

UDK 551.44:627.13(497.12)=40

Variations naturelles de niveau piézométrique d'un aquifère karstique

Naravna nihanja gladine podtalnice kraškega vodonosnika

Primož Krivic

Geološki zavod, 61000 Ljubljana, Parmova 33

Résumé

La première partie de ce travail est relative à l'étude des variations naturelles de la pression ou du niveau piézométrique à l'aide d'un modèle statistique. L'étude des variations piézométriques sous l'effet des marées marines, a permis de caractériser le comportement hydrodynamique général de l'aquifère et d'évaluer les caractéristiques hydrodynamiques du milieu. La dernière partie de ce travail est consacrée à l'interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré-karstique. Ce travail montre donc la possibilité d'application des différentes approches à la résolution des problèmes hydrodynamiques des aquifères fissurés et karstiques.

Kratka vsebina

V prvem delu študije o hidrodinamiki razpoklinskih in kraških vodonosnikov so s pomočjo statističnega modela obravnavana naravna nihanja piezometričnih nivojev podtalnice v odvisnosti od padavin in pretokov rek, ki napajajo vodonosnik. Drugi del obsega študij periodičnih nihanj gladine podtalnice pod vplivom plimovanja morja, ki omogoča določitev splošnih hidrodinamičnih parametrov vodonosnika. Zadnji del pa je posvečen interpretaciji črpalnih poizkusov v kraško-razpoklinskih vodonosnikih.

Avertissement. Cet article constitue la première partie d'un mémoire sous titre: «Étude hydrodynamique d'un aquifère karstique» présenté par l'auteur en vue d'une soutenance de thèse de Docteur-ingénieur à l'Université Montpellier II, France, année 1981. Les deux autres parties paraîtront dans les fascicules suivants de la GEOLOGIJA.

Pojasnilo. Članek predstavlja prvi del doktorske disertacije z naslovom: »Študija hidrodinamike kraškega vodonosnika«, ki jo je avtor zagovarjal leta 1981 na Univerzi Montpellier II v Franciji. Druga dva dela pa bosta izšla v naslednjih zvezkih revije GEOLOGIJA.

Sommaire

Introduction	130
Caractérisation géologique et hydrogéologique générale de l'aquifère étudié	131
1. Contexte général	131
2. Équipement du système aquifère étudié	135
Étude de variations naturelles des niveaux piézométriques	138
1. Introduction	138
2. Corrélations entre les niveaux piézométriques des différents forages	139
3. Corrélations pluie-niveaux piézométriques	140
4. Corrélations débit-niveau piézométrique	147
5. Conclusion	148
Bibliographie	149

Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre des travaux consacrés à «l'hydrogéologie des roches fissurées et des terrains karstiques», entrepris au Département d'Hydrogéologie et de Géologie technique du Service Géologique de Ljubljana.

Le système karstique qui a servi de base à cette recherche réalisée en liaison avec le Laboratoire d'Hydrogéologie de Montpellier est celui de la région de Kras (Slovénie, Nord-Ouest de la Yougoslavie), qui est une région typique, à l'origine du terme scientifique de *karst* qui correspond à la transcription allemande du terme slovène *kras*.

Il s'agit de magasins karstiques très étendus qui constituent par leurs ressources en eau souterraine un des éléments importants du développement économique de la région.

Les problèmes abordés ici, concernent certains aspects de l'hydrodynamique souterraine traités à partir de données issues d'observations réalisées essentiellement sur forages.

Bien entendu, les interprétations qui peuvent être proposées se heurtent au fait que dans les aquifères karstiques les lois régissant les écoulements souterrains sont difficiles à saisir: la structure du milieu étant très particulière.

On a montré, en effet, que les circulations d'eau se font dans des fentes d'origine tectonique, plus ou moins karstifiées, dont la distribution confère à la roche une forte hétérogénéité hydraulique (C. D r o g u e, 1974): conduits ou chenaux à conductivités élevées et juxtaposés à des blocs fissurés à faibles conductivités.

Les chenaux ou drains sont les voies préférentielles de l'écoulement souterrain et constituent les domaines privilégiés pour le captage des eaux. Mais l'organisation spatiale de ces chenaux et leurs caractéristiques sont très difficiles à définir. Aussi, à l'heure actuelle, l'étude des aquifères karstiques est souvent effectuée à l'aide d'approches mises au point pour les terrains poreux. Des solutions spécialement adaptées au domaine karstique sont cependant proposées dans la littérature, mais on est encore relativement impuissant à procéder à l'analyse précise de certains processus liés à l'écoulement dans le karst.

Dans ce travail, nous avons examiné certains phénomènes hydrodynamiques en essayant d'utiliser pour cela les solutions les mieux adaptées. La critique de cette démarche est faite dans le texte, compte tenu de la géométrie des milieux souterrains concernés.

Il a d'abord été étudié les variations naturelles des niveaux piézométriques, conjointement aux facteurs suivants: d'une part, les apports des pluies et, d'autre part, les mouvements d'un plan d'eau libre à la limite de l'aquifère (marées de la mer Adriatique).

Les calculs des paramètres d'écoulement qui peuvent être ainsi faits pour des volumes relativement importants de la «nappe», sont complétés par des valeurs plus ponctuelles issues d'essais par pompages sur des forages spécialement réalisés pour cette étude.

Suite à l'ensemble de ces résultats, une des questions qui peut être posée, est celle de la place et de l'intérêt de l'étude de certains phénomènes relativement spécifiques (effets des marées océaniques, par exemple) dans une recherche appliquée.

Ceci nous paraît un sujet intéressant à aborder, nous y reviendrons donc dans la conclusion de ce mémoire.

CHAPITRE I

Caractérisation géologique et hydrogéologique générale de l'aquifère étudié

1. Contexte général

1.1. Situation

Le terrain étudié se situe entre le Golfe de Trst (Trieste), la vallée de la Vipava, la vallée de la Notranjska Reka et les massifs du Brkini et du Slavnik (fig. 1).

Il s'agit d'un plateau d'altitude moyenne, comprise entre 100 et 300 m. La superficie du terrain karstique de ce secteur est de 500 km² environ.

1.2. Contexte géologique et hydrogéologique

Nous possédons peu de documents géologiques de détail sur cette région. La carte géologique de Gorica au 1/100 000 ne rend pas compte en effet de certains aspects de la structure (fracturation par exemple) qui jouent très probablement un rôle important dans l'organisation des circulations d'eau.

Sans reprendre l'historique des recherches géologiques entreprises sur le Kras, nous citerons les principaux auteurs: G. Stache (1891), F. Kossmat (1909, 1916), B. Martinis (1951), C. d'Ambrosi (1955, 1960), M. Pleničar (1960), R. Pavlovec (1963), S. Buser (1968).

1.2.1. Description des faciès

La série stratigraphique est représentée du Crétacé inférieur à l'Eocène (S. Buser, 1968).

Le Crétacé inférieur et l'étage Cénomaniens sont représentés par des dolomies noires et grises surmontées de calcaires marneux qui supportent des calcaires massifs du Turonien et du Sénonien. L'ensemble de cette série a une puissance supérieure à 900 m, dont la moitié correspond aux calcaires du Turonien et du Sénonien.

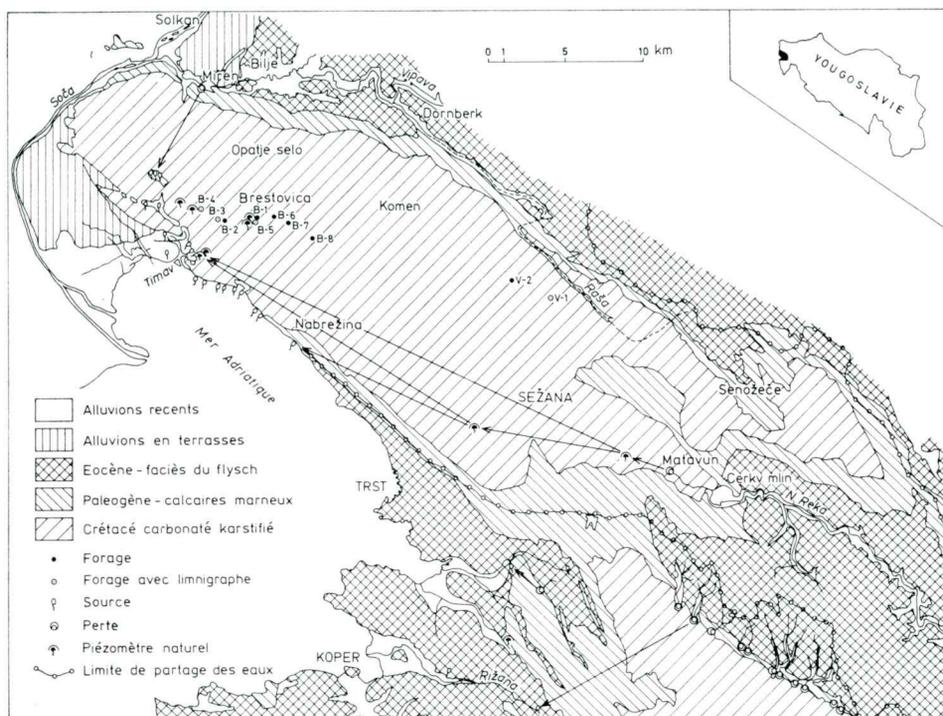


Fig. 1. Carte hydrogéologique simplifiée du Kras

Sl. 1. Poenostavljena hidrogeološka karta Tržaško-komenskega Krasa

Le Paléocène et l'Eocène inférieur sont formés tout d'abord de calcaires marneux et de marnes, puis de flyschs (Eocène). Ce dernier faciès joue un rôle hydraulique important: il constitue en effet les limites latérales étanches de l'aquifère karstique crétacé.

1.2.2. Données structurales

Du point de vue géologique, les limites de l'aquifère karstique crétacé sont relativement bien déterminées (fig. 1). En effet, parallèlement à la faille dinarique (orientation SE-NW) longeant la côte du Golfe de Trieste et au nord-est de celle, existe une structure synclinale de flyschs éocènes de Vipava; entre ces deux structures, affleurent des terrains du Crétacé, composés de calcaires et de dolomies.

La structure géologique de ce bassin est simple: les calcaires et les dolomies forment un anticlinal dont l'axe général orienté NW-SE plonge vers le nord-ouest et disparaît dans cette direction sous la couverture alluvionnaire de la rivière Soča (fig. 1).

Ce dispositif permet d'établir, aussi bien du sud-ouest qu'au nord et au nord-est, des limites du bassin versant nettes et précises. Ces limites étant donc

bien définies, reste à préciser toutefois la limite sud: en effet, la continuité des calcaires dans le massif de Slavnik et la vallée de Materija introduit une indétermination quant à la localisation précise dans l'espace, de la ligne de partage des eaux souterraines entre les bassins versants de Timav, de Rižana et de Osp.

1.2.3. Hydrogéologie générale

L'aquifère karstique est alimenté, outre par les pluies, par les cours d'eau suivants:

- les eaux de la Notranjska Reka qui se perdent en totalité à Škocjanske jame,
- le ruisseau temporaire Raša qui alimente, par infiltration, la nappe souterraine de la partie nord-est du Kras; aux basses eaux, il se perd en totalité,

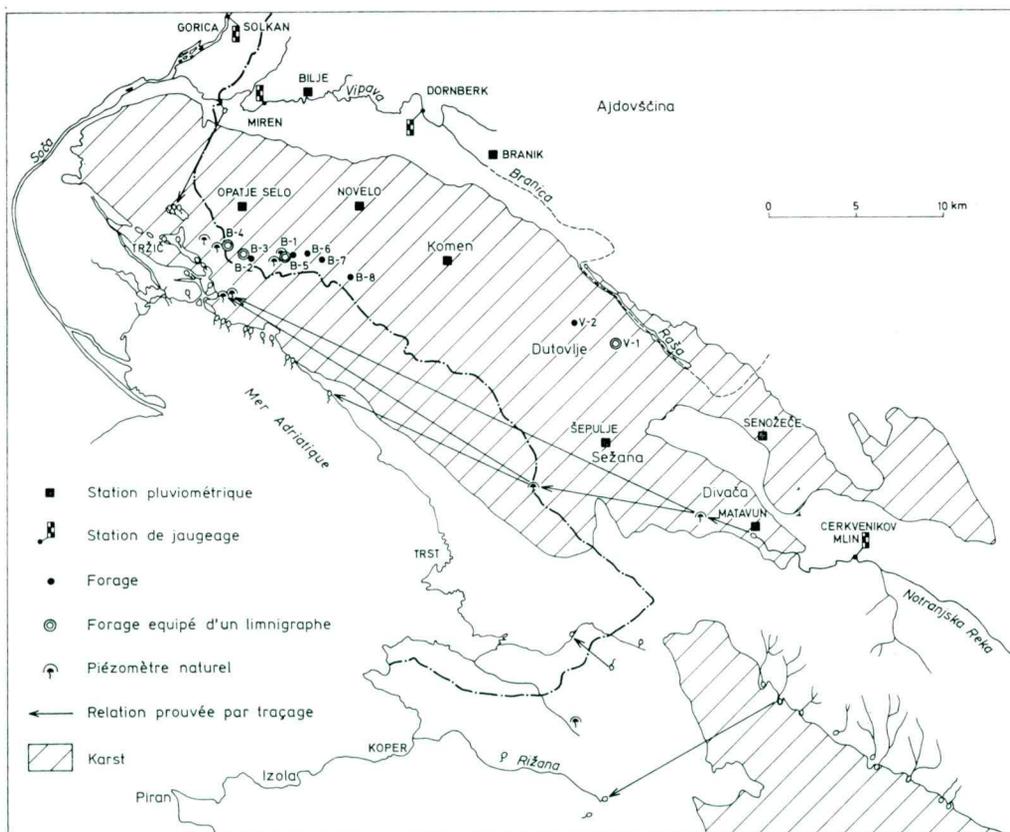


Fig. 2. Équipement hydrométrique de l'aquifère étudié

Sl. 2. Hidrometrična merilna mesta obravnavanega vodonosnika

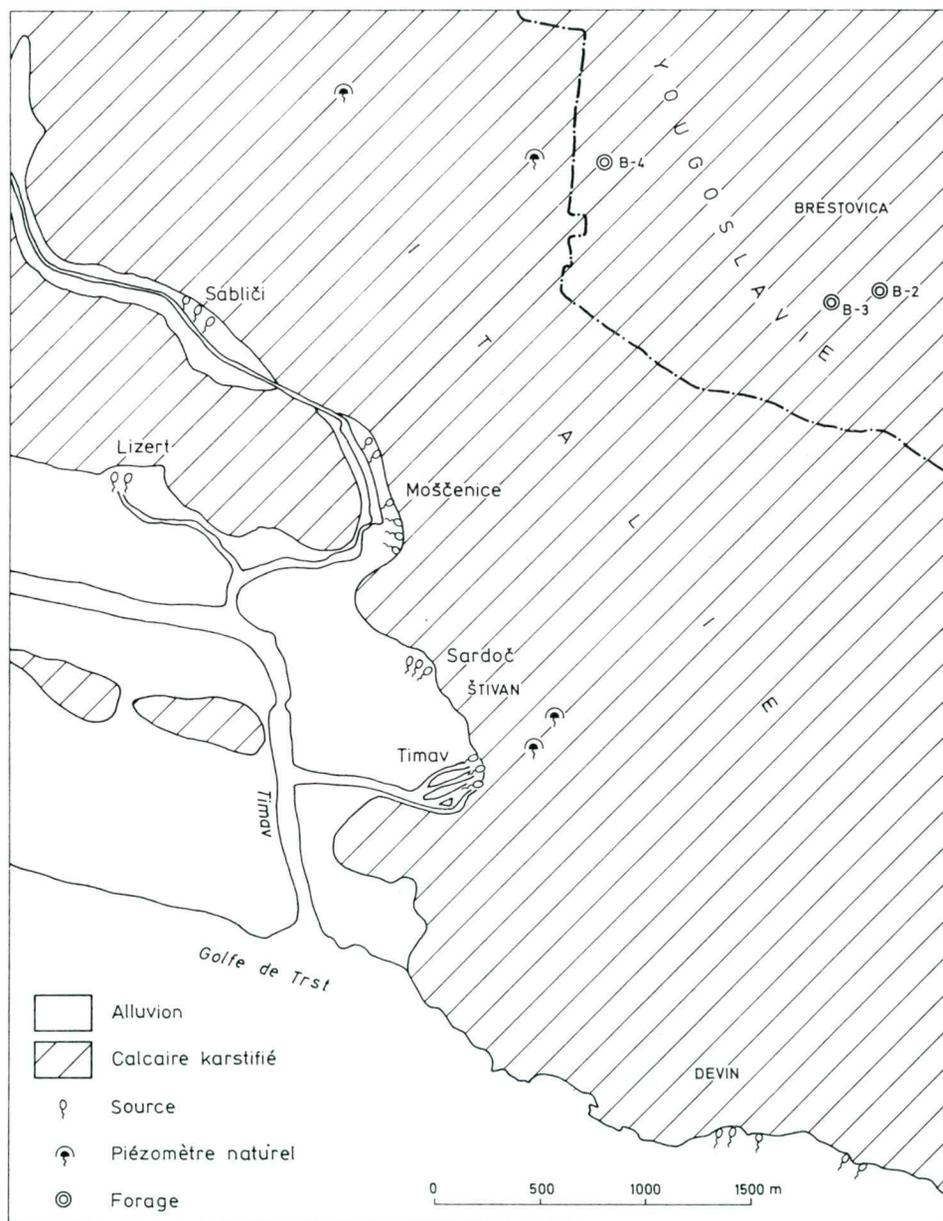


Fig. 3. Carte schématique du secteur étudié avec les sources principales de Timav
 Sl. 3. Skica dela obravnavanega območja z glavnimi izviri Timava

— la rivière Vipava qui disparaît au niveau de Miren après avoir quitté les terrains imperméables. Un traçage prouvant cette alimentation a été réalisé par G. Timéus en 1910 (fig. 2).

Enfin, la nappe alluviale de la Soča alimente le karst au contact des calcaires fissurés et karstifiés sur la partie nord-ouest de l'aquifère karstique (d'après les études de F. Mosetti & C. D'Ambrosi, 1963 et de S. Morgante, F. Mosetti & E. Tongiorgi, 1966).

Le fait qu'il n'existe pas de cours d'eau de surface pour drainer un plateau de 500 km² (les cours d'eau précités ci-dessus se situant en bordure) montre l'importance du drainage souterrain.

Ce drainage réapparaît essentiellement au niveau des trois sources de Timav au nord de Devin (fig. 3). Les autres exutoires voisins sont ceux de Sabliči, Moščence, Lizert, Sardoč au nord des sources principales, et de Brojnica au sud (E. Boegan, 1938). Enfin tout le long de la Côte Adriatique, entre Devin et Nabrežina, il faut signaler la présence de sources sous-marines pérennes ou temporaires (E. Accerboni & F. Mosetti, 1967).

Le débit cumulé de toutes ces sources n'a jamais été mesuré, mais on a pu estimer le débit d'étiage global à 10 m³/s (E. Boegan, 1938, C. d'Ambrosi, 1952, F. Bidovec, 1957, 1965), et le débit moyen à 20 m³/s (E. Boegan, 1938, C. d'Ambrosi, 1952).

Ces sources se situant sur le territoire italien n'ont pu faire hélas l'objet d'équipement limnigraphique et d'aucune surveillance dans le cadre de cette étude.

On ajoutera, enfin, que sur le plan des précipitations, la moyenne pluviométrique annuelle établie sur une période allant de 1926 à 1965, est de l'ordre de 1460 mm.

2. Équipement du système aquifère étudié

2.1. Forages

Sur la partie nord et nord-est de l'aquifère étudié nous avons implanté dix forages: le long de la vallée de Brestovica à la frontière italienne (B—4) jusqu'à Gorjansko (B—8), dans les dolines de Kazlje (V—1) et de Avber (V—2) (fig. 2, tableau 1).

Après exécution, chaque ouvrage a fait l'objet d'essais par pompage (fig. 4) et a ensuite été utilisé comme piézomètre (fig. 5). Certains forages furent équipés de limnigraphes sur des périodes plus ou moins longues; il s'agit des forages B—3, B—4, B—5, B—7 et V—1. Les niveaux piézométriques dans les autres ouvrages sont mesurés une fois par semaine (tableau 2).

2.2. Stations hydrométriques

Sur les rivières qui alimentent l'aquifère de Kras, il y a les quatre stations de jaugeages suivantes: Cerkvenikov mlin sur la rivière Notranjska Reka; Miren et Dornberk sur la rivière Vipava; et enfin, une station sur la rivière Soča au niveau de Solkan (fig. 2).

Toutes ces stations sont équipées de limnigraphes et entretenues par le Service Hydrologique de Slovénie.

Tableau 1. Caractéristiques géologiques et techniques des forages
Tabela 1. Geološki in tehnični podatki o vrtnah

Ouvrage	Diamètre foré: — au sommet — au fond	Profondeur totale de l'exécution	Faciès du niveau aquifère	Degré de fissuration et karstification
B—1	170 mm 116 mm	93,4 m	dolomie grise foncée du Crétacé inférieur et Cénomanién silicifiée	présence de fissures fines
B—2	175 mm 101 mm	72,0 m	calcaire brun grisâtre foncé du Crétacé inf. et Cénomanién	calcaire très fissuré et karstifié
B—3	200 mm 116 mm	85,3 m	calcaire brun grisâtre foncé du Crétacé inf. et Cénomanién	fissures fines
B—4	175 mm 131 mm	52,5 m	calcaire gris foncé du Crétacé inférieur et Cénomanién	calcaire très fissuré chenal ouvert de 41,7 m à 43,0 m
B—5	250 mm 219 mm diamètre de tubage: 193 mm	74,5 m crépinée de 66,7 m à 72,5 m	dolomie grise foncée du Crétacé inférieur et Cénomanién avec sable argileux de remplissage	forage recoupe le chenal immergé du puits naturel Drča jama de 66,7 m à 72,5 m
B—6	146 mm 101 mm	140,5 m	calcaire brun grisâtre foncé du Crétacé inf. et Cénomanién	calcaire peu fissuré
B—7	146 mm 101 mm	141,5 m	calcaire gris foncé du Crétacé inférieur et Cénomanién	calcaire très fissuré
B—8	146 mm 101 mm	190,3 m	calcaire gris foncé du Crétacé inférieur et Cénomanién	calcaire fissuré fissure ouverte de 169,9 m à 170,4 m
V—1	346 mm 6½" (165 mm)	200,3 m	calcaire gris marneux du Crétacé supérieur — Sénomanién	calcaire bréchiqne et fissuré
V—2	236 mm 8" (203 mm)	203,0 m	calcaire en bancs très dur gris blanc du Crétacé sup. — Sénomanién	calcaire peu fissuré



Fig. 4. Pompage d'essai dans le puits VB—4. Débit d'exhaure (103 l/s), rabattement stabilisé 0,44 m. L'eau pompée a été rejetée dans une doline située à 1000 m à l'est du puits

Sl. 4. Črpalni poizkus v vodnjaku VB—4. Pretok (103 l/s), ustaljeno znižanje 0,44 m. Izčrpana voda je bila odvedena v dolino 1000 m vzhodno od vodnjaka

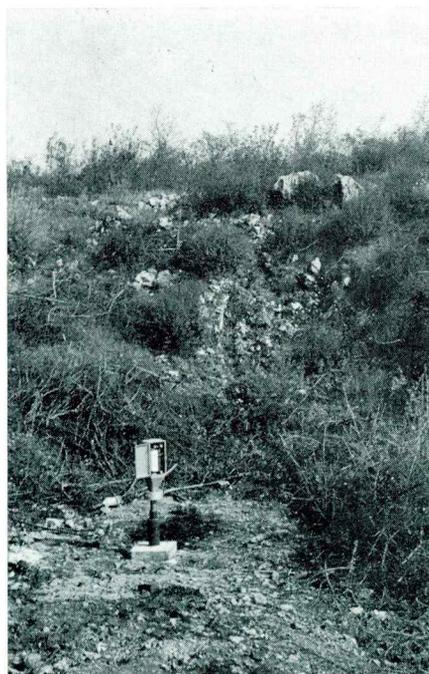


Fig. 5. Piézomètre B—4 équipé d'un limnigraphe depuis 1977, permettant l'enregistrement des marées dans l'aquifère. Profondeur 52,5 m, distance de la côte 4000 m

Sl. 5. Piezometer B—4, opremljen z limnigrafom od leta 1977, ki omogoča beleženje plimovanja v vodonosniku. Globina 52,5 m, oddaljenost od morske obale 4000 m

Tableau 2. Durées d'observations piézométriques

Tabela 2. Čas opazovanja piezometrov

Forages	Périodes d'observations piézométriques	
	limnigraphiques	manuelles
B-1		9. 3. 1977 - 1. 1. 1980
B-2		9. 3. 1977 - 1. 1. 1980
B-3	4. 10. 1979 - 1. 1. 1980	1. 4. 1977 - 1. 1. 1980
B-4	20. 4. 1977 - 23. 8. 1979	20. 4. 1977 - 1. 1. 1980
B-5	22. 6. 1977 - 20. 4. 1979	5. 5. 1977 - 1. 1. 1980
B-6		15. 6. 1977 - 1. 1. 1980
B-7	4. 12. 1979 - 1. 1. 1980	30. 7. 1977 - 1. 1. 1980
B-8		12. 9. 1977 - 1. 1. 1980
V-1	23. 5. 1979 - 1. 1. 1980	30. 1. 1979 - 1. 1. 1980
V-2		23. 5. 1979 - 1. 1. 1980

2.3. Stations météorologiques

Il s'agit d'un réseau météorologique de 10 stations, dont 6 se situent sur le plateau du Kras et les autres à proximité de celui-ci (fig. 2).

Ces stations sont gérées par le Service Météorologique de Slovénie. Elles sont équipées de pluviographes et les données de pluie journalière sont disponibles.

Ci-dessous, est précisée la liste des postes consultés:

- Opatje selo,
- Senožeče,
- Branik (Zalošče),
- Bilje,
- Matavun,
- Nova Gorica,
- Ilirska Bistrica,
- Novelo pri Temnici,
- Komen,
- Šepulje (Godnje, Šmarje).

CHAPITRE II

Étude de variations naturelles des niveaux piézométriques

Corrélations pluie-piézométrie-débit

1. Introduction

1.1. Objectifs

Rappelons que le système karstique étudié a une superficie de 500 km² environ; qu'il se situe dans les assises carbonatées du Crétacé et que ses limites sont relativement bien connues, sauf dans la partie Sud où une indétermination

subsiste quant à la position de la ligne de partage des eaux entre ce système aquifère et d'autres systèmes adjacents.

Sur cet aquifère, l'objectif de l'étude est d'analyser les relations entre les séries chronologiques de débit, de niveaux piézométriques et données pluviométriques. Pour cela nous avons établi un programme (programme HYDRO-STAT) pour le traitement de données recueillies et le tracé automatique de diagrammes synthétiques.

L'analyse statistique entre les différentes variables (pluie, débits, niveaux piézométriques) a été réalisée par la méthode de régression et corrélations linéaires.

Il importe donc de pouvoir mettre en évidence certaines dépendances entre deux ou plusieurs paramètres, voir même le degré de dépendance.

Ceci reste néanmoins relativement sommaire. Les relations entre les variables «pluie», «niveaux piézométriques» et «débits» ont été étudiées à l'aide d'une méthode classique de statistique des corrélations linéaires simples. Ce travail doit donc être considéré comme une introduction à une étude ultérieure plus approfondie.

2. Corrélations entre les niveaux piézométriques des différents forages

2.1. Résultats

L'étude a consisté à calculer et à analyser les corrélations entre les niveaux piézométriques des forages, deux par deux, à l'aide de régressions linéaires.

Exemple:

Pour les forages B—4 et B—5 la régression est la suivante:

$$h_{(B-4)} = 0,60 + 0,46 h_{(B-5)}$$

avec un coefficient de corrélation de 0,98 (fig. 6); la moyenne étant de 7,42 m pour B—5, de 4,02 m pour B—4 et l'écart-type de 2,99 m pour B—5 et de 1,40 m pour B—4 sur un échantillon de 247 couples de données.

Il a été procédé ainsi pour les 45 couples de forages. Les coefficients de corrélation, des forages pris deux par deux, sont présentés dans le tableau 3.

2.2. Interprétation

Pour les forages B—2, B—3, B—4, B—5, B—6, B—7, B—8 (voir tableau 3) le coefficient de corrélation est très significatif ($R \geq 0,95$). En revanche, il est faible pour les autres forages (B—1, V—1, V—2) qui ne réagissent donc pas de la même manière. Les forages B—2 à B—8 réagissent très nettement aux impulsions d'entrées (fig. 7). On peut donc considérer qu'ils sont représentatifs du réseau conducteur du système karstique étudié. Aussi les forages B—1, V—1, V—2 dont les niveaux piézométriques ont des variations plus lentes et qui ne se corrélaient pas avec ceux des forages précédents ne sont donc pas représentatifs du réseau conducteur. Ces forages sont implantés soit dans les zones peu perméables, soit dans des secteurs qui ne sont pas directement liés au réseau du drainage principal.

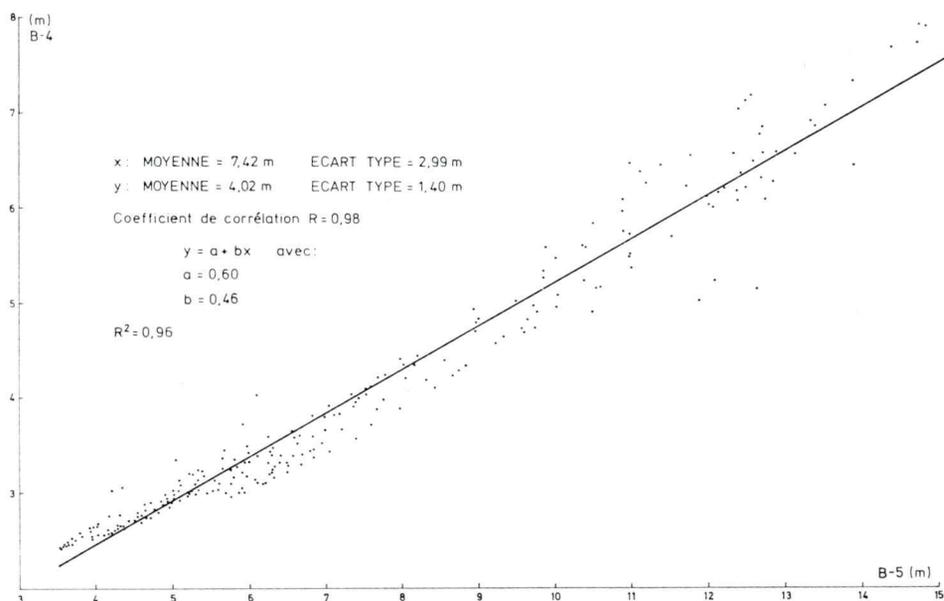


Fig. 6. Régression linéaire entre les niveaux piézométriques relevés sur les forages B—4 et B—5 (247 mesures)

Sl. 6. Linearna regresija med piezometričnimi nivoji izmerjenimi v vrtinah B—4 in B—5 (247 meritev)

Cette analyse permet donc de situer les forages dans des domaines de perméabilités de l'aquifère karstique: sur les drains conducteurs (forages B—2 à B—8) et sur les zones peu fissurées (B—1, V—1, V—2).

3. Corrélations pluie-niveaux piézométriques

Nous disposons des valeurs journalières de pluviométrie pour la période de mars 1977 à janvier 1980. La liste des stations météorologiques consultées est donnée dans le chapitre I, § 2.3.

Pour cette étude, nous avons retenu quatre postes qui nous paraissent être les plus représentatifs pour l'ensemble du plateau karstique; ce sont les stations météorologiques de Senožče, Opatje Selo, Bilje et Matavun (fig. 2).

Tous les piézomètres de B—2 à B—8 fonctionnent essentiellement de la même façon comme cela a été vu dans le paragraphe 2. Nous allons donc utiliser les données du piézomètre B—4 comme représentatives pour cette partie de l'aquifère. Les données du piézomètre B—5 serviront de contrôle et pour la comparaison du comportement d'un point à un autre, les deux piézomètres étant équipés de limnigraphes durant la période considérée.

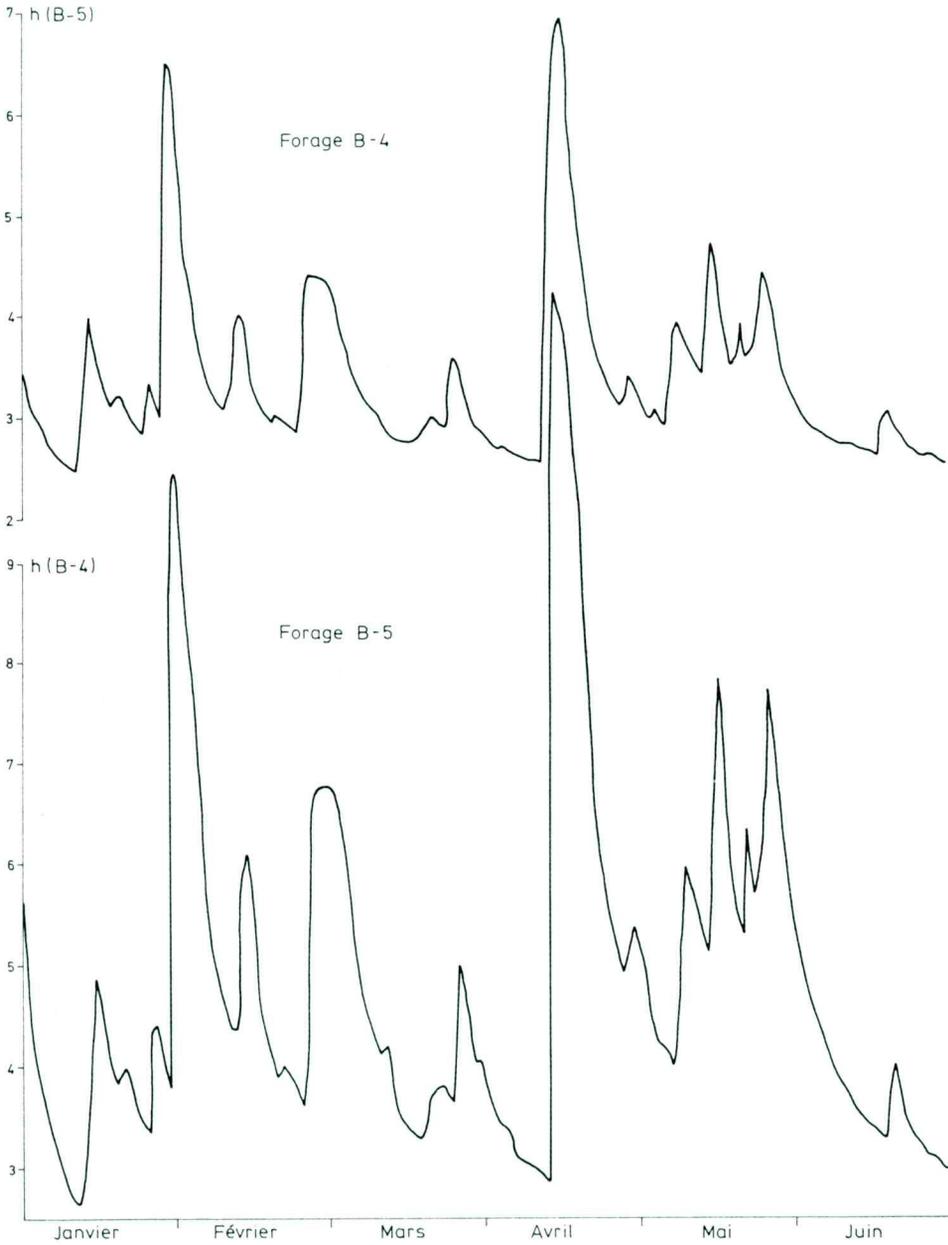


Fig. 7. Variations piézométriques sur les forages B—4 et B—5 (année 1978)

Sl. 7. Nihanje gladine podtalnice v vrtnah B—4 in B—5 (leto 1978)

Tableau 3. Coefficients de corrélation des niveaux piézométriques des forages deux par deux

Tabela 3. Korelacijski koeficienti piezometričnih nivojev po parih vrtin

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	V-1
B-2	0,61								
B-3	0,60	0,99							
B-4	0,56	0,99	0,99						
B-5	0,71	0,98	0,98	0,98					
B-6	0,67	0,99	0,99	0,99	0,99				
B-7	0,72	0,97	0,97	0,97	0,99	0,99			
B-8	0,73	0,95	0,95	0,94	0,98	0,98	0,99		
V-1	0,96	0,31	0,24	0,30	0,41	0,31	0,42	0,42	
V-2	-0,13	0,79	0,75	0,79	0,74	0,79	0,84	0,83	0,12

3.1. Corrélation linéaire simple avec introduction d'un temps de retard entre les séries «pluie» et «niveaux piézométriques»

Le facteur temps a été introduit dans l'analyse statistique en prenant des niveaux piézométriques décalés par rapport aux pluies d'un temps D . Ainsi la piézométrie du jour i est corrélée successivement avec la pluie du jour i (P_i), du jour $i-1$ (P_{i-1}), du jour $i-2$ (P_{i-2})... jusqu'à la pluie du jour $i-10$ (P_{i-10}).

La comparaison des coefficients de corrélation ainsi obtenus permet de la sorte de retenir le temps de retard Δt ($\Delta t \simeq D + 1$) pour lequel les séries, «pluie» et «niveaux» sont le mieux corrélées.

A noter que pour $\Delta t = 0$ (niveaux piézométriques pris en fin de décrue, avant l'amorce de la crue due à la pluie du jour i), les corrélations pluie-niveaux sont très médiocres, ou quasi nulles (Senožeče: $R = 0,17$; Opatje Selo: $R = 0,13$; Matavun: $R = 0,15$; Bilje: $R = -0,002$) (tableau 4).

La variation du coefficient de corrélation linéaire entre les séries «pluie» et «niveaux», compte tenu du temps de retard Δt est représentée sur la fig. 8. Il apparait une corrélation maximum pour un temps de retard $\Delta t = 2,5$ à $3,5$ jours, avec cependant des coefficients dont la valeur reste très médiocre ($0,42 < R_{\max.} < 0,51$).

Ceci confirme bien ce que l'on sait: il existe des facteurs importants autres que la pluie du jour $i-n$ ($n = 0$ à 10) pour expliquer le niveau piézométrique du jour i .

3.2. Étude de contribution de plusieurs facteurs à l'explication de l'évolution du niveau piézométrique

Le degré de saturation du karst et notamment de sa zone non saturée (P. Krivic, 1978) au moment où tombe la pluie et la façon dont elle tombe (C. Drogue, 1964) sont les facteurs qui ont une influence importante sur l'évolution du niveau piézométrique.

Tableau 4. Coefficients de corrélation linéaire simple des séries «pluie» et «niveau piézométrique» avec introduction d'un décalage

Tabela 4. Korelacijski koeficienti statističnih serij »padavine« in »piezometrični nivo« z upoštevanjem zamika

Piézomètre	Stations météorologiques				Décalage D en jours
	Senožeče	Opatje selo	Bilje	Matavun	
B-4 B-5	0,17	0,13	-0,002	0,15	0
B-4 B-5	0,46	0,40	0,30	0,48 0,44	1
B-4 B-5	0,51	0,42	0,42	0,51 0,48	2
B-4 B-5	0,47	0,39	0,44	0,44 0,40	3
B-4	0,43	0,31	0,39	0,39	4
B-4	0,36		0,30	0,32	5
B-4			0,25	0,26	6
B-4				0,22	7
B-4				0,01	10

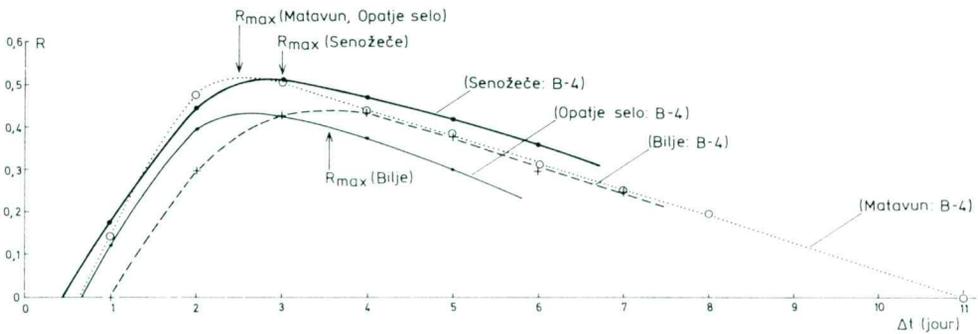


Fig. 8. Corrélation linéaire entre la pluie à différentes stations météorologiques et le niveau piézométrique du forage B-4

Variation du coefficient de corrélation R en fonction du temps de retard Δt
 $R = f(\Delta t)$

Sl. 8. Linearna korelacija med padavinami na različnih padavinskih postajah in piezometričnim nivojem v vrtini B-4

Korelacijski koeficient R v odvisnosti od časa zakasnitve odgovora Δt
 $R = f(\Delta t)$

Nous avons tenu compte dans les corrélations non seulement de la pluie du jour dont on étudie le niveau piézométrique, mais aussi de la pluie des jours antérieurs. Dans les calculs sont introduits successivement: la pluie d'un (P_{i-1}), de deux (P_{i-2}) et de trois (P_{i-3}) jours qui précèdent le jour étudié.

Il a été considéré non seulement le niveau piézométrique du jour étudié (h_i) mais aussi la montée du niveau piézométrique par rapport au niveau de la journée précédente ($h_i - h_{i-1}$), pour tenir compte ainsi de l'état de l'emmagasinement du niveau de la zone saturée du karst et de la phase dans laquelle se trouve le réservoir au moment où tombe la pluie (crue, décrue, tarissement).

Les facteurs considérés dans les corrélations sont les suivants:

- Pluie du jour (i) : P_i
- Pluie du jour précédent (i-1) : P_{i-1}
- Pluie du jour (i-2) : P_{i-2}
- Pluie du jour (i-3) : P_{i-3}
- Niveau piézométrique du jour (i) : h_i
- Montée du niveau piézométrique : $h_i - h_{i-1}$

La facteur temps a été introduit également dans ce type d'analyse par le décalage D (D = 0 à 2 jours).

3.2.1. Corrélations du type $h_i = f(P_i)$, $h_i = f(P_i, P_{i-1})$, $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2})$, $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$

Exemple: Station pluviométrique Matavun — piézomètre B—5

Il a été tenu compte des valeurs correspondantes du jour, puis de celles des jours précédents. Le coefficient de corrélation pour un décalage D = 1 jour passe de 0,44 pour $h_i = f(P_i)$, à 0,66 pour $h_i = f(P_i, P_{i-1})$, puis à 0,70 pour $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2})$ et à 0,74 pour $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$. Il montre donc une nette amélioration de la corrélation (tableau 5).

L'amélioration du coefficient de corrélation est due principalement à la prise en compte de la pluie des jours i et i-1 puisque sa valeur passe alors de 0,44 à 0,66. La prise en compte des pluies des autres jours améliore ces résultats dans des proportions moins significatives.

En faisant varier le paramètre D nous avons pu obtenir, par exemple, les relations et les coefficients de corrélations suivants:

- R = 0,72 pour $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ avec D = 0
- R = 0,79 pour $h_i = f(P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}, P_{i-4})$ avec D = 1 jour et
- R = 0,72 pour $h_i = f(P_{i-2}, P_{i-3}, P_{i-4}, P_{i-5})$ avec D = 2 jours.

Les corrélations établies sur les autres stations pluviométriques donnent des résultats suivants (voir tableau 6).

Le tableau 6 montre que le coefficient de corrélation est presque le même pour toutes les stations considérées et que le temps de retard ($\Delta t = 2$ jours environ) est égal pour tous les couples de valeurs.

Les résultats sont à première vue contradictoires: le coefficient de corrélation est plus faible (R = 0,70) pour la station pluviométrique Opatje Selo qui est la plus proche du piézomètre B—4; pour le poste Matavun qui se situe à une distance dix fois plus grande le coefficient de corrélation est plus grand

Tableau 5. Coefficients de corrélation des séries «pluie» et «niveau piézométrique» du type $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ pour les piézomètres B—4 et B—5 et la station météorologique Matavun

Tabela 5. Korelacijski koeficienti serij »padavine« in »piezometrični nivo« tipa $h_i = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ za piezometra B—4 in B—5 ter padavinsko postajo Matavun

Forage h_i	Station météorologique Matavun				Décalage D en jours
	P_i	P_i, P_{i-1}	P_i, P_{i-1}, P_{i-2}	$P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}$	
B-4	0,15			0,72	0
B-5		0,47	0,60	0,67	
B-4	0,48			0,79	1
B-5	0,44	0,66	0,70	0,74	
B-4	0,51			0,72	2
B-5	0,48	0,61	0,65	0,67	

Tableau 6. Coefficients de corrélation des séries «pluie» et «niveau piézométrique» du type $h_{i(B-4)} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ pour les différentes stations pluviométriques

Tabela 6. Korelacijski koeficienti serij »padavine« in »piezometrični nivo« tipa $h_{i(B-4)} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ za različne padavinske postaje

Décalage D en jours	$h_{i(B-4)} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$			
	Senožeče	Opatje selo	Bilje	Matavun
0	0,72	0,64	0,67	0,72
1	0,77	0,70	0,76	0,79
2	0,70	0,62	0,72	0,72

Tableau 7. Coefficients de corrélation des séries «pluie» et «niveau piézométrique» du type $h_i - h_{i-1}(B-4) = f(P_i)$ pour les différentes stations pluviométriques

Tabela 7. Korelacijski koeficienti serij »padavine« in »piezometrični nivo« tipa $h_i - h_{i-1}(B-4) = f(P_i)$ za različne padavinske postaje

Décalage D en jours	$h_i - h_{i-1} = f(P_i)$			
	Senožeče	Opatje selo	Bilje	Matavun
0	0,36	0,12	0,26	0,37
1	0,71	0,43	0,52	0,75
2	0,22	-0,01	0,29	-0,04

($R = 0,79$); de plus, le temps de retard est égal pour tous les postes, quelle que soit leur distance du piézomètre B—4. Ceci pose le problème de la représentativité des stations pluviométriques et des piézométries qu'ils sont censés traduire.

3.2.2. *Corrélation du type $h_i - h_{i-1} = f(P_i)$*

Les coefficients de corrélation restent inférieurs à ceux que nous avons obtenu précédemment (tableau 7). Par contre les pics sont beaucoup plus nets et précis que ceux des essais précédents (cf. fig. 8). C'est donc une bonne méthode pour cerner avec plus de précision le temps de retard de la réponse aux apports d'eau de pluie provenant des différents secteurs de l'aquifère.

La tentative de considérer un seuil de pluie efficace (C. D r o g u e, 1971) de 10 ou 20 mm par jour, n'a pas donné des résultats satisfaisants car le grand nombre de valeurs nulles a conduit à ne conserver qu'un trop petit nombre de groupes de données.

3.2.3. *Corrélations du type $h_i - h_{i-1} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$*

Les analyses suivantes portent sur la relation entre la pluie du jour considéré, celle des jours précédents d'une part, et la montée du niveau piézométrique d'autre part.

Il apparaît que le coefficient de corrélation s'améliore nettement lorsque l'on considère la montée du niveau piézométrique du jour i par rapport au niveau de la journée précédente (h_{i-1}) comme variable expliquée et la pluie du jour ($i - 1$) comme variable explicative.

Sur le tableau 8, il apparaît qu'il est inutile de considérer les pluies des jours ($i - 2$) et ($i - 3$) pour expliquer la montée du niveau piézométrique, leur contribution étant même défavorable. Par contre, la prise en compte des pluies des jours i et $i - 1$ a une contribution positive dans l'explication de la montée du niveau piézométrique ($R_{\max.} = 0,84$).

Tableau 8. Coefficients de corrélation des séries «pluie» et «niveau piézométrique» du type $h_i - h_{i-1} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ pour la station météorologique Matavun et le piézomètre B—5

Tabela 8. Korelacijski koeficienti serij »padavine« in »piezometrični nivo« tipa $h_i - h_{i-1} = f(P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3})$ za padavinsko postajo Matavun in piezometer B—5

Décalage D	Station météorologique Matavun: $h_i - h_{i-1}$		
	P_i, P_{i-1}	P_i, P_{i-1}, P_{i-2}	$P_i, P_{i-1}, P_{i-2}, P_{i-3}$
0	0,84	0,65	0,61
1	0,45	0,41	0,39

4. Corrélations débit-niveau piézométrique

Nous possédons des données journalières de débit de quatre stations de jaugeage pour toute la période des observations de la piézométrie. Ce sont les stations: Solkan, Cerkvnikov mlin, Miren et Dornberk.

L'analyse des liaisons corrélatives en cherchant le coefficient de corrélation maximum par la variation du décalage D donne des résultats suivants (voir tableau 9).

Le temps de retard est de deux jours pour la direction de la Vipava (Miren et Dornberk) et de la Notranjska Reka (Cerkvenikov mlin) vers les piézomètres d'observation. Dans le trajet de la Soča (Solkan) jusqu'au piézomètre B—4 le temps de passage des ondes piézométriques est de deux jours et demi. C'est le temps de passage des ondes de crue qui se propagent dans l'aquifère vers l'exutoire à partir des eaux de surface qui alimentent le karst. Ainsi la vitesse de propagation d'ondes piézométriques peut être calculée aisément.

La célérité apparente est de 730 m/h dans la direction de Cerkvnikov mlin sur la Notranjska Reka vers les sources de Timav. De Solkan sur la Soča elle est de 200 m/h et entre les pertes de la Vipava près de Miren et l'exutoire principal du système la vitesse de propagation des ondes piézométriques est de 150 m/h environ.

La variation du coefficient de corrélation compte tenu du temps de retard Δt est représentée sur la fig. 9. On observe une augmentation rapide des valeurs

Tableau 9. Coefficients de corrélation linéaire simple des séries «débit» et «niveau piézométrique»

Tabela 9. Korelacijski koeficienti serij »pretok« in »piezometrični nivo«

Forage	Stations de jaugeage				Décalage D
	Solkan	Cerkvenikov mlin	Miren	Dornberk	
B-4 B-5	0,29	0,53	0,54	0,53	0
B-4 B-5	0,51	0,75 0,70	0,74	0,74 0,73	1
B-4 B-5	0,57	0,78 0,72	0,78	0,78 0,74	2
B-4 B-5	0,53	0,68 0,64	0,71	0,71 0,68	3
B-4	0,44	0,54	0,59	0,60	4
B-4	0,30	0,42	0,46	0,47	5
B-4	0,18	0,30	0,33	0,34	6
B-5	0,08		0,22	0,23	7

du coefficient de corrélation pendant les deux premiers jours après l'impulsion, puis une diminution plus lente. Les mêmes valeurs du coefficient de corrélation, pour les débits précédant la crue, sont obtenues pour des données situées une semaine environ après celle-ci.

Le coefficient de corrélation est plus faible ($R = 0,57$) pour le couple (Solkan; B—4) que pour les autres couples (coefficient de corrélation supérieur à 0,7). Ceci pourrait être expliqué par l'amortissement des ondes piézométriques à travers les alluvions de la Soča, car la rivière Soča alimente le karst par l'intermédiaire d'une nappe alluviale.

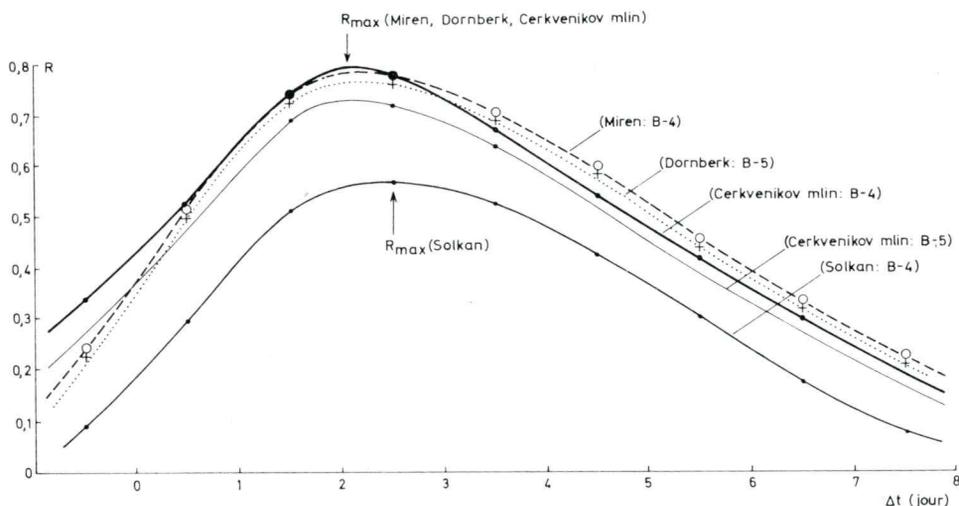


Fig. 9. Corrélation linéaire entre le débit à différentes stations de jaugeage et le niveau piézométrique des forages B—4 et B—5

Variation du coefficient de corrélation R en fonction du temps de retard Δt

$$R = f(\Delta t)$$

Sl. 9. Linearna korelacija med pretokom rek na različnih vodomernih postajah in piézometričnim nivojem v vrtinah B—4 in B—5

Korelacijski koeficient R v odvisnosti od časa zakasnitve odgovora Δt

$$R = f(\Delta t)$$

5. Conclusion

Les relations pluie-niveau piézométrique et débit-niveau piézométrique ont été étudiées à l'aide d'une méthode statistique très simple et facile à mettre en oeuvre mais qui nécessite un nombre de données assez important et une précision des mesures la plus grande possible et dont l'interprétation des résultats doit être menée avec prudence.

Cette méthode permet d'obtenir une première estimation du comportement d'ensemble de l'aquifère, de délimiter les zones de comportement semblable, et de fournir quelques données quantitatives.

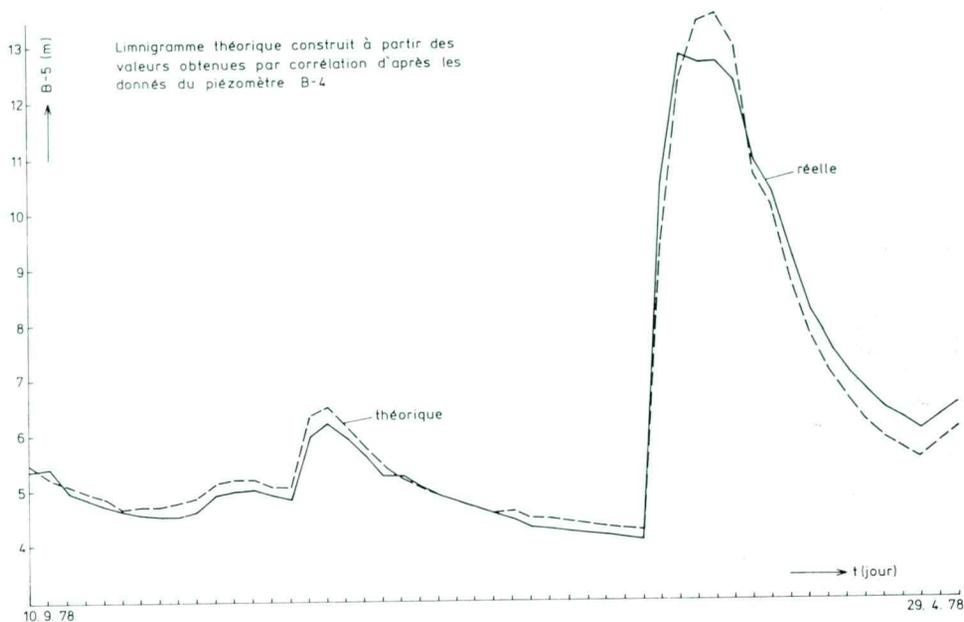


Fig. 10. Limnigrammes calculé et observé pour le forage B—5

Sl. 10. Izračunani in izmerjeni limnigram za vrtino B—5

À titre de contrôle et pour visualiser le fonctionnement du programme HYDROSTAT, nous avons calculé les niveaux piézométriques en différents points de l'aquifère pour une période égale à la période d'observation. L'exemple (fig. 10) montre une superposition très satisfaisante de courbe calculée avec la courbe réellement observée. Ce contrôle sert à vérifier la représentativité du modèle utilisé par rapport au système réel.

Bibliographie

Accerboni, E., Mosetti, F. 1967, Localizzazione dei deflussi d'acqua dolce in mare mediante un conduttometro elettrico superficiale a registrazione continua. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, Vol. 9, no 36, pp. 255—268.

Bidovec, F. 1957, Prispevek Notranjske Reke k vodnim množinam kraških izvirov v povodju Timava. 10 let hidrometeorološke službe, Zbornik HMZ, pp. 29—43, Ljubljana.

Bidovec, F. 1965, The hydrosystem of karstic springs in the Timavo Basin. *Actes Coll. Dubrovnik, AIHS-UNESCO*, Vol. 1, pp. 263—274.

Boegan, E. 1938, Il Timavo. *Mem. Inst. Ital. Speleol.*, 251 p., Trieste.

Buser, S. 1968, Osnovna geološka karta SFRJ, list Gorica 1 : 100 000. Redakcija in založba Zveznega geološkega zavoda, Beograd.

D'Ambrosi, C. 1952, Osservazioni Geo-idrologiche preliminari presso Trieste. *Boll. Soc. Adr. Sc. Nat.*, Vol. 46, pp. 75—90.

D'Ambrosi, C. 1955, Note illustrative della Carta geologica delle Tre Venezie, foglio «Trieste». Padova.

- D'Ambrosi, C. 1960, Lo stato attuale della conoscenza sull'idrologia del Carso di Trieste. *Boll. Soc. Adr. Sc. Nat.*, Vol. 51.
- Drogue, C. 1964, De la répartition sur un Karst d'une averse d'intensité constante. *Ann. Spéléol.*, T. 19, fasc. 4, pp. 631—634.
- Drogue, C. 1971, Coefficient d'infiltration ou infiltration efficace, sur les roches calcaires. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, 3ème série, pp. 121—130.
- Drogue, C. 1974, Structure de certains aquifères karstiques d'après les résultats de travaux de forages. *C. R. Acad. Sc. Paris*, 278, Serie D, pp. 2621—2624.
- Kossmat, F. 1909, Der küstentländische Hochkarst und seine tektonische Stellung. *Verh. Geol. R.-A.*, 85 p., Wien.
- Kossmat, F. 1916, Die adriatische Umrandung in der alpinen Faltenregion. *Mitt. Geol. Ges.*, 6, pp. 61—165.
- Krivic, P. 1978, Étude chimique des eaux de la zone non saturée dans un karst. *Rapport D.E.A.*, 51 p., Montpellier.
- Martinis, B. 1951, Carta geologica Tre Venezie. *Sez. Geol. Inst. Geol. Univ.*, Padova.
- Morgante, S., Mosetti, F. & Tongiorgi, E. 1966, Moderne indagini idrologiche nella zona di Gorizia. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, Vol. 8, No. 30, pp. 114—137.
- Mosetti, F. & D'Ambrosi, C. 1963, Alcune ricerche preliminari in merito a supporti legami di alimentazione fra il Timavo e l'Isonzo. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, Vol. 5, No. 17, pp. 69—84.
- Pavlovec, R. 1963, Stratigrafija produktivnih liburnijskih plasti v luči novih raziskav. *Nova proizvodnja*, 14, 3—4, Ljubljana.
- Pleničar, M. 1960, Stratigrafski razvoj krednih plasti na južnem Primorskem in Notranjskem. *Geologija*, 6, pp. 22—145, Ljubljana.
- Stache, G. 1891, Geologische Verhältnisse und Karte der Umgebung von Triest. *Verh. Geol. R.-A.*, 71 p., Wien.
- Timeus, G. 1910, Sui mezzi d'indagine nell'idrologia sotteranea. *Boll. Soc. Adr. Sc. Nat.*, Vol. 25, 2, Trieste.