

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL  
B.P. 6009 - 45 Orléans (02) - Tél.: (38) 66.06.60

**APPLICATION DES MÉTHODES ISOTOPIQUES ET HYDROCHIMIQUES  
A L'ÉTUDE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN  
DU BASSIN DE PARIS**

par

Y. VUILLAUME



**Département HYDROGÉOLOGIE**  
B.P. 6009 - 45 Orléans (02) - Tél.: (38) 66.06.60

**71 SGN 304 HYD**

Septembre 1971

## R E S U M E

L'importance de la géochimie des carbonates dans le comportement de l'isotope carbone 14 en tant que traceur naturel de l'écoulement dans les nappes, est mise en évidence par l'étude de la bibliographie récente. Les principales méthodes de correction de l'activité en  $^{14}\text{C}$  mesurée dans le bicarbonate des eaux souterraines sont exposées en tenant compte de la teneur en isotope stable  $^{13}\text{C}$  et de la saturation de l'eau en bicarbonate.

Une application de la méthode du radiocarbone dans le bassin de Paris montre que le sens d'écoulement de l'eau dans la nappe de l'Albien est conditionné par celui des eaux de surface ; elle met en évidence des zones d'alimentation et d'exutoire du réservoir qui ne sont pas nécessairement liées à la présence de ses affleurements ; elle montre que les échanges d'eau se font essentiellement à travers les épontes peu perméables du réservoir, et confirme l'existence du phénomène de drainance.

## TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Pages

CHAPITRE 1 ..... 1

Principe de la méthode au carbone 14

CHAPITRE 2 ..... 50

Rappel des données géologiques et hydrogéologiques  
concernant la nappe de l'Albien dans le Bassin de Paris

CHAPITRE 3 ..... 64

Etude géochimique et isotopique de la nappe de l'Albien

CONCLUSION GENERALE ..... 100

BIBLIOGRAPHIE ..... 101

ANNEXE :

- . Résultats d'analyses chimiques
- . 20 tableaux

## SOMMAIRE DU CHAPITRE I

---

### 1. PRINCIPES DE LA METHODE DE DATATION AU CARBONE 14

#### 1.1. Le carbone 14 dans l'atmosphère

- 1.1.1. Mode de formation
- 1.1.2. Désintégration naturelle
- 1.1.3. Combinaison chimique d'oxydation et distribution terrestre du carbone
- 1.1.4. Répartition et taux de renouvellement du  $^{14}\text{C}$  naturel
- 1.1.5. Equilibre naturel entre production et désintégration du  $^{14}\text{C}$
- 1.1.6. Perturbations récentes du taux naturel de  $^{14}\text{C}$  par l'activité humaine
  - 1.1.6.1. Influence de l'activité industrielle
  - 1.1.6.2. Influence des essais de bombes thermo-nucléaires
- 1.1.7. Signification et choix de la teneur à l'origine N°

#### 1.2. Le carbone 14 dans les nappes : Principes de la méthode au $^{14}\text{C}$ appliquée à la datation des eaux souterraines

- 1.2.1. Processus d'introduction du  $^{14}\text{C}$  dans les nappes
  - 1.2.1.1. Première source de carbone dans les nappes
  - 1.2.1.2. Les équilibres de dissolution du  $^*\text{CO}_2$  atmosphérique
  - 1.2.1.3. Importance du  $\text{CO}_2$  d'origine atmosphérique dans les nappes
  - 1.2.1.4. Concentration isotopique dans le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{HCO}_3^-$
- 1.2.2. Les équilibres de dissociation des carbonates : seconde source de carbone dans les eaux souterraines
  - 1.2.2.1. Dissolution des carbonates
  - 1.2.2.2. Concentration isotopique de la calcite
- 1.2.3. Combinaisons des sources 1 et 2 : détermination de la teneur à l'origine en  $^{14}\text{C}$  dans les eaux d'infiltration

.../...

1.2.4. Evolution de la teneur isotopique des carbonates dissous pendant leur translation dans l'aquifère

1.2.4.1. Evolution normale du  $\text{CO}_2$

1.2.4.2. Apport de  $\text{CO}_2$  supplémentaire

1.2.4.3. Echanges isotopiques de  $^{14}\text{C}$  entre phases solide et liquide

1.2.4.4. Effet de dissolution de  $\text{CaCO}_3$  dans la nappe ; correction de la teneur en  $^{14}\text{C}$  pour tenir compte de cet effet

1.2.4.5. Fixation des ions carboniques et perturbation du chimisme de l'eau par échanges au contact des argiles

### 1.3. Le carbone 14, moyen d'étude de la cinétique des eaux souterraines

1.3.1. Trajet de l'eau dans l'aquifère

1.3.2. Ecoulements comparés de l'eau et des bicarbonates

1.3.3. Vitesse de l'eau dans l'aquifère

1.3.4. Signification physique d'un échantillon

1.3.5. Débit de l'eau d'infiltration dans la nappe

1.3.6. Durée de renouvellement de la réserve de la nappe

### 1.4. Choix d'un aquifère en fonction des contraintes de la méthode

1.4.1. Contraintes spécifiques du traceur

1.4.2. Contraintes relatives à l'hydrogéologie du système

1.4.3. Application de la méthode au  $^{14}\text{C}$  dans l'étude de la nappe de l'Albien du Bassin de Paris.

## SOMMAIRE DU CHAPITRE II

---

### 2. RAPPEL DES DONNEES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES CONCERNANT LA NAPPE DE L'ALBIEN DU BASSIN DE PARIS

#### 2.1. Géologie du réservoir

2.1.1. Limites géologiques

2.1.2. Structure

2.1.3. Stratigraphie et sédimentologie

2.1.4. Epaisseur de l'aquifère dans le bassin

2.1.5. Composition minéralogique

#### 2.2. Hydrogéologie de la nappe de l'Albien

2.2.1. Evolution historique des débits de prélèvement

2.2.2. Carte des pressions

2.2.3. Ecoulements dans la nappe

2.2.4. Conclusion

## SOMMAIRE DU CHAPITRE III

---

### 3. ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN

#### 3.1. Les données

##### 3.1.1. Opérations in situ : prélèvement des échantillons

3.1.1.1. Choix de l'ouvrage

3.1.1.2. Reconnaissance in situ

3.1.1.3. Mesures in situ

3.1.1.4. Prélèvement des échantillons

##### 3.1.2. Mesures au laboratoire

3.1.2.1. Méthode de dosage du  $^{14}\text{C}$

3.1.2.2. Méthode de dosage du  $^{13}\text{C}$

3.1.2.3. Méthode de dosage du  $^3\text{H}$

3.1.2.4. Méthode de dosage chimique

##### 3.1.3. Les résultats

3.1.3.1. Résultats d'analyses isotopiques

3.1.3.2. Résultats d'analyses chimiques

#### 3.2. Interprétation des résultats hydrochimiques

##### 3.2.1. Méthodes hydrochimiques

3.2.1.1. Diagramme logarithmique

3.2.1.2. Diagramme trilinéaire

##### 3.2.2. Analyses statistiques multivariées

3.2.2.1. Analyse factorielle des correspondances

3.2.2.2. Analyse factorielle en composantes principales

##### 3.2.3. Interprétation géochimique

#### 3.3. Interprétation des résultats isotopiques

.../...

3.4. Interprétation hydrogéologique et cartographie des paramètres géochimiques et isotopiques

3.4.1. Carte du déséquilibre chlore alcalins

3.4.2. Carte des activités en  $^{14}\text{C}$

3.4.2.1. Ensemble du bassin

3.4.2.2. Etudes régionales de l'alimentation à la périphérie

3.4.2.3. Vitesse d'écoulement de l'eau

3.5. Intérêt hydrogéologique de cette étude

## I N T R O D U C T I O N

中 中 中 中 中 中 中 中 中 中

L'intérêt pour les méthodes isotopiques a été sensible chez les hydrogéologues à la suite des travaux des physiciens concernant les essais de bombes thermonucléaires, dont les retombées ont permis de marquer l'eau dans le milieu naturel et en particulier dans les nappes.

A l'origine les physiciens ont adapté les méthodes isotopiques, mais il fallait que les hydrogéologues participent à cette tentative réalisée dans leur domaine d'intervention. C'est dans ce but qu'a été entrepris le travail présenté ici, réalisé au titre des études générales de méthodologie du département d'hydrogéologie du B.R.G.M.

Dans l'intervalle de temps écoulé depuis l'origine de l'étude, les théories isotopiques et géochimiques ont été affinées et enrichies ; il a donc paru utile de faire le point actuel de la bibliographie portant sur ce thème ; c'est l'objet du premier chapitre ci-après dont le développement peut paraître disproportionné avec l'ampleur de l'interprétation proposée dans les chapitres 2 et 3 ; en effet, faute de données de géochimie exactes et suffisamment nombreuses, il a paru préférable de ne pas développer outre mesure, l'exemple d'application abordé, ce qui a été facilité par la relative simplicité hydrologique et géochimique du système étudié ; cette difficulté tient en particulier, à l'étalement de l'étude : la qualité du matériel utilisé s'est régulièrement améliorée, mais les données acquises n'étaient plus homogènes pour permettre une interprétation complète. La méthode isotopique employée ici est essentiellement celle dite du carbone 14. Avant d'aborder l'exposé du premier chapitre il convient de préciser la terminologie que nous avons adoptée:

## TERMINOLOGIE

Les résultats d'analyse isotopique sont exprimés sous forme de rapport entre les quantités de l'isotope considéré à l'isotope le plus fréquent dans la nature pour l'élément correspondant ; ainsi C 14/C 12 pour le carbone, O18/O16 pour l'oxygène et par abréviation "C 14" et "O18".

On entend par "méthodes isotopiques" l'ensemble des procédures utilisées pour donner aux résultats analytiques leur signification dans le contexte hydrogéologique ; elles peuvent être fondées sur une ou plusieurs théories ; ainsi la méthode utilisant le C 14 s'appuie sur la théorie de MUNNICH et VOGEL.

Les "isotopes naturels" ou "isotopes du milieu" ("environmental isotopes" des auteurs anglo-saxons) sont ceux présents naturellement à l'échelle du globe dans le sous-sol, dans le sol ou dans l'atmosphère, y compris lorsque leur concentration a pu subir des variations du fait de l'activité humaine (bombes thermonucléaires ou industrialisation). Ils se différencient des "isotopes artificiels" injectés délibérément dans le milieu avec un but précis (traçage des écoulements par exemple).

Le terme de datation appliqué aux méthodes isotopiques utilisant les isotopes radioactifs, ne doit pas être pris dans son sens littéral en hydrogéologie ; s'il fait heureusement allusion à l'apport chronologique des méthodes isotopiques, il ne peut être pris que dans un sens semi quantitatif du fait de l'incertitude sur la teneur à l'origine de l'isotope considéré et sur les perturbations pouvant survenir au cours de son transfert dans l'aquifère.

# 1. PRINCIPE DE LA METHODE DE DATATION AU CARBONE 14

## 1.1. Le carbone 14 dans l'atmosphère

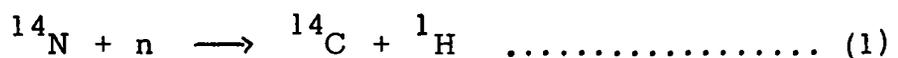
Le carbone 14 est un isotope radio-actif du carbone ; sa concentration moyenne naturelle relative à celle de l'isotope carbone 12, le plus fréquent, est de  $10^{-12}$ . La période de cet isotope, ou durée de demi-vie est évaluée à  $5\,730 \pm 40$  ans ; l'ancienne valeur de  $5\,568 \pm 30$  ans est cependant encore souvent utilisée.

Le tableau 1 récapitule les principales caractéristiques physiques des isotopes du carbone, de l'oxygène et de l'hydrogène. Les caractéristiques des isotopes utilisés en hydrologie sont rapportées dans le tableau 2.

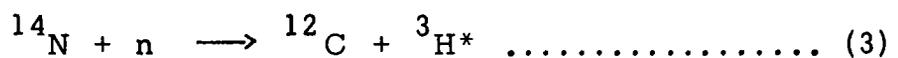
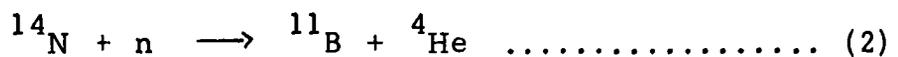
L'isotope  $^{14}\text{C}$  a donc une masse plus lourde de deux unités par rapport au  $^{12}\text{C}$  ; il a été découvert par LIBBY /1/ vers les années 1945.

### 1.1.1. Mode de formation

Les rayons cosmiques de haute énergie pénétrant dans l'atmosphère provoquent la formation de neutrons rapides à haute énergie ; ceux-ci heurtent les noyaux d'azote et provoquent la formation de  $^{14}\text{C}$  :



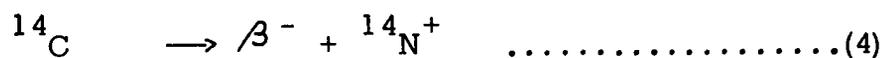
Cette réaction de spallation, la plus fréquente selon LIBBY /1/ n'est cependant pas la seule possible ; deux autres réactions peuvent se produire :



Les comparaisons de concentration naturelle effectuées le long de profils verticaux de l'atmosphère montrent une répartition des éléments intervenant dans les équations (1), (2), (3), en proportion de la probabilité de réalisation de ces différentes réactions LIBBY /1/.

### 1.1.2. Désintégration naturelle

Aussitôt produit ce radio-isotope se décompose spontanément d'après la réaction :



il émet un rayonnement "mou" de faible énergie ( $e_{\text{max}} = 156 \text{ KeV}$ )

La loi de décomposition radio-active de  $^{14}\text{C}$  peut s'exprimer en fonction du temps par une équation de forme exponentielle :

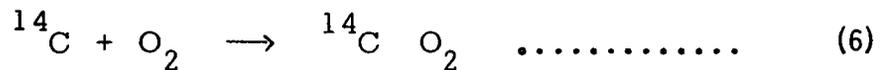
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (5)$$

où :

- N : atomes présents au moment de la mesure  
 $N_0$  : atomes à l'origine, valeur admise, supposée constante dans le temps  
 $\lambda$  : constante de décroissance liée à la période de  $^{14}\text{C}$  (1)  
t : temps écoulé entre les moments où l'échantillon vaut  $N_0$  puis N  
c'est la valeur cherchée.

### 1.1.3. Combinaison chimique d'oxydation ; distribution terrestre du carbone

Aussitôt après la formation il y a combinaison rapide de  $^{14}\text{C}$  avec l'oxygène de l'atmosphère :



le  $^{14}\text{C}$  ainsi formé constitue une proportion infime (de l'ordre de  $10^{-12}$ ) du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, dont la concentration moyenne dans l'air n'est elle-même que de l'ordre de  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Z	Isotope	%	Masse atomique	Période	Type de désintégration Radiations Energie en MeV
0	$n^1$		1.00896		$\beta^-$
1	$H^1$	99.9844	1.00815		
	$H^2$	0.0156	2.01471		
	$H^3$		3.01695	12.5 y	$\beta^-$ 0.018 pas de $\gamma$
6	$C^{10}$		10.02084	19.1 s	$\beta^+$ 2.2 $\gamma \sim 1$
	$C^{11}$		11.01499	20.5 m	$\beta^+$ 0.97
	$C^{12}$	98.892	12.00386		
	$C^{13}$	1.108	13.00756		
	$C^{14}$		14.00770	5700 y	$\beta^-$ 0.156 pas de $\gamma$
	$C^{15}$				$\gamma \sim 5.5$
8	$O^{14}$			76.5 s	$\beta^+$ 1.8 $\gamma$ 2.5
	$O^{15}$		15.0078	2.1 m	$\beta^+$ 1.7
	$O^{16}$	99.76	16.000000 (standard)		
	$O^{17}$	0.04	17.00450		
	$O^{18}$	0.20	18.0049		
	$O^{19}$		19.00958	29.5 s	$\beta^-$ 2.9 $\gamma$ 1.6 4.5

Caractéristiques physiques des isotopes de H, C, O

TABLEAU 1

- 1) Pour  $^{14}\text{C}$ ,  $1/\lambda = 8\,033$  ans d'après CRAIG /2/ et MÜNNICH /3/ ;  $\lambda$  est aussi appelé vie moyenne de l'isotope radioactif.  
2)  $^{14}\text{C}$  : cette notation signifie qu'il y a du  $^{14}\text{C}$  dans le carbone ou ( $^{14}\text{C O}_2$ ), qu'il n'y en a pas

	ISOTOPES RADIO-ACTIFS		ISOTOPES STABLES		
	$^{14}\text{C}$	$^3\text{H}$	$^{13}\text{C}$	$^{18}\text{O}$	$^2\text{H}$
Unité de mesure conventionnelle	%	U.T.	‰	‰	‰
Etalon de référence	acide oxalique N.B.S. (1)	concentration moyenne du tritium naturel	P.d.B. (2)	S.M.O.W. (3)	S.M.O.W. (3)
Valeur de l'étalon de référence	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,17 \cdot 10^{-12}$ 100 % 13,5 dpm/g de C	$^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$ 7,2 dpm/l 3,2 $10^{-3}$ pCi/l	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ ‰	$R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 1993,4 \cdot 10^{-6} \pm 2,5$ $\delta \text{D} = 8 \delta ^{18}\text{O} + 10$	$^2\text{H}/^1\text{H} = 158 \cdot 10^{-6} \pm 2$
Forme chimique					
. liquide	ions $\text{CO}_3\text{H}^-$ , $\text{CO}_3^{=}$ $\text{CO}_2$	$^3\text{H}^1\text{H}\text{O}$ eau et vapeur	ions $\text{CO}_3\text{H}^-$ , $\text{CO}_3^{=}$ $\text{CO}_2$	$^2\text{H}^{18}\text{O}$ molécule d'eau vapeur, air	$^2\text{H}^1\text{H}\text{O}$ molécule d'eau vapeur d'eau
. solide	$\text{CO}_3\text{Ca}$ , $\text{CO}_3\text{Mg}$ ... matières organiques	glace	$\text{CO}_3\text{Ca}$ , $\text{CO}_3\text{Mg}$ ... matières organiques	glace	glace
Valeurs mesurées					
. pluie ou . atmosphère	100 % naturel 200 % artificiel	10 U.T. naturel 10 000 U.T. artificiel	- 8‰	- 2 à - 5‰	- 30‰
. nappes	0 à 85 % naturel 150 % artificiel	0 à 10 U.T. naturel 500 à 1 000 artificiel	- 5 à - 25‰	- 10‰	- 80‰
. solides	$\approx 0$ %	0 à 1 000	+ 5 à - 2‰	- 53‰	
Période (ans)	5 730 + 40 (ancienne 5 568 ± 30)	12,26	-	-	-
Portée	actuel à 30 000 ans	actuel à 50 ans	-	-	-

(1) NBS : National bureau of standard (USA) - (2) P.d.B. : Bolemite de la Peedee formation (USA) - (3) SMOW : Standard mean ocean water  
dpm/g : désintégration/minute/gramme ou p/l (dpm/l)

Ainsi marqué, le gaz carbonique atmosphérique participe au cycle terrestre du carbone :

- sous la forme organique par les mécanismes de respiration des animaux et d'assimilation chlorophyllienne des végétaux,
- sous la forme minérale par le processus des équilibres de mise en solution de l'acide carbonique et de dissolution de la calcite ou la dolomite.

Le schéma de la répartition terrestre du carbone est donné dans la figure 1 d'après MÜNNICH /4/.

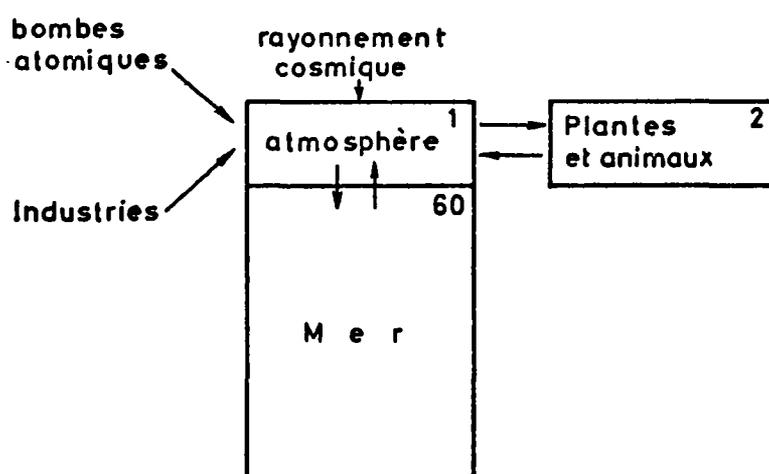


Figure 1  
d'après MÜNNICH /4/  
Répartition naturelle  
du carbone terrestre

Sur cette figure, il apparaît que la teneur en carbone de l'eau de mer (combiné sous forme minérale) vaut 60 fois celle de l'atmosphère (combiné sous forme de  $\text{CO}_2$ ) et seulement 30 fois celle de la biosphère.

Le  $^{14}\text{C}$  d'origine cosmique se répartit dans ces différents réservoirs de carbone avec des vitesses de pénétration différentes, dépendant des processus qui interviennent dans chaque cas.

#### 1.1.4. Répartition et taux de renouvellement du $^{14}\text{C}$ dans la nature

La figure 2 d'après MÜNNICH /3/ met en évidence la répartition relative du  $^{14}\text{C}$  dans le carbone total, et montre son cycle naturel ; le seul lieu de production est l'atmosphère ; il ne contient pourtant que 2 % du stock total, cela suppose un passage continu rapide et important vers la biosphère, (2 % également) et surtout vers la mer (96 %) qui constitue la réserve principale ; cette figure exprime des bilans globaux, ce qui n'exclut pas des retours biosphère  $\rightarrow$  atmosphère et mer  $\rightarrow$  atmosphère. La mer constitue le principal exutoire du  $^{14}\text{C}$ , le lieu où il se désintègre en majorité.

Les expériences de CRAIG /2/ et MÜNNICH /3/ ont eu pour but d'évaluer le temps moyen de résidence dans l'océan ; qualitativement, la couche de surface de quelques centimètres constitue un interface qui permet un échange important du  $\text{CO}_2$  ; si le passage atmosphère  $\leftrightarrow$  interface de l'océan est activé par le jeu des vagues, le passage en profondeur de l'océan est beaucoup plus lent. MÜNNICH a montré expérimentalement qu'il faut en moyenne 20 allers-retours atmosphère-eau superficielle avant que le  $\text{CO}_2$  soit fixé dans l'océan ; Il faut en moyenne 1 200 ans pour que le  $^{14}\text{C}$  accomplisse ce trajet . Cette durée avait été estimée par LIBBY /5/ comme inférieure à 2 000 ans ; sa faible valeur permet donc une homogénéisation suffisante dans le réservoir pour assurer la validité de la méthode datation au  $^{14}\text{C}$ .

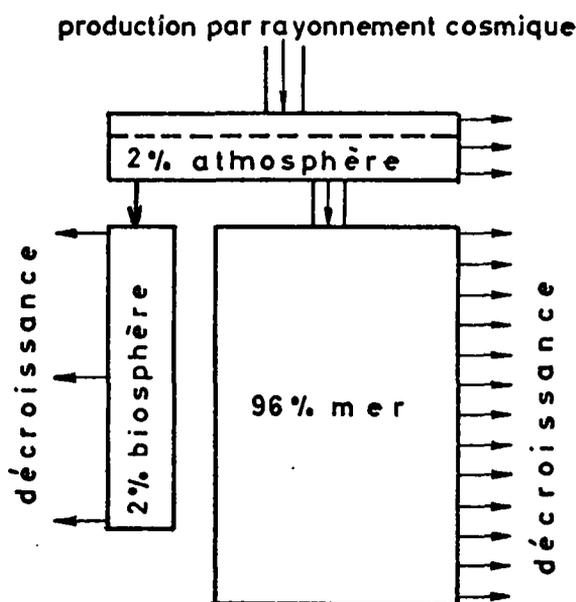


Figure 2  
d'après MÜNNICH /3/  
Répartition naturelle  
du radiocarbone

### 1.1.5. Equilibre naturel entre production et désintégration du $^{14}\text{C}$ ; fluctuations naturelles

Une des conditions d'utilisation de la méthode de datation est que la teneur à l'origine  $N_0$  de l'équation (5) reste constante pendant la durée correspondant à la "portée" de la méthode soit les 50 000 à 70 000 dernières années.

Après quelques estimations théoriques, LIBBY /1/ admet cette hypothèse ; MÜNNICH /6/, SUESS /7/, SCHELL /8/ ont tenté des vérifications par comparaison avec les résultats fournis par d'autres méthodes, essentiellement la dendrochronologie et l'archéologie.

La figure 3 d'après MÜNNICH et al /6/ montre que durant les quinze derniers siècles les variations de concentration en  $^{14}\text{C}$  dans les végétaux n'ont pas dépassé  $\pm 2\%$  du standard actuel ; il apparaît une fluctuation cyclique autour de cette dernière valeur pour des observations intéressantes l'Europe du Nord, avec un changement sensible vers les années 1100 - 1300. Des relations ont été cherchées entre ces fluctuations et la succession des périodes glaciaires ou avec la variation des émissions solaires. Les travaux de STUIVER /9/ tendent à montrer un rajeunissement apparent des résultats fournis par la méthode de datation du  $^{14}\text{C}$ , par rapport aux résultats obtenus par la dendrochronologie et par les dépôts de matières organiques dans les sédiments de lacs sur trois continents.

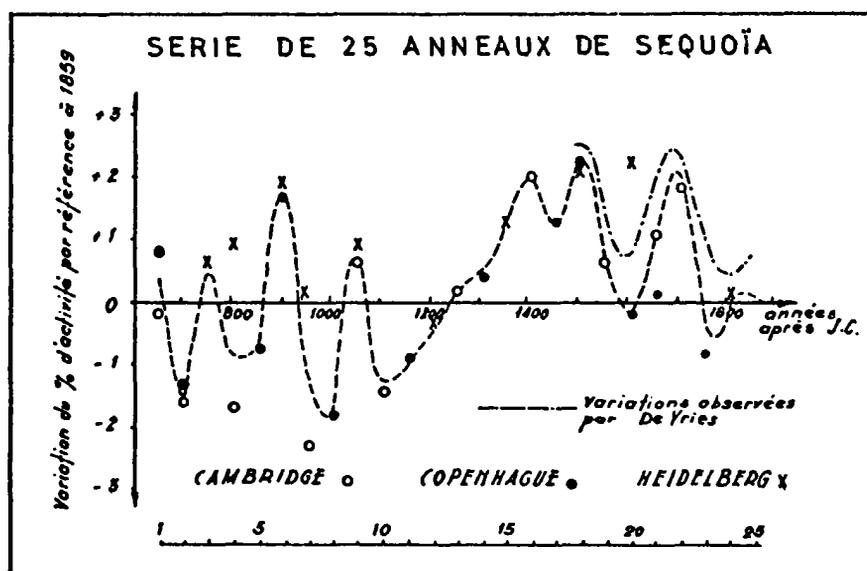


Figure 3  
d'après MÜNNICH et al. /6/

Fluctuation de la teneur en  $^{14}\text{C}$  pendant les dernières 1300 années observées dans les anneaux de Sequoia

SCHELL /8/ a également montré un rajeunissement apparent des âges obtenus par la méthode au  $^{14}\text{C}$  relativement à ceux fournis par l'archéologie ; sur la figure 4 cette différence est de 500 ans pour les 5 000 dernières années.

En conclusion, il semble difficile de se prononcer actuellement sur l'évolution de la teneur à l'origine en  $^{14}\text{C}$  pendant les 70 derniers millénaires. Les différents utilisateurs ont négligé en général les fluctuations éventuelles. Certains ont proposé des corrections, qui semblent prématurées en l'absence de vérifications suffisamment nombreuses ; si fluctuations il y a, elles retentissent sur l'évaluation de l'âge d'autant plus que celui-ci est plus récent ; dans l'application de la méthode que nous faisons en hydrologie d'autres raisons de fluctuations plus importantes exposées en 1.2. font que nous pouvons négliger cette éventuelle perturbation.

#### 1.1.6. Perturbations du taux naturel de $^{14}\text{C}$ par l'activité humaine

Il s'agit là d'effets récents intéressant la répartition planétaire du  $^{14}\text{C}$ .

##### 1.1.6.1. Perturbations dues à l'activité industrielle

Depuis 1850 environ, la combustion de fortes quantités de houille puis de pétrole, dépôts fossiles sans activité  $^{14}\text{C}$ , a libéré dans l'atmosphère suffisamment de  $\text{CO}_2$  pour modifier la teneur "naturelle". Cet effet mis en évidence notamment par SUESS /7/, /10/, est suffisamment important pour nécessiter une correction de 5 % de teneur entre les années 1850 et 1950 ; cette dernière étant la base de référence pour toutes les dates fournies par les laboratoires de radiocarbone (GODWIN /11/).

##### 1.1.6.2. Retombées des bombes thermo-nucléaires

La date de référence 1950 est antérieure à la série des essais de bombes thermonucléaires qui ont libéré dans l'atmosphère des quantités importantes d'isotopes nouveaux et augmenté sensiblement le taux de ceux qui s'y trouvaient ; c'est particulièrement le cas du  $^{14}\text{C}$  ou du  $^3\text{H}$ .

La figure 5 d'après MÜNNICH /12/ montre que cette augmentation a doublé le taux naturel vers les années 1963 - 1964 pour l'Europe centrale ; ces résultats sont en accord avec les observations de LIBBY /5/ et d'autres chercheurs aux U.S.A.

La diffusion de ces produits injectés (sous forme de poussières de granulométrie plus ou moins fine) est rapide dans un même hémisphère, en fonction des courants atmosphériques à différents niveaux. La restitution au niveau du sol dans l'air et la pluie se fait avec des fluctuations annuelles sous forme de pics dont l'intensité maximale se situe en juin pour l'Europe.

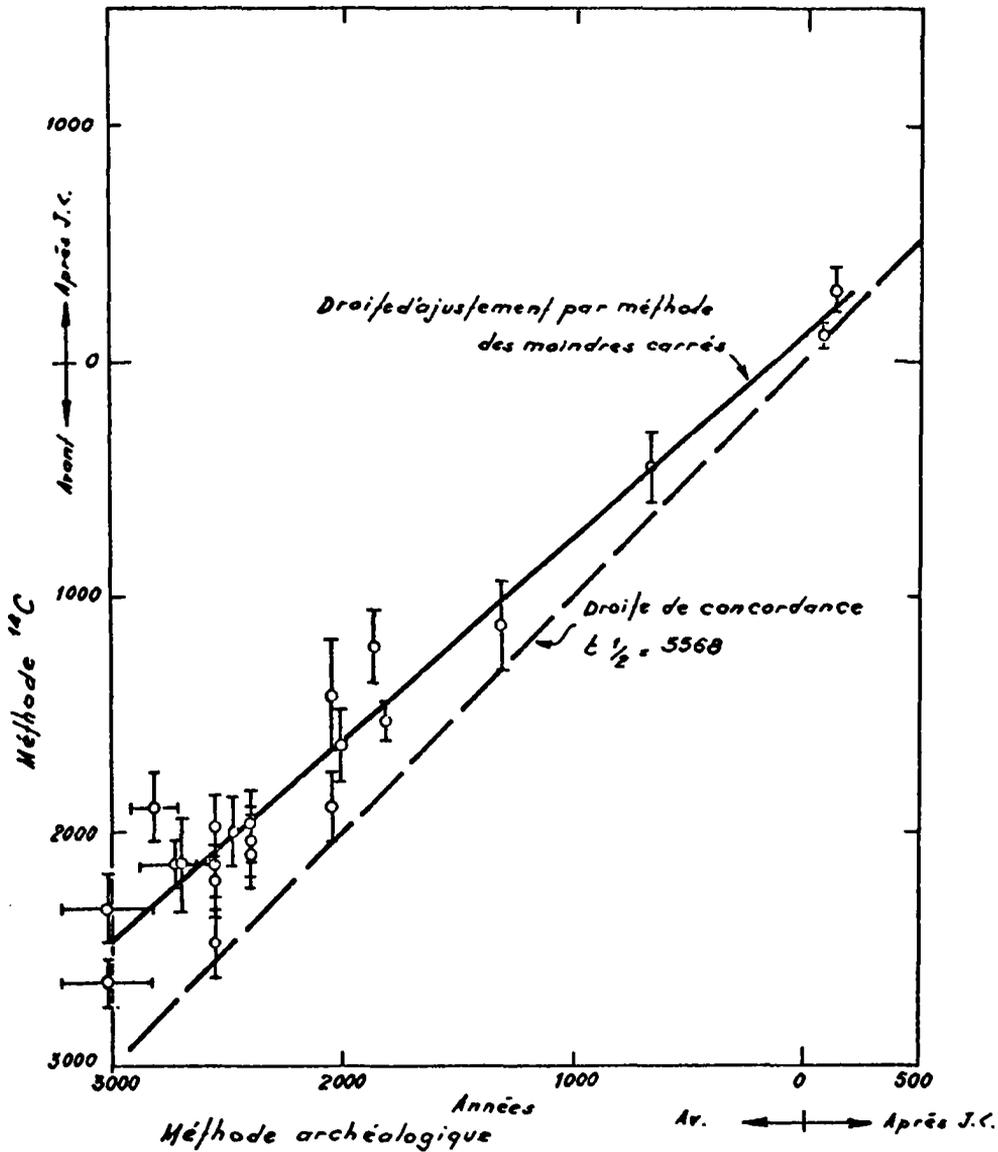


Figure 4  
d'après SCHELL /8/

Comparaison des âges obtenus par les méthodes de l'archéologie et au <sup>14</sup>C (échantillons de Crète, Egypte, Irak, Israël, Pakistan, Soudan)

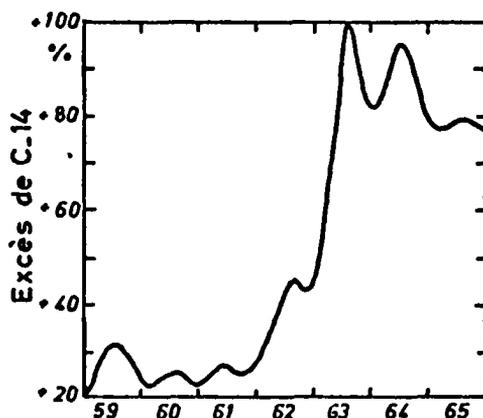


Figure 5  
d'après MÜNNICH /12/

Accroissement du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  dans  
le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère de l'hémisphère  
Nord entre 1959 et 1965

Excédent de la teneur en C-14 du  $\text{CO}_2$  atmosphérique par rapport à la teneur naturelle en C-14 en Europe centrale depuis 1959. Les essais nucléaires faits avant 1958, avaient provoqué une augmentation de la teneur naturelle en C-14 de l'atmosphère de l'ordre de 15 %. Les essais effectués en 1958 ont conduit à un maximum de la concentration de C-14 en l'année 1959. Après l'arrêt des expériences, survenu en 1959, et se prolongeant jusqu'en 1961, la nouvelle série des essais des années 1961/62 a provoqué les valeurs extrêmes en 1963/64 (double par rapport à la teneur naturelle). Le retard constaté entre le moment des essais et l'apparition de la plus forte teneur en C-14 des bombes dans la troposphère provient d'un enrichissement des produits des bombes dans la stratosphère.

Le passage d'un hémisphère à l'autre est beaucoup plus lent ; les essais ayant eu lieu essentiellement dans l'hémisphère nord, les teneurs observées y sont sensiblement plus élevées qu'au Sud. Ceci est particulièrement visible sur les figures 6 et 7 d'après AIEA /13/ et VERHAGEN /14/ pour le  $^3\text{H}$  : en 1963 les teneurs sont de 10 000 U.T. en Europe et seulement de 100 U.T. en Afrique du Sud.

Sur les figures 5, 6, 7, il apparaît un effet, accusé depuis, de décroissance régulière des teneurs observées ; ceci tient à la suppression des essais de bombes dans l'atmosphère.

La perturbation importante réalisée par les bombes thermonucléaires interdit l'utilisation des isotopes radio-actifs comme chronomètre ou "dateurs" au sens strict dans les études hydrologiques, entre 1955 et 1971. Un palliatif a été trouvé par la répétition des mesures dans le temps en des sites donnés et l'établissement de corrélation entre les activités mesurées dans les pluies et les aquifères.

Pour des raisons de commodité d'emploi, et parce que le  $^{14}\text{C}$  a une portée très supérieure à l'intervalle de temps durant lequel les teneurs ont été perturbées, nous avons pu éviter cette difficulté ; la méthode au  $^3\text{H}$  étant mieux adaptée pour les études portant sur les faibles durées.

#### 1.7. Signification et choix de la teneur à l'origine $N_0$

Après avoir mis en évidence le  $^{14}\text{C}$ , LIBBY /1/ avait pensé l'utiliser comme moyen de datation pour connaître l'âge de différents composés du carbone.

Cette application suppose que la répartition du  $^{14}\text{C}$  dans le cycle du carbone soit rapide condition vérifiée (cf. 1.1.3. et 1.1.4.) ; elle suppose ensuite que l'on prenne comme référence une "coupure", un événement, comme le rappelle MARGAT /15/, date à partir de laquelle le composé carboné sera soustrait au cycle de renouvellement naturel du  $^{14}\text{C}$  ; dès cet instant, il faut admettre que la teneur en  $^{14}\text{C}$  dans le carbone considéré n'est plus contrôlée que par la désintégration radio-active.

Cette date sera par convention, celle de la mort pour un individu, un animal ou une plante, celle de l'arrivée en zone saturée pour l'eau souterraine, celle du recouvrement d'un sédiment par une autre couche, etc... La constante est ici la disparition du cycle de renouvellement du  $^{14}\text{C}$ .

Il est alors possible d'utiliser la loi de décroissance radio-active exprimée en (5) comme chronomètre de laquelle on peut tirer t :

$$t = 8.033 \log_e \frac{A_0}{A_t} \dots\dots\dots (7)$$

- t : temps exprimé en années
- $A_0$  : activité du standard moderne
- $A_t$  : activité mesurée de l'échantillon, exprimée en coup par minute par gramme de carbone

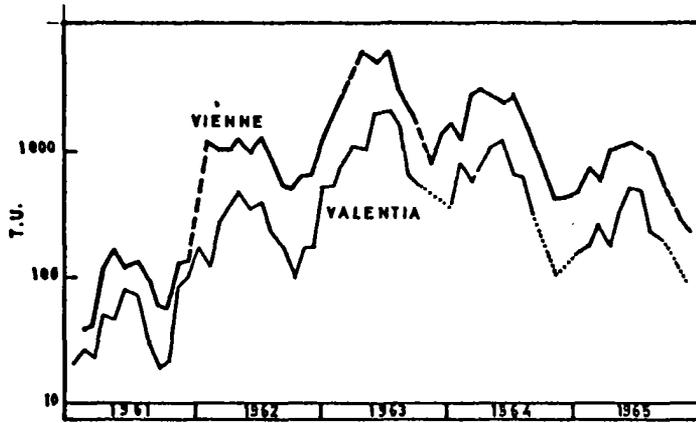


Figure 6

d'après AIEA Guidebook /13/

Variations de la concentration en tritium  
dans la pluie de l'hémisphère Nord

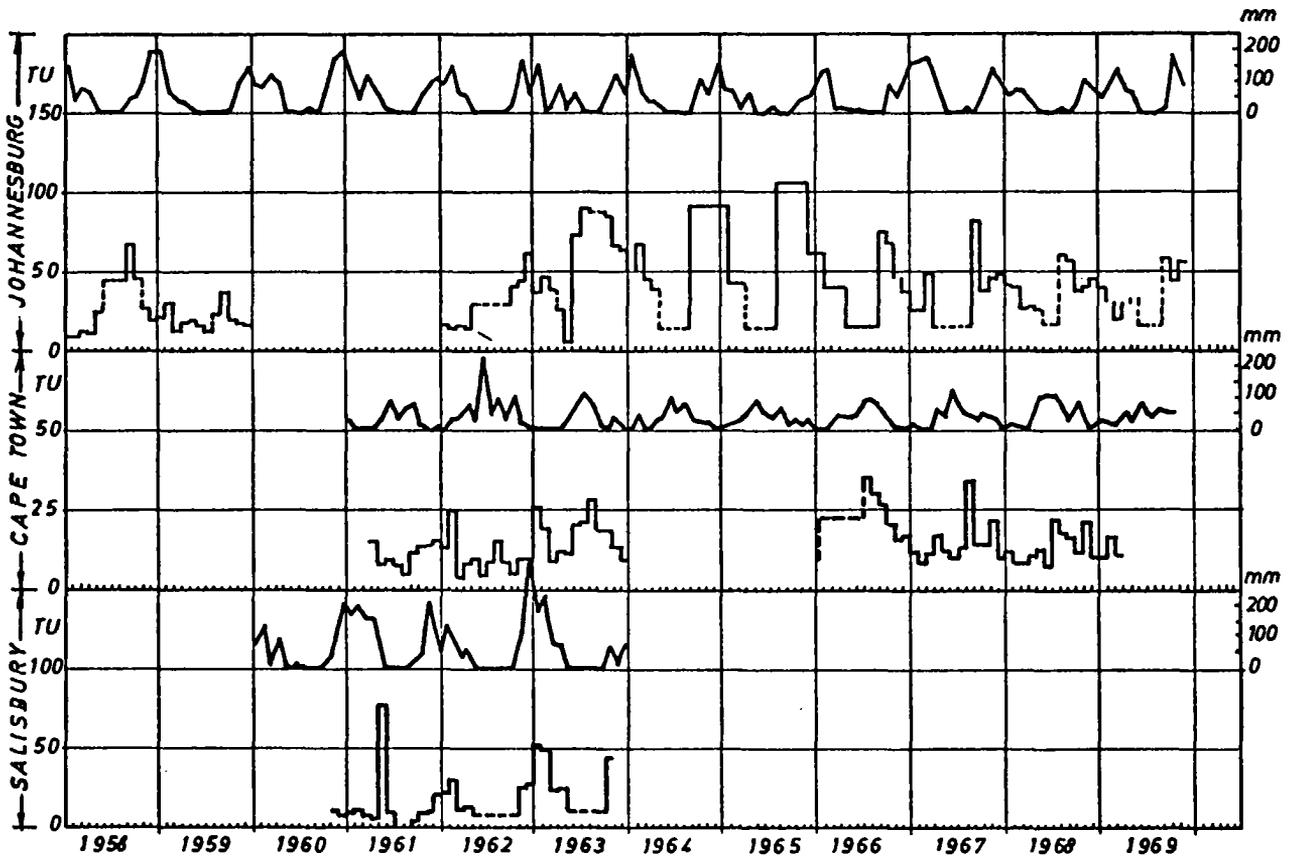


Figure 7  
d'après VERHAGEN /14/  
Variations du  $^3\text{H}$  dans les pluies de l'hémisphère Sud

$A_0$  et  $A_t$  sont des rapports, ou activités de  $^{14}\text{C}$  et non plus des valeurs absolues comme en (5).

En pratique chaque laboratoire détermine son  $A_0$  en utilisant l'acide oxalique du standard américain N.B.S. (National Bureau of Standard), par comptage d'impulsion obtenue lors de chaque désintégration d'un atome de  $^{14}\text{C}$  ; cette opération de comptage pendant un temps donné permet de définir l'activité avec une précision ou probabilité de  $\pm \sigma$  ; il y a donc 66 % de chances que la valeur trouvée soit comprise dans la fourchette de valeur indiquée. Pour l'échantillon, la procédure est la même après une préparation chimique préalable. Des précisions sur la méthode utilisée au laboratoire de radio-carbone sont fournies par EVIN et al. /17/.

L'expression graphique de la relation /7/ est donnée sur la figure 8 tirée de MÜNNICH /16/.

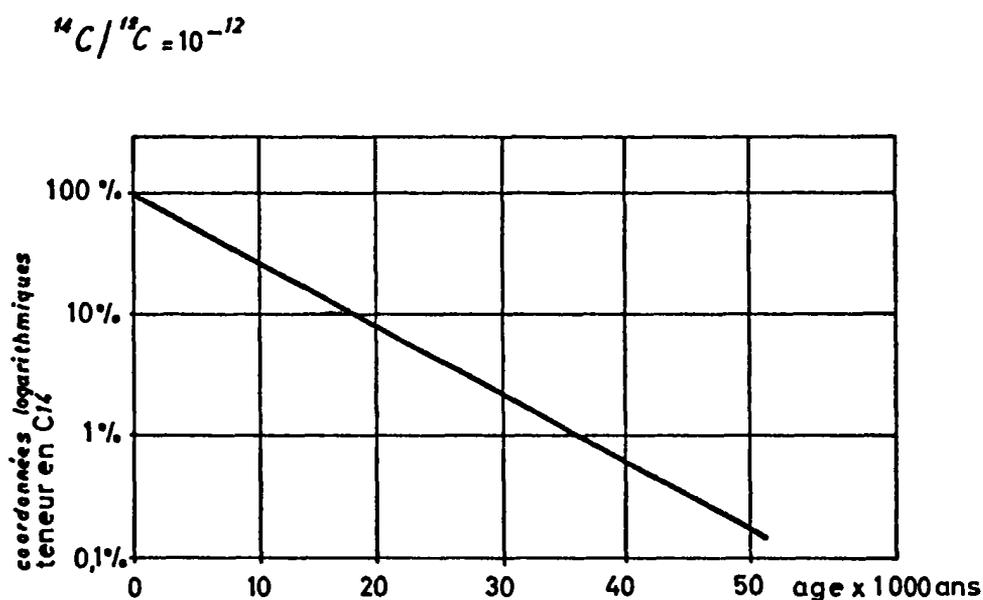


Figure 8  
d'après MÜNNICH /16/

Décroissance de la radioactivité du  $^{14}\text{C}$   
en fonction du temps

## 1.2. Le carbone 14 dans les aquifères. Principe de la méthode au $^{14}\text{C}$ appliquée à la datation des eaux souterraines

Le principe de cette méthode a été énoncé par BRINKMANN, MUNNICH et VOGEL en 1959 /19/ ; il avait déjà été esquissé dès 1957 par MUNNICH /18/. Les premières mesures de contrôle effectuées par MÜNNICH et VOGEL leur ont permis d'élaborer une théorie qui s'est révélée, tout en étant schématique par rapport à la complexité naturelle, un très riche canevas d'investigation.

Depuis cette époque, l'Agence internationale de l'énergie atomique a permis par ses colloques de 1963, 1967, 1970 que l'emploi de cette méthode se généralise et s'affine, à la suite des travaux de géochimie théorique en laboratoire des équipes de Heidelberg (MÜNNICH, ROETHER, EHHALT, THILO ...) ou de Hanovre (WENDT, GEYH) et aussi des travaux de géochimie plus orientés vers l'hydrogéologie de ERIKSSON, BACK et HANSHAW, PEARSON aux Etats Unis.

Les équipes françaises sont restées plus en retrait sur ce plan visant plutôt à dégager l'intérêt de l'utilisation de ces méthodes et à en définir les modalités d'utilisation.

Cette optique est particulièrement celle adoptée au B.R.G.M. Il faut signaler la synthèse bibliographique sur le sujet réalisée en 1965 par A. LALLEMAND /20/.

D'une littérature abondante, il a fallu dégager les éléments nouveaux connus depuis cette époque ; c'est l'objet de ce paragraphe.

Il est nécessaire pour cela de reprendre le cycle du carbone dans les eaux souterraines, qu'il soit marqué ou non par le  $^{14}\text{C}$ .

### 1.2.1. Le processus d'introduction du $^{14}\text{C}$ dans les eaux souterraines

#### 1.2.1.1. La première source de carbone dans les eaux souterraines

Un schéma de ce processus tiré de MÜNNICH /12/ est représenté par la figure 9.

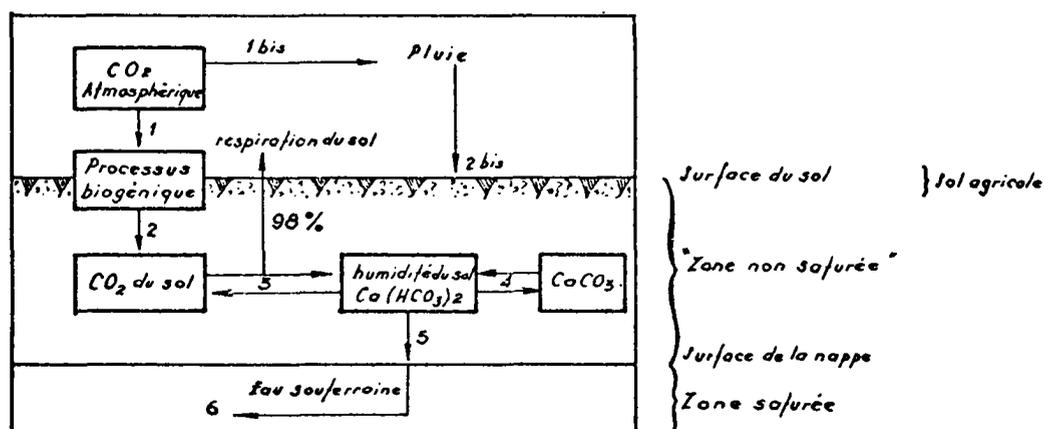


Figure 9

Schéma du processus d'introduction du  $^{14}\text{C}$   
dans les eaux souterraines

### 1.2.1.2. Les équilibres de dissociation de l'acide carbonique dans l'eau

#### - Dissolution des gaz dans l'eau

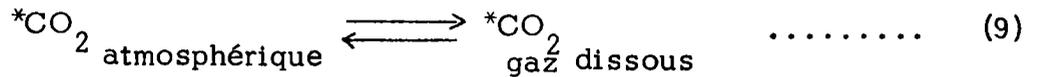
Elle est liée à la pression et la température, le facteur de solubilité  $\lambda$  d'un gaz est déterminé d'après la loi de GAY LUSSAC :

$$\lambda = \alpha (1 + t/273) \dots\dots\dots (8)$$

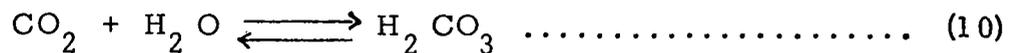
$\alpha$  : volume du gaz (dont la pression partielle est 760 mm Hg et la température 0°C) que peut dissoudre un volume d'eau unité

t : température du milieu en °C

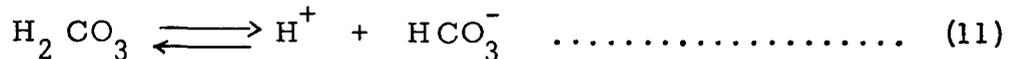
Une série d'équilibres thermodynamiques règlent ensuite le processus d'introduction du CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique dans l'eau souterraine (1) :



L'hydratation du gaz dissous entraîne la formation d'acide carbonique sous forme moléculaire :

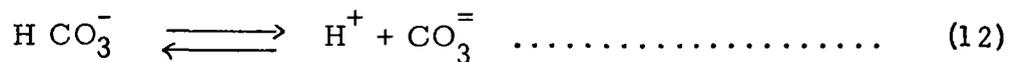


la majorité des molécules ainsi formées sont dissociées :



en pratique, il est possible de négliger l'état H<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> ; l'équation (11) rend compte de la première fonction acide ; l'étude de la cinétique de la réaction (11) a montré que le rapport de [CO<sub>2</sub>] / [H<sub>2</sub> CO<sub>3</sub>] est de 386, d'après GARRELS /23/.

Un second degré dans la dissociation de H<sub>2</sub> CO<sub>3</sub> met en évidence la seconde fonction acide :



L'abondance relative des principaux termes des équations (10), (11), (12), est réglée par le pH comme le montre la figure 10 d'après HEM /24/ ; la température et la pression interviennent aussi ; elles sont prises ici en conditions standard.

---

1) d'après notamment SCHOELLER /21/ /26/, GARRELS /23/, HEM /24/

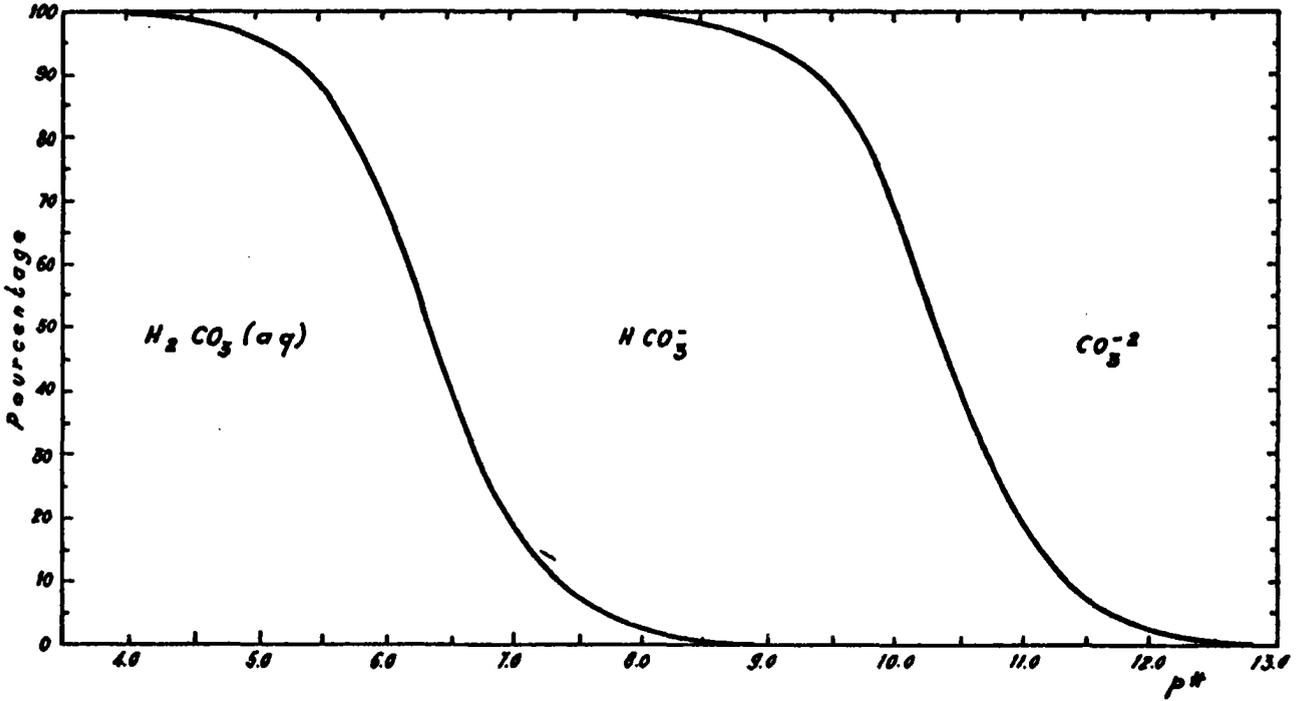


Figure 10  
d'après HEM /24/

Pourcentages relatifs de présence des différents types de CO<sub>2</sub> dissous, en fonction du pH (pression 1 atmosphère température 25°C)

En pratique, on doit donc considérer l'existence de :

H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> entre les pH 4,5 et 7,5

HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> entre les pH 5,0 et 11,5

CO<sub>3</sub><sup>=</sup> entre les pH 8,5 et 13,0

pour ces conditions de température et de pression.

Les réactions (11) et (12) amènent à considérer l'équilibre de dissociation de l'eau qui produit lui aussi des ions H<sup>+</sup> :



L'activité en CO<sub>2</sub> dissous est donnée par la relation :

$$(CO_2) = \frac{\alpha \mathcal{S}}{22,4} = \frac{\alpha C.P.}{22,4} \dots\dots\dots (14)$$

Où :

- p : pression au-dessus du liquide
- α : coefficient d'absorption du CO<sub>2</sub> dans l'eau
- ℑ : pression partielle de CO<sub>2</sub> au-dessus du liquide
- C : concentration de CO<sub>2</sub> gazeux au-dessus du liquide

Les équilibres (10) à (13) peuvent s'exprimer en fonction de leur constante d'équilibre, liée à la température et la pression, d'après la loi d'action de masse :

$$K_{H_2CO_3} = \frac{(H^+) (HCO_3^-)}{(H_2CO_3)} \dots\dots\dots (15)$$

$$K_{HCO_3^-} = \frac{(H^+) (CO_3^{=})}{(HCO_3^-)} \dots\dots\dots (16)$$

$$K_{H_2O} = \frac{(H^+) (OH^-)}{H_2O} \dots\dots\dots (17)$$

Nota : Dans la série des équilibres considérés dans les équations (9) à (13) on suppose que les équilibres sont réalisés ; il n'est pas tenu compte de la cinétique des réactions.

On néglige la constante de l'équilibre 10 ; par définition, l'activité de l'eau vaut 1, ainsi que celle de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. On passe des activités (réactions 15,16,17) aux concentrations d'ions, mesurées, par l'intermédiaire du facteur d'activité, selon les relations :

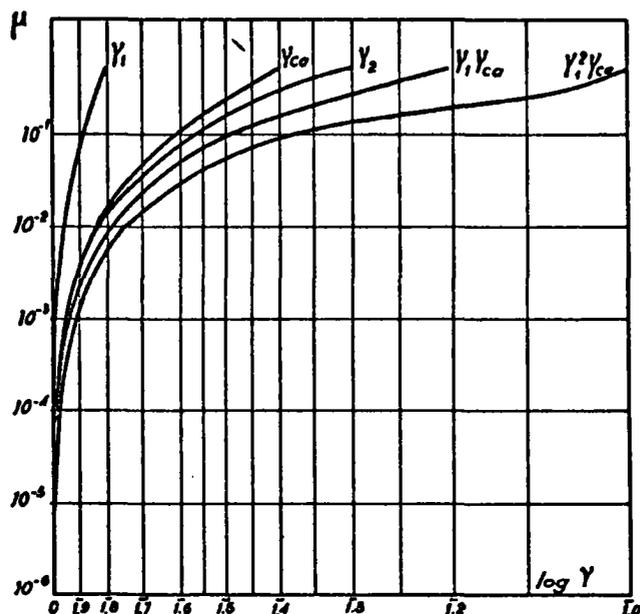
$$\gamma_0 = (CO_2) / [CO_2] \dots\dots\dots (18)$$

$$\gamma_1 = (HCO_3^-) / [HCO_3^-] \dots\dots\dots (19)$$

$$\gamma_2 = (CO_3^{=}) / [CO_3^{=}] \dots\dots\dots (20)$$

Ce facteur d'activité dépend de la température, de la pression, mais aussi de la force ionique  $\mu$  de la solution (donc de sa minéralisation) d'après la relation de DEBYE-HÜCKEL. Il existe des abaques qui permettent de calculer  $\mu$  pour différentes concentrations des principaux ions habituellement rencontrés en solution in HEM /24/.

La figure 11 donne les log de  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_{Ca}$  en fonction de  $\mu$ , d'après SCHOELLER /21/; (la plupart des eaux souterraines ont une force ionique  $< 10^{-1}$ ).



**Figure 11**

Variations des facteurs d'activités  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{Ca}, \gamma_1 \gamma_{Ca}, \gamma_1^2 \gamma_{Ca}$  en fonction de la force ionique

Sur la figure 12 sont reportées les valeurs de log K en fonction de la température, correspondant aux réactions (15), (16), (22).

### 1.2.1.3. Importance du CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique dans les nappes

La pression partielle de CO<sub>2</sub> dans l'air est en moyenne de  $3 \cdot 10^{-3}$ ; dans le sol agricole elle peut être de 10 à 100 plus forte du fait de l'intense activité organique qui s'y développe, d'après SCHOELLER /26/, VOGEL & EHHALT /22/. C'est donc essentiellement par le canal des plantes que les eaux souterraines reçoivent leur teneur en CO<sub>2</sub> dans la zone d'alimentation de la nappe.

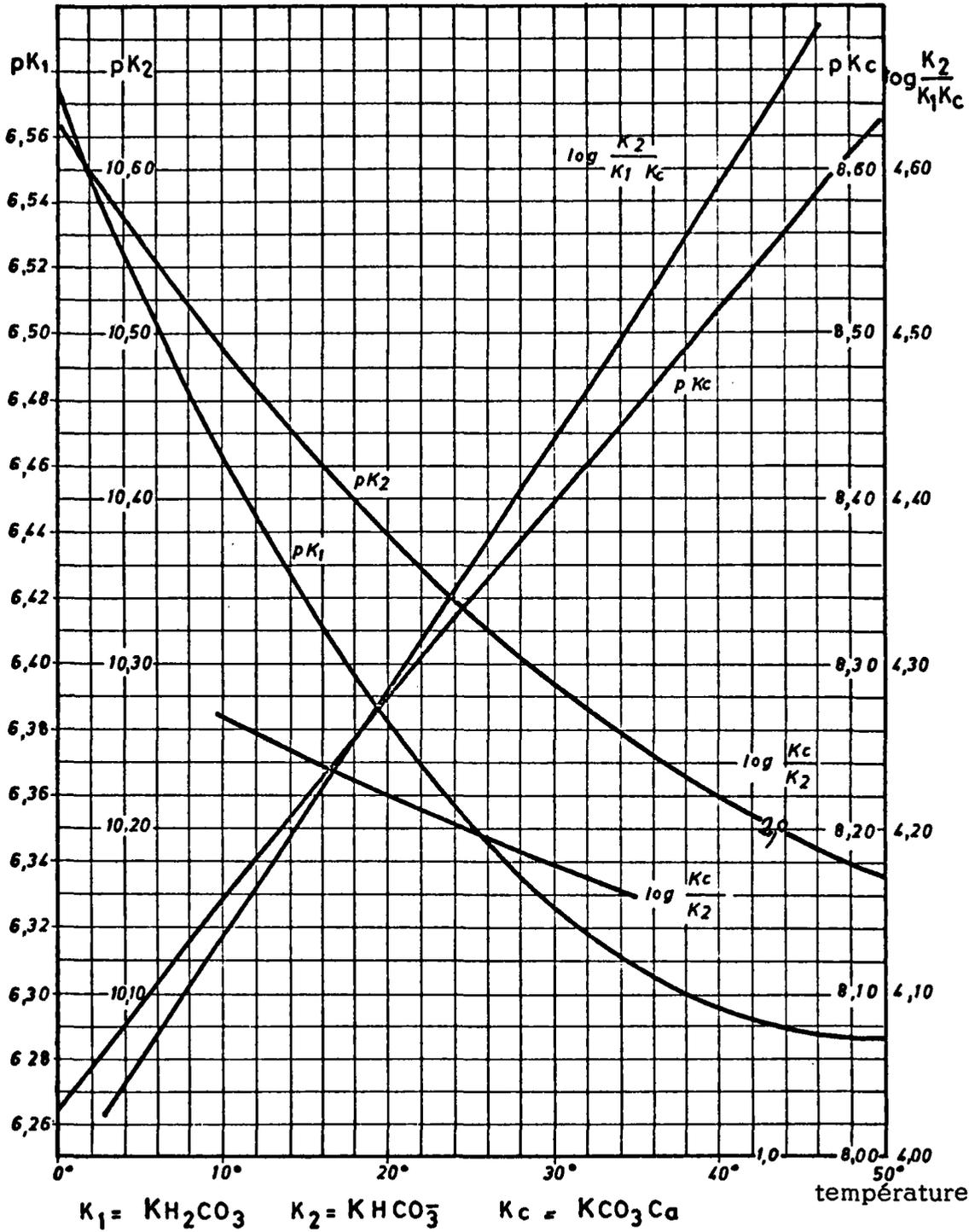
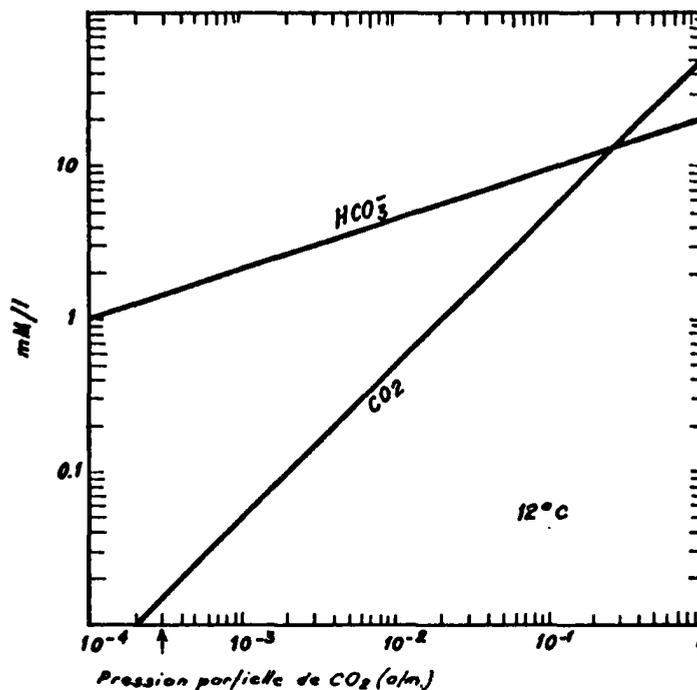


Figure 12 - d'après SCHOELLER /21/

La figure 13 d'après VOGEL & EHHALT /22/ montre que la pression partielle du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère ne peut dissoudre qu'un millimole de  $\text{HCO}_3^-$  au maximum, à la température de  $12^\circ\text{C}$  donc en conditions moyennes de température de sol. Or les eaux souterraines peuvent avoir des teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  pouvant atteindre 10 m M/l.



**Figure 13**  
d'après VOGEL & EHHALT  
1 m M/l de  $\text{HCO}_3^-$  = 61 mg/l  
Equilibre des concentrations de  
 $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_2$  dans l'eau

Il faut donc admettre que les plantes fournissent l'essentiel du  $\text{CO}_2$  des eaux souterraines, la part venant directement de l'atmosphère étant réduite.

#### 1.2.1.4. Concentration isotopique dans le $\text{CO}_2$ et le $\text{HCO}_3^-$

##### - Teneur en $^{14}\text{C}$

Le  $\text{CO}_2$  atmosphérique est marqué en  $^{14}\text{C}$ , de même que celui produit par les plantes ; un certain décalage a été observé récemment par MÜNNICH entre l'accroissement de teneur en  $^{14}\text{C}$  d'origine thermo-nucléaire dans les plantes et l'atmosphère ; nous négligeons ces fluctuations qui ont pu subvenir après les explosions thermo-nucléaires ; le rapport isotopique  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  dans les plantes est  $\approx 10^{-12}$  avant 1955, d'après MÜNNICH /18/, /19/.

##### - Teneur en $^{13}\text{C}$

Cet isotope stable marque également le  $\text{CO}_2$ , de façon différente suivant le milieu considéré si l'abondance moyenne est de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 1,1 \%$

(tableau 1) ce rapport subit des fluctuations significatives de 1<sup>er</sup> ordre de 40‰, du fait de processus thermodynamiques différentiels.

Le calcaire marin (cf. tableau 3 d'après HANSHAW /36/) est pris comme référence, parce que le plus lourd  $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$  par définition ; on constate un allègement moyen du  $\text{CO}_2$  atmosphérique de  $-7\text{‰}$  à  $-8\text{‰}$  (par effet cinétique des réactions d'équilibres carboniques 9 à 12) et un allègement moyen plus prononcé encore du  $\text{CO}_2$  des plantes de 1<sup>er</sup> ordre de  $-25\text{‰}$  par effet cinétique du processus d'assimilation des plantes.

Ces résultats sont aussi portés sur les figures 14, tirée de VOGEL /25/, et 15, d'après VOGEL EHHALT /22/.

Il apparaît donc que le  $^{13}\text{C}$  peut constituer un marqueur du  $\text{CO}_2$  d'origine atmosphérique, biogénique ou minérale marin, qui présente la particularité de ne pas se dégrader par désintégration radioactive comme le  $^{14}\text{C}$ .

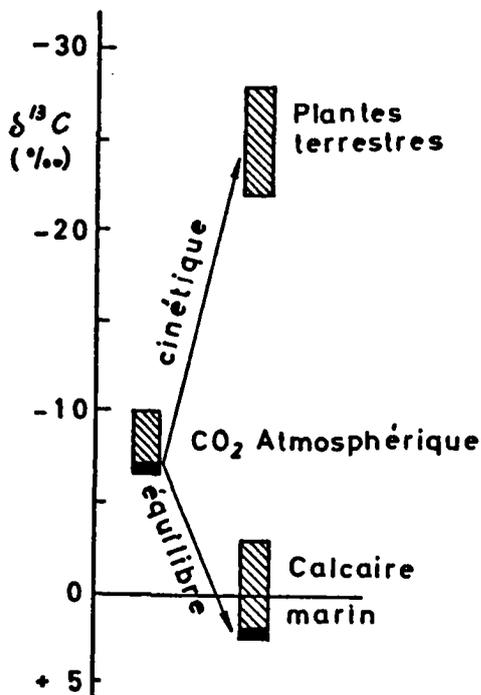


Figure 14

Les deux principaux processus naturels de séparation isotopique du  $^{13}\text{C}$

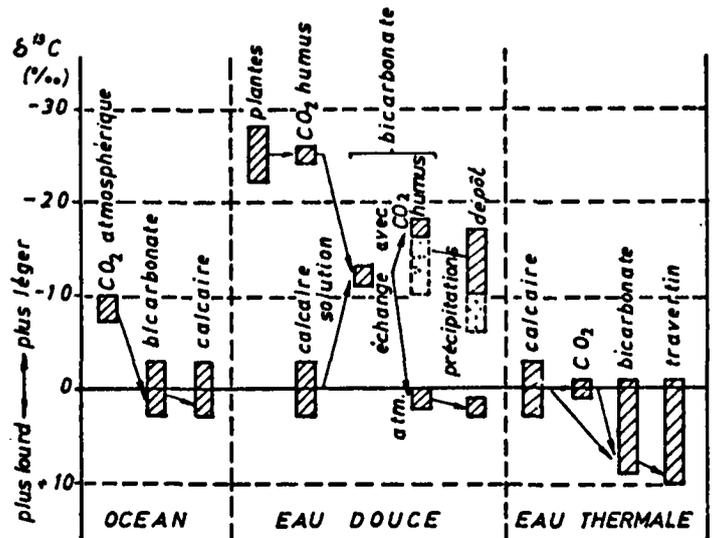


Figure 15

Séparation isotopique du  $^{13}\text{C}$  dans différents processus naturels

TABLEAU 3

VALEURS DU RAPPORT  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  DANS LA NATURE

d'après HANSHAW /36/

Composé du carbone	Valeurs moyennes $\delta^{13}\text{C}$ ‰ P. d. B.	Nombre d'analyses	Références	
CO <sub>2</sub> de l'atmosphère	- 7.0 ± 0.4	50	KEELING (1953)	
	- 7	5	CRAIG (1953)	
Calcaire marin et coquilles	- 0.2 ± 2.9	23	CRAIG (1953)	
	- 0.1 ± 2.3	14	CRAIG (1954)	
	0	150	BAERTSCHI (1951)	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> de l'océan	- 2.2 ± 0.7	5	CRAIG (1954)	
Carbone organique des sédiments et du pétrole	- 28 ± 4	15	CRAIG (1953)	
Plantes terrestres, bois, feuilles	- 25 ± 4	50	CRAIG (1953)	
	- 25 ± 5	64	WICKMAN (1952)	
CO <sub>2</sub> dans l'air du sol	climat humide	- 23.2	1	BROECKER & OLSON (1960)
	climat semi-aride	- 16.7 ± 2	5	RIGHTMIRE (1967)

## 1.2.2. La seconde source importante de carbone dans les eaux souterraines

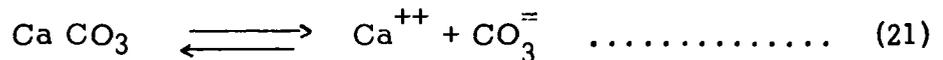
### 1.2.2.1. Dissolution des carbonates

Elle est fournie par dissolution des solides présents dans le sol et les réservoirs ; il s'agit de :

CO <sub>3</sub> Ca	calcite	)	les plus fréquents	)	peuvent fournir les éléments majeurs de l'eau
CO <sub>3</sub> Ca	aragonite	(			
(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ca Mg	dolomite	)	relativement fréquente	(	
CO <sub>3</sub> Mg	magnésite	)	rare	)	
CO <sub>3</sub> Fe	sidérite	)	peuvent fournir à l'eau des oligo-éléments	(	
CO <sub>3</sub> Mn	rhodocrosite	(			
CO <sub>3</sub> Sr	strontianite	)	peuvent fournir à l'eau des éléments en trace	(	
CO <sub>3</sub> Ba	whitherite	(			

Ce sont les deux premiers minéraux qui fournissent en général à l'eau son Ca<sup>++</sup> et environ la moitié de son CO<sub>3</sub><sup>=</sup>

Placée dans l'eau, la calcite est dissociée :



la constante d'équilibre de cette réaction peut s'écrire :

$$K_{\text{Ca CO}_3} = \frac{(\text{Ca}^{++}) \cdot (\text{CO}_3^=)}{(\text{Ca CO}_3)} \dots\dots\dots (22)$$

(par convention l'activité du solide vaut 1 )

Placée dans l'eau distillée, la calcite seule est peu soluble ; elle fournit environ 16 mg/l de Ca CO<sub>3</sub> dissous ; la présence des ions carboniques introduits par la pression partielle de CO<sub>2</sub> augmente sensiblement cette solubilité.

### 1.2.2.2. Concentration isotopique du carbone dans la calcite

La théorie de MÜNNICH admet que la calcite ne possède pas de <sup>14</sup>C donc qu'elle existe depuis plus de 50 à 70 000 ans ; par contre elle possède une teneur en <sup>13</sup>C = 0‰ ( soit celle de l'étalon par définition).

Ces hypothèses sont admissibles en général ; elles doivent être discutées dans certains cas particuliers :

par exemple : travertins plus récents que 50 000 ans, ou valeur de <sup>13</sup>C différente de 0‰.

1.2.3. Combinaisons dans l'eau souterraine des carbonates issus des deux principales origines et fixation de la teneur isotopique de l'eau souterraine

Par combinaison des ions  $\text{CO}_3^{2-}$  de l'équation (22) et  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et du  $\text{CO}_2$  des équations (9), (10), (11), (12), la teneur globale en ions carboniques dissous augmente de même que la teneur en ions  $\text{Ca}^{++}$ .

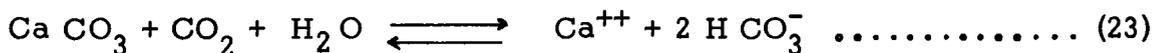
TABLEAU 4

Solubilité de la dolomite, de la calcite et de la magnésie  
Millimoles de  $(\text{HCO}_3^-)_2$  dans 1 kg sol

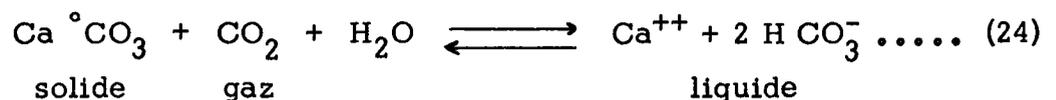
θ température °C	p $\text{CO}_2$ en atm.	Dolomite	Calcite	Magnésie
		Ca Mg $(\text{CO}_3)_2$	Ca $\text{CO}_3$	Mg $\text{CO}_3$
0	1	10,74	15,08	22,52
25	1	6,49	9,0	16,50
55	1	6,08	6,09	15,59
70	1	4,58	3,45	15,59
25	0,0012	1,42	0,81	1,65

Sur le tableau 4 d'après SCHOELLER /26/ on constate que la solubilité de la calcite peut atteindre 15 millimoles avec une pression de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère.

Cette combinaison est exprimée sous la forme contractée :



MÜNNICH et al. /19/ à la suite des travaux de CRAIG et UREY admettait la répartition isotopique suivante :



$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  en % 0 100 50

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  en % 0 - 25 - 12,5

le bicarbonate ainsi introduit dans la nappe n'est généralement pas saturé (1) ; ses teneurs en  $^{14}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  devraient être intermédiaires entre celles des plantes et du calcaire.

(1) Les valeurs des constantes d'équilibre des équations (14) à (17) et (22) sont en conditions normales (25°C, 1 atmosphère)

$$K_{\text{CO}_2} = 10^{-1,47} \quad K_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-14,0} \quad K_{\text{H}_2\text{CO}_3} = 10^{-6,4}$$

$$K_{\text{H CO}_3} = 10^{-10,3} \quad K_{\text{Ca CO}_3} = 10^{-8,3}$$

Mais les vérifications réalisées sur le terrain par MÜNNICH /19/ ont fourni des résultats sensiblement différents :

$$^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 75 \text{ à } 85 \% \quad ; \quad ^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = -15 \text{ à } -18\text{‰}$$

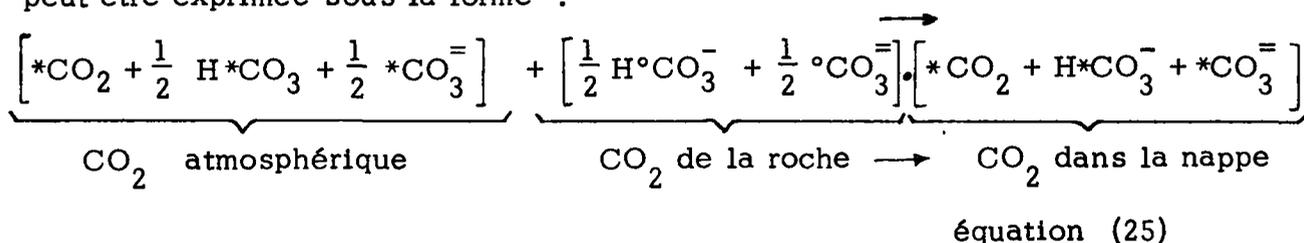
MÜNNICH fait alors intervenir un échange isotopique important dans le sol et la zone non saturée, entre le  $\text{CO}_2$  gazeux et les ions carboniques dissous; alors les teneurs sont respectivement de :

$$\delta^{14}\text{C} = 100 \% \text{ et } 50 \% \quad ; \quad \delta^{13}\text{C} = -25\text{‰} \text{ et } -12,5\text{‰}$$

la variation des teneurs observées de 75 % à 85 % est liée à la différence de couverture végétale, liée elle-même à la nature du terrain et au climat.

La comparaison des teneurs  $^{14}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  d'un échantillon s'avère donc toujours un guide utile pour évaluer ces effets d'échange isotopique entre gaz et liquide dans la zone d'infiltration.

Une autre explication à cet excès de  $^{14}\text{C}$  dans les eaux d'infiltration est proposée par SCHOELLER /21/ ; il examine l'influence du pH sur le processus de dissolution des carbonates dont rend compte globalement l'équation /23/, qui peut être exprimée sous la forme :



ici aussi, on admet que les quantités d'ions carboniques fournies par l'atmosphère et par la roche composent en partie égale celle de l'eau.

En faisant intervenir les valeurs de constantes d'équilibre, on considère l'évolution en fonction du pH des deux rapports :

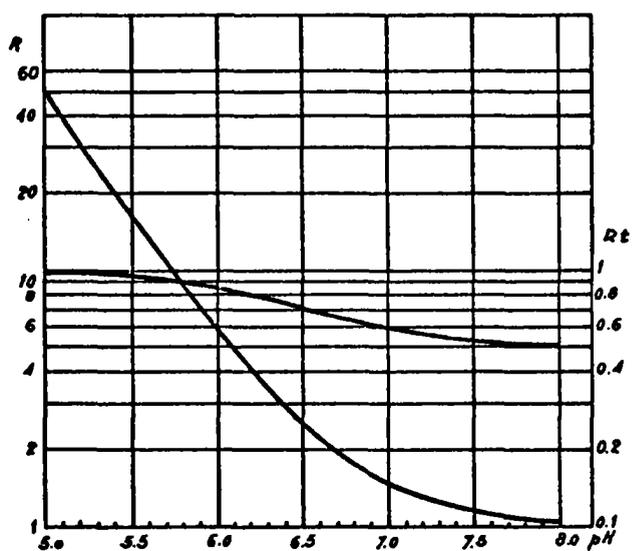
$$R = \frac{* \text{CO}_2 \text{ atmosphérique}}{{}^{\circ} \text{CO}_2 \text{ de la roche}} \quad \text{et} \quad R_t = \frac{* \text{CO}_2 \text{ atmosphérique}}{* \text{CO}_2 \text{ dans la nappe}}$$

on obtient les courbes de la figure 16, dans lesquelles :

$$R = \delta (\text{H}^+) 10^6 + 1$$

$$R_t = \frac{(\text{H}^+) 10^7 + 2}{(\text{H}^+) 10^7 + 4}$$

Il apparaît donc que dans la gamme des faibles pH rencontrés dans le sol et à un moindre degré, dans la zone d'alimentation de la nappe, la concentration en carbone 14 peut être notablement plus forte que celle de l'équilibre théorique à 50 %.



**Figure 16**

d'après H. SCHOELLER /21/

Rapports du  $\text{CO}_2$  de dissolution au  $\text{CO}_2$  de la roche et  $R_t$  au  $\text{CO}_2$  total, en fonction du pH

(en conditions de  $T^\circ$  et pression standard)

Que l'on considère un processus d'échange isotopique seul ou un processus purement géochimique, il n'y a rien d'étonnant à ce que la teneur à l'origine en <sup>14</sup>C des eaux souterraines d'infiltration soit supérieure à 50 %. Il est même possible que ces deux phénomènes se superposent pour aboutir à cet effet.

Notons que la végétation semble jouer un rôle important ; dans les zones désertiques MÜNNICH et VOGEL /27/ avaient déjà constaté que les teneurs à l'infiltration sont de l'ordre de 70 à 75 %. Depuis, les travaux de RIGHTMIRE au Texas, en zone semi-aride, ont confirmé que la teneur à l'origine doit être de cet ordre de grandeur pour <sup>14</sup>C et de - 15 à - 19 ‰ en <sup>13</sup>C.

1.2.4. Evolution de la teneur isotopique du bicarbonate pendant son transfert dans l'aquifère

1.2.4.1. Evolution normale

Dans sa théorie MÜNNICH /19/ admet que la teneur en CO<sub>2</sub> évolue peu, une fois acquise l'empreinte initiale. Il a vérifié son hypothèse dans la nappe de la plaine du Rhin et sur des cases lysimétriques.

En réalité, cette hypothèse n'est valable que dans certains aquifères et c'est certainement la partie la plus critiquable de sa théorie. Cette hypothèse a été sensiblement améliorée par HANSHAW-PEARSON.

Il est notoire que la minéralisation de l'eau évolue avec l'écoulement. En particulier, dans les aquifères calcaires, la teneur en ions carboniques augmente sensiblement vers l'aval jusqu'à saturation ou même sursaturation par rapport à la calcite, la dolomite, le gypse (voir à ce sujet le tableau 6, dont les valeurs sont fournies par BACK-HANSHAW /40/).

Dans les nappes captives où la pression et la température varient fortement, SCHOELLER /21/ a montré l'incidence de ces facteurs sur la teneur en acide carbonique.

Dans les filets descendants, le ΣCO<sub>2</sub> (1) de l'eau augmente du fait de l'influence exercée par la température et la pression sur les constantes ; lorsque Σ<sub>équilibre</sub> = ΣCO<sub>2</sub> de l'eau, il peut y avoir précipitation, sauf cas de sursaturation :

$$\Sigma_{eq} = \frac{22,4 K''_2}{\alpha_P K''_1 K'_C} \left[ H CO_3^- \right]^2 \left[ Ca^{++} \right] \dots\dots\dots (26)$$

en négligeant la variation de CO<sub>2</sub>, on aurait une variation de log  $\frac{K''_2}{K''_1 K'_C}$  de 0,0321 pour 100 m.

---

(1) ΣCO<sub>2</sub> : teneur en "acide carbonique total" de l'eau .

avec :

$$\frac{(H^+) [HCO_3^-]}{[CO_2]} = \frac{\gamma^o}{\gamma_1} K_1 = K_1''' \quad [Ca^{++}] [CO_3^{=}] = \frac{K_c}{\gamma_{Ca} \gamma_2} = K_c'$$

$$\frac{(H^+) [CO_3^{=}]}{[HCO_3^-]} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} K_2 = K_2'''$$

p : pression

$\alpha$  : coefficient d'absorption du  $CO_2$  par l'eau

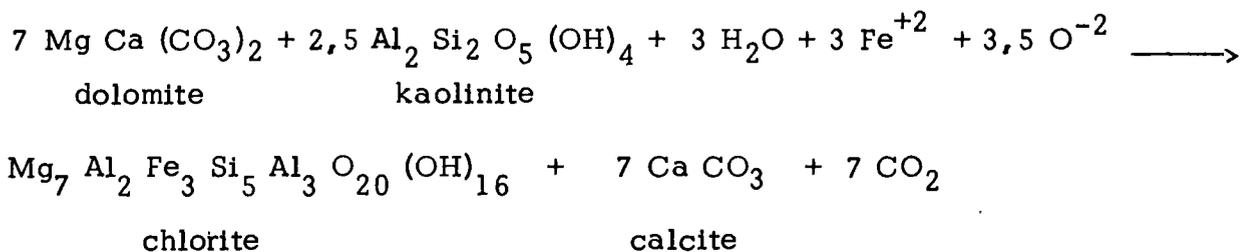
Dans les filets ascendants, par variation des valeurs de constante en fonction de la pression et la température le  $\delta CO_2$  de l'eau diminue par rapport au  $\delta CO_2$  d'équilibre : l'eau tend à devenir plus agressive et à dissoudre plus le calcaire ; c'est alors qu'il y a risque de vieillissement apparent par diminution artificielle du rapport  $^{14}C/^{12}C$ .

#### 1.2.4.2. Apport perturbateur de $CO_2$ "fossile" dans les nappes

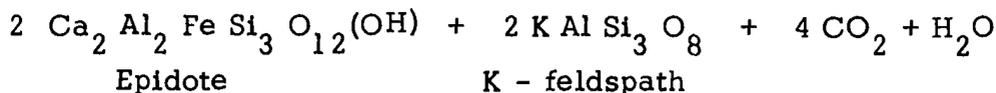
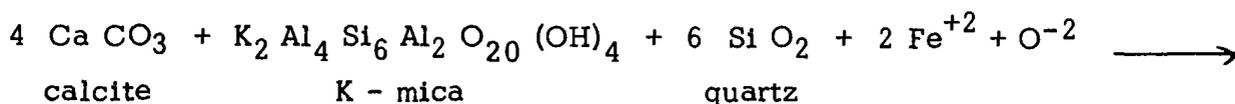
$^{14}C/^{12}C$  Il s'agit de  $^{14}CO_2$  inactif qui pourrait perturber sensiblement le rapport  $^{14}C/^{12}C$  des bicarbonates de l'eau, en particulier :

- le  $^{14}CO_2$  des régions volcaniques sera inactif en  $^{14}C$  ; sa teneur en  $^{13}C$  pourra indiquer s'il provient de l'attaque d'un calcaire marin
- le  $^{14}CO_2$  provenant de la combustion lente des plantes fossiles : un vieillissement apparent en résultera, mais ici encore le  $^{13}C$  montrera l'influence végétale anormale.

Dans la région à activité tectonique récente, on a pu observer que la combinaison de dolomite et de kaolinite peut produire du  $CO_2$  d'après MUFFLER /47/.



Dans le même système le  $\text{CO}_2$  peut également résulter de la combinaison de la calcite avec un mica potassique et du quartz



Ces perturbations peuvent survenir dans certaines régions qui présentent une activité tectonique récente, La production de  $\text{CO}_2$  par la combustion des plantes représente un plus grand risque de perturbation.

Dans tous les cas de perturbation, la teneur en isotope  $^{13}\text{C}$  est un indicateur précieux.

#### 1.2.4.3. Echanges isotopiques à l'interface solide - liquide

La phase liquide contenant du  $^{14}\text{C}$  ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  non nul), la phase solide étant inactive ( $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 0$ ) il pourrait y avoir échange isotopique entre ces deux phases pour compenser ce déséquilibre, et donc vieillissement apparent de l'eau.

Cette hypothèse a été très discutée par les physiciens. MÜNNICH /19/ admettait d'abord que cet effet était négligeable, puis il a proposé une correction par l'isotope stable  $^{13}\text{C}$  /27/. Après la remarque de ERIKSSON /28/ puis les travaux de GEYH /35/, MÜNNICH - THILO /31/, en laboratoire, l'utilité de cette correction est remise en cause.

La base de la correction de MÜNNICH et VOGEL /19/ est fournie par l'équation (24).

L'eau de la zone d'alimentation possède une teneur isotopique :

$$^{14}\text{C} = 85 \% \quad \text{et} \quad ^{13}\text{C} = - 17,5 \text{ ‰}$$

toute détermination de  $^{14}\text{C}$  est accompagnée de  $^{13}\text{C}$  dans les échantillons. On corrige la teneur en  $^{14}\text{C}$  mesurée, si celle en  $^{13}\text{C}$  correspondante indique une anomalie ; la proportion de correction du  $^{14}\text{C}$  est déterminée d'après la variation du  $^{13}\text{C}$ .

ERIKSSON /28/ objecte que la diffusion dans les calcaires étant un processus continu, il n'affecte pas que la surface du solide ; il s'ensuit que le  $^{14}\text{C}$  pénètre dans le solide, s'y désintègre, est remplacé par d'autres atomes soustraits au liquide ; cependant que le  $^{13}\text{C}$  non désintégré, ne subit pas la même perte, car il sature le solide, donc le principe de la correction "d'échange" isotopique serait remis en cause. En pratique, il faut voir aussi que cette correction d'échange peut également inclure les variations de concentrations du carbone par solubilisation ou précipitation.

- Estimation expérimentale de la perturbation apportée par le processus d'échange solide-liquide

Une estimation de la perturbation maximale possible a été faite par MÜNNICH /12/ ; des expérimentations ont été menées ensuite par MÜNNICH et THILO /32/. Voici leurs principales conclusions :

Soit deux réservoirs de carbone :

- l'un liquide,  $h_1$ , de dimension :  $h_1 = \epsilon C N$

$h_1$  atomes de carbone/cm<sup>3</sup>  
 $\epsilon$  porosité  
 C concentration en moles/cm<sup>3</sup>  
 N atomes (Avogadro)

- l'autre solide,  $h_2$ , de dimension :  $h_2 = n \cdot 3 \alpha (1 - \epsilon) / r d^2$  ..... (27)

n couches moléculaires  
 $\alpha$  coefficient de surface de la calcite  
 d distance moyenne entre atomes de carbone dans CaCO<sub>3</sub> ( $4 \cdot 10^{-8}$  cm)  
 r diamètre des granules de Ca CO<sub>3</sub>

$h_1$  et  $h_2$  ont des teneurs isotopiques différentes.

On sait que par unité de temps, la perte de <sup>14</sup>C est évaluée par l'expression :

$$N_o = - \lambda N \quad \dots \dots \dots (28)$$

en tenant compte du facteur d'échange  $f$ , cette expression devient :

$$N_o = - (1 + f) \lambda N \quad \dots \dots \dots (29)$$

ce qui revient à dire que l'activité mesurée sera inférieure en (29) par rapporte à celle de (28).

Les expériences ont porté sur des "billes" de CaCO<sub>3</sub> :

diamètre = 100  $\mu$  ;  $\epsilon = 0,3$  ; C = 6 m M/l ; pour la première couche d'atome seule, le rapport f a pu être évalué à :

$$h_2/h_1 = 1/4 = f \quad \dots \dots \dots (30)$$

Donc la perturbation possible de l'activité peut atteindre 1/4 de sa valeur réelle, voir 1/2 si l'on fait intervenir une forme plus naturelle pour les grains de calcite. Selon MÜNNICH si de telles perturbations ne semblent pas observées, c'est que la taille des grains est en général 10 fois plus grande que celle des conditions expérimentales. Les résultats de ces expériences sont portés sur les figures 17, 18, 19 ; il apparaît que l'accroissement de température facilite l'échange isotopique ; le calcium ne semble pas fixé ; le carbonate oui ; cette conclusion s'accorde avec celle de A. LALLEMAND /33/ sauf pour le calcium. Enfin, les essais avec circulation en continu montrent un effet de saturation du solide. Il y a une asymptote lorsque l'on atteint 75 % de restitution du traceur à 25°C ; l'échange semble donc important.

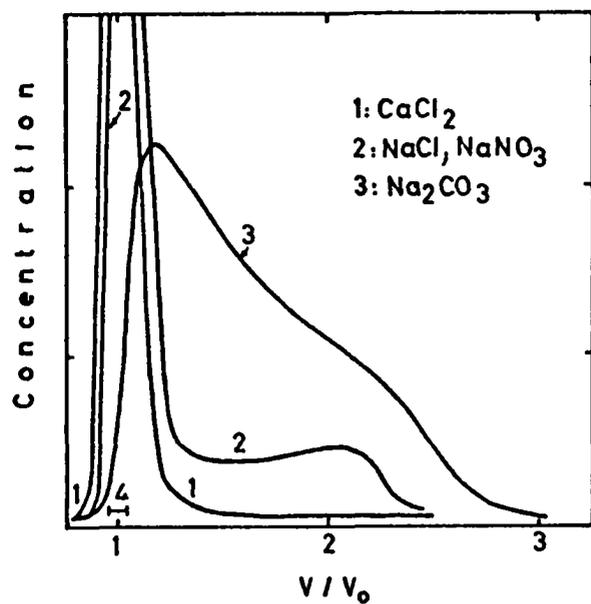


Figure 18

Fixation préférentielle du carbone par rapport au calcium (ce dernier n'est pas affecté)

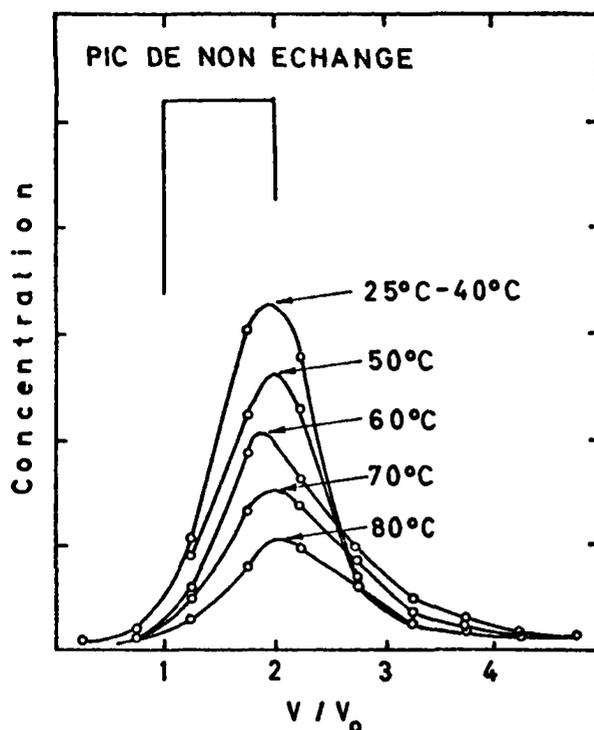


Figure 17

Fixation croissante du traceur avec la température (injection par vague)

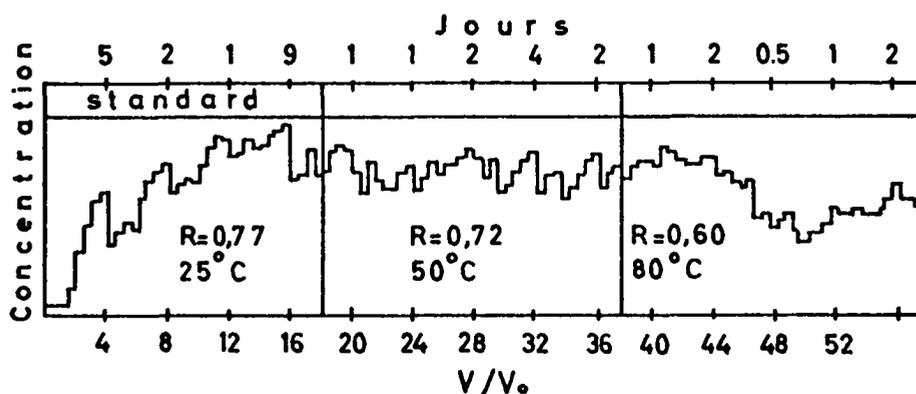


Figure 19

d'après MÜNNICH & al. /32/

Evolution du pourcentage de restitution du traceur en fonction de la température ; les flèches indiquent la date de cessation d'écoulement

Résultats d'expérimentations  
sur colonnes

WENDT /30/ a pu mettre en évidence des échanges isotopiques, dépendant de la température, de l'ordre de quelques % pour les conditions expérimentales particulières.

Cependant les études expérimentales de ANDERSON /39/ montrent que le processus d'échange isotopique entre du CO<sub>2</sub> gazeux marqué et la calcite peut être réduit pour les basses températures (<50°C), est négligeable en pratique ; alors que dans les mêmes conditions, l'échange du <sup>18</sup>O est supérieur de 4 fois.

Il apparaît une certaine opposition dans les conclusions de ces travaux, qui tiennent peut-être aux différences de conditions expérimentales.

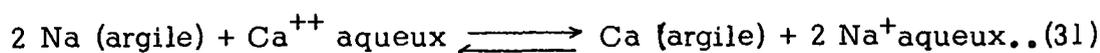
En pratique, le régime d'échange existe certainement, mais surtout dans les réservoirs calcaires. Mais dans ces aquifères, l'essentiel du débit de la nappe transite par des vides de faible dimension ; ce sont les fissures ou les chenaux qui en véhiculent la majeure partie. La surface de contact qui permet l'échange est alors réduite.

La dissolution du calcaire du réservoir doit donc provoquer une plus grande perturbation du rapport <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C que l'échange isotopique.

#### 1.2.4.4. Correction de la teneur en <sup>14</sup>C mesurée pour tenir compte de la dissolution de Ca<sup>o</sup>CO<sub>3</sub> supplémentaire :

La théorie de MÜNNICH est incomplète sur ce point, car il est fréquent de voir la teneur des eaux en ions carboniques augmenter sensiblement pendant l'écoulement dans l'aquifère pour atteindre quelquefois la sursaturation par rapport à CaCO<sub>3</sub>. Si l'on admet que la seule source de <sup>14</sup>C se trouve dans la zone d'alimentation, il apparaît donc un risque important de diminution du rapport <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C, qui n'est plus dû uniquement à la désintégration radio active.

A la suite des travaux de BACK & HANSHAW /40/, SCHOELLER /21/, PEARSON /35/, PEARSON & HANSHAW /35/, il est possible de connaître l'importance de cette perturbation. Il faut pour cela tenir compte des équilibres carboniques, des équations du paragraphe 1.2, mais aussi de l'incidence des échanges de bases sur ces équilibres provoqués par des effets de surface au contact des argiles, selon la réaction :



Cette réaction peut entraîner la dissolution de calcite supplémentaire si le réservoir peut en fournir, ou le départ de CO<sub>2</sub> libre, ou l'accroissement de l'agressivité de l'eau.

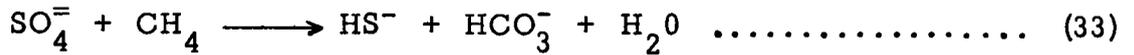
De même la combustion des matières organiques fossiles profondes peut avoir une influence sur ces équilibres, selon les réactions :

- en milieu oxygéné



Il est possible de contrôler cet effet, car le pH et la teneur en oxygène dissous diminuent d'amont vers l'aval.

- en milieu réducteur



par réduction des sulfates,

La possibilité existe de sursaturation importante de l'eau par rapport à différents carbonates : elle est mise en évidence notamment par BACK & HANSHAW /40/ dont est tiré le tableau 5.

Dans tous ces cas de perturbation, l'information  $^{13}\text{C}$  est particulièrement précieuse, c'est ainsi que PEARSON-HANSHAW /35/ ont observé une relation entre la saturation de l'eau par rapport à la calcite et la teneur en  $^{13}\text{C}$  des bicarbonates, la figure 20 en rend compte.

TABLEAU 5

Degré de saturation des ions carboniques dissous dans l'eau par rapport à différents minéraux d'après BACK & HANSHAW /40/

Localité	Calcite	Aragonite	Dolomite
X - Can	147	93	121
Chichen Itza	77	48	8
Hoctun	87	55	13
Leona Vicaria	93	59	36
Libre Union	115	73	54
Valladolid	293	184	312
Merida	106	67	56
Muna	311	196	799
Puerto Juarez	115	73	74
Cocoterros <sup>2</sup>	90	57	107
Isla Mujeres	240	151	1,106
1 $\frac{K_{iap}}{K_{eq}} \times 100$	$K_{iap} = \alpha \text{Ca}^{2+} \cdot \alpha \text{CO}_3^{2-}$ $K_{eq} = \text{constante à l'équilibre}$		

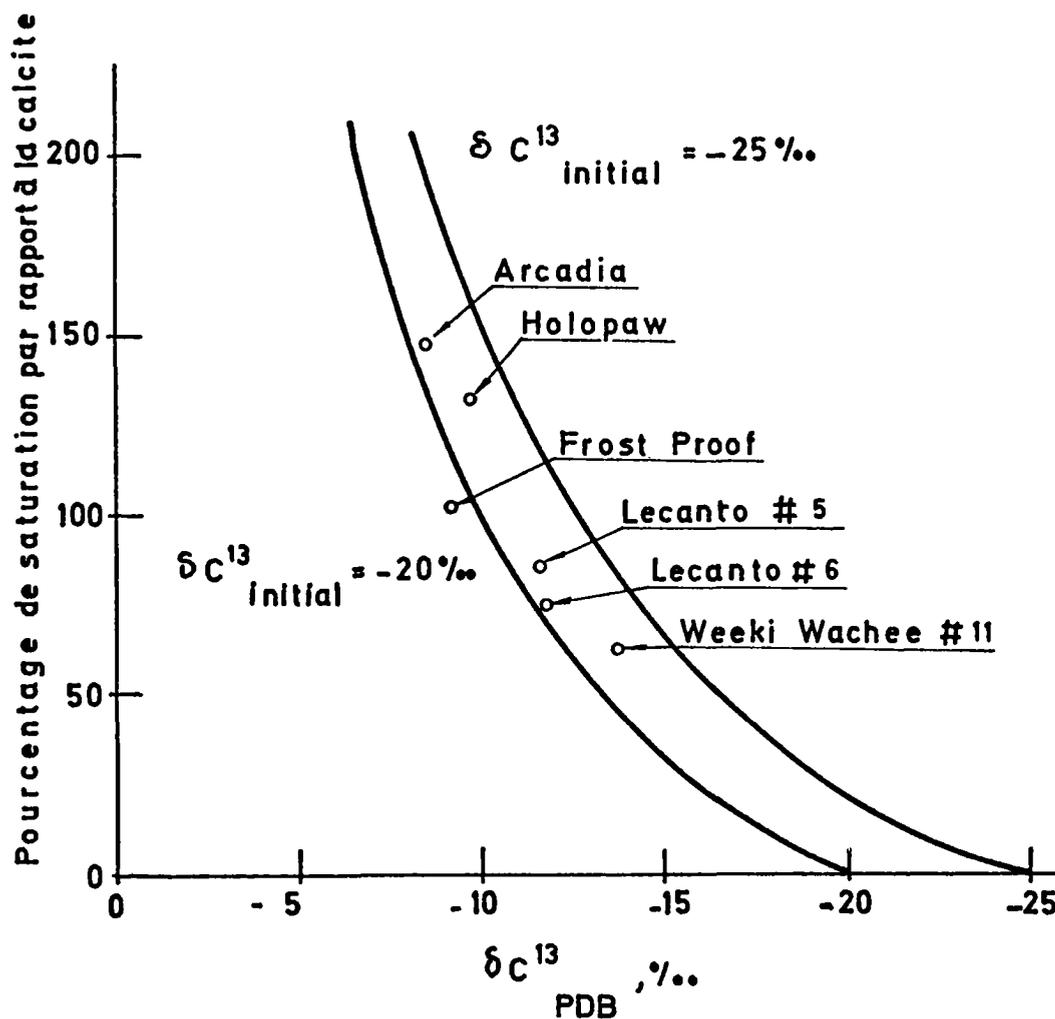


Figure 20

Relation entre le  $\delta C^{13}$  et le % de saturation en calcite dans l'aquifère de Floride

- Mise en évidence de perturbation isotopique par le rapport de  $\delta^{13}\text{C}$  aux ions carboniques

Cette "correction" ne se conçoit que pour un même système aquifère ; il est alors possible de connaître assez précisément la teneur en  $^{14}\text{C}$  à l'origine et de suivre son évolution dans la nappe.

PEARSON /34/ et figure 21 tracent la droite d'équation :

$$\log C_{\text{total}} = - \log (\delta^{13}\text{C}_{\text{sm}}) / - 25 + \log C_{\text{initial}} \dots\dots\dots (34)$$

$C_{\text{initial}}$  = teneur en acide carbonique total lors de l'infiltration

$C_{\text{total}}$  = teneur en acide carbonique total au point considéré

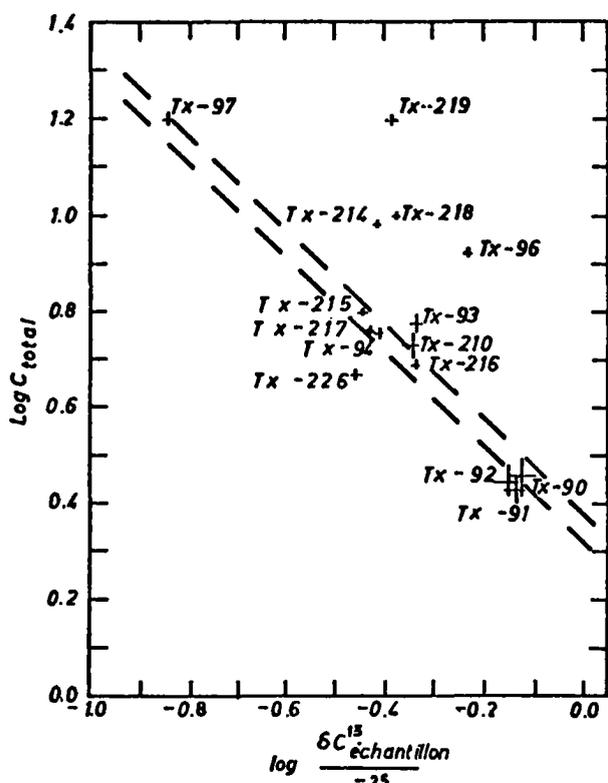
$$\text{avec } \delta^{13}\text{C}_{\text{sm}} = \left[ \text{pl}/(\text{pl} + \text{ls}) \right] \delta^{13}\text{C}_{\text{pl}} + \left[ \text{ls}/(\text{pl} + \text{ls}) \right] \delta^{13}\text{C}_{\text{ls}} \dots(35)$$

pl = acide carbonique total fourni à l'eau dans la zone d'infiltration et provenant des plantes

ls = acide carbonique total dissous, provenant du calcaire

La droite portée sur la figure 21 a une pente -1 et coupe l'axe des ordonnées au niveau du log de la valeur en acide carbonique total initial .

La répartition des points sur cette droite met en évidence l'existence d'éventuels échanges isotopiques ou de perturbation, par référence à la teneur en  $\delta^{13}\text{C}$ .



**Figure 21**  
d'après PEARSON /34/  
Comparaison du  $\delta^{13}\text{C}$  avec la teneur en ions carboniques totaux

- Correction de la teneur en  $^{14}\text{C}$  mesurée pour tenir compte de dissolution en  $\text{Ca CO}_3$

HANSHAW - PEARSON /35/ proposent une correction spécifique de l'aquifère, qui tient compte des variations de minéralisation le long d'un même filet liquide, entre deux points A et B :

$$\frac{A_B}{A_A} \times \frac{\sum m_{CB}}{\sum m_{CA}} = e^{-\lambda \Delta t} \dots\dots\dots (36)$$

dans laquelle :

- $A_B$  et  $A_A$  = activités du  $^{14}\text{C}$  mesurées en aval et amont  
 $\sum m_{CB}$  et  $\sum m_{CA}$  = somme de toutes les formes d'acide carbonique mesurée en B et A, exprimée en molalité  
 $\lambda$  = constante de décroissance du radiocarbone  
 $\Delta$  = différence de temps entre les points A et B.

- Correction de la teneur mesurée en  $^{14}\text{C}$  au moyen de celle en  $^{13}\text{C}$

HANSHAW - PEARSON /35/ proposent la relation :

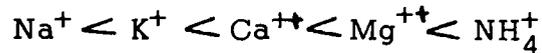
$$\frac{A_m}{1} \times \frac{(-25)}{(\delta_{ech}^{13}\text{C} + 0,5)} = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (37)$$

si  $A_m$  = activité mesurée et  $\delta_{ech}^{13}\text{C}$  = caractéristiques de l'échantillon; On prend habituellement -25 %, comme valeur de référence pour la teneur des plantes (voir aussi le tableau 3).

1.2.4.5. Fixation des ions carboniques et perturbation du chimisme de l'eau par échange au contact des argiles :

Une autre perturbation possible du chimisme de l'eau peut survenir au contact des argiles interstratifiées dans les niveaux sableux. Les argiles possèdent en effet des charges électriques de surface qui peuvent influencer sensiblement sur le comportement des ions dissous.

La figure 22 d'après GOUY in VAN OLPHEN /48/ montre comment peut se faire la répartition des charges en surface de l'argile et dans la solution ; Il se constitue une double couche ionique à l'interface ; les charges négatives sont liées à la structure de l'argile ; en conséquence seules les charges positives sont attirées et adsorbées sur la particule ; ceci montre que seuls les cations sont susceptibles de fixation . Mais il existe une différence de réactivité entre eux, selon la relation :



ce qui revient à dire que  $\text{Ca}^{++}$  remplace plus facilement  $\text{Na}^+$  sur l'argile et non l'inverse.

Cette propriété de fixation augmente lorsque la taille des ions complexes ou des molécules que forme le cation avec l'eau, augmente .

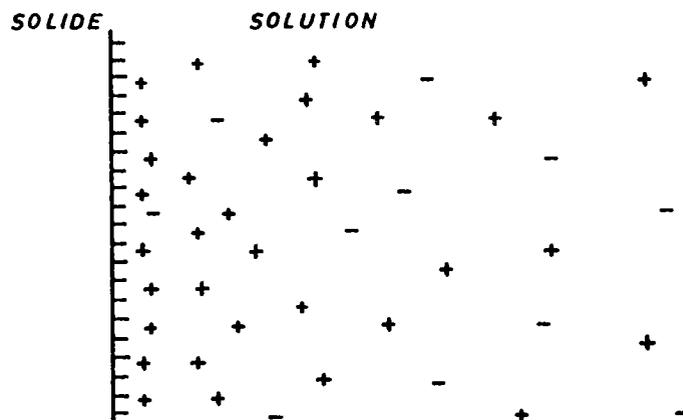
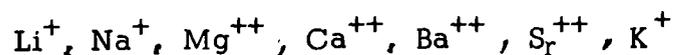


Figure 22 .

Les figures 23a, b, c, d'après SCHACHTSCHABEL in GRIM /49/ montrent que ce facteur d'échange entre le cation en solution et les argiles, croît le plus souvent dans l'ordre suivant :



On notera que cet échange est sensible particulièrement dans le domaine des fortes concentrations en sels de l'eau.

Echange ionique des argiles  
avec des chlorures alcalins  
et alcalino terreux d'après  
SCHACHTSCHABEL in /54/

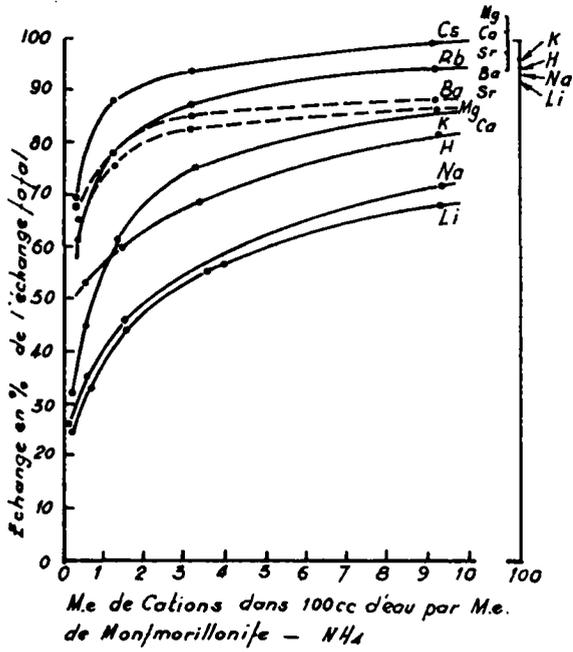


Fig. 23a - NH<sub>4</sub> montmorillonite

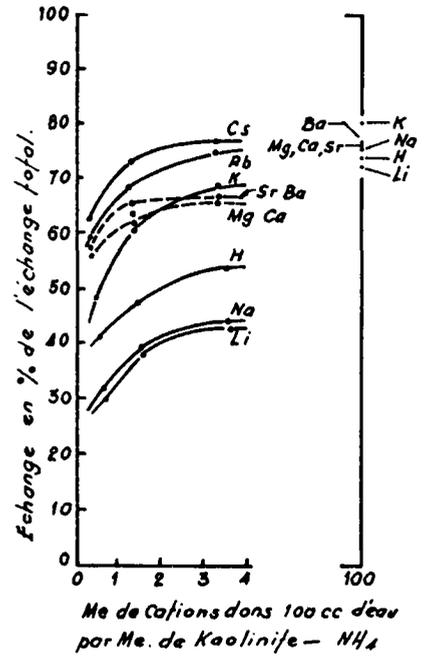


Fig. 23c - NH<sub>4</sub> kaolinite

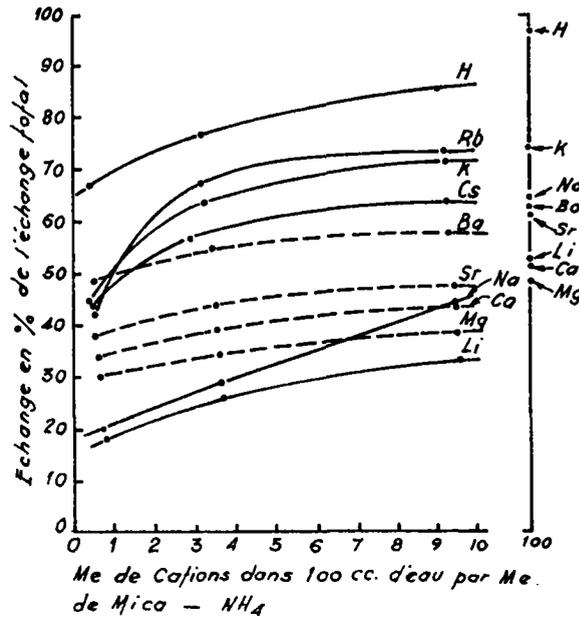


Fig. 23b - NH<sub>4</sub> muscovite

En définitive, les anions ne semblent donc pas directement perturbés au contact des argiles, observation en bon accord avec la pratique des expériences de traçage : les formes anioniques semblent peu fixées d'après SCHOELLER /26/.

Dans les conditions de nappes captives, l'ordre des degrés de mobilité définis par WHITE /50/ semble différent de celui donné par VAN OLPHEN :

- ions les plus mobiles :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{I}^-$
- ions beaucoup moins mobiles :  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{++}$ , ( $\text{Cl}^-$  en général)
- comportement variable :  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Br}^-$

Les travaux de LONG et NEGLIA /41/ montrent que l'eau interstitielle des argiles issues de différents gisements pétroliers est en équilibre chimique avec la phase minéralogique ; il apparaît notamment que pour les fortes teneurs en  $\text{K}^+$ , le minéral stable présent est l'illite, argile potassique. En conditions naturelles, les perturbations de chimisme entraînées par la percolation au travers des argiles ne semblent pas négligeables ; elles semblent affecter essentiellement le potassium et à un moindre degré les cations ; les anions, et particulièrement l'acide carbonique semblent beaucoup moins perturbés.

### 1.3. Le carbone 14, moyen d'étude de la cinétique des eaux souterraines

Les déterminations de  $^{14}\text{C}$  étant effectuées à partir de prélèvements réalisés en différents points d'un même aquifère, quelles informations nouvelles ces données chronologiques peuvent-elles apporter en hydrogéologie ?

On supposera ici que les conditions discutées en 1.2. sont connues et qu'il n'y a pas de limitation d'ordre géochimique à l'emploi de la méthode.

Nota : Les notions de traçage et celles de trajet, vitesse, débit, perméabilité, étant inséparables, le découpage tenté ci-dessous pour alléger le texte pourra paraître artificiel.

#### 1.3.1. Modalités d'écoulement de l'eau dans l'aquifère :

Le potentiel de gravité détermine le sens de l'écoulement souterrain. La roche réservoir offre une résistance à la circulation de l'eau, d'où des pertes de charge limitant la vitesse réelle d'écoulement. Les cartes piézométriques, tracées à partir des mesures de l'altitude du plan d'eau dans les ouvrages et les sources, permettent de déterminer le tracé théorique des filets liquides et de rendre compte des variations de gradient hydraulique dans l'aquifère.

Entre le trajet théorique des filets liquides et celui réel des molécules d'eau ou de traqueur, il existe une différence significative de trajectoire et de longueur de parcours, dont rend compte la figure 24 tirée de SCHNEEBELI /44/.

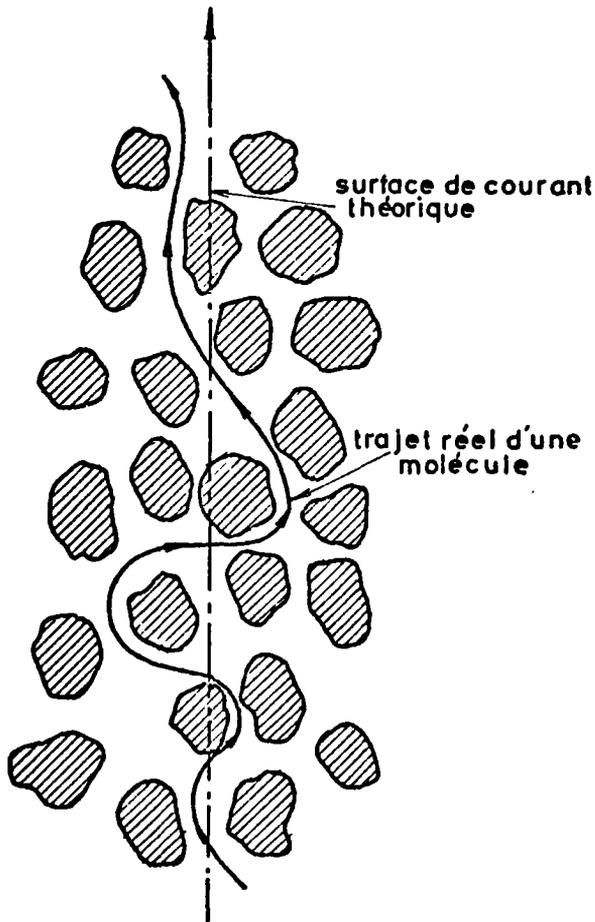


Figure 24  
d'après SCHNEEBELI /44/  
Comparaison des trajets d'écoulement  
théorique et réel, dans un plan du  
milieu poreux

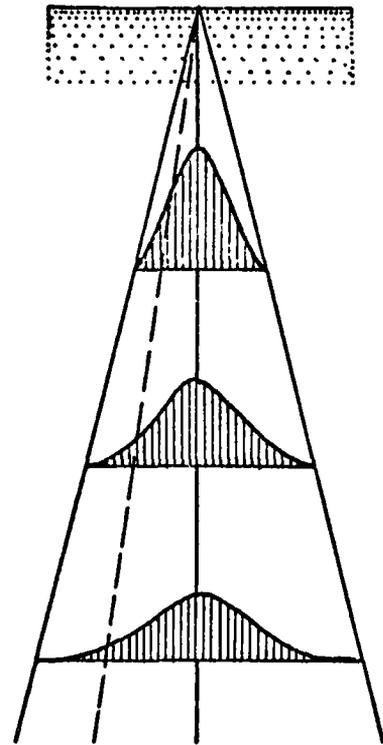


Figure 25  
d'après DANIEL /51/  
Cône de diffusion ou cône de  
dispersion

Par des méthodes de traçages en milieu très simplifié, quasi homogène, DANIEL /51/ a mis en évidence la dispersion de l'eau introduite en un point du milieu poreux ; la propagation s'effectue selon un cône dont l'angle au sommet est de l'ordre de  $6^\circ$ , ainsi que le montrent les figures 25 et 26.

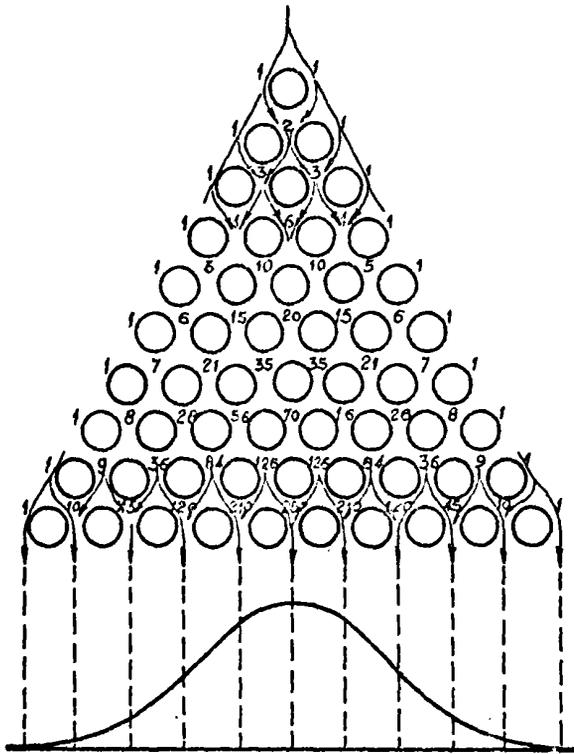


Figure 26 d'après DANIEL

Perpendiculairement à l'axe principal de l'écoulement, les débits dans le milieu poreux se répartissent selon une courbe de GAUSS et dans une proportion comparable à celle définie par la méthode du triangle de PASCAL (figure 26). Il apparaît figure 25 que la conservation du débit entraîne la diminution de la valeur maximale (ou mode de la courbe de GAUSS) le long de l'axe principal d'écoulement. La concentration décroît vers l'aval comme l'inverse du carré de la distance au point d'émission, ceci en écoulement uniforme. Dans cette étude, DANIEL admet que le traceur se comporte comme l'eau.

Pour un modèle moins simplifié, la propagation du traceur reste semblable à celle définie par ce modèle. Cependant, des variations de perméabilité importantes peuvent modifier sensiblement ce schéma, comme l'a mis en évidence THEIS /53/.

Les observations de DANIEL sont en bon accord avec celles de GOGUEL /52/ à propos de la diffusion de l'eau dans le milieu poreux. La conservation du débit dans un volume unitaire, exprimée par la loi de DARCY et rendue par l'équation de LAPLACE, implique que la hauteur piézométrique  $h$  est une fonction harmonique des coordonnées; ce qui revient à dire qu'une ligne de courant est perpendiculaire aux surfaces isopiézométriques qu'elle traverse successivement (figure 27).

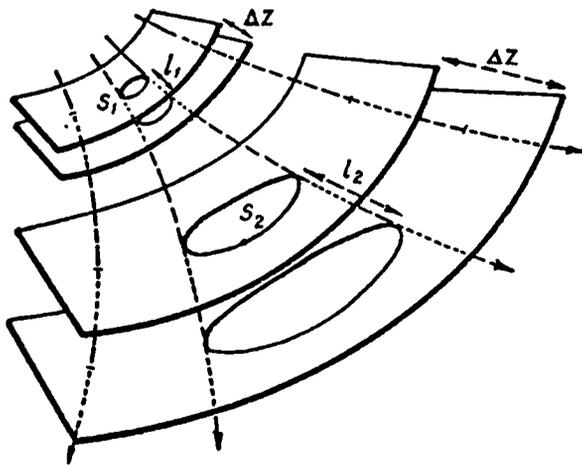


Figure 27 d'après GOGUEL

Relations entre l'écoulement des surfaces  
d'égale hauteur piézométrique et la section  
d'un tube de ligne de courant

Un tube de courant est déterminé par l'enveloppe des lignes de courant appuyées sur une courbe fermée, pour que le débit de ce tube reste constant, entre deux surfaces, sa section doit varier proportionnellement à la distance de ces surfaces. Les filets divergent en aval entraînant la diffusion dans le milieu poreux à partir de la zone d'alimentation (ils convergent ensuite vers l'exutoire). Cette diffusion est sensiblement plus forte dans le sens longitudinal que transversal. Il s'agit là d'une diffusion dynamique entraînée par un gradient de pression, beaucoup plus forte que celle statique, entraînée par un gradient de concentration.

On pourra donc considérer que le traceur injecté de façon continue, ce qui est le cas du  $^{14}\text{C}$ , n'a que de faibles gradients locaux de concentration ; en conséquence, sa diffusion sera comme celle de l'eau, considérée comme essentiellement dynamique. Si le traceur diverge, c'est parce que l'eau elle-même diverge.

### 1.3.2. Écoulements comparés de l'eau et des bicarbonates

Pour des raisons d'ordre géométrique (différence de taille), gravimétrique (différence de poids), électrique (différence de réactivité avec le terrain, complexation), les vitesses comparées des molécules d'eau et de traceur peuvent être différentes. Ces effets prennent toute leur ampleur pendant les durées importantes. Dans le cas des carbonates, les effets de solubilisation de la calcite doivent également intervenir.

De façon globale, DE WIEST admet l'existence d'un retard, produit par tout ou partie des phénomènes cités dans la relation :

$$V_i = \frac{V_w}{1 + K_d \frac{P_b}{n}} \dots \dots \dots (38)$$

avec  $V_i$  = vitesse du traceur  
 $V_w$  = vitesse de l'eau  
 $P_b$  = densité de l'eau  
 $n$  = porosité

$K_d$  = est un coefficient caractéristique du milieu, solide + liquide. Il est difficile de l'évaluer en conditions naturelles notamment dans les nappes captives.

Une évaluation en a été tentée par OLIVE et al. /54/ dont rend compte la figure 28.

L'âge de l'eau pourrait être supérieur, de l'ordre de 40 fois, à celui défini au moyen du traceur ; cette différence est sensiblement réduite dans la gamme des faibles durées.

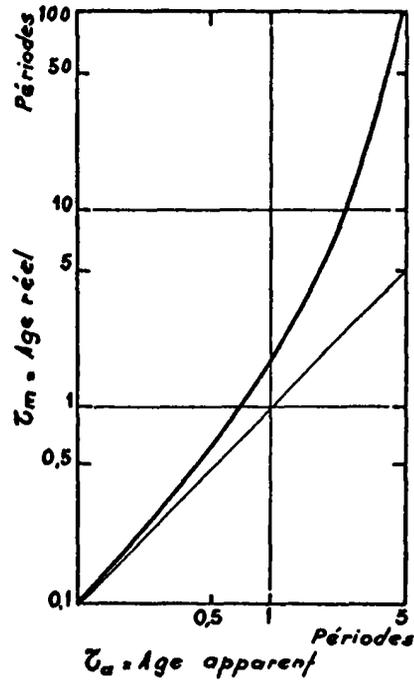


Figure 28

d'après OLIVE /54/

Relation'entre âge apparent et réel  
des eaux souterraines

### 1.3.3. Vitesse de l'eau dans l'aquifère

#### - Terminologie :

La vitesse de l'eau peut être définie, à la suite de CASTANY /45/ et SCHOELLER /26/ notamment :

- . Vitesse apparente ou vitesse massive de L.H.S. /56/ :

$$U_a = K \frac{h}{l} \dots\dots\dots (39)$$

c'est la vitesse de filtration à travers une section de terrains entre deux points d'une même ligne de courant

K = coefficient de perméabilité de DARCY

$\frac{h}{l}$  = gradient hydraulique

- . Vitesse effective (ou vitesse réelle)

$$U_e = \frac{K}{md} \frac{h}{l} \dots\dots\dots (40)$$

avec md = porosité effective dynamique

- . Vitesse de terrain :

$U_t$  mesurée avec l'aide d'un traceur entre deux points d'un même filet liquide

- . Vitesse réelle intergranulaire :

$U_g$  se rapporte au trajet réel parcouru par les molécules d'eau, dans les sables,  $U_g = 1,33 U_t$

- . Vitesse réelle capillaire :

$U_c$  serait définie en assimilant le pore à un tube capillaire, en régime laminaire, la répartition des vitesses est celle donnée par la figure 29. La vitesse capillaire pourrait être maximale ou moyenne suivant qu'elle est prise au centre ou au milieu du conduit.

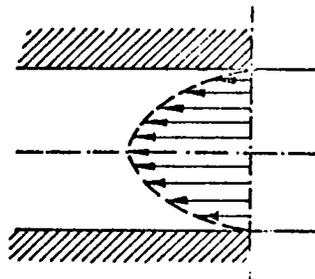


Figure 29

d'après CASTANY /45/

#### 1.3.4. Signification physique d'un échantillon d'eau

Quel sens physique attribuer, quelle représentativité pouvons-nous attribuer à un échantillon d'eau prélevé pour datation ?

Cet échantillon est constitué d'une somme de molécules d'eau ayant transité par une série de capillaires à des vitesses variables :

Si on admet une section moyenne de capillaire de 1 mm<sup>2</sup>, une vitesse de terrain de 365 m/an ou 1 m/j (vitesse de DARCY évaluée à 10 m/an) pour recueillir un échantillon de 100 l en 1 jour ( $Q = 10^{-1}$  m<sup>3</sup>/j) il faut donc recueillir le débit assuré par 10<sup>5</sup> capillaires.

Le "conducteur" qui a fourni l'échantillon a donc un volume infiniment plus grand que le capillaire moyen. Il est donc hors de question d'appréhender par ce procédé une "vitesse capillaire".

Cette "démonstration" ne fait que confirmer ce que l'on sait déjà : les débits d'exploitation de 1 à 100 m<sup>3</sup>/h tirés au moment de l'échantillonnage sont fournis par une hauteur importante de l'aquifère.

Compte tenu du fait que ces ouvrages sont conçus pour assurer un rendement maximal en eau, et qu'à cet effet ils sont souvent crépinés verticalement sur plusieurs dizaines de mètres ; sachant d'autre part que l'exploitation de la nappe a débuté depuis plusieurs dizaines d'années en certains points, un échantillon recueilli en un temps donné résulte donc du mélange en proportions indéterminées des débits intergranulaires de différents niveaux d'inégale perméabilité et donc d'inégale vitesse.

Un tel échantillon est donc essentiellement imparfait, encore qu'il soit difficile de dire dans quelle mesure. Néanmoins, on peut admettre en première approximation que le "conducteur" qui a fourni l'échantillon recueilli a une section dont la dimension est voisine de celle de l'aquifère. Il serait alors possible d'évaluer une vitesse ; elle ne peut être intergranulaire, le trajet des filets liquides n'étant pas exactement connu. La seule estimation du trajet est fournie par la méthode des gradients de pression hydraulique ; il ne peut donc s'agir que d'une vitesse de terrain qui serait très voisine de la vitesse effective de l'eau définie à partir de la formule de DARCY ; SCHOELLER /26/ admet d'ailleurs que  $U_e \simeq U_t$ .

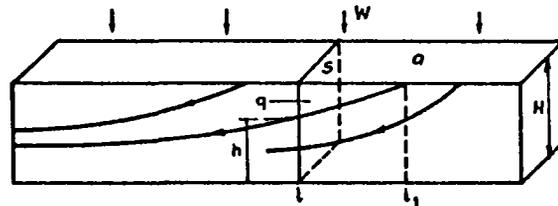
Cette approximation ne reste valable que dans un aquifère à perméabilité considérée comme homogène, dans le volume intéressé par l'appel crée depuis la mise en exploitation de l'ouvrage.

Compte tenu des gradients d'accélération créés le long des filets liquides au cours des écoulements, en régime influencé par les pompages, ou en régime naturel, du fait des variations du niveau de base de l'aquifère, la vitesse de terrain ainsi évaluée ne pourrait être qu'une résultante, également mal définie .

Dans une nappe libre, VOGEL /55/ et figure 30, définit à partir de la loi de DARCY, le temps de translation d'un front perpendiculaire à l'axe d'écoulement par la relation :

$$t = \frac{\mathcal{L}H}{W} \cdot \ln \frac{H}{h} \dots\dots\dots (41)$$

- $\mathcal{L}$  = porosité totale  
 H = puissance de l'aquifère  
 W = taux d'alimentation (débit)  
 a = surface de la zone d'alimentation



**Figure 30**

**Écoulement en nappe libre**

On peut admettre que :

$$U_t \approx \frac{K}{md} \frac{h}{l} = \frac{Q}{S md} \dots\dots\dots (42)$$

- si S = surface perpendiculaire aux écoulements  
 et Q = débit

Les méthodes isotopiques permettent de connaître  $U_t$ , il est donc possible d'évaluer l'un des trois paramètres K, md ou Q connaissant deux autres, et ayant par ailleurs h/l et S.

L'application de la relation (42) est soumise aux limites de validité de la loi de DARCY, à savoir :

- régime permanent avec écoulement laminaire
- conservation du débit entre deux points d'observation

Ceci implique que l'on considère la nappe en régime naturel, dans les zones non influencées par un prélèvement récent dans lesquelles l'écoulement est en régime transitoire.

### 1.3.5. Débit de l'eau d'infiltration dans la nappe

On peut admettre que le traceur est injecté dans la nappe avec un débit constant, et dans certains cas, que le débit d'eau est aussi constant. Connaissant le rapport des concentrations de traceur entre deux points d'un filet liquide, connaissant le débit  $q$  de traceur injecté, il serait possible de connaître  $Q$ , le débit d'eau injecté dans une section donnée, d'après la relation 43 établie par ANDRE /46/ :

$$Q = q \frac{C_1}{C_2} \dots\dots\dots (43)$$

ici aussi les conditions de validité sont semblables à celles de la loi de DARCY :

- écoulement en régime permanent
- conservation du débit entre les points examinés  
 $q = \text{volume de traceur} \times \text{section considérée} \times \text{temps}$   
 le temps est mesuré par décroissance radio-active du traceur entre deux points d'un même filet liquide
- la section serait assimilée à la zone d'alimentation
- volume du traceur injecté : concentration de traceur à l'origine  $\times$  volume d'eau utile dans l'aquifère, pour la section considérée.

Compte tenu de l'imprécision avec laquelle  $q$  serait connu, il ne semble pas réaliste d'employer cette relation.

### 1.3.6. Durée de renouvellement de la réserve de la nappe

C'est d'après MARGAT /15/ le nombre d'années théoriquement nécessaire pour reconstituer la réserve, c'est un rapport global :

$$\text{Durée de renouvellement} = \frac{\text{volume de la nappe}}{\text{débit}} \dots\dots\dots (44)$$

La durée de renouvellement ne peut être directement assimilée à l'âge de l'eau, car il s'agit d'une valeur sans dimension, comme à partir de paramètres hydrauliques approchés.

Les méthodes isotopiques permettent d'évaluer la durée de parcours entre deux points le long d'un même filet liquide dont le régime d'écoulement doit être permanent ; ce qui implique une conservation du débit. Pour réaliser cette condition il est nécessaire de rapprocher suffisamment les points de mesure pour négliger la variation du débit sous l'effet de la divergence ou de la convergence des filets liquides ; mais la marge d'incertitude affectant chaque mesure limite ce rapprochement à une distance minimale au-delà de laquelle les différences d'âges observées ne sont plus significatives. Ces conditions étant satisfaites, on connaît alors la durée d'écoulement entre deux points d'un filet liquide si la vitesse des molécules d'eau et de traceur sont comparables. Ensuite, pour connaître la durée de renouvellement définie en (44), il faudrait répéter cette opération sur les principaux axes d'écoulement traversant le réservoir, ce qui reviendrait à le quadriller d'un réseau d'observations. La valeur moyenne (pondérée en fonction des débits de chaque filet liquide) des données unitaires de renouvellement ainsi mesurées, correspondrait sensiblement alors à la durée de renouvellement définie en (44).

#### 1.4. Choix d'un aquifère en fonction des contraintes de la méthode

A la suite des discussions dans les paragraphes 1.1., 1.2 et 1.3, il a fallu choisir un terrain d'expérience, compte tenu des conditions suivantes :

##### 1.4.1. Contraintes spécifiques du traceur

Pour une première application, il fallait éviter un réservoir calcaire qui pourrait créer a priori des perturbations importantes, donc choisir un aquifère de type siliceux, qui soit relativement neutre sur le plan géochimique.

La taille du système devait être importante ; il fallait d'autre part un aquifère captif, de telle sorte que les "âges" rencontrés, couvrent a priori toute la gamme de la méthode au  $^{14}\text{C}$ , du plus récent au plus ancien.

Les déterminations de  $^{14}\text{C}$  devraient être accompagnées à celles de  $^{13}\text{C}$  et de  $^3\text{H}$  quand cela paraîtrait nécessaire. Il faudrait également effectuer des analyses chimiques complètes et des mesures in-situ, d'ions carboniques notamment ; toutes ces données devant se révéler utiles pour l'interprétation géochimique ultérieure.

Pour cet essai méthodologique, il était nécessaire que le terrain soit "proche" de façon à éprouver la technique d'échantillonnage, point délicat. Ces conditions garantissaient la meilleure liaison terrain-laboratoire .

##### 1.4.2. Contraintes relatives à l'hydrogéologie du système

Il fallait disposer de bonnes connaissances hydrogéologiques du système, afin de confronter les résultats isotopiques à ceux fournis par les méthodes plus classiques.

Notamment :

- pour la géologie du système :

- . nature des sédiments, répartition des porosités, variations de faciès, limites du système

- pour l'hydrogéologie :

- . perméabilités, limites hydrauliques, carte piézométrique, tracé des écoulements principaux ; historique des débits, localisation des zones de surexploitation.

1.4.3. Application de la méthode au  $^{14}\text{C}$  dans l'étude de la nappe de l'Albien du Bassin de Paris

Cet aquifère répondrait assez bien aux conditions énoncées en 1.4.1. et 1.4.2. En outre, des travaux d'hydrogéologie de LAUVERJAT /58/ et d'hydraulique souterraine de SAROCCHI & LEVI-LAMBERT /57/ étaient en cours au début de notre étude ; nous avons donc choisi ce système comme terrain d'expérience.

## 2. RAPPEL DES DONNEES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES CONCERNANT LA NAPPE DE L'ALBIEN DU BASSIN DE PARIS

Une série d'études hydrogéologiques a été faite sur ce sujet dont sont extraits les principaux éléments de ce chapitre. Plusieurs synthèses en études globales ont été faites en 1939, par LEMOINE, HUMERY, SOYER (ou L.H.S.) /56/, en 1962 par le Bureau de recherche de pétrole (documents inédits), en 1966 par SAROCCHI et LEVY-LAMBERT /57/ (Direction des carburants) en 1967 par LAUVERJAT /58/. Pour ce travail on bénéficiait donc de données hydrogéologiques récentes et immédiatement utilisables.

### 2.1. Géologie du réservoir

#### 2.1.1. Limites géologiques

Sous l'appellation de nappe captive des Sables verts, ou de nappe de l'Albien du bassin de Paris on désigne un aquifère bien connu historiquement, et néanmoins défini de façon peu précise :

- le réservoir correspond essentiellement à des terrains albiens mais aussi en dessous, à ceux du Barrémien ou du Néocomien, et latéralement à ceux du Cénomaniens ;
- géographiquement, ce réservoir s'étend dans le bassin de Paris, mais aussi dans celui de Londres (Greensands) et sous la Manche.

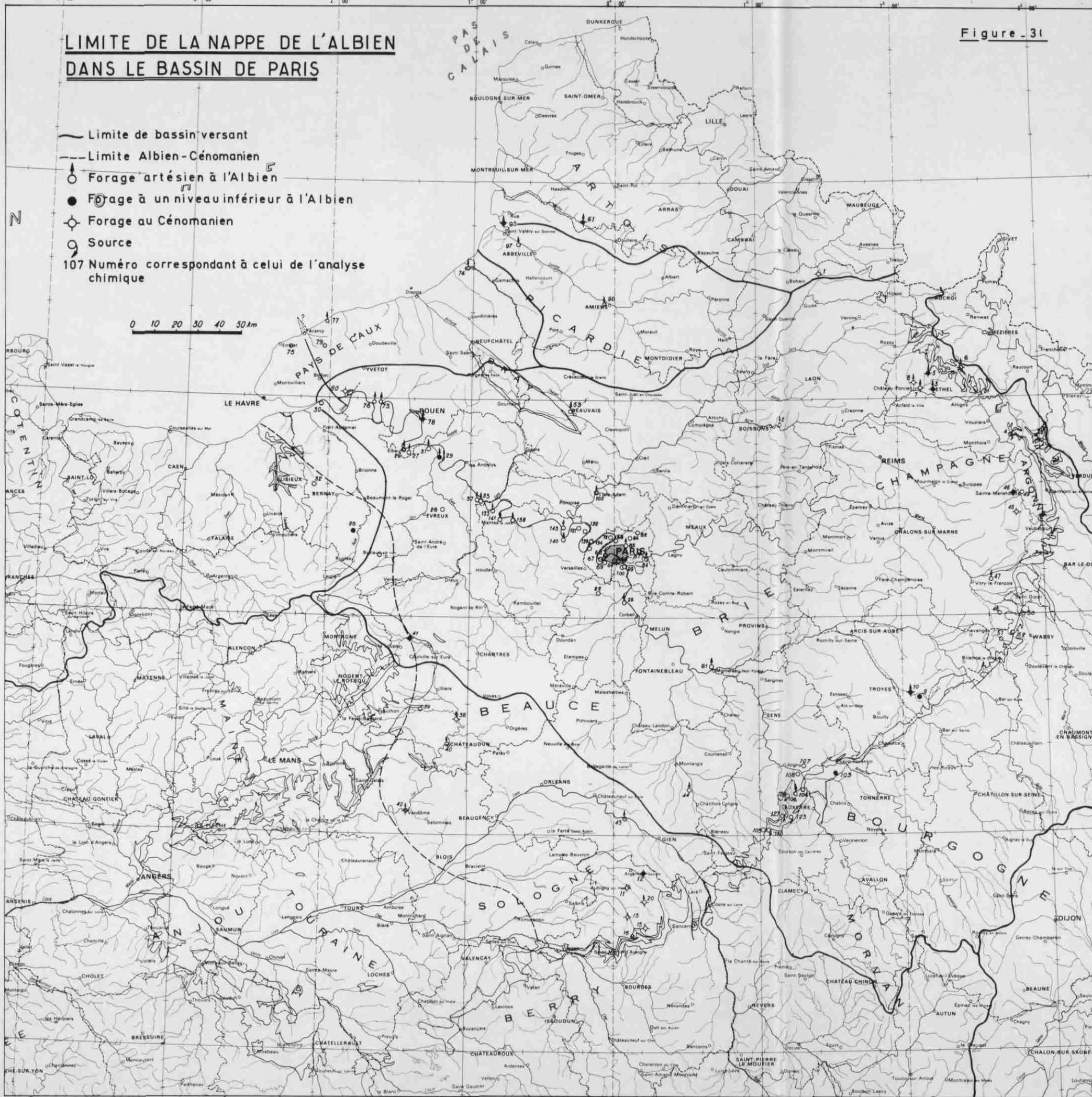
Les limites géologiques dans le bassin de Paris auquel nous bornerons notre travail, sont portées sur la figure 31, tirée notamment de ALBINET-COTTEZ /63/.

L'altitude moyenne des affleurements de cette nappe ne dépasse pas 250 m, comme en rend compte la figure 32 tirée de L.H.S. /56/ ; leur extension principale est constituée par l'auréole est et sud est du bassin ; on notera également quelques affleurements à l'embouchure de la Seine, ceux de la boutonnière du Bray, ceux sous la Manche et en Angleterre la surface importante des Greensands.

# LIMITE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN DANS LE BASSIN DE PARIS

- Limite de bassin versant  
 - - - Limite Albien-Cénomanién  
 ○ Forage artésien à l'Albien  
 ● Forage à un niveau inférieur à l'Albien  
 ⊕ Forage au Cénomanién  
 9 Source  
 107 Numéro correspondant à celui de l'analyse chimique

0 10 20 30 40 50 km



Les principaux fleuves qui drainent le bassin et exercent une influence à long terme sur la nappe, sont également figurés ; l'essentiel de ce travail a porté sur les bassins de la Seine et de la Loire, dans lesquels nous avons le plus de données géologiques.

### 2.1.2. Structure

C'est celle d'un vaste synclinal formé par la subsidence régulière du milieu de dépôt ; des auréoles concentriques d'âge de plus en plus récent marquent les fluctuations du dépôt. Une coupe NW-SE du système est donnée sur la figure 33 d'après LAUVERJAT in /62/, et un agrandissement concernant les terrains albiens à néocomiens en est fait dans la figure 34 d'après SAROCCHI- LEVY-LAMBERT /57/.

Des accidents tectoniques (faille de la Seine notamment) orientés NW-SE et des ondulations de même direction, perturbent cette répartition régulière ; ils sont visibles sur la figure 33 et contribuent à compartimenter l'aquifère.

### 2.1.3. Stratigraphie et sédimentologie

La série stratigraphique du centre du bassin de Paris est schématisée sur la figure 34 extraite des documents B.R.P. in CASTANY /59/ ; l'aquifère captif situé entre 700 et 900 m de profondeur est séparé des nappes superficielles par 400 m de craie peu perméable et d'argiles ; 200 m d'argiles sableuses l'isolent des nappes profondes.

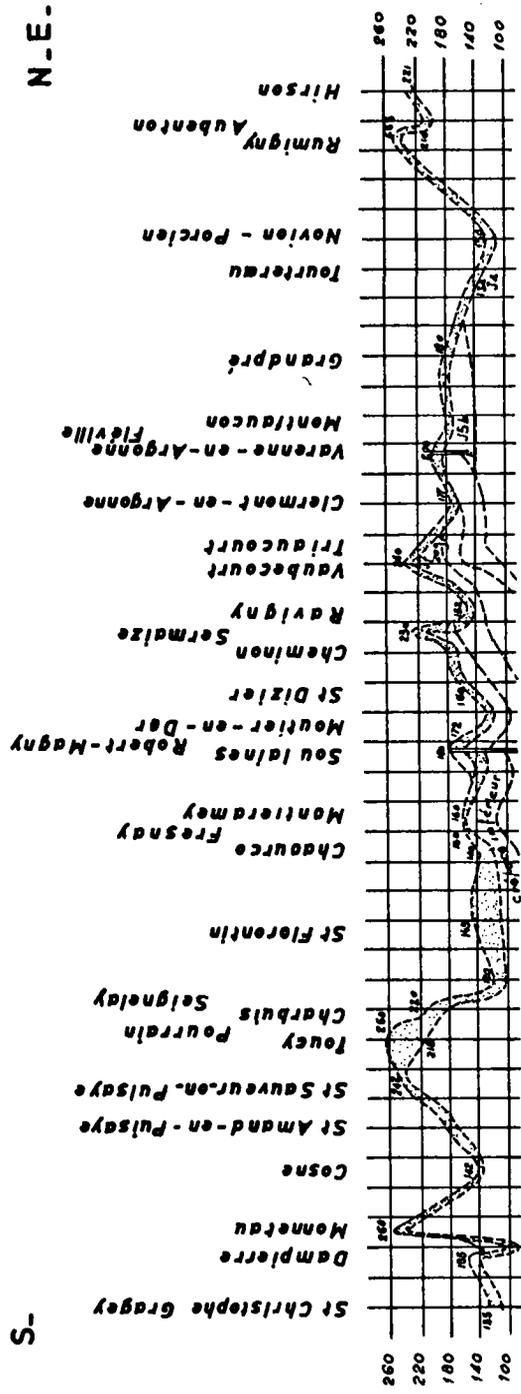


Figure 32

Altitude des sables Terlo Albiens sur affleurements

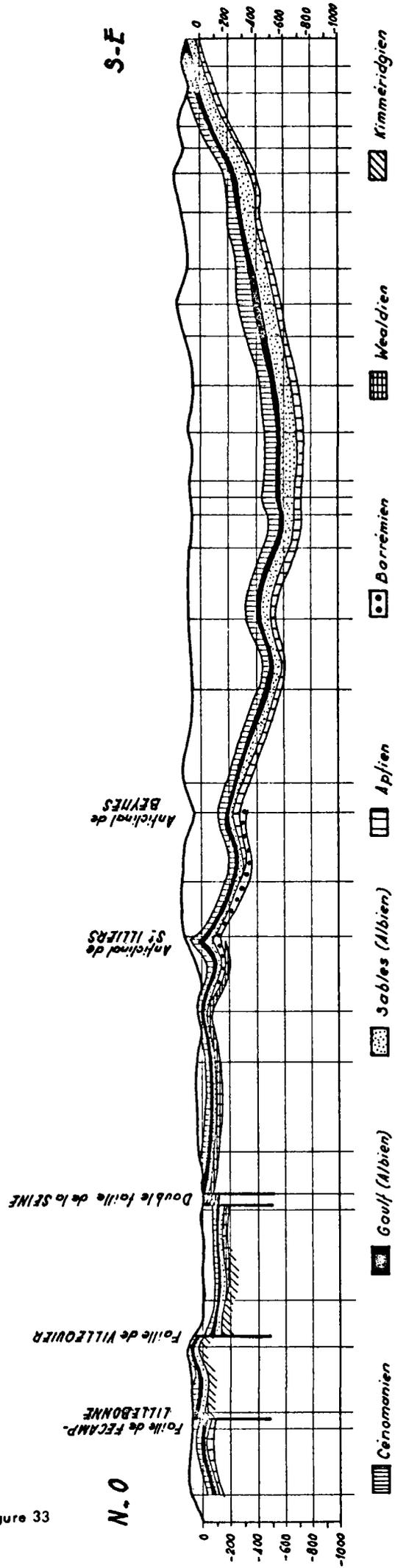


Figure 33

0 25 50 km.  
Echelle des longueurs

d'après J. LAUVERJAT

## PRINCIPAUX NIVEAUX AQUIFERES DU BASSIN PARISIEN...

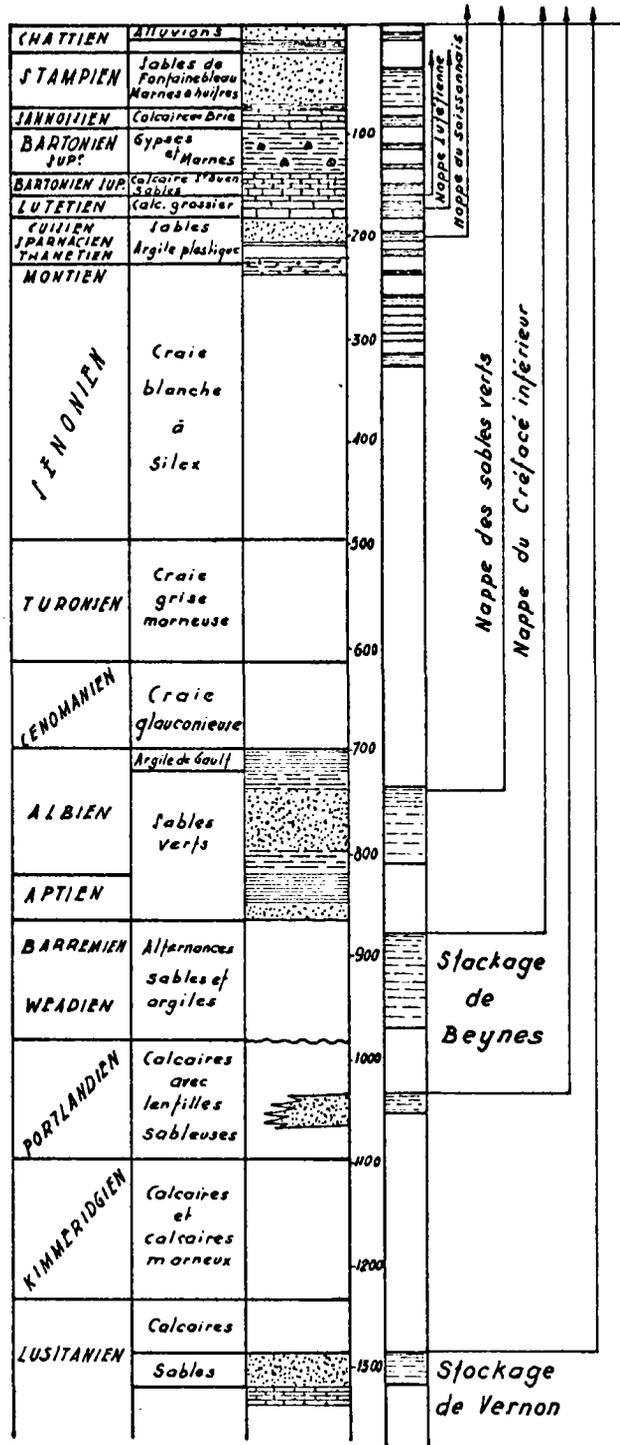


Figure 34

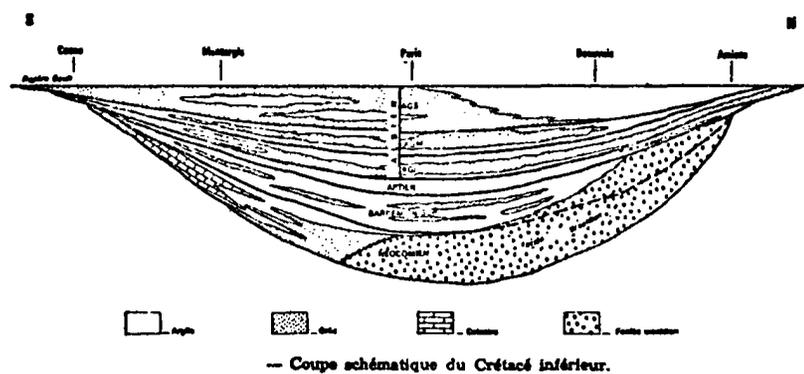
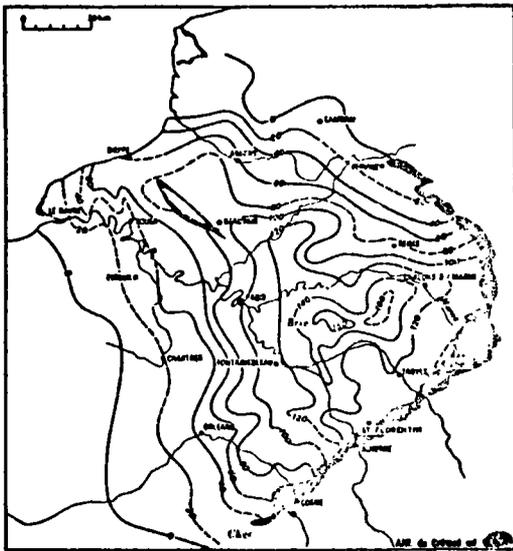


Figure 35

La figure 35 d'après SAROCCHI - LEVY-LAMBERT /57/ met en évidence les variations latérales de faciès à l'intérieur de l'aquifère lui-même, selon un axe N-S.

### 2.1.4. Epaisseur de l'aquifère dans le bassin

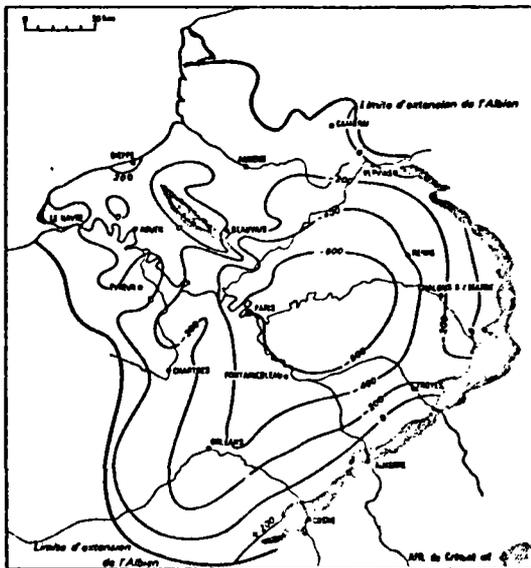
Elle est reportée sur la figure 36 extraite de /57/ ; elle atteint 160 m au maximum à l'Est de Paris, dans la fosse de Brie.



— Isopaches de l'Albien.

L'isopache 0 située à l'Ouest, sépare les terrains albien et cénomaniens ; en réalité il y a continuité de l'aquifère entre ces niveaux.

Figure 36



— Isobathes du toit des grès albiens.

Sur la figure 37 est portée la profondeur de la nappe ; la base du Gault est prise comme référence.

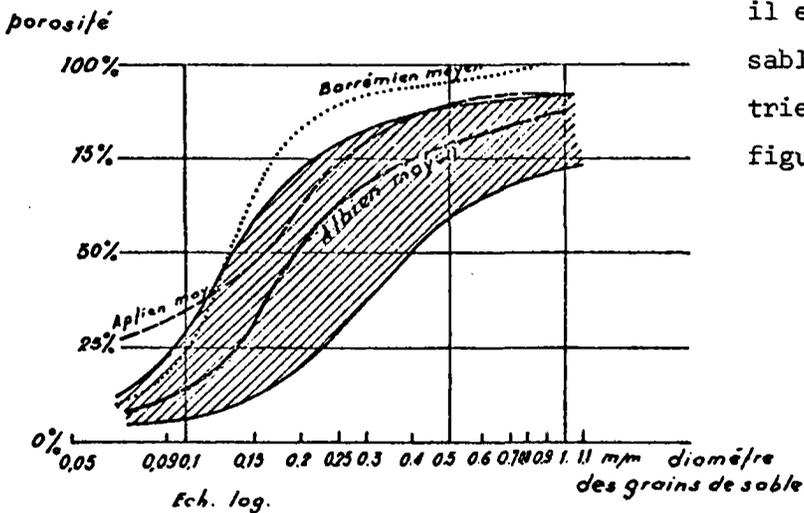
Figure 37

### 2.1.5. Composition minéralogique

Il n'existe pas d'étude minéralogique systématique des sédiments ; les carottes de forages étant dispersées; elle n'était plus réalisable lors de notre intervention.

Les renseignements ci-dessous sont essentiellement tirés de L.H.S. /56/.

#### Faciès perméable



il est composé essentiellement de sables siliceux dont la granulométrie moyenne est donnée sur la figure 38

granulométrie moyenne des sables albiens

Figure 38

De la glauconie donne à ces sables leur couleur verte ; c'est un silicate voisin des phyllites qui contient du fer (sous les formes  $Fe^{++}$  et  $Fe^{+++}$ ) et du manganèse ; cette glauconie s'est déposée en milieu marin réducteur ; elle est facilement altérable et peut libérer du fer et du manganèse.

De la pyrite,  $\text{FeS}_2$ , est également présente ; elle indique aussi des conditions de dépôt réductrices ; elle s'altère facilement en libérant du fer qui tend à donner des hydroxydes insolubles ; un affleurement frais est de couleur verte ; rapidement sa couleur devient rougeâtre ; on remarque parfois des niveaux grésifiés à ciment de fer.

Faciès peu perméable : il est individualisé (Gault, Armance) ou interstratifié dans les sables ; les silicates d'alumine argileux : phyllites, halloysite y abondent, avec présence d'oxydes de fer. La forme halloysite est une espèce hydratée de kaolinite, plus réactive que cette dernière ; ceci explique que l'on ait des échanges de base au centre du bassin.

On regrettera donc l'absence de données géochimiques systématiques, nous sommes donc contraints d'admettre que le réservoir possède une faible réactivité vis-à-vis des carbonates.

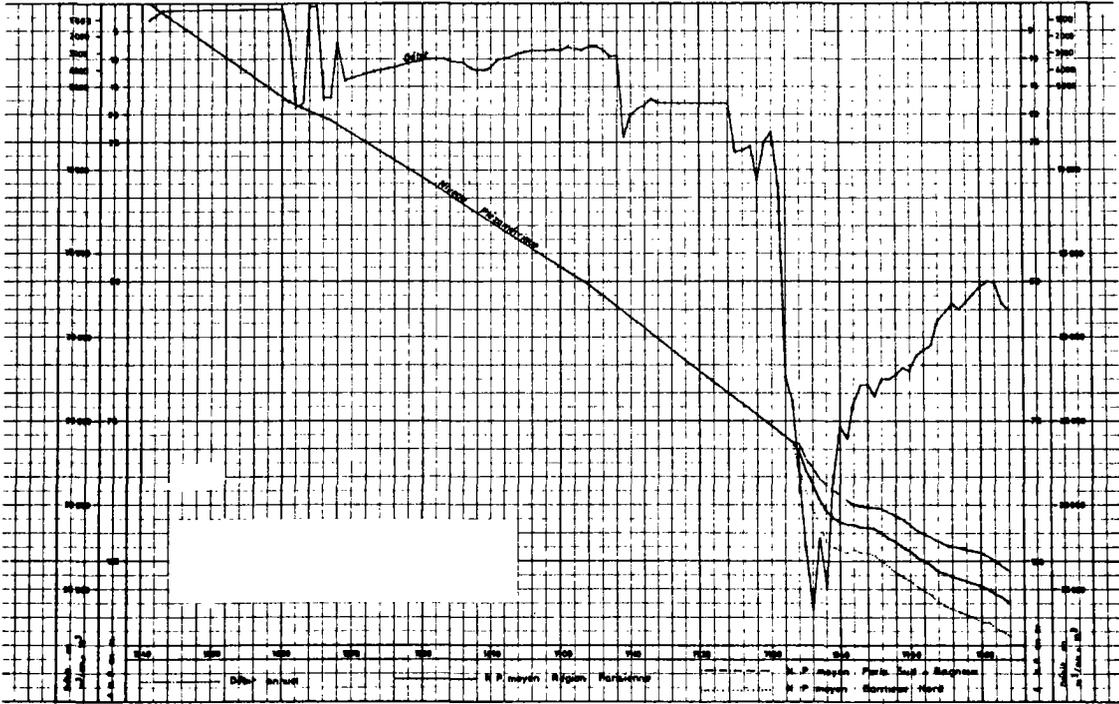
## 2.2. Hydrogéologie de la nappe de l'Albien

### 2.2.1. Evolution historique des débits de prélèvement

Nous ne ferons qu'un bref rappel des données nécessaires à l'étude isotopique.

La nappe a été découverte en 1841 dans le centre du bassin et exploitée intensivement de 1880 à 1930 ; la multiplication des ouvrages autour de Paris, a entraîné une diminution importante des niveaux (supérieure à 100 m actuellement), dont rend compte la figure 38 d'après LAUVERJAT /58/.

On a recherché la cause de ce phénomène dans un tarissement de l'alimentation des affleurements, bien que VIBERT /64/ ait rappelé dès 1937 qu'il résulte de la dépression créée par l'influence des nouveaux ouvrages.



— Baisse du niveau piézométrique en fonction de l'augmentation du débit global annuel dans la région parisienne.

figure 39

### 2.2.2. Cartes des pressions

Se trouvait donc posée de façon précise la question de savoir dans quel sens coule l'eau dans la nappe ; c'est dans ce contexte qu'il a paru utile de faire des déterminations isotopiques, l'information chronologique pouvant être précieuse pour trancher entre les deux hypothèses suivantes :

- 1) la nappe s'alimente par les affleurements du réservoir essentiellement au S-E et coule vers le N-W, en suivant un axe sensiblement parallèle à l'Yonne, puis la Seine, Son exutoire principal est à l'embouchure de la Seine et éventuellement sous la Manche.
- 2) La nappe ne s'alimente pas forcément par ses affleurements, mais à partir des dômes piézométriques ; cela implique un passage à travers les argiles du Gault, dans le sens descendant, pour l'alimentation, dans le sens ascendant pour l'exutoire ; celui-ci est alors plus large et comprend les vallées des grandes rivières.

Les données piézométriques dont nous pourrions disposer d'après B.R.P., CASTANY /59/, DICA /57/, LAUVERJAT /58/ et d'après des études plus localisées, PANETIER /61/ ont été regroupées sur la figure 40. Les renseignements ne sont pas toujours synchrones, pour l'ensemble des forages et dans la région parisienne les niveaux sont fortement influencés ; d'autre part, la répartition des points d'observation ne permet pas d'établir un document indiscutable.

Des dômes apparaissent, correspondant à des zones d'alimentation et des entonnoirs correspondant à des zones exutoires ; ils ne coïncident pas nécessairement avec les affleurements géologiques du réservoir.

Cette carte tend à montrer que la nappe peut être alimentée par son toit ou inversement qu'elle peut se vider à travers lui, sur l'ensemble de sa surface.

Les observations de PANETIER /61/ réalisées récemment en zone d'affleurement au S-E sont en bon accord avec cette interprétation.

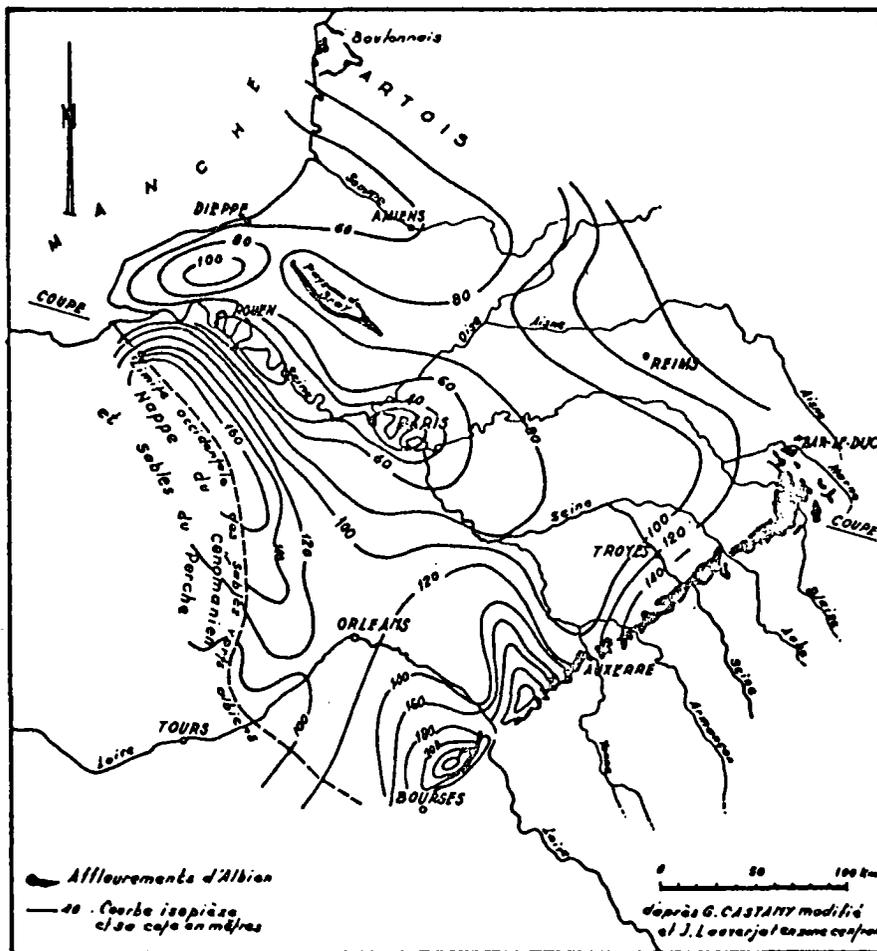
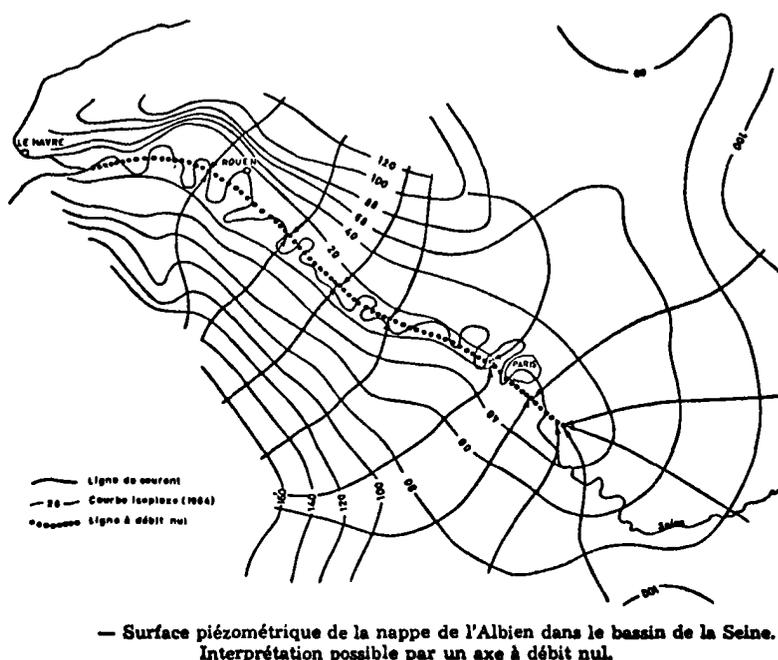


Fig. 40. Nappe de l'Albien - Carte de la surface piézométrique actuelle.

### 2.2.3. Ecoulements dans la nappe

Les filets liquides définis à partir des données piézométriques sont orthogonaux aux isopièzes ; le long de l'axe de la Seine cela revient à dire qu'il existe dans la nappe une limite à débit nul parallèle à la rivière, selon l'interprétation proposée par MARGAT /60/ sur la figure 41.



Dans ce schéma on admet donc que les filets liquides ont une composante verticale à leur extrémité amont et aval qui est prépondérante par rapport à la composante horizontale.

Cette hypothèse paraît plus facilement admissible si on se rapporte à l'échelle réelle des distances en présence :

longueur AUXERRE - LE HAVRE	: ≈ 300 000 m
épaisseur moyenne de la nappe	: ≈ 100 m
épaisseur maximale de la couverture	: ≈ 1 000 m.

Le rapport des échelles hauteur/longueur est donc respectivement de l'ordre de 1/3 000 et 1/300 ; sur une carte de l'aquifère à l'échelle du 1/1 000 000, le rapport de la distance à l'épaisseur du papier qui sert de support à la carte est du même ordre de grandeur. (30 cm pour 0,1 mm). Dans les coupes habituellement réalisées, l'échelle des hauteurs est fortement exagérée.

On conçoit donc que les échanges verticaux puissent exister, d'autant que les perméabilités entre peu perméable et aquifère varient seulement de 2 à 3 puissances de 10.

Cette hypothèse de drainance est rejetée explicitement par L.H.S. /56/, et SAROCCHI - LEVY - LAMBERT /57/ ; elle est admise implicitement par CASTANY /59/ et B.R.P. explicitement par MARGAT /60/.

#### 2.2.4. Conclusion

Pour l'application des méthodes isotopiques, il a fallu considérer la nappe de l'Albien-Cénomaniens comme un seul aquifère, comprenant principalement une zone centrale dont l'état originel est fortement perturbé par les prélèvements remontant à plus d'un siècle et des régions bordières à l'état quasi naturel. Du point de vue géochimique, il a fallu admettre que l'influence des réservoirs sur la minéralisation de l'eau des pores est négligeable.

### 3. ETUDE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN

#### 3.1. Les données

On relève dans la littérature que 200 ouvrages au moins captent l'eau de cet aquifère ; il s'agit de forages profonds souvent artésiens, de puits ou de sources ; les références les concernant ne sont pas toujours concordantes ; leur équipement est aussi très varié. Nombre de ces ouvrages ont vieilli, certains sont introuvables.

Il a donc fallu tenir compte de ces impératifs pour réaliser les prélèvements d'échantillons ; il en a donc résulté une diminution importante du nombre de puits d'observation ; à ces contraintes est venue s'ajouter la disposition réelle des forages ; ils ont été conçus pour répondre au besoin qui se manifestait le long de la vallée de la Seine surtout ; le réseau d'observation chimique est plus fourni que celui isotopique, car nous avons pu tenir compte de certaines analyses anciennes.

Il existe donc une certaine hétérogénéité dans la répartition des points de mesure d'un isotope à l'autre, entre analyses chimiques et isotopiques.

#### 3.1.1. Opérations *in situ* : prélèvement des échantillons

Les opérations *in situ* peuvent se décomposer de la façon suivante :

##### 3.1.1.1. Choix de l'ouvrage

Il est d'abord guidé par la position géographique du point dans l'aquifère, en fonction de l'objectif choisi : par exemple jalonner un axe SE-NW comme nous le désirions à l'origine. Vient ensuite la consultation de la coupe technique : est éliminé tout ouvrage qui favorise un mélange de nappes (par vieillissement ou par construction) ; les conditions

d'exhaure de l'eau sont ensuite examinées : l'eau doit être accessible en surface (par artésianisme ou pompage) et ne pas entrer en contact avec l'atmosphère (contamination en  $^{14}\text{C}$ ) pendant l'exhaure.

### 3.1.1.2. Reconnaissance *in situ*

Elle s'avère utile compte tenu de la vétusté de certains ouvrages ; il arrive donc que l'ouvrage soit abandonné, introuvable, devenu inaccessible ; il n'existe pas de robinet d'échantillonnage ... ; le diamètre de ce robinet n'est pas compatible avec celui de notre cuve, malgré une impressionnante série de raccords régulièrement enrichie ... ; l'eau est polluée par contact avec l'air, etc.

### 3.1.1.3. Les mesures *in situ*

Différentes mesures sont nécessaires sur place, soit parce que l'élément dosé risque d'évoluer entre le terrain et le laboratoire, soit parce que cette information est utile pour déterminer le volume d'échantillon nécessaire.

#### + Température :

Elle est mesurée avec un thermomètre à mercure au 1/10 de °C - entre le fond et la surface l'eau se refroidit sensiblement (de 2 à 3°C) ; quelquefois cette mesure est faussée par la présence d'un réservoir. Cette mesure est utile pour les mesures de l'agressivité de l'eau et de sa résistivité.

#### + Résistivité :

Elle est mesurée avec un pont de KOHLRAUSCH dont la précision est de l'ordre de  $\pm 2\%$  (appareil CHAUVIN et ARNOUX).

Cette détermination *in situ* permet de savoir si la minéralisation de l'eau a évolué entre terrain et laboratoire, par dégazage notamment (perte de  $\text{CO}_2$ )

pH :

Il est mesuré avec un pH mètre électronique à électrodes de verre et au calomel combinées ; la précision électronique possible est  $\pm 0,05$  pH ; la précision pratique est :  $\pm 0,15$  pH. La mesure *in situ* est seule valable, ce paramètre évoluant très rapidement en cours de transport ; elle est nécessaire pour évaluer le degré d'agressivité de l'eau.

Carbonates :

Les carbonates totaux ( $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{=}$ ) sont dosés par la méthode colorimétrique AFNOR, à l'héliantine et la phtaléine ; la précision est de l'ordre de quelques ppm en conditions de terrain.

Ces mesures sont indispensables pour évaluer le degré d'agressivité de l'eau et nécessaires pour connaître la quantité minimale d'eau à échantillonner pour la détermination du  $^{14}\text{C}$ .

La figure /42/ donne la quantité d'eau nécessaire en fonction de sa minéralisation, en supposant un rendement de 100 % ; en pratique il est de l'ordre de 80 % avec le système de la cuve à carbonate de baryum.

Fer :

Il est mesuré par la méthode de comparaison colorimétrique (système DEGREMONT-HYDROCURE) avec une précision de l'ordre de  $\pm 0,1$  mg/l dans la gamme de 0,1 à 2 mg/l.

Cette mesure est nécessaire car cet élément évolue pendant le transport et le fer est un indicateur de la nappe de l'Albien ; il est donc utile de disposer de cette information *in situ* dans certaines régions. (Ouest)

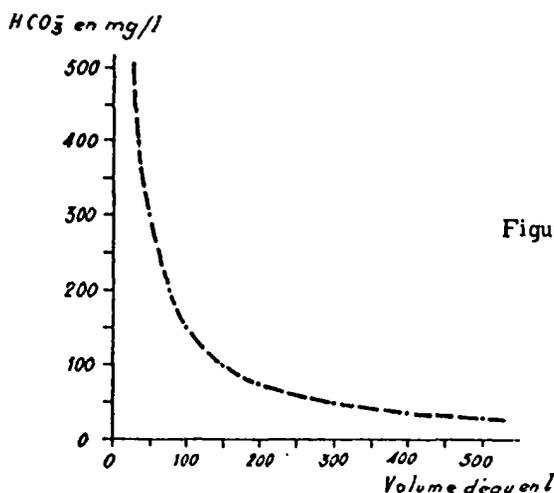


Figure 42.

#### 3.1.1.4. Prélèvement des échantillons

Pour analyse chimique : un flacon de deux litres suffit ; il est préalablement rincé avec l'eau de la nappe.

Pour analyse isotopique du tritium : un flacon de deux litres suffit, préalablement rincé et hermétiquement bouché.

Pour analyse isotopique du  $^{14}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  : deux méthodes ont été employées :

+ pour étalonnage ou vérification des faibles activités : des flacons de 50 l dont l'air est remplacé par de l'azote pour éviter un apport de  $^{14}\text{C}$  actuel sont remplis sur place et acheminés au laboratoire, où a lieu une acidification par HCl en excès : les bicarbonates présents sont transformés en  $\text{CO}_2$  et dégagés par cristallisation à  $-80^\circ\text{C}$  ou entraînés par un courant d'azote gazeux et piégés dans la baryte hydratée sous forme de carbonate de baryum.

+ méthode courante : la concentration des carbonates, sous forme de carbonate de baryum se fait *in situ* dans une cuve de 100 l (système A.I.E.A.) ; l'addition à l'eau de réactifs de soude purifiée et de chlorure de baryum permet la précipitation chimique du  $\text{CO}_3\text{Ba}$ . Cette réaction n'est pas complète (le rendement est de 80% en 3 heures), mais le risque de séparation isotopique paraît réduit.

Dans l'ensemble les opérations de prélèvement durent environ 1 jour par point ; cette durée dépend en partie de la minéralisation de l'eau, donc des quantités à traiter sur place ainsi que de la facilité d'accès à l'ouvrage.

#### 3.1.2. Mesures au laboratoire

Les échantillons sont recueillis pendant des campagnes qui durent environ 15 jours ; ils sont ensuite fournis aux laboratoires spécialisés :

- pour le  $^{13}\text{C}$ , c'est le Laboratoire de Géologie dynamique à la Faculté des Sciences - Paris VI, patronné par M. le Professeur GLANGEAUD, les analyses étant effectuées sous la direction de R. LETOLLE ;

- pour le  $^{14}\text{C}$ , c'est le Laboratoire de radiocarbone du C.N.R.S. à Lyon patronné par M. le Professeur FLANDRIN, les analyses étant effectuées sous la direction de J. EVIN (1) ;

- pour le  $^3\text{H}$ , c'est le Département Laboratoires du B.R.G.M. dirigé par M. GONI, les analyses étant effectuées sous la direction de A. MARCE ;

- pour les analyses chimiques, c'est le Département Laboratoires du B.R.G.M., les analyses étant effectuées sous la direction de MM GRILLOT et TOURNIER.

On ne fera ici qu'un bref rappel du principe des méthodes utilisées.

### 3.1.2.1. Méthodes de dosage du $^{14}\text{C}$

Le principe en est défini par LIBBY /1/ dès 1954 ; la technologie a fortement évolué depuis ; la méthode utilisée à Lyon a été décrite par EVIN et al /17/. Après la transformation chimique (cf.1.1.1.4) l'échantillon est introduit sous forme de  $\text{CO}_2$  dans un compteur proportionnel ; les impulsions électriques provenant de la désintégration du  $^{14}\text{C}$  sont sommées pendant une durée de l'ordre de 16 heures pour obtenir une précision de mesure suffisante ; l'influence parasite des rayons cosmiques est éliminée par une double couronne extérieure de compteur geiger selon le principe de l'anticoïncidence ; l'analyse permet de connaître un rapport d'activité isotopique de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ , qui est comparé à celui d'un étalon.

---

(1) avec qui j'ai publié l'essentiel des résultats isotopiques relatifs à cette étude, sous forme d'une note présentée au Congrès de l'A.I.E.A. portant sur l'utilisation des isotopes en hydrologie (1970) /65/.

### 3.1.2.2. Méthode de dosage du $^{13}\text{C}$

L'échantillon gazeux purifié sortant de la chaîne chimie du  $^{14}\text{C}$ , est introduit dans l'enceinte du spectrographe de masse ; les atomes de carbone sont ionisés, puis accélérés dans un champ électrique et déviés par un champ magnétique dirigé perpendiculairement à leur trajectoire ; la déviation est fonction de la masse des ions ; là encore on détermine un rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ; la méthode analytique est décrite par LETOLLE et al in /66/.

### 3.1.2.3. Méthode de dosage du $^3\text{H}$

L'échantillon d'eau est purifié puis on procède à une concentration du  $^3\text{H}$  par électrolyse différentielle ; l'accroissement de concentration varie de 8 à 15 ; la désintégration des atomes de  $^3\text{H}$  présents est alors mesurée en fonction du temps dans un compteur à scintillation liquide ; la méthode analytique est inspirée de celle adoptée à l'A.I.E.A. et au C.E.N.G.

### 3.1.2.4. Méthodes de dosages chimiques

Elles sont classiques, telles que décrites par RODIER /67/ ; dans certaines analyses anciennes,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  sont connus par différence, cependant que les  $\text{SO}_4^{=}$  étaient dosés par la méthode gravimétrique peu précise.

Résultats d'analyses isotopiques

NUM 1	LIEU 2	Nappe				Prélèvement date 7	Résultats			
		Nature 3	Profondeur 4	Nature ouvrage 5	Strati- graphie 5		Agressivité 8	<sup>14</sup> C % NBS ± 1σ 9	<sup>13</sup> C ‰ PDB ± 0,20 10	<sup>3</sup> H U.T. 11
12	BLANCAFORT	C	160	F	S + Cs	10/67	A	42,2 ± 1,3	-	bdf
13	CHAPELLE ANGILLON	C	-	F	Cs	11/67	A	34,2 ± 0,9	-	bdf
22	ORSAY	C	655	F	S1,2,3	1/68	A	7,8 ± 0,8	- 10,65	-
23	VIRY-CHATILLON	C	690	A	S1,2	8/69	A	1,2 ± 0,5	- 12,81	-
24	BEMECOURT	C	250	F	Ra	5/69	A	75,5 ± 1,0	- 13,7	-
28	GAUCIEL	C	275	F	S1	7/68	N	37,5 ± 0,8	- 9,85	-
30	MARAIS VERNIER	C	55	P	S1	7/68	-	36,9 ± 0,9	- 14,25	bdf
31	PONT DE L'ARCHE	C	195	A	S1	11/67	A	7,2 ± 0,7	-	bdf
32	THIBERVILLE	C	115	F	S1.K	5/69	A	65,3 ± 0,8	- 13,0	-
33	VERNON	C	105	A	S1,2	7/68	N	21,7 ± 0,6	- 8,25	-
39	BROU	C	185	F	S	5/69	A	52,3 ± 0,8	- 9,0	-
40	CHATEAUDUN	C	255	A	S	6/69	N	40,9 ± 0,8	- 5,7	-
44	MONTBOUY	C	355	A	S1	10/67	A	28,9 ± 0,5	-	bdf
46	CHAUDEFONTAINE	C	130	F	S + Cz	6/69	N	74,8 ± 0,9	- 13,35	10 ± 3
47	DOMPREMY	C	100	A	S	6/69	N	17,9 ± 0,9	- 9,0	bdf
48	NUISEMENT	L	120	F	S	6/69	N	84,3 ± 1,1	- 11,69	77 ± 8
*49	Ste MENEHOLDE	C	80	A	S + J	6/69	A	1,4 ± 0,4	-	bdf
50	HUMBECOURT	L	27	F	S + Ap	6/69	N	76,9 ± 0,8	- 12,10	208 ± 16
51	MONTIER-EN-DER	C	55	F	S + Ap	6/69	N	52,8 ± 0,8	-	37 ± 5
52	VOILLECOMTE	L	45	P	S + Ap	6/69	A	66,3 ± 1,0	- 14,80	bdf
66	PARIS O.R.T.F.	C	650	F	S	2/67	A	3,2 ± 0,5	- 12,2	-

NUM 1	LIEU 2	Nappe				Prélèvement date 7	Résultats			
		Nature 3	Profondeur 4	Nature ouvrage 5	Strati- graphie 6		Agressivité 8	<sup>14</sup> C	<sup>13</sup> C	<sup>3</sup> H
								% NBS ± 1σ 9	‰ PDB ± 0,20 10	U.T. 11
69	ISSY	C	500	F	S	7/69	A	3,7 ± 0,4	- 15,0	bdf
72	VILLENEUVE	C	780	F	S1,2	6/67	A	9,1 ± 0,5	- 10,46	bdf
*75	LES LOGES	C	225	F	S Cc	8/68	N	15,9 ± 0,4	- 9,60	-
76	LE TRAIT	C	135	A	S1	7/68	A	12,3 ± 0,7	- 10,9	-
77	St-PIERRE EN PORT	C	175	A	S1	8/68	-	16,0 ± 2,0	- 11,4	-
81	GRANDE PAROISSE	C	760	A	S	7/69	N	3,2 ± 0,5	- 10,19	bdf
81bis	GRANDE PAROISSE (marne)	C	760	A	S	7/69	-	1,3 ± 0,65	+ 0,88	bdf
82	AULNAY s/BOIS	C	835	F	S	3/68	A	2,7 ± 0,1	- 16,38	bdf
82	AULNAY s/BOIS	C	835	F	S	7/69	A	1,0 ± 0,4	- 9,5	bdf
82	AULNAY s/BOIS	C	835	F	S	10/69	A	2,6 ± 0,3	- 10,59	bdf
83	EPINAY	C	815	A	S	3/68	N	9,7 ± 1,4	- 13,19	-
84	NOISY LE GRAND	C	765	A	S	3/69	N	3,5 ± 0,5	- 14,1	-
84	NOISY LE GRAND	C	765	A	S	8/69	N	3,7 ± 0,4	-	-
85	PANTIN	C	810	F	S1,2,3 Ba	12/66	N	6,4 ± 0,1	- 15,25	-
95	LE CROTOY	C	370	A		7/68	-	31,7 ± 0,85	- 17,1	-
100	IVRY	C	560	F	S1,2	1/68	A	8,5 ± 0,1	- 13,26	-
104	CHICHERY	C	90	F	S1,2	7/69	A	58,9 ± 1,1	- 13,0	bdf
104	CHICHERY	C	90	F	S1,2	4/66	A	53,2 ± 1,8	- 17,7	bdf
105	DRACY	C	75	F	S1	7/69	A	66,7 ± 1,08	- 13,88	10 ± 3
106	FLEURY	C	50	A	S3	11/67	N	14,9 ± 0,7	-	bdf
107	MIGENNES	C	100	F	S1	10/67	A	46,6 ± 1,0	-	bdf
107	MIGENNES	C	100	F	S1	7/69	A	67,3 ± 0,9	-	21 ± 4
122	PARLY-BERNIERS	L	0	S	S1	10/66	A	91,7 ± 1,0	-	27 ± 5

NUM 1	LIEU 2					Prélèvement date 7	Résultats			
		Nature 3	Profondeur 4	Nature ouvrage 5	Strati- graphie 6		Agressivité 8	<sup>14</sup> C % NBS ± 1σ 9	<sup>13</sup> C ‰ PDB ± 0,20 10	<sup>3</sup> H U.T. 11
123	PARLY-CHENONS	L	10	P	S1	10/66	A	94,7 ± 0,7	-	77 ± 8
127	POILLY	L	0	S	S2	10/66	N	91,7 ± 1,0	-	9 ± 3
132	ACHERES	C	600	F	S1,2,3	3/68	A	8,9 ± 0,2	- 16,30	-
138	MANTES	C	225	A	S1	3/66	N	11,8 ± 1,4	-	-
139	LE PECQ	C	700	F	S1,2,3	12/66	A	6,4 ± 0,1	- 15,25	-
144	BARLIEU	C	160	F	Ba S + Cs	10/67	-	82,1 ± 1,3	-	bdf
*145	HONFLEUR	L	0	S	Cs	7/68	A	78,6 ± 1,4	- 13,31	12 ± 3
146	NEUILLY	C	100	A	S1	3/69	-	15,9 ± 0,6	- 14,97	bdf
146bis	NEUILLY (Marne)	C	100	1	S1	3/69	-	0,6 ± 0,5	- 1,7	bdf
148	CHAMPVALLON	C	-	A	S1	3/69	I	13,6 ± 0,7	- 12,81	bdf
*149	GRAND-CHAUMONT	L	10	P	Cc	7/69	I	95,6 ± 1,1	- 13,22	-
*150	FROVILLE	L	-	P	T	7/69	I	72,5 ± 0,9	- 12,72	-
*151	APPOIGNY	C	70	A	Ba	3/69	I	0,6 ± 0,4	- 18,29	bdf
*151bis	APPOIGNY	C	70	A	Ba	10/67	I	11,6 ± 0,8	- 15,3	bdf

Légende dans les colonnes :

1 : numéro correspondant à celui de l'annexe et des traitements statistiques.

\* : nappe autre que l'Albien.

3 : C : nappe captive ; L : nappe libre.

4 : Profondeur de l'aquifère par rapport au sol.

5 : Nature de l'ouvrage : F : forage pompé ; A : forage artésien ; P : Puits ; S : source.

6 : Stratigraphie : S : Albien non différencié en : S1 : Albien > ; S2 : Albien moyen ; S3 : Albien < ; Cs : Cénomaniens sableux ; Ccz : Cénomaniens gèze ; Cc : Cénomaniens craie ; Ap : Aptien ; Ba : Barrémiens ; T : Turonien ; J : Jurassique ; Ra : Rauracien ; K : Kiméridgien.

8 : Indice d'agressivité (HEM) : I : eau incrustante ; A : eau agressive ; N : eau neutre.

### 3.1.3. Les résultats

#### 3.1.3.1. Résultats d'analyses isotopiques

Ils sont regroupés dans le tableau 6 ; certaines valeurs, essentiellement de  $^{13}\text{C}$  ont été rajoutées par rapport au tableau publié à Vienne /65/.

Plusieurs déterminations ont été faites en certains points ; la variabilité des résultats obtenus à Migennes (107) a une explication hydrologique : les pompages intensifs de l'été font appel à l'eau récente des alluvions de l'Yonne par rabattement du niveau de l'aquifère captif, dont le réservoir affleure sous ces alluvions ; les résultats de  $^3\text{H}$  sont en bon accord avec cette hypothèse.

Dans la gamme des faibles activités, au centre du bassin, les variations de résultats peuvent s'expliquer par une légère pollution survenant soit au cours du prélèvement, soit lors de la filtration des carbonates ; des contrôles effectués avec beaucoup de précautions (l'eau étant directement traitée au laboratoire de radiocarbone, sans contact avec l'air) ont montré que la seconde étape pouvait être critiquable, elle a été supprimée ; cependant, les valeurs trouvées ne sont nulles en aucun cas : il y a toujours une activité en  $^{14}\text{C}$  significative au centre du bassin.

#### 3.1.3.2. Résultats d'analyses chimiques

Ils sont regroupés en annexe dans les tableaux imprimés après calcul par l'ordinateur, à l'aide du programme HYCH mis au point en collaboration avec P. SOLETY /68/.

Les analyses proviennent notamment des laboratoires du B.R.G.M., de la C.G.E., de la S.L.E.E., du Service de contrôle des eaux de la Ville de Paris. Elles ont été effectuées à des dates variables indiquées par 2 chiffres en colonne A et signalées notamment dans la littérature par

L.H.S. /56/, LACHAIZE /69/, LAUVERJAT /58/, ROUX /70/. Chaque analyse est identifiée par un numéro qui la caractérise sur les diverses figures de ce chapitre ; le classement adopté est départemental ; de plus, une série de groupes ont été définis, à partir d'un classement hybride, à la fois géologique et hydrologique, dont voici le code :

Aquifère albien - -cénomanien	}	1. affleurements	}	Bassins versants
		2. proche captivité		de la Seine
		3. captivité maximale		et la Loire
	}	4. affleurements ou proche captivité	}	Bassin versant
		5. captivité maximale		de la Somme
		8. aquifère >		à la nappe principale
		9. aquifère <		à la nappe principale

Dans la colonne numéro de code, le niveau stratigraphique est indiqué :

A	pour Albien vrai ou assimilé
J	Jurassique
RA	Rauracien
CE	Cénomanien
B	Barrémien
K	Kimméridgien
BT	Bathonien
BJ	Bajonien
CO	Corallien
SQ	Séquanien
TR	Trias
TU	Turonien

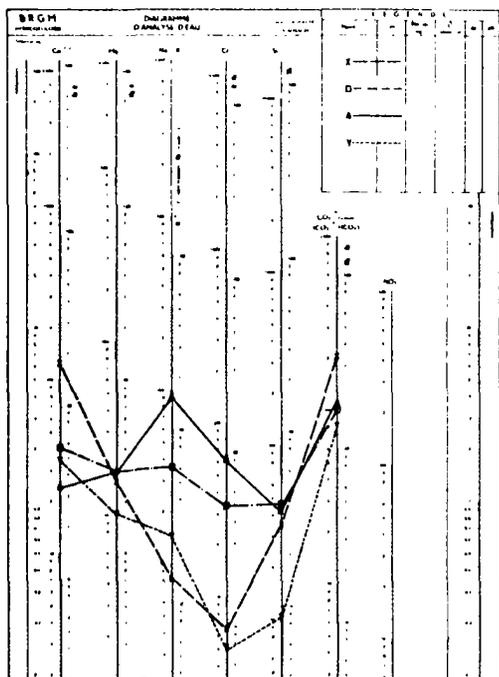


Fig 43a.

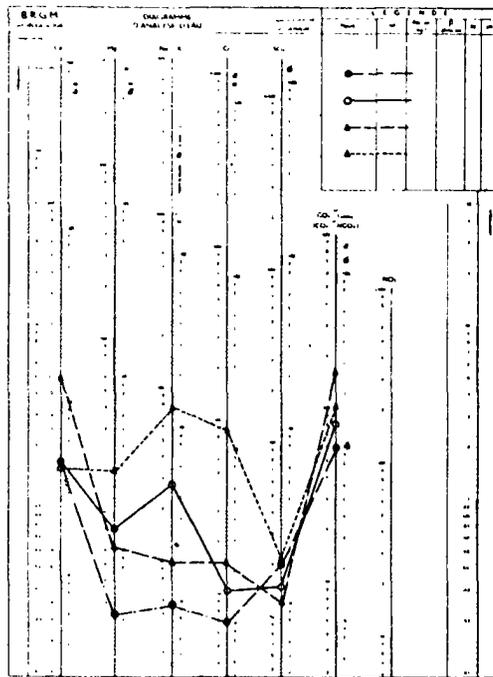
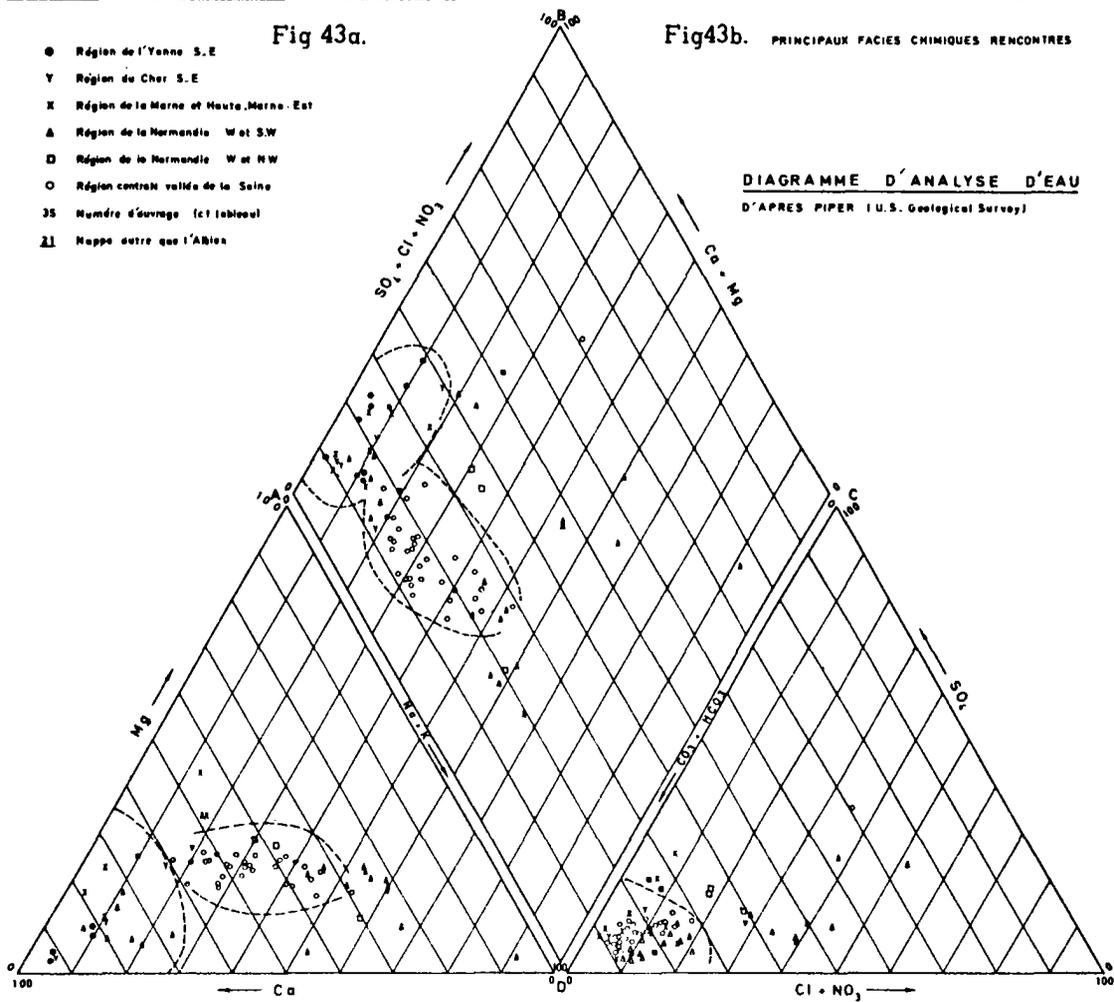


Fig 43b. PRINCIPAUX FACIES CHIMIQUES RENCONTRES



## 3.2. Interprétation des résultats hydrochimiques

### 3.2.1. Méthodes hydrochimiques

#### 3.2.1.1. Diagramme logarithmique

Elaboré par SCHOELLER il a été adapté par BERKALOFF ; il existe une notice d'utilisation rédigée par MARGAT /71/ ; il permet de comparer un petit nombre d'analyses caractérisées par leurs éléments majeurs ; les valeurs absolues sont prises en compte, exprimées en meq/l ou mg/l, pour une large plage de concentration.

Deux séries d'analyses types sont présentées sur les figures 43a et b :

+ le faciès hydrochimique de l'amont piézométrique correspondant souvent à une zone de captivité, est toujours de type bicarbonaté calcique, quelle que soit la situation géographique dans le bassin : Est, Sud Est et Ouest ..

++ le faciès hydrochimique de l'aval piézométrique qui correspond à un degré de captivité plus ou moins avancé ; il est de type bicarbonaté sodique, d'autant plus accusé que le trajet probable parcouru dans la nappe est plus long.

Le long de l'exutoire principal Yonne-Seine, le faciès bicarbonaté sodique évolue sensiblement vers un type chloruré sodique à proximité de la mer. La minéralisation totale évolue peu, augmentant à peine vers l'aval environ (1,5 fois celle de l'amont). Il en va de même des ions carboniques (présents physiquement sous forme  $\text{HCO}_3^-$  et exprimés sous forme de  $\text{CO}_3^{=}$ ).

#### 3.2.1.2. Diagramme trilinéaire

Ils prennent en compte des valeurs relatives des éléments majeurs, ramenées en % du total des anions et des cations respectivement ; il est ainsi possible de comparer des minéralisations de valeur très différente.

Ce diagramme élaboré par PIPER /72/ a été adapté par MONITION /73/ ; complètement indispensable du précédent, il permet, en remplaçant chaque analyse par un point, d'examiner simultanément un grand nombre d'échantillons et de mettre en évidence des évolutions géochimiques.

La figure 44 montre deux types de faciès : l'un bicarbonaté calcique, correspondant aux dômes piézométriques répartis dans le bassin, l'autre bicarbonaté sodique, correspondant aux zones d'artésianisme actuel ou originel ; un petit nombre de points supplémentaires a été inclus qui correspondent à des niveaux différents de l'Albien ; ils paraissent beaucoup plus dispersés que les échantillons précédents.

### 3.2.2. Analyse statistique multivariante

Deux méthodes d'analyse factorielle ont été utilisées : celle des correspondances du Professeur J.P. BENZECRI /74/, celle en composantes principales, dans un but purement démonstratif, ici. Un exemple plus complet d'utilisation de ces méthodes en hydrochimie a été exposé en collaboration avec P. CAZES et P. SOLETY /75/.

#### 3.2.2.1. Analyse factorielle des correspondances

Elle est effectuée au moyen du programme d'ordinateur AFACØ décrit par SOLETY-VUILLAUME /68/ avec adaptation sur traceur de courbe. Par ce moyen, il est possible de comparer un grand nombre d'échantillons caractérisés par plusieurs paramètres, qui peuvent être chimiques (ce que permet le diagramme trilineaire pour l'ensemble des majeurs) ou également physiques, géologiques, etc. ; chaque série de valeur pour un paramètre donné est normée, puis centrée, ce qui permet de comparer des valeurs relatives.

Les figures 45a et c montrent le plan des axes 1-2 et 1-3 ; ils dégagent des correspondances entre 6 variables :  $Ca^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $CO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $CS_4$  ( $Cl^- + SO_4^-$ ) et montrent simultanément la répartition des échantillons des groupes 1-2-3-4 tels que définis au 3-1-3-2 ; les figures 45b et d sont des agrandissements des précédentes ce qui permet d'identifier chaque échantillon par son numéro et celui de son groupe.

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

SCALE 1 = 1000000

DIRECTION 1 = 0.058 DIRECTION 2 = 0.021  
POURCENT 1 = 65.18 POURCENT 2 = 23.99

2

1

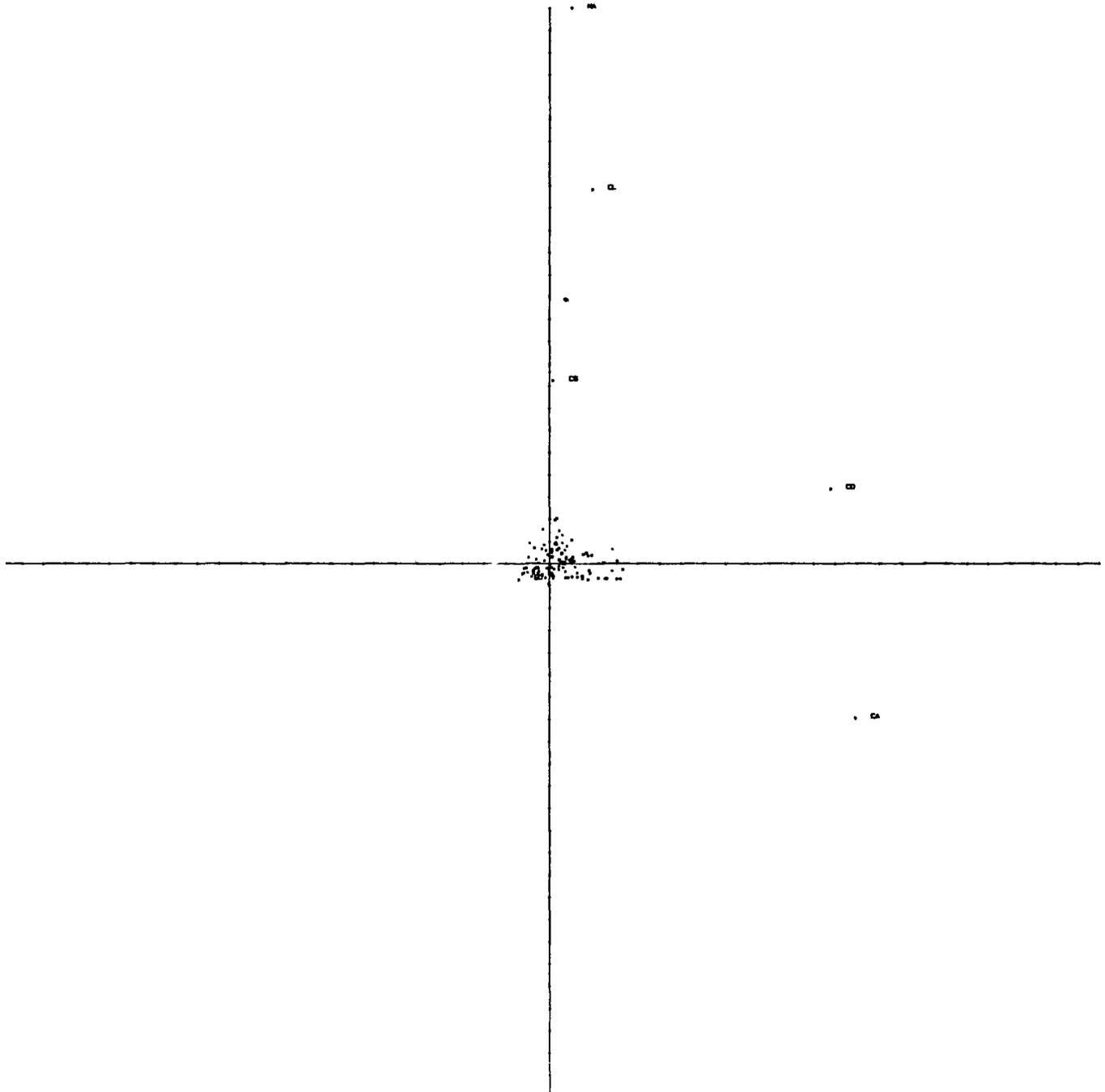


Figure 45a

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

ECHELLE 1 = 1:4 ECHELLE 2 = 1:4

DIRECTION 1 = 0.058 DIRECTION 2 = 0.021  
POURCENT. 1 = 65.18 POURCENT. 2 = 23.99

2

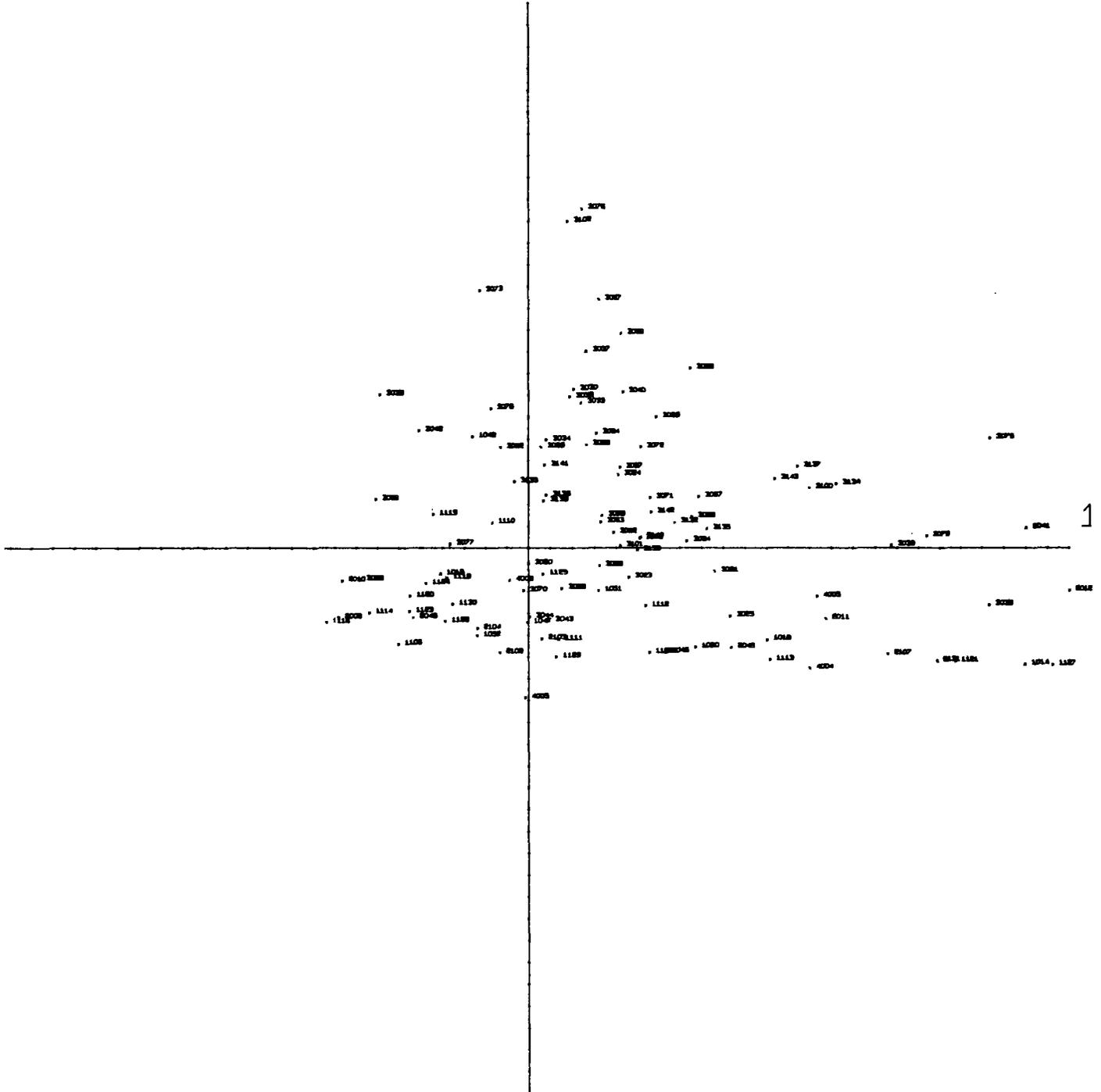


Figure 45b.

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

ECHELLE 1 = 3-0 ECHELLE 2 = 3-0

DIRECTION 1= 0.058 DIRECTION 3= 0.007  
POURCENT. 1= 65.18 POURCENT. 3= 8.34

3

1

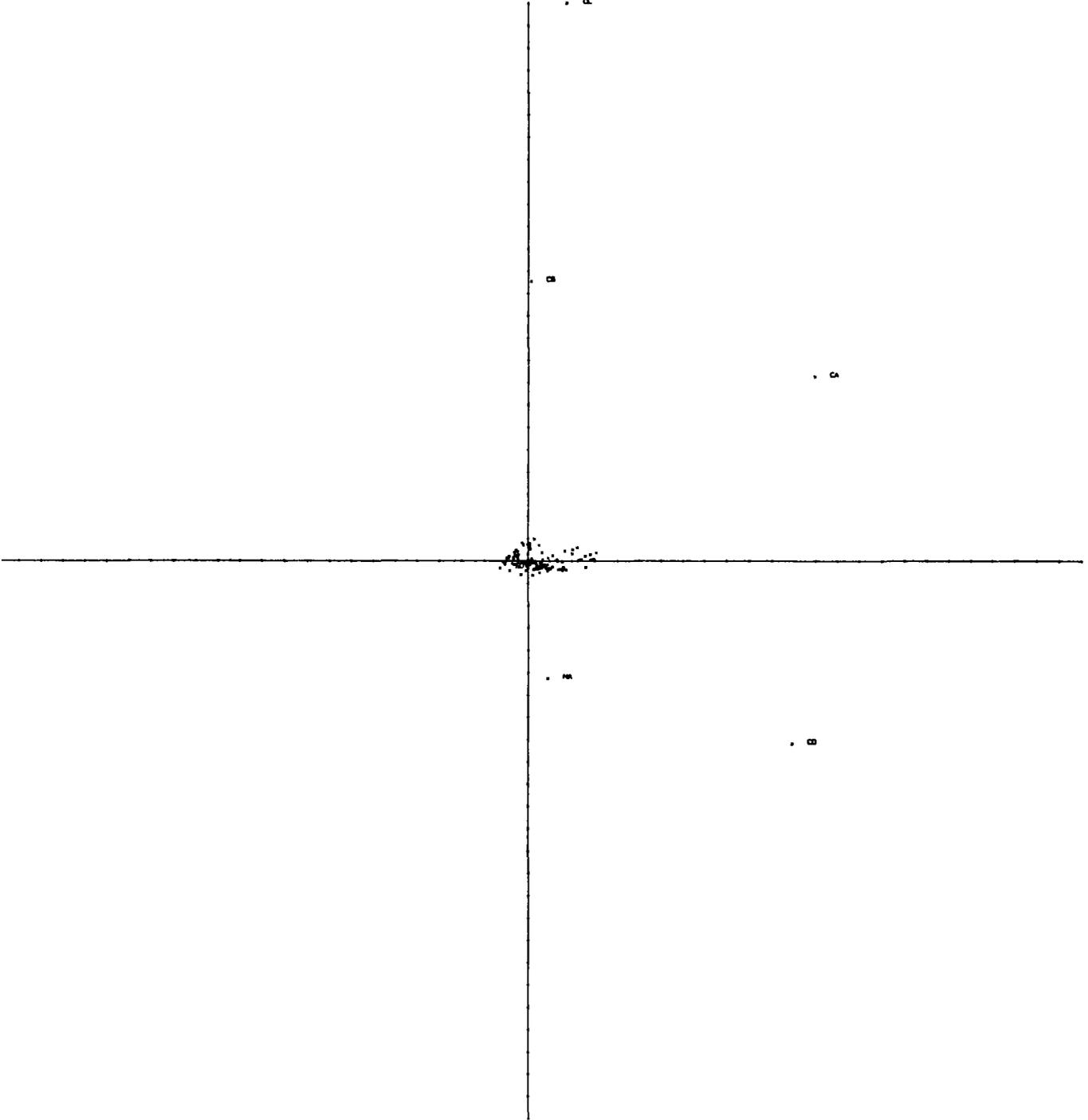


Figure 45c.

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

TABLE 1 - 2-5 (TABLE 2 - 2-6)

3

DIRECTION 1= 0.058 DIRECTION 3= 0.007  
POURCENT. 1= 65.18 POURCENT. 3= 8.34

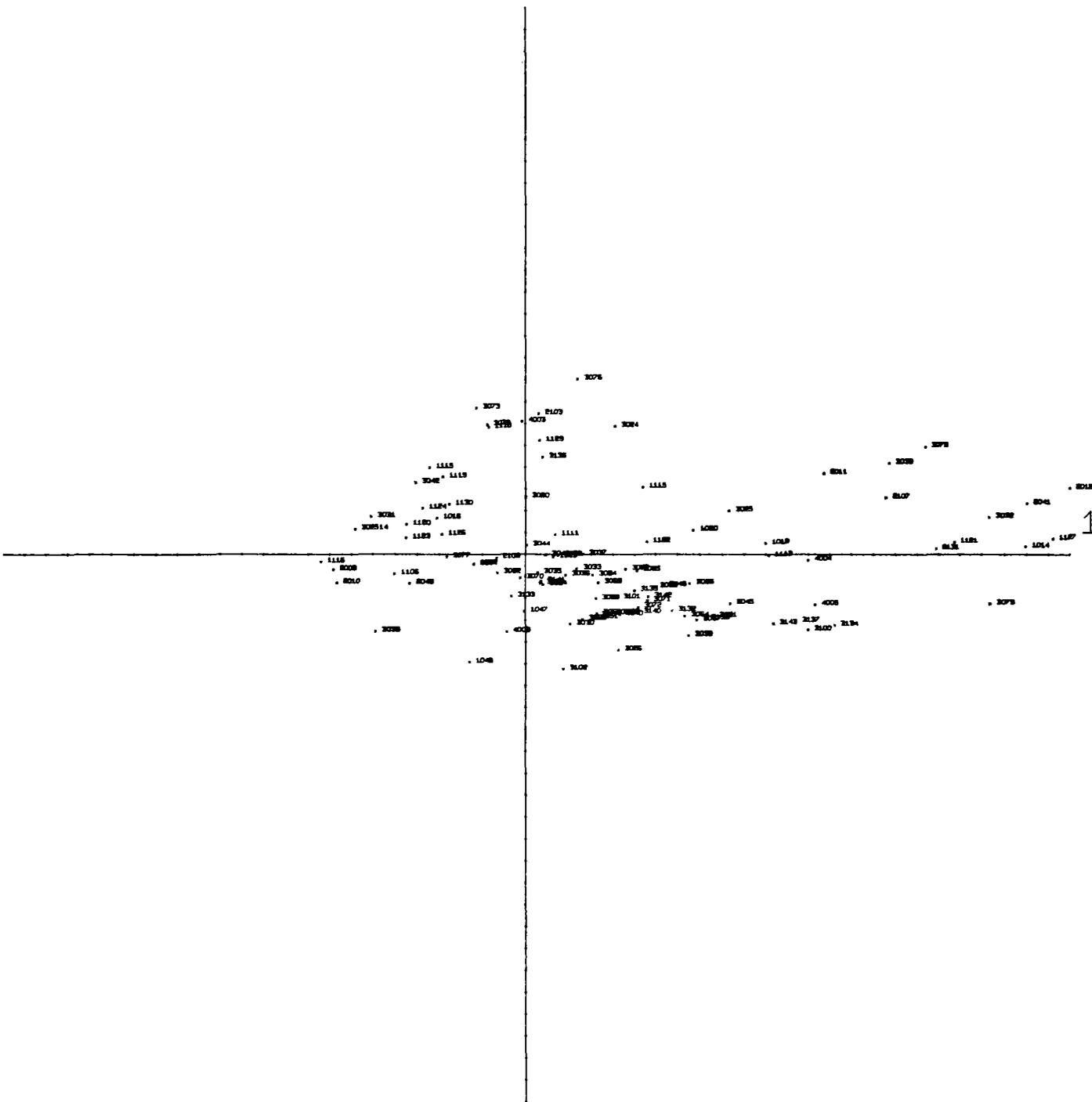


Figure 45d.

Le plan des axes 1-2, est une réduction de l'hyperplan à 6 axes orthogonaux, qui explique  $65,2 + 24,0 \approx 90$  % de la variance totale de la population dans l'hyperplan considéré ; le plan des axes 1-3 n'explique que  $65,2 + 8,4 \approx 75$  % de la variance totale.

Il est visible sur ces figures 45a, b, c, d, que la variable CO, proche de l'axe 1 est intermédiaire entre CA et NA, cependant que les échantillons, bien que très groupés subissent une différenciation selon ces trois tendances.

On retrouve ici l'évolution entre pôles  $\text{CO}_3\text{Ca}$  et  $\text{CO}_3\text{Na}$  déjà mise en évidence au moyen du diagramme trilineaire. On notera que l'échelle de l'axe 3 est amplifiée pour faciliter la lecture des numéros d'échantillons.

#### 3.2.2.2. Analyse factorielle en composantes principales

Les résultats en sont fournis sur les figures 46a et b tracées par ordinateur au moyen du programme ACØC ; les plans de ces figures sont définis par les axes 1-2 et 1-3 ; les valeurs prises en compte sont seulement divisées par la moyenne de la colonne correspondant aux variables (6 au total comme précédemment), ce qui ne permet plus la représentation simultanée mais permet de comparer des valeurs absolues ; chaque variable est représentée par un axe ; la part de variance totale expliquée par chaque axe factoriel orthogonal, n'est plus que de 55,1 % pour l'axe 1, 24,6 pour l'axe 2, (au total  $\approx 80$  %) 10,3 % sur l'axe 3.

Sur les figures 46a et b, on observe bien toujours la même opposition pour la population considérée dans l'espace entre les axes de variable CO (1,2,3 positifs), CA (1,2 positifs, 3 négatifs) et NA (1,3 positifs, 2 négatifs) ; il y a donc concordance dans les résultats fournis par ces différentes méthodes d'interprétation statistique.

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

SCHELE 1. 3.1 SCHELE 2. 3.1  
2

DIRECTION 1= 3.307 DIRECTION 2= 1.477  
POURCENT. 1= 55.12 POURCENT. 2= 24.63

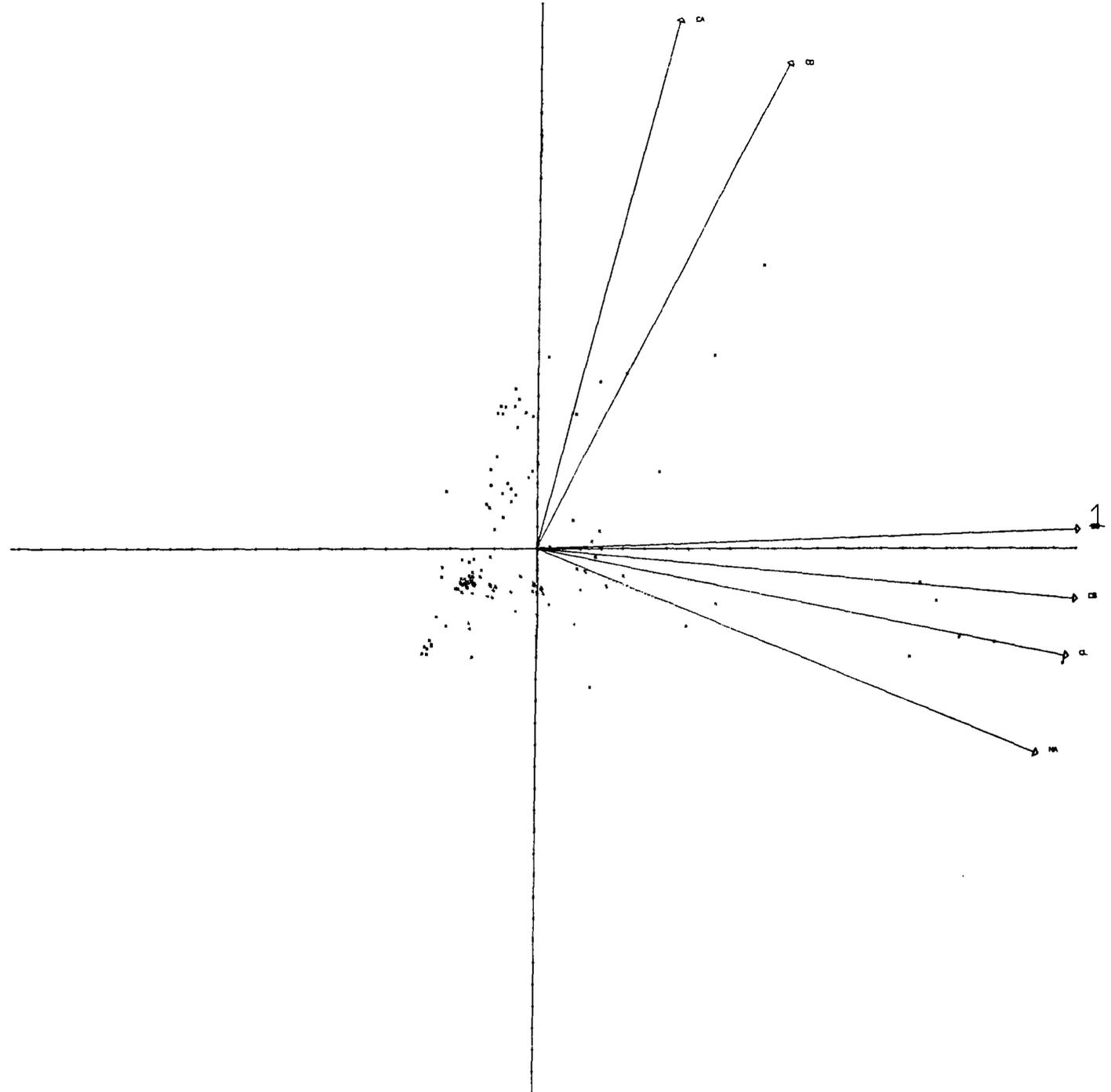


Figure 46a.

\*ALBIEN-B-P \*VUI1Y 004

EDULE 1 2 3 EDULE 2 3  
3

DIRECTION 1= 3.307 DIRECTION 3= 0.619  
POURCENT. 1= 55.12 POURCENT. 3= 10.32

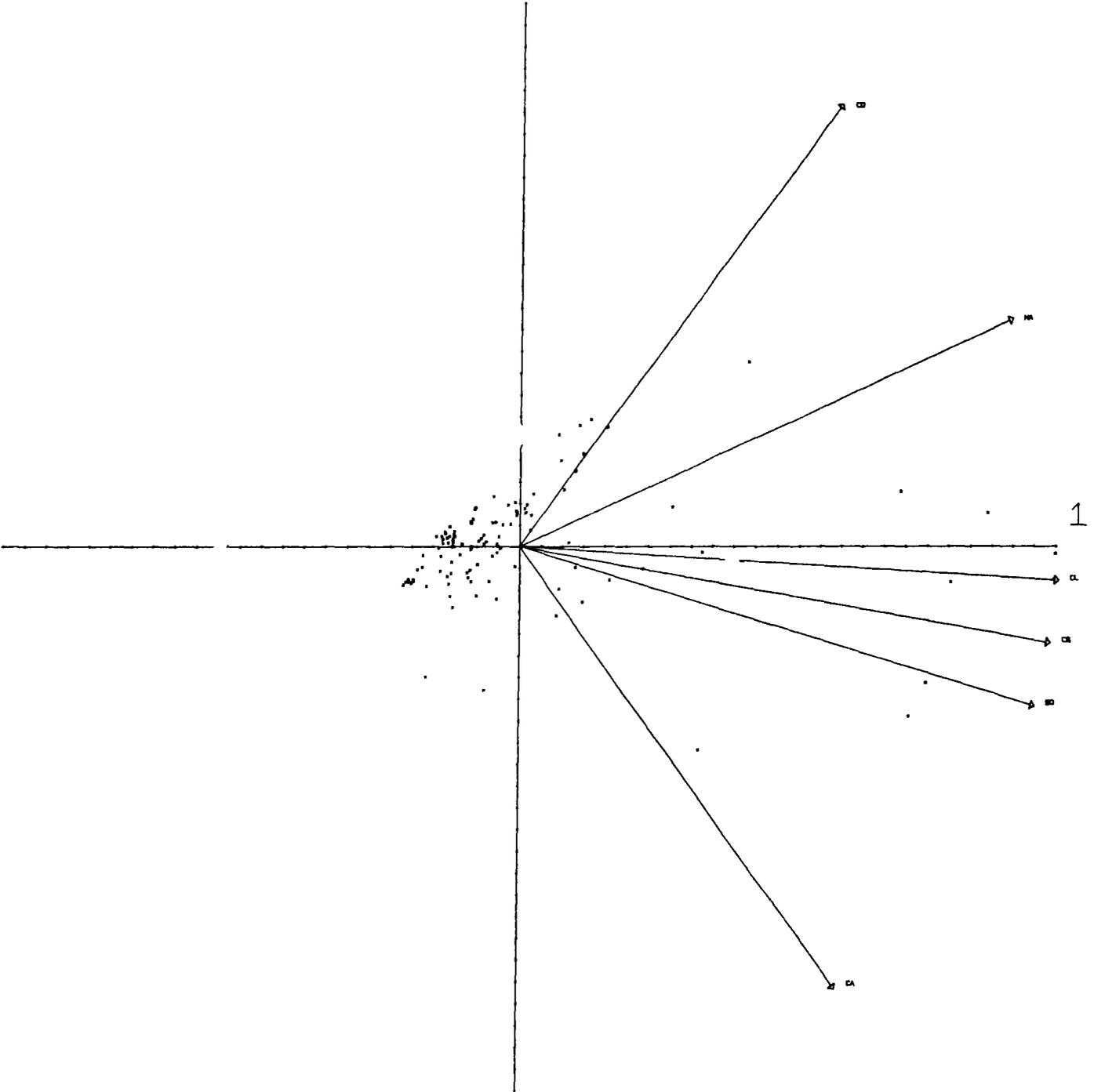


Figure 46b.

### 3.2.3. Interprétation géochimique

Dans la limite des possibilités d'observation, on a pu aboutir aux conclusions suivantes par différentes méthodes d'interprétation :

1 - le faciès hydrogéochimique de l'eau est homogène dans la nappe et sur de grandes surfaces ;

2 - ce faciès est de type  $\text{CO}_3\text{Ca}$  au niveau des dômes piézométriques quelle que soit leur position géographique et tend vers un type  $\text{CO}_3\text{Na}$  au niveau des exutoires, quelle que soit leur position géographique. Il existe donc bien un effet d'échange de base (fixation du  $\text{Ca}^{++}$  dans les argiles, libération de  $\text{Na}^+$  en compensation) déjà mis en évidence par SCHOELLER dans cet aquifère /76/. Il apparaît cependant en plus, dans les zones proches de la mer un rééquilibre du  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ , qui pourrait indiquer soit un lessivage incomplet des terrains, soit une invasion marine plus récente, ce que permettent de confirmer les résultats isotopiques.

Dans l'ensemble de la nappe, la minéralisation totale est de l'ordre de 0,3 g/l, ce qui comparé à la teneur originelle de l'eau de mer de 30 g/l, représente un facteur de dilution de 100 ; il y a donc renouvellement régulier de l'eau dans cette nappe, (si on néglige tout phénomène géochimique de précipitation).

#### Nota :

Les analyses chimiques effectuées à différentes époques et en différents points de pompage intensif, n'ont pas montré d'évolution sensible du chimisme en fonction du temps, d'après LAUVERJAT /58/.

Degré de saturation des eaux par rapport à la calcite :

Il n'est pas possible de faire un calcul précis actuellement, faute de données thermodynamiques expérimentales concernant les différentes constantes d'équilibres dans les gammes de pression et température rencontrées ici (l'approche de SCHOELLER /21/ se fait en calculant ces valeurs). D'autre part, les analyses étant effectuées au laboratoire ne traduisent pas les valeurs exactes, l'eau ayant évolué pendant le transport de l'échantillon.

Compte tenu de la faible précision des mesures dont nous disposions, nous avons simplement fourni une évaluation du degré d'agressivité de l'eau à partir de la méthode de HEM /77/ dans le tableau 6, colonne 8.

Il apparaît que les eaux sont en général agressives, particulièrement dans les zones d'alimentation ; si dans ces zones les filets traversent les argiles, après avoir lessivé la craie, on peut supposer que l'eau perd alors une quantité de  $\text{Ca}^{++}$  qu'elle a acquis dans le calcaire supérieur, ce qui explique qu'elle devienne agressive ; par ce processus, les argiles deviennent progressivement marneuses, essentiellement dans les zones de flux vertical descendant ; cette hypothèse déjà avancée par PANETIER /61/ devrait être vérifiée par une étude minéralogique fine.

Durant ce transfert vertical le  $\text{HCO}_3^-$  pourrait ne pas être perturbé et la teneur en  $^{14}\text{C}$  ne devrait pas varier sensiblement.

### 3.3. Interprétation des résultats isotopiques

L'essentiel des résultats isotopiques est reporté sur la figure 47 et dans le tableau 6. Deux groupements s'en dégagent :

- celui des zones d'alimentation ou de proche captivité dont les teneurs varient de 60 à 85 % en  $^{14}\text{C}$  et de - 11,5 ‰ à - 14,5 ‰ en  $^{13}\text{C}$  ; ce groupe est homogène ;

- celui des zones d'exutoire : beaucoup plus hétérogène les valeurs de  $^{14}\text{C}$  s'étalent de 1 à 20 %, celles de  $^{13}\text{C}$  de - 10 - 17 ‰ ; si les longueurs de trajet sont différentes, ce qui entraîne des variations sensibles des activités  $^{14}\text{C}$ , il semble aussi que des échanges puissent intervenir, dans les deux sens, soit par allègement traduisant l'influence de matières organiques (cas du Crotoy (95)) ou au contraire, par alourdissement au contact du calcaire, (cas de Vernon (93) ou Chateaudun (40) par exemple).

Dans le tableau 6 on remarque pour l'échantillon 51 de Montier en Der une teneur en  $^3\text{H}$  de 37 UT qui paraît incompatible avec la valeur de  $^{14}\text{C}$  de 52,8 % ; il peut y avoir ici mélange d'eaux d'âge différent ou échanges isotopiques et vieillissement important ; en l'absence de résultat de  $^{13}\text{C}$  il n'est pas possible de trancher.

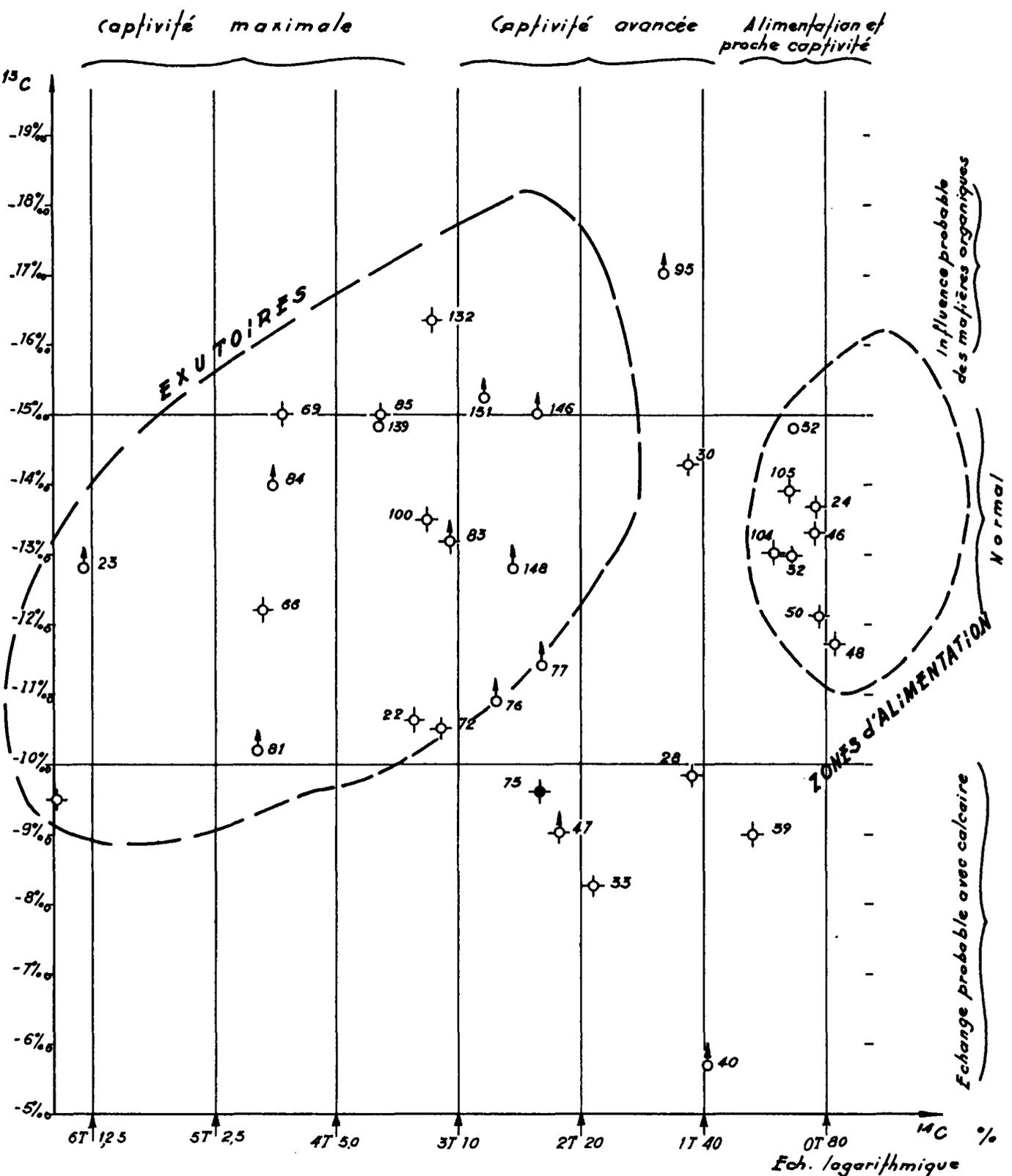


Fig. 47 : RESULTATS ISOTOPIQUES DE  $^{13}\text{C}$  ET  $^{14}\text{C}$

### 3.4. Interprétation hydrogéologique et cartographie des paramètres géochimiques et isotopiques

On tient compte ici de la répartition spatiale des résultats-traités jusqu'à présent par des méthodes géochimiques ou statistiques.

Il apparaît clairement que le réseau d'observation utilisable est peu commode pour mener à bien cette étude ; c'est une des raisons qui explique que l'on ait pu proposer des cartes piézométriques sensiblement différentes. Les courbes auront donc souvent un tracé hypothétique, figuré par un pointillé.

#### 3.4.1. Carte de l'indice du déséquilibre chlore-alkalin

On a cartographié le rapport  $\frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}$ , appelé par SCHOELLER indice d'échange de base ; il traduit l'échange de cations entre argiles et solution :

1 - dans les zones d'infiltration  $Ca^{++}$  est très supérieur à  $Na^+$  lequel est supérieur à  $Cl^-$  ;

2 - dans les zones d'échanges de base, on a  $Na^+ > Cl^-$  et  $Na^+ > Ca^{++}$  ;

3 - dans les zones d'invasion marine, on retrouve le rapport  $Na^+ = Cl^-$

L'effet 1 se remarque dans l'Eure et l'Eure-et-Loir, le Cher, l'Yonne, l'Est, Nord Est ;

L'effet 2 est visible le long de l'axe Yonne-Seine, jusqu'à Rouen, dans le haut bassin de l'Oise et celui du Loir ;

L'effet 3 est visible à l'embouchure de la Seine et de la Somme. On notera la grande homogénéité des faciès observés dans la région parisienne.

# LIMITE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN DANS LE BASSIN DE PARIS

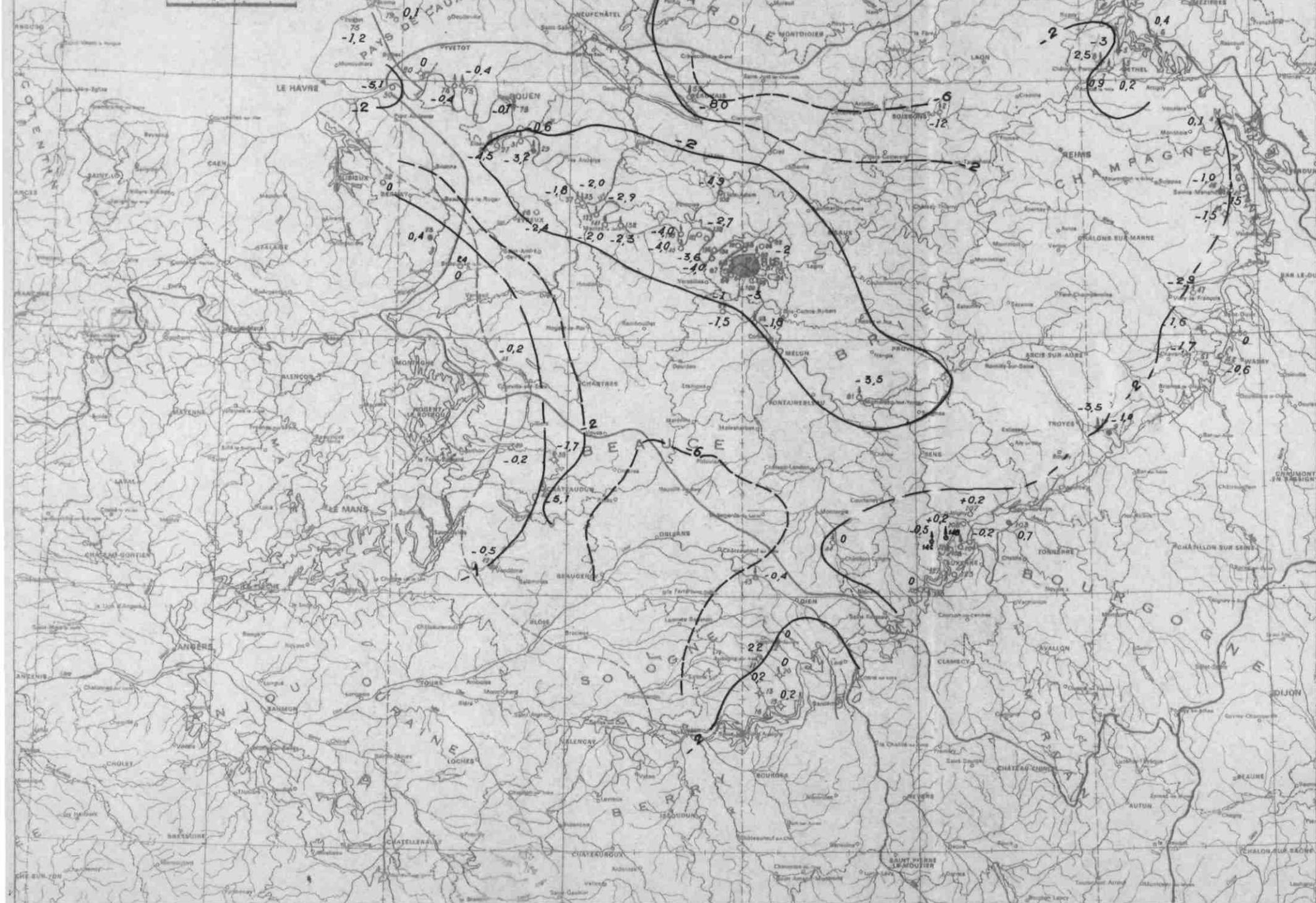
## CARTE DU DESEQUILIBRE CHLORE/ALCALIN. (I. E. B)

Fig. 48

- Limite de bassin versant
  - - - Limite Albien-Cénomanién
  - Forage artésien à l'Albien
  - Forage à un niveau inférieur à l'Albien
  - ◇ Forage au Cénomanién
  - Source
- 107 Numéro correspondant à celui de l'analyse chimique

$$\frac{Cl - (Na + K)}{Cl}$$

0 10 20 30 40 50 km



### 3.4.2. Carte des activités en $^{14}\text{C}$ (1)

#### 3.4.2.1. Ensemble du bassin

La figure 49 montre la répartition géographique des prélèvements. Les courbes d'isradioactivité ont été tracées en joignant les points présentant une activité égale évaluée en périodes de radiocarbone (courbes 1T, 2T, etc.). Cette représentation, choisie de préférence à un tracé de courbes traduisant des différences égales de pourcentage (par exemple de 10 en 10 %), a l'avantage de mettre en évidence des différences d'activité correspondant à des intervalles de temps égaux ( $\approx 5\ 700$  ans, s'il n'y a pas perturbation de la teneur en  $^{14}\text{C}$ ).

L'activité à l'origine (courbe OT) a été prise de 80 % du standard moderne. Cette valeur semble la plus probable dans cette région si l'on examine les activités des eaux actuelles ou sub-actuelles de France ou de l'Europe du Nord. Mais il a toutefois été constaté que des valeurs plus basses sont également possibles. Si on choisissait une activité à l'origine un peu différente (70 % par exemple) cela entraînerait seulement un décalage des courbes parallèlement à elles-mêmes, décalage qui serait faible à partir de la courbe 2T. De toute façon, cela ne modifierait pas l'orientation générale du tracé et les conclusions hydrologiques qui en sont déduites. Pour cette raison, il n'a pas été jugé utile de transformer les activités  $^{14}\text{C}$  en âges absolus.

La figure 49 montre, par les fortes activités des zones périphériques du bassin, l'existence d'une alimentation récente non seulement dans l'E et le S-E près des zones d'affleurements, mais aussi au S et à l'O où l'Albien n'affleure pas. On constate en effet des valeurs de 60 à 70 % NBS au S-O et dans certains points du S-E. De ces points, l'eau chemine dans l'aquifère vers des exutoires qui sont localisés autour de Rouen et Paris, avec une séparation entre ces zones ; on retrouve ici l'image de la surface piézométrique et notamment les exutoires naturels (zone d'affleurement de Rouen sous les alluvions de la Seine et à l'embouchure de ce fleuve) et l'exutoire de la région parisienne.

---

(1) Nous admettons ici que les effets géochimiques perturbateurs sont négligeables, compte tenu des résultats acquis et discutés en 3.2. L'essentiel de ce paragraphe est repris de la note EVIN-VUILLAUME /65/.

Les activités observées autour de Paris sont plus faibles que celles de la région de Rouen. On peut penser que, à Rouen, se manifeste l'influence des zones d'alimentation proches, ou que, à Paris, les pompes intensifs ont notablement modifié les écoulements ; ici, dans l'aquifère albien, il y aurait appel à des eaux provenant des zones à plus faible taux de renouvellement (au N-E de Paris) ou bien des eaux, relativement plus vieilles, provenant de nappes plus profondes.

#### 3.4.2.2. Etudes régionales de l'alimentation à la périphérie

##### - Zones est et sud est

Une coupe schématique de la région S-E montre sur la figure 50 le mécanisme de l'alimentation de la nappe à sa périphérie ;

Sur ce schéma interprétatif, on reconnaît :

- le tracé de la surface piézométrique de la nappe des sables albiens, modelé sur celui de la nappe libre de la Craie située immédiatement au-dessus,
- les lignes d'écoulement des filets liquides dans les terrains entre les dômes piézométriques et les exutoires des nappes,
- les lignes d'égale période<sup>14</sup>C que l'on devrait observer si les ouvrages étaient convenablement disposés pour cela,
- la situation de quelques uns des ouvrages sur lesquels les prélèvements ont été effectués.

Le réseau d'observation disponible n'a pas permis de mesurer les activités tout au long d'un même filet liquide. Toutefois, il semble, en examinant la situation de chacun des puits et les radioactivités obtenues, que l'on puisse reconnaître les différentes zones d'alimentation et d'exutoire et le sens des écoulements.

LIMITE DE LA NAPPE DE L'ALBIEN  
DANS LE BASSIN DE PARIS  
 COURBES SCHEMATIQUES D'ISORADIOACTIVITE  
 DU  $^{14}\text{C}$

Figure 49

— Limite de bassin versant

- - - Limite Albien-Cénomarien

○ Forage artésien à l'Albien

● Forage à un niveau inférieur à l'Albien

○ Forage au Cénomarien

○ Source

107 Numéro correspondant à celui de l'analyse chimique

1T - 40% NBS

2T - 20%

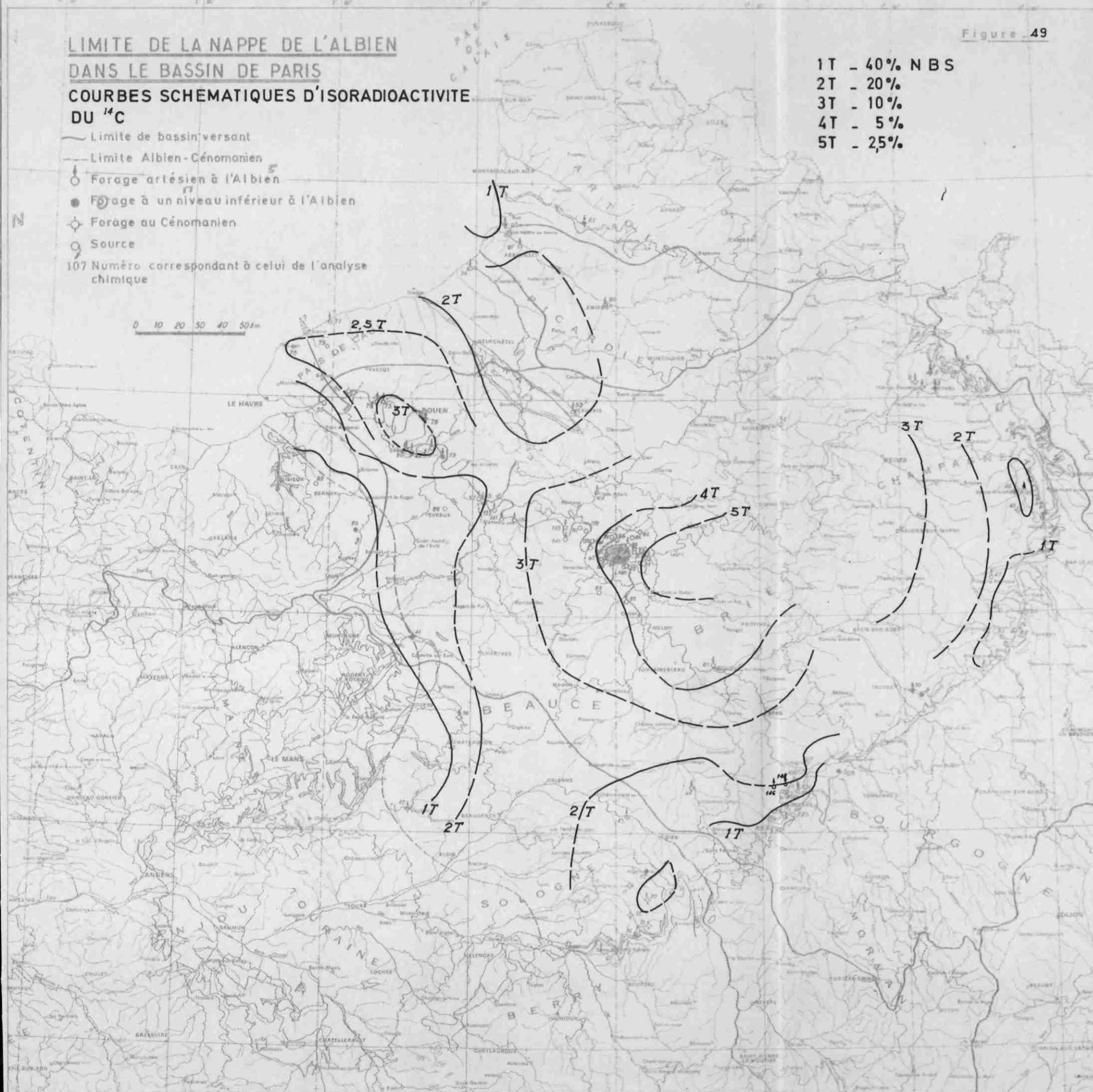
3T - 10%

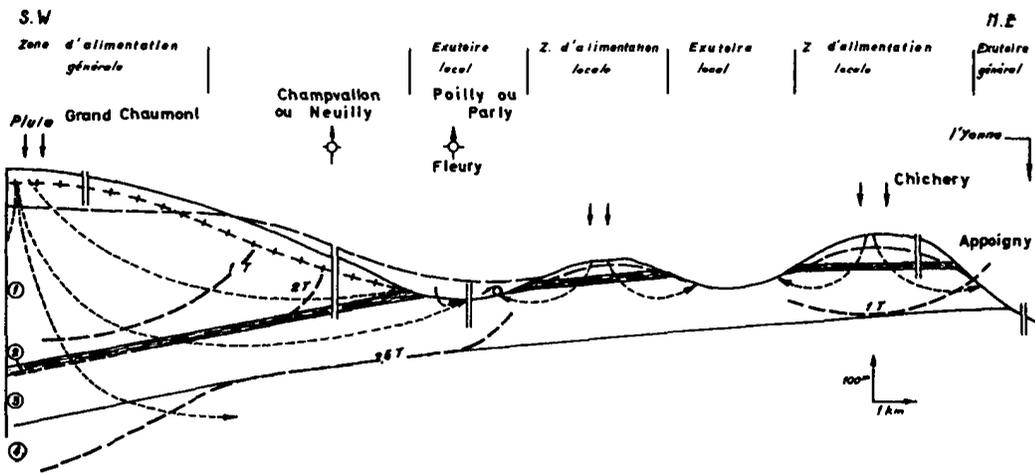
4T - 5%

5T - 25%

N

0 10 20 30 40 50 km





**SCHEMA INTERPRETATIF D'APRES LES DONNEES REGIONALES**

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>— + — + — Surface piézométrique de la nappe libre de la craie</li> <li>— — — — — Surface piézométrique de la nappe captive</li> <li>— &gt; — — — — Ligne d'écoulement</li> <li>— — — — — Ligne d'égalité période C.M des filets liquides dans les aquifères</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>① Craie</li> <li>② Marnes et argiles du gault</li> <li>③ Sables de l'Albion</li> <li>④ Sables et argiles de Barrémien</li> </ul> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figure 50.

Un point tel que Chichery (activité 55 % NBS) se trouve dans une zone d'alimentation. Son activité indique qu'il faut ici une durée de 1/2 période C14 environ, pour que l'eau puisse descendre verticalement à travers le toit peu perméable de la nappe captive avant qu'elle n'atteigne celle-ci.

Les points tels que Neuilly et Champvallon sont proches d'une zone d'alimentation. Leur activité plus basse (15 % NBS) implique un temps de transfert vertical plus long à travers les terrains supérieurs, ici plus épais. En ces points, il y a aussi écoulement dans le plan de l'aquifère, mais il est très court en raison de la proximité d'un exutoire local.

Le forage de Fleury (15 %) est, lui, franchement dans une zone d'exutoire et les eaux y sont ascendantes.

A Parly et Poilly, les activités avoisinent les 90 % NBS. Mais ces points, situés sur les affleurements albiens, sont en position hydrologique particulière. Ils sont situés dans la partie libre de la nappe de l'Albien. Les radioactivités traduisent les influences récentes des bombes thermonucléaires aussi bien en tritium qu'en radiocarbone. Les eaux en ces points peuvent résulter du mélange des eaux de pluie, tombées sur les sables affleurants, avec les eaux ascendantes de la nappe captive ; ces dernières ayant accompli un long trajet sont des eaux anciennes. Mais, comme le rapport des volumes est fonction des débits, liés aux perméabilités des terrains, l'influence ancienne n'a pu être retrouvée sur les sources ou les puits peu profonds de la nappe libre, alors qu'elle est observée dans presque toute son ampleur dans le niveau captif des sables à Fleury (n°106).

Il est intéressant de comparer ces résultats avec ceux obtenus sur des eaux provenant des niveaux supérieurs ou inférieurs à l'Albien. La nappe libre de la Craie (n°149 et 150) fournit des activités élevées tandis que la nappe captive du Barrémien (n°151), située sous l'Albien, a des eaux de très basse activité.

Il faut enfin signaler le cas du forage de Migennes (n°107) dont la situation montre qu'il fait appel à de l'eau ancienne (prélèvement du 10/1967) sauf dans le cas où les pompages sont suffisamment importants, en été, pour renverser le gradient hydraulique et appeler l'eau des nappes alluviales de l'Armançon et de l'Yonne (prélèvement du 7/1969) ; dans ce second cas, on note la présence de tritium prouvant l'apport d'eau actuelle.

#### - Zone ouest

Les fortes activités observées dans cette zone indiquent que les eaux sont récentes et même *quasi* actuelles à Bémécourt (75,5 %), bien que les terrains albiens n'affleurent pas. Mais il existe, dans cette région, un dôme piézométrique dans la nappe captive, auquel se superpose un autre point haut piézométrique dans la nappe libre. L'alimentation serait ici plus rapide que dans la zone sud est, les perméabilités étant plus fortes à l'Ouest.

Ainsi, pour l'ensemble de la périphérie, on peut conclure que l'alimentation de la nappe de l'Albien est essentiellement indépendante des affleurements et qu'elle se fait par la nappe libre à travers les couches peu perméables du toit de la formation.

#### 3.4.2.3. Vitesse d'écoulement

Donner une vitesse d'écoulement entre deux points implique que l'on parle de vitesse apparente.

On constate, entre Thiberville (n°32) et la région de Rouen, une différence de 3,5 périodes C14 pour une distance de 60 km, soit une vitesse apparente d'environ 3m/an. Du même point (n°32) à Vernon (n°33) la vitesse apparente serait de 5m/an. Enfin des environs d'Auxerre à Paris l'ordre de grandeur est aussi de 5m/an. On retrouve à peu près les mêmes valeurs quelle que soit la région du bassin considérée, d'où l'espacement régulier des courbes d'isoradioactivité.

Les évaluations de vitesse d'écoulement à partir de la formule de Darcy, impliquant un régime permanent, fournissent des valeurs allant de 3m/an /59/ à 10m/an /58/.

Ainsi les valeurs obtenues par la méthode du radiocarbone sont comparables ou inférieures à celles données par la formule de Darcy. Ceci est en accord avec les observations récentes de Vogel /55/. Il convient cependant de rappeler (cf. 1.3) que ces vitesses ne sont pas comparables entre elles, et que la vitesse de l'isotope peut être inférieure à celle de l'eau (cf. figure 28).

### 3.5. Intérêt hydrogéologique de cette étude

Bien que la disposition hétérogène du réseau d'observation n'ait pas permis de suivre les écoulements dans l'ensemble de l'aquifère, il est possible de tirer les conclusions suivantes de cette étude :

d'après les résultats isotopiques et géochimiques obtenus, l'hypothèse de l'alimentation exclusive de la nappe par ses affleurements, doit être rejetée au profit de celle qui admet que cette alimentation est essentiellement réalisée à travers le toit peu perméable du réservoir.

Cette conclusion a pour corollaire le fait que l'exutoire de la nappe n'est pas localisé aux seuls affleurements de la basse-Seine et de la Manche, mais réparti sur l'ensemble du bassin, dans les zones d'artésianisme.

Ces conclusions sont fondées sur les résultats isotopiques et géochimiques suivants :

- il n'y a pas d'augmentation régulière de l'âge de l'eau du S-E au N-W le long de l'axe Yonne-Seine ; bien au contraire ces "âges" sont les plus anciens de ceux observés dans la nappe ;

- les "âges" observés aux affleurements de l'Yonne sont très anciens dans la zone de proche captivité ; s'il existe bien de l'eau récemment entrée dans la partie libre de l'affleurement, elle est drainée par l'Yonne ; localement, cette zone constitue donc pour la nappe un exutoire et non un impluvium.

- Dans la région d'entière captivité S-W et W, les "âges" observés dans l'aquifère recouvert par 85 mètres de terrain, dont 15 mètres de marne peu perméable, sont parmi les plus récents de la nappe captive.

#### Conséquences

Ces conclusions paraissent utiles pour permettre l'étalonnage d'un modèle hydraulique de l'aquifère : même s'il n'est pas possible de parler d'âge de l'eau, il est possible de dire où elle est la plus récente et donc de

connaître le processus de l'alimentation ; elles permettent de choisir le type de loi hydraulique à appliquer à ce modèle, ce qui n'avait pu être fait antérieurement pour ce même aquifère.

Les écoulements "dans" l'aquifère sont donc essentiellement à composante verticale plus qu'horizontale ; ce qui implique que les trajets des filets liquides soient plus courts entre amont et aval, qu'on ne l'imaginait récemment encore.

Les observations isotopiques et géochimiques s'accordent à montrer qu'il y a une influence marine récente à l'embouchure de la Seine et de la Somme ; en excluant tout effet perturbateur de mélange ou de géochimie, cet événement serait survenu il y a 8 000 à 12 000 ans.

Ces conclusions sont à rapprocher de celles d'océanologie appuyées notamment sur des mesures de  $^{14}\text{C}$ , selon lesquelles le niveau des mers a varié au Quaternaire récent (Holocène) de plusieurs dizaines de mètres ; pendant une période récente, la Manche a pu ne pas exister. Ces observations générales n'excluent pas toutefois l'existence de phénomènes tectoniques locaux sur la côte, (à l'échelle de quelques dizaines de kilomètres) avec jeu différentiel de compartiments.

Cette dernière conclusion pose donc le problème de la permanence du niveau de base de l'aquifère et aussi celui de son extension géographique sous la Manche et en Angleterre...

La méthode d'observation utilisée ici est du type image instantanée ; elle peut être complétée par des observations périodiques espacées dans le temps, dont la fréquence doit être liée à la vitesse d'évolution du phénomène observé.

## CONCLUSION GENERALE

\*\*\* \*\*

De cette étude réalisée afin de reconnaître les modalités pratiques d'utilisation des méthodes isotopiques et hydrochimiques en hydrogéologie, il est possible de dégager les points suivants :

- l'emploi des isotopes comme traceur des écoulements dans les nappes est possible, à condition de le lier nécessairement à celui des méthodes géochimiques et hydrogéologiques ;
- les résultats à en attendre sont d'ordre chronologique essentiellement ; mais on ne pourra considérer que des valeurs relatives : on pourra reconnaître les zones d'aquifère dans lesquelles l'eau est la plus récente. Ces informations seront utiles en vue d'étalonner les modèles mathématiques hydrauliques des aquifères ;
- le domaine d'application préférentiel de ces méthodes est cependant celui des études de transfert de pollution qu'elles soient d'origine atmosphérique et régionale ou d'origine terrestre et localisées ;
- dans les études de géochimie appliquée enfin, l'emploi des méthodes isotopiques se révèle indispensables en vue de caractériser les eaux de qualité déterminée et de définir leur possibilité d'utilisation.

A l'occasion de ce travail nous avons pu adapter et évaluer certaines méthodes d'interprétation de données géochimiques ; un effort reste à faire en ce qui concerne l'étude des phénomènes thermodynamiques qui présentent un intérêt majeur dans l'évaluation de la qualité des eaux. Le choix de cet objectif implique que l'eau fasse aussi un effort pour acquérir *in situ* les données nécessaires, avec une précision suffisante.

**BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE**

## CHAPITRE 1

- /1/ W.F. LIBBY - 1955 - Radiocarbon dating. The University of Chicago press - 175
- /2/ CRAIG H. - 1957 - The natural distribution of radiocarbon and the exchange time of carbon dioxide between atmosphere and sea.  
Tellus 9.1.
- /3/ MÜNNICH K.O. - 1963 - Der kreislauf des radiokohlenstoff in der natur.  
Naturwissenschaften - t.50 - n°6 - p. 211-218.
- /4/ MÜNNICH K.O. - 1960 - Die <sup>14</sup>C methode - Geologischen Rundschau -  
T.49 - n°1 - p. 237-244. traduction BRGM n°4625 : la méthode au <sup>14</sup>C.
- /5/ LIBBY W.F. - 1967 - The history of radiocarbon dating - IAEA - Congrès de Monaco -
- /6/ MÜNNICH K.O., TAUBER H., WILLIS E.H. - 1960 - Variations in the atmospheric radiocarbon concentration over the past 1300 years.  
American J. of Sc. Radiocarbon supplement - Vol 2.1960. p. 1.4
- /7/ SUESS H.E. - 1967 - Bristlecone pine calibration of the radiocarbon timescale I.A.E.A. - Congrès de Monaco -
- /8/ SCHELL W.R., FAIRHALL A.W., HARP G.D. - 1967 - An analytical model of <sup>14</sup>C distribution in the atmosphere - AIEA. Congrès de Monaco - Mars 1967.
- /9/ STUIVER M. - 1967 - Origin and extent of atmospheric <sup>14</sup>C variations during the past 10 000 years. AIEA. CR congrès de Monaco.
- /10/ SUESS H.E. - 1955 - Science. 122 - 415.
- /11/ GODWIN H. - 1962 - 5th Radiocarbon dating conference for agreements to use 5568 as half-life and B.P. to be based on 1950 A.D. - Nature 195 - 943 et 984 - 1962
- /12/ MÜNNICH K.O. - 1968 - Isotopen datierung von grundwasser.  
Naturwissenschaften - T.55 n°4. p. 158-163. et traduction BRGM n° 5223 :  
Datation isotopique des eaux souterraines.  
CRAIG H. - 1961 - Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 on natural waters.  
Science 133. 1961. 1833-34.

- /13/ A.I.E.A. - 1968 - Guidebook on nuclear techniques in hydrology - 214 -
- /14/ VERHAGEN B.T., SELLSCHOP J.P.F., JENNINGS C.M.H. - 1970 - Contribution of environmental tritium measurements to some geohydrological problems in Southern Africa.  
AIEA - Vienne - isotope hydrology - p. 289-313
- /15/ MARGAT J. - 1965 - Age des eaux souterraines et renouvellement des réserves des nappes. Réflexions sur les bases de l'hydrochronologie. Rapport BRGM - DS 65.A.88. 24.  
Suess H.E. - 1955 - Radiocarbon concentration in modern wood - Science 122 - p.415.
- /16/ MÜNNICH K.O. - 1961 - Les possibilités d'erreur dans l'analyse au  $^{14}\text{C}$  Ber.5 Internat. Kongr. Hambourg 1958 - p. 582-587 - VERU. Frühgeschichte Traduction BRGM n°4638.
- /17/ EVIN J., LONGIN R., PACHIAUDI Ch. - 1969 -  
Lyon natural radiocarbon measurements I - . in Radiocarbon Supplement - Am. J. of Science - Vol.11 - n°1 1969, p.112-117.
- /18/ MÜNNICH K.O. -1957 - Messungen des  $^{14}\text{C}$  gehaltes von harten gundwasser. Naturwissenschaften 44.2 p.32-33.
- /19/ BRINKMANN R., MÜNNICH K.O., VOGEL I.C., - 1959 - Détermination de l'âge de l'eau souterraines par le  $^{14}\text{C}$  in Naturwissenschaften - t.46 n°1 p.10-12. Traduction BRGM n°4641.
- /20/ LALLEMAND A. - 1965 - Datation des eaux et des calcaires par la méthode au Carbone 14. Etude documentaire.  
Rapport BRGM - DS.65.A.90. 70.
- /21/ SCHOELLER H. - 1969 - L'acide carbonique des eaux souterraines - Bulletin du BRGM - Section III.1p.1-32.
- /22/ VOGEL J.C., EHFALT O. - 1963 - The use of carbon isotopes in groundwater studies. Radio-isotopes in hydrology - AIEA - 1963 - p.383-395.
- /23/ GARRELS R.M., CHRIST C.L. - 1967 - Equilibre des minéraux et de leurs solutions acqueuses - Gauthier Villars : 335.
- /24/ HEM J.D. - 1970 - Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. geological survey - Water supply paper 1473 - 363.
- /25/ VOGEL J.C. - 1960 - Isotope separation factors of carbon in the equilibrium system  $\text{CO}_2$   $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{=}$ .  
In summer course or nuclear geology - Varenna 1960 - p.216-221.

- /26/ SCHOELLER H. - 1962 - Les eaux souterraines - Masson. 642.
- /27/ MUNNICH K.O., VOGEL J.C. - 1962 - Recherches sur les eaux pluviales du Sahara oriental - traduction BRGM n° 4626 de geol. Rdsch. t.52 n°2 p. 611-624.
- /28/ ERIKSSON E. - 1962 - Application of isotopes technics in Hydrology. Technical report series n°11 - AIEA - Vienne .
- /29/ BACK W., CHERRY R., HANSHAW B., - 1966 - Chemical equilibrium between the water and minerals of a carbonate aquifer. Nat. Speleol. Soc. Bull. Vol 28 n°3, p.119-126.
- /30/ WENDT I., STAHL W., GEYH M., FAUTH F., - 1967 - Model experiments for <sup>14</sup>C water age determinations Isotopes in hydrology - AIEA - Vienne p. 321-337
- /31/ MUNNICH K.O., ROETHER W., THILO L. - 1967 - Dating of groundwater with tritium and <sup>14</sup>C Isotopes in hydrology - AIEA - Vienne p.305-320.
- /32/ MUNNICH K.O., THILO L. - 1970 - Reliability of <sup>14</sup>C dating of groundwaters: Effect of carbonate exchange. AIEA - Vienne - Isotope hydrology - p.259-270.
- /33/ LALLEMAND A. - 1969 - Contribution à la sélection des traceurs radioactifs pour l'hydrogéologie. Rapport Euratom EU 4222 f. 123.
- /34/ PEARSON F.J., WHITE D.E., - 1967 - Carbon ages and flow rates water in Carrizo sand. ATASCOSA County-Texas - Water resources Res. v.3 p. 251-261.
- /35/ PEARSON F.J., HANSHAW B.B., - 1970 - Sources of dissolved carbonate species in ground water and their effects on carbon 14 dating. Isotope hydrology - AIEA - Vienne p.271-286.
- /36/ HANSHAW B.B. - 1969 - Carbon 14 in groundwater studies. AIEA - inter regional course on the applications of isotope technic in hydrology - SAO PAULO.

- /38/ TAMERS M.A. - 1967 - Radiocarbon ages of groundwater in an arid zone unconfined aquifer. Isotope technics in the hydrologic cycle p.143-152. Geophysical Monograph series - A. G.U.
- /39/ ANDERSON T.F. - 1969 - Self diffusion of carbon and oxygen calcite by isotope exchange with carbon dioxide. J. geophys. Res. 74 - 3918.
- /40/ BACK W., HANSHAW B;B. - 1970 - Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan. J. of hydrology - vol.10 n°4 p.330-368.
- /41/ LONG G., NEGLIA S. - 1968 - Composition de l'eau interstitielle des argiles et diagenèse des minéraux argileux.  
Rev. inst. Fr. Petro . vol.1 - p.53 -
- /42/ DE WIEST R.J., DAVIS N. - 1966 - Hydrogeology - Wiley - 463.
- /43/ G.GRISON, LALLEMAND A. - 1970 - Contribution à la sélection de traceurs radioactifs pour l'hydrogéologie. AIEA - Isotope hydrology - p.823-833.
- /44/ SCHNEEBELI G. - 1966 - Hydraulique souterraine - Eyrolles - 362.
- /45/ CASTANY G. -1963 - Traité pratique des eaux souterraines. Dunod . 647.
- /46/ ANDRE H. - 1964 - Hydrometrie pratique des cours d'eau ENHERMA - de Grenoble. 88.
- /47/ MUFFLER P., WHITE D. - 1968 - Origin of  $CO_2$  in the Salton sea geothermal system, Southeastern California - U.S.A.  
XXIII - International geological congress - vol. 17 p. 185-194.
- /48/ VAN OLPHEN H. - 1963 - An introduction to clay colloïd chemistry - intersciencepublishers - Wiley - New-York 290.
- /49/ GRIM R.E. - 1953 - Clay Mineralogy - Mc Graw Hill 380.
- /50/ WHITE D.E. - 1965 - Saline waters of sedimentary rocks  
Mémoir 4 : fluids in subsurface environments. YOUNG A. & GALLEY (J.E.)  
ed. A.A.P.G. Tulsa - Oklahoma.
- /51/ DANIEL P. - 1953 - La mesure des débits des eaux souterraines -  
Colloque d'Ankara sur l'hydrologie p.104-112. de la zone aride - Unesco.
- /52/ GOGUEL J. - 1959 - Application de la géologie aux travaux de l'ingénieur  
Paris.
- /53/ THEIS C.V. - 1963 - Hydrologic phenomena affecting the use of tracers in timing groundwater flow.  
AIEA - Radio isotopes in hydrology - P. 193-206.

- /54/ OLIVE P. - 1970 - Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère Nord, par la méthode du tritium. Thèse Centre de recherches géodynamique - Paris - 128.
- /55/ VOGEL J.C. - 1967 - Investigation of groundwater flow with radiocarbon AIEA - Isotopes in hydrology p.335-369

## CHAPITRE 2

- /56/ LEMOINE P., HYMERY R., SOYER R. - 1939 - Les forages profonds du bassin de Paris - La nappe artésienne des sables verts.  
Masson - Mémoires du Muséum d'histoire naturelle - Nouvelle série - Tome XI - 700.
- /57/ SAROCCHI C., LEVY-LAMBERT H. - 1966 - La nappe aquifère de l'Albien dans le Bassin de Paris - Annales des Mines et Chronique d'hydrogéologie du BRGM n°11 - 1967 - p.33-56.
- /58/ LAUVERJAT J. - 1967 - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre du Bassin de Paris - Thèse 3e cycle géodynamique - Paris. et Chronique d'hydrogéologie n°11 - 1967 - p.57-80.
- /59/ CASTANY G. - 1960 - Quelques aspects nouveaux de l'hydrogéologie du Bassin parisien. C.R. du Comité français de géodésie et géophysique.
- /60/ MARGAT J. - 1967 - Remarques sur la signification des surfaces piézométriques des nappes captives. Chronique d'hydrogéologie - n°12 p.13-17.
- /61/ PANETIER J.M. - 1969 - L'alimentation de la nappe des sables albiens en Puisaye (S.E. du Bassin de Paris).  
BRGM Bulletin Section III n°5 p.67-70.
- /62/ MEGNIEN C. and al. - 1970 - Atlas des nappes aquifères de la région parisienne BRGM.
- /63/ ALBINET M., COTTEZ S. - 1967 - Carte hydrogéologique du bassin de Paris.  
BRGM
- /64/ VIBERT A. - 1937 - Le comportement des nappes profondes du bassin parisien - Technique sanitaire et municipale (33) - p.45-49

### CHAPITRE 3

- /65/ EVIN J., VUILLAUME Y. - 1970 - Etude par le radio-carbone de la nappe captive de l'Albien du bassin de Paris - AIEA. Isotope Hydrology - p.315-332.
- /66/ LETOLLE R., MARCE A., FONTES J.C. - 1965 - Un spectromètre de masse pour mesure de précision des abondances isotopiques de l'oxygène et du carbone. Bull. Soc. fr. Mineralo et cristal. LXXXVIII, p.417-421.
- /67/ RODIER J. - 1966 - L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau DUNOD.
- /68/ SOLETY P., VUILLAUME Y. - 1970 - Possibilités actuelles de traitement automatique par ordinateur des données hydrochimiques : Programmes HYCH, HISTO, GRAD, AFACØ - Rapport interne BRGM 70-SGN-233 HYD.
- /69/ LACHAIZE J.L. - 1968 - Contribution à l'étude géochimique du fluor dans les eaux de la région parisienne. Thèse 3e cycle - Géodynamique - Paris.
- /70/ ROUX J.C. - 1963 - Contribution à l'étude hydrogéologique du bassin de la Somme - Thèse 3e cycle - Géodynamique - Paris.
- /71/ MARGAT J. - 1963 - Notice explicative du diagramme d'analyse d'eau - Rapport BRGM DS 63.A.31.
- /72/ PIPER A.M. - 1944 - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis - Am. Geophys. Union Trans. v.25 p.914-923.
- /73/ MONITION L. - 1966 - Les graphiques à base trilinéaire - Le diagramme en losange - Rapport BRGM inédit DS.66.A.6.
- /74/ BENZECRI J.P. - 1970 - Distance distributionnelle et métrique du Chi deux en analyse factorielle des correspondances - 3e édition - Laboratoire de Stat. Math. Fac. Sc. Paris VI.
- /75/ CAZES P., SOLETY P., VUILLAUME Y. - 1971 - Exemple de traitement statistique de données hydrochimiques - Application aux nappes du calcaire carbonifère et de la craie, dans le Nord. Rapport B.R.G.M.71.SGN 98 HYD à paraître dans le bulletin du BRGM, section III.
- /76/ SCHOELLER H. - 1955 - Les modifications de la composition chimique de l'eau dans une même nappe. p.124-144.
- /77/ HEM J.D. - 1961 - Calculation and use of ion activity - U.S.G.S. Water supply paper - 1535 C 17.

**A N N E X E**

TABLEAU 1 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM				
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3			
02-AISNE																				
CC 50-1-2	BOUE						525	18.0	620	7.8	40.0	28.0	0.0	0.0	310.0	91.0	180.0	0.0	0.0	1
A	BUCY-LE-LONG						635				6.0	7.2	206.0	0.0	25.0	153.0	180.0	0.0	0.0	2

TABLEAU 1 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS				NUM
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3		
2.0	2.3	0.0	0.0	8.7	1.9	6.0	0.0	4.3	16.6	-58.7	649	46.2	53.8	0.0	0.0	52.5	11.4	36.1	0.0	1	
0.3	0.6	9.0	0.0	0.7	3.2	6.0	0.0	9.9	9.9	-0.2	577	3.0	6.1	90.9	0.0	7.1	32.2	60.7	0.0	2	

TABLEAU 1 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
1.17	0.00		0.46	0.54	1.00	0.22	0.69	0.53	0.11	0.36	1.00	1
2.00	29.86	0.00	0.03	0.06	0.09	4.53	8.52	0.07	0.32	0.61	-11.72	2

TABLEAU 2 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM			
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3		
08-ARDENNES																			
AR 86-71	AMAGNE						400	115.4	1.0	7.5	0.0	15.0	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3
A 110-7-24	CHAMPIGNEULE						400	114.0	7.0	3.0	1.5	7.0	20.5	175.0	0.0	8.0	0.0	0.0	4
A 86-2-3	GRAND CAMP						470	96.0	11.0	15.0	0.0	6.0	19.0	186.0	0.0	0.5	0.0	0.0	5
A 86-8-18	JONVAL						400	130.0	4.2	3.1	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	6
AR 86-2-7	NOVION-PORCI						800	115.0	7.2	10.0	0.0	8.0	32.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	7
AR 86-1-32	MASIGNY						400	105.0	21.0	52.5	0.0	23.0	97.5	418.6	0.0	0.1	0.0	0.0	8

TABLEAU 2 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K			SO4	CO3	NO3		TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
5.8	0.1	0.3	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	0.0	6.2	1.0	71.5	167.0	93.4	1.3	5.3	0.0	41.2	58.8	0.0	0.0	3	
5.7	0.6	0.1	0.0	0.0	0.2	0.4	5.8	0.1	6.5	6.6	-1.0	336.0	88.3	9.0	2.0	0.6	3.0	6.5	88.6	1.9	4	
4.8	0.9	0.7	0.0	0.0	0.2	0.4	6.2	0.0	6.4	6.8	-3.1	333.0	75.4	14.4	10.2	0.0	2.5	5.8	91.5	0.1	5	
6.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	7.0	0.2	93.2	146.0	93.1	9.0	1.9	0.0	91.6	0.0	0.0	8.4	6	
5.8	0.6	0.4	0.0	0.0	0.2	0.7	0.0	0.0	6.8	0.9	76.6	172.0	84.7	8.8	6.4	0.0	25.0	74.1	0.0	0.9	7	
5.3	1.8	2.3	0.0	0.0	0.6	2.0	14.0	0.0	9.3	16.6	-28.4	717.0	56.6	18.9	24.6	0.0	3.9	12.2	83.9	0.0	8	

TABLEAU 2 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.01	0.06	0.00	0.93	0.01	0.95	1.43	0.00	0.41	0.59	0.00	0.23	3
0.10	0.02	0.29	0.88	0.09	0.97	2.17	29.58	0.03	0.06	0.89	0.14	4
0.19	0.14	0.00	0.75	0.14	0.90	2.34	36.68	0.02	0.06	0.92	-2.86	5
0.05	0.02	0.00	0.93	0.05	0.98	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.40	6
0.10	0.08	0.00	0.85	0.09	0.94	2.96	0.00	0.25	0.74	0.00	-0.93	7
0.33	0.43	0.00	0.57	0.19	0.75	3.14	21.54	0.04	0.12	0.84	-2.52	8

TABLEAU 3 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM	
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3
10-AUBE																	
A 298-8-	LUSIGNY	652	11300	T.7				65.0	35.2	61.4	12.3	92.5	224.6	84.0	0.0	0.0	9
J 298-7-1	THENNELIERES	652	10400	7.7				41.4	20.5	136.9	10.4	49.7	205.3	107.0	0.0	3.6	10

TABLEAU 3 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	
3.3	2.9	2.7	0.3*	1.5	4.7	2.8	0.0*	9.2	9.0	1.2*	535.*	35.4	32.0	29.1	3.4*	16.3	52.2	31.3	0.0*	9
2.1	1.7	6.0	0.3*	1.4	4.3	3.6	0.1*	10.0	9.3	3.6*	574.*	20.7	17.1	59.5	2.7*	15.1	46.0	38.3	0.6*	10

TABLEAU 3 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.90*	0.82*	0.12*	0.35*	0.32*	0.67*	3.16*	1.89*	0.17*	0.52*	0.31*	-1.02*	9
0.83*	2.88*	0.04*	0.21*	0.17*	0.38*	3.06*	2.55*	0.15*	0.46*	0.38*	-3.44*	10

TABLEAU 4 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM	
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3
18-CMER																	
A	AUBIGNY-NERE	652	2300.	7.7	74.2	1.8	6.2	1.6*	14.2	11.5	89.0	0.0	29.3*	11			
A	432-5-5	BLANCAFORT	652	15.8*	2290.*	7.0	76.2	3.5	7.5	2.6*	12.8	7.5	118.0	0.0	0.0*	12	
A		CHAPELLE-ANG	672*	8.2*	2400.*	7.5*	282.*	83.2	2.4	5.5	1.5*	13.5	6.0	124.4	0.0	0.0*	13
A		FERRAND-C-M	691	15.0*	1920.*	8.0*	324.*	107.6	2.2	3.7	1.2*	6.0	12.0	163.0	0.0	0.7*	14
A		HENRICHEMONT	652	6330.*	6.5	22.0	1.8	4.9	1.2*	11.4	0.0	30.0	0.0	18.0*	15		
A		MOROGES-BERT	691	15.0*	7400.*	5.7*	612.*	9.4	0.5	3.8	0.9*	6.4	7.5	11.0	0.0	6.6*	16
PO		MOROGES-LAV	698	11.0*	1740.*	7.3*	374.*	104.8	5.3	8.2	18.3*	17.0	16.0	157.0	0.0	28.4*	17
B		MOROGES-PEZ	691	18.0*	6250.*	7.1*	120.*	35.6	0.8	2.9	2.2*	5.3	7.0	53.0	0.0	4.5*	18
RA		VALENTIGNY	699	12.0*	1925.*	7.4*	317.*	106.0	3.6	4.7	3.5*	8.2	13.0	157.0	0.0	12.6*	19
A		VAILLY-CDMMU	672	10.2*	5250.*	6.5*	142.*	24.2	5.3	6.7	1.7*	11.3	9.0	31.7	0.0	10.7*	20
CE		VAILLY-ROCHE	679*	9.8*	1340.*	7.3*	744.*	146.4	2.9	26.2	4.7*	25.5	90.4	170.0	0.0	5.5*	21

TABLEAU 4 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	*		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
3.7	0.1	0.3	0.0*		0.4	0.2	3.0	0.5*	4.2	4.1	1.2*	227.*	89.0	3.6	6.5	1.0*	9.8	5.9	72.9	11.4*	11
3.8	0.3	0.3	0.1*		0.4	0.2	3.9	0.0*	4.5	4.5	0.5*	228.*	84.8	6.5	7.3	1.5*	8.1	3.5	88.4	0.0*	12
4.2	0.2	0.2	0.0*		0.4	0.1	4.1	0.0*	4.6	4.7	-0.2*	236.*	89.7	4.3	5.2	0.8*	8.2	2.7	89.1	0.0*	13
5.4	0.2	0.2	0.0*		0.2	0.3	5.4	0.0*	5.8	5.9	-0.9*	296.*	93.5	3.2	2.8	0.5*	2.9	4.3	92.7	0.2*	14
1.1	0.1	0.2	0.0*		0.3	0.0	1.0	0.3*	1.5	1.6	-3.6*	89.*	73.6	10.0	14.3	2.1*	20.0	0.0	62.2	17.8*	15
0.5	0.0	0.2	0.0*		0.2	0.2	0.4	0.1*	0.7	0.8	-7.2*	46.*	67.1	6.0	23.6	3.3*	22.3	19.3	45.4	13.0*	16
5.2	0.4	0.4	0.5*		0.5	0.3	5.2	0.5*	6.5	6.5	0.1*	355.*	80.5	6.8	5.5	7.2*	7.4	5.1	80.6	6.9*	17
1.8	0.1	0.1	0.1*		0.1	0.1	1.8	0.1*	2.0	2.1	-2.5*	111.*	87.7	3.3	6.2	2.8*	7.0	6.8	82.8	3.3*	18
5.3	0.3	0.2	0.1*		0.2	0.3	5.2	0.2*	5.9	5.9	-0.3*	308.*	89.9	5.1	3.5	1.5*	3.9	4.6	88.2	3.4*	19
1.2	0.4	0.3	0.0*		0.3	0.2	1.1	0.2*	2.0	1.7	6.8*	100.*	60.9	22.2	14.7	2.2*	18.4	10.8	61.0	9.8*	20
7.3	0.2	1.1	0.1*		0.7	1.9	5.7	0.1*	8.8	8.4	2.7*	471.*	83.0	2.7	12.9	1.4*	8.6	22.5	67.8	1.0*	21

TABLEAU 4 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.04*	0.07*	0.15*	0.89*	0.04*	0.93*	0.60*	7.42*	0.10*	0.06*	0.73*	0.22*	11
0.08*	0.09*	0.20*	0.85*	0.06*	0.91*	0.43*	10.91*	0.08*	0.04*	0.88*	-0.09*	12
0.05*	0.06*	0.16*	0.90*	0.04*	0.94*	0.33*	10.90*	0.08*	0.03*	0.89*	0.27*	13
0.03*	0.03*	0.19*	0.93*	0.03*	0.97*	1.48*	32.15*	0.03*	0.04*	0.93*	-0.13*	14
0.14*	0.19*	0.14*	0.74*	0.10*	0.84*	0.00*	3.11*	0.20*	0.00*	0.62*	0.24*	15
0.09*	0.35*	0.14*	0.67*	0.06*	0.73*	0.87*	2.03*	0.22*	0.19*	0.45*	-0.04*	16
0.08*	0.07*	1.32*	0.81*	0.07*	0.87*	0.70*	10.93*	0.07*	0.05*	0.81*	-0.72*	17
0.04*	0.07*	0.45*	0.88*	0.03*	0.91*	0.98*	11.83*	0.07*	0.07*	0.83*	-0.22*	18
0.06*	0.04*	0.44*	0.90*	0.05*	0.95*	1.17*	22.66*	0.04*	0.05*	0.88*	-0.27*	19
0.37*	0.24*	0.15*	0.61*	0.22*	0.83*	0.59*	3.32*	0.18*	0.11*	0.61*	-0.05*	20
0.03*	0.16*	0.11*	0.83*	0.03*	0.86*	2.62*	7.89*	0.09*	0.23*	0.68*	-0.75*	21

TABLEAU 5 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	MG/L CATIONS						MG/L ANIONS						NUM		
		A	L	T	RO	PH	RS	CA	MG	NA	K	CL	SO4		CO3	HCO3
91-ESSONNE																
B 219-1-3	*ORSAY	*673	*31.4*	*3590.*	*7.6*	*172.*	33.0	6.5	8.0	11.0*	9.0	15.0	62.0	0.0	0.0*	22
A 219-7-	*VIRY-CHAT	*673	*33.0*	*3710.*	*7.6*	*156.*	31.0	7.0	8.0	11.0*	8.0	11.0	62.0	0.0	0.0*	23

TABLEAU 5 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	*		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
1.7	0.5	0.3	0.3*		0.3	0.3	2.1	0.0*	2.8	2.6	3.5*	144.*	58.5	19.2	12.3	10.0*	9.6	11.9	78.5	0.0*	22
1.6	0.6	0.3	0.3*		0.2	0.2	2.1	0.0*	2.8	2.5	4.6*	138.*	56.1	21.1	12.6	10.2*	8.9	9.1	82.0	0.0*	23

TABLEAU 5 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.33	0.21	0.81	0.58	0.19	0.78	1.23	8.15	0.10	0.12	0.79	-1.48	22
0.38	0.22	0.81	0.56	0.21	0.77	1.02	9.17	0.09	0.09	0.82	-1.80	23

TABLEAU 6 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
27-EURE																
K 179-6-3	BENEQUART	693	12.0	1850	7.3	328	70.8	4.3	29.6	2.0	49.7	21.5	92.7	0.0	23.7	24
K 178-4-1	BOSC-RENOULT	643	12.0	2090	7.5	328	70.0	0.0	0.0	14.0	20.0	17.0	124.0	0.0	0.0	25
A 123-4-70	ELBEUF-CERIS	683	16.7	1630	7.9	359	32.0	15.8	74.0	19.6	23.8	22.0	161.0	0.0	0.0	26
A 123-4-73	ELBEUF-CHARB	683	16.2	1540	7.9	380	29.2	14.3	83.2	18.2	34.1	23.0	153.0	0.0	3.3	27
A 150-6-5	GAUCIEL	683	14.0	1900	7.7	302	45.4	11.4	44.0	8.3	22.0	18.0	124.5	0.0	12.2	28
J 124-2-108	INCARVILLE	693	28.0	354	7.9	1845	34.0	13.9	660.5	12.9	560.9	350.7	228.1	0.0	1.6	29
A 98-2-2	MARAIS-VERNI	683	13.1	1425	7.7	384	34.8	7.8	64.7	28.7	20.6	23.5	132.0	0.0	1.7	30
A 124-1-64	PONT-ARCHE	673	15.4	920	7.8	328	52.8	24.0	148.0	23.6	152.0	132.3	123.0	0.0	1.1	31
K 148-2-1	THIBERVILLE	693	12.0	1850	8.0	308	100.0	6.3	9.3	1.2	15.3	12.0	157.4	0.0	9.5	32
A 151-1-24	VERNON-L1	683	16.7	239	7.8	239	27.2	11.5	38.5	14.0	25.0	17.5	96.0	0.0	0.0	33
A 151-1-25	VERNON-L2	683	16.7	239	7.8	239	27.0	10.9	35.9	14.0	22.0	19.0	94.0	0.0	2.6	34
A 151-1-26	VERNON-L3	683	16.7	240	7.9	240	27.2	11.0	37.0	14.3	24.1	20.5	96.0	0.0	0.0	35
A 151-1-	VERNON-L4	683	16.7	2170	7.9	240	27.0	10.8	41.4	14.0	25.3	18.0	97.0	0.0	0.0	36
A 151-1-16	VERNON-ST-MA	553	14.8	2050	7.6	328	31.0	11.3	53.5	16.5	35.0	19.2	112.0	0.0	0.0	37

TABLEAU 6 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	
3.5	0.4	1.3	0.1	1.4	0.4	3.1	0.4	5.2	5.3	-0.7	294	67.6	6.8	24.6	1.0	26.3	8.4	58.1	7.1	24
3.5	0.0	0.0	0.4	0.6	0.4	4.1	0.0	3.9	5.1	-13.4	245	90.7	0.0	0.0	9.3	11.2	7.0	81.8	0.0	25
1.6	1.3	3.2	0.5	0.7	0.5	5.4	0.0	6.6	6.5	1.1	348	24.1	19.8	48.5	7.6	10.3	7.1	82.6	0.0	26
1.5	1.2	3.6	0.5	1.0	0.5	5.1	0.1	6.7	6.6	1.1	358	21.7	17.7	53.7	6.9	14.6	7.3	77.4	0.8	27
2.3	1.0	1.9	0.2	0.6	0.4	4.1	0.2	5.3	5.3	0.1	285	42.5	17.8	35.8	4.0	11.6	7.0	77.7	3.6	28
1.7	1.2	28.7	0.3	15.8	7.3	7.6	0.0	31.9	30.7	1.9	1862	5.3	3.6	90.0	1.0	51.4	23.8	24.7	0.1	29
1.7	0.6	2.8	0.7	0.6	0.5	4.4	0.0	5.9	5.5	3.9	313	29.3	10.9	47.4	12.4	10.6	8.9	80.0	0.5	30
2.6	2.0	6.4	0.6	4.3	2.8	4.1	0.0	11.7	11.2	2.3	656	22.6	17.1	55.1	5.2	38.4	24.7	36.8	0.2	31
5.0	0.5	0.4	0.0	0.4	0.3	5.2	0.2	6.0	6.1	-1.0	311	83.9	8.8	6.8	0.5	7.1	4.1	86.3	2.5	32
1.4	1.0	1.7	0.4	0.7	0.4	3.2	0.0	4.4	4.3	1.0	229	31.3	22.0	38.5	8.2	16.5	8.5	75.0	0.0	33
1.4	0.9	1.6	0.4	0.6	0.4	3.1	0.0	4.2	4.2	-0.1	225	32.3	21.7	37.4	8.6	14.8	9.4	74.8	1.0	34
1.4	0.9	1.6	0.4	0.7	0.4	3.2	0.0	4.3	4.3	-0.6	230	32.0	21.6	37.8	8.6	15.8	9.9	74.3	0.0	35
1.4	0.9	1.8	0.4	0.7	0.4	3.2	0.0	4.4	4.3	0.9	233	30.6	20.4	40.8	8.1	16.6	8.7	74.7	0.0	36
1.6	0.9	2.3	0.4	1.0	0.4	3.7	0.0	5.2	5.1	1.2	278	29.6	18.0	44.4	8.1	19.3	7.8	72.9	0.0	37

TABLEAU 6 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.10	0.36	0.04	0.68	0.07	0.74	0.32	2.21	0.26	0.08	0.58	0.04	24
0.00	0.00		0.91	0.00	0.91	0.63	7.34	0.11	0.07	0.82	0.36	25
0.82	2.01	0.16	0.24	0.20	0.44	0.68	8.00	0.10	0.07	0.83	-4.55	26
0.82	2.48	0.13	0.22	0.18	0.39	0.50	5.31	0.15	0.07	0.77	-3.25	27
0.42	0.84	0.11	0.42	0.18	0.60	0.61	6.70	0.12	0.07	0.78	-2.43	28
0.68	16.89	0.01	0.05	0.04	0.09	0.46	0.48	0.51	0.24	0.25	-0.84	29
0.37	1.62	0.26	0.29	0.11	0.40	0.84	7.58	0.11	0.09	0.80	-5.12	30
0.76	2.44	0.09	0.23	0.17	0.40	0.64	0.96	0.38	0.25	0.37	-0.64	31
0.10	0.08	0.08	0.84	0.09	0.93	0.58	12.17	0.07	0.04	0.86	-0.01	32
0.70	1.23	0.21	0.31	0.22	0.53	0.52	4.54	0.16	0.09	0.75	-1.89	33
0.67	1.16	0.23	0.32	0.22	0.54	0.64	5.06	0.15	0.09	0.75	-2.10	34
0.67	1.18	0.23	0.32	0.22	0.54	0.63	4.71	0.16	0.10	0.74	-1.91	35
0.67	1.33	0.20	0.31	0.20	0.51	0.52	4.50	0.17	0.09	0.75	-2.01	36
0.61	1.50	0.18	0.30	0.18	0.48	0.41	3.79	0.19	0.08	0.73	-1.79	37

TABLEAU 7 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM	
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3
28-EURE-LOIR																	
A 325-4-1	BONNEVAL	373			1800			7.8	4.2	109.0	10.5	10.0	37.0	46.0	0.0	0.0	38
A 325-2-1	BROU	693	15.0		2050	7.9	318	77.6	3.6	14.9	1.1	19.9	11.0	110.0	0.0	28.8	39
A 325-7-1	CHATEAUOUN	693	16.0		1630	8.0	388	58.4	3.6	75.1	9.0	20.2	25.0	151.0	0.0	35.4	40
K 254-4-2	PONTGOVIN	692	24.0		2170	7.9	292	70.0	9.6	12.0	1.3	16.3	8.0	124.5	0.0	8.0	41

TABLEAU 7 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS				NUM
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3		
0.4	0.3	4.7	0.3	0.3	0.8	1.5	0.0	5.7	2.6	37.9	224	6.8	6.1	82.4	4.7	10.9	29.8	59.3	0.0	38	
3.9	0.3	0.6	0.0	0.6	0.2	3.7	0.5	4.9	4.9	-0.6	266	79.9	6.2	13.3	0.6	11.4	4.7	74.6	9.3	39	
2.9	0.3	3.3	0.2	0.6	0.5	5.0	0.6	6.7	6.7	0.2	377	43.5	4.5	48.6	3.4	8.5	7.8	75.3	8.4	40	
3.5	0.8	0.5	0.0	0.5	0.2	4.1	0.1	4.9	4.9	-0.5	249	72.1	16.5	10.7	0.7	9.4	3.4	84.6	2.6	41	

TABLEAU 7 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.90	12.15	0.06	0.07	0.06	0.13	2.74	5.44	0.11	0.30	0.59	-16.78	38
0.08	0.17	0.04	0.80	0.06	0.86	0.41	6.54	0.11	0.05	0.75	-0.21	39
0.10	1.12	0.07	0.43	0.04	0.48	0.92	8.85	0.09	0.08	0.75	-5.14	40
0.23	0.15	0.06	0.72	0.16	0.89	0.36	9.04	0.09	0.03	0.85	-0.21	41

TABLEAU 8 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RD	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
41-LOIR CHER																
•VENDOME	•623•••••••	936.0	7.4	602.0	59.0	14.8	143.0	9.0	151.0	86.0	135.0	0.0	0.0	42		

TABLEAU 8 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS			NUM	
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	TDS	CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3		NO3
3.0	1.2	6.2	0.2	4.3	1.8	4.5	0.0	10.6	10.5	0.4	597.0	27.7	11.6	58.5	2.2	40.3	17.0	42.7	0.0	42

TABLEAU 8 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.42	2.11	0.04	0.28	0.12	0.39	0.42	1.06	0.40	0.17	0.43	-0.52	42

TABLEAU 9 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RD	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
45-LOIRET																
400-4-67	•BRIARE	•653•23.0	4900.0	7.6	••••••••••	34.2	2.8	3.5	3.6	6.4	15.0	54.0	0.0	0.0	43	
A1400-4-7	•MONTBOUY	•653•••••••	4420.0	7.7	••••••••••	35.4	3.0	3.8	4.3	9.2	17.5	56.0	0.0	0.0	44	

TABLEAU 9 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS			NUM	
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	TDS	CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3		NO3
1.7	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	1.8	0.0	2.2	2.3	-2.3	119.0	78.2	10.7	7.0	4.2	7.9	13.6	78.5	0.0	43
1.8	0.3	0.2	0.1	0.3	0.4	1.9	0.0	2.3	2.5	-4.1	129.0	77.1	10.9	7.2	4.8	10.4	14.6	75.0	0.0	44

TABLEAU 9 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.14	0.09	0.61	0.78	0.11	0.89	1.73	9.98	0.08	0.14	0.79	-0.36	43
0.14	0.09	0.67	0.77	0.11	0.88	1.41	7.20	0.10	0.15	0.75	-0.06	44

TABLEAU 10 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
51-MARNE																
CE160-7-1	BRAUX	692	1660	7.7	355	96.0	17.5	4.4	6.3	5.0	24.0	183.0	0.0	1.6	45	
PD160-3-37	CHAUFONTAI	692	1480	7.6	388	121.0	15.1	5.5	4.5	6.4	35.0	209.0	0.0	0.9	46	
A	DOMPREMY	691	1790	8.0	322	98.0	32.4	7.8	11.0	5.7	38.0	159.0	0.0	2.9	47	
A	NUISEMENT	692	1470	7.8	411	76.2	31.1	27.2	10.4	19.9	94.0	161.0	0.0	0.2	48	
A 160-3-4	STE-MENEHOUL	691	1670	7.9	352	22.0	12.0	92.5	10.0	9.9	40.0	146.0	0.0	4.0	49	

TABLEAU 10 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS				NUM
	MG	NA	K	CL		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3		
4.8	1.5	0.2	0.2	0.1	0.5	6.1	0.0	6.6	6.8	-1.2	337	72.6	22.1	2.9	2.4	2.1	7.4	90.2	0.4	45		
6.0	1.3	0.2	0.1	0.2	0.7	7.0	0.0	7.7	7.9	-1.5	397	79.0	16.4	3.1	1.5	2.3	9.2	88.3	0.2	46		
2.9	2.7	0.3	0.3	0.2	0.8	5.3	0.0	6.2	6.3	-0.6	314	46.6	43.4	5.5	4.5	2.5	12.6	84.2	0.7	47		
3.8	2.6	1.2	0.3	0.6	2.0	5.4	0.0	7.9	7.9	-0.2	420	48.5	33.0	15.1	3.4	7.1	24.8	68.0	0.0	48		
1.1	1.0	4.0	0.3	0.3	0.8	4.9	0.1	6.4	6.0	2.7	336	17.2	15.7	63.1	4.0	4.6	13.8	80.5	1.1	49		

TABLEAU 10 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.30	0.04	0.84	0.73	0.22	0.95	3.55	43.31	0.02	0.07	0.90	-1.51	45
0.21	0.04	0.48	0.79	0.16	0.95	4.04	38.64	0.02	0.09	0.88	-0.97	46
0.93	0.12	0.83	0.47	0.43	0.90	4.93	33.01	0.03	0.13	0.84	-2.87	47
0.68	0.31	0.23	0.49	0.33	0.82	3.49	9.57	0.07	0.25	0.68	-1.59	48
0.91	3.66	0.06	0.17	0.16	0.33	2.99	17.45	0.05	0.14	0.81	-14.34	49

TABLEAU 11 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
52-HTE-MARNE																
A	HUMBE COURT	691	1480	7.9	370	111.6	2.4	7.8	1.0	12.8	26.0	147.6	0.0	31.0	50	
A	MONTIER-DER	691	1335	7.7	356	60.0	34.6	13.5	11.6	11.4	30.0	171.0	0.0	5.1	51	
A	VOILLECOMTE	691	3190	7.3	168	47.4	4.0	6.0	2.1	7.1	29.0	67.1	0.0	0.5	52	

TABLEAU 11 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	CL		SO4	CO3	NO3	CL	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		CL	SO4	CO3	
5.6	0.2	0.3	0.0*	0.4	0.5	4.9	0.5*	6.1	6.3	-1.4*	340.*	90.0	3.3	5.5	0.4*	5.7	8.6	77.9	7.8*	50		
3.0	2.9	0.6	0.3*	0.3	0.6	5.7	0.1*	6.8	6.7	0.3*	337.*	44.3	42.6	8.7	4.4*	4.8	9.3	84.7	1.2*	51		
2.4	0.3	0.3	0.1*	0.2	0.6	2.2	0.0*	3.0	3.0	-0.5*	163.*	78.5	11.0	8.6	1.8*	6.6	19.8	73.4	0.3*	52		

TABLEAU 11 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.04*	0.06*	0.08*	0.91*	0.03*	0.94*	1.50*	13.65*	0.06*	0.09*	0.78*	-0.01*	50
0.96*	0.20*	0.51*	0.44*	0.43*	0.87*	1.95*	17.75*	0.05*	0.09*	0.85*	-1.75*	51
0.14*	0.11*	0.21*	0.79*	0.11*	0.90*	3.02*	11.18*	0.07*	0.20*	0.73*	-0.57*	52

TABLEAU 12 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
60-OISE																
A	*BEAUVAIS	*635	*****	2910.*	7.5*	205.*	8.0	2.4	83.0	0.0*	14.0	9.6	92.0	0.0	0.0*	53
BT103-4-1	*CUIGNERES	*638	*****	7.6	*****	1410.0	315.0	5650.0	0.0*	3700.0	250.0	210.0	0.0	0.0*	54	
BJ103-4-1	*CUIGNERES	*638	*****	1060.0	375.0	8300.0	0.0*	14950.0	550.0	390.0	0.0	0.0*	55			
BT	*ST-MAUR	*638	*****	7.0*	6543.*	310.0	290.0	4500.0	0.0*	7680.0	230.0	450.0	0.0	0.0*	56	
CO	*ST-MAUR	*638	*****	7.9	*****	50.0	120.0	915.0	0.0*	370.0	1480.0	330.0	0.0	0.0*	57	
CO 80-4-1	*WELLES-PEREN	*638	*****	8.1	*****	44.0	45.0	170.0	0.0*	960.0	2420.0	45.0	0.0	0.0*	58	
SQ 80-4-1	*WELLES-PEREN	*638	*****	7.7	*****	144.0	72.0	2620.0	0.0*	2620.0	2560.0	36.0	0.0	0.0*	59	
SQ 80-4-1	*WELLES-PEREN	*638	*****	7.0	*****	180.0	90.0	1770.0	0.0*	1480.0	1714.0	440.0	0.0	0.0*	60	

TABLEAU 12 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS				BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	CL		SO4	CO3	NO3	CL	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		CL	SO4	CO3	
0.4	0.2	3.6	0.0*	0.4	0.2	3.1	0.0*	4.2	3.7	7.0*	209.*	9.5	4.8	85.7	0.0*	10.8	5.5	83.8	0.0*	53		
70.5	26.3	245.7	0.0*	104.2	5.2	7.0	0.0*	342.4	116.4	49.2*	11535.*	20.6	7.7	71.7	0.0*	89.5	4.5	6.0	0.0*	54		
53.0	31.3	360.9	0.0*	421.1	11.5	13.0	0.0*	445.1	445.6	-0.1*	25625.*	11.9	7.0	81.1	0.0*	94.5	2.6	2.9	0.0*	55		
15.5	24.2	195.7	0.0*	216.3	4.8	15.0	0.0*	235.3	236.1	-0.2*	13460.*	6.6	10.3	83.1	0.0*	91.6	2.0	6.4	0.0*	56		
2.5	10.0	39.8	0.0*	10.4	30.8	11.0	0.0*	52.3	52.3	0.0*	3265.*	4.8	19.1	76.1	0.0*	19.9	59.0	21.1	0.0*	57		
2.2	3.8	7.4	0.0*	27.0	50.4	1.5	0.0*	13.3	79.0	-71.1*	3684.*	16.5	28.1	55.4	0.0*	34.2	63.9	1.9	0.0*	58		
7.2	6.0	113.9	0.0*	73.8	53.3	1.2	0.0*	127.1	128.3	-0.5*	8052.*	5.7	4.7	89.6	0.0*	57.5	41.6	0.9	0.0*	59		
9.0	7.5	77.0	0.0*	41.7	35.7	14.7	0.0*	93.5	92.1	0.7*	5674.*	9.6	8.0	82.3	0.0*	45.3	38.8	15.9	0.0*	60		

TABLEAU 12 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.50	9.02	0.00	0.10	0.05	0.14	0.51	7.78	0.11	0.05	0.84	-8.15	53
0.37	3.48	0.00	0.21	0.08	0.28	0.05	0.07	0.90	0.04	0.06	-1.36	54
0.59	6.81	0.00	0.12	0.07	0.19	0.03	0.03	0.95	0.03	0.03	0.14	55
1.56	12.62	0.00	0.07	0.10	0.17	0.02	0.07	0.92	0.02	0.06	0.10	56
4.00	15.91	0.00	0.05	0.19	0.24	2.96	1.06	0.20	0.59	0.21	-2.82	57
1.70	3.36	0.00	0.16	0.28	0.45	1.86	0.06	0.34	0.64	0.02	0.73	58
0.83	15.82	0.00	0.06	0.05	0.10	0.72	0.02	0.58	0.42	0.01	-0.54	59
0.83	8.55	0.00	0.10	0.08	0.18	0.86	0.35	0.45	0.39	0.16	-0.85	60

TABLEAU 13 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RD	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM		
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3	
62-PAS-CALAI																		
A	*WAVANS-AUTHI*635						8.1	4300.	120.0	26.4	1470.0	0.0	2400.0	216.0	309.0	0.0	0.0	61
B	*WAVANS-AUTHI*638						7.0	13360.	245.0	270.0	4380.0	0.0	7330.0	515.0	252.0	0.0	0.0	62

TABLEAU 13 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS			NUM	
	MG	NA	K			SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3		NO3
6.0	2.2	63.9	0.0		67.6	4.5	10.3	0.0	72.1	82.4	-6.7	4541.	8.3	3.1	88.6	0.0	82.0	5.5	12.5	0.0	61
12.3	22.5	190.4	0.0		206.5	10.7	8.4	0.0	225.2	225.6	-0.1	12992.	5.4	10.0	84.6	0.0	91.5	4.8	3.7	0.0	62

TABLEAU 13 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.37	10.65	0.00	0.08	0.03	0.11	0.07	0.15	0.82	0.05	0.12	0.05	61
1.84	15.55	0.00	0.05	0.10	0.15	0.05	0.04	0.92	0.05	0.04	0.08	62

TABLEAU 14 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RD	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM		
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3	
75-SEINE																		
A	183-6B-48 *BLOMET						8.2		27.0	8.7	15.0	6.5	8.0	13.2	74.0	0.0	0.0	63
B	183-7A-114 *BUTTE-CAILLE						7.5		36.0	9.6	13.0	9.0	7.0	12.0	89.3	0.0	0.0	64
A	183-3C-28 *HEBERT						7.6		36.0	10.0	13.0	11.0	10.0	13.0	78.0	0.0	0.0	65
B	183-6A-32 *DRTF						7.1	140.	30.0	7.5	11.4	11.3	11.8	10.0	79.0	0.0	0.0	66
A	183-6A-39 *PASSY						8.0		26.0	8.0	13.5	11.0	6.0	9.0	76.3	0.0	0.0	67

TABLEAU 14 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K			SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
1.4	0.7	0.7	0.2*		0.2	0.3	2.5	0.0*	2.9	3.0	-1.2*	152.*	46.7	25.1	22.5	5.8*	7.6	9.3	83.1	0.0*	63
1.8	0.8	0.6	0.2*		0.2	0.3	3.0	0.0*	3.4	3.4	-0.4*	175.*	53.0	23.6	16.6	6.8*	5.8	7.3	86.9	0.0*	64
1.8	0.8	0.6	0.3*		0.3	0.3	2.6	0.0*	3.5	3.2	4.9*	171.*	51.7	23.9	16.2	8.1*	8.9	8.6	82.5	0.0*	65
1.5	0.6	0.5	0.3*		0.3	0.2	2.6	0.0*	2.9	3.2	-4.3*	161.*	51.5	21.5	17.0	10.0*	10.5	6.6	83.0	0.0*	66
1.3	0.7	0.6	0.3*		0.2	0.2	2.5	0.0*	2.8	2.9	-1.1*	149.*	45.8	23.5	20.7	9.9*	5.8	6.5	87.7	0.0*	67

TABLEAU 14 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/ANP	CO3/ANP	IEB	NUM
0.54*	0.48*	0.26*	0.47*	0.25*	0.72*	1.22*	10.95*	0.08*	0.09*	0.83*	-2.63*	63
0.44*	0.31*	0.41*	0.53*	0.24*	0.77*	1.27*	15.10*	0.06*	0.07*	0.87*	-3.04*	64
0.46*	0.31*	0.50*	0.52*	0.24*	0.76*	0.96*	9.23*	0.09*	0.09*	0.82*	-2.01*	65
0.42*	0.33*	0.58*	0.52*	0.21*	0.73*	0.63*	7.92*	0.10*	0.07*	0.83*	-1.36*	66
0.51*	0.45*	0.48*	0.46*	0.24*	0.69*	1.11*	15.05*	0.06*	0.06*	0.88*	-4.14*	67

TABLEAU 15 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM	
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3
92-HAUTSEINE																	
A 183-6D-38	*BAGNEUX	*533*	*****		3590.*	7.4*	*****	31.0	8.1	19.0	8.0*	7.5	12.0	60.1	0.0	0.0*	68
A 183-6A-128	*ISSY-MOULINI*	653*	24.8*		3420.*	8.4*	*****	32.0	8.3	11.5	11.3*	6.4	14.5	77.0	0.0	0.0*	69
A 183-6A-31	*ISSY-MOULINZ*	653*	26.7*		3770.*	7.6*	176.*	32.5	9.0	10.0	11.7*	9.0	19.0	72.5	0.0	1.0*	70
A 183-1C-48	*NANTERRE	*333*	*****					30.0	7.4	18.0	0.0*	8.8	11.2	72.0	0.0	0.0*	71
A 183-28-87	*VILLENEUVE-G*	673*	22.0*		2975.*	7.7*	248.*	28.0	9.7	26.0	15.0*	12.0	12.0	80.0	0.0	0.0*	72

TABLEAU 15 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K			SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
1.6	0.7	0.8	0.2*		0.2	0.3	2.0	0.0*	3.3	2.5	13.8*	145.*	47.6	20.7	25.4	6.3*	8.6	10.1	81.3	0.0*	68
1.6	0.7	0.5	0.3*		0.2	0.3	2.6	0.0*	3.1	3.0	0.5*	161.*	51.9	22.4	16.2	9.4*	5.9	9.9	84.2	0.0*	69
1.6	0.8	0.4	0.3*		0.3	0.4	2.4	0.0*	3.1	3.1	0.5*	164.*	52.3	24.1	14.0	9.6*	8.2	12.8	78.4	0.5*	70
1.5	0.6	0.8	0.0*		0.2	0.2	2.4	0.0*	2.9	2.9	0.3*	147.*	51.7	21.3	27.0	0.0*	8.6	8.1	83.3	0.0*	71
1.4	0.8	1.1	0.4*		0.3	0.3	2.7	0.0*	3.7	3.3	6.7*	182.*	37.6	21.7	30.4	10.3*	10.4	7.7	81.9	0.0*	72

TABLEAU 15 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.44	0.53	0.25	0.48	0.21	0.68	1.18	9.48	0.09	0.10	0.81	-3.88	68
0.43	0.31	0.58	0.52	0.22	0.74	1.68	14.24	0.06	0.10	0.84	-3.38	69
0.46	0.27	0.69	0.52	0.24	0.76	1.56	9.53	0.08	0.13	0.78	-1.90	70
0.41	0.52	0.00	0.52	0.21	0.73	0.94	9.68	0.09	0.08	0.83	-2.16	71
0.58	0.81	0.34	0.38	0.22	0.59	0.74	7.89	0.10	0.08	0.82	-3.48	72

TABLEAU 16 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
76-SEINE-MTE																
A 99-4C-34	CANTELEU	673	16.0	1050	7.7	768	41.6	10.1	125.0	23.3	150.5	45.6	127.0	0.0	0.9	73
A 31-8-11	EU	635					16.0	6.0	522.0	0.0	600.0	79.0	177.0	0.0	0.0	74
CE56-8-	LESLOGES	683	15.4	2000	7.8	317	54.4	22.3	18.3	8.0	16.3	8.5	148.0	0.0	2.0	75
A 99-2-3	LETRAIT	683	15.8	1500	7.9	352	29.6	16.0	67.7	15.7	85.9	19.0	102.0	0.0	0.0	76
A 57-2-1	ST-PIERREPOR	683	15.4	1920	7.7	300	40.0	17.0	33.6	14.3	31.2	41.5	99.0	0.0	1.8	77
J 100-5-8	SOTTEVILLE	553	18.0		7.6	386	46.0	16.0	56.0	18.7	94.0	35.7	98.0	0.0	0.0	78
A 57-6-1	THIERGEVILLE	673	9.9	1770	7.6	370	90.8	9.9	14.5	2.2	27.0	12.0	135.0	0.0	1.5	79
K	TRIGUERVILLE	683	13.0	3800	6.6	200	36.4	1.7	11.2	1.1	17.8	16.0	45.0	0.0	14.0	80

TABLEAU 16 ANNEXE 2

CA	MEQ MG	CATIONS				MEQ SO4	ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS				NUM
		NA	K	CL			CO3	NO3		TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	
2.1	0.8	5.4	0.6	4.2	1.0	4.2	0.0	9.0	9.4	-2.6	524	23.2	9.4	60.7	6.7	44.9	10.1	44.9	0.2	73		
0.8	0.5	22.7	0.0	16.9	1.6	5.9	0.0	24.0	24.4	-0.9	1400	3.3	2.1	94.6	0.0	69.1	6.7	24.1	0.0	74		
2.7	1.9	0.8	0.2	0.5	0.2	4.9	0.0	5.6	5.6	-0.2	277	48.8	33.3	14.3	3.7	8.2	3.2	88.1	0.6	75		
1.5	1.3	2.9	0.4	2.4	0.4	3.4	0.0	6.2	6.2	-0.5	335	24.0	21.6	47.8	6.5	38.9	6.4	54.7	0.0	76		
2.0	1.4	1.5	0.4	0.9	0.9	3.3	0.0	5.2	5.1	1.7	278	38.1	27.0	27.9	7.0	17.3	17.0	65.1	0.6	77		
2.3	1.3	2.4	0.5	2.6	0.7	3.3	0.0	6.5	6.7	-0.8	364	35.1	20.4	37.2	7.3	39.8	11.2	49.1	0.0	78		
4.5	0.8	0.6	0.1	0.8	0.3	4.5	0.0	6.1	5.5	4.5	292	75.0	13.6	10.4	0.9	13.7	4.5	81.3	0.4	79		
1.8	0.1	0.5	0.0	0.5	0.3	1.5	0.2	2.5	2.6	-1.6	143	73.5	5.7	19.7	1.1	19.6	13.0	58.7	8.7	80		

TABLEAU 16 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.40	2.61	0.11	0.23	0.09	0.33	0.22	1.00	0.45	0.10	0.45	-0.42	73
0.63	28.37	0.00	0.03	0.02	0.05	0.10	0.35	0.69	0.07	0.24	-0.34	74
0.68	0.29	0.26	0.49	0.33	0.82	0.39	10.74	0.08	0.03	0.88	-1.18	75
0.90	1.99	0.14	0.24	0.22	0.46	0.16	1.41	0.39	0.06	0.55	-0.38	76
0.71	0.73	0.25	0.38	0.27	0.65	0.98	3.75	0.17	0.17	0.65	-1.08	77
0.58	1.06	0.20	0.35	0.20	0.55	0.28	1.23	0.40	0.11	0.49	-0.10	78
0.18	0.14	0.09	0.75	0.14	0.89	0.33	5.92	0.14	0.05	0.81	0.10	79
0.08	0.27	0.06	0.73	0.06	0.79	0.66	2.99	0.20	0.13	0.59	-0.03	80

TABLEAU 17 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
77-SEINE-MNE																
B 295-1-49	GDE-PARISSE	683	22.4	3280	8.0	178	35.2	10.6	10.0	7.6	5.0	10.5	83.0	0.0	0.0	81

TABLEAU 17 ANNEXE 2

CA	MG	NA	K	CL	MEQ ANIONS			TCA	BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS	NUM		
					SO4	CO3	NO3		TAN	ERR	CA		MG	NA	K	CL			SO4	CO3
1.8	0.9	0.4	0.2	0.1	0.2	2.8	0.0	3.3	3.1	2.3	161	53.8	27.0	13.3	6.0	4.5	7.0	88.5	0.0	81

TABLEAU 17 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.50	0.25	0.45	0.54	0.27	0.81	1.55	19.64	0.05	0.07	0.88	-3.47	81

TABLEAU 18 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
93-SEINE-STO																
A 183-4B-17	AULNAY	673	34.4	2670	7.9	333	25.0	9.0	41.0	21.5	24.0	23.0	86.0	0.0	0.0	82
A 183-2B-26	EPINAY	673	28.2	1140	7.8	720	75.0	36.0	71.5	25.0	111.0	154.0	80.0	0.0	2.0	83
A 184-5-13	NOISY-GRAND	673	31.6	3060	8.1	338	28.0	8.0	31.0	20.0	17.0	14.5	80.0	0.0	0.0	84
A 183-3D-121	PANTIN-BLANC	613	3330	7.6	3330	22.4	8.5	28.5	0.0	12.0	13.6	78.0	0.0	0.7	85	
A 183-3C-29	PLAINE-ST-D	373	4440	7.4	4440	26.0	7.2	32.0	0.0	10.5	10.0	84.0	0.0	0.0	86	
A 183-4D-17	VILLEMOMBLE	343	31.5	3360	7.3	3360	27.0	7.5	23.0	13.5	11.0	13.0	82.8	0.0	0.0	87

TABLEAU 18 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS			NUM	
	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	TDS	CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3		NO3
1.3	0.8	1.8	0.6	0.7	0.5	2.9	0.0	4.3	4.0	3.7	229.0	28.8	17.3	41.1	12.7	16.8	11.9	71.3	0.0	82
3.8	3.0	3.1	0.6	3.1	3.2	2.7	0.0	10.5	9.0	7.5	554.0	35.7	28.6	29.6	6.1	34.6	35.5	29.5	0.4	83
1.4	0.7	1.3	0.5	0.5	0.3	2.7	0.0	3.9	3.4	6.5	198.0	35.6	17.0	34.3	13.1	13.9	8.8	77.3	0.0	84
1.1	0.7	1.2	0.0	0.3	0.3	2.6	0.0	3.1	3.2	-2.6	163.0	36.5	23.1	40.4	0.0	10.5	8.8	80.4	0.3	85
1.3	0.6	1.4	0.0	0.3	0.2	2.8	0.0	3.3	3.3	-0.2	169.0	39.5	18.2	42.3	0.0	9.0	6.3	84.7	0.0	86
1.4	0.6	1.0	0.3	0.3	0.3	2.8	0.0	3.3	3.3	-0.3	177.0	40.6	18.8	30.1	10.4	9.3	8.1	82.6	0.0	87

TABLEAU 18 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.60	1.43	0.31	0.29	0.17	0.46	0.71	4.24	0.17	0.12	0.71	-2.45	82
0.80	0.83	0.21	0.36	0.29	0.64	1.03	0.85	0.35	0.36	0.30	-0.20	83
0.48	0.96	0.38	0.36	0.17	0.53	0.63	5.57	0.14	0.09	0.77	-2.89	84
0.63	1.11	0.00	0.37	0.23	0.60	0.84	7.69	0.10	0.09	0.80	-2.67	85
0.46	1.07	0.00	0.39	0.18	0.58	0.70	9.47	0.09	0.06	0.85	-3.70	86
0.46	0.74	0.35	0.41	0.19	0.59	0.87	8.91	0.09	0.08	0.83	-3.34	87

TABLEAU 19 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
80-SOMME																
CO 46-6-23	AMIENS	638	21.0				12200.0	196.0	95.0	3580.0	0.0	4250.0	2280.0	180.0	0.0	88
BT 46-6-23	AMIENS	638	24.5				20630.0	410.0	305.0	5950.0	0.0	10400.0	530.0	235.0	0.0	89
A 46-6-23	AMIENS	635	17.5				6870.0	70.0	50.5	2040.0	0.0	1660.0	1970.0	312.0	0.0	90
BT 61-8-2	BELLEUSE	638		6.7			1100.0	440.0	8220.0	0.0	13160.0	405.0	210.0	0.0	0.0	91
CO 61-8-2	BELLEUSE	638		7.5			160.0	167.0	2765.0	0.0	3100.0	2060.0	333.0	0.0	0.0	92
BJ 61-8-2	BELLEUSE	638		6.3			1620.0	570.0	8100.0	0.0	16230.0	275.0	230.0	0.0	0.0	93
TR 61-8-2	BELLEUSE	638		6.9			2000.0	440.0	7600.0	0.0	15800.0	285.0	450.0	0.0	0.0	94
A 32-3-1	LECROTOY	685	18.8	140.0	7.7	4390.0	43.4	26.0	1570.0	25.3	2100.0	382.0	184.0	0.0	0.0	95
BT34-2-7	OCCOCHES	638		8.5	6650.0	1410.0	67.0	2420.0	0.0	3700.0	250.0	210.0	0.0	0.0	0.0	96
A 32-4-1	SAIGNEVILLE	635		7.3	4730.0	54.0	31.2	1750.0	0.0	2510.0	216.0	180.0	0.0	0.0	0.0	97
BT	VERMANDOVILL	638		7.0	13360.0	245.0	160.0	5240.0	0.0	8320.0	515.0	250.0	0.0	0.0	0.0	98

TABLEAU 19 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS		PC CATIONS				PC ANIONS			*NUM
	MG	NA	K	*		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR	*	*	CA	MG	NA	K	*	CL	SO4	
9.8	7.9	155.7	0.0*	119.7	47.5	6.0	0.0*	173.4	173.2	0.0*	10581.*	5.7	4.6	89.8	0.0*	69.1	27.4	3.5	0.0*	88	
20.5	25.4	258.7	0.0*	293.0	11.0	7.8	0.0*	304.6	311.8	-1.2*	17830.*	6.7	8.3	84.9	0.0*	93.9	3.5	2.5	0.0*	89	
3.5	4.2	88.7	0.0*	46.8	41.0	10.4	0.0*	96.4	98.2	-0.9*	6102.*	3.6	4.4	92.0	0.0*	47.6	41.8	10.6	0.0*	90	
55.0	36.7	357.4	0.0*	370.7	8.4	7.0	0.0*	449.1	386.1	7.5*	23535.*	12.2	8.2	79.6	0.0*	96.0	2.2	1.8	0.0*	91	
8.0	13.9	120.2	0.0*	87.3	42.9	11.1	0.0*	142.1	141.3	0.3*	8585.*	5.6	9.8	84.6	0.0*	61.8	30.4	7.9	0.0*	92	
81.0	47.5	352.2	0.0*	457.2	5.7	7.7	0.0*	480.7	470.6	1.1*	27025.*	16.9	9.9	73.3	0.0*	97.2	1.2	1.6	0.0*	93	
100.0	36.7	330.4	0.0*	445.1	5.9	15.0	0.0*	467.1	466.0	0.1*	26575.*	21.4	7.8	70.7	0.0*	95.5	1.3	3.2	0.0*	94	
2.2	2.2	68.3	0.6*	59.2	8.0	6.1	0.0*	73.2	73.2	-0.0*	4330.*	3.0	3.0	93.2	0.9*	80.8	10.9	8.4	0.0*	95	
70.5	5.6	105.2	0.0*	104.2	5.2	7.0	0.0*	181.3	116.4	21.8*	8057.*	38.9	3.1	58.0	0.0*	89.5	4.5	6.0	0.0*	96	
2.7	2.6	76.1	0.0*	70.7	4.5	6.0	0.0*	81.4	81.2	0.1*	4741.*	3.3	3.2	93.5	0.0*	87.1	5.5	7.4	0.0*	97	
12.3	13.3	227.8	0.0*	234.4	10.7	8.3	0.0*	253.4	253.4	-0.0*	14730.*	4.8	5.3	89.9	0.0*	92.5	4.2	3.3	0.0*	98	

TABLEAU 19 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	*NUM
0.81*	15.88*	0.00*	0.06*	0.05*	0.10*	0.40*	0.05*	0.69*	0.27*	0.03*	-0.30*	* 88
1.24*	12.62*	0.00*	0.07*	0.08*	0.15*	0.04*	0.03*	0.94*	0.04*	0.03*	0.12*	* 89
1.20*	25.34*	0.00*	0.04*	0.04*	0.08*	0.88*	0.22*	0.48*	0.42*	0.11*	-0.90*	* 90
0.67*	6.50*	0.00*	0.12*	0.08*	0.20*	0.02*	0.02*	0.96*	0.02*	0.02*	0.04*	* 91
1.74*	15.03*	0.00*	0.06*	0.10*	0.15*	0.49*	0.13*	0.62*	0.30*	0.08*	-0.38*	* 92
0.59*	4.35*	0.00*	0.17*	0.10*	0.27*	0.01*	0.02*	0.97*	0.01*	0.02*	0.23*	* 93
0.37*	3.30*	0.00*	0.21*	0.08*	0.29*	0.01*	0.03*	0.96*	0.01*	0.03*	0.26*	* 94
1.00*	31.46*	0.01*	0.03*	0.03*	0.06*	0.13*	0.10*	0.81*	0.11*	0.08*	-0.16*	* 95
0.08*	1.49*	0.00*	0.39*	0.03*	0.42*	0.05*	0.07*	0.90*	0.04*	0.06*	-0.01*	* 96
0.96*	28.18*	0.00*	0.03*	0.03*	0.07*	0.06*	0.08*	0.87*	0.06*	0.07*	-0.08*	* 97
1.09*	18.60*	0.00*	0.05*	0.05*	0.10*	0.05*	0.04*	0.92*	0.04*	0.03*	0.03*	* 98

TABLEAU 20 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A L T RD PH RS					MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				*NUM	
		*	*	*	*	*	CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3		NO3
94-VAL-MARNE																
A 183-70-85	*CHARENTON	*643*	28.0*	3545.*	7.6*	*****	27.0	7.5	13.5	6.0*	7.0	12.0	71.0	0.0	0.0*	99
A 183-70-33	*IVRY-P-1	*643*	31.0*	2820.*	8.0*	*****	44.0	17.0	19.0	9.9*	10.0	11.1	124.2	0.0	0.0*	100
A 183-70-73	*IVRY-P-2	*673*	28.9*	3375.*	7.7*	*****	28.0	7.0	12.5	10.5*	8.0	12.0	72.0	0.0	0.0*	101

TABLEAU 20 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	*		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
1.4	0.6	0.6	0.2*	0.2	0.3	2.4	0.0*	2.7	2.8	-1.8*	144.*	49.7	23.0	21.6	5.7*	7.0	8.9	84.1	0.0*	99	
2.2	1.4	0.8	0.3*	0.3	0.2	4.1	0.0*	4.7	4.7	0.5*	235.*	46.8	30.2	17.6	5.4*	6.1	5.0	89.0	0.0*	100	
1.4	0.6	0.5	0.3*	0.2	0.3	2.4	0.0*	2.8	2.9	-1.4*	150.*	50.1	20.9	19.4	9.6*	7.8	8.7	83.5	0.0*	101	

TABLEAU 20 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.46*	0.43*	0.26*	0.50*	0.23*	0.73*	1.27*	12.00*	0.07*	0.09*	0.84*	-2.76*	99
0.64*	0.38*	0.31*	0.47*	0.30*	0.77*	0.82*	14.70*	0.06*	0.05*	0.89*	-2.83*	100
0.42*	0.39*	0.50*	0.50*	0.21*	0.71*	1.11*	10.65*	0.08*	0.09*	0.83*	-2.61*	101

TABLEAU 21 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	MG/L CATIONS					MG/L ANIONS				NUM					
		A	L	T	RO	PH	RS	CA	MG	NA		K	CL	SO4	CO3	HCO3
95-VAL-OISE																
A 153-1-47	ISLE-ADAM	343					10.8	1.0	80.0	0.0*	21.0	17.5	114.0	0.0	0.0*	102

TABLEAU 21 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				CL	PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	*		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K		SO4	CO3	NO3	
0.5	0.1	3.5	0.0*	0.6	0.4	3.8	0.0*	4.1	4.8	-7.4*	244.*	13.2	2.0	84.8	0.0*	12.4	7.7	79.9	0.0*	102	

TABLEAU 21 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.15*	6.44*	0.00*	0.13*	0.02*	0.15*	0.62*	6.42*	0.12*	0.08*	0.80*	-4.88*	102

TABLEAU 22 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	AL	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
							CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
89-YONNE															
	AVROLLES	652	860	7.8			213.2	3.7	10.6	3.5	73.1	62.1	0.0	176.3	42.0
A2367-7-5	CHICHERY	652	4870	7.7			32.6	2.4	4.2	2.3	7.1	20.5	51.8	0.0	0.0
A1402-5-2	DRACY	652	4265	7.3			40.8	2.4	5.0	0.7	8.5	0.1	62.0	0.0	4.5
A3402-3-1	FLEURY	651	2156	7.7			63.2	14.2	6.2	8.7	11.4	74.2	92.7	0.0	0.0
A1367-4-4	MIGENNES	692	1980	7.8	337		94.8	1.7	5.2	2.1	12.1	13.0	120.8	0.0	44.3
A1367-7-6	VILLEMER	652	1520	7.4			130.0	3.6	6.1	2.6	14.2	65.4	164.0	0.0	0.0
CE402-6-41	BEAUVOIR	658	1840	7.4			107.6	1.7	4.1	7.8	14.5	152.0	0.0	0.0	12.6
A1402-3-29	BRANCHE-S	661	10880	7.9	96		9.4	0.8	4.5	1.6	8.1	4.5	7.3	0.0	11.0
A2402-3-31	CHARBUY-PT-S	661	1720	8.5	396		119.0	3.0	10.0	3.0	22.3	44.0	148.0	0.0	6.6
A1402-3-42	CHARBUY-E-S	661	1260	8.5	507		140.0	6.2	12.9	22.0	42.6	38.0	180.5	0.0	17.7
402-7-1	CHEVANNE-S	661	1810	8.4	370		112.0	8.4	4.3	3.0	8.5	22.0	165.0	0.0	8.8
A2402-6-132	DIGES-FRIT-S	661	16200	7.3	25		5.9	0.6	3.0	1.5	4.4	7.5	3.6	0.0	2.2
A1402-6-106	DIGES-BEC-S	661	14860	7.7	65		5.3	1.3	3.8	0.6	6.3	5.0	6.7	0.0	11.0
A3402-6-95	DIGES-TOUR-S	661	6750	6.2	131		10.5	2.4	9.6	3.3	8.1	32.5	1.5	0.0	12.0
CE402-5-33	DRACY-GEN-S	669	2020	8.5	313		107.0	2.5	5.9	0.7	9.2	6.0	162.5	0.0	3.2
CE402-5-23	DRACY-MIN-S	669	2130	8.5	298		99.2	2.9	4.8	0.6	6.7	7.5	147.0	0.0	8.8
A2402-4-26	GURGY-SCE	661	4515	8.1	120		26.1	2.3	9.2	3.1	15.6	15.0	14.0	0.0	28.8
A1402-3-101	LINDRY-B-S	661	2920	8.1	246		32.0	5.8	11.8	30.0	22.0	31.0	37.5	0.0	35.4
A2402-3-70	LINDRY-MAR-P	661	2000	8.5	331		106.0	1.9	4.8	3.3	6.4	13.5	155.0	0.0	7.8
A1402-6-68	PARLY-BER-S	661	2565	8.4	249		72.0	1.9	4.9	3.3	8.8	19.0	94.5	0.0	11.0

TABLEAU 22 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS			BALANCE			TDS	PC CATIONS				PC ANIONS			NUM
	MG	NA	K	CL		SO4	CO3	NO3	TCA	TAN	ERR		CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	
10.7	0.3	0.5	0.1	2.1	1.3	2.9	1.0	11.5	7.3	22.6	604	92.5	2.7	4.0	0.8	28.3	17.8	40.4	13.5	103
1.6	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	1.7	0.0	2.1	2.4	-6.4	120	78.7	9.7	8.8	2.8	8.5	18.1	73.4	0.0	104
2.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0	2.1	0.1	2.5	2.4	2.0	124	82.4	8.1	8.8	0.7	10.1	0.1	86.8	3.0	105
3.2	1.2	0.3	0.2	0.3	1.5	3.1	0.0	4.8	5.0	-1.2	270	65.3	24.5	5.6	4.6	6.5	31.2	62.3	0.0	106
4.7	0.1	0.2	0.1	0.3	0.3	4.0	0.7	5.2	5.3	-1.7	294	91.8	2.7	4.4	1.0	6.4	5.1	75.4	13.2	107
6.5	0.3	0.3	0.1	0.4	1.4	5.5	0.0	7.1	7.2	-0.7	385	91.1	4.2	3.7	0.9	5.5	18.8	75.6	0.0	108
5.4	0.1	0.2	0.2	0.4	3.2	0.0	0.2	5.9	3.8	22.0	300	91.2	2.4	3.0	3.4	10.8	83.9	0.0	5.3	109
0.5	0.1	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.8	0.7	2.2	47	60.8	8.6	25.3	5.3	30.8	12.7	32.9	23.6	110
6.0	0.3	0.4	0.1	0.6	0.9	4.9	0.1	6.7	6.6	1.0	355	88.7	3.7	6.5	1.1	9.5	13.9	74.9	1.6	111
7.0	0.5	0.6	0.6	1.2	0.8	6.0	0.3	8.6	8.3	2.1	459	81.0	6.0	6.5	6.5	14.5	9.6	72.6	3.4	112
5.6	0.7	0.2	0.1	0.2	0.5	5.5	0.1	6.6	6.3	1.8	332	85.3	10.7	2.8	1.2	3.8	7.2	86.8	2.2	113
0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.5	0.4	8.3	28	57.4	9.7	25.4	7.5	28.5	35.9	27.6	8.0	114
0.3	0.1	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.2	0.6	0.7	-10.2	40	47.8	19.6	29.8	2.8	26.1	15.3	32.9	25.7	115
0.5	0.2	0.4	0.1	0.2	0.7	0.1	0.2	1.2	1.1	3.4	79	42.8	16.3	34.0	6.9	19.9	59.1	4.4	16.6	116
5.3	0.2	0.3	0.0	0.3	0.1	5.4	0.1	5.8	5.9	-0.2	297	91.7	3.6	4.4	0.3	4.4	2.1	92.6	0.9	117
5.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.2	4.9	0.1	5.4	5.4	0.4	277	91.4	4.5	3.8	0.3	3.5	2.9	91.0	2.6	118
1.3	0.2	0.4	0.1	0.4	0.3	0.5	0.5	2.0	1.7	8.2	114	66.0	9.7	20.2	4.0	26.2	18.6	27.8	27.3	119
1.6	0.5	0.5	0.8	0.6	0.6	1.3	0.6	3.4	3.1	4.5	205	47.5	14.4	15.2	22.9	20.1	21.0	40.6	18.3	120
5.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	5.2	0.1	5.8	5.8	-0.0	298	92.1	2.8	3.6	1.5	3.1	4.9	89.8	2.2	121
3.6	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	3.1	0.2	4.1	4.0	1.1	215	88.8	3.9	5.3	2.1	6.2	10.0	79.4	4.4	122

TABLEAU 22 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	NUM
0.03	0.04	0.19	0.93	0.03	0.95	0.63	1.43	0.28	0.18	0.40	0.73	103
0.12	0.11	0.32	0.79	0.10	0.88	2.14	8.63	0.08	0.18	0.73	-0.21	104
0.10	0.11	0.08	0.82	0.08	0.90	0.01	8.63	0.10	0.00	0.87	0.02	105
0.37	0.09	0.83	0.65	0.24	0.90	4.81	9.62	0.06	0.31	0.62	-0.53	106
0.03	0.05	0.24	0.92	0.03	0.95	0.79	11.81	0.06	0.05	0.75	0.18	107
0.05	0.04	0.25	0.91	0.04	0.95	3.41	13.67	0.06	0.19	0.76	0.17	108
0.03	0.03	1.12	0.91	0.02	0.94	7.75	0.00	0.11	0.84	0.00	0.07	109
0.14	0.42	0.21	0.61	0.09	0.69	0.41	1.07	0.31	0.13	0.33	-0.04	110
0.04	0.07	0.18	0.89	0.04	0.92	1.46	7.85	0.10	0.14	0.75	0.19	111
0.07	0.08	1.01	0.81	0.06	0.87	0.66	5.01	0.14	0.10	0.73	0.06	112
0.13	0.03	0.41	0.85	0.11	0.96	1.91	22.97	0.04	0.07	0.87	-0.10	113
0.17	0.44	0.29	0.57	0.10	0.67	1.26	0.97	0.28	0.36	0.28	-0.36	114
0.41	0.62	0.09	0.48	0.20	0.67	0.59	1.26	0.26	0.15	0.33	-0.02	115
0.38	0.80	0.20	0.43	0.16	0.59	2.97	0.22	0.20	0.59	0.04	-1.20	116
0.04	0.05	0.07	0.92	0.04	0.95	0.48	20.90	0.04	0.02	0.93	-0.06	117
0.05	0.04	0.07	0.91	0.04	0.96	0.83	25.96	0.04	0.03	0.91	-0.19	118
0.15	0.31	0.20	0.66	0.10	0.76	0.71	1.06	0.26	0.19	0.28	-0.09	119
0.30	0.32	1.50	0.48	0.14	0.62	1.04	2.02	0.20	0.21	0.41	-1.07	120
0.03	0.04	0.41	0.92	0.03	0.95	1.56	28.66	0.03	0.05	0.90	-0.63	121
0.04	0.06	0.40	0.89	0.04	0.93	1.60	12.71	0.06	0.10	0.79	-0.20	122

TABLEAU 23 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
A1402-6-36	PARLY-CHES-P	661	11.4	13280	7.5	74	7.2	1.4	3.2	1.2	4.0	7.5	8.5	0.0	3.3	123
A2402-6-60	PARLY-CONN-P	661	12.2	12600	7.9	63	9.0	1.4	3.3	0.9	8.5	7.5	11.2	0.0	12.8	124
A2402-6-81	PARLY-ROUG-P	661	11.2	2390	8.4	272	82.0	2.2	4.6	2.4	6.0	31.0	106.4	0.0	12.2	125
A1402-6-2	PARLY-VAUX-P	661	12.6	3105	8.5	205	40.8	2.9	6.6	2.2	13.5	28.0	46.5	0.0	26.5	126
A1402-2-26	POILLY-PEL-S	661	11.8	2010	8.5	286	106.6	2.7	3.7	1.6	6.4	11.0	155.5	0.0	5.5	127
TU402-1-1	ST-AUBIN-S	668	11.5	2075	8.6	256	95.0	1.5	5.5	1.0	6.4	5.0	141.0	0.0	8.8	128
A1402-5-50	TOUCY-QUIL-S	661	12.6	5380	7.8	156	22.7	2.7	4.0	4.0	11.8	7.5	16.7	0.0	31.0	129
A1402-5-1	TOUCY-VERN-S	661	12.4	9190	7.3	100	12.2	1.9	3.2	1.3	6.6	7.5	11.2	0.0	20.0	130
PO402-8-36	VALLANT	668	1.8	1870	8.4	314	109.0	6.5	3.7	0.6	6.4	14.5	162.0	0.0	17.7	131

TABLEAU 23 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS				*NUM
	MG	NA	K	* CL	SD4	CO3	NO3	*	TCA	TAN	ERR	*	YDS	* CA	MG	NA	K	* CL	SD4	
0.4	0.1	0.1	0.0*	0.1	0.2	0.3	0.1*	0.6	0.6	3.4*	36.*	55.7	18.0	21.5	4.8*	18.6	25.8	46.9	8.7*	123
0.5	0.1	0.1	0.0*	0.2	0.2	0.4	0.2*	0.7	1.0	-14.0*	54.*	61.4	15.9	19.6	3.1*	24.6	16.1	38.4	20.9*	124
4.1	0.2	0.2	0.1*	0.2	0.6	3.5	0.2*	4.5	4.6	-0.1*	246.*	90.2	4.0	4.4	1.4*	3.7	14.2	77.9	4.3*	125
2.0	0.2	0.3	0.1*	0.4	0.6	1.6	0.4*	2.6	2.9	-5.6*	167.*	77.7	9.2	10.9	2.1*	13.0	19.9	52.8	14.3*	126
5.3	0.2	0.2	0.0*	0.2	0.2	5.2	0.1*	5.8	5.7	0.7*	293.*	92.6	3.9	2.8	0.7*	3.2	4.0	91.3	1.5*	127
4.8	0.1	0.2	0.0*	0.2	0.1	4.7	0.1*	5.1	5.1	0.2*	264.*	92.4	2.4	4.7	0.5*	3.5	2.0	91.7	2.7*	128
1.1	0.2	0.2	0.1*	0.3	0.2	0.6	0.5*	1.6	1.5	3.1*	100.*	69.4	13.7	10.6	6.3*	21.6	10.2	36.2	32.0*	129
0.6	0.2	0.1	0.0*	0.2	0.2	0.4	0.3*	0.9	1.0	-4.7*	63.*	64.8	16.8	14.8	3.5*	18.0	15.1	36.1	30.7*	130
5.5	0.5	0.2	0.0*	0.2	0.3	5.4	0.3*	6.2	6.2	0.0*	320.*	88.4	8.8	2.6	0.2*	2.9	4.9	87.6	4.6*	131

TABLEAU 23 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SD4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	*NUM
0.32*	0.39*	0.22*	0.56*	0.18*	0.74*	1.39*	2.51*	0.19*	0.26*	0.47*	-0.51*	*123
0.26*	0.32*	0.16*	0.61*	0.16*	0.77*	0.65*	1.56*	0.25*	0.16*	0.38*	0.30*	*124
0.04*	0.05*	0.31*	0.90*	0.04*	0.94*	3.82*	20.98*	0.04*	0.14*	0.78*	-0.55*	*125
0.12*	0.14*	0.20*	0.78*	0.09*	0.87*	1.53*	4.08*	0.13*	0.20*	0.53*	0.10*	*126
0.04*	0.03*	0.26*	0.93*	0.04*	0.96*	1.27*	28.75*	0.03*	0.04*	0.91*	-0.12*	*127
0.03*	0.05*	0.11*	0.92*	0.02*	0.95*	0.58*	26.07*	0.04*	0.02*	0.92*	-0.47*	*128
0.20*	0.15*	0.59*	0.69*	0.14*	0.83*	0.47*	1.67*	0.22*	0.10*	0.36*	0.17*	*129
0.26*	0.23*	0.24*	0.65*	0.17*	0.82*	0.84*	2.01*	0.18*	0.15*	0.36*	0.07*	*130
0.10*	0.03*	0.10*	0.88*	0.09*	0.97*	1.68*	29.95*	0.03*	0.05*	0.88*	0.02*	*131

TABLEAU 24 ANNEXE 1

NO. CODE	SITUATION	A	L	T	RO	PH	RS	MG/L CATIONS				MG/L ANIONS				*NUM
								CA	MG	NA	K	CL	SO4	CO3	HCO3	
78-YVELINES																
A 152-8-13	*ACHERES	*333*	21.0*	4410.*	7.6*	204.*	26.0	6.3	11.1	9.5*	7.0	9.6	72.0	0.0	0.0*	132
A 151-6-5	*BONNIERES	*653*	*****	2415.*	8.4*	*****	28.0	10.7	36.7	14.5*	17.8	23.5	95.0	0.0	0.0*	133
B 182-4-21	*BOUGIVAL	*653*	*****	3180.*	8.2*	*****	34.8	9.6	14.8	14.1*	7.8	7.5	91.5	0.0	0.0*	134
A 182-4-5	*MAISONS-L-1	*643*	26.5*	3520.*	*****	164.*	26.0	6.9	8.2	2.6*	8.0	9.3	77.5	0.0	0.0*	135
B 182-4-6	*MAISONS-L-2	*643*	28.5*	2500.*	7.5*	*****	36.0	10.0	23.0	14.0*	9.0	10.0	10.8	0.0	0.0*	136
B 182-4-31	*MAISONS-L-3	*653*	27.0*	3570.*	8.4*	*****	27.8	8.0	14.8	12.5*	8.5	7.0	78.0	0.0	0.0*	137
A1151-7 3	*MANTES	*653*	*****	2420.*	8.3*	*****	32.6	12.0	27.8	14.5*	17.0	20.5	93.0	0.0	0.0*	138
A1182-4-9	*LE-PECQ	*623*	24.2*	3380.*	8.0*	147.*	27.0	8.0	10.0	12.6*	6.0	10.0	64.5	0.0	0.0*	139
B 182-3-21	*POISSY	*623*	*****	3420.*	7.8*	169.*	30.0	9.0	13.0	13.2*	7.0	12.0	77.0	0.0	0.0*	140
A1151-7-5	*ROSNY	*653*	*****	2350.*	8.4*	*****	30.8	11.5	34.5	13.6*	21.6	20.6	95.0	0.0	0.0*	141
A 183-1C-1	*ST-GERMAIN	*623*	*****	4010.*	8.0*	147.*	27.0	7.9	14.5	12.1*	5.7	9.6	63.0	0.0	0.0*	142
A1152-7-91	*TRIEL	*653*	*****	3700.*	8.3*	*****	25.0	7.6	12.6	12.9*	6.4	6.7	68.0	0.0	0.0*	143

TABLEAU 24 ANNEXE 2

CA	MEQ CATIONS				CL	MEQ ANIONS				BALANCE			PC CATIONS				PC ANIONS				NUM			
	MG	NA	K	•		SO4	CO3	NO3	•	TCA	TAN	ERR	•	TDS	•	CA	MG	NA	K	•		CL	SO4	CO3
1.3	0.5	0.5	0.2*	•	0.2	0.2	2.4	0.0*	2.6	2.8	-4.6*	•	141.*	•	51.0	20.6	18.9	9.5*	•	7.0	7.2	85.8	0.0*	132
1.4	0.9	1.6	0.4*	•	0.5	0.5	3.2	0.0*	4.3	4.2	1.2*	•	226.*	•	32.9	20.9	37.5	8.7*	•	12.1	11.8	76.2	0.0*	133
1.7	0.8	0.6	0.4*	•	0.2	0.2	3.0	0.0*	3.5	3.4	1.7*	•	180.*	•	49.1	22.6	18.2	10.2*	•	6.4	4.6	89.0	0.0*	134
1.3	0.6	0.4	0.1*	•	0.2	0.2	2.6	0.0*	2.3	3.0-13.3*		•	138.*	•	56.6	25.0	15.5	2.9*	•	7.5	6.5	86.0	0.0*	135
1.8	0.8	1.0	0.4*	•	0.3	0.2	0.4	0.0*	4.0	0.8	65.9*	•	112.*	•	45.1	20.9	25.0	9.0*	•	30.8	25.3	43.8	0.0*	136
1.4	0.7	0.6	0.3*	•	0.2	0.1	2.6	0.0*	3.0	3.0	0.6*	•	156.*	•	46.0	22.1	21.3	10.6*	•	8.0	4.9	87.1	0.0*	137
1.6	1.0	1.2	0.4*	•	0.5	0.4	3.1	0.0*	4.2	4.0	2.5*	•	217.*	•	38.7	23.8	28.7	8.8*	•	12.0	10.7	77.4	0.0*	138
1.4	0.7	0.4	0.3*	•	0.2	0.2	2.1	0.0*	2.8	2.5	4.7*	•	138.*	•	48.7	24.0	15.7	11.6*	•	6.7	8.2	85.1	0.0*	139
1.5	0.8	0.6	0.3*	•	0.2	0.3	2.6	0.0*	3.2	3.0	2.3*	•	161.*	•	47.6	23.8	17.9	10.7*	•	6.5	8.3	85.2	0.0*	140
1.5	1.0	1.5	0.3*	•	0.6	0.4	3.2	0.0*	4.3	4.2	1.7*	•	227.*	•	35.4	22.0	34.5	8.0*	•	14.5	10.2	75.3	0.0*	141
1.4	0.7	0.6	0.3*	•	0.2	0.2	2.1	0.0*	2.9	2.5	9.0*	•	139.*	•	45.8	22.3	21.4	10.5*	•	6.5	8.1	85.3	0.0*	142
1.3	0.6	0.5	0.3*	•	0.2	0.1	2.3	0.0*	2.8	2.6	3.3*	•	139.*	•	45.3	22.9	19.8	12.0*	•	7.0	5.4	87.6	0.0*	143

TABLEAU 24 ANNEXE 3

MG/CA	NA/CA	K/NA	CA/CT	MG/CT	ALCT/CT	SO4/CL	CO3/CL	CL/AN	SO4/AN	CO3/AN	IEB	•	NUM
0.40*	0.37*	0.50*	0.51*	0.21*	0.72*	1.01*	12.17*	0.07*	0.07*	0.86*	-2.68*	•	132
0.64*	1.14*	0.23*	0.33*	0.21*	0.54*	0.98*	6.32*	0.12*	0.12*	0.76*	-2.92*	•	133
0.46*	0.37*	0.56*	0.49*	0.23*	0.72*	0.71*	13.88*	0.06*	0.05*	0.89*	-3.57*	•	134
0.44*	0.27*	0.19*	0.57*	0.25*	0.82*	0.86*	11.46*	0.08*	0.06*	0.86*	-0.88*	•	135
0.46*	0.56*	0.36*	0.45*	0.21*	0.66*	0.82*	1.42*	0.31*	0.25*	0.44*	-4.36*	•	136
0.48*	0.46*	0.50*	0.46*	0.22*	0.68*	0.61*	10.86*	0.08*	0.05*	0.87*	-3.03*	•	137
0.61*	0.74*	0.31*	0.39*	0.24*	0.62*	0.89*	6.47*	0.12*	0.11*	0.77*	-2.30*	•	138
0.49*	0.32*	0.74*	0.49*	0.24*	0.73*	1.23*	12.72*	0.07*	0.08*	0.85*	-3.48*	•	139
0.50*	0.38*	0.60*	0.48*	0.24*	0.71*	1.27*	13.02*	0.07*	0.08*	0.85*	-3.58*	•	140
0.62*	0.97*	0.23*	0.35*	0.22*	0.57*	0.71*	5.20*	0.14*	0.10*	0.75*	-2.04*	•	141
0.49*	0.47*	0.49*	0.46*	0.22*	0.68*	1.25*	13.08*	0.07*	0.08*	0.85*	-4.86*	•	142
0.51*	0.44*	0.60*	0.45*	0.23*	0.68*	0.77*	12.57*	0.07*	0.05*	0.88*	-3.87*	•	143