

## **Sommaire**

<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Sigles et Abréviations :.....</b>	<b>3</b>
<b>I- Introduction :.....</b>	<b>4</b>
<b>II- Présentation de la zone d'étude.....</b>	<b>8</b>
<b>III- Prélèvements et techniques expérimentales .....</b>	<b>13</b>
<b>IV- Résultats .....</b>	<b>24</b>
<b>V- Discussion .....</b>	<b>31</b>
<b>VI- Conclusions et perspectives de l'étude.....</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>47</b>
<b>Listes des figures.....</b>	<b>48</b>

## Résumé

Une étude des eaux souterraines du Narbonnais, objet de ce rapport, a été ciblée sur la composition et l'origine des eaux de l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur. Pour comparaison, les eaux de la nappe alluviale de l'Aude, ainsi que de captages en bordure du littoral ont été prélevées. Chaque échantillon d'eau a été analysé en ions majeurs, en traces (Br, Sr) et en composition isotopique du Sr. Des prélèvements ont été réalisés afin de disposer d'autres données en traçage ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) et datations ( $^3\text{H}$ ), mais ces analyses sont encore en cours. En addition, les données de Michel (1995) sur les eaux souterraines du secteur de Perpignan, dans un environnement hydrogéologique comparable à celui de Narbonne, ont été utilisées. L'ensemble de ces données suggère :

- une contamination par l'eau de mer actuelle, observable nettement pour les eaux karstiques des captages proches de l'étang de Bages-Sigean et du lido,
- en domaine non-littoral, un mélange des eaux karstiques avec celle de la nappe alluviale de l'Aude dont la composition indique des interactions avec le gypse oligocène présent et antérieurement exploité dans le bassin versant du cours inférieur de l'Aude.
- que la source de l'Oeillal se distingue des eaux karstiques précédentes, par un double mélange (influence marine et de la nappe alluviale de l'Aude).

**Mots clés :** Eaux souterraines karstiques, nappe alluviale, eau de mer, traceurs, mélanges, Narbonne

### Abstract:

This report presents a study of groundwater environment Narbonne, focused on the composition and origin of the waters of the limestone aquifer Jurassic Upper and Lower Cretaceous. For comparison, water samples were taken in the Aude alluvial sheet, as well as in piezometers and catchments along the coast. Samples have been made to provide other data tracing ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) and dating ( $^3\text{H}$ ), but these tests are still underway.. In addition, data from Michel (1995) on groundwater of a hydrogeological environment comparable near Perpignan, were used. All these data suggests:

- Contamination by seawater present, clearly observable for karstic water catchment near the Bages-Sigean pond and lido,
- Non-coastal area, a mixture of water karst with that of Aude alluvial sheet, whose composition indicates interactions with gypsum Oligocene present and previously operated in the catchment area of the lower reaches of the Aude.
- That the source of Oeillal differs from previous water karst, with a double mixture (influence marine and ground alluvial de l'Aude).

Keywords: Groundwater karst, alluvial water, seawater, tracers, mixtures, Narbonne

## **Sigles et Abréviations :**

CERECO S.A.: CEntre de REcherche et de COncil (Laboratoire SUD/Nîmes-Garons)

CEREGE : Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (Aix-en-Provence)

CGS : Centre de Géochimie de la Surface (Strasbourg)

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

FORPRO : FORmations géologiques PROfondes

GdR : Groupe de Recherche

GIS : Géochimie ISotopique environnementale (Nîmes)

ICP-MS: Inductively coupled plasma mass spectrometry

IDES: Interactions et Dynamiques dans l'Environnement de Surface (Orsay)

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (Fontenay-aux-Roses)

LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et Environnement (Saclay)

SCA: Service Central d'Analyse du CNRS (Lyon)

SLMC : Société Languedocienne Micron Couleur (Narbonne / Malvés)

TRASSE : Transferts des RADionucléides dans le Sol, le Sous-sol et vers les Ecosystèmes

UMR : Unité Mixte de Recherche

## **I- Introduction :**

Ce rapport fait suite au stage que j'ai effectué à Nîmes au Laboratoire GIS (Géochimie ISotopique environnementale). Ce laboratoire fait partie de l'Université de Nîmes et du CNRS via le CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (UMR 6635)) localisé à Aix en Provence

Depuis 2001, le laboratoire GIS a accueilli successivement la direction de deux Groupements de Recherche avec respectivement pour partenaire l'ANDRA et l'IRSN. Issu d'un partenariat entre le CNRS et l'ANDRA dans le cadre de la loi de 1991 dite "Loi Bataille" sur la gestion des déchets radioactifs, le Groupement de Recherche (GdR) FORPRO, dirigé par J.Lancelot, a été créé en 1998 et s'est achevé en 2007. Depuis le 1er janvier 2008 le laboratoire du GIS devient le centre de direction du nouveau GdR TRASSE associant en partenariat le CNRS et l'IRSN, sur le transfert des radionucléides, avec une application au site de Tchernobyl, où l'équipe GIS est impliquée dans la problématique des temps de transfert de radionucléides dans la nappe phréatique sous jacente aux fosses où les déchets issus de la catastrophe de 1986 ont été enfouis.

Le laboratoire GIS accueille des étudiants dans le cadre de la licence professionnelle 3D (Métiers du Démantèlement, des Déchets et de la Dépollution), de la 3<sup>ème</sup> année de licence du parcours Environnement ; il entretient des relations avec de nombreuses entreprises concernées par les problèmes environnementaux tant du point de vue de l'enseignement professionnel que de la recherche.

La présente étude porte sur les eaux karstiques de la région narbonnaise, et l'extension du biseau salé dans les eaux souterraines du littoral. Des travaux antérieurs (Michel, 1995) réalisés à l'Université de Montpellier II lors d'un DEA ont porté sur la comparaison des signatures isotopiques en Sr des eaux souterraines du littoral et de l'arrière pays perpignanais. Cette étude conclue à une contamination des eaux karstiques littorales présentes dans les calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur par l'eau de mer du biseau salé. On peut donc supposer que des mélanges ont lieu également dans la région de Narbonne qui présente un environnement géologique et hydrogéologique assez similaire, à celui de la région de Perpignan.

L'échantillonnage des eaux souterraines karstiques des formations Jurassique supérieur-Crétacé inférieur a été réalisé du littoral vers l'arrière pays narbonnais (Fig. 1). En bordure de

l'étang de Bages-Sigean à Port la Nouvelle, trois prélèvements d'eau ont été réalisés dans des piézomètres ; peu profonds, ceux-ci se trouvent dans les formations calcaires du Jurassique supérieur. Plus au Nord, le captage du CAT La Clape est beaucoup plus profond (45 m NGF) et plonge dans les calcaires fissurés du Crétacé inférieur.

Les captages par forage de St Johannès, des Pallagustis, et des Galounettes, servent à l'alimentation en eau potable de domaines privés au Nord-Ouest de Narbonne. Très proches les uns des autres, ils permettent l'utilisation de l'eau de l'aquifère karstique à des fins domestiques.

Au Nord de Narbonne, la source karstique de l'Oeillal émerge à la base du Montlaurés, relief de calcaires du Jurassique supérieur émergeant de la plaine alluviale de l'Aude, à la faveur d'un horst oligocène (Fig. 1).

Par comparaison avec les prélèvements précédents, nous avons également échantillonné la nappe alluviale de l'Aude grâce à un captage servant à l'alimentation en eau potable de l'agglomération narbonnaise et situé au Sud Est de la commune de Cuxac-d'Aude. Aux abords de Port La Nouvelle, l'eau saumâtre de l'étang de Bages-Sigean a également fait l'objet d'un prélèvement afin de déterminer son influence sur les eaux karstiques.

Les données de Michel (1995) constituent des points de comparaison intéressants, notamment la source du Château de Salses près de Perpignan, supposée représenter le pôle non contaminé de la nappe souterraine des calcaires du Jurassique supérieur/Crétacé inférieur. En addition, aux sources karstiques de la région de Perpignan, Michel (1995) a également étudié le captage de Rec de Conillac, situé au Sud Est du Massif de La Clape (Fig. 1), et qui fournit un bon exemple de source karstique contaminée par l'eau de mer.

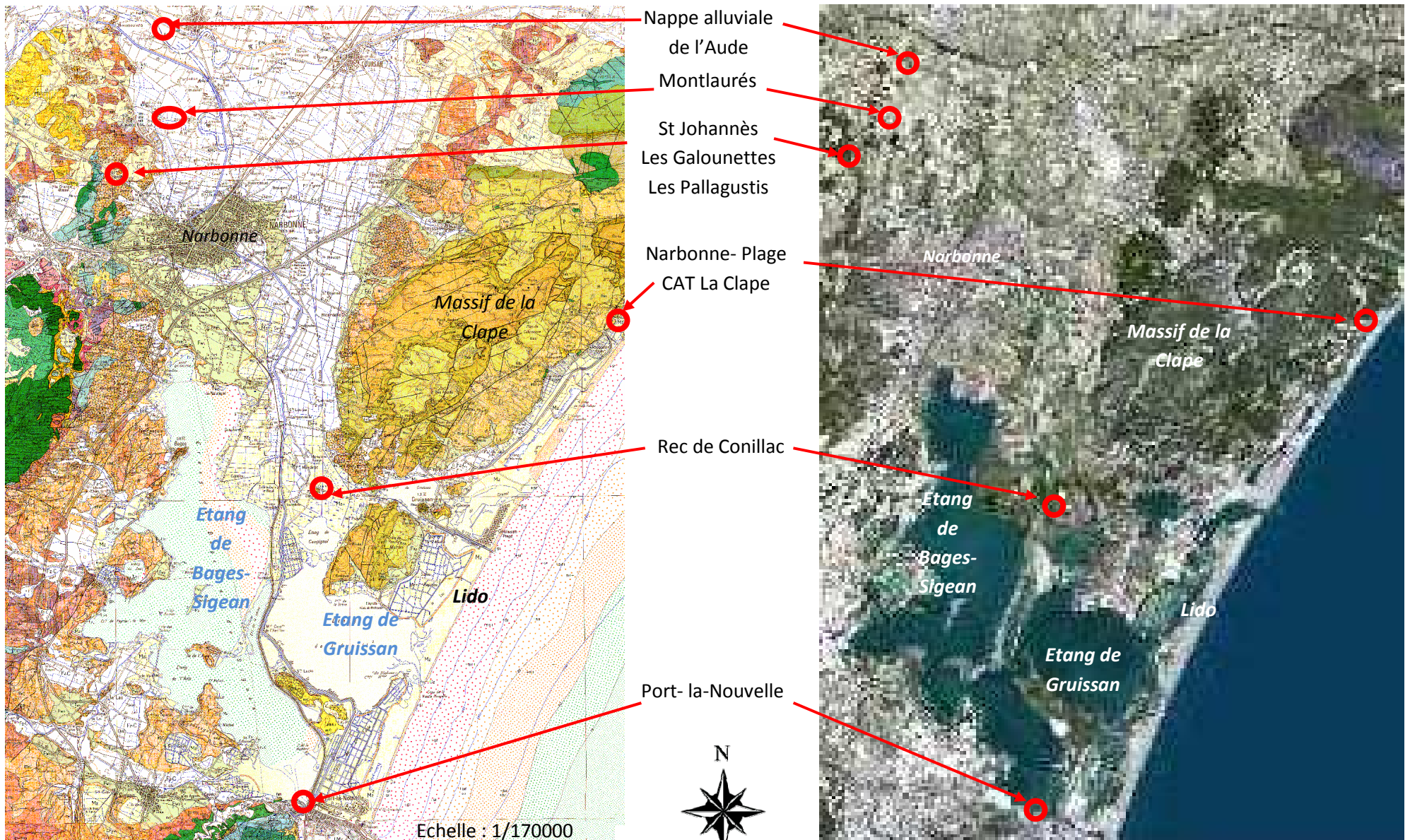


Figure 1a : Répartition des points de prélèvements d'eau de l'étude-Extraits des cartes géologiques de Narbonne et de Béziers au 1/50000- Image Géoportail

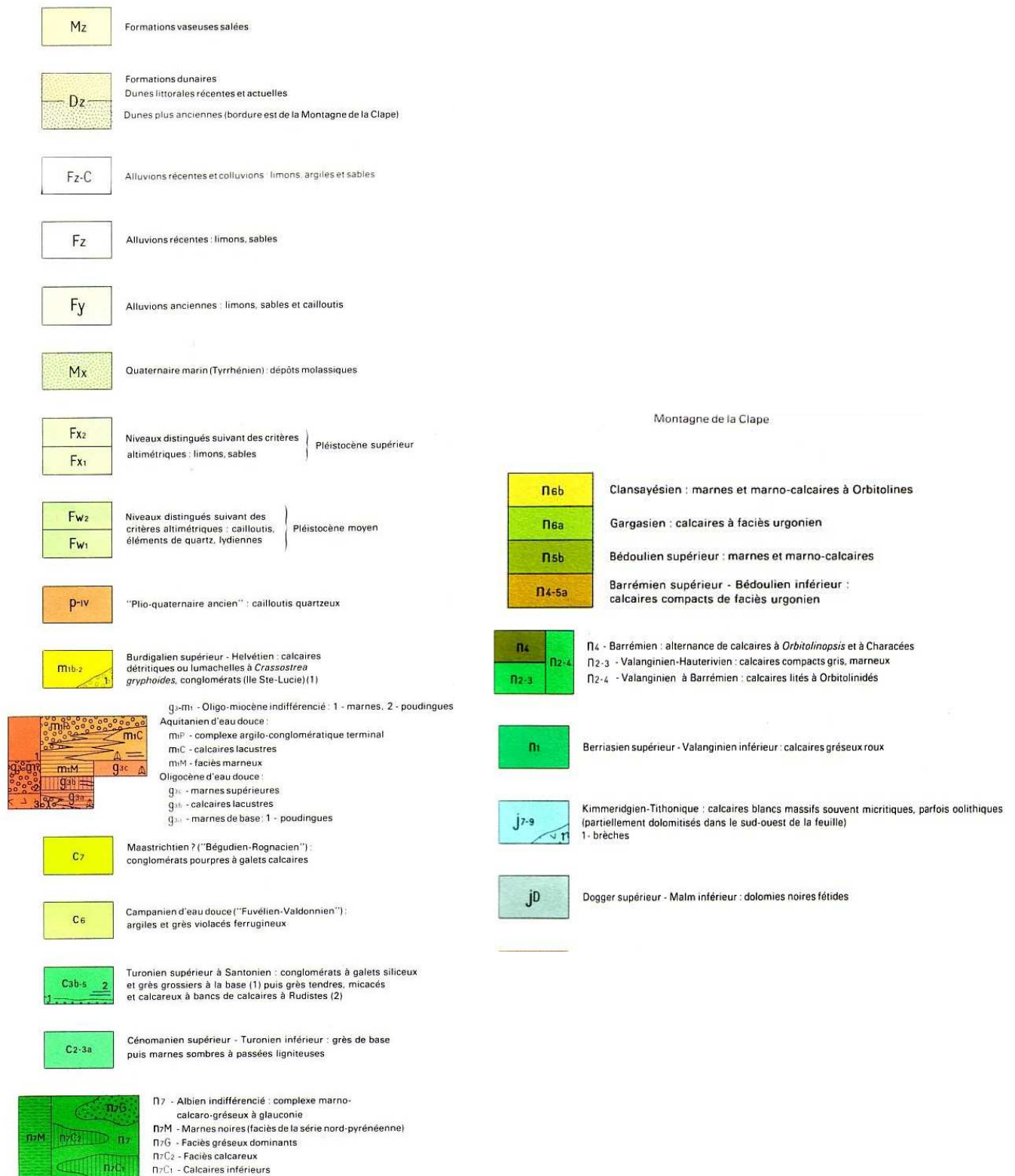


Figure 1b : Représentation des principales formations géologiques du secteur étudié

## II- Présentation de la zone d'étude

### A) Localisation géographique



Figure 2: Photographie satellite de la région narbonnaise et du Sud du département de l'Hérault- Géoportail 2008- Echelle 1/420000

Centrée sur la basse plaine de l'Aude, la commune de Narbonne s'étend de la mer Méditerranée aux contreforts des Corbières maritimes en englobant le massif calcaire de la Clape, le cours inférieur actuel de l'Aude et les étangs de Bages-Sigean et de Gruissan.

### B) Synthèse climatique

La zone d'étude est l'une des moins arrosées de France, avec seulement 500 à 570 mm de pluie par an. Il existe une différence entre Narbonne et Port la Nouvelle. Les données pluviométriques provenant de Narbonne ( $\approx 570$  mm) sont représentatives de l'intérieur des terres et celles provenant de Port la Nouvelle représentatives du littoral ( $\approx 500$  mm).

La période la plus sèche se situe pendant les trois mois d'été avec un maximum au mois de juillet. Au contraire, le maximum de précipitations se produit en automne. Le mois d'octobre est généralement le plus arrosé, avec environ 90 mm à Narbonne et 75 mm à Port la nouvelle.

La température moyenne à Narbonne est de 14°C. Le minimum moyen est atteint au mois de janvier (6.3°C) et le maximum en juillet (23.9°C). Ces extrêmes correspondent donc à un écart thermique important de 18°C.

Les vents sont presque permanents dans la région. Notamment dans le secteur des basses plaines qui n'est abrité que par de rares reliefs, et sur l'ensemble de la bordure littorale.

### C) Contexte géologique régional

La région du Languedoc Roussillon est marquée structurellement par la mise en place de la « Chaîne pyrénéo-provençale ».

A partir du Trias l'histoire géologique de ce secteur peut se décrire en 3 grandes phases :

*Du Trias au Crétacé inférieur (inclus)*, une sédimentation continentale, puis marine, domine. Au Trias, l'évaporation d'eaux salées dans les lagunes, crée des dépôts de gypse et d'argiles. Au Jurassique l'avancée de la mer induit de puissants dépôts calcaires à l'est des Pyrénées qui se retrouvent actuellement entre autres dans les Corbières et les Grands Causses.

*De la fin du Crétacé inférieur au milieu du Crétacé supérieur*, la plaque Ibérique et Europe se séparent, et se met en place une ride océanique marquant l'axe WNW-ESE du Golfe de Gascogne. Parallèlement de grandes fractures E-W se mettent en place dans les Pyrénées, provoquant des fossés d'effondrement dans lesquels s'accumulent des niveaux sableux et argileux continentaux.

*Du Crétacé supérieur à l'Eocène supérieur*, les plaques Ibérie et Europe se rapprochent et coulisent en un décrochement senestre, entraînant le plissement du matériel pyrénéen. Le mouvement de convergence se développe au cours de l'Eocène, les roches déformées sont rapidement bloquées dans la zone de contact des plaques, la déformation va alors se propager vers le nord, coté français et vers le sud coté espagnol.

La chaîne pyrénéo-provençale se met en place à partir de - 45 Ma. Le serrage a pour conséquence le plissement des formations et la naissance de chevauchements. Par exemple, le massif de la Clape, maintenant isolé géographiquement des Corbières par les dépôts oligocènes de Narbonne à Sigean et la plaine alluviale de l'Aude, fait néanmoins partie de la nappe des Corbières, et a été déplacé sur une dizaine de kilomètres.

A partir de - 30 Ma, une grande phase de distension s'exprime en particulier par des grabbens orientés NE- SW, remplis de sédiments lacustres et fluviatiles oligocènes (conglomérats, argiles, calcaires).

La fin du Miocène est marquée par le retour de la mer, qui va déposer des calcaires fossilifères dans le Languedoc Roussillon. L'épisode messinien (cf. ci-dessous) sera suivi par le dépôt de sables pliocènes, notamment dans la région de Montpellier, où ils constituent une importante nappe aquifère.

#### D) Contexte hydrogéologique régional

La fermeture du détroit de Gibraltar (Messinien) a fait de la Méditerranée une mer fermée. Par évaporation, le niveau de la mer est alors descendu de 1 000 à 1 500 mètres. Des canyons se sont formés dans les massifs calcaires karstiques. Plus tard lors de la remontée de la mer ils se sont remplis par endroit d'eau salée, tandis que d'autres ont servi à l'écoulement des eaux douces karstiques.

Les principaux aquifères karstiques de la région Languedoc- Roussillon se trouvent dans ces formations jurassiques à crétacées (Hébrard et al, 2001). Dans l'ensemble de ces massifs calcaires karstiques, des émergences fortement chlorurées ont été observées sur deux grandes zones :

- L'Étang de Thau en zone littorale,
- Les Corbières orientales, sur le pourtour des étangs littoraux situés entre Perpignan et Narbonne.

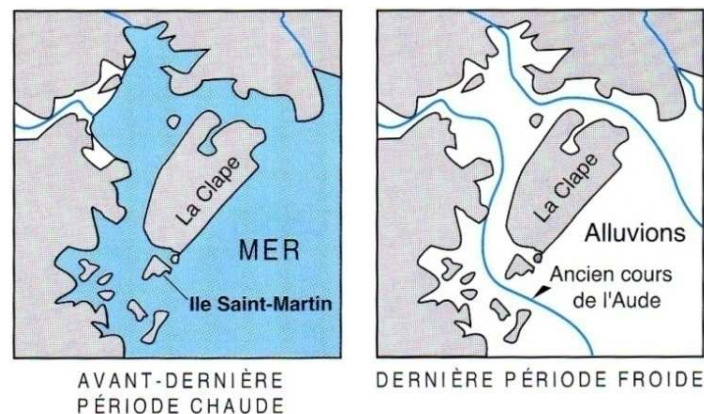
Dans la zone d'étude, le massif de la Clape se compose de deux ensembles calcaires karstifiés d'âge Crétacé inférieur-Jurassique supérieur et Aptien, séparés par les marnes moyennes de l'Aptien. On note des exurgences au contact des marnes, telles les sources du Rec d'Argent et du Gourp. Au Nord du massif, le gouffre de l'Œil Doux semble représenter un regard sur la nappe, et comme les autres sources il a des fluctuations sensibles à la pluviométrie et aux coups de mer (Fig.3).



**Figure 3: Photographie du Gouffre de l'Œil Doux, qui n'a pu être échantillonné lors de cette étude - Données personnelles**

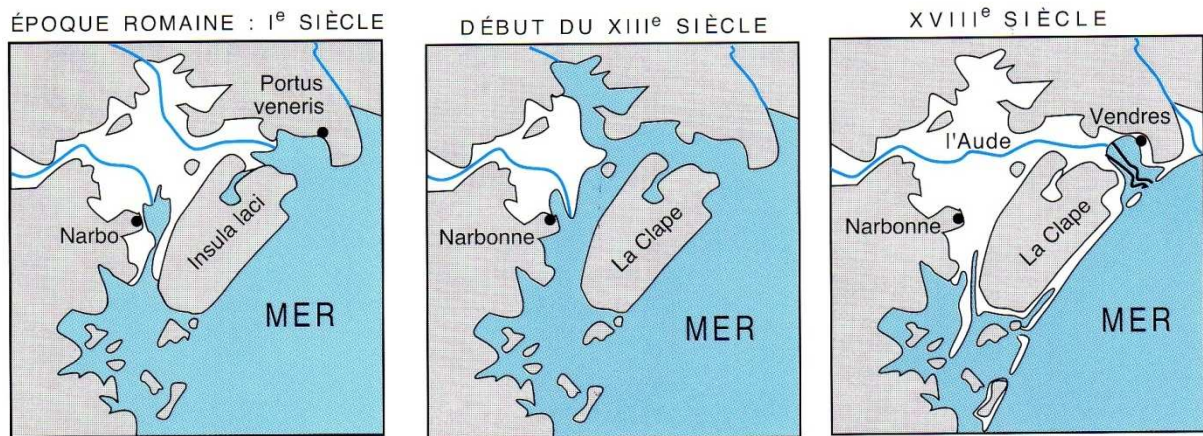
E) Evolution littorale récente de la zone d'étude narbonnaise

Les traces d'organismes lithophages et le dépôt des sédiments marins très récent autour du massif de la Clape, prouvent la présence de la mer, il y a 100000 ans (Fig. 4 ; Bousquet, 2006).



**Figure 4: Illustration du recul de la mer pendant le Würm- Bousquet, 2006**

Au cours de la dernière période glaciaire du Quaternaire (Würm), la mer recule de plusieurs dizaines de kilomètres. Entre la Clape et le massif des Corbières, l'Aude creuse alors son cours pour se jeter dans la mer. La remontée des températures entraîne l'élévation du niveau marin. Celle-ci commence vers -15000 et, il y a -4000 ans la mer arrive à peu près à son niveau actuel.



**Figure 5: Les changements du rivage près de Narbonne pendant la période historique- Bousquet 2006**

Dans la région de Narbonne les changements de ligne de côte ont été étudiés en détail grâce à de nombreux forages et aux documents et vestiges laissés entre autres par les romains (AMBERT, 1993). Entre le I<sup>er</sup> et le XIII<sup>ème</sup> siècle, la mer arrive jusqu'à Narbonne ; Narbonne et le Montlaurés sont des ports et le Massif de la Clape est une île (Fig. 5 et 6).



**Figure 6: Photographie de perforations de Pholades dans les calcaires du Jurassique supérieur à la base du Montlaurés témoignant de la présence récente de la mer (entre le I<sup>er</sup> et le XIII<sup>ème</sup> siècle) - Données personnelles**

En ce qui concerne l'Aude, celle-ci prend sa source dans les Pyrénées à Roc d'Aude, le fleuve fait un coude à Carcassonne pour aller se jeter en Méditerranée au Grau de Vendres. Avant l'inondation du 12 octobre 1316, l'Aude coulait uniquement en direction de Narbonne et se jetait dans l'étang de Gruissan ; cette inondation a provoqué un colmatage de la très basse vallée de l'Aude, des canaux ont alors été creusés et l'Aude s'est divisée en deux bras : l'un vers le Sud, l'autre vers l'Est. Ce dernier passe au Nord du Massif de la Clape et se jette dans l'étang de Vendres. En 1755, fut creusé, entre Coursan et Salles-d'Aude, un canal qui deviendra le lit du fleuve actuel (Fig. 5). Jusqu'au XVIII<sup>ème</sup> siècle la matière en suspension des eaux de l'Aude à contribuer à colmater les divers étangs.

### III- Prélèvements et techniques expérimentales

#### A) Choix des sites de prélèvements

L'inventaire des piézomètres sur le site Infoterre du BRGM, a permis de mettre en évidence 5 piézomètres correspondant à notre critère de recherche, à savoir une profondeur suffisante pour atteindre l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur-Crétacé inférieur. (Annexe 1)

Afin de caractériser les eaux de l'aquifère karstique dans ces calcaires, les prélèvements suivants ont été réalisés :

*La source de l'Oeillal* est l'une des plus importantes du Languedoc Roussillon avec un débit de 4000 m<sup>3</sup>/h. Il s'agit d'une résurgence au pied d'un relief calcaire kimméridgien (Jurassique supérieur) du Montlaurés, horst de terrains jurassiques, formés à l'oligocène et émergeant de la plaine alluviale de l'Aude (Fig. 8). Depuis quelques années, les analyses réalisées sur les sites industriels voisins de la COMURHEX et de la SLMC montrent une augmentation de la concentration en chlorures. On notera qu'en aout 2008 le débit de la source de l'Oeillal a considérablement déchu pour atteindre la valeur minimale de 70 m<sup>3</sup>/h (Communication J. Lancelot).

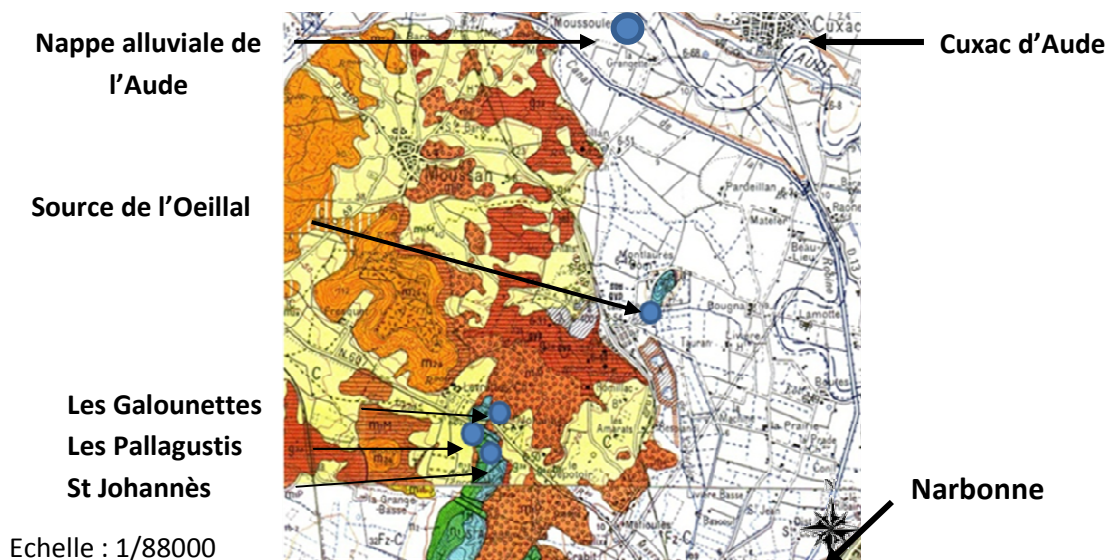


Figure 7: Localisation des points de prélèvement de la plaine alluviale de l'Aude, du horst du Montlaurés et de l'arrière pays narbonnais- Echelle : 1/88000 – Extrait de la carte géologique de Béziers au 1/50000

Les captages des propriétés de St Johannès, des Pallagustis et des Galounettes sont situés environ 2,2 km au Sud Est de la Source de l'Oeillal et à moins de 2 km de la limite de la

plaine alluviale de l'Aude. Avec des profondeurs respectives de 58, 40 et 51 m, ces forages pompent dans la nappe des calcaires karstifiés du Jurassique supérieur.

Afin de tester de possibles échanges entre les eaux de *la nappe alluviale de l'Aude* et celle de l'aquifère karstique sous jacent, nous avons échantillonné la nappe alluviale au Sud Ouest de la commune de Cuxac d'Aude au niveau d'un puits de pompage servant à l'alimentation en eau potable de la ville de Narbonne. Le forage atteint la profondeur de 18 m.

Enfin, pour tester les possibles échanges des eaux de l'aquifère karstique avec l'eau de mer, nous avons échantillonné 4 piézomètres le long du littoral.

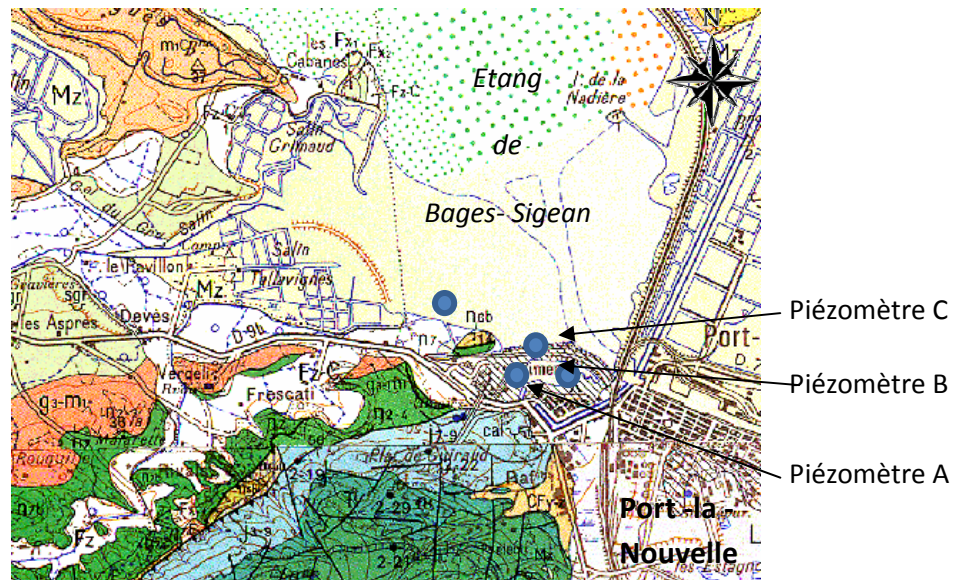
Au CAT La Clape, un forage a été réalisé dans un forage en bordure du Massif de la Clape à 62 m de profondeur dans les calcaires fissurés du Crétacé inférieur.



**Figure 8: Localisation du forage du CAT La Clape à Narbonne plage et du Rec de Conillac au Nord de l'étang de Campagnol- Extrait de la carte géologique de Narbonne au 1/50000**

Au Sud du Massif de La Clape, nous disposons d'un captage, *le Rec de Conillac* préalablement étudié par Michel (1995), caractéristique d'une eau de l'aquifère karstique fortement contaminée par l'eau de mer (Fig. 9).

Nous avons également échantillonné 3 piézomètres au Sud de l'étang de Bages-Sigean (Fig. 10). sur la commune de *Port La Nouvelle*. Peu profonds (entre 5,5m et 6m), ils se situent dans le Jurassique supérieur (J<sub>7-9</sub> Kimméridgien Tithonique, calcaires gris massifs microcristallin), affleurant quelques dizaines de mètres plus au Sud.



**Figure 9: Extrait de la carte géologique de Narbonne au 1/50000 avec la localisation des points de prélèvements à Port La Nouvelle- Source: BRGM- Echelle1/51500**

L'eau saumâtre de l'étang de Bages-Sigean a fait également l'objet d'un échantillonnage, pour mettre en évidence l'éventuelle contamination par l'eau salée des piézomètres étudiés à Port La Nouvelle.

## B) Campagne de prélèvements

La première campagne de prélèvement d'échantillons d'eau a été effectuée fin avril 2008 (St Johannès et Oeillal), une seconde a eu lieu courant mai 2008 (La Clape, Les Pallagustis, Les Galounettes) après avoir reçu les autorisations des propriétaires. Les différentes émergences se trouvaient à leur régime hydrologique moyen. La dernière campagne a eu lieu au début du mois juillet, suite au recensement de 3 nouveaux piézomètres au Sud de l'étang de Bages-Sigean à Port-la-Nouvelle. (Annexe 2)

## C) Matériel utilisé et méthode de prélèvement

Sur chaque site de prélèvements, un protocole identique a été suivi. L'eau des forages est pompée pendant quelques minutes afin de renouveler deux à trois fois le volume d'eau dans le piézomètre. Les dépôts et impuretés sont ainsi éliminés. Simultanément les mesures de pH, température et conductivité sont prises en continu ; une fois les valeurs stabilisées, le prélèvement commence. Les appareils électriques pH-mètre, conductivimètre, thermomètre et sonde redox sont étalonnés avant chaque campagne de prélèvement.

Les échantillons sont récoltés dans un flacon spécifique de l'analyse (Annexe 2) dont ils vont faire l'objet, et préalablement rincé avec l'eau à prélever. Chaque flacon est fermé, vide d'air, et transporté dans une glacière réfrigérée.

Les échantillons nécessitant d'être filtrés, sont passés à travers une cellule de filtration contenant un filtre (Millipore®) interchangeable dont le diamètre des pores est de 0,45 µm. Sur chaque site de prélèvement, la cellule est entièrement rincée à l'eau distillée, puis avec l'eau à prélever et le filtre changé.

Une dernière mesure de conductivité, pH et température est réalisée à la fin de l'échantillonnage pour s'assurer que ces paramètres n'ont pas évolué.

#### D) Analyse des échantillons

##### a) Dosage de l'alcalinité

L'alcalinité est mesurée directement sur le terrain à l'aide d'un kit basé sur le principe de colorimétrie. On dispose d'un erlenmeyer dans lequel 100 ml de l'eau à étudier sont mélangés à un réactif (dans notre cas le Bleu de Bromocrésol pour un pH>7). Une cartouche d'acide couplée à un pistolet permet de connaître la quantité d'acide introduit jusqu'au virage (Fig. 12).



**Figure 10: Photographie du Kit d'alcalinité HACH**

Le kit de terrain permet de faire la mesure directement sur le site de prélèvement et donc de réduire au mieux les impacts de contamination et donc l'évolution potentielle de l'eau. Seulement, la précision dépend de la bonne utilisation du matériel, la zone de virage n'étant pas évidente à détecter. Pour les premiers prélèvements nous avons réalisé une seconde mesure en laboratoire grâce à la méthode de Gran. Il s'avère que la différence entre ces deux méthodes est de l'ordre de  $\pm 3\%$ .

#### b) Les éléments majeurs et les éléments en traces

Une partie des échantillons sont partis dans des laboratoires indépendants, qui effectueront les analyses. Les cations sont dosés par ICP-MS (Spectromètre de masse de type quadripôle ou secteur magnétique). Le brome et les anions sont analysés par chromatographie ionique.

Les anions, les cations, et les traces (brome et strontium) sont analysés par le Laboratoire Central d'Analyses du CNRS à Lyon (SCA). Suite à plusieurs erreurs relevées dans les données transmises, un deuxième lot a été envoyé pour l'analyse des anions et du brome au laboratoire Sud CERECO habilité COFRAC. (Annexe3)

Pour les mêmes raisons, les concentrations en strontium ont été analysées une seconde fois au Centre de Géochimie de la Surface (CGS) à Strasbourg par ICPMS.

#### c) Le tritium

Le tritium a été envoyé pour analyse au LSCE (UMR1572) de Saclay. L'analyse du  $^3\text{H}$  se fait par reconnaissance de  $^3\text{He}$ . Un volume d'échantillon est enfermé dans un ballon de verre, après un dégazage poussé le ballon est scellé. Il va avoir recroissance de  $^3\text{He}$ , et après plusieurs mois celui-ci est dosé par spectrométrie de masse. En connaissant le temps de stockage et la masse de l'échantillon, la teneur en tritium se déduit de la quantité d' $^3\text{He}$  formée.

Les essais nucléaires (Bombe H) de 1963 sont un repère précis de la concentration en tritium dans les eaux de pluies. La période de demi-vie de 12,3 ans du  $^3\text{H}$  permet de dater les eaux souterraines récentes, d'âge inférieur à 100 ans.

*Les résultats d'analyses de tritium sur les échantillons prélevés ne sont pas connus à l'heure de la rédaction de ce mémoire.*

#### d) Les isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène

Les échantillons ont été transmis au laboratoire IDES (UMR CNRS-UPS 8148) à Orsay, pour des analyses par spectrométrie de masse.

Les deux éléments de la molécule d'eau, O et H, possèdent comme isotopes stables le  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  et le  $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$ . Au cours des diverses réactions de l'eau avec son environnement, des fractionnements isotopiques se produisent. Ces fractionnements sont enregistrés au sein des

molécules d'eau par le biais des ratios en  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) et  $^2\text{H}/^1\text{H}$  ( $\delta\text{D}$ ), dont l'étude permet d'obtenir ainsi nombre d'informations (provenance des recharges des aquifères, mélanges...).

Les aquifères continentaux sont principalement alimentés par des eaux météoriques et donc significativement plus appauvris en isotopes lourds de l'eau océanique, d'où l'intérêt de leur dosage. Les carbonates sont caractérisés par des  $\delta^{18}\text{O}$  élevés ( $\approx 20\text{‰}$ ) tandis que les eaux ont des  $\delta^{18}\text{O}$  inférieurs. Lors du contact entre l'eau et les carbonates, l'équilibre va entraîner un enrichissement en  $^{18}\text{O}$  de l'eau. Ces deux éléments seront des traceurs de mélange entre les eaux souterraines, météoriques et marines, mais aussi des échanges isotopiques avec l'encaissant.

**Tableau 1: Rapports isotopiques de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  dans les roches, l'eau douce et l'eau de mer**

Types	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$
<b>Roches métamorphiques</b>	De +5 à +13	
<b>Roches carbonatées</b>	De +25 à +34	
<b>Eau douce</b>	De -10 à -50	Jusqu'à -450
<b>Eau de mer</b>	0 (Standard ou SMOW)	0 (Standard ou SMOW)

*Les résultats d'analyse  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  sur les échantillons prélevés ne sont pas connus à l'heure de la rédaction de ce mémoire.*

#### e) Le chlore 37

C'est également un indicateur de mélange. Les échantillons ont été envoyés au Canada à l'Université de Waterloo. Il faut un minimum de 2 mg de Cl pour l'analyse. Le dosage est réalisé par spectrométrie de masse.

*Les résultats d'analyse de  $\delta^{37}\text{Cl}$  sur les échantillons prélevés ne sont pas connus à l'heure de la rédaction de ce mémoire.*

## f) Le Strontium

Les analyses isotopiques de strontium ont été réalisées au laboratoire GIS, ce dernier possédant une salle blanche de classe 100 et un spectromètre de masse à thermoionisation et source solide, le TRITON TI permettant l'analyse isotopique de cet élément en trace.

Le strontium, à l'état naturel se présente sous la forme de quatre isotopes dont trois sont stables :  $^{84}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Sr}$ , avec une abondance respective de 0.56%, 9.86%, 82.56%. Le  $^{87}\text{Sr}$  est lui aussi stable mais radiogénique, issu de la désintégration naturelle du  $^{87}\text{Rb}$ . Depuis la formation de la Terre et du système solaire, les proportions des isotopes 88, 86 et 84 du strontium sont restées constantes dans les géomatériaux terrestres ou extraterrestres (Terre, Lune, météorites). Il n'en est pas de même pour la teneur en  $^{87}\text{Sr}$  qui augmente avec le temps par désintégration du  $^{87}\text{Rb}$  (Annexe 4)

Dans le cadre de notre étude l'analyse du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  dans les différents échantillons permet d'identifier les interactions eaux roches et sera également un traceur de mélange, par exemple eau douce- eau de mer.

**Tableau 2: Rapports isotopiques du strontium dans les roches et l'eau de mer**

Types de roches	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Roches silicatées	$\geq 0.7112$
Roches carbonatées	0.706-0.709
Eau de mer actuelle	0.70920

## E) L'analyse du strontium au spectromètre de masse

### a) Préparation des échantillons

Avant leur introduction dans le spectromètre de masse, les échantillons vont subir une préparation minutieuse en salle blanche.

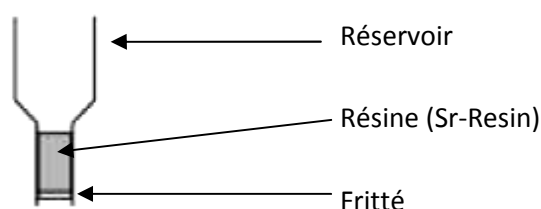
La salle blanche de classe 100 est indispensable, pour éviter la contamination des échantillons par des substances riches en strontium, telles que les particules de poussières. Le port de gants permet ainsi de protéger le manipulateur des acides manipulés mais également les échantillons. On notera que tous les réactifs utilisés sont distillés isothermalement en salle blanche.

### Traitement de l'échantillon

Le matériel utilisé lors de la chimie, a été au préalable lavé en suivant un protocole strict. (Annexe 5)

La concentration en Sr permet d'évaluer le volume d'échantillon à utiliser pour la chimie, sachant qu'il faut environ 700 ng de Sr avant la préparation chimique. L'échantillon est mis en solution dans un bécher en téflon à bouchon vissant sur une plaque chauffante, disposée dans une hotte d'évaporation à flux laminaire vertical. Après évaporation à sec, l'échantillon est repris à l'acide  $\text{HNO}_3^-$  0,05 N ultrapur.

La méthode de Pin (2003) (Annexe 6) est basée sur le principe de la séparation sur micro-colonne échangeuse d'ions. Les colonnes sont remplies sur 8 mm de haut par de la résine « Sr resin ».



**Figure 11: Schéma d'une micro-colonne échangeuse d'ion**

Après un lavage minutieux à l' $\text{HCl}$  6N, les colonnes sont conditionnées en  $\text{HNO}_3^-$  2N. L'échantillon est introduit dans la colonne en 5 fois 100  $\mu\text{l}$ , afin que le strontium s'adsorbe correctement à la résine.

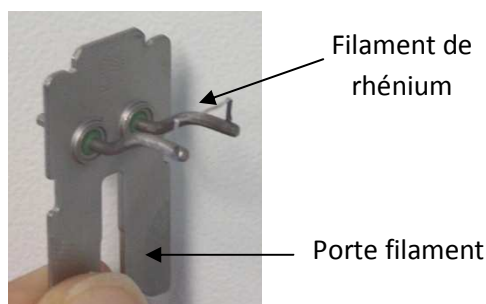
L'élution se fait en 4 étapes successives, avec utilisation d'acides tri-distillés. La première élution est réalisée avec l'acide  $\text{HNO}_3^-$  2N, la seconde à 7N va permettre l'élution du Ba. Une fois que les 200 $\mu\text{l}$  d'  $\text{HNO}_3^-$  passés, un bécher propre en téflon est placé sous la colonne pour récupérer le Sr, qui est élué par une solution d'  $\text{HNO}_3^-$  à 0,05N.

La fraction contenant le Sr récupéré lors de la dernière élution est mise à évaporer dans une hotte d'évaporation.

### Dépôts des échantillons

Après évaporation, il reste au fond du bécher, le Sr sous forme d'une tache ou d'une microbille. Ce dépôt est récupéré via une micro pipette avec un microlitre de  $\text{HNO}_3$  0,05N, puis déposé sur un filament de rhénium ultrapur préalablement monté sur un porte filament et

dégazé à 2000°C sous vide. Le dépôt se déroule en 3 étapes selon la technique « sandwich », à savoir une couche de l'échantillon entre deux couches d'activateur au tantale (Annexe 7).



**Figure 12 : Exemple de filaments au rhénium sur son porte filament**

La dernière étape consiste en une chauffe de quelques secondes à 1,5A jusqu'à ce que les filaments soient portés au rouge sombre. Après ce stade les échantillons peuvent être introduits, via un barillet, dans le bloc-source du spectromètre de masse TRITON T1.

#### b) Principe de fonctionnement du spectromètre de masse

Le TRITON T1 est un spectromètre à thermo-ionisation à source solide. Il permet d'avoir une grande précision sur la mesure de composition isotopique en Sr et ne nécessite que de très faible quantité de matière pour l'analyse.

Ce spectromètre de masse se compose de plusieurs parties. Dans le bloc-source, sous vide ( $10^{-7}$ - $10^{-8}$ ), s'effectue l'évaporation et l'ionisation de l'élément à analyser, puis l'accélération par une haute tension de 10kV et la focalisation dans la source au sens strict. Le faisceau ionique formé contenant tous les ions strontium passe dans le tube. Dans l'entre fer de l'électroaimant, au niveau de la courbure du tube, un champ magnétique est appliqué perpendiculairement à la trajectoire des ions qui se séparent en fonction de leur masse pour donner autant de faisceaux ioniques qu'il y a d'isotopes dans l'élément analysé. Ces faisceaux sont dirigés vers des collecteurs ou cages de Faraday. Le signal électrique reçu par chaque collecteur est amplifié et traité directement par un ordinateur qui corrige de la discrimination de masse expérimentale et édite les rapports isotopiques grâce au logiciel Triton Software.

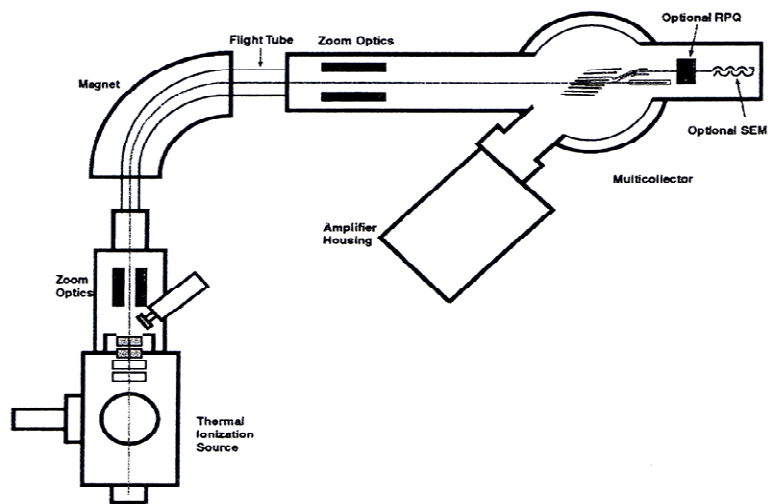


Figure 13: Schéma du spectromètre de masse Triton TI- (Manuel Triton TI Electron Finnigan)

c) Passage des échantillons au spectromètre de masse

Les échantillons sont placés dans le bloc-source du spectromètre accompagnés d'un standard NBS987, donnant une valeur certifiée à 0,710252.

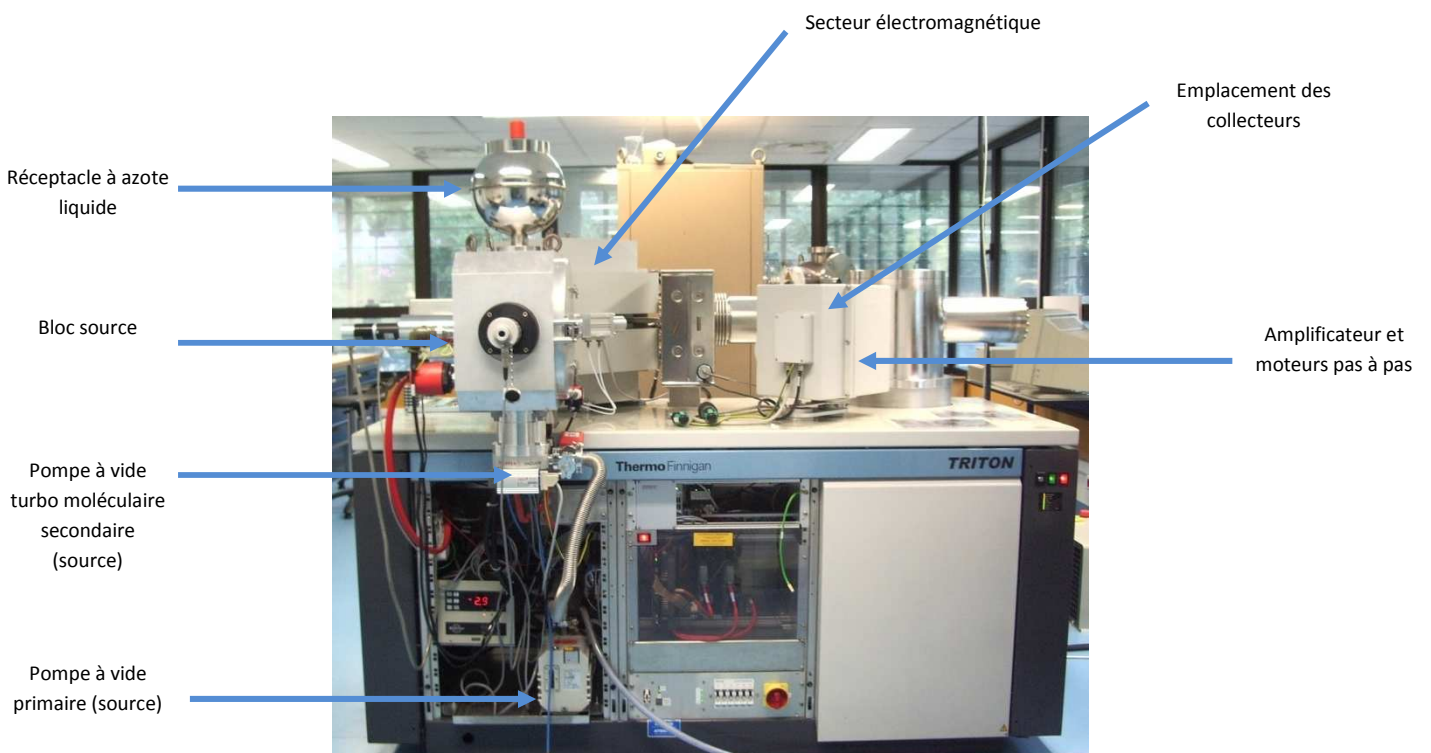


Figure 14: Photographie du spectromètre de masse TRITON T1 du Laboratoire GIS- Donnée personnelle

Les pompes ioniques permettent d'obtenir un vide de  $10^{-8}$  T dans le tube. Dans la figure 16, les deux pompes ioniques sont masquées respectivement par le bloc source et par le bloc renfermant les amplificateurs et les moteurs pas à pas.

Le bloc-source est mis sous vide, grâce à une pompe primaire à palettes, puis une pompe secondaire turbomoléculaire, enfin l'ajout de  $N_2$  liquide dans le vase cryogénique en communication avec un doigt de gant, plongeant dans le bloc source permet d'atteindre un vide de l'ordre de  $10^{-8}$ T. L'échantillon est chauffé progressivement pour obtenir un signal supérieur à 6 volts (Valeur idéale pour avoir une bonne précision). Une fois le signal stabilisé on peut lancer l'acquisition, il est conseillé de réaliser 10 blocs de 10 cycles soient 100 analyses afin d'avoir une bonne erreur de l'ordre de  $10^{-6}$ . Dans mon cas, nous avons réalisé au minimum 10 blocs de 8 cycles car le signal atteignait des valeurs supérieures à 6 volts et une erreur de l'ordre de  $5.10^{-6}$ .

Avant l'acquisition des données isotopiques de Sr, on vérifie l'absence de Rb, indiquant que la chimie a été faite correctement et qu'il n'y a pas de superposition de pics de Rb et de Sr au niveau de la masse 87..

## IV- Résultats

### A) Evaluation critique des résultats

Dès la réception des résultats d'analyse, la balance ionique a été calculée pour chaque échantillon d'eau analysé (Annexe 3). Des incohérences ont alors été mises en évidence, notamment pour les chlorures, le brome et le strontium. Le SCA du CNRS a accepté à notre demande de refaire une partie des dosages des échantillons, suite à une erreur reconnue de dilution.

Certaines incohérences subsistant, des duplicata ont été alors réalisés dans deux autres laboratoires. Les teneurs en strontium ont été ainsi analysées une seconde fois au laboratoire du CGS par ICP MS, à partir des isotopes  $^{86}\text{Sr}$  et  $^{88}\text{Sr}$ , les valeurs retenues sont celles obtenues à partir du  $^{88}\text{Sr}$ , (10 fois plus abondant que le  $^{86}\text{Sr}$ ) fournissant des données plus précises.

Les anions ont été analysés une seconde fois par laboratoire Sud de CERECO agréé COFRAC

Une erreur subsiste pour le point PN A, le résultat obtenu par le SCA pour la concentration en Cl semble erroné à l'étude de la balance ionique. Par contre la valeur de Cl donnée par le laboratoire CERECO (soit 2121 mg/l), donne une balance ionique correcte (3%). (Annexe 3)

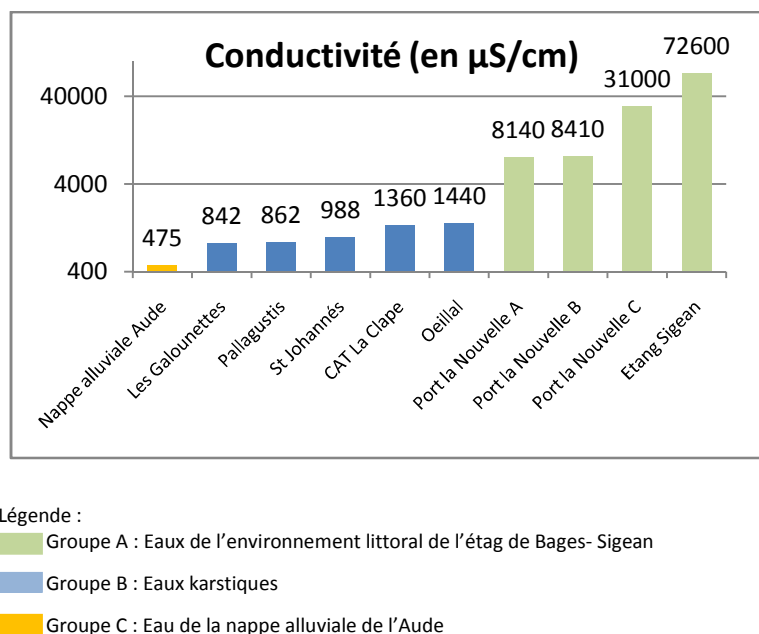
Notons que s'il est possible de vérifier facilement la cohérence des résultats pour les majeurs, par contre nous disposons de peu de moyens pour évaluer l'exactitude des données fournies sur des éléments en traces. Le rapport Br/Cl, comparé à celui de l'eau de mer, peut être une indication, ainsi dans le cas de l'Oeillal, ce rapport Br/Cl a permis de mettre en évidence une erreur dans le calcul de la dilution, avec un rapport Br/Cl de 28, contrairement à tous les autres échantillons où ce rapport Br/Cl varie entre 250 et 450.

Les valeurs de Sr utilisées sont celles fournies par le CGS, leur dosage étant plus précis et nettement plus cohérent avec le contexte hydrogéologique des échantillons que celui du SCA.

## B) Présentation des résultats

### a) Les données de terrain

Les mesures de terrain indiquent trois groupes distincts parmi les échantillons d'eau prélevés: les eaux de l'environnement littoral de l'étang de Bages-Sigean (Groupe A) très chargées, avec des conductivités de l'ordre de 8 à 70 mS/cm, les eaux karstiques (Groupe B) et l'eau de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C) à faible conductivité.(Fig. 15).



**Figure 15: Conductivité en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  des eaux prélevées**

Les forages de Port la Nouvelle (Groupe A) traduisent l'influence marine, avec une conductivité qui augmente lorsqu'on se rapproche de la rive l'étang de Bages-Sigean.

Parmi le groupe B, il existe deux sous ensembles :

- B1 : correspondant aux conductivités inférieures à  $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ , Les Galounettes, les Pallagustis, St Johannès
- B2 : composé du CAT La Clape et de la source de l'Oeillal.

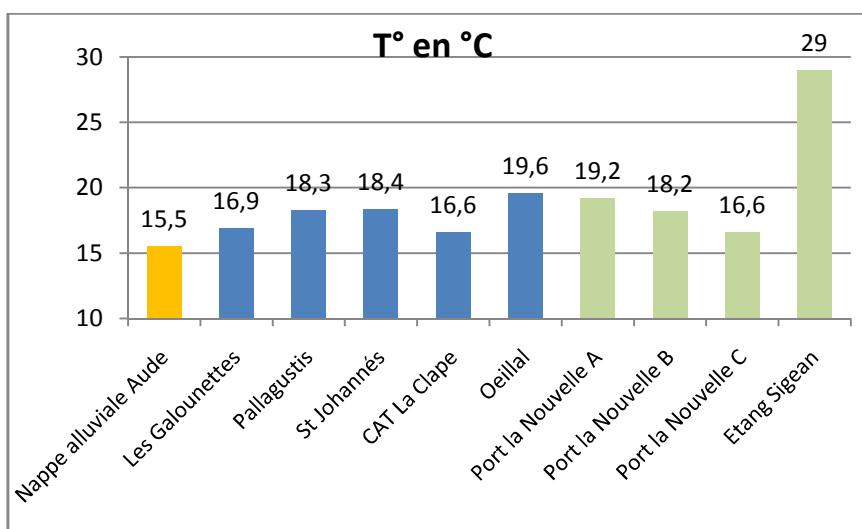
Notons que l'eau du CAT La Clape prélevée dans l'aquifère des calcaires du Crétacé inférieur du Massif de la Clape, mais dans un forage proche du Lido, garde une valeur de conductivité du domaine des eaux karstiques. Par contre, l'échantillon du Rec de Conillac localisé dans un environnement assez similaire à celui du CAT de La Clape présente une conductivité de 21,1 mS/cm et des preuves d'une contamination par l'eau de mer (Michel, 1995).

La quantité totale en éléments solubles dissouts montre que les eaux des trois piézomètres de Port la Nouvelle sont les plus chargées (Tab. 3). Parmi les eaux karstiques, l'Oeillal est la plus concentrée avec un TDS de 951 mg.l<sup>-1</sup>, par contre celui de la nappe alluviale de l'Aude est le plus faible (377 mg.l<sup>-1</sup>).

**Tableau 3: Quantité totale en solubles dissouts en mg.l-1**

Site	<i>Nappe alluviale Aude</i>	<i>Les Galounettes</i>	<i>Les Pallagustis</i>	<i>St Johannès</i>	<i>CAT La Clape</i>	<i>Oeillal</i>	<i>PN A</i>	<i>PN B</i>	<i>PN C</i>	<i>Etang Sigean</i>
<b>TDS (mg.l<sup>-1</sup>)</b>	377	783	664	713	1022	951	3749	5209	18784	45733

Le pH varie entre 6,95 et 7,25 pour les eaux karstiques (Groupe B) et 7.13 et 9.3 pour les eaux de l'environnement littoral de l'étang de Sigean (Groupe A). L'eau de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C) présente un pH de l'ordre de 7,41.



**Figure 16: Représentation graphique des températures des eaux échantillonnées**

Pour les captages de St Johannès, des Galounettes, des Pallagustis, les températures sont sensiblement les mêmes. Il faut noter que dans les cas des Galounettes la température est 1,5°C inférieure à celles de St Johannès et les Pallagustis, alors que les forages sont proches de quelques dizaines de mètres. La température relevée pour l'Oeillal n'est pas représentative de la température réelle de la source, en effet la mesure n'a pas pu être réalisée à la sortie du griffon. De même la température de l'eau de l'étang de Sigean reflète l'influence de l'ensoleillement (prélèvement au mois de juillet et en bordure de l'étang).

## b) Les éléments majeurs

Le diagramme de Schoeller (Fig. 17) représente les concentrations en majeurs obtenues pour les 10 échantillons d'eau prélevés. Dans ce diagramme, se retrouvent les 3 groupes d'eau définis précédemment à partir de la conductivité et de la quantité en éléments solubles :

- Les eaux de l'environnement littoral de l'étang de Bages- Sigean (Groupe A, Fig. 18) aux compositions voisines
- Les eaux des calcaires karstifiés du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur (Groupe B, Fig.19)
- L'eau de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C, Fig. 19)

Le groupe A, à forte influence marine, présente des concentrations en chlorures comprises entre 36 et 710  $\text{mmol.l}^{-1}$  (Fig.18) tandis que les nitrates sont inexistantes. L'eau de l'étang de Bages-Sigean est la plus chargée en sodium et en chlorures, soit 617,4 et 710  $\text{mmol.l}^{-1}$ . Le moins chargé étant le piézomètre A, le plus éloigné de l'étang de Bages Sigean. Les prélèvements dans les piézomètres A, B et C ont été réalisés à faible profondeur (5 à 6 m), sachant que le sous sol est bien constitué de calcaires du Jurassique supérieur.

Le groupe B des eaux karstiques présente un a un faciès sulfato-calcosodique (Fig.19). Les concentrations en sodium varient entre 1,3 et 5,4  $\text{mmol.l}^{-1}$  pour ces eaux. Leurs concentrations en chlorures sont nettement inférieures à celles du groupe A, elles varient entre 1,1 et 6,1  $\text{mmol.l}^{-1}$ .

La nappe alluviale (Groupe C) montre les plus faibles concentrations en sodium et en chlorures, qui sont respectivement de 0,59 et 0,28  $\text{mmol.l}^{-1}$ .

La quantité de calcium dans les deux groupes A et B est assez proche, elle s'étale de 2,87 à 3,5  $\text{mmol.l}^{-1}$  pour le groupe B et de 1,5 à 12,72  $\text{mmol.l}^{-1}$  pour le groupe A, la plus forte concentration s'observe pour l'étang de Bages- Sigean.

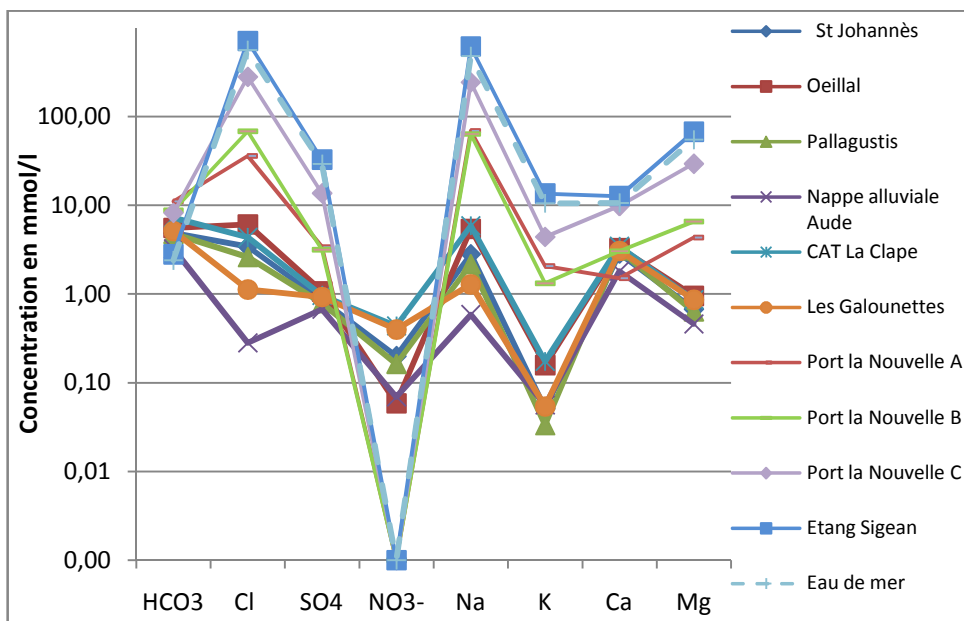


Figure 17: Diagramme de Schoeller pour l'ensemble des eaux étudiées de l'environnement narbonnais

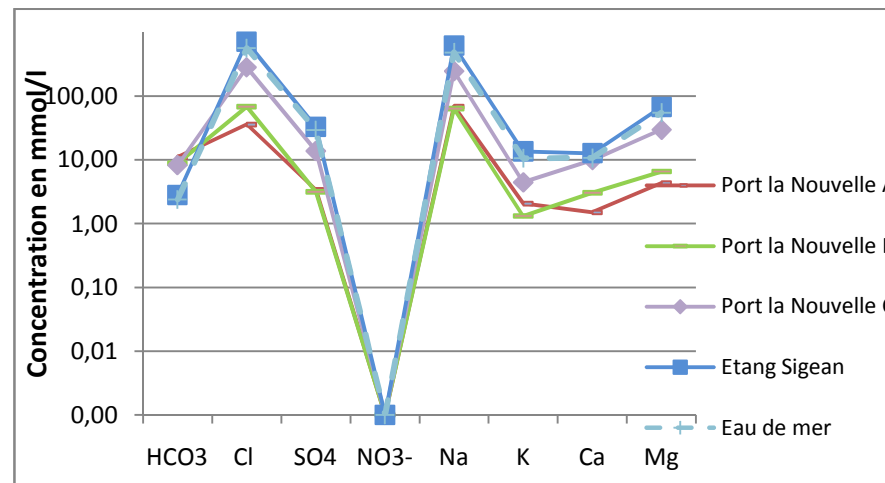


Figure 18: Diagramme de Schoeller pour les eaux du groupe A (influence marine forte)

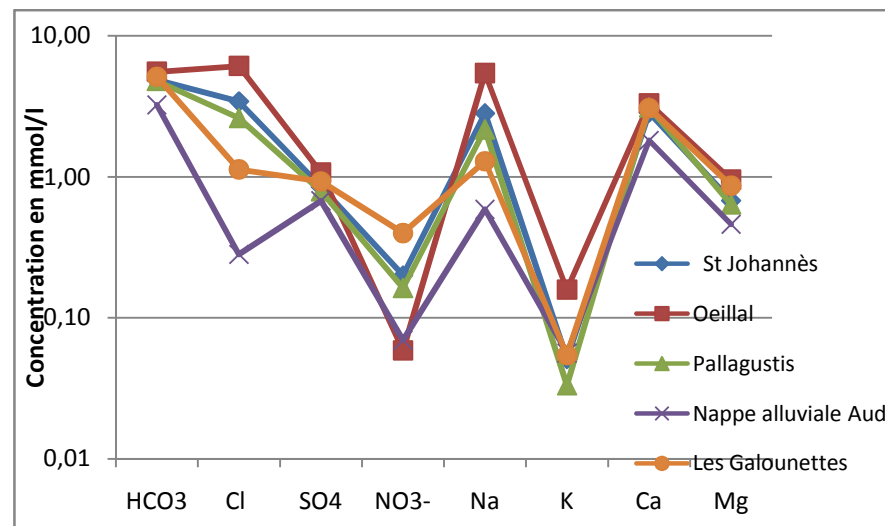


Figure 19: Diagramme de Schoeller pour le groupe B (eaux karstiques des calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur) et le « groupe » C de la nappe alluviale de l'Aude (pour comparaison)

c) Les éléments en traces

Les concentrations en brome varient de 0,3 à 0,75 mg.l<sup>-1</sup> pour les eaux karstiques narbonnaises, alors qu'elles sont 10 fois plus élevées pour les eaux sous influence marine du groupe B où elles atteignent jusqu'à 26,6 mg.l<sup>-1</sup> pour le piézomètre C, le plus près de l'étang de Bages-Sigean. L'eau de la nappe alluviale de l'Aude (dite Groupe C) est la moins concentrée, aussi bien pour le brome que pour le strontium, 0,1 et 0,256 mg.l<sup>-1</sup>.

**Tableau 4: Concentrations en éléments en traces (Br et Sr) pour les Groupes A et B, et la nappe alluviale de l'Aude**

Site	Nappe alluviale Aude	Les Galounettes	Les Pallagustis	St Johannès	La Clape	Oeillal	PN A	PN B	PN C	Etang Sigean
<b>Br (mg.l<sup>-1</sup>)</b>	0,1	0,3	0,3	0,4	0,5	0,75	6,53	7,51	26,6	82
<b>Sr (mg.l<sup>-1</sup>)</b>	0,256	0,314	0,340	0,407	0,307	0,687	0,730	1,50	4,93	9,68

d) La composition isotopique en strontium

Dans le groupe A, les eaux des 3 piézomètres de Port la Nouvelle présentent des rapports isotopiques <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr compris entre 0,70904 et 0,70908, en accord avec une forte influence marine. L'eau de l'étang de Bages-Sigean, prélevée non loin des 3 piézomètres de Port-la-Nouvelle, présente un rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de 0,70915 ±0,000003, identique à celui de l'eau de mer actuelle (de 0,70920 ±0,0001- Cf. Références dans Dennebouy, 2001).

Les rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr du groupe B des eaux karstiques sont systématiquement inférieurs à ceux du groupe A et varient entre 0,70840 (St Johannès) à 0,70869 (les Galounettes). Notons à ce propos que les rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de l'eau de mer du Jurassique supérieur et au Crétacé inférieur varient entre 0,7071 et 0,7078 (Dennebouy, 2001). Ces valeurs se retrouvent dans la phase carbonatée du même âge, d'un calcaire non affecté par la diagénèse. La présence de minéraux argileux dans le calcaire tendra à augmenter les rapports <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr des échantillons de roches totales de ce calcaire par rapport à celui de la phase carbonatée.

Il est probable que la valeur de 0,709010 du rapport <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr de l'eau de la nappe alluviale de l'Aude résulte d'un mélange entre le Sr issu du bassin versant du cours moyen et supérieur de l'Aude (>0,710), et du Sr du gypse oligocène présent en abondance dans le bassin versant du cours inférieur. Notons à ce propos les compositions isotopiques en Sr de l'eau de mer oligocène, comprises entre 0,70768 et 0,70834 (Dennebouy, 2001). Néanmoins, l'eau de la

nappe alluviale de l'Aude présente un rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  nettement plus élevé (0,70901) que celui du groupe B des eaux karstiques étudiées.

**Tableau 5: Données isotopiques en Sr obtenues au laboratoire GIS**

	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Erreur std 2 $\delta$
St Johannès	0,708401	0,000006
Oeillal	0,708854	0,000007
Pallagustis	0,708534	0,000006
Nappe alluviale- Aude	0,709010	0,000005
CAT La Clape	0,708428	0,000005
Les Galounettes	0,708696	0,000004
Port la nouvelle A	0,709084	0,000007
Port la nouvelle B	0,709073	0,000006
Port la nouvelle C	0,709044	0,000006
Etang Sigean	0,709152	0,000003

## V- Discussion

### A) Les éléments majeurs

Le report des données en éléments majeurs des eaux étudiées dans les diagrammes triangulaires (Ca/Mg/Na+K) et Cl/SO<sub>4</sub>/HCO<sub>3</sub>) des figures 20 et 21 est en très bon accord avec la distinction d'un Groupe A (eaux sous influence de l'eau de mer), d'un Groupe B (eaux karstiques peu ou pas contaminées par l'eau de mer) et d'un Groupe C (eau de la nappe alluviale de l'Aude).

La répartition des points dans ces diagrammes triangulaires, avec en addition le report des données antérieures sur les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer (Michel, 1995 ; Fig.22 et 23) suggèrent que les eaux karstiques de la zone narbonnaise sont plus ou moins mélangées avec l'eau de la nappe alluviale de l'Aude ; l'aquifère karstique des calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur serait donc connecté avec l'aquifère de la nappe alluviale de l'Aude, dans le cours inférieur de celle-ci. L'échantillon d'eau karstique de la villa des Galounettes paraît être le plus affecté par l'eau de la nappe alluviale. Inversement, l'échantillon de la source de l'Oeillal paraît être le moins affecté des eaux karstiques par la nappe alluviale, de plus une influence marine n'est pas à exclure pour cet échantillon. Rappelons à ce propos la présence de la mer en bordure du Montlaurés pendant les temps historiques (jusqu'au XIII<sup>ème</sup> siècle).

Ces diagrammes triangulaires mettent de nouveau en évidence la contamination par l'eau de mer via l'étang de Bages-Sigeon pour les eaux des trois piézomètres de Port-la-Nouvelle (Groupe A).

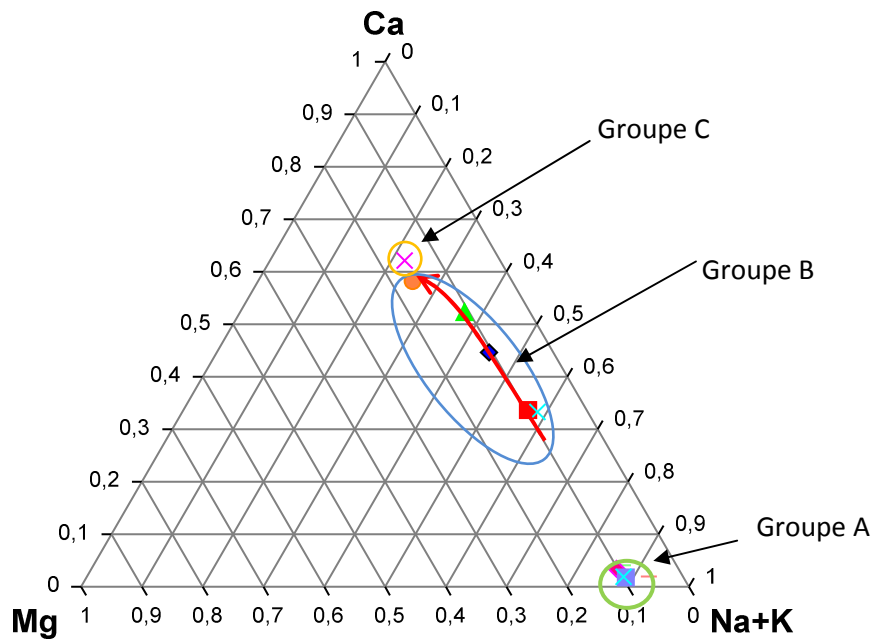


Figure 20: Diagramme Ca-Mg-Na+K à partir des concentrations en mmol.l-1, pour les eaux étudiées, avec distinction des Groupes A et B et de la nappe alluviale de l'Aude (Group C)

Légende :

- ◆ St Johannès
- Oeillal
- ▲ Pallagustis
- × Nappe alluviale Aude
- × CAT La Clape
- Les Galounettes
- Port la Nouvelle A
- Port la Nouvelle B
- ◆ Port la Nouvelle C
- Etang Sigean
- + Eau de mer

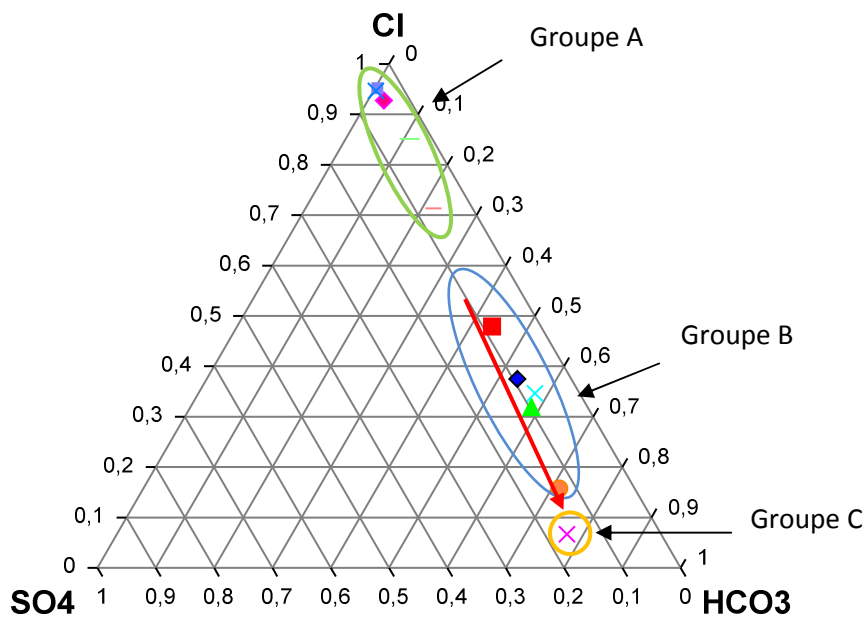


Figure 21: Diagramme Cl-SO4- HCO3- à partir des concentrations en mmol.l-1, pour les eaux étudiées, avec distinction des Groupes A et B et de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C)

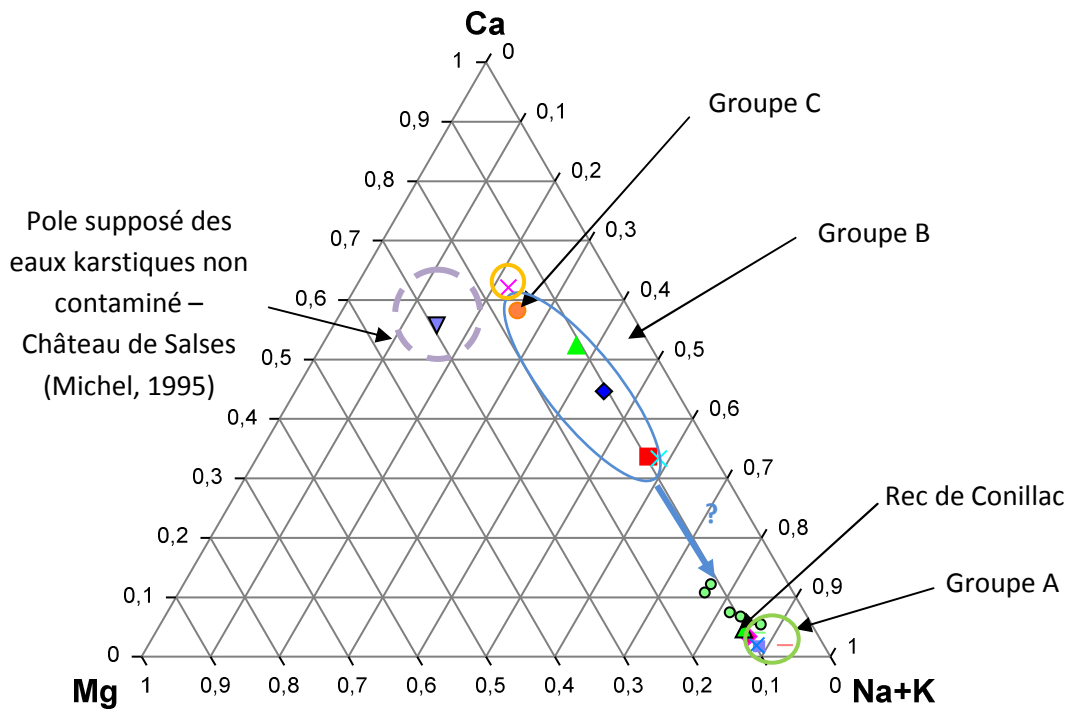


Figure 22: Diagramme Ca- Mg- Na+K de la Fig.20 avec report en addition des eaux karstiques du Crétacé inférieur contaminées par le biseau salé (Michel, 1995)

- Légende :
- ◆ St Johannès
  - Oeillal
  - ▲ Pallagustis
  - × Nappe alluviale Aude
  - × CAT La Clape
  - Les Galounettes
  - Port la Nouvelle A
  - Port la Nouvelle B
  - ◆ Port la Nouvelle C
  - Etang Sigean
  - + Eau de mer
  - ▲ Rec de Conillac n°48
  - × Salses Crét.inf n°18
  - Données O.Michel

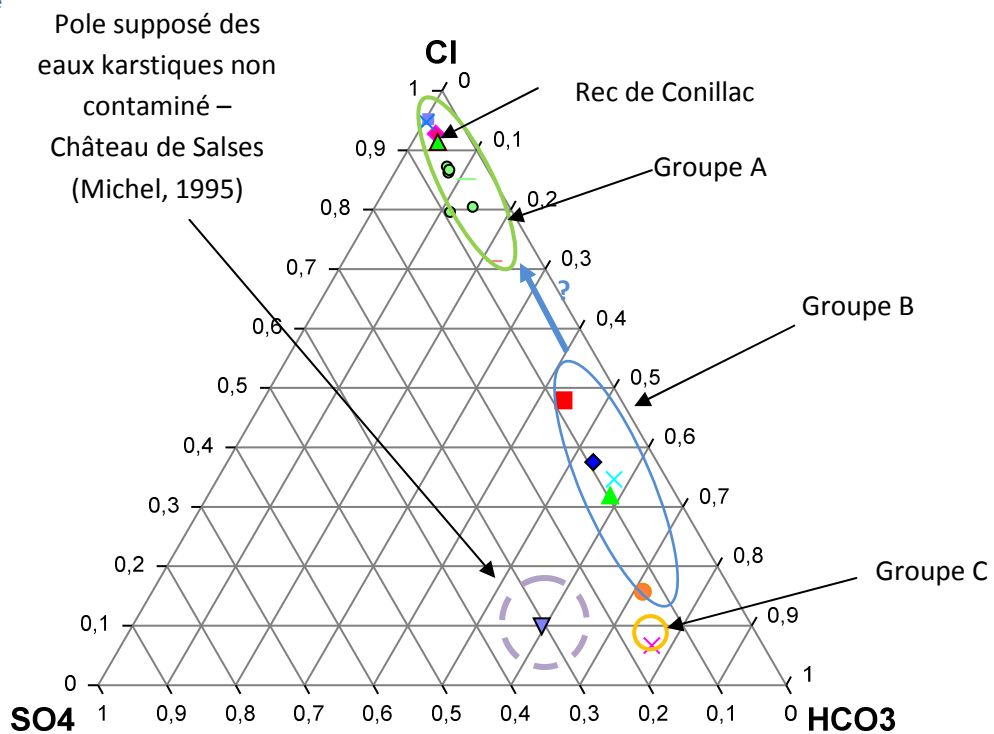
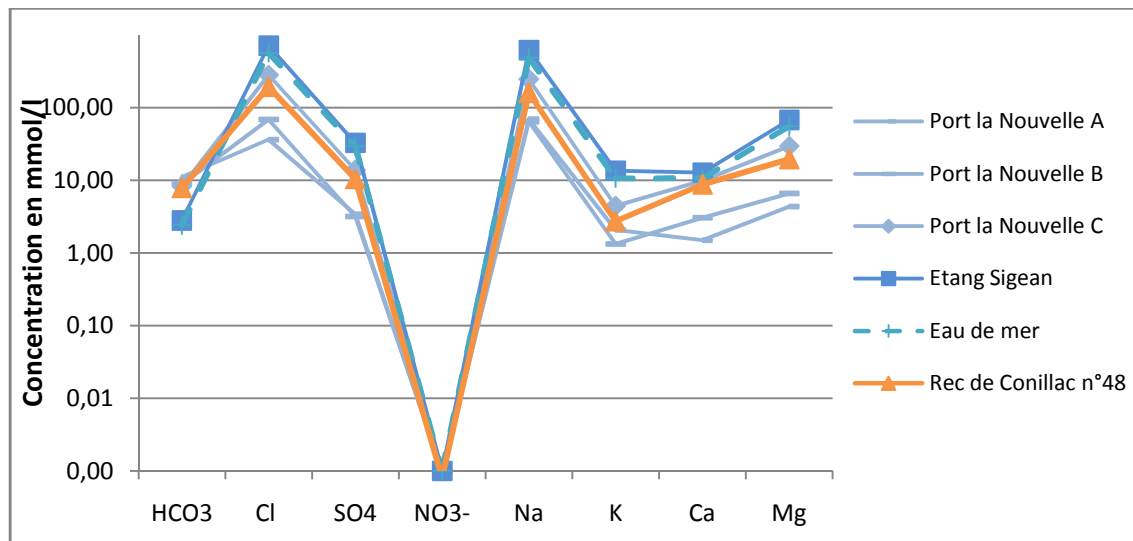


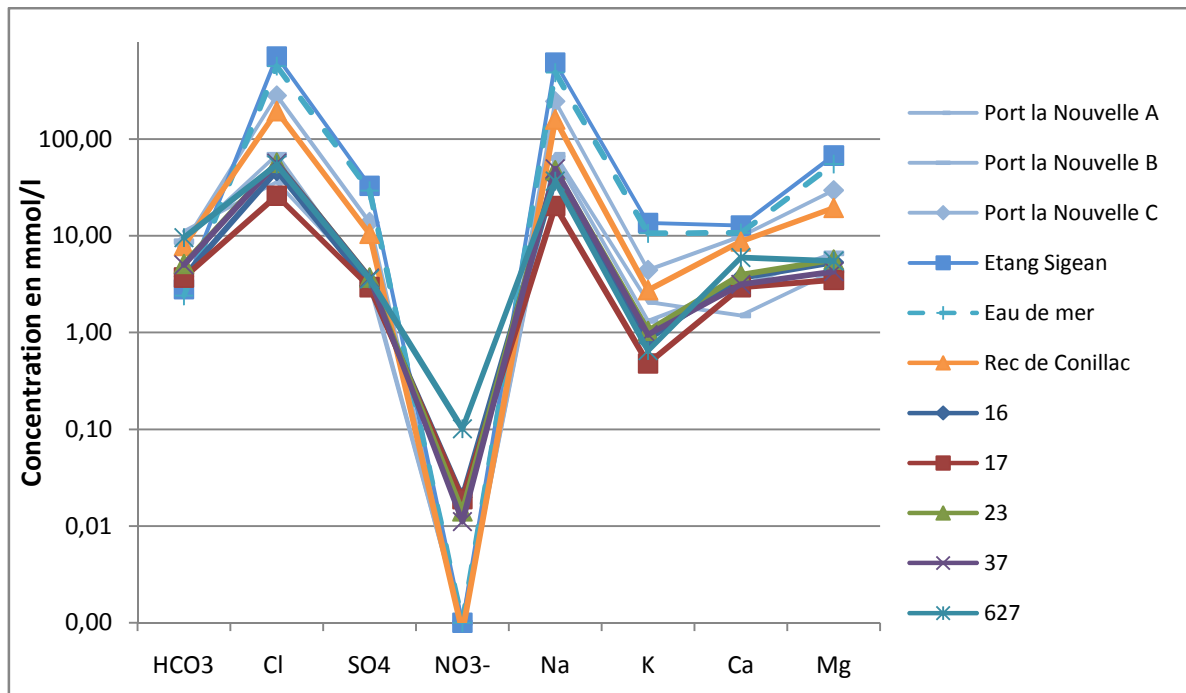
Figure 23 : Diagramme Cl-SO4- HCO3 de la Fig.21 avec report en addition des eaux karstiques du Crétacé inférieur contaminées par le biseau salé (Michel, 1995)

Le report dans le diagramme de Schoeller (Fig.24) des eaux du groupe A (PNA, PNB, PNC) de l'eau de mer et de l'eau de l'étang de Bages- Sigean définit un domaine spécifique dans lequel se place l'eau du Rec de Conillac (Michel, 1995), typique d'une eau karstique de l'environnement narbonnais, dans les calcaires du Jurassique supérieur – Crétacé inférieur fortement contaminé par l'eau de mer biseau salé. Rappelons que l'échantillon du Rec de Conillac a été prélevé au Sud Ouest du Massif de La Clape, non loin de l'étang de Bages-Sigean.



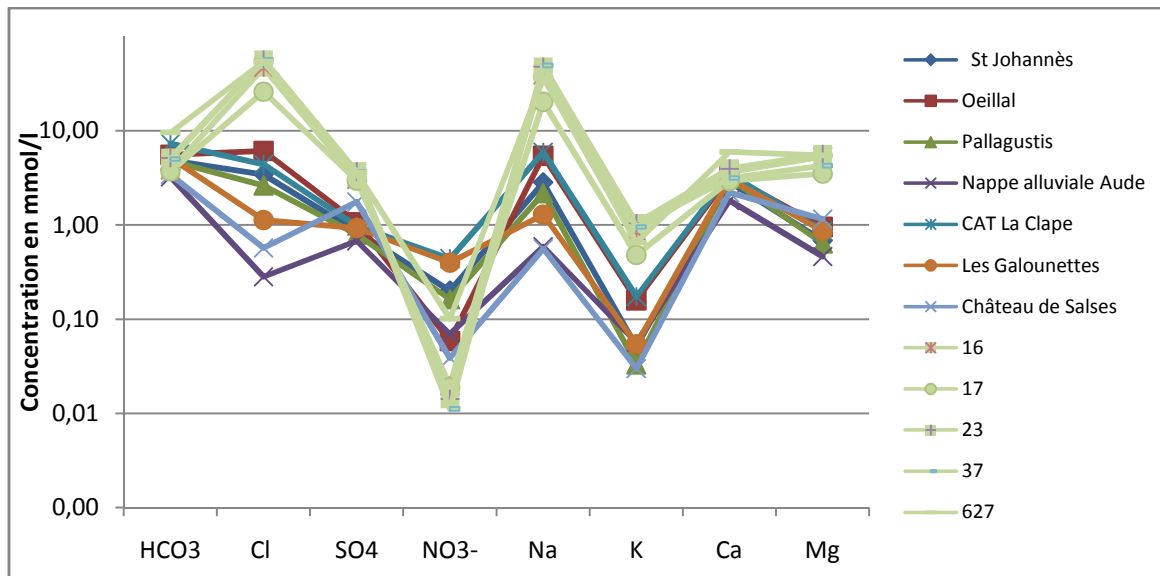
**Figure 24: Domaine des eaux du Groupe A, y compris l'eau de l'étang de Bages-Sigean et l'eau de mer dans le diagramme de Schoeller. Pour comparaison, est également figurée l'eau karstique du Rec de Conillac contaminée par l'eau de mer du biseau salé**

Les travaux de Michel (1995) ont porté, entre autres, sur les eaux karstiques dans les calcaires du Crétacé inférieur contaminées par l'eau de mer du biseau salé dans l'environnement de Perpignan (Fig.25). Leur report dans le diagramme de Schoeller, avec en comparaison les eaux du Groupe A sont en bon accord avec l'hypothèse d'un mélange eau karstique- eau de mer pour l'ensemble de ces eaux entre deux pôles celui de l'eau de mer (assimilable à l'eau de l'étang de Bages-Sigean) et celui de l'eau de la source du Château de Salses considéré par Michel (1995) comme non contaminée par l'eau de mer.



**Figure 25: Domaine des eaux du Groupe A, y compris l'eau de l'étang de Bages-Sigean et l'eau de mer dans le diagramme de Schoeller. Pour comparaison, est également figurée les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan et le Rec de Conillac (Michel, 1995)**

Le report des données des eaux du groupe B dans le diagramme de Schoeller (Fig 26) permet de distinguer ces eaux, comme dans le diagramme triangulaire de celles fortement contaminées par l'eau de mer (Port La Nouvelle, Rec de Conillac, Eaux littorales de l'environnement de Perpignan). On note de nouveau que la source de l'Oeillal présente le plus de caractéristiques d'une faible contamination par l'eau de mer. Pour ces eaux du groupe B le report des données dans le diagramme de Schoeller, suppose des eaux d'origine karstique (représenté par le pole pur du Château de Salses) évoluant par mélange d'une part avec l'eau de la nappe alluviale de l'Aude et d'autre part avec l'eau de mer.

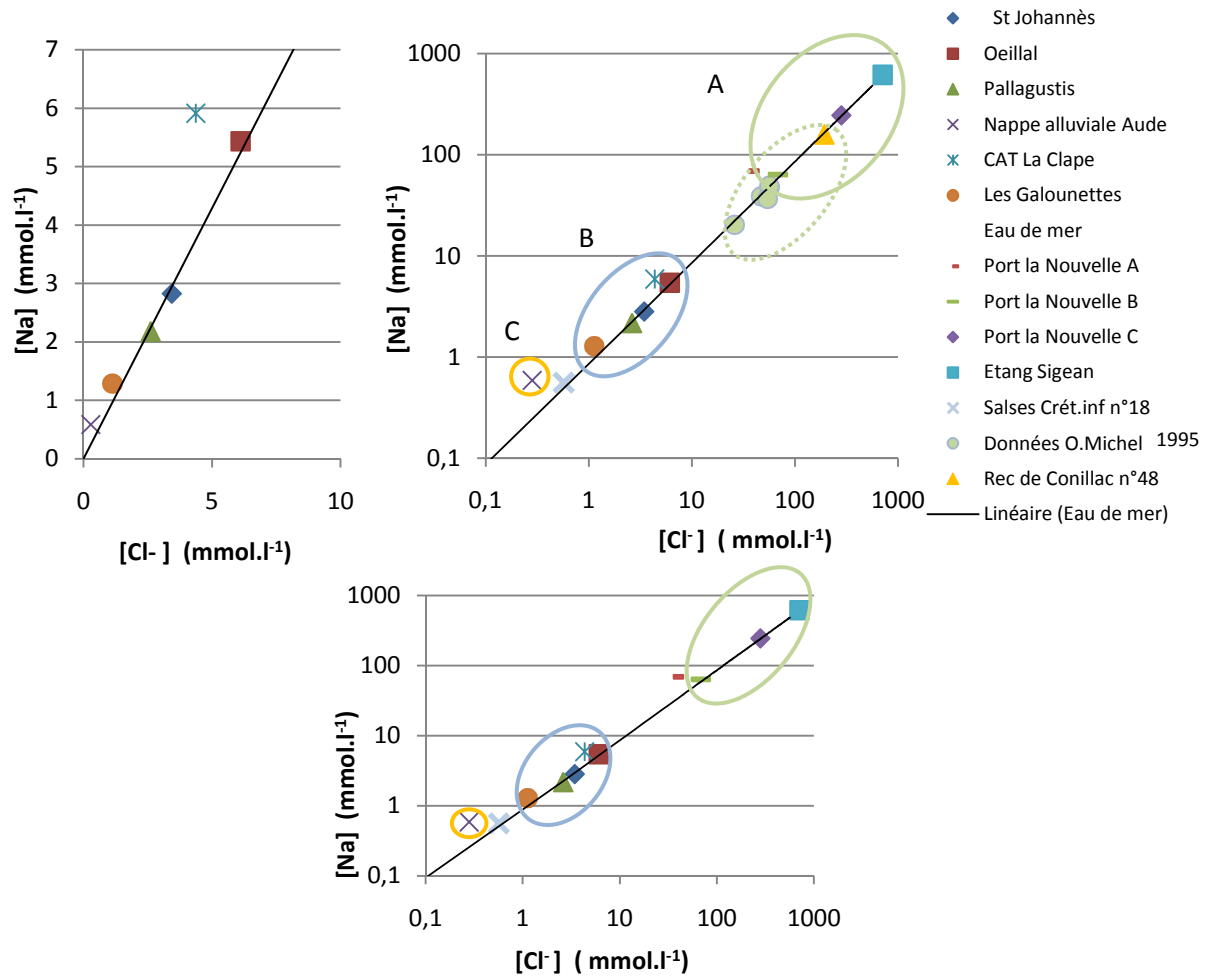


**Figure 26: Domaine des eaux du Groupe B et de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C). Pour comparaison, est également figurée les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan et le Château de Salses (pôle supposé non-contaminé par l'eau de mer) (Michel, 1995)**

Malgré des compositions en majeurs similaires, la figure 27 paraît montrer un enrichissement des eaux en chlorures et en sodium par rapport au pôle crétacé inférieur non contaminé, les eaux de l'Oeillal et du CAT la Clape étant les plus affectées.

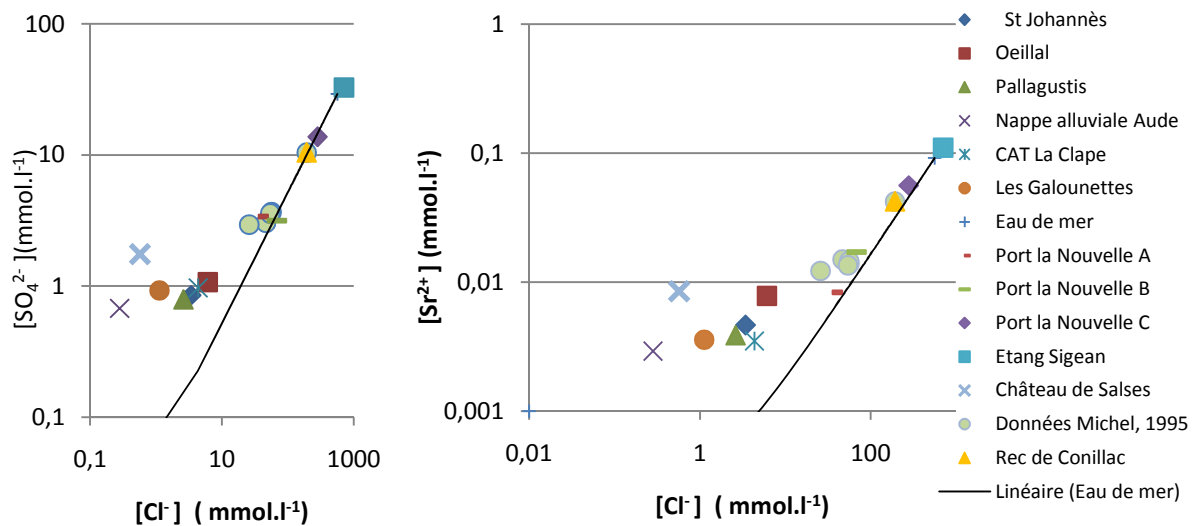
Le diagramme binaire [Na] vs [Cl] (Fig. 27) confirme le processus de contamination par l'eau de mer, très accentué pour les eaux du Groupe A (piézomètres de Port La Nouvelle). Ce processus affecte mais plus faiblement les eaux du Groupe B de l'environnement narbonnais, parmi celle-ci, l'eau de la source de l'Oeillal, présente le plus fort indice de contamination. On note également, qu'une très faible influence de la mer n'est pas exclue pour l'eau de la nappe alluviale de l'Aude et pour le Château de Salses considéré comme représentant le pôle pur des eaux karstiques selon Michel (1995).

On observe une évolution vers le pôle marin depuis nappe alluviale de l'Aude jusqu'à la source de l'Oeillal. La nappe alluviale de l'Aude semble subir également cette influence, mais il reste à déterminer si cette faible contamination est ancienne ou récente. Comme exposé précédemment (cf. Partie Ic), la remontée de la mer s'est faite récemment jusque dans l'emplacement de l'ancienne plaine alluviale de l'Aude



**Figure 27: Diagrammes binaires [Na] vs [Cl] pour les trois groupes A, B et C avec pour comparaison la droite de dilution de l'eau de mer et les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan (MICHEL, 1995)**

Toutefois compte tenu de l'environnement géologique particulier du secteur narbonnais où affleurent des évaporites oligocènes (gypse anhydrite et soufre exploité antérieurement à Portel et Malvés) l'hypothèse d'une simple contamination par l'eau de mer devra être confirmée à la fois par le rapport  $[Br]/[Cl]$  et  $[SO_4]/[Cl]$ , traceur pertinent des environnements évaporitiques, et par les diagrammes de mélange ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) vs  $(1/[Sr])$ .



**Figure 28: Diagrammes binaires  $[SO_4]/[Cl]$  et  $[Sr]/[Cl]$  pour les trois groupes A, B et C avec pour comparaison la droite de dilution de l'eau de mer et les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan (Michel, 1995)**

Le report des données dans les deux diagrammes binaires  $[SO_4]/[Cl]$  et  $[Sr]/[Cl]$  permet de discriminer entre une simple contamination par l'eau de mer et la double influence de l'eau de mer et des évaporites oligocènes présentes à l'affleurement dans le bassin versant du cours inférieur de l'Aude.

Dans ces deux diagrammes, la contamination par l'eau de mer se confirme à la fois pour les eaux du Groupe A et pour la plupart des eaux karstiques de l'environnement de Perpignan (Michel, 1995) avec des points s'alignant sur la droite de dilution de l'eau de mer.

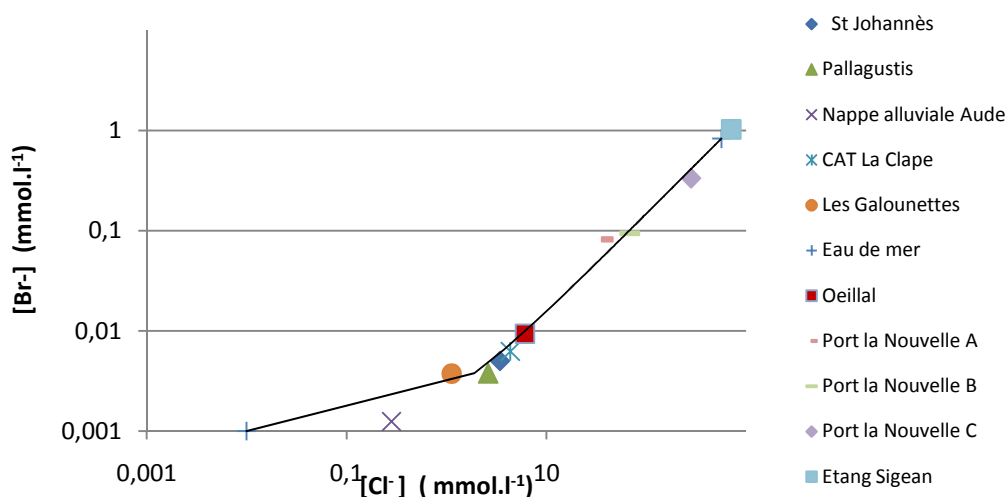
Par contre un enrichissement à la fois en sulfates et en strontium, par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer caractérise les eaux karstiques narbonnaises, suggérant une interaction avec des évaporites, cette interaction s'observe également, pour la nappe alluviale du cours inférieur de l'Aude, ce qui est cohérent avec la présence massive de gypse anciennement exploité dans la zone de Malvesi, à proximité du Montlaurès. Ces données suggèrent que l'interaction avec les évaporites oligocènes résultant du mélange des eaux karstiques avec celle de la nappe alluviale de l'Aude. L'enrichissement en Sr et  $SO_4$  de l'eau karstique du château de Salses est à mettre en relation avec la présence proches de marnes albiennes ou triasiques renfermant des évaporites (gypse).

## B) Les éléments en traces

Le rapport Br/Cl est souvent utilisé pour discriminer une eau ayant été en contact avec des évaporites, d'une eau correspondant à un mélange avec l'eau de mer (Hébrard et al, 2006). Dans le cas d'une intrusion de l'eau de mer dans l'aquifère, le rapport molaire Br/Cl reste similaire à celui de l'eau de mer : 1.5 à 1.7‰ (El Achheb, 2001), 1.54 ‰ (Marjoua, 1995). Les eaux contaminées par les évaporites ont des rapports oscillant entre 0,7 et 1,2 ‰ (Blavoux, 2003)

**Tableau 6: Rapport Br/Cl en mmol/mmol pour les 10 points d'échantillonnage de l'étude**

Site	St Johannès	Oeillal	Pallagustis	Nappe alluviale de l'Aude	CAT La Clape	Les Galounettes	PNA	PNB	PNC	Etang Sigean	Eau de mer
<b>Br/Cl (mmol/mmol)</b>	0,00146	0,00153	0,00143	0,00444	0,00143	0,00333	0,00227	0,00137	0,00118	0,00145	0,0015



**Figure 29: Rapport Br/Cl pour les eaux étudiées accompagnées de la droite de dilution de l'eau de mer**

Dans le cas de l'étude des eaux souterraines, les points se positionnent le long de la droite de dilution de l'eau de mer, suggérant ainsi une contamination marine (Fig. 29). Notons que la nappe alluviale de l'Aude et l'eau des Galounettes, sont très proches dans les diagrammes précédents, présentent une anomalie en brome. Les problèmes dans l'analyse des concentrations en Br (Annexe 3) des échantillons empêchent de distinguer une influence évaporitique dans cet ensemble d'échantillons d'eau sur la base du rapport Cl/Br.

### C) Les isotopes du strontium

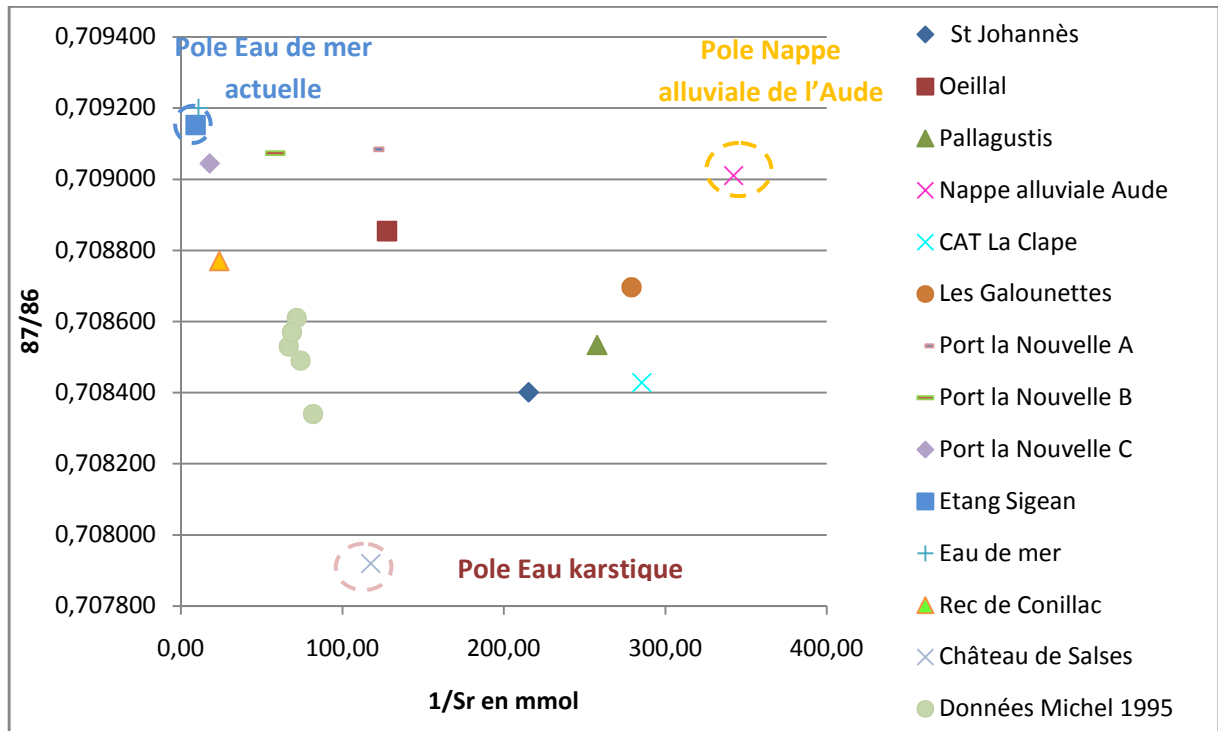


Figure 30: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) de l'ensemble des données acquises sur les eaux littorales des régions de Narbonne (celle de l'étude) et de Perpignan (Michel, 1995). Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique et Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés

Les données acquises lors de cette étude, et lors de celle de Michel (1995) sont reportées dans le diagramme de mélange  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  en fonction de  $1/[\text{Sr}]$  où un mélange binaire d'eau se présente sous la forme d'un segment de droite (Faure 1986).

## Groupe A

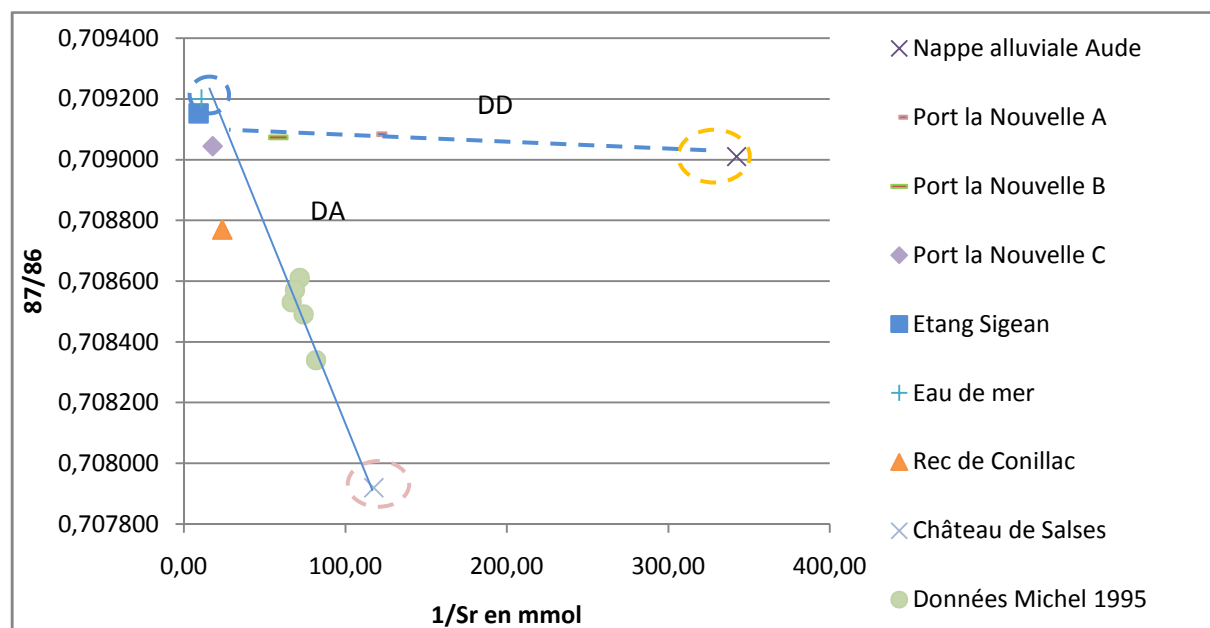


Figure 31: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) des données acquises sur les eaux littorales de Port la Nouvelle et de Perpignan (Michel,1995), ainsi que la nappe alluviale de l'Aude. Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique et Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés

Les données du Groupe A et des 3 pôles de mélange supposés, d'après les éléments majeurs, sont reportés dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) (Fig. 30 et 31).

Le mélange binaire simple eau karstique- eau de mer est confirmé dans ce diagramme pour les eaux du littoral perpignanais, les points se plaçant sur une droite de mélange (DA) joignant le pôle « Eau karstique » au pôle « Eau de mer actuelle ». Les eaux du piézomètre PNC et de l'étang de Bages-Sigean se placent sur la même droite de contamination. En ce qui concerne les 2 autres piézomètres PNA et PNB le déplacement de leurs points représentatifs vers la droite à partir de la droite de contamination DA et du point PNC (piézomètre situé au plus près de l'étang) suggère un processus secondaire de dilution par soit des eaux météoriques soit plus vraisemblablement de l'eau d'arrosage (espaces verts) qui correspondrait à l'eau d'alimentation des communes de Narbonne et de celle de Port La Nouvelle (ie. de la nappe alluviale du cours inférieur de l'Aude). Cet effet de dilution anthropique est représenté par la droite en tiretés DD dans la figure 31.

## Groupe B

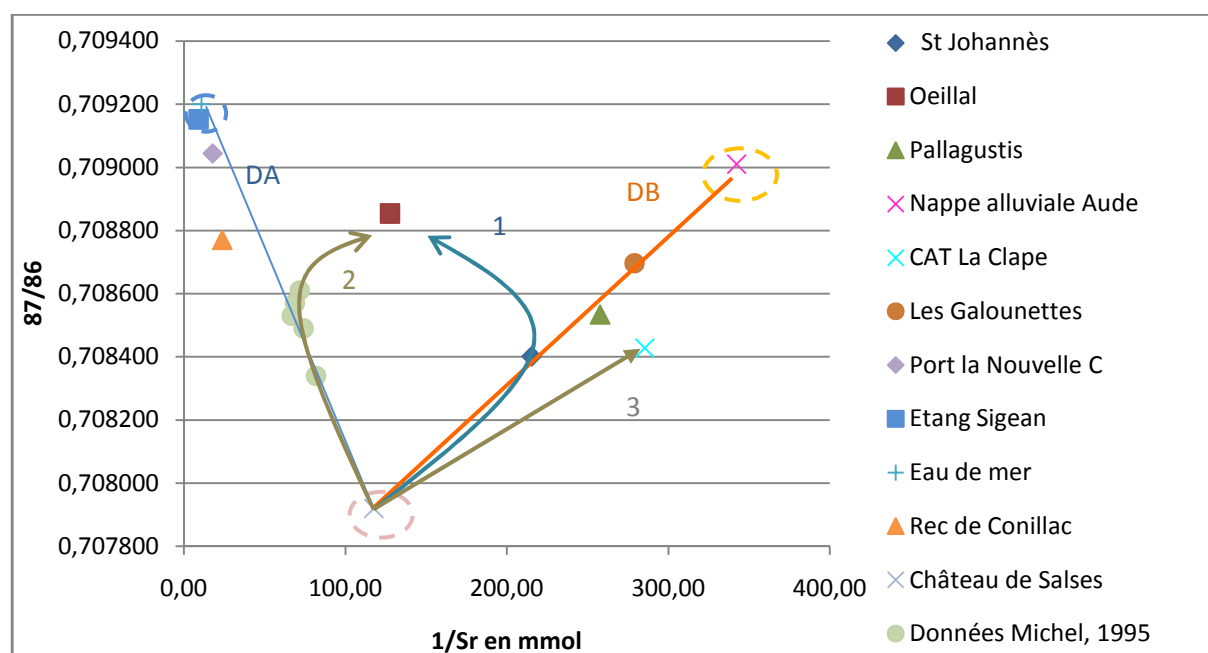


Figure 32: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) de données du Groupe B et C acquises sur les eaux littorales des régions de Narbonne (celle de l'étude) et de Perpignan (Michel, 1995). Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique du Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés

Les données du Groupe B et des 3 pôles de mélange supposés d'après les éléments majeurs sont reportés (Fig. 30 et 32) dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ).

Dans ce diagramme, les points de 3 eaux karstiques (Galounettes, St Johannès et Pallagustis) définissent un bon alignement (DB) passant par le pôle de la nappe alluviale de l'Aude et le pôle supposé pur des eaux karstiques (Château de Salses) défini par Michel (1995). La droite DB confirme bien les observations précédentes de connexions entre l'aquifère karstique des calcaires du Jurassique supérieur – Crétacé inférieur et celui de la nappe alluviale de l'Aude. Rappelons que ce pôle de la nappe alluviale porte la marque d'interaction avec les évaporites oligocènes affleurant dans le bassin versant du cours inférieur de l'Aude (cf.  $[\text{SO}_4]/[\text{Cl}]$ ,  $[\text{Sr}]/[\text{Cl}]$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $[\text{Br}]/[\text{Cl}]$ ).

Il reste enfin à examiner les cas particuliers des eaux de la source de l'Oeillal et du captage du CAT La Clape dont les points se répartissent de part et d'autre de la droite DB dans ce diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ). En ce qui concerne la source d'Oeillal, rappelons que dans tous les diagrammes antérieurs (triangulaires, Schoeller, binaire  $[\text{SO}_4]/[\text{Cl}]$ ,  $[\text{Na}]/[\text{Cl}]$ ,  $[\text{Sr}]/[\text{Cl}]$ ) l'eau de cette source est parmi les eaux karstiques narbonnaises, celle qui se rapproche le plus des eaux karstiques perpignanaises contaminées par l'eau de mer. La localisation de

l'échantillon Oeillal dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) suppose que cette eau karstique présente la double influence marine de l'eau de mer actuelle ou récente et la nappe alluviale de l'Aude. Cette double influence est cohérente avec le contexte hydrogéologique très particulier de cette résurgence localisée à la fois à la limite du horst du Montlaurés, émergeant de la plaine alluviale de l'Aude (Fig. 1a), et à la limite Nord de l'avancée de la mer Méditerranée aux temps historiques (du Ier au XIIIème siècle). A partir du pôle supposé des eaux karstiques, l'évolution de l'eau de la résurgence de l'Oeillal a pu se faire dans un domaine limité par les courbes 1 et 2.

Pour l'eau du captage du CAT de La Clape en bordure du lido, à titre d'hypothèse il est proposé un chemin d'évolution de type 3 pour l'eau. Cette évolution suppose dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) que l'un des deux pôles « eau karstique » et « eau de la nappe alluviale » ne sont pas simplement défini respectivement par un point, mais par des domaines présentant des compositions isotopiques respectives de l'ordre de 0,7079 et 0,709 et des variations de concentration en Sr (Fig. 33). Une telle répartition a été bien observée pour les eaux de l'aquifère des calcaires oxfordiens étudiées systématiquement dans l'environnement du laboratoire souterrain de Meuse / Haute Marne (Giannesini, 2006).

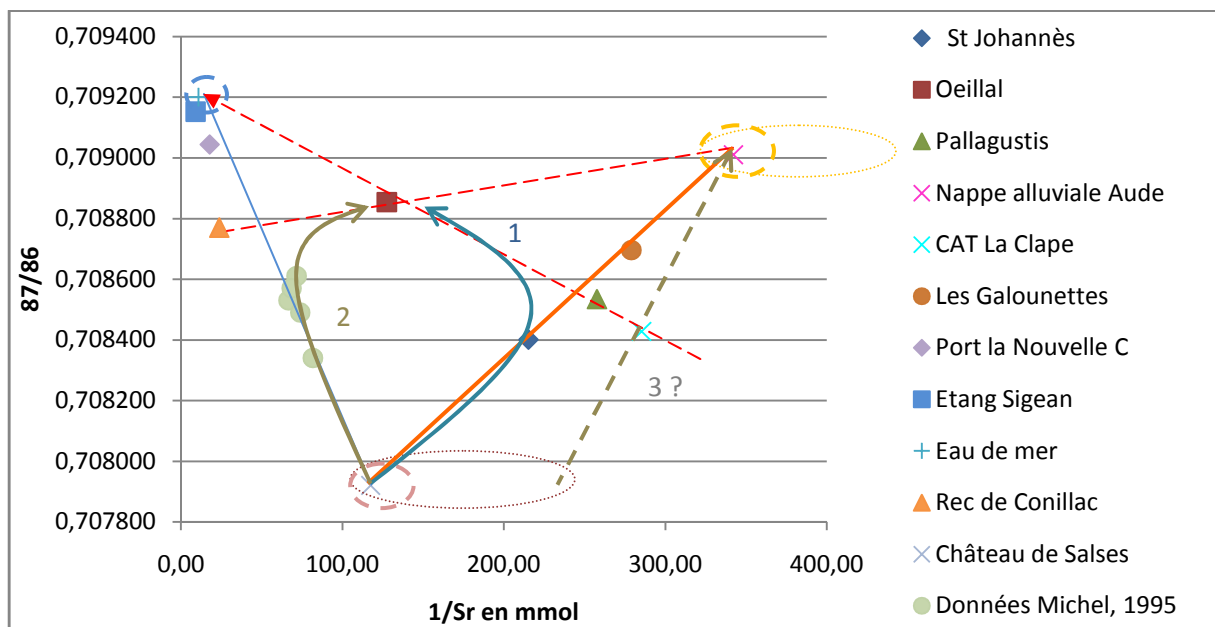
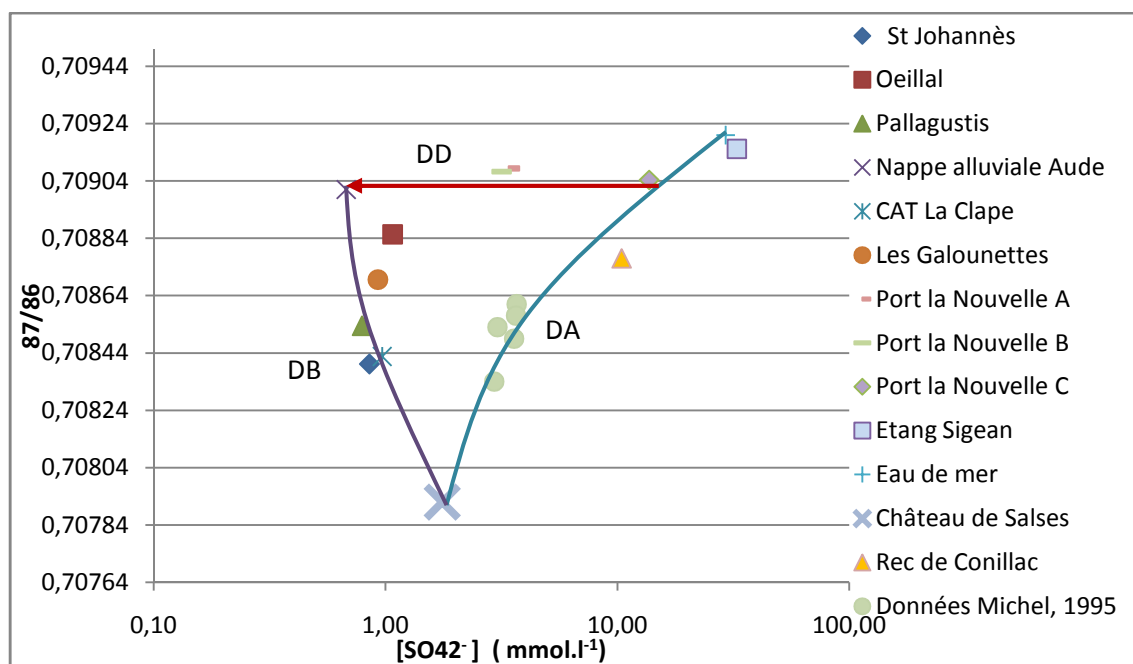


Figure 33: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) de données du Groupe B et C acquises pendant l'étude et de Perpignan (Michel,1995), accompagnées des droites de mélanges supposés.



**Figure 34: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs  $[\text{SO}_4]$  de données du Groupe A, B et C acquises pendant l'étude et de Perpignan (Michel, 1995), accompagnées des droites de mélanges supposés.**

Les données des trois groupes (A, B et C) des 3 pôles de mélange supposés d'après les éléments majeurs sont reportés (Fig. 34) dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs  $[\text{SO}_4]$ .

Dans ce diagramme, les points des eaux karstiques de la région narbonnaise (Galounettes, St Johannès, Pallagustis, l'Oeillal) et le CAT du Massif de La Clape définissent une courbe de mélange (DB) passant par le pôle de la nappe alluviale de l'Aude et le pôle supposé pur des eaux karstiques (Château de Salses) défini par Michel (1995). De la même façon, les points des eaux étudiées par Michel (1995), du Nec de Conillac, du piézomètre PNC et de l'étang de Sigean-Bages se placent sur une courbe de mélange (DA) passant par le pôle supposé pur des eaux karstiques pour rejoindre celui de l'eau de mer actuelle.

Dans le cas des 2 piézomètres PNA et PN,B le déplacement de leurs points représentatifs vers la gauche à partir de la courbe DA et du point PNC (piézomètre situé au plus près de l'étang) montre une nouvelle fois la possibilité d'un processus secondaire de dilution par des eaux météoriques ou de l'eau d'arrosage (eau d'alimentation de la nappe alluviale du cours inférieur de l'Aude). Cet effet de dilution anthropique entre 2 pôles de compositions isotopiques en Sr voisines pour des teneurs en  $\text{SO}_4$  différentes est représenté par la droite DD dans la figure 34. Le diagramme de la figure 34 justifie l'hypothèse du double mélange eau karstique-eau de mer et eau karstique- nappe alluviale de l'Aude.

## VI- Conclusions et perspectives de l'étude

Les eaux de la région narbonnaise se répartissent en trois groupes distincts, dont les pôles de mélange sont la nappe alluviale de l'Aude, les eaux karstiques non contaminées (Château de Salses) et le pôle marin (Etang de Sigean- Eau de mer). Le premier, le groupe A concerne les eaux de Port la Nouvelle, où l'eau karstique est très influencée par l'étang de Bages-Sigean voisin. Le groupe B est divisé en deux sous groupes :

- Les Galounettes, les Pallagustis, St Johannès sont des eaux du pôle Crétacé inférieur influencées par la nappe alluviale de l'Aude
- L'Oeillal résulte d'un double mélange entre la nappe alluviale de l'Aude et l'eau de mer.

La nappe alluviale de l'Aude représente le groupe C, elle subit également une influence saline, dont l'origine reste à déterminer qui peut être une origine marine actuelle ou ancienne, ou la résultante de la dissolution des évaporites de l'Oligocène, affleurant sous forme de gypse dans le bassin versant du cours inférieur de l'Aude

Pour compléter l'étude, il est nécessaire de confirmer les 2 modèles de mélange proposés dans ce rapport, en validant:

- le pôle des eaux de l'aquifère karstique Jurassique supérieur – Crétacé inférieur, non contaminé par l'eau de mer ou par la nappe alluviale de l'Aude. Il s'agira de trouver 3 ou 4 sources ou captages répondant aux critères précédents et situés de préférence entre Perpignan et Narbonne,
- le pôle des eaux de la nappe alluviale de l'Aude dans son cours inférieur ; 4 captages ont déjà été repérés pour ces analyses complémentaires de validation devront être étudiées
- les évaporites oligocènes via l'analyse du Sr et en  $\delta^{34}\text{S}$  du gypse oligocène et d'eau prélevée dans des piézomètres au niveau des marnes oligocènes à gypse. Des analyses en  $\delta^{34}\text{S}$  complémentaires devront porter sur les eaux karstiques et la nappe alluviale narbonnaise.

- L'évolution de la composition isotopique en Sr des eaux de l'Aude en 6 points du cours supérieur et cours inférieur et ce en fonction de la géologie locale du bassin versant.

Les données acquises sur l'aquifère karstique devront être complétées en échantillonnant :

des sources et des captages du secteur narbonnais, n'ayant pas fait l'objet de prélèvement en 2008, tels que la source de l'Œil Doux dans le massif de La Clape, et le Rec de Conillac

de nouveau les sources et les captages prélevés en mai et juillet 2008 et ce, après l'épisode de forte pluviosité de septembre (vers octobre – novembre 2008).

## Bibliographie

- AMBERT. P 1993, *Preuves géologiques de l'insularité du massif de la Clape (Aude) pendant la transgression flandrienne*, C. R. Académie des Sciences Paris, t316, Série II, p. 237-244.
- APPELO C.A.J, POSTMA D.1996, *Geochemistry, groundwater and pollution*, A.A.Balkema, Rotterdam. 3<sup>ème</sup> édition. 536p.
- AQUILINA. L, LADOCHE. B, DOERFLIGER N., SEIDEL J.L., BAKALOWICZ M., DUPUY C., LE STRAT P.. 2002, *Origin, evolution and residence time of saline thermal fluids (Balaruc springs, southern France): implications for fluid transfer across the continental shelf*, Chemical geology 192 (2002) 1-21.
- BLAVOUX, B, GILLI E., ROUSSET C.. 2003, *Alimentation et origine de la salinité de la source sous-marine de Port-Miou (Marseille–Cassis). Principale émergence d'un réseau karstique hérité du Messinien*, Géoscience
- BOUSQUET, JC 1997, *Géologie du Languedoc Roussillon*, BRGM éditions, Montpellier. 2<sup>ème</sup> édition. 142p.
- DENNEBOUY. S 2001, *Mise en évidence et caractérisation de la variabilité haute fréquence du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$* . Thèse de Doctorat « Dynamique et Ressources des Bassins Sédimentaires », Ecole des Mines de Paris, 202 p
- EL ACHHEB A., MANIA J., MUDRY J. 2001, *Processus de salinisation des eaux souterraines dans le bassin Sahel-Doukkala (Maroc occidental)*. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers.
- FAURE G., 1986, *Principals of isotope geology*. Wiley text Book, 1986, 2 editions, 608 p.
- GIANNESINI, 2006, *Géochimies isotopiques couplées des eaux des formations argileuses et calcaires du site Andra du site Meuse/ Haute-Marne*, Université Aix Marseille III, 277p.
- HEBRARD O, PISTRE S, CHEYNET N., DAZY J., BATIOU-GUILHE C.,SEIDEL JL. 2006. *Origine des eaux des émergences karstiques chlorurées du Languedoc-Roussillon*, Géoscience,.
- MARJOUA A., 1995, *Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc) : origine de la salinisation des eaux*. Doct. Univ.Paris 6, 102p.
- MICHEL. O 1995, *Origine des eaux et des interactions eaux roches en domaine littoral et de l'arrière pays languedocien, par le traçage isotopique du strontium naturel. Comparaison avec les données sur les éléments majeurs*. Rapport de DEA Tectonique- Géophysique- Géochimie- Hydrogéologie, Université Montpellier II, 45p.
- PIN C. 2003, *Precise determination of Rb, Sr, Ba, and Pb in geological materials by isotope dilution and ICP-quadrupole mass spectrometry following selective separation of the analytes*. Jaas.

## Listes des figures

Figure 1a : Répartition des points de prélèvements d'eau de l'étude-Extraits des cartes géologiques de Narbonne et de Béziers au 1/50000- Image Géoportail .....	6
Figure 2: Photographie satellite de la région narbonnaise et du Sud du département de l'Hérault- Géoportail 2008- Echelle 1/420000.....	8
Figure 3: Photographie du Gouffre de l'Œil Doux, qui n'a pu être échantillonné lors de cette étude - Données personnelles .....	11
Figure 4: Illustration du recul de la mer pendant le Würm- Bousquet, 2006 .....	11
Figure 5: Les changements du rivage près de Narbonne pendant la période historique- Bousquet 2006.....	12
Figure 6: Photographie de perforations de Pholades dans les calcaires du Jurassique supérieur à la base du Montlaurés témoignant de la présence récente de la mer (entre le I <sup>er</sup> et le XIII <sup>ème</sup> siècle) - Données personnelles .....	12
Figure 7: Localisation des points de prélèvement de la plaine alluviale de l'Aude, du horst du Montlaurés et de l'arrière pays narbonnais- Echelle : 1/88000 – Extrait de la carte géologique de Béziers au 1/50000.....	13
Figure 8: Localisation du forage du CAT La Clape à Narbonne plage et du Rec de Conillac au Nord de l'étang de Campagnol- Extrait de la carte géologique de Narbonne au 1/50000.....	14
Figure 9: Extrait de la carte géologique de Narbonne au 1/50000 avec la localisation des points de prélèvements à Port La Nouvelle- Source: BRGM- Echelle 1/51500.....	15
Figure 10: Photographie du Kit d'alcalinité HACH.....	16
Figure 11: Schéma d'une micro-colonne échangeuse d'ion .....	20
Figure 12 : Exemple de filaments au rhénium sur son porte filament.....	21
Figure 13: Schéma du spectromètre de masse Triton TI- (Manuel Triton TI Electron Finnigan) .....	22
Figure 14: Photographie du spectromètre de masse TRITON T1 du Laboratoire GIS- Donnée personnelle.....	22
Figure 15: Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$ des eaux prélevées .....	25
Figure 16: Représentation graphique des températures des eaux échantillonnées .....	26
Figure 17: Diagramme de Schoeller pour l'ensemble des eaux étudiées de l'environnement narbonnais.....	28
Figure 18: Diagramme de Schoeller pour les eaux du groupe A (influence marine forte) .....	28

Figure 19: Diagramme de Schoeller pour le groupe B (eaux karstiques des calcaires du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur) et le « groupe » C de la nappe alluviale de l'Aude (pour comparaison).....	28
Figure 20: Diagramme Ca-Mg-Na+K à partir des concentrations en mmol.l-1, pour les eaux étudiées, avec distinction des Groupes A et B et de la nappe alluviale de l'Aude (Group C).....	32
Figure 21: Diagramme Cl-SO4- HCO3- à partir des concentrations en mmol.l-1 , pour les eaux étudiées, avec distinction des Groupes A et B et de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C) .....	32
Figure 22: Diagramme Ca- Mg- Na+K de la Fig.20 avec report en addition des eaux karstiques du Crétacé inférieur contaminées par le biseau salé (Michel, 1995).....	33
Figure 23 : Diagramme Cl-SO4- HCO3 de la Fig.21 avec report en addition des eaux karstiques du Crétacé inférieur contaminées par le biseau salé (Michel, 1995).....	33
Figure 24: Domaine des eaux du Groupe A, y compris l'eau de l'étang de Bages-Sigean et l'eau de mer dans le diagramme de Schoeller. Pour comparaison, est également figurée l'eau karstique du Rec de Conillac contaminée par l'eau de mer du biseau salé.....	34
Figure 25: Domaine des eaux du Groupe A, y compris l'eau de l'étang de Bages-Sigean et l'eau de mer dans le diagramme de Schoeller. Pour comparaison, est également figurée les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan et le Rec de Conillac (Michel, 1995) .....	35
Figure 26: Domaine des eaux du Groupe B et de la nappe alluviale de l'Aude (Groupe C). Pour comparaison, est également figurée les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan et le Château de Salses (pole supposé non-contaminé par l'eau de mer) (Michel, 1995).....	36
Figure 27: Diagrammes binaires [Na] vs [Cl] pour les trois groupes A, B et C avec pour comparaison la droite de dilution de l'eau de mer et les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan (MICHEL, 1995).....	37
Figure 28: Diagrammes binaires [SO4]/ [Cl] et [Sr]/ [Cl] pour les trois groupes A, B et C avec pour comparaison la droite de dilution de l'eau de mer et les eaux karstiques contaminées par l'eau de mer de l'environnement de Perpignan (Michel, 1995).....	38
Figure 29: Rapport Br/Cl pour les eaux étudiées accompagnées de la droite de dilution de l'eau de mer .....	39
Figure 30: Répartition dans le diagramme (87Sr/86Sr) vs (1/[Sr]) de l'ensemble des données acquises sur les eaux littorales des régions de Narbonne (celle de l'étude) et de Perpignan (Michel,1995). Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique et Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés.....	40
Figure 31: Répartition dans le diagramme (87Sr/86Sr) vs (1/[Sr]) des données acquises sur les eaux littorales de Port la Nouvelle et de Perpignan (Michel,1995), ainsi que la nappe alluviale de l'Aude.	

Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique et Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés ..... 41

Figure 32: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) de données du Groupe B et C acquises sur les eaux littorales des régions de Narbonne (celle de l'étude) et de Perpignan (Michel, 1995). Les 3 pôles supposés de mélange (eau de mer actuelle, eau de la nappe alluviale de l'Aude, eau karstique du Château de Salses) sont marqués par des cercles en tiretés ..... 42

Figure 33: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs ( $1/[\text{Sr}]$ ) de données du Groupe B et C acquises pendant l'étude et de Perpignan (Michel, 1995), accompagnées des droites de mélanges supposés ..... 43

Figure 34: Répartition dans le diagramme ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) vs  $[\text{SO}_4]$  de données du Groupe A, B et C acquises pendant l'étude et de Perpignan (Michel, 1995), accompagnées des droites de mélanges supposés ..... 44

### Liste des tableaux :

Tableau 1: Rapports isotopiques de  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta\text{D}$  dans les roches, l'eau douce et l'eau de mer ..... 18

Tableau 2: Rapports isotopiques du strontium dans les roches et l'eau de mer ..... 19

Tableau 3: Quantité totale en solubles dissouts en  $\text{mg.l}^{-1}$  ..... 26

Tableau 4: Concentrations en éléments en traces (Br et Sr) pour les Groupes A et B, et la nappe alluviale de l'Aude ..... 29

Tableau 5: Données isotopiques en Sr obtenues au laboratoire GIS ..... 30

Tableau 6: Rapport Br/Cl en  $\text{mmol/mmol}$  pour les 10 points d'échantillonnage de l'étude ..... 39

Annexe 1 :  
Propriétés des piézomètres échantillonnés

Annexe 2 :  
Echantillonnage

### Annexe 3 :

### Problèmes rencontrés lors de l'analyse des résultats

Annexe 4 :  
Complément d'information sur le strontium

Annexe 5 :

Protocole de lavage du matériel utilisé pour la séparation du strontium  
sur micro colonne échangeuse d'ions

Annexe 6 :

Méthode de séparation du strontium sur micro-colonne échangeuse  
d'ions d'après C.PIN

## Annexe 7 :

### Méthode de dépôt des échantillons sur un filament de rhénium

## Tables des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Sigles et Abréviations :.....</b>	<b>3</b>
<b>I- Introduction :.....</b>	<b>4</b>
<b>II- Présentation de la zone d'étude.....</b>	<b>8</b>
A) Localisation géographique.....	8
B) Synthèse climatique.....	8
C) Contexte géologique régional.....	9
D) Contexte hydrogéologique régional.....	10
E) Evolution littorale récente de la zone d'étude narbonnaise.....	11
<b>III- Prélèvements et techniques expérimentales .....</b>	<b>13</b>
A) Choix des sites de prélèvements.....	13
B) Campagne de prélèvements.....	15
C) Matériel utilisé et méthode de prélèvement.....	15
D) Analyse des échantillons.....	16
E) L'analyse du strontium au spectromètre de masse.....	19
<b>IV- Résultats .....</b>	<b>24</b>
A) Evaluation critique des résultats.....	24
B) Présentation des résultats.....	25
<b>V- Discussion .....</b>	<b>31</b>
A) Les éléments majeurs.....	31
B) Les éléments en traces.....	39
C) Les isotopes du strontium.....	40
<b>VI- Conclusions et perspectives de l'étude.....</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>47</b>
<b>Listes des figures.....</b>	<b>48</b>