

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

*Anongba Braphond Rodrigue Vincent Benjamin  
Tohourri 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/esipreprint.9.2023.p533](https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2023.p533)

Approved: 22 September 2023

Posted: 26 September 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Benjamin A. B. R.V., Privat T., Issa S.S. & Germain A.M. (2023). *Origine et Processus de Minéralisation des Eaux Souterraines dans la Partie sud du Marais Poitevin (Poitou-Charentes-France) et de Son Substratum Carbonaté de l'Oxfordien Supérieur*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2023.p533>

### 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 la qualité des eaux. 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, cette étude menée sur les eaux du Marais Poitevin a permis de montrer que les eaux souterraines du marais se singularisent par une grande diversité de

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. L'approche statistique (Analyse en Composantes Principales) retenue pour cette étude, couplée à la corrélation entre les éléments chimiques, mettent en évidence un phénomène complexe de mélange d'eaux météoriques, bicarbonatées et salines. 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 l'interaction entre les eaux souterraines et la roche encaissante.

---

**Mots-clés :** Marais Poitevin, Zone humide, géochimie, Analyse en composantes principales, Diagramme de Piper, Diagramme de Schöeller-Berkaloff

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

*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

---

### 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, 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. The statistical approach (principal component analysis) adopted for this study, coupled with the correlation between the chemical elements, highlights a complex phenomenon of mixing meteoric, bicarbonate and saline waters. 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 to the interaction between Poitevin marsh groundwater and the surrounding rock.

---

**Keywords:** Poitevin marsh, wetland, geochemistry, principal component analysis, Piper diagram, Schöeller-Berkaloff diagram

## 1. Introduction

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 les 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 le fonctionnement du marais Poitevin et aider ainsi à la

mise sur pied d'outils afin de favoriser une gestion durable et efficace de cette zone humide.

L'approche utilisée dans cette étude est basée sur l'apport de la géochimie à la connaissance de l'origine et de la minéralisation des eaux sur ce territoire.

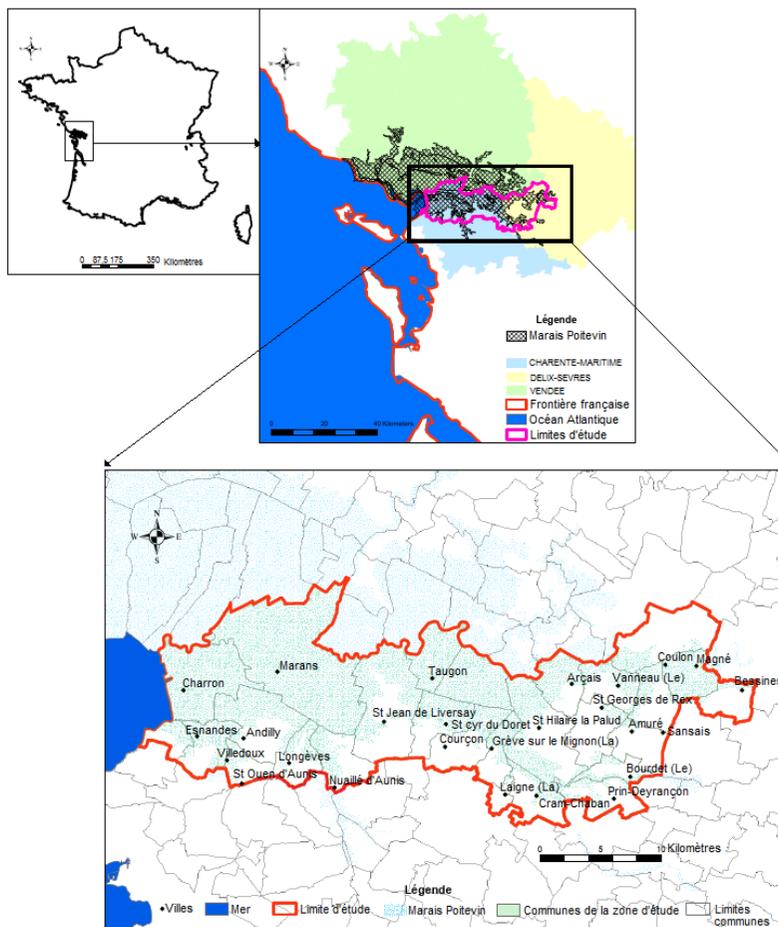
Cette étude a donc pour objectif de mettre en évidence, la nature des eaux rencontrées dans le Marais Poitevin et de déterminer l'origine de leurs minéralisations. Cela permettra de déduire les relations entre les eaux des aquifères du quaternaire et celles de l'Oxfordien supérieur afin de permettre une gestion optimale et durable de ces eaux.

## **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>. Il s'étend sur deux régions (Pays de la Loire et Poitou-Charentes) et trois départements (Vendée, Charente Maritime et Deux-Sèvres). Ce territoire qui regroupe quatre-vingt-deux (82) communes est très fortement peuplé avec une population estimée à cent soixante-un mille (161 000) habitants recensés lors de la campagne de l'Institut National de la Statistique et des études économiques (INSEE) réalisée en 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 qui sont 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, 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. 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 soixante-dix (70) km. La zone retenue pour cette étude est la partie sud du Marais Poitevin. Elle est localisée sur les départements de la Charente Maritime et des Deux Sèvres et est située à proximité du détroit du Poitou, en bordure nord du bassin d'Aquitaine. Elle s'étend de Bessines à l'extrême Est jusqu'à Charron à l'Ouest (Figure 1). Elle englobe au total vingt-sept

(27) communes dont seize (16) communes appartiennent au département de la Charente Maritime et onze (11) communes à celui des Deux Sèvres. La superficie totale de cette zone est estimée à cinq-cent-cinquante (550) km<sup>2</sup>. Le climat est de type océanique avec une pluviométrie moyenne annuelle de sept-cent-soixante-dix (770) mm à huit-cent-quarante (840) mm. La topographie du marais Poitevin est très homogène avec des îlots d'altitudes variant entre dix (10) et vingt (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 feront l'objet de cette étude. Ce sont les aquifères des formations du Quaternaire encore connues sous le vocable de « Bri » et 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)

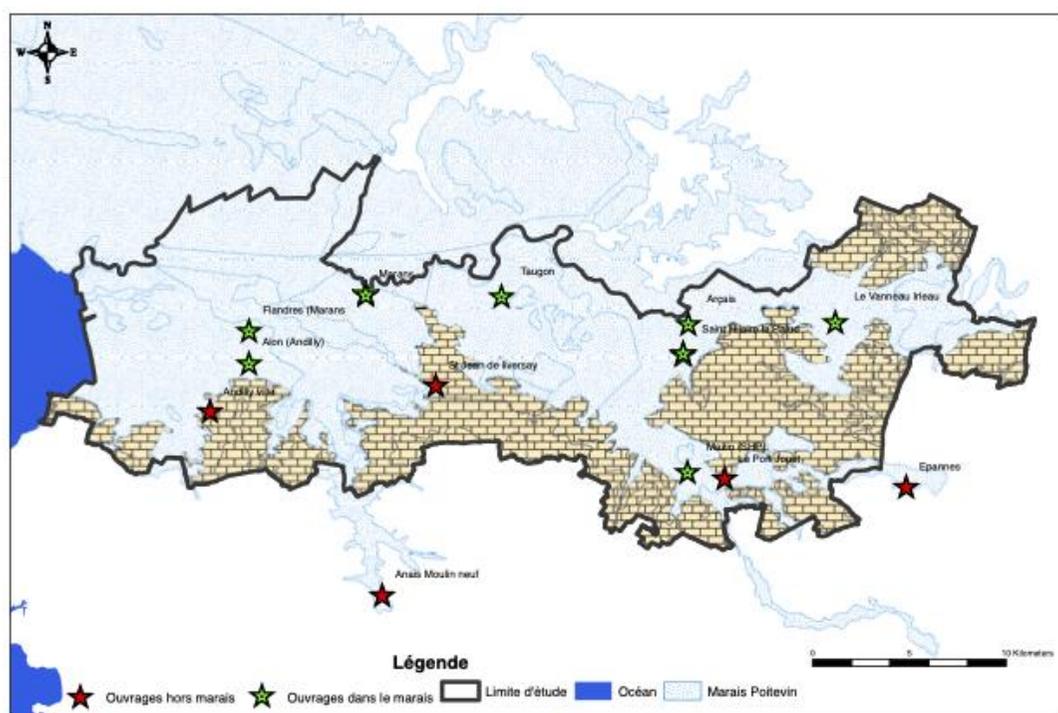
### 3. Matériel et méthodes

#### 3.1. Matériel

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

Pour mener à bien cette étude, il a été décidé la mise en place de dix-neuf (19) ouvrages qui ont permis la campagne d'échantillonnage des eaux souterraines du Marais Poitevin. Quatre de ces ouvrages (Marans F1, Marans F4, SHP F1 et SHP F4) captent les eaux de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire. Parmi ces quatre (4) ouvrages, Marans F1 était à sec le jour de l'échantillonnage. Dix (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 qui est de 3,65 mètres, il a été décidé de représenter les

résultats de ces deux ouvrages sous la notation « Marans F2-3 ». Parmi les ouvrages localisés dans le Marais Poitevin, Huit (8) de ces ouvrages 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, deux (2) ouvrages captent les eaux de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur sous la couverture quaternaire et les deux autres captent les eaux de l'aquifère du Quaternaire. Quant aux eaux de l'Oxfordien supérieur située en dehors du Marais Poitevin, elles sont captées par cinq (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 à l'intérieur et en dehors du Marais Poitevin (Braphond et al, 2023)

### 3.1.2. Matériels utilisés lors de la campagne d'échantillonnage

Dans le cadre de cette étude, le matériel utilisé pour l'acquisition des paramètres physicochimiques que sont, la conductivité électrique, la température et le pH, est l'appareil de chez WTW pH/Cond 340 i. Les mesures d'oxygène dissous, le potentiel redox et les solides totaux dissous (TDS) ont été réalisées à l'aide de l'appareil U-22XD de chez Horiba. La plage de mesure pour la conductivité électrique va de 0 à 1999  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec une résolution de 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De 0 à 19,99  $\text{mS}/\text{cm}$  avec une résolution de

0,01 mS/cm. De 0 à 199,9 mS/cm avec une résolution de 0,1 mS/cm et de 0 à 500 mS/cm avec une résolution de 1 mS/cm. La plage de mesure de la température va de -5,0 à +105°C avec une résolution de 1°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.

### 3.2. Méthode de mesures et d'échantillonnage

Pour la réalisation des analyses chimiques, une campagne d'échantillonnage a été réalisée en février 2007. Dix-sept (17) échantillons ont été collectés au cours de cette campagne dans les ouvrages des sites expérimentaux, des sondages à la tarière et dans les ouvrages captant les eaux des formations de l'Oxfordien supérieur en amont du Marais Poitevin (Figure 2) 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. Ceci 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 récupérer 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 µm et 0,45 µm. Les récipients ainsi préparés ont été 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, 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°C. le WTW pH/Cond 340 i a été régulièrement calibré à l'aide de deux tampons standards à pH 4 et 7. Les mesures d'oxygène dissous, le potentiel redox, les solides totaux dissous (TDS) ont été réalisées à l'aide de l'appareil U-22XD de Horiba.

L'alcalinité a été déterminée immédiatement sur site après échantillonnage par la méthode de titrage Gran en utilisant du HCl 0,1 N. 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 SpectraAA-640 avec une précision  $< \pm 10\%$ .

## **4. Résultats et discussion**

### **4.1. Présentation des résultats**

#### **a. Les eaux souterraines du Quaternaire dans le Marais Poitevin**

Les températures des eaux des formations du quaternaire dans le Marais Poitevin sont assez homogènes et varient de 9,8°C à Taugon à 14,5°C sur le site expérimental de Marans. Excepté Taugon et Mazin dont la température des eaux reflète celle de la saison hivernale, la température moyenne des eaux des formations du Quaternaire dans le Marais Poitevin est de 13,2°C ( $n = 7$  ;  $\sigma = 0,9$  ;  $\sigma/m = 12\%$ ) (tableau 1). Ces eaux souterraines ont un pH neutre avec des valeurs également homogènes qui varient de 6,76 à 7,75 avec une moyenne de 7,2 ( $n = 9$  ;  $\sigma = 0,4$  ;  $\sigma/m = 6\%$ ). Elles sont modérément à fortement minéralisées ( $m = 8063 \text{ mS.cm}^{-1}$  ;  $n = 9$  ;  $\sigma = 11640$  ;  $\sigma/m = 144\%$ .) (tableau 1) avec des valeurs de conductivité qui vont de 910  $\text{mS.cm}^{-1}$  à Taugon à 37100  $\text{mS.cm}^{-1}$  sur le site expérimental de Marans. Les valeurs de conductivité obtenues dans les formations du Quaternaire dans le Marais Poitevin sont fortement hétérogènes avec un coefficient de variation qui est de 144%. Les valeurs d'oxygène dissous obtenues sont également assez hétérogènes avec un coefficient de variation de 71%. Les valeurs d'oxygène dissous vont de 1  $\text{mg.L}^{-1}$  à Saint Hilaire la Palud à 11,2  $\text{mg.L}^{-1}$  à Arçais et à Taugon. Le potentiel d'oxydo-réduction est très hétérogène dans les formations du Quaternaire. Ces valeurs vont de -169 mV sur le site expérimental de Marans à 218 mV à Andilly Alon ( $n = 9$  ;  $\sigma = 137$  ;  $\sigma/m = 858\%$ ). Les valeurs obtenues pour les éléments totaux dissous (TDS) des eaux du quaternaire sont quant à elle hétérogènes avec des teneurs qui 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 mg.L<sup>-1</sup> (site expérimental de Marans). Les teneurs en sulfates des eaux échantillonnées varient de 6,7 mg.L<sup>-1</sup> à Le Vanneau à 1408 mg.L<sup>-1</sup> 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 mg.L<sup>-1</sup> à Mazin à 165 mg.L<sup>-1</sup> 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 mg.L<sup>-1</sup> sauf à Andilly Alon. Cette forte teneur est à mettre en relation avec une possible contamination des eaux de cet ouvrage par l'exploitation agricole dans laquelle il se trouve.

Le seul ouvrage du Quaternaire présentant une faible quantité de calcium se situe à Le Vanneau (34,13 mg.L<sup>-1</sup>). Hormis celui-ci, les teneurs rencontrées dans les eaux des autres ouvrages du Quaternaire fluctuent entre 103,70 mg.L<sup>-1</sup> à Marans Flandres et 423,80 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud. Les teneurs en magnésium des eaux des formations du Quaternaire sont comprises entre 18,4 mg.L<sup>-1</sup> à Taugon et 879 mg.L<sup>-1</sup> sur le site expérimental de Marans. Contrairement au calcium et au magnésium, les teneurs en sodium obtenues sont très élevées dans les eaux des formations du Quaternaire. Ces valeurs vont de 26 mg.L<sup>-1</sup> dans les eaux des formations quaternaires de Mazin à 6630 mg.L<sup>-1</sup> dans celles des formations quaternaires du site expérimental de Marans. Les teneurs en potassium les plus élevées se rencontrent dans les eaux des sites expérimentaux avec des valeurs qui oscillent entre 43 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud et 238 mg.L<sup>-1</sup> sur le site expérimental de Marans.

#### **b. Les eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin**

Dans les formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire, les températures des eaux souterraines mesurées sont très homogènes et varient de 13,7 °C sur le site expérimental de Saint Hilaire la Palud à 14,5 °C sur le site expérimental de Marans ( $m = 14,2$  °C ;  $n = 3$  ;  $\sigma = 0,4$  ;  $\sigma/m = 3$  %) (tableau 1). La conductivité de ces eaux souterraines montre une très forte minéralisation matérialisée par des valeurs de conductivité allant de 22500 mS.cm<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud à 36100 mS.cm<sup>-1</sup> mesurée dans les eaux du forage F4 sur le site expérimental de Marans. Ces valeurs mesurées sont homogènes d'un site expérimental à l'autre ( $m = 29533$  mS.cm<sup>-1</sup> ;  $n = 3$  ;  $\sigma = 5562$  ;  $\sigma/m = 18$  %) avec un coefficient de variation inférieur à 50%. Les eaux des formations de l'Oxfordien supérieur sous le quaternaire dans le Marais Poitevin sont légèrement acides avec des valeurs de pH qui vont de 6,7 à Marans à 6,93 à Saint Hilaire la Palud ( $m = 6,80$  ;  $\sigma$

= 0,09 ;  $n = 3$  ;  $\sigma/m = 1$  %). Les valeurs d'oxygène dissous obtenues sont également assez homogènes avec un coefficient de variation de 27%. Les valeurs d'oxygène dissous obtenues dans ces eaux souterraines vont de 2,7 mg.L<sup>-1</sup> à Marans à 4,9 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud. Le potentiel d'oxydo-réduction est hétérogène dans les formations de l'Oxfordien supérieur sous le Quaternaire dans le Marais Poitevin. Les valeurs mesurées vont de -351 à 138 mV sur le site expérimental de Marans ( $n = 3$  ;  $\sigma = 203$  ;  $\sigma/m = 256$  %). Ces valeurs sont hétérogènes au sein d'un même site. Les valeurs en éléments totaux dissous (TDS) des eaux de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire sont également hétérogènes avec des teneurs qui sont comprises entre 2,94 g.L<sup>-1</sup> et 14 g.L<sup>-1</sup>.

Les teneurs en bicarbonates mesurées dans les échantillons des eaux des formations de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin varient de 497,8 mg.L<sup>-1</sup> dans les eaux du site expérimental de Saint Hilaire la Palud à 1007,7 mg.L<sup>-1</sup> dans celles du site expérimental de Marans. Les teneurs en chlorures des eaux échantillonnées sont comprises entre 7508 mg.L<sup>-1</sup> (site expérimental de Saint Hilaire la Palud) et 12588 mg.L<sup>-1</sup> (site expérimental de Marans). Les teneurs en sulfates des eaux échantillonnées varient de 352,7 mg.L<sup>-1</sup> à 665,3 mg.L<sup>-1</sup> sur le site expérimental de Marans. Les teneurs en nitrate des sites expérimentaux sont inférieures au seuil de détection ce qui souligne la relative bonne protection des eaux de cet aquifère quant aux pollutions liées aux activités anthropiques.

Les teneurs en calcium rencontrées dans les eaux des ouvrages de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin fluctuent entre 530,30 mg.L<sup>-1</sup> et 677 mg.L<sup>-1</sup> à Marans. Les teneurs en magnésium des eaux des formations de l'Oxfordien supérieur sont comprises entre 1105,4 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud et 1129 mg.L<sup>-1</sup> sur le site expérimental de Marans. Comme dans le cas des eaux des formations du Quaternaire, les eaux des formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire présentent des valeurs de sodium assez élevées avec des teneurs qui vont 2387 mg.L<sup>-1</sup> à Saint Hilaire la Palud à 5710 mg.L<sup>-1</sup> dans les eaux des formations de l'Oxfordien supérieur à Marans. Les teneurs en potassium les plus élevées se rencontrent dans les eaux du site expérimental de Marans avec une valeur maximum mesurée à 150,90 mg.L<sup>-1</sup>.

### **c. Les eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur hors Marais Poitevin**

Contrairement aux formations quaternaires, 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%. Dans les formations de l'Oxfordien supérieur situé en dehors du Marais Poitevin, les températures des eaux mesurées varient de

13,6 °C. à 14,8 °C ( $m = 14,2$  °C ;  $n = 5$  ;  $\sigma = 0,4$  ;  $\sigma/m = 2$  %). Cette plage de température est très proche de celle rencontrée dans les formations du Quaternaire et de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin. Les mesures de conductivité obtenue pour les eaux des formations calcaires de l'Oxfordien supérieur en dehors du marais vont de  $731 \text{ mS.cm}^{-1}$  à  $937 \text{ mS.cm}^{-1}$  avec une moyenne de  $805 \text{ mS.cm}^{-1}$  ( $n = 5$  ;  $\sigma = 75$  ;  $\sigma/m = 9$  %). Ces valeurs sont très faibles et homogènes par rapport à celles mesurées sur les eaux rencontrées dans le Marais Poitevin. Les valeurs d'oxygène dissous obtenues sont hétérogènes avec un coefficient de variation de 51%. Les valeurs d'oxygène dissous vont de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  à Port-Jouët à  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  à Anais Moulin Neuf. Le potentiel d'oxydo-réduction est homogène dans les formations de l'Oxfordien supérieur hors marais. Ces valeurs vont de  $80 \text{ mV}$  à Port-Jouët à  $138 \text{ mV}$  à Anais Moulin Neuf ( $n = 9$  ;  $\sigma = 54,3$  ;  $\sigma/m = 37$  %). Les valeurs en éléments totaux dissous (TDS) des eaux de l'Oxfordien supérieur hors marais sont quant à elle 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 les eaux des échantillons de l'Oxfordien supérieur hors marais varient de  $317 \text{ mg.L}^{-1}$  dans les eaux d'Épannes à  $386 \text{ mg.L}^{-1}$  dans celles de Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en chlorures des eaux échantillonnées sont comprises entre  $24 \text{ mg.L}^{-1}$  (Port-Jouët) et  $43 \text{ mg.L}^{-1}$  (Saint Jean-de-Liversay). Les teneurs en sulfates des eaux échantillonnées 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, les eaux échantillonnées dans les formations de l'Oxfordien supérieur en dehors du marais présentent des concentrations assez élevées de 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 de nitrate met en évidence une pollution de ces eaux par les activités anthropiques.

Les teneurs en calcium rencontrées dans les eaux des ouvrages de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin fluctuent entre  $127 \text{ mg.L}^{-1}$  à Andilly ville et  $156 \text{ mg.L}^{-1}$  à Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en magnésium des eaux des formations de l'Oxfordien supérieur hors marais 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 vont  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  à Port-Jouët la Palud 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 maximum mesurée à  $42 \text{ mg.L}^{-1}$ .

#### **d. Les autres sources d'eau.**

Au cours de cette étude, de l'eau de mer et de pluie ont été échantillonnées (tableau 1). De l'eau a également été récupérée dans un canal près du site expérimental de Saint Hilaire la Palud. La température de l'eau

de mer mesurée lors de cette campagne est de 9°C ce qui reflète la température de la saison hivernale. Elle est quasi identique à la température de l'eau de pluie qui est de 10°C. La conductivité de l'eau de mer est très élevée, elle est de l'ordre de 49500 mS.cm<sup>-1</sup> contre une valeur de 150 mS.cm<sup>-1</sup> pour l'eau de pluie. Le pH de l'eau de mer est alcalin avec une valeur de 8. L'eau de pluie quant à elle a un pH neutre avec une valeur 7,25. L'échantillon d'eau de mer, contient des teneurs très élevées en chlorure (17489 mg.L<sup>-1</sup>) et en sodium (9358 mg.L<sup>-1</sup>). Quant à l'eau de pluie, les valeurs de chlorure et de sodium mesurées sont respectivement de 5 mg.L<sup>-1</sup> et de 2,3 mg.L<sup>-1</sup>.

**Tableau 1.** Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude du Marais Poitevin et les teneurs en composition chimique

Forage	T(°C)	Zs <sup>sc</sup> mS.cm <sup>-1</sup>	pH	Eh mV	O <sub>2</sub> mg.L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	F <sup>-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Br <sup>-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Sr <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>	K <sup>+</sup> mg.L <sup>-1</sup>
<b>Marais Poitevin</b>																
<b>Eaux souterraines de l'aquifère du Quaternaire dans le Marais Poitevin</b>																
Andilly Alon	13.7	1189	6.94	218	6.5	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	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	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	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	122.8	756.4	0.2	328.4	1.6	45.1	177.9	0.5	50.3	264.6	21.17
MaransFlandres	12.2	10780	7.46	-155	4.3	295.2	790.6	0.9	3039.5	13.2	13.3	103.7	0.9	181.1	1724	86.20
Marans F2-3	14.5	37100	6.76	-169	1.6	609.3	2154.5	2.1	12623.5	54.4	<	208	26.3	879	6630	238
SHP F3	12.6	5850	6.81	-41	1	1408.7	763.7	0.5	841.2	4	<	423.8	3	170.1	743.1	43
SHP F2	12.5	11400	7.71	171	5.2	804.5	678.3	<	2985	13.9	<	236	2.9	158.4	1983	101.60
<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	665.3	536.8	3.9	10318.5	45.7	<	677	78.8	1113	4189	125
Marans F4	14.5	36100	6.7	-351	2.7	352.7	1007.7	4.5	12588.0	55.3	<	530.3	122	1129	5710	150.90
SHP F4	13.7	22500	6.93	-25	4.9	585.5	497.8	4.3	7508.6	32.8	<	616.5	120	1105	2387	82.30
<b>Eaux souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur hors Marais Poitevin</b>																
Port Jouet	13.9	735	6.90	80	1.1	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	22.20	317	0.06	28.41	0.11	69.39	147.90	0.39	4.07	10.84	2.26
St JeanLiversay	14.5	937	6.92	90	7.9	39.24	386	0.16	42.92	0.14	80.34	156.20	0.40	5.97	23.32	19.68
Andilly ville	14.8	811	6.93	197	4.6	40.83	359	0.12	31.89	0.13	55.62	127.10	0.23	6.60	20.04	41.63
Anais Moulin	14.2	809	6.96	138	10	36.19	376	0.38	34.68	0.12	49.78	129.50	2.26	26.8	14.14	1.96
<b>Autres sources d'eau</b>																
<b>Eau de pluie</b>																
Actuelle	9.7	150	7.25	n.a.	n.a.	1.7	n.a.	<	5	0	0.6	1	<	0.4	2.3	0.21
<b>Cours d'eau</b>																
Canal		1090	7.61			132	395	0.2	76.9	0.4	27.4	170	0.6	17.8	53.4	
<b>Eau de mer</b>																
récente	9	49500	8	n.a.	n.a.	2773	166	<	17489	72	<	363	4	1195	9358	402.20
ancienne	11	56608	9	n.a.	n.a.	3171	190	<	20000	82	<	415	5	1367	10702	

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

## 4.2. Discussion

### a. La Balance ionique

Avant de discuter les résultats d'analyses chimiques obtenues lors de cette étude, il convient d'analyser la fiabilité des dosages effectués. La méthode utilisée est appelée balance ionique ( $\varepsilon$ ). Il faut rappeler qu'en théorie, une eau naturelle est électriquement neutre. De ce fait, lors du dosage d'une eau, la somme (en équivalents-chimiques) des cations devrait être égale à celle des anions (en équivalents-chimiques). En réalité, cette égalité n'est presque jamais obtenue. La différence est attribuée à la présence de certains ions non dosés ou à des erreurs d'analyse. Ainsi, une certaine marge de déséquilibre entre anions et cations est admise. Elle est exprimée

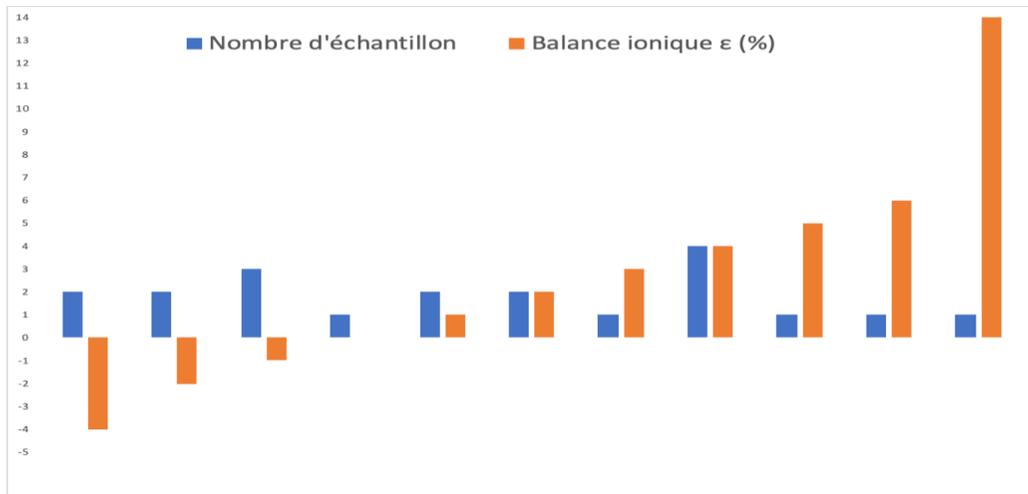
sous la forme d'un écart relatif par la formule 
$$\varepsilon = \frac{\sum^+ - \sum^-}{\sum^+ + \sum^-} \times 100$$

(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 excellente
$-5\% \text{ et } -1\% < \varepsilon < +1\% \text{ et } +5\%$	Fiabilité des résultats d'analyses acceptable
$-10\% \text{ et } -5\% < \varepsilon < +5\% \text{ et } +10\%$	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  $\varepsilon < \pm 5\%$ . Le contrôle de la qualité des résultats d'analyses par la balance ionique a été appliqué à toutes les analyses réalisées. Les résultats obtenus montrent que 90 % des 21 analyses réalisées présentent une balance ionique  $\varepsilon < \pm 5\%$  (figure 3). Seuls les résultats d'analyses de l'échantillon de l'eau récupéré dans un canal près du site expérimental de Saint Hilaire la Palud et ceux d'un des deux échantillons d'eau de pluie présentent une balance ionique qui ne respecte pas le critère  $\varepsilon < \pm 5\%$  (avec des valeurs de balance ionique respectivement de +6% et +14%). La fiabilité des résultats de ces analyses étant médiocre à douteuse. Les résultats de ces analyses n'ont pas été discutés dans cette étude.



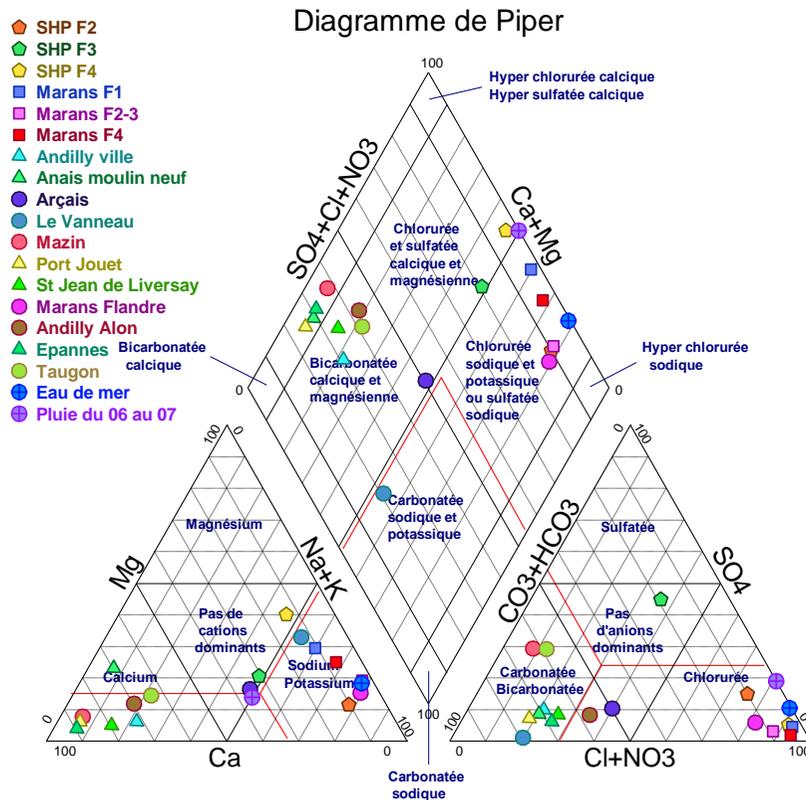
**Figure 3.** Évaluation de la fiabilité des résultats d'analyses chimiques des échantillons des eaux souterraines du Marais Poitevin par la balance ionique

### b. Le faciès des eaux de la zone d'étude

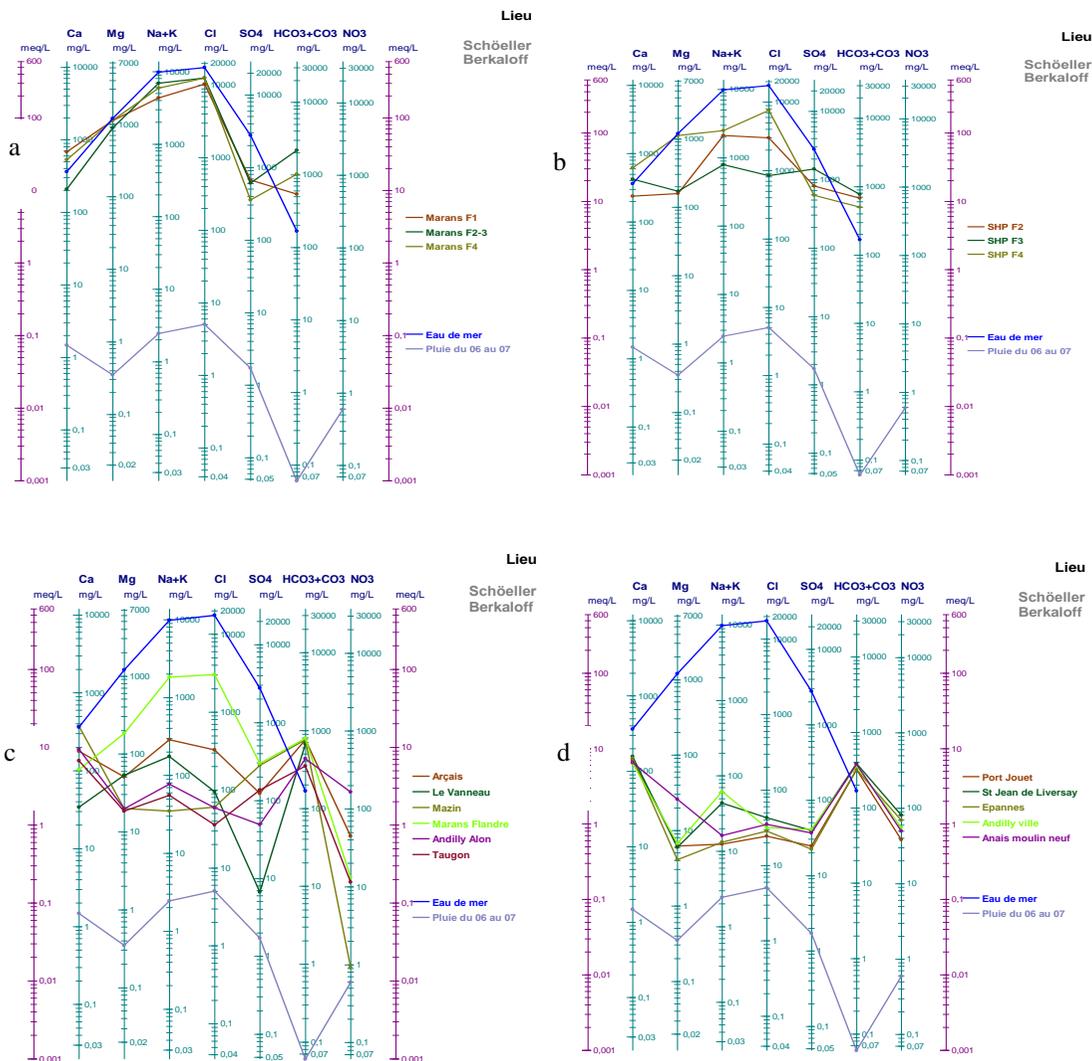
Les faciès hydrochimiques sont couramment utilisés en hydrogéologie pour la description de la composition des eaux naturelles. La nécessité de permettre une comparaison aisée voire de classer les eaux naturelles selon les échantillons analysés a induit l'utilisation de représentation graphique. Celles utilisées dans ce travail sont les diagrammes de Piper (Piper 1944) et de Schöeller-Berkaloff (Shöeller, 1962). Le premier permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions. La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée. Le second diagramme, est une représentation graphique semi-logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en  $\text{mg.L}^{-1}$  sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique permet de visualiser le faciès des eaux analysées. Ces deux représentations ont été utilisées car elles sont complémentaires. En effet si elles permettent toutes les deux la détermination du faciès d'une eau, le diagramme de Schöeller - Berkaloff indique pour chaque eau analysée la teneur moyenne ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) en éléments majeurs de ces eaux. Cette donnée qui n'apparaît pas sur le diagramme de Piper est toute aussi utile à la comparaison de la composition chimique des

eaux provenant de différents aquifères.

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



**Figure 4.** Représentation sur le diagramme de Piper des résultats des analyses des eaux souterraines du Marais Poitevin, des eaux souterraines en dehors 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 en dehors 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 indépendamment de l'aquifère. En effet quel que soit le type d'aquifère (aquifère de l'Oxfordien supérieur et du Quaternaire), le faciès des eaux prélevées sur le site expérimental de Marans est chloruré sodique. Ce faciès est également celui de l'eau de mer et de l'eau de pluie (figures 4 et figure 5a). Les eaux prélevées sur le site expérimental de Saint Hilaire la Palud ont, contrairement aux eaux précédentes, des faciès

hydrochimiques différents ((figures 4 et figure 5b). Ainsi, les eaux échantillonnées dans 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). Ainsi, les eaux prélevées à Mazin, Andilly Alon et Taugon sont bicarbonatées calciques, celles échantillonnées à Marans Flandre sont chlorurées sodiques, celles prélevées à Arçais et à Le Vanneau sont bicarbonatées sodiques. Les eaux prélevées dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin présentent un faciès unique qui est bicarbonaté calcique ((figures 4 et figure 5d). Ces eaux sont assez homogènes avec quelques légères différences au niveau de la composition chimique.

### **c. Origine de la minéralisation des eaux de la zone d'étude**

- Utilisation de l'Analyse en Composante principale (ACP) pour la compréhension de la minéralisation des eaux de la zone d'étude.

Pour comprendre l'origine de la minéralisation des eaux échantillonnées, une analyse statistique (ACP) a été réalisée à l'aide de la version 10 du logiciel STATISTICA de l'éditeur StatSoft France sur l'ensemble des 19 échantillons d'eaux souterraines, de pluie et de mer.

Quinze variables à savoir, les paramètres physico-chimiques (T, pH, alcalinité, conductivité, Eh, TDS, oxygène dissous), les ions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) et le bromure ( $\text{Br}^-$ ) 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 tableau2.

**Tabelau 2.** Correlation entre les quinze variables

	T	pH	Cond	O2	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												
O2	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	0,784	1								
Na <sup>+</sup>	-0,101	0,228	0,986	-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	0,927	-0,450	-0,369	0,416	0,315	0,966	0,387	1					
Mg <sup>2+</sup>	0,074	-0,007	0,947	-0,397	-0,481	0,500	0,317	0,884	0,771	0,785	1				
Cl <sup>-</sup>	-0,036	0,144	0,998	-0,449	-0,496	0,509	0,375	0,986	0,602	0,925	0,948	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0,412	0,457	0,705	-0,462	-0,173	0,152	0,028	0,744	0,449	0,822	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	0,998	-0,447	-0,503	0,527	0,390	0,981	0,618	0,914	0,954	0,999	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	52,78	17,17	8,9
% de variance exprimée cumulée	52,78	69,95	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. 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	0,832	0,302
2	<b>pH</b>	0,135	-0,850	-0,167
3	<b>Cond</b>	0,985	-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>	0,970	-0,092	0,078
9	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0,629	0,213	0,390
10	<b>K<sup>+</sup></b>	0,910	-0,236	0,113
11	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,930	0,101	0,228
12	<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,978	-0,020	0,139
13	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,734	-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>	0,979	0,007	0,136

Le facteur 1 exprimant 53 % de la variance est défini par la conductivité (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) (figure 5a, 5c). 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, 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 dans les eaux souterraines du Marais Poitevin. Les teneurs en bromures corrélées avec celles des chlorures (0,999) sont vraisemblablement liées à une origine marine. Cette hypothèse 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'hypothèse sur l'origine marine des eaux souterraines du Marais Poitevin. Toutefois, la corrélation entre le calcium et le magnésium (0,771) montre que la dissolution des carbonates est également un processus essentiel dans la minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin.

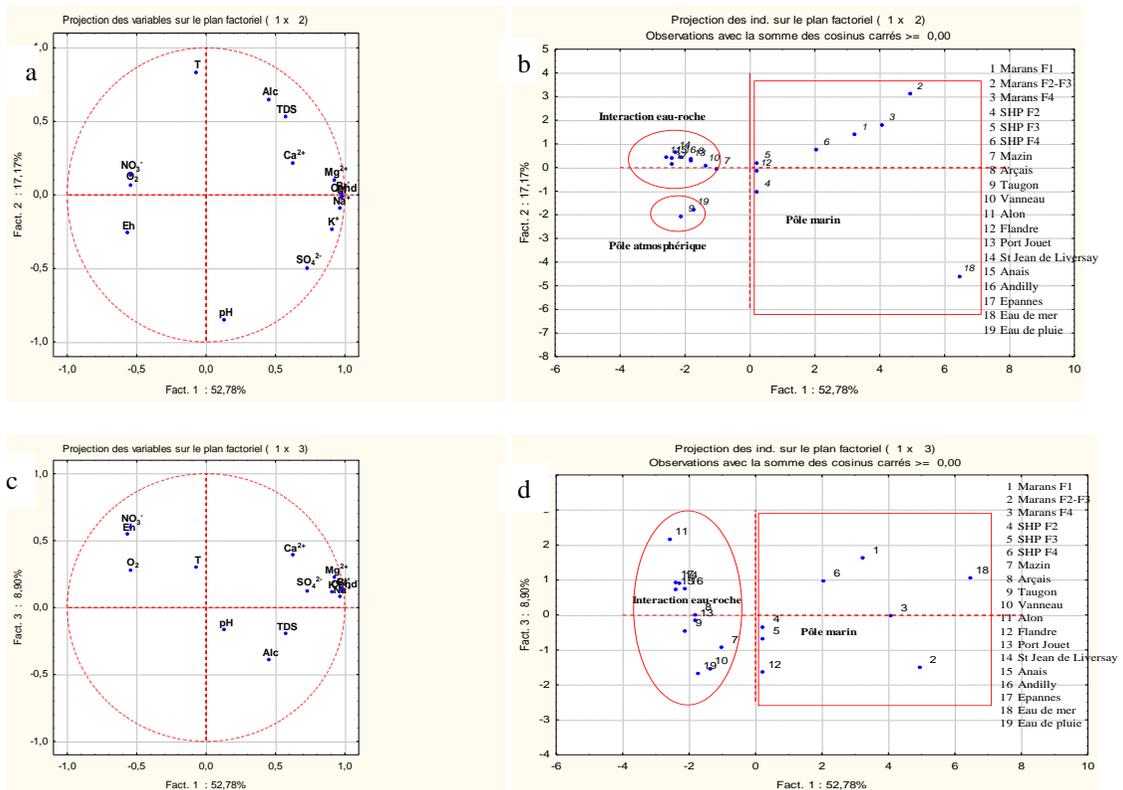
L'axe 2 et l'axe 3 expriment respectivement 17 % et 9 % de la variance. L'axe 2 est essentiellement déterminé par la température (0,832) et à un degré moindre par l'alcalinité (0,646) et le TDS (0,530). Toutefois, l'axe 2 est aussi corrélé au pH en opposition avec les variables liées à cet axe (-0,850). Cette opposition traduit une évolution inverse du pH par rapport à la température, à l'alcalinité et au TDS. 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 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 trois pôles de minéralisation des eaux souterraines du Marais Poitevin : les apports atmosphériques, les interactions eaux - roches encaissantes et les apports marins.

Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine le pôle marin sont celles à forte minéralisation. Parmi celles-ci, on distingue les eaux souterraines des sites expérimentaux de Marans et de Saint Hilaire la Palud 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 à Saint Hilaire la Palud 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 Saint Hilaire la Palud 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 et Epannes. 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. Enfin le pôle atmosphérique est dominant dans les eaux souterraines de Taugon (figure 6b). En effet ce sont les seules eaux souterraines qui se retrouvent avec les eaux atmosphériques. Ces eaux sont faiblement minéralisées. Le faciès des eaux souterraines de Taugon est bicarbonaté calcique ce qui montre encore une fois l'influence de l'interaction eau – roches encaissantes dans la minéralisation de ces eaux. 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, de la zone en amont, 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 différents éléments chimiques pour la compréhension de la minéralisation des eaux de la zone d'étude

Le chlorure est un ion qu'on peut qualifier de conservateur 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). Ainsi toute variation de sa teneur est très souvent attribuée à des phénomènes naturels tels que l'évaporation, l'évapotranspiration, l'intrusion d'eau marine ou à des phénomènes anthropiques tels que des pollutions par des eaux usées.

Cette étude est donc basée sur la relation entre les chlorures et d'autres éléments chimiques des eaux souterraines prélevées. 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. Les éléments chimiques utilisés dans cette analyse sont le bromure, le sodium, le potassium, les sulfates, le

calcium, et le magnésium.

Pour la discussion des résultats, les échantillons ont été subdivisés en trois groupes 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 et de Saint Hilaire la Palud ainsi que celles échantillonnées à 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 en partie 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 Saint Hilaire la Palud, 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 exclure également 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 quaternaires 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.

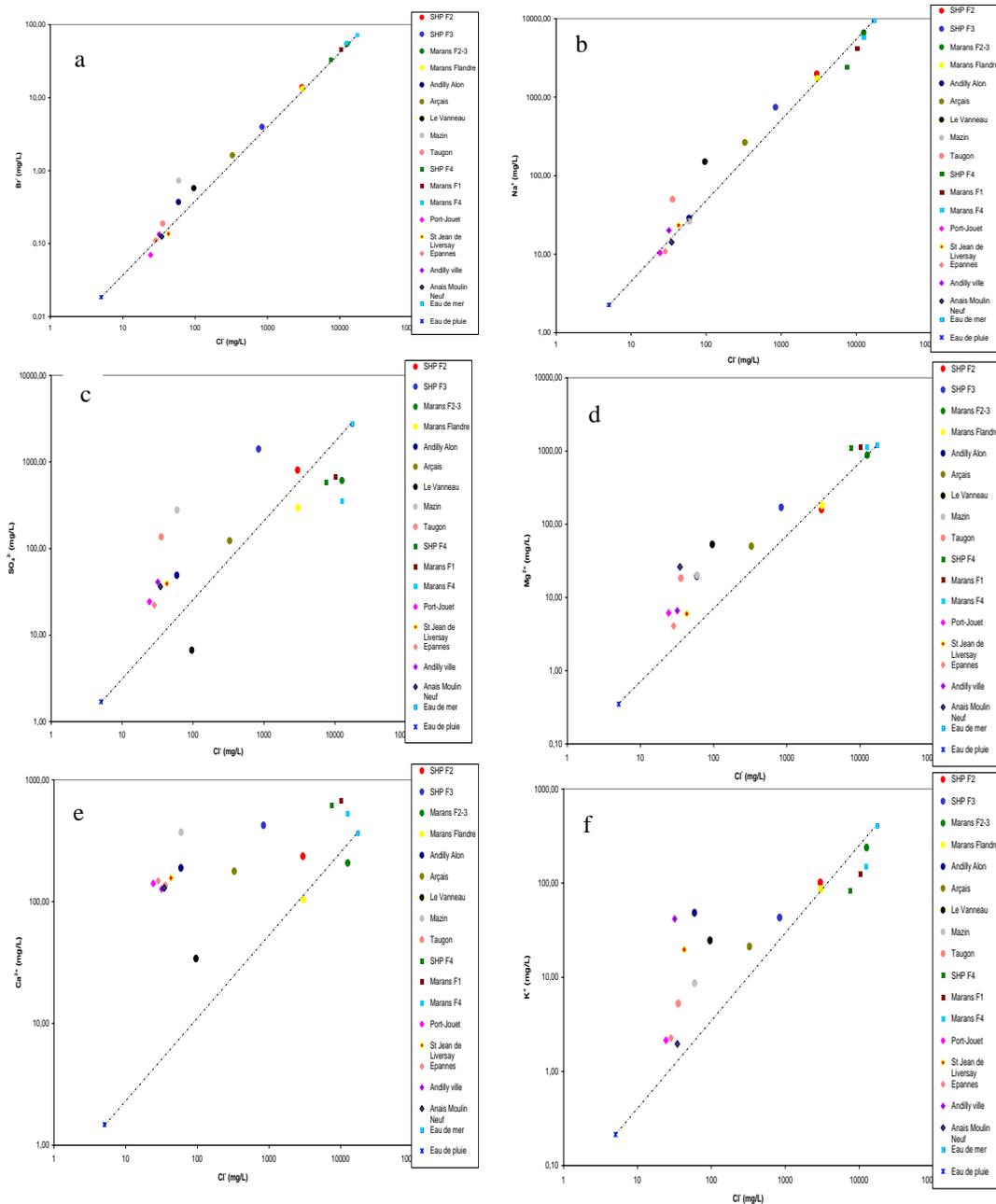
Pour les eaux souterraines des formations quaternaires, on observe que la diminution des teneurs en chlorure s'accompagne de la diminution des teneurs en bromure (figure 7 a). Toutefois, si la composition des eaux souterraines d'Arçais s'aligne sur la droite de mélange eau douce - eau de mer, on note 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, ils sont probablement liés à la décomposition de 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 souterraines.

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. Pour 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 hors marais, 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. Cet appauvrissement pourrait être dû aux conditions réductrices dans lesquelles baignent ces dernières.

*Les eaux souterraines du Marais Poitevin où domine la minéralisation du pôle atmosphérique.* Ce groupe d'eaux souterraines ne renferme que les eaux souterraines de l'ouvrage de Taugon. Par rapport à la droite de mélange eau douce - eau de mer, ces eaux souterraines sont enrichies en tous les éléments chimiques. 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.



**Figure 7.** Relation entre  $Br^-$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , et  $Cl^-$  des eaux souterraines du Marais Poitevin et en amont

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

Dans les paragraphes précédents, il a été mis en évidence l'origine marine des eaux souterraines du Marais Poitevin. Pour asseoir cette hypothèse, 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 ces eaux souterraines.

Admettons que les eaux souterraines du Marais Poitevin ont des teneurs en chlorure et bromure résultant uniquement d'un mélange complet du type eau de mer, eau de pluie. En dehors de toute pollution anthropique, cette hypothèse peut être considérée comme une condition remplie même s'il a été démontré que les teneurs en bromure de certaines eaux souterraines du Marais Poitevin ont évolué sous l'effet de la dégradation de la matière organique. Si on émet une seconde hypothèse selon laquelle cette évolution des teneurs en bromure n'a pas perturbé l'équilibre qui s'est établi lors de la contamination marine des eaux souterraines du Marais Poitevin, il est possible d'admettre que le chlorure et le bromure ont été conservés et n'ont donc pas évolué de façon significative. Dès lors, ils constituent de bons traceurs de mélange.

Il est donc possible d'écrire, pour les teneurs en chlorure et en bromure dans les eaux souterraines du Marais Poitevin, ce qui suit en  $\text{mg.L}^{-1}$  (Marjoua, 1995 ; Barbecot, 1999):

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

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 sont représentés par les échantillons d'eau de mer et de pluie récupérés au cours de la campagne de février 2007.

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 soit bicarbonatées calciques (Mazin, Andilly Alon, et Taugon avec 99 à 100 % d'eau de pluie), pour ces eaux souterraines, seules dominent les interactions eau - roches encaissantes, soit bicarbonatées sodiques (Arçais et Le Vanneau avec 98 à 99 % d'eau de pluie), pour celles-ci, il existe une faible influence de l'eau de mer matérialisée par l'ion sodium, soit sulfatée sodique (SHP F3 avec 95 % d'eau de pluie) dans laquelle 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 quasi nulles en eau de mer (100 % d'eau de pluie). Dans ces eaux, seules dominent les interactions eau – roches encaissantes.

Ainsi, les eaux souterraines analysées présentent pour certaines d'entre elles une origine marine dominante. La plupart de celles dans lesquelles les eaux marines ne sont pas dominantes présentent une minéralisation marquée par les interactions eau-roches encaissantes.

Toutes les eaux souterraines matérialisées par de faibles teneurs en eau de pluie mettent en évidence la faible recharge de ces eaux doublée de conditions hydrodynamiques défavorables qui se traduisent par une faible circulation des eaux ce qui est conforme aux résultats des tests hydrodynamiques obtenus par Braphond et al, 2023.

**Tableau 5.** Proportion marine éventuelle dans les eaux souterraines du Marais Poitevin et en amont

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	18	82
	SHP F3	5	95	6	94	5	95
	Marans F2-3	72	28	76	24	74	26
	Marans Flandre	17	83	18	82	18	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	44	56
	Marans F1	59	41	64	36	61	39
	Marans F4	72	28	77	23	74	26
Oxfordien supérieur hors couverture quaternaire	Port Jouet	0	100	0	100	0	100
	St Jean de Liversay	0	100	0	100	0	100
	Epannes	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
	Pluie du 06 au 07février 2007	0	100	0	100	0	100

Les analyses chimiques réalisées dans le cadre de ce travail montrent que les eaux souterraines des ouvrages calcaires en dehors du marais sont toutes bicarbonatées calciques. Elles sont typiques d'eau enrichie en bicarbonates et en calcium par dissolution des formations carbonatées encaissantes.

Les eaux souterraines prélevées dans les formations du Marais Poitevin (formations quaternaires et de l'Oxfordien supérieur) présentent pour beaucoup des faciès essentiellement chlorurés sodiques. Ce faciès témoigne de l'origine marine de ces eaux. Cette dernière a d'ailleurs été mise en évidence par le calcul de la proportion d'eau de mer contenue dans ces eaux souterraines avec des teneurs pouvant atteindre 75 %. Ces différentes proportions d'eau de mer dans les eaux souterraines des formations quaternaires du Marais Poitevin mettent en évidence l'hétérogénéité spatiale du comportement hydrodynamique de ces dernières. En effet, les endroits du Marais Poitevin à faible proportion d'eau de mer sont probablement les zones à perméabilité plus élevée. A l'inverse, les zones où demeurent encore de fortes proportions d'eau de mer sont à mettre en relation avec des propriétés hydrodynamiques défavorables ce qui ne permet pas l'évacuation de ces eaux. Certaines eaux souterraines prélevées dans le Marais Poitevin présentent un faciès autre que chloruré sodique. Parmi celles-ci, figurent les eaux souterraines prélevées à Mazin, à Andilly Alon, à Taugon à Arçais, à Le Vanneau et dans l'ouvrage SHP F3 du site expérimental de Saint Hilaire la Palud. Ces eaux souterraines ont toutes en commun une très faible proportion d'eau de mer (< 5 %) ce qui expliquerait des faciès autres que chloruré sodique. Ainsi, la minéralisation de ces eaux est fortement marquée par les échanges eau – roches encaissantes rendant les eaux souterraines de Mazin, Andilly Alon et Taugon bicarbonatées calciques, celles d'Arçais et de Le Vanneau bicarbonatées sodiques et celles de l'Ouvrage F3 du site expérimental de Saint Hilaire la Palud sulfatées sodiques. Ces faciès hydrochimiques couplés à l'analyse en composantes principales (ACP) et à la comparaison des éléments chimiques entre eux, permettent d'affirmer que ces eaux souterraines ont subi de nombreuses interactions avec l'aquifère (dissolution, réduction).

Au vu des études présentées ci-dessus (faciès des eaux, ACP et corrélation entre éléments chimiques), 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.

- 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 des interactions entre les eaux souterraines et la matrice 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.

## Conclusion

Les résultats acquis sur le domaine sud du Marais Poitevin permettent de mieux comprendre l'origine de la minéralisation des eaux sur ce secteur et de mieux appréhender les écoulements d'eau dans le marais. En effet, Les études hydrochimiques ont permis d'améliorer les connaissances de l'hydrosystème du Marais Poitevin. Les analyses d'eau réalisées sur les prélèvements effectués dans de nombreux sondages montrent un phénomène complexe de mélange d'eaux météoriques, bicarbonatées et salines. Ainsi, les eaux prélevées dans le Marais Poitevin présentent pour beaucoup des faciès essentiellement chlorurés sodiques notamment dans sa partie Ouest aux environs de Marans et à certains endroits dans sa partie Est aux environs de Saint Hilaire la Palud. La salinité des eaux souterraines à certains endroits du Marais Poitevin, aussi bien dans le Quaternaire que dans l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire, est due à la présence d'eau de mer piégée dans les sédiments du marais. La présence de cette eau de mer confère aux eaux souterraines du Marais Poitevin un faciès chloruré sodique. 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 (Braphond et *al*, 2023) et une mauvaise recharge par les précipitations. Les fortes proportions d'eau de mer dans les eaux souterraines des formations de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire révèlent de très mauvaises conditions hydrodynamiques dans cette entité du marais (Braphond et *al*, 2023). Les ouvrages d'Andilly Alon et de Taugon présentent quelques caractéristiques intéressantes. En effet, les eaux souterraines de ceux-ci sont faiblement chargées en ions dissous (teneur en eau de mer nulle). De plus, les paramètres physico-chimiques (conductivité) 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 en amont du marais. Aussi, il est possible de penser que les apports des eaux souterraines de l'Oxfordien supérieur hors 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, les eaux circulant dans le Marais Poitevin pénètrent peu dans les formations quaternaires particulièrement peu perméables. De ce fait, 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. 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.

**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.V.R. (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. 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.
5. 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.
6. 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, t.81, fasc. 3-4, pp. 227-249.
7. 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.
8. 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
9. 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.
10. 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.
11. 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
12. 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- FR, 121p.

13. 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
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Mook W.G., 2001: Environmental Isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications. IHP-V Technical Documents in Hydrology, N° 39. UNESCO - IAEA 257p.
19. Piper A.M., 1944: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, n° 25, pp. 914-928.
20. Safège ingénieurs conseils (2001). Rapport étude hydrogéologique de la nappe intensément exploitée de l'Aunis, 228p
21. Schöeller H., 1962 : Les Eaux Souterraines, Hydrogéologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson et Cie, Éditions, Paris. 642 p.
22. 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.
23. Tellam J.H., 1995: Hydrochemistry of saline groundwaters of the lower Mersey Basin Permo-Triassic sandstone aquifer, UK. *Journal of hydrology*. 165 : 45-48.
24. 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>
25. Welsch J. (1916) : Le Marais Poitevin. *Annales de Géographie.*, tome XXV. Pp326-346.