

820

CONNAISSANCE HYDROGÉOLOGIQUE DES GRANDS AQUIFÈRES
PROFONDS EN MILIEU POREUX ET A DONNÉES PEU NOMBREUSES

MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE
BASÉE SUR LES PARAMÈTRES GÉOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

Développement

de la méthodologie sur l'aquifère multicouche des sables de l'Albien
du bassin parisien

Application :

Aquifère des grès Nubiens du Sinaï et du Néguev

RÉSUMÉ DE LA THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de
Neuchâtel pour obtenir le grade de Docteur ès-Sciences

par

Avraham MELLOUL

Jury: A. BURGER, G. CASTANY, J.-C. FONTES et L. KIRALY

1979

Juin

IMPRIMATUR POUR LA THÈSE

Connaissance hydrogéologique des grands aquifères profonds en milieux poreux et à données peu nombreuses. Méthodologie d'étude sur les bases de paramètres géochimiques et isotopiques.
de Monsieur Avraham Melloul

UNIVERSITÉ DE NEUCHÂTEL

FACULTÉ DES SCIENCES

La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel,
sur le rapport des membres du jury,

Messieurs A. Burger, L. Kiraly, G. Castany
(Paris) et J.-C. Fontes (Paris)

autorise l'impression de la présente thèse sans exprimer
d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 25 juillet 1979

Le doyen :

J.-P. Schaer
J.-P. Schaer

BULLETIN DU CENTRE D'HYDROGEOLOGIE No 3, 1979

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE HYDROGEOLOGIQUE
DES GRANDS AQUIFERES PROFONDS EN MILIEU POREUX,
A DONNEES PEU NOMBREUSES.

Méthodologie d'étude basée sur les paramètres géo-
chimiques et isotopiques. (*)

par Avraham Melloul

INTRODUCTION

La connaissance des grands aquifères profonds, considérés comme unités hydrogéologiques (KIRALY 1978) telle qu'elle est abordée dans le présent travail a, pour objectifs :

1. D'expliquer les phénomènes qui conditionnent la qualité des eaux, la recharge et la réserve.
2. De construire un modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère qui soit représentatif de la réalité.
3. De dégager des critères d'optimisation de l'étude de façon qu'elle soit la moins coûteuse possible, tout en restant efficace.

(*) *Résumé de la Thèse présentée à l'Université de Neuchâtel le 1.6.1979. Un manuscrit original est déposé au Centre d'Hydrogéologie.*

La méthodologie d'étude proposée a été développée sur l'aquifère de l'Albien du Bassin de Paris et mise en application sur l'aquifère des Grès Nubiens du Sinaï et du Neguev.

Cette méthodologie utilise comme outil d'élaboration la méthode des composantes principales pour le traitement des paramètres physiques, chimiques et isotopiques.

L'insuffisance et la répartition inégale des données nous contraint à adopter un certain nombre d'hypothèses de travail dont quelques-unes pourront être vérifiées. Il n'en reste pas moins qu'une partie des résultats et des conclusions émises dans cette étude doivent être considérées avec prudence.

1. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE D'ETUDE

La présentation est schématisée par l'organigramme de la figure 1, dont les différentes étapes se résument comme suit :

1.1. Apports hydrogéologiques des paramètres utilisés

1.1.1. Les paramètres physiques et chimiques :

- La température différencie les eaux proches de la surface et les eaux profondes.
- Le pH et le TAC rapportés à une même température, expriment l'état agressif ou précipitant des eaux.
- Les chlorures sont, par rapport aux autres ions, difficilement précipitables. De ce fait, il peuvent être utilisés comme traceurs des circulations.
- NO_3^- et SO_4^{2-} : indiquent l'existence d'un système ouvert et la présence d'eaux chimiquement polluées.

PLAN D'ETUDE

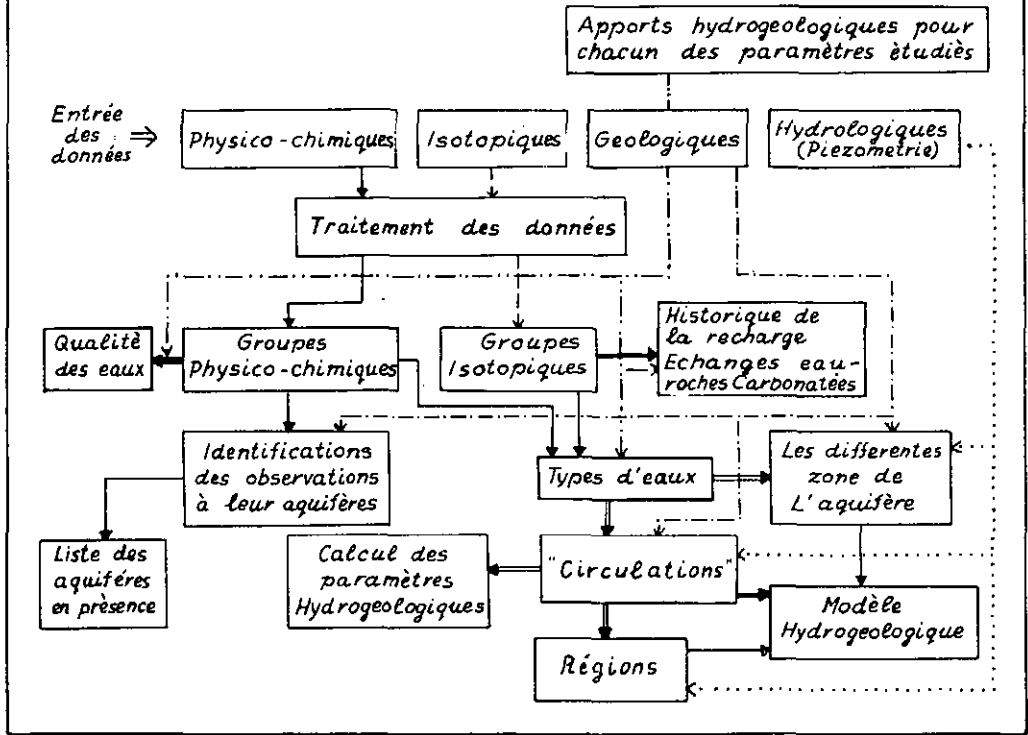


Figure 1

- Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Fe²⁺ (soluble), SiO₂, HCO₃⁻:

renseignent sur la minéralisation acquise aux dépens des roches, les échanges entre la roche-réservoir et l'eau et les échanges de bases entre les argiles et l'eau.

- La conductivité et le résidu sec: expriment le degré de minéralisation des eaux.

Les teneurs en chacun de ces éléments, comparées aux normes requises par les organes nationaux ou internationaux, indiquent la qualité des eaux pour les besoins domestiques, agricoles ou industriels.

1.1.2. Les paramètres isotopiques :

- L'oxygène 18 et le deutérium :

Les concentrations de ces isotopes stables dans l'eau de l'aquifère permettent de distinguer entre les eaux qui appartiennent aux systèmes ouverts ou zones de recharges et celles qui appartiennent aux systèmes fermés ou zones captives, dont l'origine peut être liée à des paléoclimats.

Ils sont donc d'une grande utilité pour l'historique de la recharge, pour la détection de la drainage entre les nappes et pour la délimitation de zones au sein de l'aquifère.

- Le carbone 13 :

Il permet de répondre aux problèmes relatifs aux échanges entre le CO₂ atmosphérique et le CO₂ dissout dans le sol, aux rapports entre l'eau et la roche carbonatée et aux types de végétations dans les zones d'alimentation.

Son emploi est important pour le calcul de l'activité initiale en carbone 14 dans les modèles

isotopiques (FONTES et GARNIER 1977, MOOK 1972, PEARSON and al. 1970).

- Le carbone 14 et le tritium :

Ils donnent l'ordre de grandeur de l'âge moyen des eaux : quelques dizaines d'années pour le tritium à quelques dizaines de milliers d'années pour le Carbone 14.

Ils permettent de différencier les zones qui ont des eaux récentes de celles qui ont des eaux anciennes ou de mélange.

La connaissance de l'âge est notamment importante pour l'estimation des vitesses d'écoulement des eaux souterraines.

En conclusion, les paramètres isotopiques peuvent être utilisés comme facteurs de contrôle dans le cas où le même phénomène hydrogéologique est également expliqué par des paramètres physiques et chimiques.

1.1.3. Les paramètres géologiques

Ils contribuent à la compréhension des processus d'échanges qui existent entre la roche aquifère et l'eau de la nappe et à la délimitation des différentes parties du modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère étudié.

1.1.4. Les paramètres hydrologiques

Si la carte piézométrique de l'aquifère étudié existe, les lignes d'écoulement (perpendiculaires aux équipotentielles) peuvent être utilisées pour vérifier les "circulations" trouvées à l'aide de paramètres physiques, chimiques et isotopiques.

1.2. Traitement des données, formation des groupes

Le traitement des paramètres physiques, chimiques et isotopiques utilise la méthode des composants principales expliquée dans DAVIS (1973).

Cette méthode permet de :

- traiter simultanément un grand nombre de paramètres d'unités différentes et cela, même si le nombre d'échantillons est restreint,
- mettre en évidence les paramètres les plus influents sous la forme des nouveaux axes de coordonnées 1 et 2 qui sont les plus explicatifs de la variation totale des données (exemple : figure 5),
- former des groupes de puits d'observation en fonction des paramètres les plus explicatifs (fig. 5).

La méthode répond à l'objectif 3 défini plus haut (p. 55) en ce sens qu'elle met en évidence les paramètres les plus influents et donc les plus explicatifs de la formation des groupes.

Elle répond également à l'objectif 1, défini plus haut, en ce sens qu'elle permet d'identifier:

- le champ du chimisme de l'aquifère à l'aide des groupes de puits d'observation (ex. figure 5).
- le champ des concentrations en isotopes de l'aquifère à l'aide des groupes de puits d'observation (ex. figure 6) qui conduit à l'explication de l'historique de la recharge et des échanges roches carbonatées-eau de l'aquifère.

1.3. Les types d'eaux et les zones de l'aquifère

Les types d'eaux résultant de la prise en considération simultanée, par analyse statistique, des paramètres physiques, chimiques et isotopiques des eaux composant les groupes définis ci-dessus.

Lorsque ces types d'eaux sont rapportés à leur contexte géologique, ils servent à délimiter les "zones de l'aquifère". Ainsi :

- des eaux souterraines qui ont une forte teneur en ^{14}C et/ou en ^3H ainsi que des concentrations en ^{18}O et ^2H proches de celles des eaux de surface, avec présence de NO_3^- et de SO_4^{2-} peuvent être caractéristiques des zones d'alimentation,
- des eaux souterraines qui ont une faible teneur en ^{14}C , des concentrations en ^{18}O et ^2H différentes de celles des eaux de surface et une minéralisation élevée, peuvent définir des zones où les eaux sont anciennes comme c'est le cas pour les zones d'exutoires d'un aquifère captif,
- des eaux souterraines avec des valeurs isotopiques et chimiques intermédiaires peuvent être attribuées soit à des zones de transition, soit à des zones de mélange.

1.4. Les circulations et les régions

L'évolution d'un même type d'eau, ou d'un type à un ou plusieurs autres types d'eaux, entre la zone d'alimentation et la zone exutoire dans un même aquifère, permet de déduire l'existence d'un faisceau d'écoulement.

Nous définissons celui-ci d'une manière simplifiée comme une circulation propre à cet aquifère. (Celle-ci diffère de celle que l'on considère en hydrodynamique pour désigner l'écoulement d'une molécule d'eau).

- La mise en évidence d'une circulation, à partir de types d'eaux provenant d'aquifères différents, illustre l'existence et l'importance des transferts et des mélanges d'eaux entre ceux-ci.

- La proximité de deux ou plusieurs circulations par leur chimisme et leur situation géographique, conduit à les grouper en une région de l'aquifère.

1.5. Le modèle hydrogéologique conceptuel et le bilan de l'aquifère

A l'aide de la connaissance des éléments définis ci-dessus : zones, formation des écoulements, circulation et région dans l'unité hydrogéologique étudiée, nous construisons alors son modèle et nous estimons son bilan.

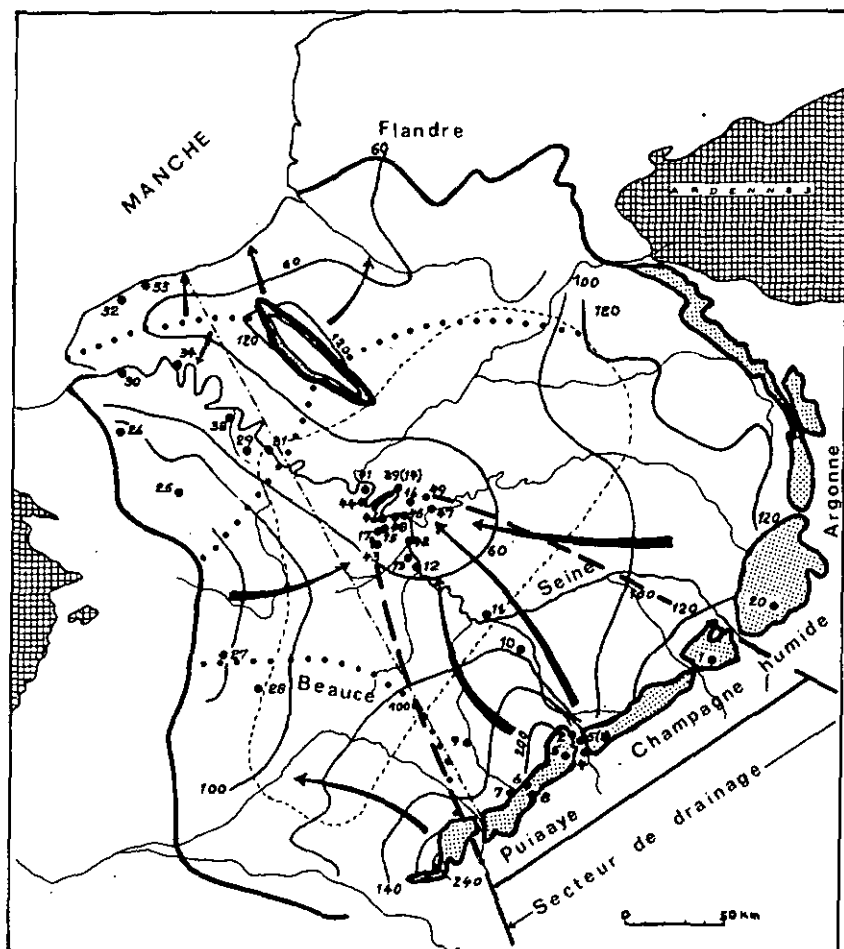
2. DEVELOPPEMENT DE LA METHODE SUR L'AQUIFERE MULTICOUCHE SABLO-GRESEUX DE L'ALBIEN DU BASSIN DE PARIS. (B.P.)

Cet aquifère a fait l'objet d'études par de nombreux auteurs, notamment :

SAROCHI et LEVY-LAMBERT (1966), LAUVERJAT (1966) EVIN et VUILLAUME (1969), VUILLAUME (1971) et CASTANY (1974).

De ce fait les résultats de notre recherche pourront être comparés aux conclusions énoncées par ces auteurs.

La méthodologie que nous avons développée a été appliquée au préalable sur un secteur de drainage du bassin (figures 2, 3 et 4), ayant servi de témoin expérimental. 17 échantillons d'eau ont été prélevés sur le terrain, dans lesquels les paramètres physiques, chimiques et isotopiques mentionnés aux paragraphes 1.1.1. et 1.1.2 ont été mesurés. Ces données ont été traitées par la méthode des composantes principales pour individualiser des groupes chimiques et isotopiques (figures 5 et 6). Ensuite, la détermination des types d'eau (Tableau 1), et des circulations a permis de construire le modèle hydrogéologique



LEGENDE:









-  LIMITE OUEST DE LA FORMATION DE L'ALBIEN
-  AFFLEUREMENTS DE LA FORMATION DU CRETACE INFERIEURE - ALBIEN
-  LIMITE DE PARTAGE DES EAUX SOUTERRAINES
-  LIMITE D'EXTENSION DES FORMATIONS TERTIAIRES
-  LIMITE D'EXTENSION DES MARNES DE BRIENNE ET DES ARGILES DE GAULT
-  PUIITS D'OBSERVATIONS
-  COURBE PIEZOMETRIQUE
-  AXES PRINCIPAUX D'ECOULEMENT SOUTERRAIN

Figure 2 : aquifère de l'Albién du bassin de Paris.

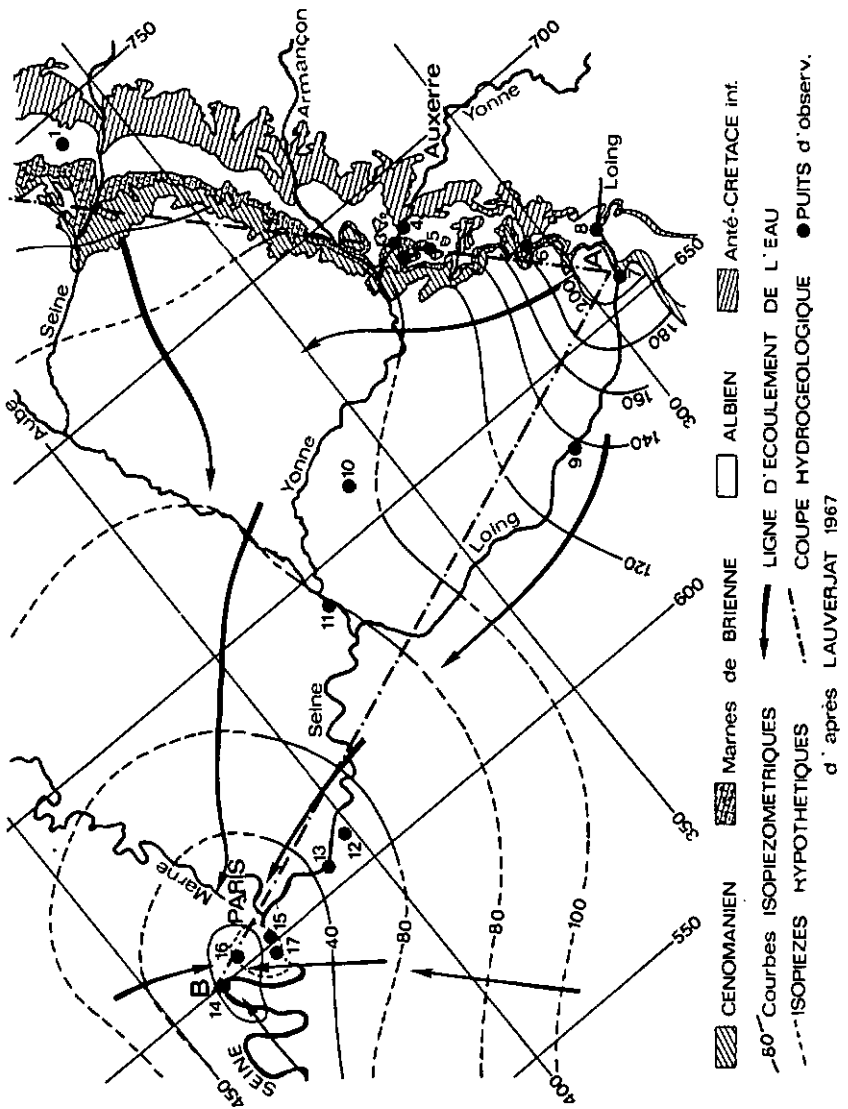


Figure 3 : secteur de drainage.

SECTEUR DE DRAINAGE DU BASSIN DE PARIS

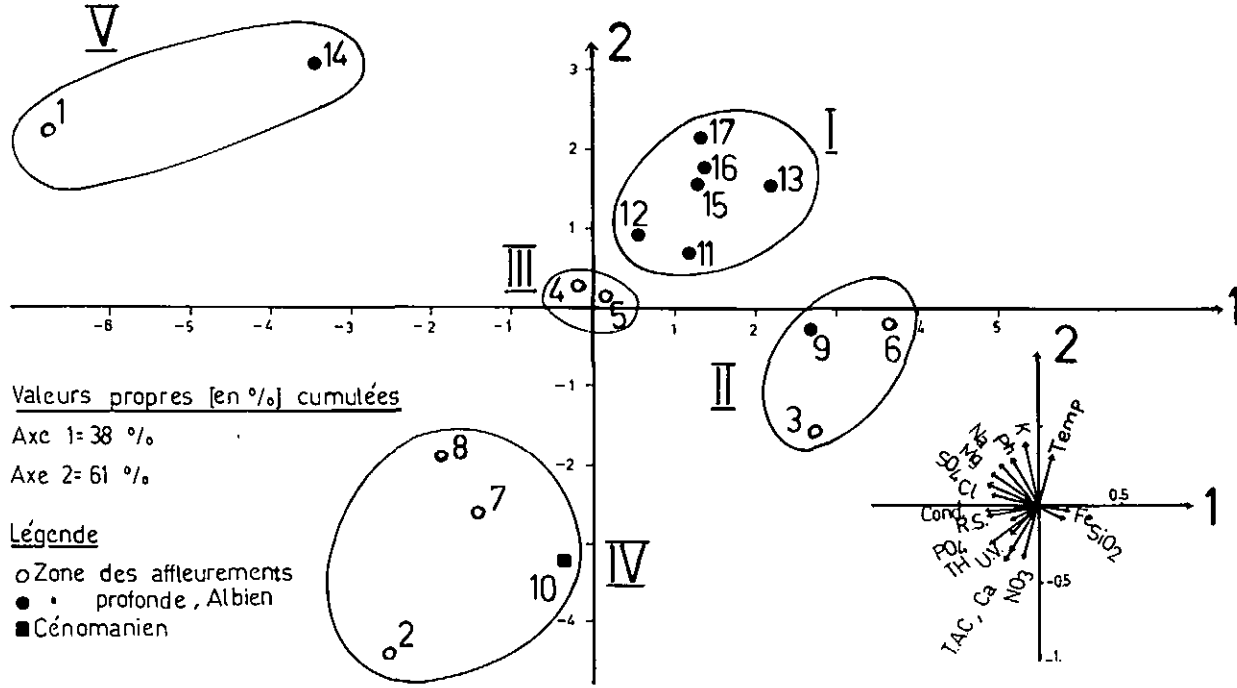


Figure 5 : analyse des composantes physico-chimiques.

Groupes Chimiques	N° du Puits	Les paramètres chimiques (mg/l)													
		TEMP(°C)	Na ⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	RS	NO ₃ ⁻	pH	Th	SO ₄ ²⁻	Fe(μg)	SiO ₂	Cl ⁻	K ⁺	Mg ²⁺
I	11	14.1	14	37	204	189	(1)	7.8	132	2.8	2.12	6.8	5.6	7.0	8.1
	12	34.0	16	42	222	207	(1)	7.5	142	3.2	0.49	7.0	7.9	8.4	7.8
	13	33.5	6.5	26	138	159	(1)	7.7	95	1.0	0.18	7.1	4.5	7.5	5.3
	15	27.0	10	28	120	380	(1)	7.9	96	8.4	0.30	7.1	6.0	8.3	5.8
	16	20.0	18	25.3	162	188	(1)	8.1	90	6.0	1.10	5.8	8.3	9.7	5.9
	17	25.0	22	24	150	160	(1)	7.9	89	9.6	0.20	6.4	9.7	10.8	6.0
	\bar{x}	25.6	14.4	30.3	166	213	(1)	7.8	107	5.1	0.73	6.7	7.0	8.6	6.48
	6	7.0	5.5	6.7	36	76	0	0.1	21	3.0	0.69	0.4	1.7	1.2	1.06
II	3	13.8	4.3	35	108	179	0.6	6.7	96	15.4	5.12	9.6	6.7	1.8	1.9
	6	11.8	3.8	17.6	114	117	0.4	7.1	65	9.2	14.8	7.7	8.1	3.3	3.0
	9	16.7	10.7	36.8	144	145	0.7	7.3	102	4.5	4.9	5.6	7.2	2.7	2.7
	\bar{x}	14.1	6.28	29.8	122	147	0.57	7.03	87.6	9.7	8.27	7.7	7.3	2.6	2.53
	6	2.01	3.1	8.65	15.7	25.3	0.12	0.24	16.2	4.46	4.6	1.55	0.57	0.6	0.41
III	4	13.7	5.3	61.5	216	265	0.9	7.8	272	27	0.90	3.5	10.2	7.4	11.7
	5	12.8	5.1	63.8	186	269	0.95	7.9	204	27.2	0.95	3.8	10.0	7.1	10.3
	\bar{x}	13.25	5.2	62.6	201	267	0.92	7.85	208	27.1	0.92	3.6	10.1	7.2	11.0
	6	0.45	0.1	1.15	15	2	0.01	0.05	4	0.01	0.01	0.2	0.1	0.2	0.7
IV	2	12.65	6.0	138.2	318	401	54.0	7.3	343	298	0.55	5.0	22.0	2.1	3.16
	7	7.6	14.2	106.1	246	362	40.0	7.9	270	21.3	0.18	11.2	31.2	4.8	2.2
	8	12.4	5.7	98.1	342	400	1.0	7.5	365	32.0	1.40	4.4	15.7	2.8	23.0
	10	11.8	10.7	102.2	282	348	60.0	7.2	255	12.2	0.20	5.8	15.9	1.6	2.8
	\bar{x}	11.11	9.15	111.1	297	377.7	38.7	7.5	308	23.82	0.58	6.6	21.2	2.8	7.7
	6	2.05	3.5	158	363	23.2	22.9	0.2	46.7	7.8	0.49	2.7	6.3	1.2	8.7
V	1	13.4	47.0	62.0	186	545	1.2	8.3	300	15.4	1.32	3.5	44.3	9.8	33.3
	14	28.0	42.0	47.5	150	409	(1.0)	7.9	196	9.7	0.20	5.9	60.5	11.7	22.4
	\bar{x}	20.7	44.5	54.75	168	477	1.1	8.1	248	12.5	0.76	4.7	52.4	10.7	27.8
	6	7.3	2.5	7.25	18	68	0	0.2	52	28.5	0.56	1.2	8.1	0.9	5.4

TABLEAU IA : Classification des données chimiques, isotopiques et géologiques du secteur de drainage.

Groupes Chimiques	N° du Puits	Les paramètres isotopiques						Groupes Isotopiques	Aquifères	Types d'eau (T)
		Age (années)		PDB	SMOW					
		Tamers	Fat Geo		C-13‰	O-18‰	D ‰			
I	11	14700	12100	-11.09	-8.47	-56.6	α	SF+SD+SV	1	
	12	36300	31300	-9.3	-8.40	-56.6	α	"		
	13	26500	26300	-13.11	-8.73	-56.7	α	SF		
	15	29100	29400	-12.90	-8.72	-57.1	α	SF+SD+SV		
	16'	16500	15800	-12.35	-8.58	-56.1	α	"		
	17	17100	16300	-12.00	-8.54	-56.3	α	.		
	\bar{x}				-11.92	-8.56	-56.56			
c				1.25	0.12	0.3				
II	3	2300	1400	-15.84	-8.31	-52.3	β	SF+SD	2	
	6			-13.13	-7.69	-49.2	β	SD+SV		
	9	8900	6000	-11.82	-8.40	-54.3	α	SF	3	
	\bar{x}				-13.65	-8.13	-51.93			
	6				1.66	0.3	2.1			
III	4	12400	8100	-10.09	-8.72	-57.6	α	Ba	4	
	5	10300	9800	-11.85	-9.00	-60.1	α	SV		
	\bar{x}				-10.97	-8.86	-58.85			
	6				0.88	0.14	1.25			
IV	2				-6.90	-45.0	β	SF?	5	
	7				-14.57	-8.22	-54.5	β		?
	8	8000	2000	-8.62	-7.60	-49.5	β	?		
	10	600	1100	-12.88	-7.50	-49.4	β	Ce		
	\bar{x}				-12.02	-7.55	-49.6			
	6				2.50	0.46	3.36			
V	1				-5.00	-8.3	-53.4	γ	SV	6
	14	16700	17500	-11.30	-8.5	-57.2	α	SF+SV		
	\bar{x}				-8.15	-8.4	-55.3			
	c				3.15	0.1	1.9			

TABLEAU IB : Classification des données chimiques, isotopiques et géologiques du secteur de drainage.

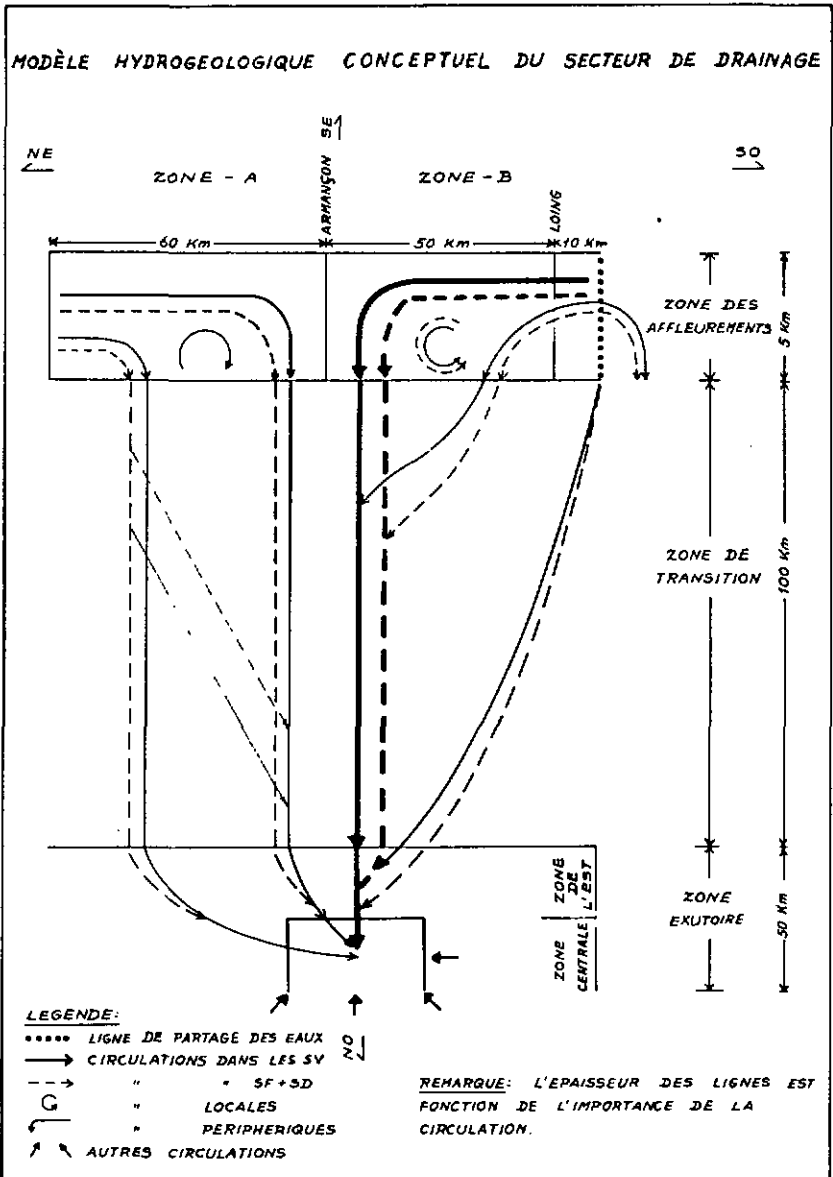


Figure 7

conceptuel du secteur (figure 7).

La généralisation de l'étude à tout le bassin (figure 2) s'est faite à l'aide de l'analyse chimique de 20 échantillons d'eau supplémentaires. Ceux-ci ont été traités selon la même méthode. En outre, les groupes obtenus ont été comparés à ceux du secteur expérimental (figure 8) afin de mettre en évidence les liens existants entre les eaux de ce dernier et celles du reste du bassin. Les nouveaux groupes et types d'eaux trouvés (Tableau 2) ont conduit alors à la construction du modèle hydrogéologique conceptuel de l'ensemble du bassin (figure 9).

3. RESULTATS RELATIFS A L'AQUIFERE DE L'ALBIEN du B.P.

3.1. Résultats relatifs à la qualité des eaux, à la recharge et à la réserve de l'aquifère

Un exemple des résultats obtenus par la méthode des composantes principales est donné par la figure 5:

- Le groupe I, représente des puits de la zone profonde de l'ensemble de l'unité hydrogéologique de l'Albien. Ces eaux sont plus minéralisées que celles du groupe II, caractéristique de l'Albien moyen dans la zone de recharge mais moins minéralisées que celles du groupe III qui appartient à l'aquifère de l'Albien inférieur. Le rapprochement de ces groupes, de même que l'étude de leur paramètres stables (Cl^- , ^{18}O et 2H) nous ont conduit à la conclusion que la minéralisation des eaux du groupe I est formée par le mélange des eaux des groupes II et III. La minéralisation relativement faible fait que les eaux de l'Albien sont en général d'assez bonne qualité.
- Le groupe IV représente des eaux de l'aquifère de la Craie (puits 10) qui sont en général plus riches en nitrates et plus minéralisées et qui ne semblent pas influencer l'aquifère de l'Albien dans la

Les Groupes	Les Puits	Paramètres chimiques (mg/l)											Carbonates			
		TMP (°C)	Resistivité (ohm)	pH	RS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Ca meq/l	Ca meq/l	PDB ‰ (C-13)
XI	41	21.0	4410	7.6	204	26.0	6.3	11.1	9.5	7.0	9.6	144	0.0	1.05	1.48	-16.3
	42	28.9	3375	7.7	-	28.0	7.0	12.5	10.5	8.0	12.0	144	"	1.15	1.35	-13.26
	43	31.4	3590	7.6	172	33.0	6.5	8.0	11.0	9.0	15.0	124	-	1.10	1.10	-10.65
	44	24.2	3980	8.0	147	27.0	8.0	10.0	12.6	6.0	10.0	129	-	1.20	0.94	-14.3
	46	26.7	3770	7.6	176	32.5	9.0	10.0	11.7	9.0	19.0	145	1.0	1.20	1.32	-15.0
	48	26.9	3480	7.1	140	30.0	7.5	11.4	11.3	11.8	10.0	158	0.0	1.20	1.82	-12.2
	\bar{x}	26.5	3667	7.6	167	29.4	7.4	10.5	11.1	8.47	12.0	140.6	0.0	1.15	1.33	-13.61
6	3.3	358	0.26	22	2.6	0.9	1.4	0.96	1.83	3.40	11.2	0	0.05	0.28	1.85	
VI	30	13.1	1425	7.7	384	34.8	7.8	64.7	28.7	20.6	23.5	264	1.7	2.35	2.27	-14.25
	31	16.7	2170	7.9	240	27.0	10.8	41.4	14.0	25.5	18.0	194	0.0	1.70	1.59	-8.25
	33	15.4	1920	7.7	300	40.0	17.0	33.6	14.8	31.2	41.1	198	1.8	1.75	1.71	-11.40
	34	15.8	1500	7.9	352	29.6	16.0	67.7	15.7	85.9	19.0	204	0.0	1.65	1.85	-10.90
	\bar{x}	15.25	1753	7.8	319	32.9	12.9	51.8	18.1	40.8	25.6	215	0.87	1.86	1.85	-11.20
	6	1.32	305	0.1	55	5.0	3.8	14.6	6.1	26	9.5	28	0.8	0.28	0.25	2.12
VII	47	31.6	3060	8.1	336	28.0	8.0	31.0	20.0	17.0	14.5	160	0.0	1.55	1.19	-14.1
	49	34.4	2670	7.9	333	25.0	9.0	41.0	21.5	24.0	23.0	172	"	1.65	1.32	-9.5
	\bar{x}	33	2865	8.0	335	26.5	8.5	36	20.7	20.5	18.7	166	0.0	1.60	1.25	-11.8
	6	1.4	195	0.1	2.5	1.5	0.5	5	0.75	3.5	4.25	6	0	0.05	0.06	2.3
VIII	38	28.0	354	7.9	1845	34.0	13.9	66.5	12.9	56.9	350.7	456.2	1.6	4.4	3.37	-2.9
IX	25	12.0	1850	7.3	328	70.8	4.3	29.6	2.0	49.7	21.5	185.4	23.7	1.55	1.95	-13.17
	26	12.0	1850	8.0	308	100.0	6.3	9.3	1.2	15.3	12.0	314.8	9.5	2.50	2.83	-13.00
	27	15.0	2050	7.9	318	77.6	3.6	14.9	1.1	19.9	11.0	220.0	28.8	1.75	2.06	-9.00
	28	16.0	1630	8.0	388	58.4	3.6	75.1	9.0	20.2	25.0	302.0	35.4	2.50	2.62	-5.70
	\bar{x}	13.75	1845	7.8	335	76.7	4.45	32.2	3.32	26.3	17.57	255.6	24.3	2.10	2.36	-10.21
	6	1.78	148	0.29	31	15.1	1.1	25.6	3.21	13.7	6.0	54	9.5	0.4	0.37	3.1
X	20	17.2	1790	8.0	322	58.0	32.4	7.8	11.0	5.7	38.0	31.8	2.9	2.60	2.82	-9.00
	29	14.0	1900	7.7	302	45.4	11.4	44.0	8.3	22.0	18.0	24.9	12.2	2.10	2.20	-9.85
	32	15.4	2000	7.8	317	54.4	22.3	18.3	8.0	16.3	8.5	29.6	2.0	2.45	2.63	-9.60
	\bar{x}	15.5	1896	7.8	314	52.6	22.0	23.4	9.1	14.7	21.5	28.7	5.7	2.38	2.55	-9.50
	6	1.3	86	0.12	8.5	5.3	8.7	15.2	1.34	6.7	12.7	26.7	4.6	0.2	0.25	0.35

TABLEAU IIA : Classification des données chimiques, isotopiques et géologiques du bassin de Paris.

Les Groupes	Les Puits	Modèles isotopiques (% mod)				C-14 mesures' (% mod)	Age (années)		Profondeur (m)	Aquifères	Types d'eau (T)	
		Tamers	Pearson	Fonleest (car)	Garnes Cm. IAS		Tamers	F. et G. (cor)				
XI	41	53	65	69	72	8.9 ± 0.2	14700	16900	600	SF+SD+SV	1	
	42	52	53	53	54	8.5 ± 0.1	14900	15100	560	SF+SD		
	43	52	43	39	38	7.8 ± 0.8	15600	13300	655	SF+SD+SV		
	44	51	57	64	60	7.3 ± 1.3	16000	17900	700	SF		
	46	52	60	64	64	3.7 ± 0.4	21800	23500	500	S		
	48	57	49	43	45	3.2 ± 0.5	23800	21400	650	S+Ba!		
	\bar{x}	52.8	54.5	55.3	55.5	6.56	17800	1800	610			
	G	2.0	7.2	11.26	11.4	2.26	3500	3500	66			
VI	30	52	57	62	60	8.6 ± 0.0	2800	4200	55	SF	9	
	31	51	33	25	23	21.7 ± 0.6	7000	1100	105	SF+SD	8	
	33	52	46	43	42	16.0 ± 2.0	9700	8100	175	SF	9	
	34	51	44	38	39	12.4 ± 0.7	11600	9200	135	SF		
		\bar{x}	51.5	45	42	47	21.7	7800	5700	117		
		G	0.5	8.5	13.2	13.1	9.3	3300	3200	43		
VII	47	51	56	62	59	3.5 ± 0.5	22100	23700	765	S	1	
	49	51	38	35	33	1.0 ± 0.4	32500	29300	835	S		
		\bar{x}	51	47	48.5	46	2.25	27300	26500	800		
		G	0	9	13.5	13	1.25	5100	2800	35		
VIII	38	57	-12	-37	-40	14 ± 0.4	29700	!	!	Ce+S+Ja	10	
IX	25	56	52	51	51	7.5 ± 1.0	-2400	-3200	250	Ra	5	
	26	51	52	51	52	6.5 ± 0.8	-2000	-2000	115	SF+K		
	27	51	36	26	27	5.0 ± 0.8	-100	-5700	185	S		
	28	51	29	71	71	4.0 ± 0.8	1800	4500	255	S		
		\bar{x}	52.2	41	49.7	50.2	5.84	-700	-1600	201		
		G	2.2	12.4	15.5	15.6	13.0	1700	3800	57		
X	20	51	36	27	28	17.9 ± 0.9	8600	5200	100	S	6	
	29	52	39	33	32	37.5 ± 0.8	2700	-1000	275	SF	5	
	32	52	38	31	31	15.9 ± 0.4	9700	5500	225	Ce+S	8	
		\bar{x}	51.7	37.7	30.3	30.3	23.7	7000	3200	200		
		G	0.47	1.24	2.49	1.70	9.7	3100	3000	73		

TABLEAU IIB : Classification des données chimiques, isotopiques et géologiques du bassin de Paris.

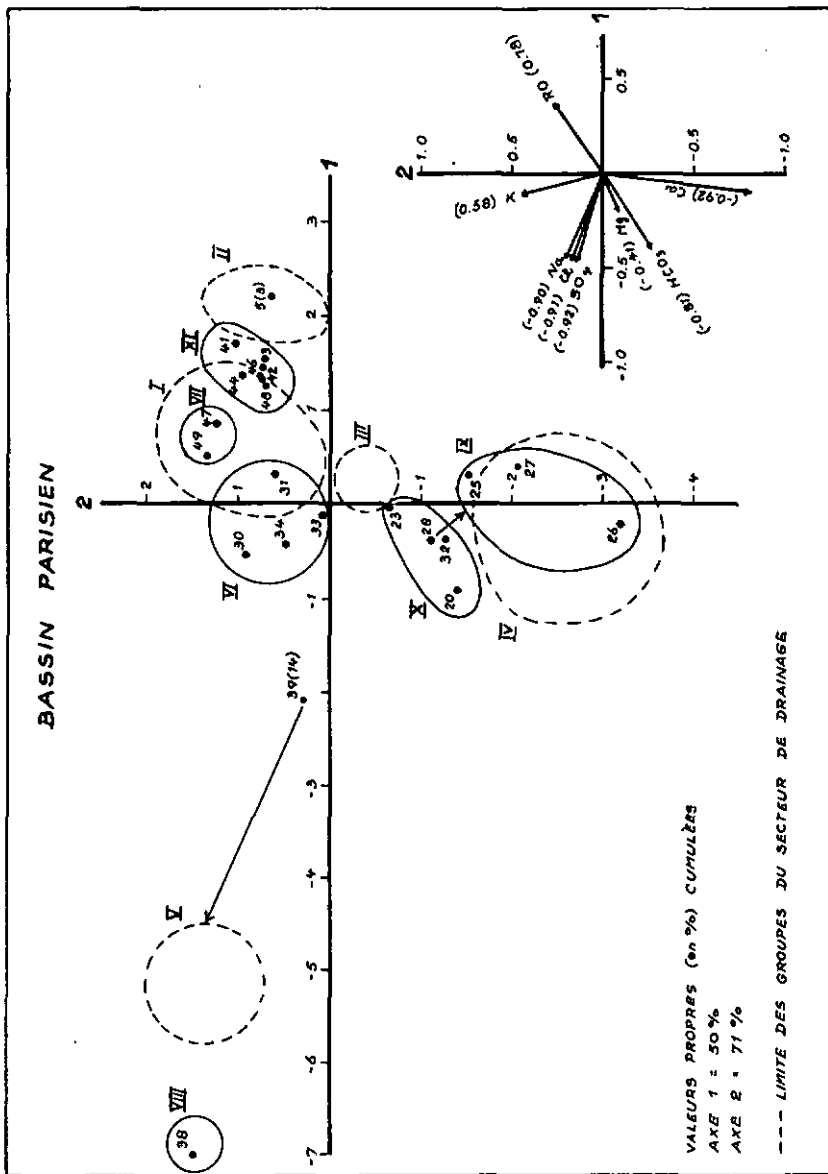
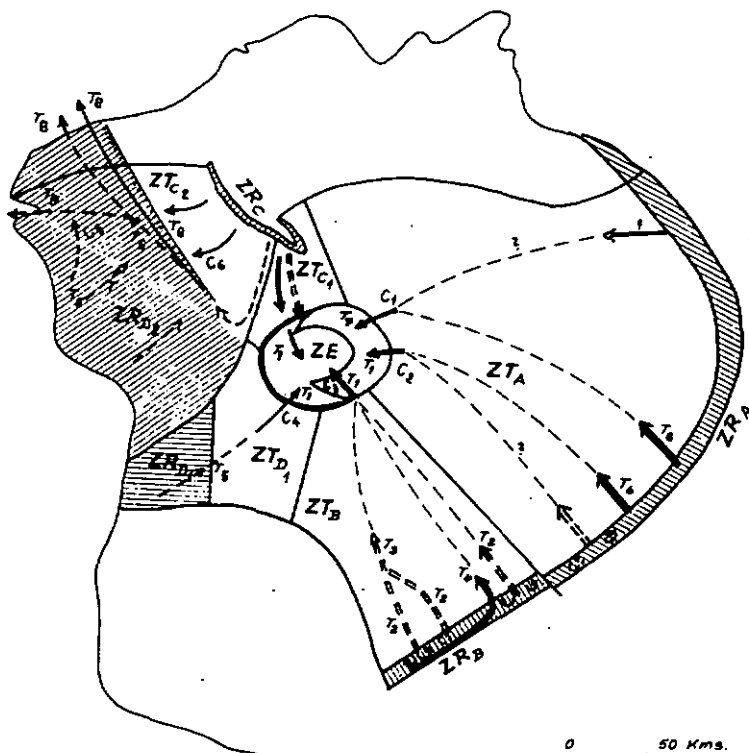


Figure 8 : analyse comparative des composantes physico-chimiques.

MODELE HYDROGEOLOGIQUE DE L'ALBIEN DU B.P.



0 50 Kms.

LEGENDE:



ZONE DE RECHARGE



" TRANSITOIRE



" EXUTOIRE



CIRCULATIONS DANS LES SD+SE



" " " SV



" " LOCALES



FAILLE



LIMITE ENTRE LES REGIONS



A REGION DE L'EST ET DU NORD-EST



B " DU SUD-EST



C " " PAYS DE BRAY



D " DE L'OUEST ET DU SUD-OUEST



T₁₋₁₀ TYPE D'EAU

Figure 9

région du secteur expérimental.

- Le groupe V se distingue très clairement des groupes précédemment cités de par sa minéralisation plus élevée. Les eaux seraient caractéristiques de la région B. du bassin (voir figures 7 et 9).

La figure 8 montre que les groupes VI, VII et XI sont assez proches du groupe I, donc représentatifs des eaux de la zone profonde.

- Le groupe X et plus spécifiquement le groupe IX, apparaissent être très proches du groupe IV; en effet, l'eau de ceux-ci est très influencée par l'aquifère de la Craie.

- Le groupe VIII, le plus minéralisé de tous, se situe au delà du groupe V du secteur de drainage. L'échantillon de ce groupe semble individualiser une eau stagnante.

La figure 6 qui représente le traitement des données isotopiques, fait apparaître dans le secteur expérimental, les groupes isotopiques suivants :

- Le groupe α est formé surtout par des échantillons représentatifs de la zone profonde dont les eaux anciennes sembleraient être originaires d'une époque paléoclimatique plus froide. La faible tendance de ces eaux à être enrichies en ^{13}C indique un contact plus long avec la roche.

Les puits 4 et 5, qui font aussi partie de ce groupe bien qu'appartenant à la zone des affleurements, nous conduisent à admettre l'existence d'eaux anciennes que nous expliquerons ultérieurement par l'existence de "circulations périphériques" (parag. 3.2.1.)

- Le groupe β peut être assimilé à des eaux récentes. Pour quelques uns de ses puits la recharge est actuelle (présence de tritium). La forte dispersion des données est caractéristique des influences du milieu

extérieur sur un système ouvert.

- Le groupe γ , à cause de sa forte teneur en ^{13}C , indique un échange intense avec des roches d'origines carbonatées.

A cause de l'insuffisance des données, il n'a pas été possible de généraliser ce traitement à tout le bassin.

La méthode des composantes principales a été appliquée aussi aux rapports chimiques caractéristiques, ce qui a conduit à mettre en évidence l'existence d'échange de bases entre les permutites et l'eau de l'aquifère dans la zone profonde.

3.2. Le modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère de l'Albien

3.2.1. Description du modèle :

La détermination de 10 types d'eaux dans le bassin, donnés par les Tableaux 1 et 2 et la figure 9, ont permis de délimiter dans le bassin :

les zones d'alimentation ZR

les zones de transition ZT

les zones d'exutoire ZE

ainsi que les circulations C1 à C6

et les régions A,B,C et D

C'est sur la base de ces nouvelles connaissances que nous avons construit le modèle hydrogéologique conceptuel représenté par la figure 9 et que nous décrivons sommairement comme suit :

- Les zones de recharge sont représentées dans les régions A,B, et C, par les affleurements de l'aquifère de l'Albien. Dans la région D, il n'y a pas d'affleurements de l'Albien et pas de couche imperméable (Marnes de Briennes et Argiles du Gault). De ce fait la recharge s'y fait également à partir de l'a-

quifère de la Craie.

Dans la région B, (partie du secteur de drainage expérimental) apparaissent différentes circulations:

- des circulations qui peuvent être formées d'eaux relativement anciennes (autour de 10.000 ans) et que nous définissons comme des circulations périphériques, allant du S-E, en Puisaye, vers le N-W avant de se diriger vers le centre du bassin.
- des circulations plus courtes ou locales (systèmes locaux selon TOTH -1963) alimentant directement l'aquifère de l'Albien moyen.

Dans cette même région B, il semble que l'aquifère de l'Albien inférieur soit séparé de celui de l'Albien moyen, lui-même séparé de l'aquifère de la Craie.

Une telle disposition, mise en évidence par la chimie et les isotopes, n'est pas en accord complet avec les constatations de VUILLAUME (1971) et PANETIER (1969) qui considèrent que l'Albien y est aussi alimenté par l'aquifère de la Craie.

- Les zones de transition constituent les zones de passage entre les zones de recharge et les zones d'exutoire des différentes circulations. Elles sont, en général, pauvres en données. Il semblerait cependant que dans les régions A, B et C, cette zone soit captive, alors que dans la région D, elle se trouve dans un système ouvert.

- Les zones d'exutoire : on remarque 2 types d'exutoires:

- La zone exutoire artificielle du centre du bassin, due au pompage intensif et qui se subdivise en deux parties :

La partie Est : (régions A et B) dans laquelle les écoulements semblent confinés et moins influencés que dans la partie Ouest.

La partie Ouest : où les mélanges d'eaux des circulations de différentes régions sont plus marqués.

-- La zone exutoire naturelle de la Basse-Seine :

La décharge semble, dans ce cas, se faire parallèlement au cours de la Basse-Seine ou, plus au N, vers la Manche, à travers des failles.

3.2.2. Paramètres hydrogéologiques

La reconnaissance des circulations a permis également d'estimer que les vitesses d'écoulement effectives se situent entre 3 et 7 m/an, les perméabilités du milieu aquifère aux environs de 10^{-5} m/sec. La recharge annuelle atteint l'ordre de grandeur de 10 millions de m^3 /an et la réserve utile, calculée pour l'aquifère de l'Albien ayant pour exutoire la région autour de Paris, de $258 \cdot 10^9 m^3$.

3.2.3. Remarques : En plus des objectifs fixés, nous avons aussi constaté les faits suivants :

- La minéralisation augmente dans le sens de l'écoulement (Evolution du type d'eau T2 à T3), mais son changement est plus marqué en cas de mélanges d'eau de différents aquifères (T1 obtenu par mélange de T3 et T4) comme cela est indiqué par la figure 9.
- Les paramètres physiques, chimiques et isotopiques peuvent être considérés comme des facteurs de contrôle pour le cas où les circulations trouvées à l'aide de ces paramètres coïncident avec les lignes d'écoulements des cartes équipotentielles.

Dans ce cas, on peut alors considérer les lignes isopièzes comme représentatives d'un seul et même horizon aquifère.

- Les paramètres isotopiques, par rapport aux paramètres physico-chimiques, peuvent être considérés réciproquement :

- comme facteurs de contrôle, si un même phénomène hydrogéologique peut être expliqué à la fois par ces deux groupes de paramètres. Cela est par exemple le cas pour les eaux de la zone profonde qui montrent une appartenance à un long écoulement, par les échanges entre roches et eaux plus intenses, les températures élevées, la minéralisation élevée et le manque de nitrates. Cette appartenance est également confirmée par les facteurs isotopiques: faibles teneurs en ^{14}C , en ^2H et en ^{18}O .
- comme facteur de complémentarité, si un même phénomène hydrogéologique ne peut être expliqué qu'avec l'utilisation de ces 2 types de paramètres. Cela est par exemple le cas du schéma des écoulements dans la zone des affleurements de la région B.

3.3. Résultats relatifs aux critères d'optimisation de la recherche

- Le traitement des données par la méthode des composantes principales a permis de mettre en évidence des facteurs préférentiels tels que les paramètres de terrain suivant: la température, le pH, le T.A.C. et la conductibilité électrique. Ils apparaissent comme suffisamment explicatifs pour la formation des groupes. Remarquons ici que :
- L'utilisation d'un nombre maximum d'échantillons dotés d'une faible série de paramètres ne répond qu'à des questions spécifiques aux variables choisies. Par contre, un nombre maximum de paramètres, même avec un nombre restreint d'échantillons, répond à un éventail plus large de questions relatives à la nappe étudiée.

Cette conclusion est illustrée par le fait que, dans le présent travail, nous avons essayé de répondre à la fois aux problèmes du choix des paramètres, de la qualité des eaux, de l'historique de la recharge et des mécanismes d'écoulements. Comparativement, dans

les études antérieures, le nombre d'observations est plus élevé, mais la série des paramètres est moins étendue. Les études ont alors une signification spécialisée sur tel ou tel paramètres et leur conclusion aussi.

- Lorsque le lien qui existe entre un certain nombre de puits d'observations dans un même espace aquifère est connu, par leur groupe ou leur type d'eau, il devient alors possible de n'utiliser qu'un nombre restreint de puits sans nuire à l'efficacité de la recherche. Cette constatation est importante dans les cas où, pour des raisons diverses, des restrictions économiques ou techniques sont imposées.
- La mesure d'un plus grand nombre de paramètres, dans un même puits est moins onéreuse que le forage de nouveaux puits. De ce fait, et pour les raisons citées ci-dessus, la démarche proposée conduit à une réduction importante des coûts de recherche.

4. APPLICATION

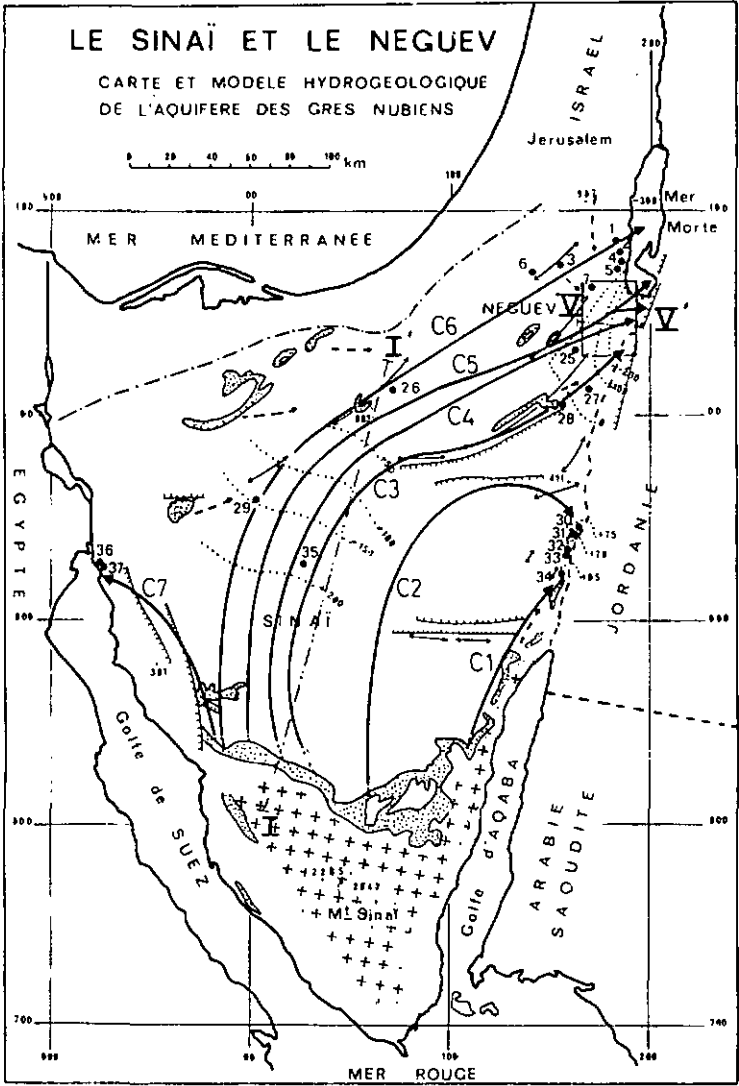
AQUIFERE DES GRES NUBIENS DU SINAI ET DU NEGUEV

4.1. Généralités

Notre recherche étant surtout dirigée vers son utilisation en régions arides, la méthodologie a été appliquée à l'aquifère des grès Nubiens du Sinai et du Neguev représenté par les figures 10,11,12 et 13.

37 échantillons d'eau dont l'aquifère est supposé connu ont été utilisés.

Les paramètres pris en considération sont : les ions majeurs, la température, le pH, le résidu sec, la silice, la dureté totale, l'oxygène 18, le deutérium, la profondeur du puits, l'épaisseur de la nappe et le débit spécifique. Comme cette collection de paramètres n'est pas complète pour tous les échantillons,



- Légende :
- Puits d'observation.
 - Limite Nord de l'aquifère.
 - ▨ Grès Nubiens.
 - ++ Socle cristallin. (Précamb.)
 - ||||| Failles
 - ↔ Axe anticlinal.
 - 2134 Altitude.
 - |—|—| Coupe hydrogéologique.
 - ⋯ Isopièzes hypothétiques.
 - ↻ Circulations
 - > Recharges.
 - Région agrandie dans la figure 12.

Figure 10 : carte hydrogéologique du Sinaï et du Neguev.

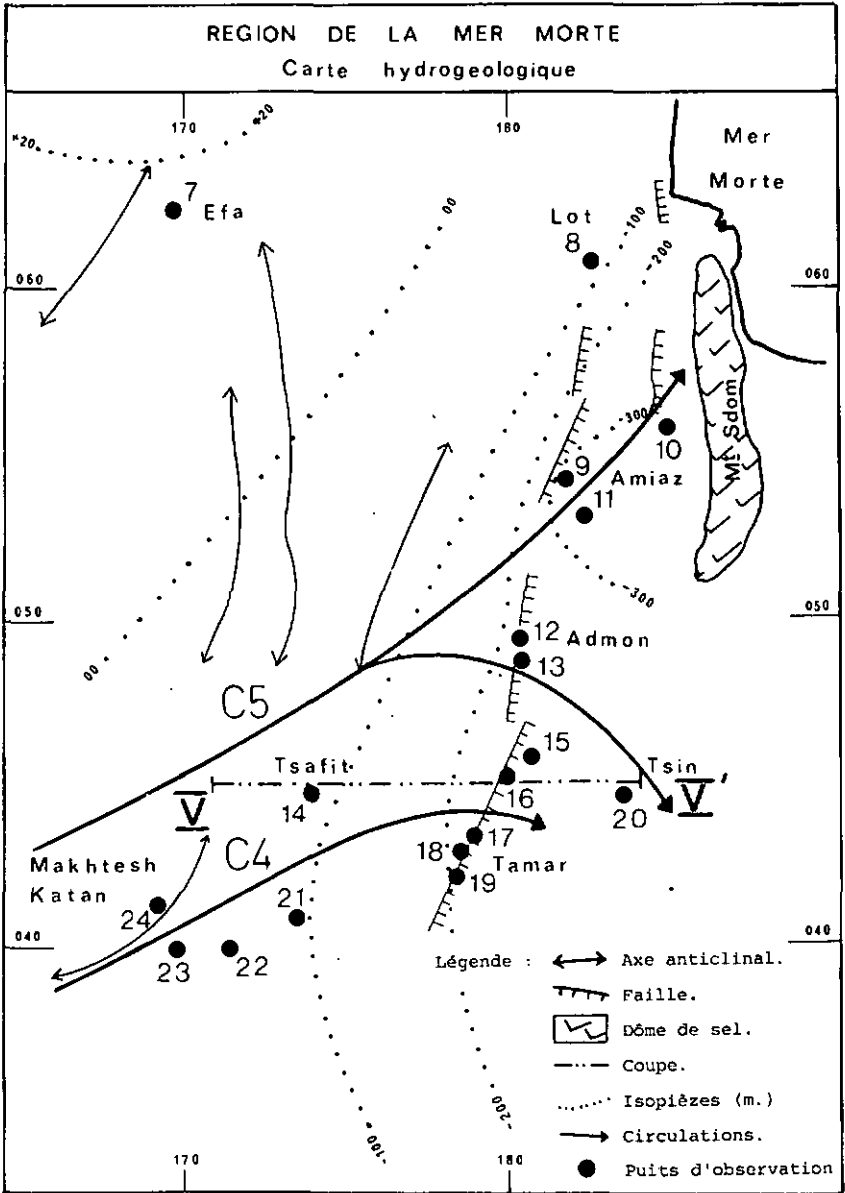


Figure 12 : région de la mer morte.

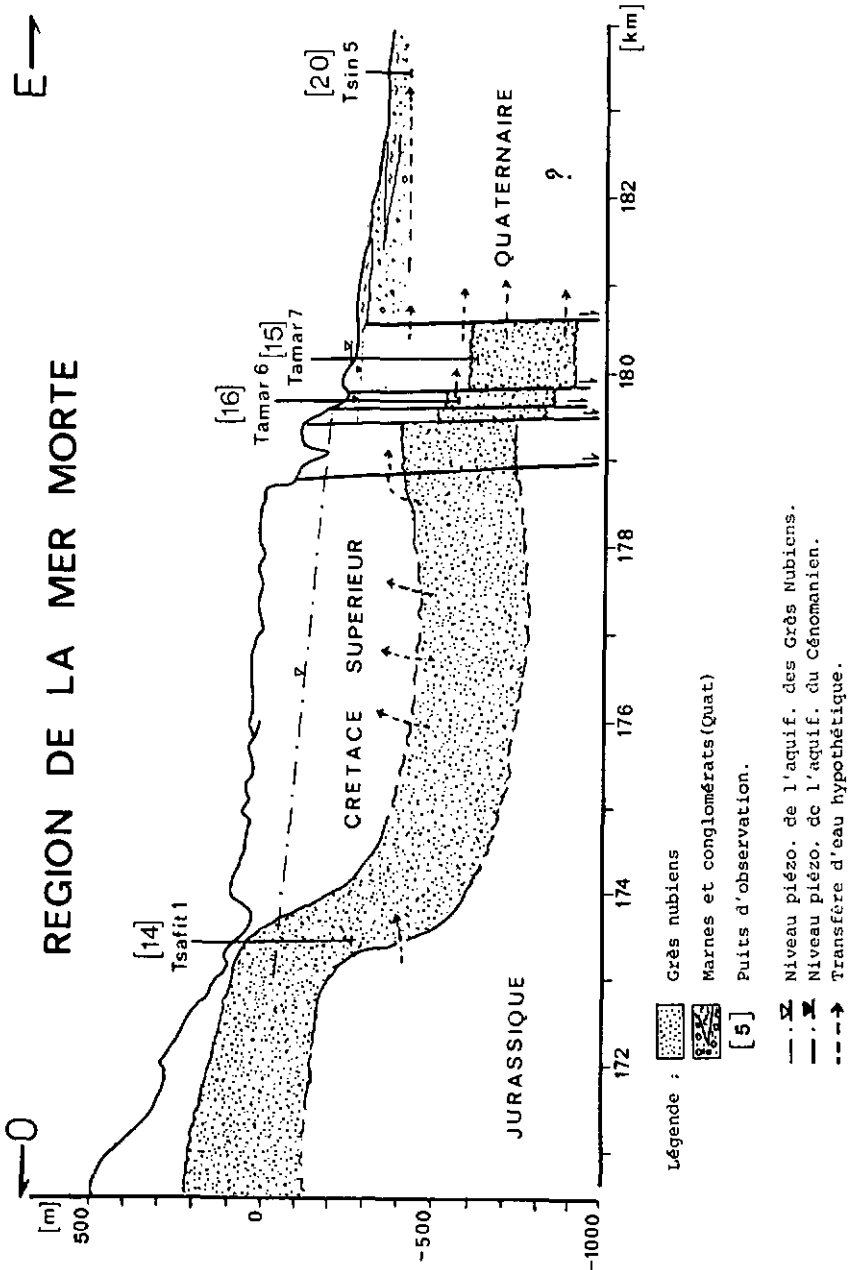


Figure 13 : section V-V' , coupe hydrogéologique (d'après ROSENTHAL and al. 1977)

certains des traitements de données par les composantes principales ne reposent que sur un nombre faible de puits d'observations.

En outre, le manque de données, surtout dans le Sud du Sinaï, nous contraint à admettre plusieurs hypothèses comme bases de travail.

Malgré toutes ces restrictions, l'application de la méthode, par la formation de groupes (figures 14 et 15), la détermination des types d'eaux et la mise en évidence des circulations (Tableau 3), aboutit à la construction du modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère (figure 10).

4.2. Les résultats de l'étude

4.2.1. Résultats similaires à ceux obtenus dans les travaux antérieurs :

Les résultats obtenus par notre démarche coïncident avec les travaux de : ISSAR et al., (1972), GAT et ISSAR, (1974), ROSENTHAL et al., (1978) et LEVY et GALAI, (1978), dans les domaines suivants:

- la recharge de la nappe se fait surtout à partir des affleurements du Sud du Sinaï (figure 10).
L'essentiel de la réserve aquifère proviendrait d'eaux de précipitations des époques paléoclimatiques plus froides qu'aujourd'hui. Un apport complémentaire d'eaux anciennes et modernes se ferait à partir des affleurements du Jurassique, des Grès Nubiens et du Cénomaniens du Nord du Sinaï et du Negev (figure 10).
- La décharge de la nappe se fait dans la région de la Mer Morte et plus généralement le long de la dépression du Jourdain et du Golfe de Suez (figure 10)
- La présence de failles (figures 12 et 13) et de changements lithologiques favorisent le transfert

Figure 14 : analyse des composantes physico-chimiques.

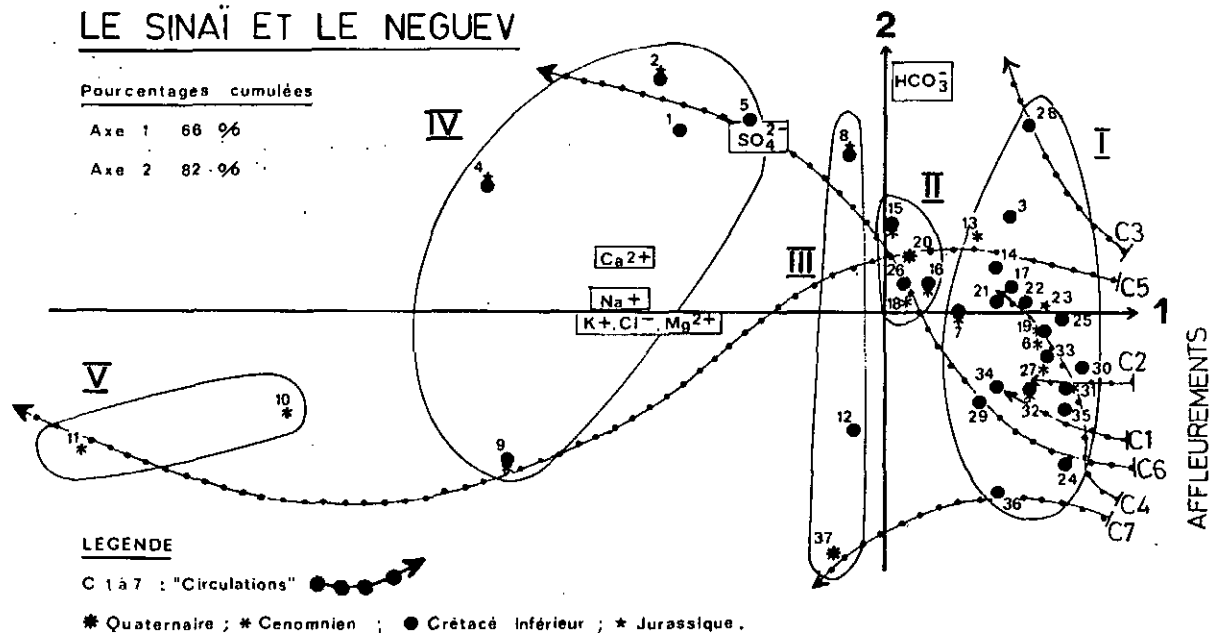


Figure 15 : analyse des paramètres d'exploitation.

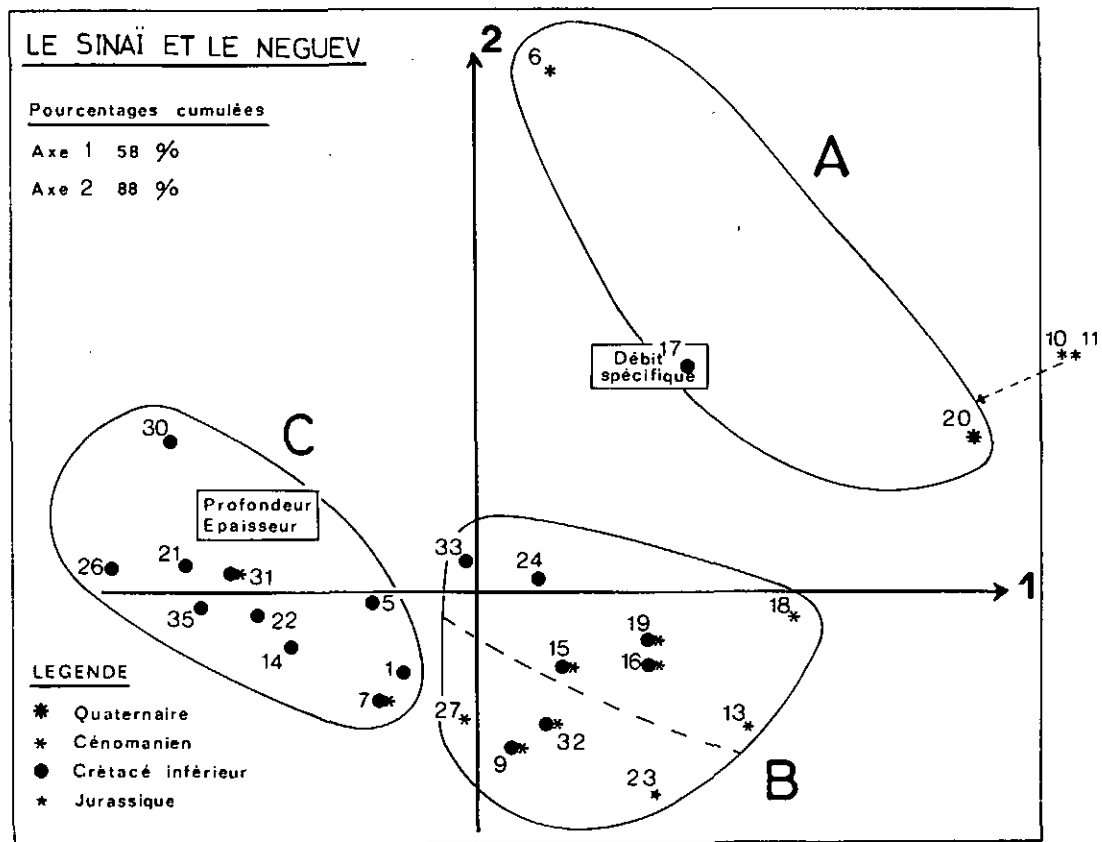


Tableau III

GROUPES CHIMIQUES

No	S.G	OBSERVATIONS	SOMME DES CATIONS
I	A	24, 36.	$21 < \Sigma^+ < 50$
	B	27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35.	
	C	6, 7, 17, 19, 21, 22, 23, 25.	
	D	3, 13, 14, 28.	
II	D	15, 16, 18, 20, 26.	$50 < \Sigma^+ < 65$
III	A	37.	$72 < \Sigma^+ < 83$
	B	12.	
	D	8.	
IV	D	9.	$98 < \Sigma^+ < 160$
	E	1, 2, 4, 5.	
V	C	10.	$212 < \Sigma^+ < 291$
	D	11.	

GROUPES ISOTOPIQUES

No.	OBSERVATIONS	TENEURS EN ^{18}O et ^2H
a	8, 21, 26, 29, 33, 35..	-Teneurs les plus faibles en ^{18}O et en ^2H -Localisés près de la ligne caract. des eaux anciennes.
B	10, 11, 16, 27, 31.	-Localisés au-dessous de la droite caractéristique des eaux anciennes.
Y	2, 12, 13, 15, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 34.	-Localisés entre les droites caract. des eaux de précipitations actuelles et des eaux anciennes de la région.

TYPES D'EAUX (T)

No.	COMPOSANTES	OBSERVATIONS
T ₁	(I+II) α	21, 26, 29, 33, 35.
T ₂	(I+II) β	16, 27, 31.
T ₃	(I+II) γ	13, 15, 17, 18, 20, 23, 24, 25, 30.
T ₄	(III+IV+V) α	8
T ₅	(III+V+VI) β	10, 11.
T ₆	(III+V+VI) γ	2, 12.

CIRCULATIONS (C)

No.	COMPOSANTES	OBSERVATIONS
C ₁	AF ₁ → T ₃ → DJ	34.
C ₂	AF ₂ → 30 → T ₂ → 32 → T ₁ → DJ	30, 31, 32, 33.
C ₃	AF ₃ → 28 → DJ	28.
C ₄	AF ₄ → T ₁ → T ₃ → T ₄ → 22 → T ₁ → T ₉ → T ₃ → DJ	35, 25, 24, 23, 22, 21, 19, 17.
C ₅	AF ₅ → T ₄ → T ₂ → T ₃ → T ₆ → DJ; 9 → T ₅ → DJ	14, 18, 16, 15, 13, 12, 20; 9, 10, 11.
C ₆	AF ₆ → T ₁ → 3 → 7 → 4 → 5 → 8 → T ₆ → DJ	29, 26, 3, 7, 1, 2, 5, 4, 8.
C ₇	AF ₇ → 36 → 37 → GS	36, 37.

DJ : dépression du Jourdain
AF : affleurements
GS : golfe de Suez

d'eaux entre différents aquifères.

- La minéralisation des eaux est très influencée par la dissolution de roches carbonatées, chlorurées et sulfatées et/ou par la pollution à partir d'eaux marines piégées.
- La vitesse d'écoulement effective est d'environ 5 m /an, le coefficient de perméabilité du milieu aquifère est estimé à environ 10^{-4} m /s et la réserve totale à $300 \cdot 10^9$ m³.

4.2.2. Les nouveaux résultats

La méthode d'étude a apporté de nouvelles connaissances sur :

- Les différents groupes chimiques d'eaux qui apparaissent dans le Sinaï et le Neguev comme cela est représenté à la figure 14 : on y remarque généralement que les eaux du Sinaï se trouvent dans les groupes les moins minéralisés : I et II.
- L'interprétation des rapports chimiques caractéristiques des ions majeurs, de même que l'étude des formules ioniques, nous a conduit à mettre en évidence des eaux riches en sulfate (qui proviendraient de l'aquifère gypseux du Jurassique dans le Sinaï et la zone exutoire de la Mer Morte), en chlorures (dûs à l'évaporation et à la proximité de la région de la Mer Morte et qui arriveraient par l'aquifère du Cénomanién) ainsi que des eaux riches en sodium et sulfates (à cause de la présence de couches marneuses) dans le Sinaï.
L'écoulement de ces eaux d'un aquifère à l'autre est favorisé par la présence des failles (figure 13) et des changements lithologiques mentionnés plus haut.
- La formation de groupes de puits basés sur les paramètres d'exploitation , comme cela est indiqué

sur la figure 15. Le groupe A et la partie supérieure du groupe B représentent, de par leur débit spécifique élevé, leur profondeur et leur épaisseur de nappe, quelques caractéristiques d'un aquifère bien développé et productif. Mis à part les puits 17, 24 et 33 qui appartiennent à l'aquifère des Grès Nubiens, les autres puits de cet aquifère ne montrent pas d'aussi grandes transmissivités que celles du Cénomancien.

- La détermination des 6 types d'eaux donnés au tableau 3, fait apparaître des eaux à faible minéralisation (T1 à T3) et à forte minéralisation (T4 à T6). Ces types d'eaux seraient dus à des précipitations d'une époque paléoclimatique plus froide qu'aujourd'hui (T1 et T4), à une évaporation affectant des eaux anciennes (T2 et T5), et à des mélanges d'eaux anciennes et modernes (T3 et T6).

- La mise en évidence des circulations est obtenue à partir des liens évolutifs qui existent entre certains types d'eaux (Tableau 3). Ces circulations montrent un parallélisme avec les lignes d'écoulement obtenues à partir de la carte piézométrique hypothétique (figure 10). Elles se distinguent les unes des autres par une différence de minéralisation. Cette différence est cependant plus élevée le long de chaque circulation.

- Le modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère a été construit sur la base de ces nouvelles connaissances (figure 10).

5. CRITIQUE METHODOLOGIQUE

Notre étude a montré que, malgré le nombre restreint d'échantillons d'eau à disposition, la connaissance hydrogéologique des aquifères étudiés est possible. La méthode proposée peut conduire à une

réduction des frais d'investigation.

L'insuffisance des informations est compensée par le fait que la convergence, dans l'interprétation des résultats de plusieurs paramètres qui expliquent un même phénomène hydrologique, diminue l'influence des imprécisions de mesures et du petit nombre d'échantillons.

La méthode d'étude a rendu possible mais pas toujours sûre l'explication des schémas de circulation et des limites des zones d'alimentation et de transition, dans le cas de données insuffisantes et d'hypothèses parfois non vérifiées. Cela nous contraint à considérer comme provisoires certains des résultats.

Cette étude serait plus assurée et les conclusions plus satisfaisantes, si les puits d'observation étaient répartis d'une manière plus homogène, si la série de paramètres mesurés était plus complète et si les données étaient plus sûres.

6. DEBOUCHES DE LA RECHERCHE

Cette méthode peut s'appliquer d'abord aux aquifères similaires à ceux que nous avons étudiés, par exemple : La Nappe du Continental Intercalaire du Sahara, la Nappe du Maestrichtien du Sénégal, ou la Nappe du Pliocène Supérieur du Tchad. Une étude plus approfondie de cette méthodologie permettra d'étendre également son utilisation aux aquifères en milieu fissurés et carbonatés.

Remerciements

Mes remerciements les plus sincères et toute ma reconnaissance vont au Professeur A. Burger ainsi qu'à toutes les personnes et les institutions qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'élaboration de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- CASTANY, G. et al. (1974), Les bassins de la Seine et et des cours d'eau Normands. Ressources d'eau et données hydrologiques. Vol.I, No 4 : 15 - 156.
- DAVIS J.C., (1973) Statistics and data Analysis in Geology. Kansas Geological Survey.
- EVIN, J., VUILLAUME, Y., (1969) Etude par le radiocarbone de la nappe captive de l'Albien du bassin de Paris. Isotope Hydrology 1970 (Congrès de Vienne) : 315 - 331.
- FONTES, J.C., and GARNIER, J.M., (1977) Determination of the initial ^{14}C Activity of the total dissolved Carbon Age estimation of water of confined aquifers. Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire de Géologie dynamique Paris : 14 p.
- GAT, J.R., and ISSAR, A., (1974) Desert isotope hydrology water sources of the Sinai desert. Geochimica and Cosmochimica acta 1974 vol. 38 : 1117 - 1138.
- ISSAR, A., and al. (1972) On the ancient water of the upper Nubian Sandstone aquifer in Central Sinai and Southern Israël. Journal of hydrology No 17: 353-374.
- KIRALY, L., (1978) La notion d'unité hydrologique essai de définition. Bul.Centre d'Hydrogéologie No 2: 83 - 221.
- LAUVERJAT, J., (1966) Contribution à l'étude géologique et hydrologique de l'Albien dans le Centre du bassin de Paris. Université de Paris VI. Thèse 3ème cycle 180 p.
- LEVI et GALAI, A., (1978) Les grès Nubiens du Crétacé inférieur comme aquifère du Sinai et du Neguev (en hébreu) 20 p.
- MOOK, W.G., (1972) On the reconstruction of the initial ^{14}C contents of G.W. from Chemical

- and isotopic composition 8th int.cong.
radiocarbon dating. Wellington New.
Zeeland : 342 - 352.
- PANETIER, J.M., (1969) Processus d'alimentation de la
nappe captive de l'Albien en Puisaye. Me-
moires du B.R.G.M. (avril) : 583 - 592.
- PEARSON and al. (1970) Sources of dissolved carbona-
tes species in G.W. and their effects on
 ^{14}C dating. Isotope hydrology (Vienne)
271 - 285.
- ROSENTHAL, and al. (1978) Hydrologie de la formation
de Kurnub dans la région de la mer morte
Serv. hydr.Jerusalem (en hébreu): 30 p.
- SAROCHI, C., LEVY-LAMBERT, H, (1966) La nappe aquifè-
re de l'Albien dans le bassin de Paris.
B.R.G.M. No 11 : 33 - 56.
- TOTH, T., (1963) A theroretical analysis of G.W.flow
in small drainage basins. Journal of géol.
vol. 68 No 16 : 4795 - 4811.
- VUILLAUME, Y., (1971) Utilisation des méthodes isoto-
piques et hydrochimiques en hydrogéologie
B.R.G.M. : 101 p.