

# Origine et Processus de Minéralisation des Eaux Souterraines dans la Partie Sud du Marais Poitevin (Nouvelle-Aquitaine-France) et de Son Substratum Carbonaté de l'Oxfordien Supérieur

*Anongba Braphond Rodrigue Vincent Benjamin*

*Tohouri Privat*

École Normale Supérieure (ENS),  
Département des Sciences et Technologiques, Section des Sciences de la Vie et de la Terre. Abidjan, Côte d'Ivoire

*Soro Sandona Issa*

Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INPHB),  
École Doctorale Polytechnique (EDP), Unité Mixte de Recherche et d'Innovation Génie Civil, Géosciences et Sciences Géographiques

*Adja Miessan Germain*

École Normale Supérieure (ENS),  
Département des Sciences et Technologiques, Section des Sciences de la Vie et de la Terre, Abidjan, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n33p231](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n33p231)

Submitted: 30 August 2023  
Accepted: 28 November 2023  
Published: 30 November 2023

Copyright 2023 Author(s)  
Under Creative Commons CC-BY 4.0  
OPEN ACCESS

*Cite As:*

Anongba Braphond R.V.B., Tohouri P., Soro S.I. & Adja M.G. (2023). *Origine et Processus de Minéralisation des Eaux Souterraines dans la Partie Sud du Marais Poitevin (Nouvelle-Aquitaine-France) et de Son Substratum Carbonaté de l'Oxfordien Supérieur*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (33), 231. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n33p231>

## Résumé

Le Marais Poitevin est un territoire exploité à des fins économiques. Les activités anthropiques dans cette zone humide mettent en péril l'équilibre qui préside à la recharge naturelle et à leur qualité. L'un des problèmes à résoudre avant d'envisager des solutions de préservation et de sauvegarde de ce territoire est de connaître l'origine et de comprendre le processus de minéralisation des eaux du marais. Pour atteindre ces objectifs, les diagrammes de Piper et de Schöller-Berkaloff couplés à une approche statistique (Analyse en composantes principales) ainsi qu'à la corrélation entre

les éléments chimiques ont mis en évidence un phénomène complexe d'eaux bicarbonatées et de mer avec des teneurs atteignant 74%. Les eaux analysées sont proches de la neutralité dans le Marais Poitevin avec un pH moyen de 7,2. Cette étude montre que ces eaux souterraines se singularisent par une grande diversité de leurs faciès en fonction de la position géographique qu'elles occupent. Les eaux localisées à l'Ouest de la zone d'étude sont essentiellement chlorurées sodiques alors que celles localisées à l'Est présentent des faciès qui vont de chlorurés sodiques à bicarbonatés calciques en passant par les faciès bicarbonatés sodiques et sulfatés sodiques.

Ainsi, deux origines quant à la minéralisation des eaux du Marais Poitevin ont été mises en évidence. Une minéralisation d'origine marine liée à une contamination des eaux du Marais Poitevin par de l'eau de mer, et une autre liée à la dissolution des minéraux carbonatés des formations encaissantes.

---

**Mots-clés:** Marais Poitevin, Zone humide, hydrochimie, Analyse en composantes principales (ACP), Diagramme de Piper, Diagramme de Schöeller-Berkaloff

---

## **Origin and Salinization Process of Groundwaters in Poitevin Marsh (New-Aquitaine-France) and Its Underlying Upper Oxfordian Carbonate Bedrock**

*Anongba Braphond Rodrigue Vincent Benjamin  
Tohour Privat*

École Normale Supérieure (ENS),  
Département des Sciences et Technologiques, Section des Sciences de la Vie  
et de la Terre. Abidjan, Côte d'Ivoire

*Soro Sandona Issa*

Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INPHB),  
École Doctorale Polytechnique (EDP), Unité Mixte de Recherche et  
d'Innovation Génie Civil, Géosciences et Sciences Géographiques

*Adja Miessan Germain*

École Normale Supérieure (ENS),  
Département des Sciences et Technologiques, Section des Sciences de la Vie  
et de la Terre, Abidjan, Côte d'Ivoire

---

### **Abstract**

The Poitevin marsh, a territory exploited for economic purposes, is threatened by human activities. One of the problems to be solved before considering solutions for preservation and safeguarding of this territory is to know the origin and to understand the mineralization process of the Poitevin marsh groundwaters. To achieve these objectives, Piper and Schöller-Berkaloff diagrams coupled with a statistical approach (Principal Component Analysis) as well as the correlation between chemical elements highlighted a complex phenomenon of mixing bicarbonate and saline waters with contents reaching 74%. The results show that the waters are close to neutral with an average pH of 7.2. This study carried out on the Poitevin marsh groundwaters has made it possible to show that these waters are distinguished by a great diversity of facies depending on their geographical positions. Waters located to the west of the study area are essentially sodium-chloride type while those located to the East have facies ranging from sodium-chloride type to calcium-bicarbonate type, passing through sodium bicarbonate type and sodium sulfate type. So, two origins of the Poitevin marsh waters mineralization have been highlighted. Mineralization of marine origin linked to the contamination of Poitevin marsh groundwaters by sea water, and another linked to the dissolution of carbonate minerals from surrounding rocks.

---

**Keywords:** Poitevin marsh, wetland, hydrochemistry, principal component analysis (PCA), Piper diagram, Schöeller-Berkaloff diagram

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte et justification

Les zones humides sont des écosystèmes productifs qui jouent un rôle dans le maintien de nombreux cycles naturels et soutiennent un large éventail de biodiversité. Ils régulent la quantité d'eau, contribuent à limiter les crues et participent à la rétention de substances polluantes. Toutefois, ces milieux humides attirent les populations à cause de leur localisation (côtière, en fond de vallée). De ce fait, ces endroits sont devenus l'un des écosystèmes mondiaux les plus touchés et les plus menacés par les activités humaines (Guetté et al, 2018, Guetté, 2018). Dans la plupart des pays où il existe des zones humides, l'un des facteurs limitant des activités humaines est la quantité d'eau douce disponible. En conséquence, dans ces milieux ou à leur périphérie, les nappes d'eau souterraines connaissent pour certaines d'entre elles, une surexploitation qui entraîne des déséquilibres environnementaux majeurs accentués ces dernières années par une évolution climatique défavorable. Comme toute zone humide, le Marais Poitevin connaît une explosion de sa démographie pendant la période estivale, qui s'accompagne par une surexploitation de ses ressources liée à l'accroissement des activités anthropiques telles que les activités agricoles, économiques et touristiques. Il a ainsi vu disparaître une grande partie de sa zone inondable avec des nappes souterraines qui ont été classées en nappes intensément exploitées par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne qui est une agence gouvernementale française. Les prélèvements d'eau dans ce milieu sont tellement intenses que cela provoque des ruptures d'écoulement des cours d'eau dans le marais (Safège, 2001).

Malgré cette dégradation générale, le Marais Poitevin demeure un espace écologique d'intérêt national et fait l'objet d'études pour en comprendre son fonctionnement (Braphond et al, 2023 ; Vincent et al, 2022 ; Anongba, 2007 ; Bernard, 2006).

La partie sud du Marais Poitevin, objet de cette étude, est méconnue du point de vue de la chimie des eaux souterraines. En effet, l'état actuel des connaissances met en évidence des lacunes de connaissances sur l'hydrochimie des eaux souterraines des formations du Quaternaire et de l'Oxfordien supérieur aussi bien à l'intérieur du marais qu'en amont. Les études qui ont été réalisées sur cette partie du marais l'ont essentiellement été d'une part, sur les transferts hydriques entre les formations du quaternaire et celles de l'Oxfordien supérieur (Braphond et al, 2023), et d'autre part sur la caractérisation des sols (Vincent et al, 2022 ; Bernard, 2006 ; Garnier, 1975 ; Ducloux et Nijs, 1972 ; Dupuis, 1969). Il s'avère donc nécessaire de mener

des études sur la chimie des eaux souterraines de la partie sud du marais afin de compléter les études existantes sur son fonctionnement et contribuer à la mise en place d'outils pour favoriser une gestion durable et efficace de cette zone humide.

Cette étude a donc pour objectif de connaître, la nature hydrogéochimique des eaux du Marais Poitevin et de déterminer l'origine de leurs minéralisations.

## **1.2. Présentation de la zone d'étude**

Le Marais Poitevin est le marais le plus vaste de la façade atlantique française, la deuxième zone humide la plus importante de France après la Camargue et la cinquième zone humide d'Europe avec une superficie de 964 km<sup>2</sup> (Anongba, 2007). Il s'étend sur deux régions qui sont les Pays de la Loire et le Poitou-Charentes. Cette dernière fait désormais partie d'un nouveau territoire administratif appelé la Nouvelle-Aquitaine créé lors de la réforme territoriale de 2015 et entrée en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2016. Le Marais Poitevin s'étend sur trois départements (Vendée, Charente Maritime et Deux-Sèvres). Ce territoire qui regroupe 82 communes est très fortement peuplé avec une population estimée à 161 000 habitants recensés lors de la campagne de l'Institut National de la Statistique et des études économiques (INSEE, 2015). Le processus d'évolution naturelle et les aménagements hydro-agricoles ont progressivement transformé cette vaste zone humide. Ces aménagements permettent donc de distinguer sur ce territoire trois grandes zones. La première est la façade littorale qui est sous l'influence marine et où se rencontrent des vasières tidales et les prés salés de la baie de l'Aiguillon. La seconde est une zone centrale, le marais desséché, protégée des marées d'équinoxe par des digues de mer et des cours d'eau par des digues qui bordent les principaux cours d'eau. Elle est à l'abri de toute inondation et est généralement vouée à la céréaliculture ou laissée en prairie naturelle. La troisième est une zone d'épandage des crues hivernales non protégée des inondations. Cette zone appelée le marais mouillé s'étend sur la périphérie et borde les rivières.

Le Marais Poitevin se présente comme une dépression s'inscrivant entre deux plaines du substratum carbonaté traduisant la structure isoclinale des formations jurassiques de la bordure septentrionale du bassin d'Aquitaine (Dupuis et al. 1965 ; Camuzard 2000). Ancien Golfe des Pictons, ce marais s'étend de Niort à l'océan Atlantique, sur une longueur d'environ 70 km. La zone retenue pour cette étude est la partie sud du Marais Poitevin localisée sur les départements de la Charente Maritime et des Deux Sèvres. Elle est située à proximité du détroit du Poitou, en bordure nord du bassin d'Aquitaine et s'étend de Bessines à l'extrême Est jusqu'à Charron à l'Ouest (Figure 1). Elle englobe au total 27 communes dont 16 appartiennent au département de la Charente Maritime et 11 à celui des Deux Sèvres. Elle a une superficie totale

estimée à 550 km<sup>2</sup>. Le climat est de type océanique avec une pluviométrie moyenne annuelle de 770 mm à 840 mm. La topographie du marais Poitevin est très homogène avec des îlots d'altitudes variant entre 10 et 20 m. Ce sont soit des soubassements calcaro-marneux qui ont échappé au nivellement lors des phases successives d'érosion qui ont jalonné l'histoire du marais, soit des cailloux ou des graviers quaternaires reposant sur des bancs calcaires (Welsch, 1916). Au plan géologique et hydrogéologique, la zone d'étude est constituée de deux grandes formations géologiques qui sont les formations Calcaires et Marno-calcaires d'âge Jurassique sur lesquelles reposent les formations du Quaternaire encore connu sous le vocable de « Bri » (Mazeau, 1979). Ces deux entités géologiques permettent de différencier plusieurs aquifères dans la zone d'étude dont deux font l'objet de cette étude : l'aquifère des formations du Quaternaire connues sous le vocable de « Bri » et celui de l'Oxfordien supérieur (calcaire). Les formations de l'Oxfordien supérieur qui affleurent en amont du marais se retrouvent sous couverture des formations du quaternaires dans le marais.

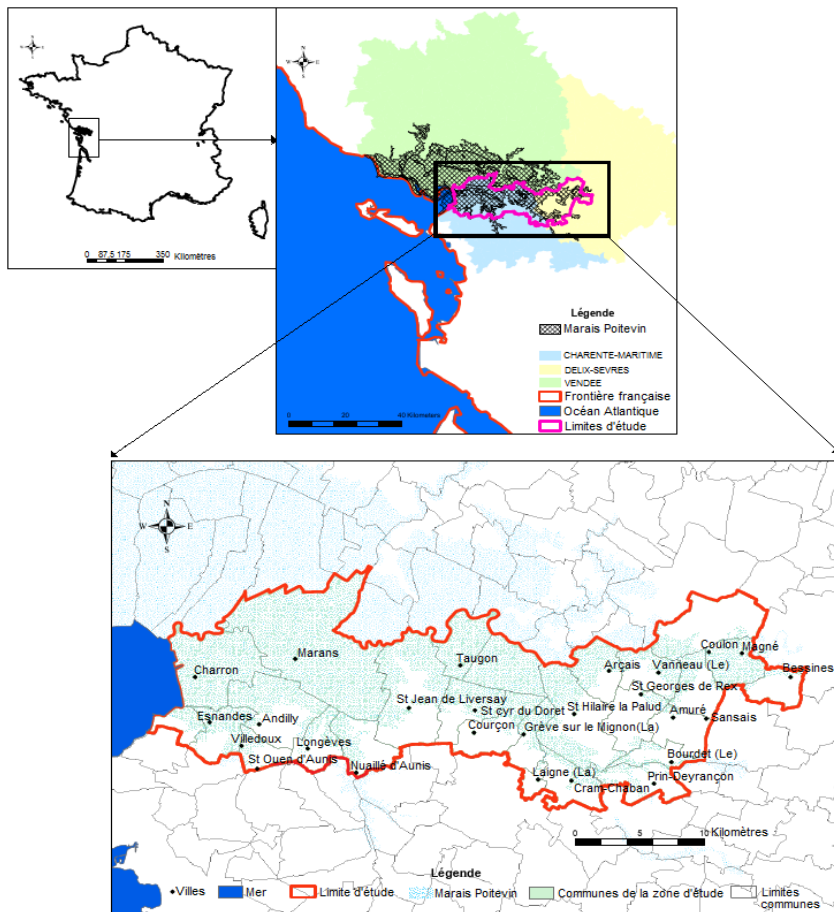
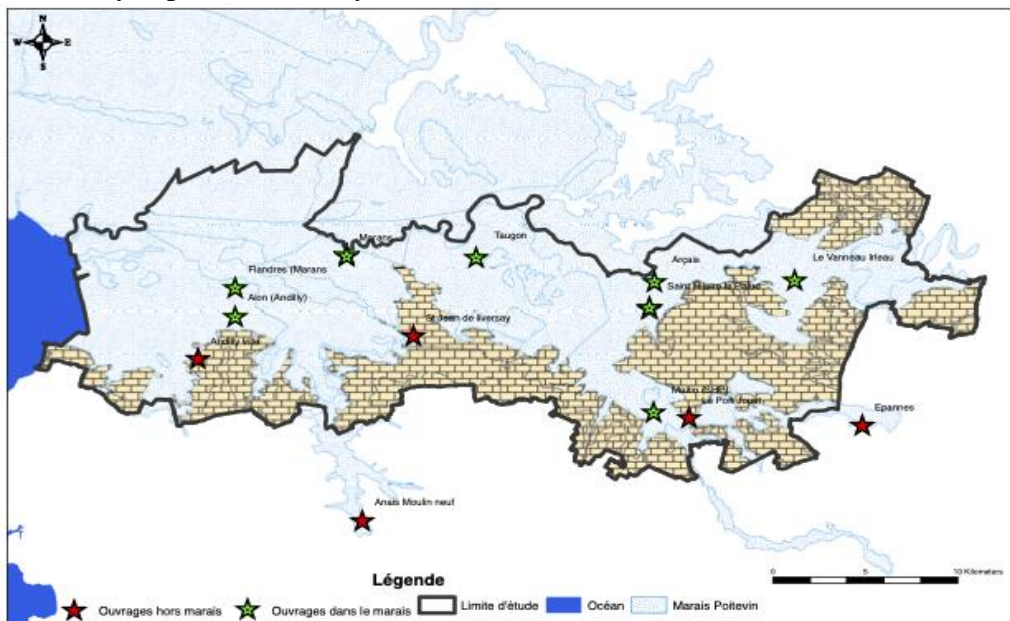


Figure 1. Localisation géographique de la zone d'étude (Vincent et al, 2022)

## 2. Méthodologie

### 2.1. Implantation des forages et des sondages à la tarière

La campagne d'échantillonnage des eaux souterraines du Marais Poitevin a nécessité la mise en place d'ouvrages au nombre de 19 (figure 2). Ils ont été réalisés à l'aide de foreuse à la tarière munie de vis sans fin, mises bout à bout à l'aide de clavettes, jusqu'à la profondeur souhaitée. 4 de ces ouvrages (Marans F1, Marans F4, SHP F1 et SHP F4) captent les eaux de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire. Parmi ces 4 ouvrages, Marans F1 était à sec le jour de l'échantillonnage. 10 de ces ouvrages (SHP F2, SHP F3, Marans F2, Marans F3, Andilly Alon, Marans Flandre, Arçais, Le Vanneau, Mazin et Taugon) captent les eaux des formations du Quaternaire dans le marais Poitevin. Les résultats obtenus sur les eaux de Marans F2 et de Marans F3 étant identiques certainement à cause de la faible distance entre ces deux ouvrages, 3,65 m, ces derniers ont été notés « Marans F2-3 ». Parmi les ouvrages localisés dans le Marais Poitevin, 8 sont disposés sur deux sites expérimentaux dont l'un se trouve à Marans à l'Ouest de la zone d'étude, et l'autre à Saint Hilaire la Palud, à l'est de la zone d'étude. Sur chaque site expérimental, 2 ouvrages captent les eaux de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur sous la couverture quaternaire et les 2 autres captent les eaux de l'aquifère du Quaternaire. Quant aux eaux de l'Oxfordien supérieur située en amont du Marais Poitevin, elles sont captées par 5 ouvrages qui sont des puits d'exploitants agricoles localisés dans les communes de Port-Jouet, St Jean de Liversay, Épannes, Andilly ville et Anais Moulin neuf.



**Figure 2.** Carte de localisation montrant les points d'échantillonnage des eaux souterraines situées à l'intérieur et en amont du Marais Poitevin (Braphond et al, 2023)

## 2.2. Échantillonnage et mesure des paramètres physicochimiques

Pour la réalisation des analyses chimiques, une campagne d'échantillonnage a été réalisée en février 2007. 17 échantillons ont été collectés au cours de cette campagne à l'aide d'une pompe portative électrique immergée de 2 pouces reliée à un convertisseur de fréquence et alimentée par un groupe électrogène de 4 kVa. Les échantillonnages des eaux souterraines ont été réalisés après pompage préalable sur chaque site ayant permis la vidange d'au moins trois fois la colonne d'eau de l'ouvrage, afin de s'assurer que les eaux prélevées sont représentatives de l'eau souterraine environnante. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un tube préleveur en polyéthylène. Un échantillon d'eau de mer a été prélevé au port de la Rochelle à l'écart de toute pollution liée à l'activité navale et deux échantillons d'eau de pluie ont été prélevés au Bourdet en Vendée. Les échantillons d'eau de pluie ont été prélevés dans un seau en plastique mis en place pendant la nuit et récupéré le matin avant le lever du soleil afin de minimiser l'effet de l'évaporation. Les bouteilles devant servir à recueillir les eaux échantillonnées ont été rincées plusieurs fois par celles-ci. Les eaux prélevées pour l'analyse des ions majeurs et mineurs ont été conservées dans des récipients en polypropylène complètement remplis et bouchés hermétiquement. Les récipients devant servir aux dosages des cations ont été acidifiés à l'acide nitrique supra pur à un pH inférieur à 2. Ceux non acidifiés ont été réservés aux eaux devant servir aux dosages des anions. Les échantillons ont été filtrés sur site avec des filtres de membrane millipore de diamètre 0,22  $\mu\text{m}$  et 0,45  $\mu\text{m}$ . Les récipients ainsi préparés ont été étiquetés et conservés dans des glacières à basse température ( $2^{\circ}\text{C} < T < 8^{\circ}\text{C}$ ), puis expédié par transport pour analyse.

Les paramètres physico-chimiques à savoir la conductivité électrique, la température, le pH, le potentiel d'oxydoréduction, l'oxygène dissous, les solides totaux dissous (TDS) et l'alcalinité ont été déterminés sur site. La conductivité électrique, le pH et la température ont été mesurés avec un appareil de mesure à microprocesseur WTW pH/Cond 340 i normalisé à  $25^{\circ}\text{C}$ . Le WTW pH/Cond 340 i a été régulièrement calibré à l'aide de deux tampons standards à pH 4 et 7. La plage de mesure pour la conductivité électrique va de 0 à 50000 mS/cm avec une résolution de 1 mS/cm. La plage de mesure de la température va de  $-5,0$  à  $+105^{\circ}\text{C}$  avec une résolution de  $1^{\circ}\text{C}$ . Celle du pH va de  $-2,00$  à  $+19,99$  upH avec une résolution de 0,01 upH. La plage de mesure du potentiel d'oxydoréduction va de  $-1999$  à  $+1999$  mV avec une résolution de 1mV. Celle de l'oxygène dissous va de 0 à 19,9 mg/L avec une résolution de 0,2 mg/L. quant aux solides totaux dissous, la plage de mesure va de 0 à 65 g/L avec une précision de 1g/L.

Toutes les analyses ont été réalisées au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon. La composition en anions des eaux souterraines du Marais Poitevin a été déterminée par chromatographie ionique (CI) sur un



Dionex ICS 1000 avec une précision de  $\pm 5\%$ . Les analyses de cations ont été réalisées par absorption atomique sur un Varian SpectrAA-640 avec une précision  $< \pm 10\%$ .

### 2.3. Évaluation de la qualité des analyses effectuées

Avant de discuter les résultats de toute analyse chimique, il convient d'évaluer la fiabilité des dosages effectués. La méthode utilisée est appelée balance ionique ( $\varepsilon$ ). Elle est exprimée sous la forme d'un écart relatif par la formule

$$\varepsilon = \frac{\sum^+ \text{Cations} - \sum^- \text{Anions}}{\sum^+ \text{Cations} + \sum^- \text{Anions}} \times 100 \quad (1)$$

Cette marge de déséquilibre doit être interprétée comme un biais induit lors de l'analyse. En règle générale, les résultats d'analyses sont appréciés selon la classification ci-après.

$-1\% < \varepsilon < +1\%$	Fiabilité des résultats d'analyses
$-5\% \text{ et } -1\% < \varepsilon < +1\% \text{ et } +5\%$	Fiabilité des résultats d'analyses
$-10\% \text{ et } -5\% < \varepsilon < +5\% \text{ et } +10\%$	Fiabilité des résultats d'analyses médiocre
$\varepsilon < -10\% \text{ ou } \varepsilon > +10\%$	Fiabilité des résultats d'analyses douteuse

D'après cette classification, l'écart admis est estimé classiquement à  $-5\% < \varepsilon < +5\%$ . La balance ionique a donc été systématiquement appliquée à tous les résultats d'analyses de cette étude.

### 2.4. Étude du faciès hydrochimique des eaux souterraines

Les faciès hydrochimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. Les représentations graphiques utilisées dans ce travail sont les diagrammes de Piper (Piper 1944) et de Schöeller-Berkaloff (Shöeller, 1962).

Le logiciel utilisé dans cette étude pour la représentation de ces diagrammes est la version 8.1 du programme informatique « DIAGRAMMES » du laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon (Simler, 2023)

### 2.5. Méthode d'analyse statistique

Les méthodes d'analyses statistiques sont couramment utilisées pour étudier et classer différents processus hydrogéochimiques à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines. Dans le cadre de cette étude, la méthode statistique retenue est l'analyse en composantes principales (ACP). L'étude

ACP de ce travail a été réalisée à l'aide de la version 10 du logiciel STATISTICA de l'éditeur StatSoft France. L'objectif est de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation et les variables qui les gouvernent.

## 2.6. Corrélation entre différents éléments chimiques

Le chlorure est un ion qu'on peut qualifier de conserver dans les eaux des aquifères carbonatés. En effet cet ion n'est pas affecté par les échanges qui peuvent se produire entre une eau souterraine et sa matrice carbonatée à cause de sa charge négative (Giraud *et al*, 2000).

Cette méthode basée sur la relation entre les chlorures et d'autres éléments chimiques des eaux souterraines prélevées a été utilisée dans ce travail. La disposition des différents points par rapport à la ligne de mélange eau douce, eau de mer peuvent être de grande utilité pour l'identification d'autres phénomènes qui sont annexés au processus de mélange.

## 2.7. Estimation des teneurs en eaux de mer dans les échantillons d'eau

Dans cette étude, il a été décidé le calcul, à partir des concentrations en chlorure et en bromure (éléments supposés conservés dans un aquifère calcaire ; Tellam, 1995; Fidelibus *et al*, 1992; Giraud *et al*, 2000; El Achleb *et al*, 2001; Mook, 2001), des proportions éventuelles d'eau de mer dans les eaux souterraines étudiées.

D'après Barbecot, 1999 et Marjoua, 1995, pour les teneurs en chlorure et bromure, il est possible d'écrire, ce qui suit, en  $\text{mg.L}^{-1}$ :

$$rA_{\text{échantillon}} = [(1 - X) rA_{\text{pluie}}] + X rA_{\text{mer}} \quad (2)$$

avec  $rA$  : teneur en chlorure ou en bromure

La proportion marine  $X$  dans le mélange sera donc :

$$X = \frac{rA_{\text{échantillon}} - rA_{\text{pluie}}}{rA_{\text{mer}} - rA_{\text{pluie}}} \quad (3)$$

Les pôles eau de mer, eau de pluie utilisés dans cette étude sont ceux représentés par les échantillons d'eau de mer et de pluie récupérés au cours de la campagne de février 2007.

## 3. Résultats

### 3.1. Eaux souterraines du Quaternaire dans le Marais Poitevin

La température moyenne des eaux des formations du Quaternaire dans le Marais Poitevin est de  $13,2^{\circ}\text{C}$  ( $n = 7$  ;  $\sigma = 0,9$  ;  $\sigma/m = 12\%$ ) (tableau 1).

Ces eaux souterraines ont un pH neutre avec une moyenne de 7,2 ( $n=9$  ;  $\sigma=0,4$  ;  $\sigma/m=6\%$ ). Elles sont modérément à fortement minéralisées ( $m=8063 \text{ mS.cm}^{-1}$  ;  $n=9$  ;  $\sigma=11640$  ;  $\sigma/m=144\%$ ) avec des valeurs très hétérogènes qui varient entre  $910 \text{ mS.cm}^{-1}$  et  $37100 \text{ mS.cm}^{-1}$ . Les valeurs d'oxygène dissous présentent un coefficient de variation de l'ordre de 71%, et varient entre  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Hilaire la Palud et  $11,2 \text{ mg.L}^{-1}$  à Arçais et à Taugon. Le potentiel d'oxydo-réduction, avec un coefficient de variation de 858 % est également très hétérogène. Les valeurs mesurées oscillent entre  $-169 \text{ mV}$  et  $218 \text{ mV}$  ( $n=9$  ;  $\sigma=137$ ). Quant aux éléments totaux dissous (TDS), Les valeurs obtenues sont comprises entre  $0,6 \text{ g.L}^{-1}$  et  $22 \text{ g.L}^{-1}$ .

Les teneurs en bicarbonates mesurées dans les échantillons des eaux du Quaternaire varient de  $349 \text{ mg.L}^{-1}$  dans les eaux de Taugon à  $2155 \text{ mg.L}^{-1}$  dans celles du site expérimental de Marans (tableau 1). Les teneurs en chlorures des eaux échantillonnées sont comprises entre  $36 \text{ mg.L}^{-1}$  (Taugon) et  $12624 \text{ mg.L}^{-1}$  (site expérimental de Marans). Les teneurs en sulfates des eaux échantillonnées vont de  $6,7 \text{ mg.L}^{-1}$  à Le Vanneau à  $1408 \text{ mg.L}^{-1}$  sur le site expérimental de Saint Hilaire la Palud. Les teneurs en nitrate des sites expérimentaux sont inférieures au seuil de détection ; ce qui souligne les faibles valeurs de ce composé dans ce milieu. Toutefois, on en rencontre dans les autres ouvrages captant les eaux des formations du quaternaire dans le Marais Poitevin avec des valeurs qui vont de  $0,9 \text{ mg.L}^{-1}$  à Mazin à  $165 \text{ mg.L}^{-1}$  à Andilly Alon. De façon générale, du fait de la relative bonne protection des ouvrages situés dans la zone du marais, les teneurs en nitrates rencontrées dans les eaux de ces ouvrages n'excèdent pas  $45 \text{ mg.L}^{-1}$  sauf à Andilly Alon ( $165 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Cette forte teneur est probablement liée à une possible contamination des eaux de cet ouvrage par l'exploitation agricole localisée à proximité.

Le seul ouvrage du Quaternaire présentant une faible teneur en calcium se situe à Le Vanneau ( $34,13 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Par contre, les teneurs rencontrées dans les eaux des autres ouvrages du Quaternaire fluctuent entre  $103,70 \text{ mg.L}^{-1}$  à Marans Flandres et  $423,80 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Hilaire la Palud. Les teneurs en magnésium des eaux des formations du Quaternaire sont comprises entre  $18,4 \text{ mg.L}^{-1}$  à Taugon et  $879 \text{ mg.L}^{-1}$  sur le site expérimental de Marans. Contrairement au calcium et au magnésium, les teneurs en sodium obtenues dans les eaux des formations du Quaternaire sont très élevées. Elles sont de  $26 \text{ mg.L}^{-1}$  dans les eaux des formations quaternaires de Mazin et  $6630 \text{ mg.L}^{-1}$  dans celles des formations quaternaires du site expérimental de Marans. Enfin, Les teneurs en potassium sont assez variables, elles oscillent entre  $43 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Hilaire la Palud et  $238 \text{ mg.L}^{-1}$  sur le site expérimental de Marans.

### **3.2. Eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin**

Dans les formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire, la température moyenne enregistrée est de l'ordre de 14,2 °C ( $n = 3$  ;  $\sigma = 0,4$  ;  $\sigma/m = 3$  %) (tableau 1). La conductivité électrique de ces eaux montre de très fortes valeurs allant de 22500 mS.cm<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud à 36100 mS.cm<sup>-1</sup> à Marans. Ces eaux sont légèrement acides avec des valeurs de pH qui oscillent entre 6,7 et 6,93 ( $m = 6,80$  ;  $\sigma = 0,09$  ;  $n = 3$  ;  $\sigma/m = 1$  %). Les valeurs d'oxygène dissous sont homogènes et vont de 2,7 mg.L<sup>-1</sup> à Marans à 4,9 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud. Les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction sont comprises entre -351 et 138 mV ( $n = 3$  ;  $\sigma = 203$  ;  $\sigma/m = 256$  %). Les éléments totaux dissous (TDS) ont des teneurs qui sont comprises entre 2,94 g.L<sup>-1</sup> et 14 g.L<sup>-1</sup>.

Les teneurs en bicarbonates sont assez élevées et varient entre 497,8 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud et 1007,7 mg.L<sup>-1</sup> à Marans. Les eaux de cet aquifère ont de très fortes teneurs en chlorures avec des valeurs comprises entre 7508 mg.L<sup>-1</sup> et 12588 mg.L<sup>-1</sup>. Celles en sulfates vont de 352,7 mg.L<sup>-1</sup> à 665,3 mg.L<sup>-1</sup>. Les nitrates sont en dessous du seuil de détection ce qui souligne la relative bonne protection des eaux de cet aquifère quant aux pollutions liées aux activités anthropiques.

Le calcium a des teneurs qui fluctuent entre 530,30 mg.L<sup>-1</sup> et 677 mg.L<sup>-1</sup>. Quant au magnésium, ses teneurs sont plus élevées avec des valeurs qui vont de 1105,4 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud à 1129 mg.L<sup>-1</sup> à Marans. Le sodium est très présent dans les eaux de cet aquifère avec des valeurs assez élevées. Les teneurs sont comprises entre 2387 mg.L<sup>-1</sup> et 5710 mg.L<sup>-1</sup>. Les teneurs en potassium les plus élevées se rencontrent à Marans avec une valeur de 150,90 mg.L<sup>-1</sup>.

### **3.3. Eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur en amont du Marais Poitevin**

Contrairement aux formations du Quaternaire, les paramètres physico-chimiques mesurés dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur situées en dehors du marais sont assez homogènes (tableau 1). En effet excepté l'oxygène dissous, tous les paramètres présentent un coefficient de variation inférieur à 50%. La moyenne des températures de ces eaux est de 14,2°C ( $n = 5$  ;  $\sigma = 0,4$  ;  $\sigma/m = 2$  %). Les valeurs de conductivité électrique sont assez faibles en comparaison avec celles rencontrées dans le Marais Poitevin. Elles vont de 731 mS.cm<sup>-1</sup> à 937 mS.cm<sup>-1</sup> avec une moyenne de 805 mS.cm<sup>-1</sup> ( $n = 5$  ;  $\sigma = 75$  ;  $\sigma/m = 9$  %). Les valeurs d'oxygène dissous oscillent entre 1 mg.L<sup>-1</sup> à Port-Jouët et 10 mg.L<sup>-1</sup> à Anais Moulin Neuf. Le potentiel d'oxydo-réduction est homogène et varie de 80 mV à Port-Jouët à 138 mV à Anais Moulin Neuf ( $n = 9$  ;  $\sigma = 54,3$  ;  $\sigma/m = 37$  %). Les valeurs en éléments totaux

dissous (TDS) sont également homogènes avec des teneurs qui sont comprises entre  $0,47 \text{ g.L}^{-1}$  et  $0,6 \text{ g.L}^{-1}$ .

Les teneurs en bicarbonates mesurées sur ces eaux varient de  $317 \text{ mg.L}^{-1}$  dans celles d'Épannes à  $386 \text{ mg.L}^{-1}$  dans celles de Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en chlorures sont comprises entre  $24 \text{ mg.L}^{-1}$  (Port-Jouët) et  $43 \text{ mg.L}^{-1}$  (Saint Jean-de-Liversay). Les teneurs en sulfates varient de  $22 \text{ mg.L}^{-1}$  à Épannes à  $41 \text{ mg.L}^{-1}$  Andilly Ville. Contrairement aux eaux rencontrées dans le Marais Poitevin, celles en dehors du marais présentent des concentrations assez élevées en nitrates avec des valeurs qui vont de  $39 \text{ mg.L}^{-1}$  à Port-Jouët à  $80 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Jean-de-Liversay. Cette présence traduit une pollution liée à des activités anthropiques.

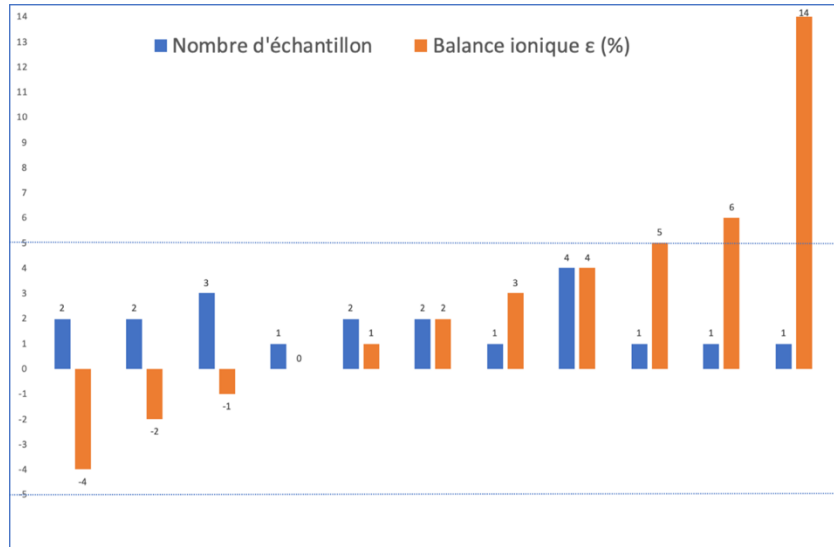
Les teneurs en calcium fluctuent entre  $127 \text{ mg.L}^{-1}$  à Andilly ville et  $156 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Jean-de-Liversay. Celles en magnésium sont comprises entre  $4 \text{ mg.L}^{-1}$  à Épannes et  $26 \text{ mg.L}^{-1}$  à Anais Moulin Neuf. Les valeurs de sodium rencontrées dans ces eaux s'échelonnent de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  à Port-Jouët à  $23 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en potassium les plus élevées se rencontrent dans les eaux de Andilly Ville avec une valeur de  $42 \text{ mg.L}^{-1}$

**Tableau 1.** Résultats des mesures des paramètres physico-chimiques et des analyses des teneurs en éléments chimiques des eaux souterraines du Marais Poitevin, des eaux souterraines situées en amont du Marais Poitevin, de l'eau de mer et de l'eau de pluie

Forage	T°C	$\chi$ 25°C mS/cm	pH	Eh mV	O <sub>2</sub> mg/L	TDS g/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	F <sup>-</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	Br mg/L	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup> mg/L	Sr <sub>2</sub> <sup>+</sup> mg/L	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L
<b>Eaux Souterraines de l'aquifère du Quaternaire dans le Marais Poitevin</b>																	
Andilly Alon	13.7	1189	6.94	218	6.5	0.8	49	434.3	0.1	59.1	0.4	165	189	0.5	19.5	28.8	48.37
Taugon	9.8	910	7.75	162	11.2	0.6	135.9	348.9	0.7	35.7	0.2	11.4	135.1	0.6	18.4	50	5.25
Mazin	10.8	1680	6.82	48	2.2	1.1	277.9	754	0.2	59.6	0.7	0.9	372.4	0.7	20.1	26.2	8.65
Le Vanneau	14.2	1289	7.43	-111	4.7	0.9	6.7	666.1	1.5	96.1	0.6	<	34.1	2.5	53.1	150.6	24.53
Arçais	12.5	2370	6.99	30	11.2	1.7	122.8	756.4	0.2	328.4	1.6	45.1	177.9	0.5	50.3	264.6	21.17
Marans	12.2	10780	7.46	-155	4.3	8	295.2	790.6	0.9	3039.5	13.2	13.3	103.7	0.9	181.1	1724	86.20
Flandres	14.5	37100	6.76	-169	1.6	22	609.3	21545	2.1	12623.5	54.4	<	208	26.3	879	6630	238
Marans F2-3	12.6	5850	6.81	-41	1	3.9	1408.7	763.7	0.5	841.2	4	<	423.8	3	170.1	743.1	43
SHP F3	12.5	11400	7.71	171	5.2	7.93	804.5	678.3	<	2985	13.9	<	236	2.9	158.4	1983	101.6
SHP F2																	
<b>Eaux Souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur sous couverture Quaternaire dans le Marais Poitevin</b>																	
Marans F1	14.5	30000	6.79	138	3.1	14	665.3	536.8	3.9	10318.5	45.7	<	677	78.8	1113	4189	125
Marans F4	14.5	36100	6.70	-351	2.7	2.94	352.7	1007.7	4.5	12588	55.3	<	530.3	122	1129	5710	150.9
SHP F4	13.7	22500	6.93	-25	4.9	5.38	585.5	497.8	4.3	7508.6	32.8	<	616.5	120	1105	2387	82.3
<b>Eaux Souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin</b>																	
Port Jouet	13.9	735	6.90	80	1.1	0.48	24.19	320	0.2	24.31	0.07	38.54	141	0.74	6.13	10.34	2.14
Epannes	13.6	731	6.92	214	6.1	0.47	22.20	317	0.06	28.41	0.11	69.39	147.9	0.39	4.07	10.84	2.26
St Jean de Liversay	14.5	937	6.92	90	7.9	0.6	39.24	386	0.16	42.92	0.14	80.34	156.2	0.40	5.97	23.32	19.68
Andilly Ville	14.8	811	6.93	197	4.6	0.55	40.83	359	0.12	31.89	0.13	55.62	127.1	0.23	6.60	20.04	41.63
Anais Moilin Neuf	14.2	809	6.96	138	10	0.53	36.19	376	0.38	34.68	0.12	49.78	<sup>129</sup> 5	2.26	26.8	14.14	1.96
<b>Eau de pluie</b>																	
Actuelle	9.7	150	7.25	n.m	n.m	n.m	1.7	n.a	<	5	0	0.6	1	<	0.4	2.3	0.21
<b>Cours d'eau</b>																	
Canal	n.m	1090	7.61	n.m	n.m	n.m	132	395	0.2	76.9	0.4	27.4	170	0.6	17.8	53.4	n.a
<b>Eau de mer</b>																	
Récente	9	49500	8	n.m	n.m	n.m	2773	166	<	17489	72	<	363	4	1195	9358	402.2

n.m : non mesuré ; n.a : non analysé ; < : en dessous du seuil de détection

T : température ; □ ou Cond : conductivité électrique ; pH : potentiel d'hydrogène ; Eh : potentiel d'oxydo-réduction ; O<sub>2</sub> : oxygène dissous ; TDS : solides totaux dissous ; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : sulfates ; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> : bicarbonates ; F<sup>-</sup> : fluorures ; Cl<sup>-</sup> : chlorures ; Br<sup>-</sup> : bromures ; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> : nitrates ; Ca<sub>2</sub><sup>+</sup> : calcium ; Sr<sub>2</sub><sup>+</sup> : strontium ; Mg<sub>2</sub><sup>+</sup> : magnésium ; Na<sup>+</sup> : sodium ; K<sup>+</sup> : potassium.

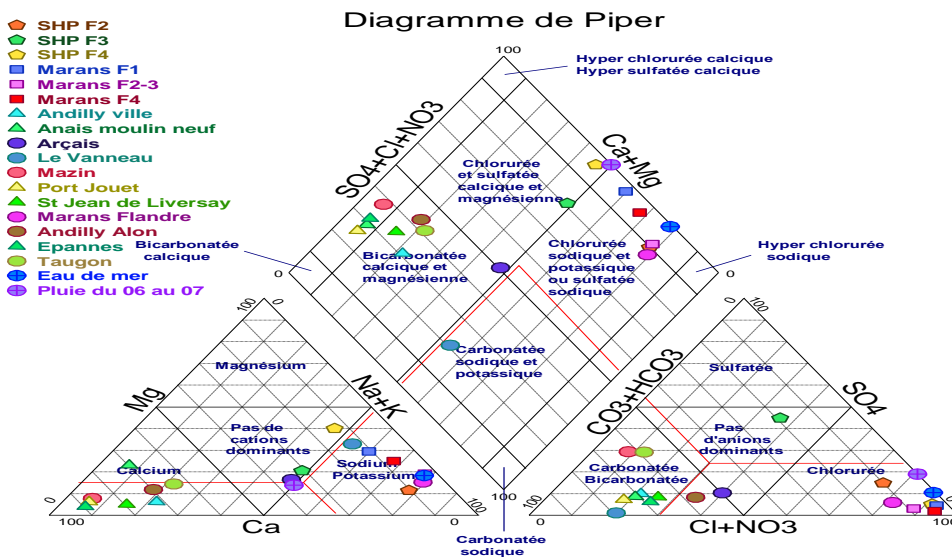


**Figure 3.** Évaluation de la fiabilité des résultats d'analyses chimiques des échantillons des eaux souterraines du Marais Poitevin, des eaux souterraines situées en amont du Marais Poitevin, de l'eau de pluie et de l'eau de mer par la balance ionique

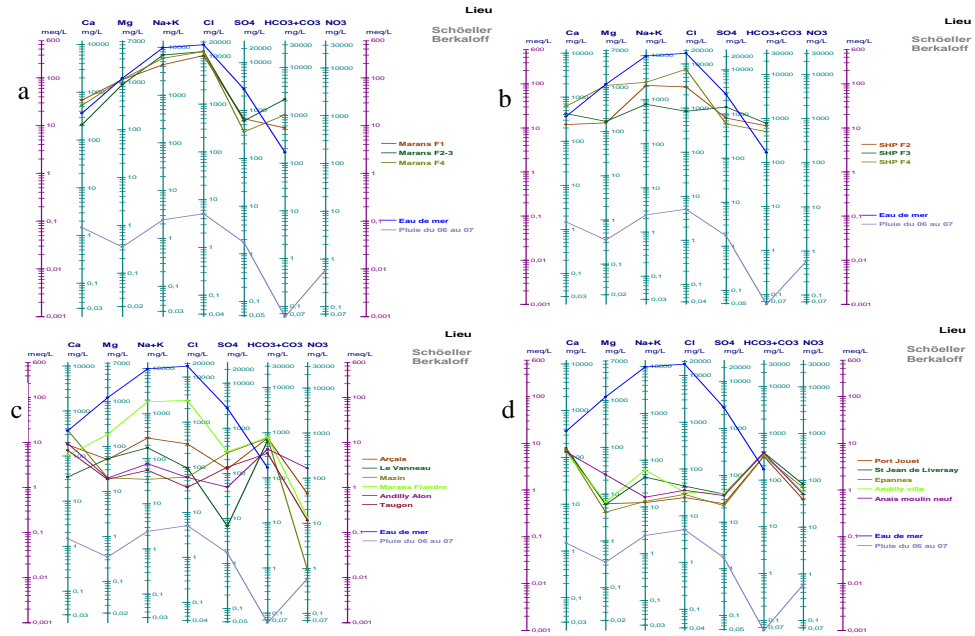
### 3.5. Faciès et origine de la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude

- Diagrammes de Piper et de Schöller-Berkaloff

Les résultats de la représentation graphique des eaux analysées par le diagramme de Piper et de Schöeller - Berkaloff sont présentés figure 4 et 5.



**Figure 4.** Représentation sur le diagramme de Piper des résultats des analyses des eaux souterraines du Marais Poitevin, des eaux souterraines situées en amont du Marais Poitevin, de l'eau de mer et de l'eau de pluie.



**Figure 5.** Représentation sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff des résultats d'analyses des eaux souterraines du site expérimental de Marans dans le Marais Poitevin (a), du site expérimental de Saint Hilaire la Palud dans le Marais Poitevin (b), du Quaternaire hors sites expérimentaux dans le Marais Poitevin (c), de l'Oxfordien supérieur localisé en amont du Marais Poitevin (d), de l'eau de mer et de l'eau de pluie.

Les eaux prélevées sur le site expérimental de Marans présentent le même faciès hydrochimique qui est chloruré sodique. Ce faciès est également celui de l'eau de mer et de l'eau de pluie (figures 4 et figure 5a). Sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure 5a), l'allure quasiment similaire des segments de droites reliant les teneurs en ions majeurs des eaux laisse penser que celles-ci semblent subir la même influence ou le même processus de minéralisation. L'allure des segments de droites reliant les ions majeurs de ces eaux sont quasiment identiques à celle de l'eau de mer et de l'eau de pluie. De plus, les teneurs en ions majeurs de ces eaux sont proches de celles de l'eau de mer ce qui suggère une origine marine de ces eaux. Les eaux prélevées sur le site expérimental de SHP ont, des faciès hydrochimiques différents (figures 4 et figure 5b). Sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure 5b), les segments de droites reliant les ions majeurs ne présentent pas la même allure et se recoupent ce qui évoque un processus d'acquisition de ces ions qui est différent. Ainsi, les eaux de l'ouvrage SHP F2 qui capte les formations du Quaternaire présentent un faciès chloruré sodique. A l'inverse, les eaux prélevées dans le forage SHP F3 qui capte le même aquifère que le forage SHP F2 présentent un faciès qui est plutôt sulfaté sodique avec toutefois une teneur assez importante en chlorure. Les eaux échantillonnées dans l'ouvrage SHP F4



qui capte les formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire dans le Marais Poitevin sont de nature chlorurée sodique. Les eaux prélevées dans les ouvrages du Quaternaire en dehors des sites expérimentaux présentent des faciès hydrochimiques différents (figures 4 et figure 5c). Sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure 5c), les segments de droites reliant les ions majeurs se recoupent et n'ont pas la même allure, ce qui permet de conclure à un processus d'acquisition des ions qui est différent. Ainsi, les eaux prélevées à Mazin, Andilly Alon et Taugon sont bicarbonatées calciques, celles prélevées à Arçais et à Le Vanneau sont bicarbonatées sodiques et celles échantillonnées à Marans Flandre sont chlorurées sodiques. Toutefois, les segments de droites qui relient les ions majeurs des eaux souterraines de l'ouvrage de Marans Flandre semblent parallèles à celles de l'eau de mer ce qui permet également de supposer, que ces dernières ont une origine marine. Enfin, les eaux prélevées dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin présentent un faciès hydrochimique unique qui est bicarbonaté calcique ((figures 4 et figure 5d). Sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (figure 5d), l'allure plus ou moins similaire des segments de droites reliant les ions majeurs de ces eaux laisse penser à un processus identique d'acquisition de la minéralisation. Ces eaux sont assez homogènes avec quelques légères différences au niveau de la composition chimique.

- Utilisation de l'analyse en Composante principale (ACP).

Quinze variables à savoir, les paramètres physico-chimiques (T, pH, alcalinité, conductivité, Eh, TDS, oxygène dissous), les ions majeurs (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) et le bromure (Br<sup>-</sup>) ont été prises en compte ainsi que dix-neuf individus représentés par les eaux échantillonnées. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le tableau 2

**Tableau 2.** Corrélation entre les quinze variables

	T	pH	Cond	O <sub>2</sub>	Eh	TDS	Alc	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>
T	1														
pH	-0,670	1													
Cond	-0,033	0,143	1												
O <sub>2</sub>	0,142	0,050	-0,453	1											
Eh	-0,050	0,100	-0,504	0,404	1										
TDS	0,299	-0,205	0,532	-0,242	-0,303	1									
Alc	0,343	-0,332	0,400	-0,136	-0,556	<b>0,784</b>	1								
Na <sup>+</sup>	-0,101	0,228	<b>0,986</b>	-0,464	-0,488	0,495	0,395	1							
Ca <sup>2+</sup>	0,139	-0,290	0,616	-0,271	-0,215	0,330	0,161	0,502	1						
K <sup>+</sup>	-0,180	0,366	<b>0,927</b>	-0,450	-0,369	0,416	0,315	<b>0,966</b>	0,387	1					
Mg <sup>2+</sup>	0,074	-0,007	<b>0,947</b>	-0,397	-0,481	0,500	0,317	<b>0,884</b>	<b>0,771</b>	<b>0,785</b>	1				
Cl <sup>-</sup>	-0,036	0,144	<b>0,998</b>	-0,449	-0,496	0,509	0,375	<b>0,986</b>	0,602	<b>0,925</b>	<b>0,948</b>	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,412	0,457	<b>0,705</b>	-0,462	-0,173	0,152	0,028	<b>0,744</b>	0,449	<b>0,822</b>	0,591	0,690	1		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,317	-0,246	-0,438	0,427	0,534	-0,344	-0,260	-0,416	-0,328	-0,317	-0,439	-0,423	-0,385	1	
Br <sup>-</sup>	-0,017	0,123	<b>0,998</b>	-0,447	-0,503	0,527	0,390	<b>0,981</b>	0,618	<b>0,914</b>	<b>0,954</b>	<b>0,999</b>	0,674	-0,430	1

Les valeurs propres qui expriment la variance de chacun des facteurs sont présentées dans le Tableau 3. Le tableau 4 qui permet de définir chacun des trois axes par rapport aux 15 variables est présenté ci-après.

**Tableau 3.** Pourcentages exprimés par les axes principaux

	Axe 1	Axe 2	Axe 3
Valeur propre	7,92	2,58	1,34
% de variance exprimée	<b>52,78</b>	<b>17,17</b>	<b>8,9</b>
% de variance exprimée cumulée	52,78	<b>69,95</b>	78,85

L'axe 1 exprime à lui seul 53 % de la variance totale (tableau 3). Il est très important par rapport aux autres. Le plan factoriel (1-2) exprime 70 % de la variance totale du nuage de points. En dessous de cette valeur, il est considéré qu'un nombre important d'informations reste caché (Biémi, 1992). Ainsi, toute représentation des données dans ce plan rendra compte de l'essentiel de la structure et ce de façon satisfaisante.

**Tableau 4.** Corrélation entre les axes factoriels et les variables

Identifiants	Variables	Axe 1	Axe 2	Axe 3
1	<b>T</b>	-0,068	<b>0,832</b>	0,302
2	<b>pH</b>	0,135	<b>-0,850</b>	-0,167
3	<b>cond</b>	<b>0,985</b>	-0,009	0,123
4	<b>O<sub>2</sub></b>	-0,539	0,066	0,275
5	<b>Eh</b>	-0,565	-0,262	0,546
6	<b>TDS</b>	0,575	0,530	-0,196
7	<b>Alc</b>	0,454	0,646	-0,393
8	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>0,970</b>	-0,092	0,078
9	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,629	0,213	0,390
10	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>0,910</b>	-0,236	0,113
11	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>0,930</b>	0,101	0,228
12	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>0,978</b>	-0,020	0,139
13	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	<b>0,734</b>	-0,502	0,123
14	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,543	0,135	0,599
15	<b>Br<sup>-</sup></b>	<b>0,979</b>	0,007	0,136

Le facteur 1 exprimant 53 % de la variance est défini par la conductivité électrique (0,985), les ions bromure (0,979), chlorure (0,978), sodium (0,970), magnésium (0,930), potassium (0,910), sulfate (0,734) et à un degré moindre, le calcium (0,629) et le TDS (0,575) (tableau 4). Le potentiel d'oxydoréduction (-0,565), l'ion nitrate (-0,543) et l'oxygène dissous (-0,539) sont faiblement corrélés à l'axe factoriel 1 en opposition avec les variables liées à cet axe. Cette opposition traduit une évolution inverse du potentiel d'oxydoréduction, de l'ion nitrate et de l'oxygène dissous par rapport à la conductivité et aux différents ions mentionnés ci-dessus. L'axe 1 est étroitement corrélé à la conductivité électrique, aux ions bromure, chlorure, sodium, magnésium, potassium, sulfate et calcium, éléments définissant la

minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin. Les affinités entre ces éléments mises en évidence par les coefficients de corrélation (tableau 2) permettent de conclure à une origine commune de ces ions ou ont en commun un phénomène naturel identique. Les teneurs en bromures corrélées avec celles des chlorures (0,999) sont vraisemblablement liées à une origine marine ce qui confirme les résultats déduits de l'étude des diagrammes de Schöeller-Berkaloff. L'origine marine de ces eaux est confortée par la corrélation entre le sodium et le chlorure (0,986) d'une part et le sodium et le bromure (0,981) d'autre part. De même, de fortes corrélations existent entre le bromure et le potassium (0,914), le bromure et le magnésium (0,954), le chlorure et le potassium (0,925), le chlorure et le magnésium (0,948), le sodium et le potassium (0,966), le sodium et le magnésium (0,884). Toutes ces affinités confortent l'idée que ces eaux sont d'origine marine. Toutefois, la corrélation entre le calcium et le magnésium (0,771) montre que la dissolution des carbonates est un processus non négligeable dans la minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin.

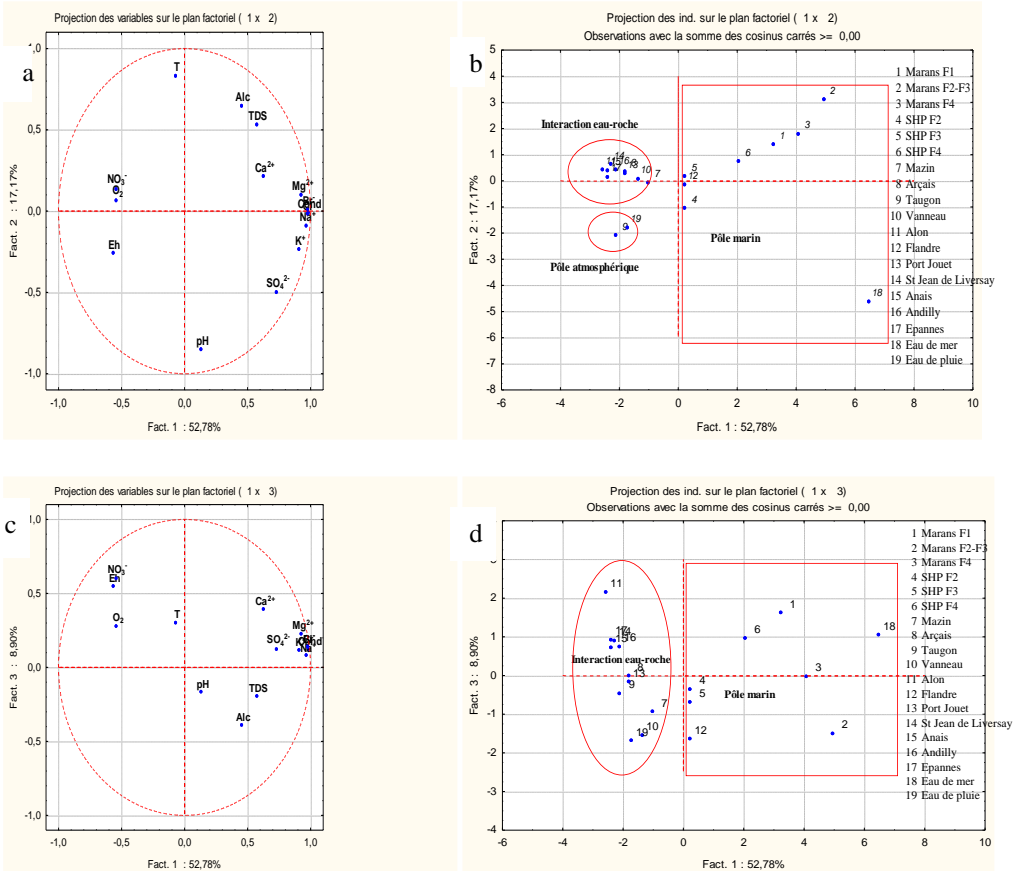
L'axe 2 et l'axe 3 expriment respectivement 17 % et 9 % de la variance. L'axe 2 est essentiellement déterminé par la température (0,832) et à un degré moindre par l'alcalinité (0,646) et le TDS (0,530). Toutefois, l'axe 2 est aussi corrélé au pH en opposition avec les variables liées à cet axe (-0,850). Cette opposition traduit une évolution inverse du pH par rapport à la température, à l'alcalinité et au TDS. Cet axe exprime la minéralisation par interaction entre les eaux souterraines et la roche encaissante due à un long temps de séjour des eaux dans les aquifères. L'axe 3 est quant à lui déterminé par les nitrates (0,599), traceurs de l'influence de l'activité anthropique et par le potentiel d'oxydoréduction (0,546). Les nitrates sont par ailleurs liés au potentiel d'oxydoréduction (0,534) ce qui laisse apparaître que la production de nitrates est également liée à l'existence de conditions aérobies donc de milieu oxydant. La faible corrélation entre le nitrate et les autres ions signifie que cet élément a une origine différente des autres éléments, probablement liée à une pollution anthropique par apports d'eaux superficielles, ou subit une dénitrification en milieu réducteur.

Dans l'espace des individus, la représentation graphique de ces derniers dans les plans factoriels (1-2) et (1-3) (figures 6b, 6d) suggère 2 pôles de minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin qui sont les interactions eaux - roches encaissantes et les apports marins.

Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine l'influence marine sont celles à forte minéralisation. Parmi celles-ci, on distingue les eaux souterraines des sites expérimentaux de Marans et de SHP ainsi que celles de Marans Flandre. Ce sont des eaux à forte conductivité électrique et qui présentent toutes un faciès chloruré sodique à l'exception des eaux souterraines de l'ouvrage SHP F2 qui en plus d'une forte concentration en ion chlorure

possèdent aussi une teneur élevée en sulfates. Il faut tout de même noter que les eaux souterraines de Marans Flandre et celles du Quaternaire du site expérimental de SHP sont proches du pôle interaction eau - roches encaissantes ce qui met en évidence l'apport non négligeable de ce pôle dans la minéralisation de ces eaux (figure 6b). Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine le pôle de minéralisation interaction eau – roches encaissantes sont celles à minéralisation moyenne à faible. On retrouve parmi ces eaux souterraines, celles de Mazin, Arçais, Le Vanneau, Andilly Alon, Port Jouet, Saint Jean de Liversay, Anais, Andilly ville, Epannes et Taugon. Ces eaux souterraines sont toutes bicarbonatées calciques sauf celles de Le Vanneau et d'Arçais qui sont bicarbonatées sodiques. Contrairement aux eaux souterraines prélevées à Mazin et Andilly Alon, qui sont les eaux du Quaternaire, dans lesquelles les bicarbonates et le calcium sont devenus majoritaires grâce aux interactions eau – roches encaissantes, celles d'Arçais et de Le Vanneau ont gardé une teneur plus élevée en sodium avec cependant des ions bicarbonates qui sont devenus majoritaires. Les eaux souterraines de Taugon (figure 6b) présentent une particularité. En effet ce sont les seules eaux qui ont des caractéristiques proches de celles de l'eau de pluie malgré un faciès bicarbonaté calcique. Ces eaux sont donc alimentées par les précipitations actuelles. L'eau de pluie est chloruré sodique. La prédominance de ce faciès dans cette eau montre l'influence des embruns marins sur les eaux de pluie de la région ce qui est justifié par la proximité de l'océan Atlantique.

Cette approche statistique met en évidence deux origines majeures quant à la minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin. Une minéralisation liée à l'eau de mer et une autre liée à l'interaction entre les eaux souterraines et la roche encaissante. Elle insiste surtout sur la forte corrélation existante entre les divers indicateurs d'une minéralisation d'origine marine des eaux souterraines étudiées.



**Figure 6.** Analyse en composantes principales des eaux souterraines du Marais Poitevin, des eaux souterraines situées en amont du Marais Poitevin, de l'eau de mer et de l'eau de pluie dans le plan factoriel 1-2 (a et b) et le plan factoriel 1-3 (c et d)

- Utilisation de la corrélation entre les concentrations des éléments chimiques et les chlorures.  
 Pour l'analyse des résultats, les eaux souterraines ont été regroupées en fonction des conclusions de l'étude ACP.
- **Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine la minéralisation du pôle marin.**

Ce sont les eaux souterraines prélevées sur les sites expérimentaux de Marans, de SHP et de Marans Flandre. Les teneurs en bromures de ces eaux s'alignent sur la droite de mélange eau douce - eau de mer, ce qui confirme l'origine marine de ces eaux (figure 7 a). D'autre part, on observe un enrichissement de ces eaux en calcium sauf pour les eaux quaternaires du site expérimental de Marans (figure 7 e), mais aussi en magnésium (figure 7 d), tandis que les teneurs en sodium (figure 7 b) et en potassium (figure 7 f) diminuent. L'enrichissement en calcium et magnésium pourrait s'expliquer par

l'arrivée d'eau douce ayant circulé au travers des roches carbonatées (calcaires et/ou dolomitiques). En revanche, la pauvreté relative en calcium des eaux du Quaternaire à Marans pourrait s'expliquer par une arrivée d'eau douce plus faible que celle envisagée à SHP, à Marans Flandre et dans les formations de l'Oxfordien du site expérimental de Marans ; ce qui expliquerait également la salinité plus forte de ces eaux. L'hypothèse d'un phénomène d'évaporation à partir d'une eau moyennement minéralisée ne semble pas pouvoir être retenue pour expliquer les observations ci-dessus car, l'application d'un facteur de concentration (déterminé à partir des concentrations en sodium) à une telle eau ne permet pas d'obtenir les teneurs en calcium et magnésium des eaux les plus minéralisées. L'appauvrissement en sulfates de ces eaux sauf celles échantillonnées dans les formations du Quaternaire à Marans, pourrait s'expliquer par les conditions d'oxydoréduction de ces milieux (Ladouche et Weng, 2005), responsables de la réduction des sulfates en sulfures en milieu anaérobie. A l'inverse, des conditions plus oxydantes pour les eaux du Quaternaire du site expérimental de Marans ne semblent pas avoir conduit à une telle réduction, mais avoir au contraire pu oxyder la pyrite mise en évidence lors de l'analyse minéralogique des sédiments issus de ce site (Vincent *et al*, 2022). On ne peut pas exclure des phénomènes liés à la dégradation de la matière organique présente dans le milieu (Giraud *et al*, 2000).

- ***Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine la minéralisation du pôle interactions eau - formations encaissantes***

Parmi ces eaux souterraines, on retrouve celles échantillonnées à la fois dans les sondages recoupant les formations du Quaternaire à Andilly Alon, Arçais, Le Vanneau et Mazin, et celles collectées dans les ouvrages localisés au droit des formations calcaires de l'Oxfordien supérieur situées en amont du Marais Poitevin à Andilly ville, Anais moulin neuf, Port-Jouët, Saint Jean-de-Liversay et Épannes.

Pour les eaux souterraines des formations du Quaternaire, on observe que la diminution des teneurs en chlorure s'accompagne de la diminution des teneurs en bromure (figure 7 a). Toutefois, si la composition des eaux souterraines d'Arçais s'aligne sur la droite de mélange eau douce - eau de mer, on note en revanche que toutes les autres eaux souterraines présentent un enrichissement en bromure. Dans le cas d'Andilly Alon, le sondage se trouvant dans une ferme agricole, on ne peut exclure que l'augmentation en bromure soit liée à une pollution anthropique, attestée par la forte présence de nitrates. Enfin, en ce qui concerne l'enrichissement en bromure des eaux de Le Vanneau et de Mazin, qui sont associées aux horizons tourbeux du marais mouillé, il est probablement lié à la décomposition de la matière organique, comme l'a montré Barbecot, 1999.

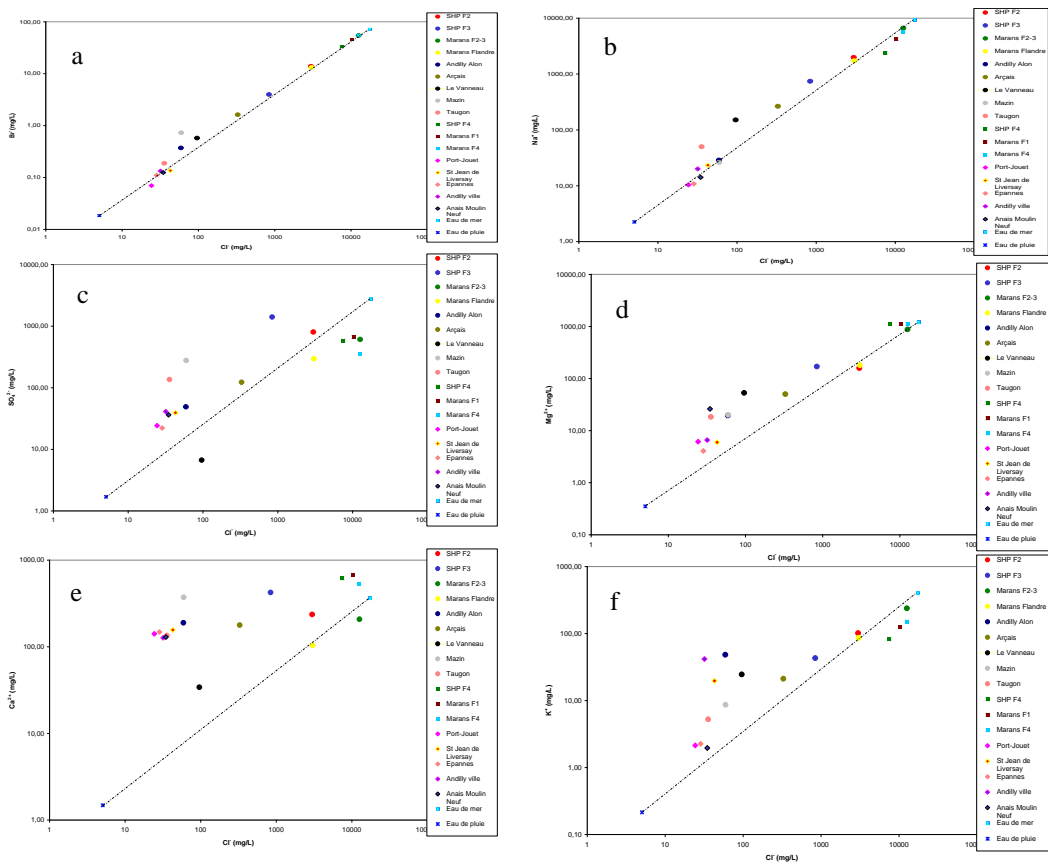
Dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur hors marais,

aucun enrichissement significatif en bromures n'est notable, ce qui pourrait marquer l'origine météorique de ces eaux.

Pour l'ensemble des eaux souterraines de ce groupe, on observe un enrichissement en calcium (figure 7 e), potassium (figure 7 f), magnésium (figure 7 d) et sulfates (figure 7 c), tandis que les teneurs en sodium restent quasiment constantes (figure 7 b). Seules les eaux souterraines de Le Vanneau font exception à ce comportement général puisque l'on y observe plutôt un appauvrissement en sulfates et en sodium (figure 7 b). Comme dans le cas des eaux souterraines où domine la minéralisation à caractère marin (formations quaternaires du marais et leur substratum de l'Oxfordien supérieur), les enrichissements observés en calcium et magnésium dans les eaux de ce groupe peuvent être liés à un apport d'eau douce ayant transité dans les formations carbonatées. L'enrichissement de ces eaux en potassium par rapport à la droite de mélange eau douce - eau de mer, lorsque l'on tend vers le pôle eau douce, s'explique probablement par le fait que les eaux douces entrant ont percolés dans des terrains carbonatés et argilo-carbonatés de l'Oxfordien supérieur qui contiennent des minéraux potassiques, tels que le microcline et l'illite mis en évidence par les analyses minéralogiques des sédiments du Marais Poitevin réalisés par Vincent *et al*, 2022. Ces terrains sont susceptibles de libérer en solution une partie de leur potassium. En ce qui concerne les teneurs en sodium des eaux souterraines de Le vanneau, il apparaît qu'une partie trouve son origine dans un apport d'eau de mer (teneur en chlorure d'environ 96 mg.L<sup>-1</sup>) tandis que la différence est explicable par des arrivées d'eau bicarbonatées ayant lessivé des terrains contenant des feldspaths calco-alcalins, tel que l'albite très présent dans les sédiments du Marais Poitevin (Vincent *et al*, 2022). L'enrichissement en sulfates des eaux souterraines situées dans la partie marais de ce groupe pourrait s'expliquer par l'oxydation de la pyrite très fréquemment rencontrée lors des analyses minéralogiques des sédiments du marais (Vincent *et al*, 2022). Quant à l'enrichissement en sulfates des eaux souterraines des ouvrages localisés sur les coteaux calcaires situés en amont du Marais Poitevin, cet apport de sulfates pourrait être lié à une contamination d'origine agricole (Fidelibus *et al*, 1992; Tahiri, 1996). Les eaux souterraines de Le Vanneau présentent un appauvrissement en sulfates qui peut être du aux conditions réductrices. Les eaux souterraines de l'ouvrage de Taugon sont enrichies en tous les éléments chimiques par rapport à la droite de mélange eau douce - eau de mer. Ce comportement peut rendre compte de l'organisation particulière des terrains à cet endroit. En effet, il s'agit d'une ancienne île calcaire totalement entourée par les formations quaternaires de remplissage. Il existe donc localement un système perméable délimité par des formations imperméables. Par conséquent, les eaux météoriques peuvent pénétrer en profondeur en percolant à travers les bancs calcaires et marno-calcaires formant cette île. Ceci expliquerait la richesse des eaux prélevées en calcium,

magnésium et potassium. Le sodium, les bromures et les sulfates pouvant quant à eux trouver leur source dans les eaux plus salées des formations quaternaires environnantes. Sans exclure qu'une fraction des bromures et des sulfates soit respectivement liée à la décomposition de la matière organique et à la réduction de la pyrite.

L'étude de la corrélation entre l'ion chlorure et les autres éléments chimiques a mis en évidence l'existence d'interaction entre la matrice des roches carbonatées et les eaux souterraines étudiées. Le remplissage sédimentaire du Marais Poitevin est essentiellement constitué de matériaux carbonatés d'origine marine (Vincent *et al.*, 2022). De ce fait, c'est la chimie des carbonates qui gouverne l'essentiel des échanges entre les eaux souterraines et les aquifères de la zone d'étude.



**Figure 7.** Relation entre Br<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, et Cl<sup>-</sup> des eaux souterraines situées dans le Marais Poitevin et celles situées en amont du Marais Poitevin



- Estimation de la proportion d'eau de mer dans les eaux souterraines de la zone d'étude

Dans le Tableau 5, sont présentés les résultats des proportions éventuelles d'eau de mer dans les eaux souterraines du Marais Poitevin. Les résultats mettent en évidence des valeurs de proportion éventuelle et hypothétique d'eau de mer très élevées dans les eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur des sites expérimentaux (valeurs comprises entre 44 et 74 %). De même, les contributions d'eau de mer sont importantes dans les formations quaternaires du site expérimental de Marans (74 %). Une proportion non négligeable d'eau de mer est aussi constatée dans l'ouvrage SHP F2 de Saint Hilaire la Palud ainsi que dans celui de Marans Flandre (18 %). Ainsi, les eaux souterraines du Marais Poitevin présentant un apport important d'eau de mer sont toutes de nature chloruré sodique. Il s'agit des eaux souterraines échantillonnées à Marans F1, Marans F2-3, Marans F4, SHP F4, SHP F2 et Marans Flandre. A contrario, toutes les eaux souterraines analysées qui présentent de faibles proportions d'eau de mer ont un faciès différent du chloruré sodique. Elles sont bicarbonatées calciques avec des teneurs en eau de mer qui varient entre 0 et 1% (Mazin, Andilly Alon, et Taugon), pour ces eaux, seules dominant les interactions eau - roches encaissantes. Elles sont bicarbonatées sodiques avec des teneurs en eau de mer qui vont de 1 à 2% (Arçais et Le Vanneau), pour celles-ci, il existe une faible influence de l'eau de mer matérialisée par l'ion sodium. Elles sont sulfatées sodiques avec teneurs en eau de mer pouvant atteindre les 5% (SHP F3), dans ce cas, il existe également une faible influence d'eau de mer représentée par le sodium et une influence de la dégradation de la matière organique représentée par l'ion sulfate. Les eaux souterraines échantillonnées dans les formations calcaires en dehors du Marais Poitevin présentent des teneurs nulles en eau de mer. Dans ces eaux, seules dominant les interactions eau – roches encaissantes.

**Tableau 5.** Teneurs en eau de mer éventuelle dans les eaux souterraines du Marais Poitevin et dans les eaux souterraines situées en amont du Marais Poitevin

Aquifère	Forage	Cl <sup>-</sup>		Br <sup>-</sup>		Valeurs moyennes	
		Proportion eau de mer (%)	Proportion eau de pluie (%)	Proportion eau de mer (%)	Proportion eau de pluie (%)	Proportion eau de mer (%)	Proportion eau de pluie (%)
Quaternaire	SHP F2	17	83	19	81	<b>18</b>	82
	SHP F3	5	95	6	94	5	95
	Marans F2-3	72	28	76	24	<b>74</b>	26
	Marans Flandre	17	83	18	82	<b>18</b>	82
	Andilly Alon	0	100	0	100	0	100
	Arçais	2	98	2	98	2	98
	Le Vanneau	1	99	1	99	1	99
	Mazin	0	100	1	99	1	99
	Taugon	0	100	0	100	0	100
Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire	SHP F4	43	57	46	54	<b>44</b>	56
	Marans F1	59	41	64	36	<b>61</b>	39
	Marans F4	72	28	77	23	<b>74</b>	26
Oxfordien supérieur hors couverture quaternaire	Port Jouet	0	100	0	100	0	100
	St Jean de Liversay	0	100	0	100	0	100
	Épannes	0	100	0	100	0	100
	Andilly ville	0	100	0	100	0	100
	Anais moulin neuf	0	100	0	100	0	100
	Eau de mer	100	0	100	0	100	0
Eau de pluie	0	100	0	100	0	100	

#### 4. Discussion

Les analyses d'eau en éléments chimiques réalisées sur les prélèvements montrent un phénomène complexe de mélange d'eaux bicarbonatées et salines. Ces résultats confirment ceux obtenus par Salin (1969) et Hantzpergue (1988) sur les eaux souterraines du Marais Poitevin. Ainsi, les eaux prélevées dans le Marais Poitevin présentent pour la majorité des faciès hydrochimiques essentiellement chlorurés sodiques dû à la présence d'eau de mer piégée dans les sédiments du marais. De l'eau de mer piégée

dans des sédiments similaires à ceux rencontrés dans le Marais Poitevin a également été mise en évidence par Ladouche et Weng, 2005 et Giraud et al, 2000 dans le Marais de Rocheford. Cette eau de mer, piégée dans les sédiments, a par la suite évoluée à certains endroits du fait des recharges successives dues aux précipitations et aux différents apports d'eau ayant transitée dans des formations carbonatées contenant des minéraux potassiques (microcline, illite) et sulfatés (pyrite) (Vincent et al, 2022). Cette évolution est matérialisée par le passage du faciès chloruré sodique aux faciès bicarbonatés calciques en passant par les faciès bicarbonatés sodiques et sulfatés sodiques. Les endroits du marais où cette évolution est observée sont ceux dont les conditions hydrodynamiques sont favorables avec des perméabilités plus élevées (Braphond et al, 2023) et probablement des recharges actuelles. A l'inverse, les endroits du Marais Poitevin où cette évolution n'est pas observée sont ceux présentant des conditions hydrodynamiques défavorables avec des perméabilités assez faibles et une mauvaise recharge par les précipitations. Ces faibles perméabilités ont été mises en évidence par les travaux de Braphond et al, 2023 ainsi que ceux de Barbecot, 1999 et de Roy, 1987. Les fortes proportions d'eau de mer (44 à 74 %) dans les eaux souterraines des formations de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire révèlent de très mauvaises conditions hydrodynamiques dans cette entité du marais. Les eaux souterraines d'Andilly Alon et de Taugon sont faiblement chargées en ions dissous (teneur en eau de mer nulle). De plus, les paramètres physico-chimiques (conductivité électrique) sont très proches de ceux des eaux échantillonnées dans les formations de l'Oxfordien supérieur situées en amont du marais. Cela permet d'émettre l'hypothèse selon laquelle ces points pourraient être alimentés par la nappe de l'Oxfordien supérieur localisée en amont du marais. Aussi, il est possible de penser que les apports des eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur situé en amont du marais sont probablement localisés préférentiellement en bordure et/ou à l'intérieur du marais au contact marais/formations de l'Oxfordien supérieur (notamment au niveau des îlots calcaires, cas de Taugon).

Dans ce contexte, il apparaît que les eaux souterraines des formations du quaternaire dans le Marais Poitevin soient peu réalimentées en eau douce depuis la surface. Font tout de même exception à cette règle les îles et leur voisinage immédiat composés de matériaux plus perméables (Anongba, 2007). Quant aux eaux souterraines des formations de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire dans le marais, il n'y a aucun échange entre ces eaux et celles circulant en surface dans le Marais Poitevin. Ce qui explique que ces dernières ont conservé un faciès proche de celui de l'eau de mer qui est le faciès d'origine de la minéralisation des eaux sur ce territoire. Les différents faciès des eaux souterraines et leurs localisations géographiques dans les formations quaternaires du Marais Poitevin permettent de supposer

que les eaux souterraines du Marais Poitevin ne constituent pas une nappe continue mais des nappes discontinues ou « pseudo nappes » juxtaposées, probablement de faible extension à cause de la faible perméabilité des formations du quaternaire. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par plusieurs auteurs dont Calligée (1995) et Tournade (1993) qui qualifient ces nappes de « nappes d'imbibition en sol très argileux » ou « pseudo nappes à surface piézométrique irrégulière ».

## Conclusion

Au vu des études présentées ci-dessus (faciès des eaux, ACP, corrélation entre éléments chimiques et calcul des proportions de l'eau de mer dans les eaux souterraines du Marais Poitevin), il apparaît que la minéralisation des eaux souterraines dans le Marais Poitevin s'est effectuée de façon différente selon la position géographique. Ainsi,

- la minéralisation des eaux souterraines des formations calcaires de l'Oxfordien supérieur localisées en amont du Marais Poitevin est le résultat d'un seul processus qui est l'interaction entre les eaux souterraines et les formations calcaires encaissantes d'où leur faciès bicarbonaté calcique. Ce processus est gouverné par la dissolution des minéraux carbonatés.
- A l'inverse, l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le Marais Poitevin s'est déroulée en deux étapes. La première étape est l'acquisition du faciès chloruré sodique issue d'une contamination d'origine marine. Par la suite, à certains endroits du marais, ce faciès a évolué d'une part sous l'effet de conditions hydrodynamiques favorables ayant provoqué l'évacuation des eaux marines et d'autre part sous l'effet de la dissolution des minéraux carbonatés des formations encaissantes. Cette évolution est parfaitement mise en évidence par les différents faciès des eaux souterraines observés dans le marais qui par endroit sont encore chlorurés sodiques (faciès d'origine) et à d'autres endroits sont sulfatés sodiques, bicarbonatés sodiques et bicarbonatés calciques. Ce dernier faciès est le faciès ultime qui montre la disparition totale de l'influence marine.

**Conflit d'intérêts :** Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

**Disponibilité des données :** Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

**Déclaration de financement :** Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

## References:

1. Anongba B. (2007). Identification du système hydrogéologique des formations quaternaires et callovo-oxfordiennes du Marais Poitevin par approche couplée minéralogique, hydrodynamique et géochimique. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers (France), 319 p.
2. Barbecot F. (1999) : Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères côtiers – Chronologies  $^{14}\text{C}$  –  $^{226}\text{Ra}$ . Thèse de doctorat. Université Paris – Sud. 261p.
3. Bernard M. (2006) : Étude des comportements des sols de marais : évolution minéralogique, structurale et hydromécanique. (Marais de Rochefort et Marais Poitevin). Thèse de doctorat. Université de Poitiers. 309 p.
4. Biémi J. (1992 : Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles. Université d'Abidjan, 480 p.
5. Braphond Rodrigue Vincent Benjamin Anongba, Djémin Jacques Édoukou, Privat Tohouri, and Adja Miessan Germain. (2023): "Contribution to the knowledge of water transfers between the Quaternary and Upper Oxfordian (limestone) aquifers of the southern part of the Poitevin marsh (Poitou-Charentes, France)," *International Journal of Innovation and Scientific Research*, vol. 65, no. 1, pp. 15–29.
6. Camuzard J.P. (2000) : Les sols marqueurs de la dynamique des systèmes géomorphologiques continentaux. Thèse de doctorat de l'Université de Caen. Volume I pp 53-129.
7. Calligée., 1995 : Plaine et marais du sud Vendée et de l'Ouest des Deux-Sèvres : étude globale pour la gestion de la ressource en eau souterraine-le Marais. 59p
8. Ducloux J et Nijs R., (1972) : Contribution à l'étude géologique et géomorphologique du Marais Poitevin, Bull. de la Soc. Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie, 9. t.81, fasc. 3-4, pp. 227-249.
10. Dupuis J., (1969) : Le climat et l'économie de l'eau dans les sols de marais mouillés. Étude pédologique du Marais Poitevin, tome II, 144p.
11. Dupuis J., Dutreuil J.P., et Jambu P. (1965) : Observation sur quelques sols récents du littoral poitevin. Sc. Du sol, n°2, Pp. 173-188
12. El Achleb 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 Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23 - 25. 12p.
13. Fidelibus M.D., Giminez E., Morell I. et Tulipiano L., 1992: Salinisation Processes in the Castellon Plain Aquifer (Spain). Proceedings 12<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting. Barcelona, Spain.
  14. Garnier D., (1975) : Contribution à l'étude de la pédogenèse récente : les sols sur argile à scrobiculaire du Marais Poitevin. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. 91p
  15. Giraud F., Lachassagne P., Ladouche B., Weng P., Pinault J.L., Chevallier C. (2000) : Étude hydrologique et hydrogéologique du marais de Rochefort. BRGM/RP-50247-16. FR, 121p.
  17. Guetté A., Robin M., Godet L., (2018) Historical anthropization of a wetland: steady encroachment by building and roads versus back and forth trends in habitat composition and demography. *Applied Geography*, 92: 41-49
  18. Guetté A., 2018. Contribution à l'analyse multiscalaire de l'anthropisation et de la naturalité en géographie de la conservation. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Loire, 245p.
  19. Hantzpergue P., 1988: Notice de la carte géologique de la feuille de Marans au 1/50 000, Orléans. Xp.
  20. Ladouche B., et Weng P. (2005): Hydrochemical assessment of the Rochefort marsh: role of surface and groundwater in the hydrological functioning of the Wetland. *Journal of hydrology* 314. Pp 22-42.
  21. Marjoua A., 1995 : Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc). Origines de la salinisation des eaux. Thèse de doctorat. Université Paris VI. 102 p.
  22. Mazeau M., 1979: Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Jurassique supérieur entre Courçon et Saint Jean D'Angély. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux I. xp.
  23. Mook W.G., 2001: Environmental Isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications. IHP-V Technical Documents in Hydrology, N° 39. UNESCO - IAEA 257p.
  24. Piper A.M., 1944: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, n° 25, pp. 914-928.
  25. Roy C., 1987 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine jurassique du Sud de la Vendée. Thèse doct. 3e cycle, Nantes 1987, 248 p., 99 fig., 22 tabl., 14 annexes.

26. Safège ingénieurs conseils (2001). Rapport étude hydrogéologique de la nappe intensément exploitée de l'Aunis, 228p
27. Salin R., 1969 : Contribution à l'étude du climat et de l'économie de l'eau dans les sols du Marais Poitevin (marais mouillé). Thèse 3<sup>o</sup> cycle, pédologie. Université de Poitiers 144 p.
28. Schöeller H., 1962 : Les Eaux Souterraines, Hydrogeologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie, Éditions, Paris. 642 p.
29. Simler R., 2023 : Logiciel DIAGRAMMES. Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon. URL: <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>
30. Tahiri A., 1996 : Contribution à la connaissance de l'hydrogéochimie de la nappe de Témara (sud de Rabat), Maroc. Thèse de Dip. Et. Sup. Univ. Abdelmalek Essadi, Tetouan Maroc. 122p.
31. Tellam J.H., 1995: Hydrochemistry of saline groundwaters of the lower Mersey Basin Permo-Triassic sandstone aquifer, UK. *Journal of hydrology*. 165 : 45-48.
32. Tournade F., 1993 : Les prairies naturelles humides communales du Marais Poitevin. Thèse de doctorat de l'université de Rennes. 217p.
33. Vincent Benjamin, A. B. R., Germain, A. M., & Jacques, D. E. (2022). Contribution à la Caractérisation des Sédiments Superficiels Quaternaires de la Partie Sud du Marais Poitevin (Poitou Charentes-France). *European Scientific Journal, ESJ*, 18(40), 211. <https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n40p211>
34. Welsch J. (1916) : Le Marais Poitevin. *Annales de Géographie.*, tome XXV. Pp326- 346.