

## STRATEGIE D'ETUDE ET ACQUISITION DES DONNEES



# I. METHODE ET INSTRUMENTATION

## I.1. Méthode et objectifs

Dans ce travail, 2 approches ont été menées conjointement : (i) une approche hydrodynamique s'intéressant à l'équilibre des charges entre les différents hydrosystèmes pour préciser les conditions aux limites de l'aquifère captif et (ii) un suivi des traceurs naturels hydrochimiques et isotopiques pour identifier précisément l'origine des eaux de l'aquifère captif.

Le croisement de ces deux approches permet d'avoir une compréhension globale de l'origine et de l'évolution de la minéralisation des eaux de l'aquifère captif.

➤ L'approche hydrodynamique comprend 2 méthodes différentes de suivi :

- des mesures piézométriques mensuelles sur l'ensemble de l'aquifère captif pour déterminer les gradients de charges au sein de l'aquifère. Ces mesures doivent permettre de déterminer le sens et la vitesse de flux dans l'aquifère et de réaliser une comparaison avec les données antérieures à ce travail (carte piézométrique de 1970, données de Crau) ;

- un suivi en continu de la température, de la conductivité et des niveaux de l'aquifère captif, ainsi que des niveaux de l'aquifère libre de Crau, du Rhône et de la mer pour étudier les transferts de pression rapides entre ces différents systèmes.

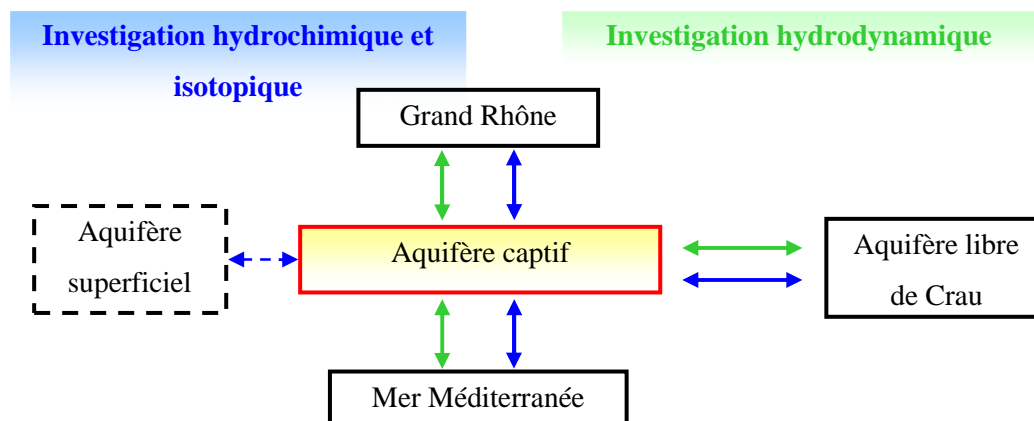


Fig. 33. Schéma des relations étudiées

➤ L'approche hydrochimique comprend :

- un suivi mensuel sur un cycle hydrologique des ions majeurs et du Carbone Organique Total (TOC) dans l'aquifère captif ;

- un suivi régulier des isotopes stables de la molécule d'eau ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) et du carbone ( $^{13}\text{C}$ ) dans l'aquifère captif et ponctuel dans les autres réservoirs (Rhône, mer, Crau).

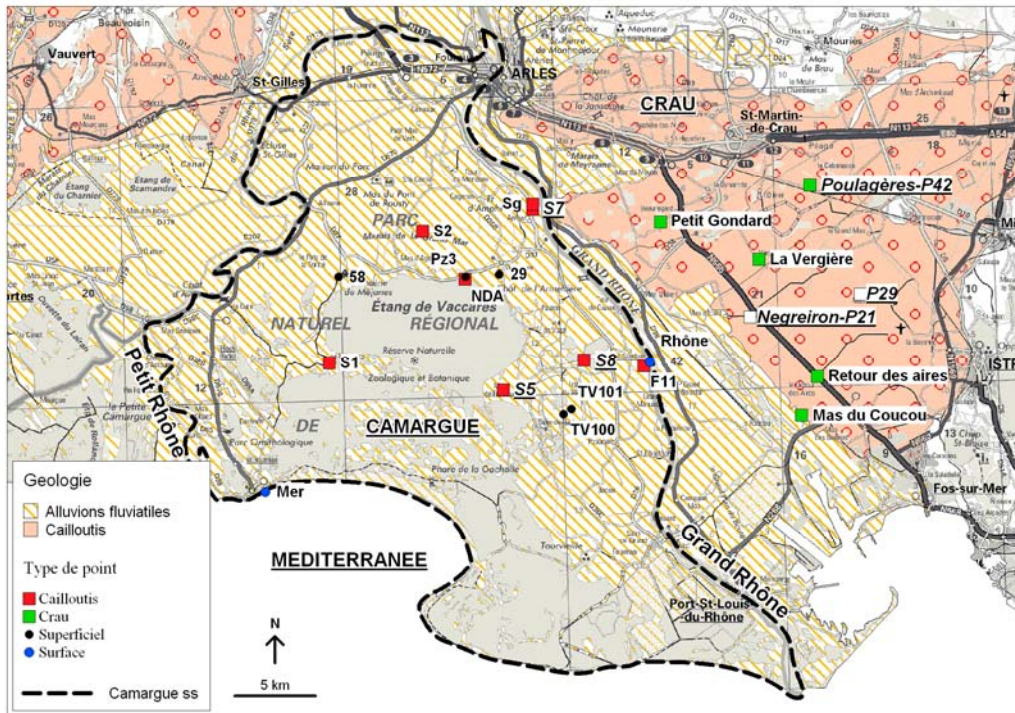
Ces mesures doivent permettre d'estimer l'influence des différents hydrosystèmes sur la minéralisation de l'aquifère captif. En particulier, les isotopes de la molécule d'eau devront permettre de discriminer les eaux provenant du Rhône et/ou de la Durance, des eaux locales ou marines. Une attention particulière a été portée sur l'analyse du  $\text{Cl}^-$  et du  $\text{Br}^-$  en tant que marqueur spécifique des eaux de mer. De plus ces mesures doivent permettre de mettre en évidence des processus d'évolution géochimique et/ou temporelle au sein de l'aquifère. En particulier, le  $^{13}\text{C}$  et le TOC doivent permettre d'estimer les interactions avec la matrice carbonatée et la matière organique ;

- une analyse ponctuelle de radioisotopes ( $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$ ) pour estimer les temps de séjour des eaux de l'aquifère captif. Des mesures de tritium ayant été réalisées dans les années 70, une nouvelle campagne de mesures en Camargue est donc intéressante pour identifier les circulations rapides depuis les eaux de surfaces et pour comparer ces résultats avec les mesures de 1970. Les mesures de  $^{14}\text{C}$  devraient permettre de déterminer si la salinisation de l'aquifère captif résulte d'un processus moderne ou passé.

Compte tenu des nombreuses données existantes sur l'aquifère superficiel, ce dernier n'a pas fait l'objet de prélèvements réguliers. De plus, les piézomètres implantés dans l'aquifère superficiel ne donnent des informations que sur le fonctionnement en surface. Or il ne semble pas y avoir de lien entre la surface et la profondeur ni dans le fonctionnement ni dans la répartition de salinité. Il ne semblait donc pas pertinent d'échantillonner à nouveau et de manière régulière les premiers mètres de l'aquifère superficiel. Enfin, aucun piézomètre atteignant l'aquitard n'était disponible.

Les prélèvements et les analyses ont donc constitué une part non négligeable de ce travail de thèse.

## I.2. Localisation des points de mesure et équipement du site



**Fig. 34. Réseau de mesures.** Les piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique en continu sont figurés en italique souligné. Les 2 piézomètres de Crau figurés en blanc n'ont pas été échantillonnés.

### Localisation des points de prélèvement

Ce travail s'appuie sur le réseau de mesure mis en place dans les années 60 par la DDA des Bouches-du-Rhône pour l'étude de la Camargue (Rapport Camargue, 1970). Sur les 10 sondages profonds de ce réseau, 5 sont toujours opérationnels ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_5$ ,  $S_7$ ,  $S_8$ ; Fig. 34). En complément, 3 nouveaux forages de particuliers ( $S_g$ ,  $F_{11}$ ,  $NDA$ ) ont été utilisés pour cette étude. Tous ces forages sont situés entre 8 km et 20 km de la mer (Fig. 34). Les fiches descriptives de ces points de mesure sont en Annexe 1. Le Tableau 2 synthétise les cotes de référence de ces forages.

Nom du sondage	Cote des cailloutis (m/NGF)	Cote du bas du tube (m/NGF)	Information crépine (m/NGF)
$S_1$	-41.7	-46.5	de -41.7 à -46.5
$S_2$	-23.7	-30.0	de -23.7 à -30.0
$S_5$	-36.3	-42.0	de -36.3 à -42.0
$S_7$	-10.4	-17.2	de -10.4 à -17.2
$S_8$	-23.3	-30.3	de -23.3 à -30.3
$F_{11}$	-20*	-37.7 d'après propriétaire (mesuré à - 31.7)	crépine de 1m
$NDA$	-25*	-32.4 d'après propriétaire	?
$S_g$	-10*	-15.4 d'après propriétaire (mesuré à -5.7)	?

**Tableau 2. Cotes de référence des forages profonds utilisés.** \* Cote estimée d'après la carte géologique

Dans l'aquifère superficiel, 5 piézomètres de salinité répartie entre 0.8 et 121 g/l ont fait l'objet d' 1 nouveau prélèvement (Fig. 34). Seuls 2 de ces piézomètres (29 et 58b) appartenaient au réseau de piézomètres superficiels de 1960.

En Crau, les prélèvements ont été effectués sur 5 piézomètres principalement répartis sur la bordure Est de la plaine, en amont de la zone d'émergence. 2 prélèvements sont situés dans la Crau sèche (Mas du coucou, Retours des Aires ; Fig. 34), les 3 autres sont situés dans la Crau irriguée.

Les prélèvements du Rhône ont été effectués à mi-distance entre Arles et l'embouchure du fleuve, au niveau du piézomètre F<sub>11</sub>.

Pour la mer, 2 prélèvements ont été effectués depuis la côte (digue des Stes Maries) et un prélèvement a été effectué au large à une dizaine de kilomètres de l'embouchure du Rhône pour éviter les effets de dilution par le panache d'eau douce du fleuve.

#### Equipement du suivi hydrodynamique

Les relevés piézométriques manuels ont été réalisés sur tous les piézomètres de l'aquifère captif, à l'exception des piézomètres artésien S<sub>2</sub> et NDA.

Les piézomètres S<sub>5</sub>, S<sub>7</sub> et S<sub>8</sub> ont été équipés de CTD Diver permettant de mesurer la pression, la conductivité et la température de l'eau. En parallèle, la pression atmosphérique a été suivie au piézomètre S<sub>5</sub>. L'acquisition des données a été réalisée au pas de 20 minutes. Des mesures manuelles par rapport au haut du tube ont été réalisées à chaque transfert de données pour corriger la dérive éventuelle des capteurs. Une dérive de quelques centimètres a en effet été observée occasionnellement et corrigée linéairement.

Les niveaux repères des piézomètres utilisés dans cette étude ont été renivelés en 2007 (Tableau 3).

Nom du piézomètre	Z sol (m/ NGF)		Cote de référence (m/NGF)		
	1970-1976	2007	1970	1976	2007
S <sub>1</sub>	0.5	0.57	2.05	2.05	1.88
S <sub>2</sub>	0	0.08	1.85	1.85	0.36
S <sub>5</sub>	0.12	0.47	1.92	1.87	1.95
S <sub>7</sub>	2.8	2.81	3.79	3.74	3.49
S <sub>8</sub>	0.67	0.55	1.64	1.61	1.49
F <sub>11</sub>		2.30			2.70
NDA		0.59			
S <sub>g</sub>		2.64			2.82
S <sub>3</sub>	<i>2.86</i>		<i>3.41</i>		
S <sub>4</sub>	<i>0.27</i>		<i>2.02</i>		
S <sub>6</sub>	<i>1.37</i>		<i>2.32</i>		
S <sub>9</sub>	<i>-1.55</i>				
S <sub>10</sub>	<i>2.4</i>				

**Tableau 3. Altitudes du sol et des niveaux repères des piézomètres de l'aquifère captif : comparaison avec les données de 1970 et 1976. Les piézomètres en italiques n'ont pas fait l'objet de mesure durant cette étude.**

Dans chaque cas, le sommet du tube a été utilisé comme référence. Les résultats obtenus sont comparés aux valeurs utilisées en 1970 et 1976.

Le point S<sub>5</sub> présente des valeurs identiques à l'erreur de mesure près. Cependant certains points présentent en 2007 des cotes différentes de celles de 1970-1976, ce qui peut-être dû à :

- une erreur de nivellement
- une modification de la hauteur du tube (tube coupé)
- l'utilisation d'une autre référence que le sommet du tube (tubage pvc interne ou tubage métallique externe)
- une modification d'altitude due à des mouvements de subsidence associée à un tassement du terrain.

Aux piézomètres S<sub>7</sub> et S<sub>2</sub>, les tubes pvc ont été coupés ou cassés, expliquant l'écart des valeurs. Pour les autres piézomètres, aucune information n'est disponible dans les anciens rapports pour déterminer l'origine de cette différence, ce qui ne permet pas de corriger rigoureusement ou de confirmer et/ou infirmer les données antérieures.

⇒ Dans la suite de l'étude les valeurs originales de niveaux piézométriques par rapport au NGF ont donc été utilisées.

### I.3. Données acquises auprès d'organismes extérieurs

#### **Suivi hydrodynamique du Rhône**

Les données de niveau et de débit horaire du Rhône à la station d'Arles ont été obtenues auprès de la CNR. Ces enregistrements étaient fournis en heure locale et ont été convertis en heure TU.

#### **Niveau marin**

Le suivi des niveaux de la mer au port de Marseille a été fourni par SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales, <http://www.sonel.org/>). Les données, en heure TU, ont été récupérées au pas de temps de 5 minutes.

#### **Pluviométrie**

Les données de pluie au pas de temps horaire proviennent de la station météorologique de la Tour du Valat.

### **Piézométrie et salinité**

Les suivis piézométriques de l'aquifère de Crau (Fig. 34) ont été récupérés au pas de temps journalier sur le site de l'ADES.

Un suivi de la salinité et des niveaux piézométriques de l'aquifère captif depuis 1960 a pu être reconstitué durant ce travail de thèse. Ces données ont successivement été collectées par :

- 1968-1969 : DDA des Bouches-du-Rhône (dans le cadre du Rapport Camargue) & Université de Grenoble (Marinos, 1969)
- 1969 - 1976 : DDA des Bouches-du-Rhône, service d'Arles
- 1976 - 1989 puis 1993-1994: Service Régional de l'Aménagement des Eaux (SRAE PACA, 1988) et PNR de Camargue ; ces données ont été récupéré auprès de la DIREN PACA
- 2003 - 2004 : Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon et CEREGE ; données acquises dans le cadre de l'ORE-RESYST (Ambrosy, 2003; Paul, 2004).

Un récapitulatif de l'ensemble des suivis réalisés sur la Camargue est disponible sur le site de la Tour du Valat (<http://www.tourduvalat.org>).



## II. PRELEVEMENTS ET ANALYSES

### II.1. Stratégie de prélèvement

Dans l'aquifère captif, les relevés piézométriques et les prélèvements ont été réalisés mensuellement entre mai 2005 et mai 2006 et ponctuellement en novembre 2006 et avril 2007 pour l'analyse du  $^3\text{H}$  et du  $^{14}\text{C}$  respectivement. Pour la campagne de tritium, tous les points de mesure (Fig. 34) ont fait l'objet d'un prélèvement. Pour le  $^{14}\text{C}$  seul le Rhône et un piézomètre de Crau ont été prélevés en plus de l'aquifère captif. Cet échantillonnage représente un total de 146 prélèvements répartis sur 18 campagnes. Le Tableau 4 récapitule le nombre de prélèvement effectué par point.

Lieu	Nombre de prélèvements
S1	14
S2	17
S5	18
S7	18
S8	17
F11	17
NDA	17
Sg	9
Rhône	4
Mer	3 (dont 1 au large)
Crau	6
Aquifère superficiel	5

**Tableau 4. Synthèse du nombre de prélèvements réalisés pour chaque hysrosystème**

Avant chaque prélèvement, l'eau des piézomètres a été renouvelée par pompage à l'aide d'une pompe de surface avec un débit compris entre 10 et 60 l/s. Pour chaque piézomètre, le volume pompé pour assurer le renouvellement de l'eau a été de 2 à 3 fois le volume de la colonne d'eau du piézomètre, ce qui correspond à une durée de pompage comprise entre 6 min et 1 h (Tableau 5).

Forage	V minimum à pomper calculé (en l)	Débit pompe (en l/min) et temps de pompage moyen
S <sub>1</sub>	220	2.8 l/min – 6h
S <sub>5</sub>	183	6 à 60 l/min – 35 min à 1h
S <sub>7</sub>	58	6 à 12 l/min – 10 min à 1h
S <sub>8</sub>	119	60 l/min – 5 à 10 min
F <sub>11</sub>	1570	66 l/min – 45 min à 1h
S <sub>g</sub>	505	66 l/min – 35 min à 1 h

**Tableau 5. Volume et durée des pompages nécessaires au renouvellement de l'eau des forages.**

En parallèle, un suivi régulier de la conductivité a permis de vérifier l'obtention d'un régime permanent. Au S<sub>1</sub>, seule une pompe de faible diamètre a pu être utilisée. Le pompage a alors été effectué sur une plus grande durée (de 5 h à 12 h). L'obtention d'une eau limpide a permis de s'assurer de la représentativité du prélèvement. Les piézomètres artésiens S<sub>2</sub> et NDA ont été prélevés directement.

Pour les piézomètres échantillonnés en Crau, seule la conductivité a été utilisée pour estimer le renouvellement de l'eau. Les piézomètres de l'aquifère superficiels ont été vidés en totalité puis prélevés après leur recharge. Pour le Rhône, une passerelle en surplomb au dessus de l'eau a permis un prélèvement à distance du bord, dans une zone avec un bon écoulement, à une profondeur d'1 m environ.

Les prélèvements d'eau et les mesures physico-chimiques ont été réalisés à l'aide d'une pompe de faible débit (<6 l/min). La température, la conductivité électrique (à 25°C) et le pH ont été mesurés dans une cellule de mesure avec un multimètre WTW. Le potentiel rédox (Eh) a été mesuré après arrêt du flux et dans la mesure du possible à l'abri de la lumière. A chaque début de journée, la sonde pH a été étalonnée entre les pH 7 et 4 avec des solutions tampons à usage unique pour éviter les variations par évaporation.

Les prélèvements pour les ions majeurs ont été filtrés en pression pour limiter les phénomènes de précipitation de carbonate, avec un filtre en acétate de cellulose à 0.45 µm.

- Les bicarbonates ont été mesurés sur le terrain par titration colorimétrique à l'acide chlorhydrique HCl à 1.6 N. La mesure a été effectuée sur un échantillon d'eau de 50 ml. Pour augmenter la précision de la mesure, le volume d'échantillon a été prélevé avec une fiole jaugée.

- Les anions et les cations ont été échantillonnés séparément dans des flacons en polyéthylène de 50 ml. Les échantillons destinés aux cations ont été acidifiés avec HNO<sub>3</sub> pour éviter les phénomènes précipitations.

Les échantillons pour les isotopes stables, le TOC et le tritium ont été prélevés directement :

- l'<sup>18</sup>O et le <sup>2</sup>H ont été prélevés dans un flacon en verre fumé de 20 ml
- le <sup>3</sup>H a été prélevé dans un flacon en polyéthylène de 1 l
- le <sup>13</sup>C a été prélevé dans un flacon en polyéthylène de 250 ml
- le TOC a été prélevé dans un flacon en verre fumé de 30 ml préalablement stérilisé à 550°C

pendant 6h.

De l'acide mercurique a été ajouté aux échantillons de <sup>13</sup>C et de TOC pour empêcher la dégradation du carbone organique par des bactéries.

Le matériel de prélèvement et tous les flacons ont été rincés 3 fois avec l'eau à prélever. Les échantillons ont été conservés dans des glacières jusqu'à leur retour au laboratoire.

Le  $^{14}\text{C}$  a nécessité un échantillonnage spécifique. Le volume prélevé (entre 10 l et 80 l) a été déterminé en fonction de la teneur en  $\text{HCO}_3^-$  et en  $\text{SO}_4^{2-}$ . Le précipité a été réalisé par ajout de  $\text{BaCl}_2$  après avoir élevé le pH par ajout de  $\text{NaOH}$ . Dans la mesure du possible, le précipité a été réalisé sur place à l'aide d'un précipitateur. Sinon, la séparation entre l'eau et le précipité a été réalisée au laboratoire.

## II.2. Méthode analytique

Les analyses ont généralement été réalisées dans les 2 jours suivant le prélèvement.

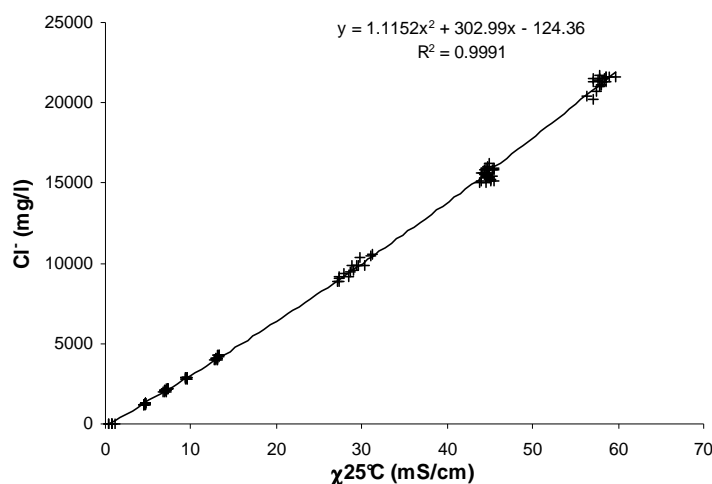
- Les cations majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) ont été analysés par un spectromètre d'absorption atomique (VARIAN 640). L'incertitude relative incluant la précision de la mesure et l'erreur de répétabilité est inférieure à 5%.

Les anions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) ont été analysés par chromatographie ionique en phase liquide (DIONEX DX120). L'incertitude relative incluant la précision de la mesure et l'erreur de répétabilité est inférieure à 3%. Une attention particulière a été portée sur la bonne séparation des pics des différents ions.

Cependant, compte tenu des fortes minéralisations, les échantillons ont dû être dilués jusqu'à un facteur 250, à l'exception des échantillons du Rhône et de la Crau. L'incertitude totale, incluant l'incertitude relative à l'appareil et celle relative à la dilution est inférieure à 10% pour les ions dominants ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) et inférieure à 5% pour les autres ions. L'erreur obtenue sur les balances ioniques est généralement inférieure à 5%.

Une vérification méticuleuse de chaque analyse a été réalisée en se basant sur la balance ionique et la comparaison de la conductivité calculée (par les conductivités molaires spécifiques) et la conductivité mesurée. Les analyses présentant des balances ioniques supérieures à 5% ont systématiquement été doublées. De plus, la relation  $\text{Cl}^-/\text{Conductivité}$  a permis de vérifier les analyses de  $\text{Cl}^-$  (Fig. 35).

Enfin, il faut mentionner qu'un protocole analytique mal adapté à l'analyse des eaux fortement concentrées a été utilisé pour les 3 premières campagnes (fév05, avr05, juin05) conduisant notamment à une mauvaise estimation du  $\text{Cl}^-$  et du  $\text{Br}^-$ ; ces 3 premières campagnes n'ont donc pas été interprétées dans la suite de l'étude. De même, une différence importante a été constatée entre la minéralisation des prélèvements de mer effectués sur la côte et celle du prélèvement effectué en pleine mer. Seule la chimie de l'échantillon de pleine mer a donc été utilisée par la suite.



**Fig. 35. Relation conductivité-chlorure des eaux analysées**

- Le Carbone Organique Total (TOC) a été mesuré à l'aide du TOC Analyser Model 700 de BIORITECH. La précision est de  $\pm 0,1$  mg/l.

- Les analyses en  $^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$  ont été réalisées par un spectromètre de masse après extraction du  $\text{CO}_2$  par attaque acide à l'acide orthophosphorique purifié. La précision de la mesure est de  $\pm 0.2\text{‰}$  (Batiot, 2002). Les résultats sont exprimés dans la notation conventionnelle ( $\delta$ ), en déviation par rapport au standard de référence V-PDB.

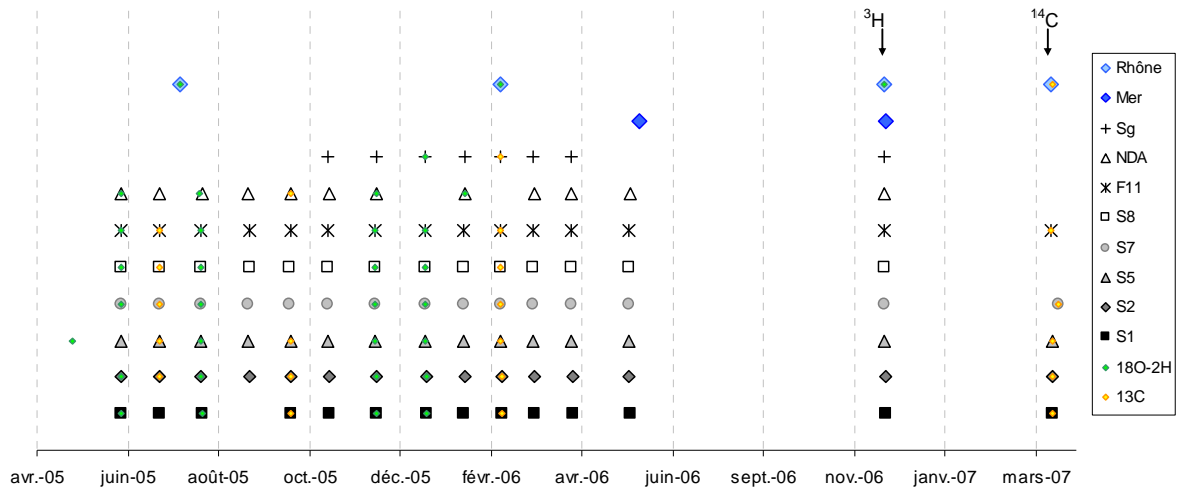
Sur les quatre campagnes analysées en  $^{13}\text{C}$ , la campagne de novembre 2006 n'a pas pu être analysée rapidement. L'enrichissement résultant a été de  $\sim 1\text{‰}$  à l'exception des points  $S_1$ ,  $S_8$  et  $S_7$  qui ont présenté des enrichissements supérieurs atteignant  $3\text{‰}$  au  $S_1$ . Cette campagne n'a donc pas été utilisée par la suite. Néanmoins ce résultat a permis de souligner l'importance d'effectuer une mesure rapide du  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CMTD}}$  et plus particulièrement lorsque la  $P_{\text{CO}_2}$  des échantillons est élevée ( $P_{\text{CO}_2} \sim 0.16$  atm au  $S_1$ ). De plus ce résultat montre l'importance du choix d'un flacon en verre pour limiter les échanges avec l'atmosphère dans le cas où une conservation des échantillons s'avère nécessaire.

- Les analyses des isotopes stables de la molécule d'eau ont été effectuées par le CEREGE à l'aide d'un spectromètre de masse (Delta Plus) mesurant le  $\text{CO}_2$  et l' $\text{H}_2$  après équilibration avec l'échantillon. La précision des mesures est de  $0.05\text{‰}$  et  $1\text{‰}$  pour le  $\delta^{18}\text{O}$  et le  $\delta^2\text{H}$  respectivement. Les résultats sont exprimés dans la notation conventionnelle ( $\delta$ ), en déviation par rapport au standard de référence V-SMOW.

- Les mesures de tritium et  $^{14}\text{C}$  ont été réalisées par la technicienne du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon à l'aide d'un compteur à scintillation liquide. Le tritium est mesuré après distillation et enrichissement par électrolyse. Pour les échantillons les plus salés ( $S_5$ ,  $S_1$ ,  $S_8$ ,  $F_{11}$ , mer) une double distillation a été nécessaire. Cette mesure dépend du bruit de fond dû à la radioactivité naturelle de l'air lors du comptage. Par convention le seuil de mesure est pris égal à 4 fois le bruit de

fond qui est variable suivant la mesure. Les résultats sont donc exprimés en fonction du seuil de mesure (entre 0.8 et 1.4 UT). Le seuil analytique pour le  $^{14}\text{C}$  est de 2,29 pcm.

La Fig. 36 présente la synthèse des analyses utilisées dans la suite de ce travail. L'ensemble des résultats est fourni en Annexe 2.



**Fig. 36. Synoptique des analyses réalisées pour les cations et anions majeurs. Les échantillons analysés également en  $^{18}\text{O}/^2\text{H}$  ou en  $^{13}\text{C}$  sont indiqués par un point vert ou jaune respectivement. Les campagnes analysées en  $^3\text{H}$  et  $^{14}\text{C}$  sont signalées par une flèche.**



## PARTIE 3.

# HYDRODYNAMIQUE D'UN AQUIFERE CÔTIER CAPTIF EN CONTEXTE DELTAÏQUE

L'étude de la piézométrie et de ses variations à court ou long terme permet de caractériser le fonctionnement hydrogéologique d'un aquifère. Dans le cas des aquifères côtiers, l'étude de l'équilibre des charges entre l'aquifère et la mer est primordiale pour comprendre et prévoir l'évolution de la salinité.

Deux approches sont successivement abordées. La première approche correspond à une étude de l'équilibre des charges des différents « réservoirs » en régime permanent, alors que la seconde s'intéresse à l'étude des variations naturelles de la piézométrie en régime transitoire.





# I. PIEZOMETRIE D'UN AQUIFERE A DENSITE VARIABLE

---

« *Ce qui est simple est toujours faux ; ce qui ne l'est pas est inutilisable* »  
Paul Valéry

## Introduction

Dans la majeure partie des aquifères, la piézométrie est un outil simple qui permet de déterminer le sens des écoulements et l'intensité des flux. Généralement, la composante verticale de l'écoulement peut être négligée et on assimile la charge hydraulique au niveau piézométrique. Une simple comparaison des niveaux piézométriques en différents points permet alors de déterminer le sens de l'écoulement ; l'eau s'écoulant des niveaux piézométriques hauts vers les niveaux piézométriques bas. Dans les aquifères où la densité n'est pas constante en tout point, les niveaux piézométriques ne peuvent plus être comparés directement (e.g. Fetter, 1994). La variation de densité au sein d'un aquifère peut résulter de différences de température ou de pression (Bachu, 1995; Bachu et Michael, 2002), mais la cause la plus commune est sans doute la variation de salinité en particulier dans les aquifères côtiers (Post *et al.*, 2007). Ces variations affectent l'utilisation de la piézométrie pour représenter la caractéristique des écoulements et peuvent conduire à des interprétations erronées si elles ne sont pas prises en compte (Custodio, 1985; Fetter, 1994; Simmons, 2005; Post *et al.*, 2007). L'utilisation des mesures piézométrique dans un aquifère à densité variable est donc beaucoup plus complexe que pour les aquifères à densité constante.

De plus, il existe une fausse idée largement répandue selon laquelle la conversion de la mesure piézométrique à une densité de référence d'eau douce, « équivalent d'eau douce » (Luszczynski, 1961), est suffisante pour analyser les cartes piézométriques en milieu à densité variable. Cette correction bien que nécessaire génère une erreur généralement non négligeable dans le cas des aquifères côtiers où les gradients de charges sont faibles (Simmons, 2005; Post *et al.*, 2007). Ainsi, en dépit de son importance pour les hydrogéologues, il existe peu d'ouvrages ou de publications qui expliquent comment utiliser correctement les données de terrain pour évaluer les flux d'eau souterraine en milieu à densité variable. On peut cependant mentionner la parution récente d'un article clarifiant ce sujet (Post *et al.*, 2007). Souvent, le problème est approché par modélisation, ce qui enlève toute la simplicité de mise en oeuvre de l'approche piézométrique ! Aussi, est-il quand même utile de pouvoir déterminer une direction d'écoulement sans passer par une approche de modélisation.

## I.1. La piézométrie en milieu à densité variable - Méthodologie

### I.1.1. Notion de charge hydraulique et relation avec la piézométrie en milieu à densité variable

#### I.1.1.1. Expression de la charge hydraulique

L'énergie d'un fluide est définie par la somme des ses énergies cinétique, de potentiel et de pression. Ainsi, en mécanique des fluides, la charge hydraulique ( $h$ ) en un point donné d'un fluide incompressible soumis à la seule gravité est donnée par la relation :

$$h = \frac{u^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z \quad (1)$$

où :  $u$  est la vitesse du fluide au point considéré et  $z$  l'élévation ou cote de ce point ;  $P$  est la pression de l'eau (Pa) ;  $\rho$  est la densité ( $\text{kg/m}^3$ ) ; et  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $\text{m/s}^2$ ).

Dans les aquifères, et plus particulièrement dans les milieux poreux, le terme de vitesse est négligeable et la charge se résume alors à la charge statique :

$$h = \frac{P}{\rho g} + z \quad (2)$$

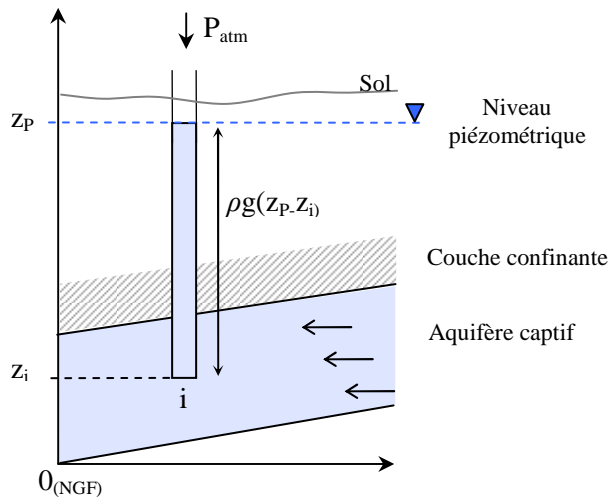
Sur le terrain, la charge représente la cote atteinte par l'eau à l'équilibre avec la pression atmosphérique dans un piézomètre (Fig. 37). Elle s'exprime généralement par rapport au NGF (Nivellement Général).

Généralement, les écoulements verticaux peuvent être négligés. Dans ce cas la charge hydraulique est indépendante de la profondeur de la mesure (*i.e.* de la profondeur de la crépine). Si la densité est égale en tout point de la colonne d'eau, la charge hydraulique en un point  $i$  (Fig. 37) peut être exprimée en fonction du niveau piézométrique  $z_p$  mesuré sur le terrain selon :

$$\begin{cases} h_i = \frac{P_i}{\rho g} + z_i \\ P_i = P_p + \rho g(z_p - z_i) \end{cases} \Rightarrow h_i = \frac{P_p + \rho g(z_p - z_i)}{\rho g} + z_i = z_p \quad (3)$$

avec  $P_p = P_{atm}$  choisit comme référence égale à 0.

⇒ La charge hydraulique est donc constante selon la verticale ; elle est indépendante de la longueur du forage et correspond au niveau piézométrique.



**Fig. 37. Représentation schématique de la charge hydraulique ; exemple d'une nappe captive**

En pratique, les aquifères ne contenant que de l'eau douce, les niveaux piézométriques mesurés sur le terrain reflètent directement les charges hydrauliques des différents points. Les niveaux piézométriques sont comparables entre eux et permettent donc de définir le sens des écoulements, des niveaux piézométriques hauts vers les niveaux piézométriques bas.

#### I.1.1.2. Concept d'équivalent eau douce

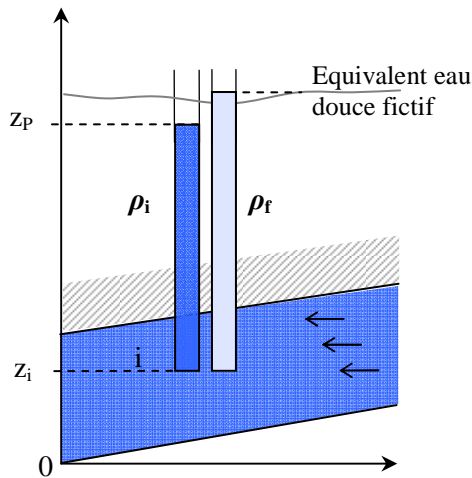
A la différence de la pression, la charge est dépendante de la densité (cf. Equation 2). Dans un système où la densité  $\rho$  varie spatialement, la charge ( $h$ ) ne représente donc plus directement les variations de pression ( $P$ ). En effet, pour une même valeur de pression, il peut correspondre des valeurs de charge différente en fonction de la densité de l'eau. Pour une eau parfaitement immobile, la non prise en compte d'une variation spatiale de densité entraîne l'apparition d'un gradient de charge fictif.

Dans les milieux à densité variable, il serait en fait préférable d'utiliser la pression de l'eau et sa densité plutôt que la charge hydraulique. Cependant, la mesure du niveau piézométrique demeure la mesure la plus facile à réaliser et la moins coûteuse expliquant la faible utilisation de la pression.

#### Définition de « l'équivalent eau douce »

Pour pouvoir comparer les charges hydrauliques de différents piézomètres d'un milieu à densité variable, une correction de densité est donc nécessaire. On se ramène alors au cas d'un milieu à densité constante en normalisant les charges par rapport à une densité de référence, identique pour tous les piézomètres. Bien que toutes les valeurs de densité puissent être utilisées, la densité de référence choisie est généralement la densité de l'eau douce ( $\rho_f \sim 1000$ ) de manière à permettre une comparaison des niveaux avec les cartes piézométriques habituelles. On définit alors un « équivalent eau douce » ou « fresh water head » (Luszczynski, 1961).

La correction couramment préconisée repose sur le principe d'équilibre des pressions. Ainsi elle consiste à déterminer la hauteur d'une colonne d'eau douce fictive exerçant une pression équivalente à la pression exercée par la colonne d'eau salée de densité  $\rho_i$  (Fig. 38).



**Fig. 38. Représentation schématique de la charge « équivalent eau douce »**

Si  $\rho_f$  est la densité de référence, la charge « normalisée » s'exprime alors par :

$$h_{f,i} = \frac{P_i}{\rho_f g} + z_i \Rightarrow \frac{\rho_i}{\rho_f} (z_p - z_i) + z_i \quad (4)$$

L'équivalent eau douce peut également être facilement calculé à partir de la mesure piézométrique suivant :

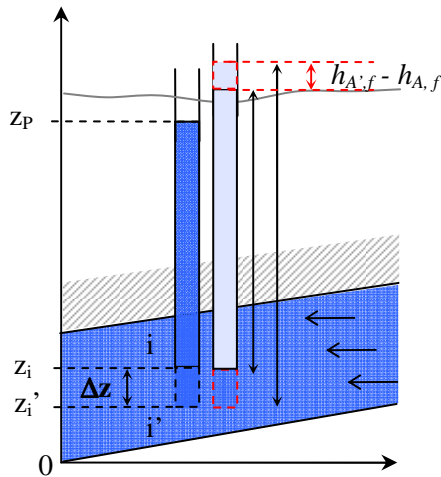
$$h_{f,i} = \frac{\rho_i}{\rho_f} h_i - \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} z_i \quad (5)$$

avec  $h_i = z_p$ , niveau piézométrique mesuré sur le terrain (cf. Eq. 3)

Dans les aquifères côtiers l'augmentation de salinité entraîne une augmentation de la densité du fluide ( $\rho_i > \rho_f$ ). Par conséquent, l'équivalent eau douce est toujours supérieur ou égal au niveau piézométrique.

### Limite

D'après l'Equation 5, il apparaît clairement que la charge corrigée est étroitement dépendante de la profondeur du piézomètre. On peut, de plus, évaluer l'écart entre les équivalents eau douce calculés pour 2 profondeurs différentes d'un même piézomètre (Fig. 39).



**Fig. 39. Représentation schématique de l'écart entre les équivalents eau douce calculés pour 2 profondeurs différentes d'un même piézomètre**

(i) Dans le cas d'un aquifère d'eau douce où la densité est constante, la charge est indépendante de la profondeur de la mesure (cf. Eq. 3). Donc  $h_i = h_{i'} = z_p$ .

(ii) Dans le cas d'un milieu à densité variable, l'équivalent eau douce au point  $i'$  est défini, d'après l'Equation 4, par :

$$h_{i'} = \frac{P_{i'}}{\rho_f g} + z_{i'} = \frac{\rho_i g (z_p - z_{i'})}{\rho_f g} + z_{i'} \quad (4')$$

Comme :  $z_{i'} = z_i + \Delta z$

Il vient :

$$h_{i'} = \frac{\rho_i g (z_p - z_i + \Delta z)}{\rho_{ref} g} + z_i - \Delta z = h_i + \frac{\rho_i \Delta z}{\rho_{ref}} - \Delta z = h_i + \Delta z \left( \frac{\rho_i}{\rho_{ref}} - 1 \right) \quad (6)$$

$$\text{Donc : } h_{i'} = h_i + \Delta z \left( 1 - \frac{\rho_i}{\rho_{ref}} \right)$$

⇒ Dans ce cas, la charge hydraulique n'est plus constante sur une même verticale et dépend de la profondeur du forage. Spatialement, la différence de profondeur des forages implique en elle-même une différence de charge hydraulique, même dans le cas d'un aquifère sans écoulement. L'utilisation de l'équivalent eau douce, dans le but d'estimer des gradients, nécessite donc que tous les piézomètres considérés aient la même profondeur, ce qui est rarement le cas.

En généralisant pour  $h=0$  et d'après l'Equation 5, on obtient directement l'erreur faite sur la correction « équivalent eau douce » en fonction de la profondeur :

$$h_f = - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z \quad (7)$$