomas, 1963).

### 2.3-2. — Calcul de la piézométrie de S2

A partir de l'efficacité barométrique, il est possible de calculer l'évolution piézométrique théorique dans un forage d'après le graphe de la pression atmosphérique. Ceci a été effectué pour le forage S2 avec un BE de 0,52 (fig. 5).

Il y a une très bonne similitude entre la courbe piézométrique calculée et la courbe réelle en ce qui concerne les amplitudes des variations. Mais la courbe calculée ne présente pas la croissance graduelle du niveau piézométrique observé. Ce qui confirme que cette remontée piézométrique n'est pas due à la barométrie.

## 3. — Commentaires et conclusion

Les différences constatées entre la réponse piézométrique de P1 et de S2, à une variation barométrique, peuvent être mises en regard des caractéristiques structurales connues de l'aquifère.

Ces deux forages recoupent des fissures productrices à différentes profondeurs s'étageant principalement de 100 à 188 mètres pour P1, et de 100-200 à 956 mètres pour S2 (fig. 1).

Cependant, la relation hydraulique existant entre ces deux ouvrages par leurs fissures peu profondes a été interrompue après la mise en place d'un tubage dans S2 jusque 330 mètres de profondeur. Par la suite, des essais par pompage ont montré l'étanchéité de la base de ce tubage ainsi que

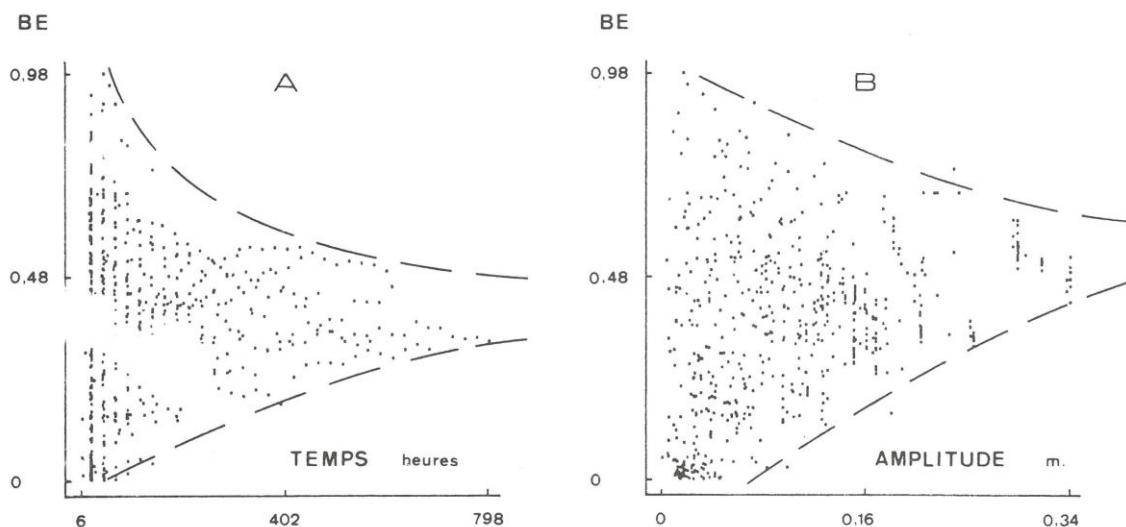


Fig. 4. — Évolution de l'efficacité barométrique avec le pas de temps (A), et l'amplitude des variations de pression atmosphérique (B).  
Evolution of the barometric efficiency with time scale (A), and amplitude of atmospheric pressure changes (B).

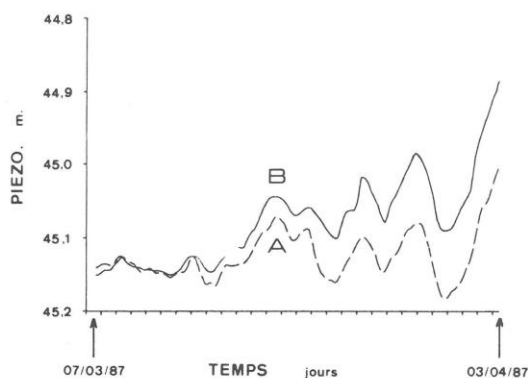


Fig. 5. — Comparaison entre la courbe piézométrique calculée (A), et observée (B) dans le forage S2 du 07/03/87 au 03/04/87.

Comparison between computed water-level curve (A) and experimental curve (B) in borehole S2 from 03/07/87 to 04/03/87.

l'absence de liaison hydraulique entre P1 et les fissures profondes de S2 (Feuga, 1986; Feuga et al., 1986; Collet, 1986; Collet et al., 1986);

Ces deux ouvrages seraient donc actuellement représentatifs de deux milieux différents superposés dans un même système aquifère.

L'élément d'information supplémentaire que nous fournissons l'effet barométrique dans ces deux ouvrages est en concordance avec le schéma proposé ci-dessus. En effet, la réponse dans P1 à une variation barométrique présente un décalage d'une dizaine d'heures et un amortissement supérieur à celui calculé dans le forage S2.

Le forage P1 est donc probablement représentatif d'un milieu aquifère semi-captif superficiel représenté par des fissures en liaison avec la surface et isolé d'un second milieu, profond et captif dont l'importante mise en charge est visualisée par la situation du niveau statique dans le forage S2.

La poursuite et l'amélioration des mesures sur P1 et S2 et l'extension des enregistrements piézométriques au forage S1, devraient permettre de mieux analyser ces effets barométriques, et d'interpréter les fluctuations piézométriques liées à la recharge par l'infiltration des eaux de pluie et aux marées terrestres.

## Références bibliographiques

ARDITTY P.C., RAMEY H.J.Jr., NUR A.M. (1978). — Response of a closed well reservoir system to stress induced by earth tides. Paper presented at the Society of Petroleum Engineers/AIME, 53rd Annual Meeting, Houston, Texas.

BESBES M. (1969). — L'effet barométrique dans les puits en relation avec le coefficient d'emmagasinement et l'étanchéité du toit des nappes captives. *Bull. BRGM*, 2, III, n° 2, pp. 57-76.

COLLET T. (1986). — Pompage à l'air-lift effectué du 19/11 au 2/12/85. Compte-rendu de l'essai et début d'interprétation. Programme Géologie Profonde de la France, 3<sup>e</sup> phase d'investigation, GPF 3, Document BRGM n° 105, pp. 357-379.

COLLET T., DETOC S., BIDAUX P., DROGUE C. (1986). — Forages de Chassolle. Programme GPF. 1986. Thème 10. Essais par pompes et étude des gradients hydrochimiques. Rapport d'activité, Laboratoire d'Hydrogéologie, Montpellier, 28 p.

FEUGA B. (1986). — Suivi hydrologique et hydrogéologique du chantier et essais hydrauliques en forages. Programme Géologie Profonde de la France, 3<sup>e</sup> phase d'investigation, GPF 3, Document BRGM n° 105, pp. 281-305.

FEUGA B. et l'équipe scientifique du projet, (1986). — Le système hydrominéral du Cézallier (Massif Central français). Reconnaissance par sondage de moyenne profondeur (programme Géologie Profonde de la France, sondages S1 et S2 de Chassolle, juillet-décembre 1985). *C.-R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, série II, n° 16, pp. 1497-1502.

JACOB C.-E. (1940). — On the flow of water in elastic artesian aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union*, 21, pp. 574-586.

ROBINSON T.-W. (1939). — Earth-tides shown by fluctuations of water-levels in wells in New-Mexico and Iowa. *Trans. Am. Geophys. Union*, **20**, pp. 656-666.

THOMAS H.-E. (1963). — A water budget for the artesian aquifer in Ogden Valley, Weber County, Utah in *Methods of collecting and interpreting ground-water data. US. Geological Survey, Water Supply paper*, 1544-H, pp 63-97.

TISON L.-L. (1951). — Fluctuations d'une nappe aquifère étendue. *Assoc. Int. Hydro. Sci., Ass. Gen. Bruxelles*, 2, pp. 195-201.

TODD D.-K. (1959). — Ground water hydrology. John Wiley and Sons, New York, 336 p.

TUINZAAD H. (1954). — Influence of the atmospheric pressure on the head of artesian water. *Assemblée générale de Rome, AIHS*, vol. 2, pp. 33-37.