

Évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines du Quaternaire de la partie sud du Marais Poitevin (Nouvelle-Aquitaine France) et de son substratum carbonaté de l'Oxfordien supérieur

Résumé

Le Marais Poitevin, zone humide anthropisée de l'ouest de la France, constitue une importante ressource pour l'activité agricole locale. Cette étude a pour objectif d'évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines issues des formations quaternaires et du substratum carbonaté de l'Oxfordien supérieur dans la partie sud du marais. Dix-sept échantillons d'eau ont été collectés et analysés. Les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissous (TDS), le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), la Température et l'oxygène dissous (O_2) ont été mesurés in situ. Les teneurs en ions majeurs et mineurs ont été déterminées en laboratoire par spectrométrie d'absorption atomique et chromatographie ionique. Les résultats montrent une hiérarchie au niveau de l'abondance des cations et des anions qui est la suivante : $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ et $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$. Les diagrammes de Piper indiquent deux principaux faciès hydrochimiques : Na^+-Cl^- et $Ca^{2+}-HCO_3^-$. L'évaluation basée sur les indices tels que la conductivité électrique (CE), le rapport d'absorption du sodium (SAR), le pourcentage du sodium soluble (SSP), le rapport de Kelly (KR), l'indice de perméabilité (IP), le rapport d'absorption du magnésium MAR, et la dureté totale (DT) révèle que les eaux de l'Oxfordien supérieur situées en périphérie du marais sont utilisables pour l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés. En revanche, les eaux internes du marais, en raison de leur forte salinité, sont inadaptées à l'irrigation conventionnelle. Cette étude souligne la nécessité d'une gestion intégrée et adaptée des ressources hydriques dans ce contexte fragile.

Mots clés : Marais Poitevin, Zone humide, irrigation, eau souterraine, Salinité.

Abstract

The Marais Poitevin, an anthropogenically influenced wetland located in western France, constitutes a critical resource for local agricultural activities. This study aims to evaluate the irrigation suitability of groundwater originating from Quaternary deposits and the Upper Oxfordian carbonate substratum in the southern sector of the marsh. Seventeen groundwater samples were collected and subjected to comprehensive analysis. In situ measurements were conducted for key physicochemical parameters, including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), redox potential (Eh), temperature, and dissolved oxygen (O_2). Major and minor ion concentrations were determined using atomic absorption spectrometry and ion chromatography. The analytical results reveal the following order of ion abundance: $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ among cations, and $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ among anions. Piper diagram interpretation identifies two predominant hydrochemical facies: Na^+-Cl^- and $Ca^{2+}-HCO_3^-$. Evaluation based on irrigation indices including electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), soluble sodium percentage (SSP), Kelly's ratio (KR), permeability index (PI), magnesium adsorption ratio (MAR), and total hardness (TH) indicates that groundwater from the Upper Oxfordian located along the marsh periphery is suitable for the irrigation of salt-tolerant crops cultivated on well-drained soils. Conversely, groundwater from the central marsh area, characterized by elevated salinity, is deemed unsuitable for

50 conventional irrigation practices. These findings underscore the necessity for integrated and
51 adaptive water resource management strategies to preserve this vulnerable ecosystem.
52
53 Keywords: Poitevin marsh, wetland, irrigation, groundwater, Salinity.
54

UNDER PEER REVIEW IN IJAR

55 1. Introduction

56 1.1. Contexte et justification

57 Les zones humides, en tant qu'écosystèmes d'interface entre les systèmes aquatiques et
58 terrestres, jouent un rôle fondamental dans le maintien des équilibres hydrologiques, la
59 régulation climatique, la séquestration du carbone, la conservation de la biodiversité et la
60 fourniture de nombreux services écosystémiques (Mitsch et Gosselink, 2000 ; Junk et al.,
61 2013). Leur valeur écologique et socio-économique est aujourd'hui largement reconnue.
62 Toutefois, leur forte attractivité pour les activités humaines, notamment l'agriculture,
63 l'urbanisation et l'industrialisation, a entraîné leur dégradation rapide à l'échelle mondiale.
64 En Europe, il est estimé que plus de 60 % des zones humides ont disparu entre 1950 et 1970,
65 principalement sous l'effet des aménagements anthropiques (Fustec et Lefeuvre, 2000 ;
66 Mitsch et Gosselink, 2000).

67 Le Marais Poitevin, deuxième plus grande zone humide de France après la Camargue,
68 constitue un exemple de ces dynamiques d'anthropisation. Modelé depuis le Moyen-Âge par
69 des opérations successives d'assèchement et d'endiguement, cet espace a vu sa structure
70 hydrologique naturelle profondément altérée pour permettre l'extension de la surface agricole
71 utile. Ces aménagements, intensifiés au XX^e siècle, ont entraîné la perte de plus de 50 % des
72 prairies humides (Yassin, 2023 ; Binet et al., 2009 ; Yanis, 2004) et la transformation du
73 paysage en un espace dominé par une agriculture intensive et fortement consommatrice d'eau
74 (Chambre d'agriculture 17/79 et Coop de l'eau 79, 2018).

75 L'organisation actuelle de la production agricole repose principalement sur la céréaliculture
76 (blé, maïs, orge, sorgho), les oléagineux (colza, tournesol, soja) et l'élevage, dont les besoins
77 en eau sont concentrés sur la période estivale (juin-août). Cependant, le régime
78 pluviométrique régional est caractérisé par une forte saisonnalité avec près de 50 % des
79 précipitations annuelles concentrées entre octobre et février (Anongba, 2007 ; Camuzard,
80 2000). Ce qu'entraîne une discordance temporelle entre la disponibilité naturelle de l'eau et la
81 demande agricole. Cette situation impose un recours massif à l'irrigation, mobilisant en
82 particulier les ressources en eaux souterraines des formations quaternaires et du substratum
83 jurassique sous-jacent.

84 La qualité chimique de ces ressources hydriques soulève néanmoins des préoccupations
85 majeures. En effet, plusieurs travaux ont documenté la forte minéralisation des eaux du
86 Marais Poitevin, témoignant d'une présence significative de sels dissous d'origine
87 géogénique et marine (Anongba et al., 2024 ; Anongba et al., 2023 ; Hantzpergue, 1988 ;
88 Salin, 1969). L'utilisation de telles eaux en irrigation, expose les sols à un risque accru de
89 salinisation, processus reconnu comme un facteur majeur de dégradation de la fertilité des
90 sols agricoles dans de nombreuses régions du monde (Amouri, 2016 ; Hamdoud, 2012 ;
91 Lobna et al., 2007 ; Challita et Moujabber, 2004).

92 La salinisation des sols, qu'elle soit primaire ou secondaire, modifie en profondeur leurs
93 propriétés physiques, chimiques et biologiques. Elle se traduit notamment par l'accumulation
94 excessive de sodium échangeable sur le complexe adsorbant, favorisant la dispersion des
95 argiles, la dégradation de la structure, la réduction de la perméabilité, ainsi que par l'asphyxie
96 racinaire et la réduction de l'activité biologique (Mehdi, 2008 ; Ado, 2017). Ces processus
97 compromettent durablement la productivité agricole et menacent la durabilité des systèmes
98 culturels dans les zones vulnérables telles que le Marais Poitevin.

99 Dans cette optique, la présente étude vise à évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux
100 souterraines du Marais Poitevin, en tenant compte de leur qualité physico-chimique.
101 L'analyse repose sur l'utilisation d'indicateurs reconnus pour leur pertinence dans
102 l'évaluation de la qualité des eaux à usage agricole. Ce sont la conductivité électrique (CE),
103 les solides totaux dissous (TDS), la dureté totale (DT), le rapport d'adsorption du sodium

104 (SAR), le pourcentage de sodium soluble (SSP), le rapport de Kelly (KR), l'indice de
105 perméabilité (IP) et le rapport d'adsorption du magnésium (MAR). L'intégration de ces
106 paramètres permettra de classer les eaux en fonction de leur aptitude agronomique,
107 d'identifier les contraintes potentielles liées à leur usage et de formuler des recommandations
108 en matière de gestion durable des ressources hydriques, adaptées aux spécificités écologiques
109 et agricoles du Marais Poitevin.

110

111 **1.2. Présentation de la zone d'étude**

112 **a. Localisation géographique**

113 Le Marais Poitevin, localisé dans la partie occidentale de la France, constitue la seconde plus
114 vaste zone humide du territoire national après la Camargue. Ancien golf des pictons, cette
115 entité géographique résulte d'un comblement progressif et d'aménagements anthropiques
116 successifs. Elle s'étend sur environ 70 km, depuis la ville de Niort jusqu'à l'océan Atlantique
117 et couvre une superficie estimée à 964 km². Le Marais Poitevin s'inscrit dans une vaste
118 dépression morphostructurale, encadrée par deux plaines du substratum carbonaté,
119 témoignant de la structure isoclinale des formations jurassiques de la bordure septentrionale
120 du bassin d'Aquitaine (Camuzard 2000 ; Dupuis et al. 1965).

121 Administrativement, cette zone humide s'étend sur deux régions (Pays de la Loire et
122 Nouvelle-Aquitaine) et trois départements (Vendée, Charente-Maritime et Deux-Sèvres). Elle
123 regroupe un total de 82 communes, représentant une population de 161000 habitants selon le
124 recensement de l'INSEE en 2015 (INSEE, 2016), ce qui en fait un espace fortement
125 anthropisé.

126 D'un point de vue fonctionnel et hydrologique, le Marais Poitevin peut être subdivisé en trois
127 grandes entités (Anongba, 2007 ; Bernard, 2006) qui sont :

- 128 1. la façade littorale, soumise à l'influence marine, est caractérisée par la présence de
129 vasières tidales et de prés salés dans la baie de l'Aiguillon,
- 130 2. Le marais desséché, situé en zone centrale, est protégé des marées par des digues
131 maritimes et des crues hivernales par des digues latérales. Ce secteur, largement
132 aménagé (drainage souterrain, endiguement), est essentiellement dédié à l'agriculture
133 ou au maintien des prairies naturelles,
- 134 3. Le Marais Mouillé, localisé en périphérie, constitue la zone d'expansion naturelle des
135 crues hivernales. Non protégé contre les inondations, il se développe le long des
136 principaux cours d'eau et présente un fort dynamisme hydrique saisonnier.

137 La présente étude porte spécifiquement sur la partie sud du Marais Poitevin, localisée à
138 l'interface des départements de la Charente-Maritime et des Deux-Sèvres, en bordure
139 septentrionale du bassin, à proximité du détroit du Poitou. Cette zone d'étude s'étend de la
140 commune de Bessines, à l'est, jusqu'à celle de Charron à l'ouest (Figure 1). Elle couvre une
141 superficie de 550 km² et englobe 27 communes, dont 16 appartiennent à la Charente-
142 Maritime et 11 aux Deux-Sèvres.

143 Sur le plan climatique, le secteur étudié est soumis à un régime océanique tempéré, avec une
144 pluviométrie annuelle moyenne oscillant entre 770 mm à la Rochelle et 840 mm à Niort
145 (Anongba, 2007).

146 **b. Contexte géologique et hydrogéologique**

147 La topographie du marais Poitevin se caractérise par une homogénéité altimétrique. Le
148 paysage est ponctué d'îlots dont les altitudes varient entre 10 et 20 m, correspondant soit à
149 des affleurements résiduels de formations calcaro-marneuses ayant échappé au nivellement
150 lors des cycles d'érosions successifs qui ont jalonné l'histoire du marais, soit des formations
151 de cailloutis ou de graviers d'âge quaternaire reposant sur des bancs calcaires plus anciens
152 (Welsch, 1916).

153 Sur le plan géologique, la zone d'étude repose principalement sur un substratum jurassique
154 constitué des formations calcaro-marneuses du Jurassique supérieur, essentiellement de
155 l'Oxfordien et du Kimmeridgien, sauf dans la portion nord-est du secteur d'étude où les
156 formations superficielles recouvrent le Jurassique moyen (Callovien) (Mazeau, 1979). Ces
157 unités géologiques sont recouvertes de dépôts meubles d'origine variée :

- 158 • dépôts marins (bri flandrien),
- 159 • dépôts fluviatiles (bri fluviatile, terrasses alluviales anciennes et récentes),
- 160 • dépôts colluvionnaires et tourbeuses dans certaines zones.

161 Ces formations superficielles d'épaisseurs variables se superposent ou s'individualisent
162 latéralement selon une organisation spatiale complexe (figure 2), en lien avec l'histoire
163 sédimentaire et hydrogéomorphologique du marais.

164 Du point de vue hydrogéologique, deux grands réservoirs aquifères peuvent être distingués
165 dans la zone d'étude :

- 166 1. le réservoir du Malm, constitué des formations du Kimmeridgien inférieur et
167 de l'Oxfordien supérieur,
- 168 2. le réservoir du Dogger, formé par les unités du Callovien et du Bathonien.

169 Ces formations aquifères sont libres en périphérie du marais, mais se retrouvent confinées
170 sous les dépôts quaternaires au sein du marais. Ainsi, l'Oxfordien supérieur, largement
171 présent dans la zone d'étude, constitue le soubassement dominant du Marais Poitevin et est
172 recouvert dans la majeure partie du secteur d'étude par des formations meubles d'origine
173 quaternaire.

174

175 c. Contexte pédologique

176 La Pédogénèse du Marais Poitevin résulte essentiellement de l'altération de formations
177 géologiques à dominante calcaire, dont la nature lithologique influence directement le
178 développement des horizons pédologiques et la répartition spatiale des unités de sols.
179 L'organisation pédologique de la zone d'étude se caractérise par une mosaïque de types de
180 sols correspondant à des environnements de formation distincts, eux-mêmes tributaires de la
181 topographie, de l'hydrodynamique locale et de l'héritage géologique.

182 L'unité pédologique la plus représentative du Marais Poitevin est constituée par les sols des
183 marais, qui forment l'horizon superficiel typique de cette zone humide (Safège, 2004). Ces
184 sols qualifiés de « jeunes », présentent un profil pédologique de type AC, caractérisé par une
185 absence ou une très faible différenciation d'horizons pédogénétiques, signe d'une évolution
186 récente ou d'un renouvellement fréquent du matériau pédologique (Nijs, 1978).

187 Les terres de groie, largement répandues dans le périmètre d'étude, se développent
188 préférentiellement sur des substrats calcaires ou marno-calcaires. Ces sols, également
189 désignés comme monophasés peu évolués (Nijs, 1978), possèdent un profil A (B) C, où
190 l'horizon intermédiaire (B), lorsqu'il est présent, se distingue par un début de
191 décarbonatation. Leur faible différenciation pédologique reflète une dynamique de formation
192 lente dans un contexte édaphique à faible lessivage.

193 Les sols tourbeux, quant à eux, se forment dans des dépressions hydroactives, au sein
194 desquelles l'accumulation de matière organique végétale en milieu réducteur et saturé d'eau
195 engendre des horizons organiques riches. Selon la classification de Kubiena (1953), ces sols
196 correspondent à des tourbes eutrophes, de type hydro-mull calcique ou anmoor, traduisant un
197 enrichissement en bases échangeables, notamment en calcium, en lien avec la nature calcaire
198 du substratum et la stagnation prolongée de l'eau.

199 Enfin, les sols des fonds de vallées, souvent associés aux zones de contact entre les unités
200 géomorphologiques majeures, présentent une texture généralement argilo-limoneuse à
201 limoneuse, voire sablo-limoneuse. Ils se distinguent par une structure fine à modérément

202 développée, souvent conditionnée par une hydromorphie plus ou moins marquée et une
203 dynamique sédimentaire fluviale ancienne ou récente (Safège, 2004).

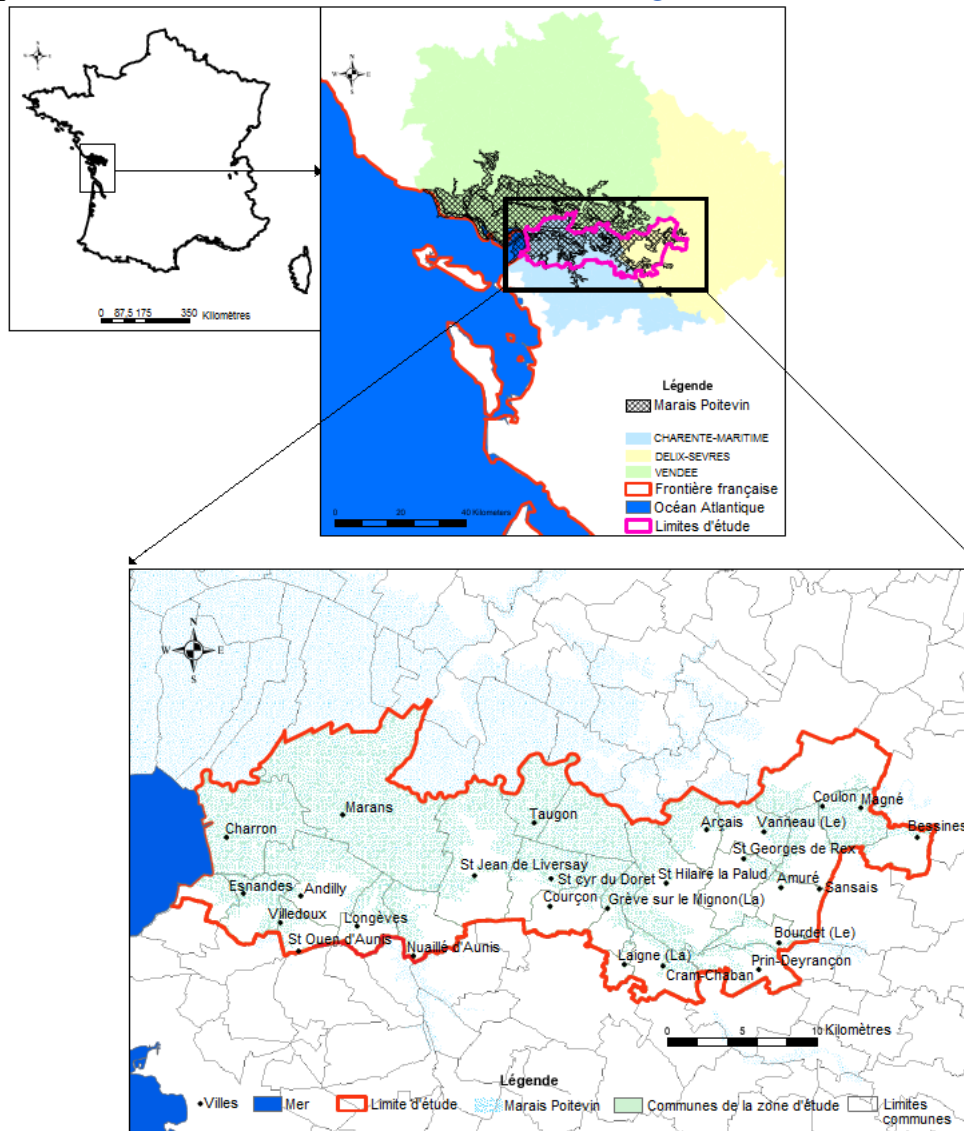


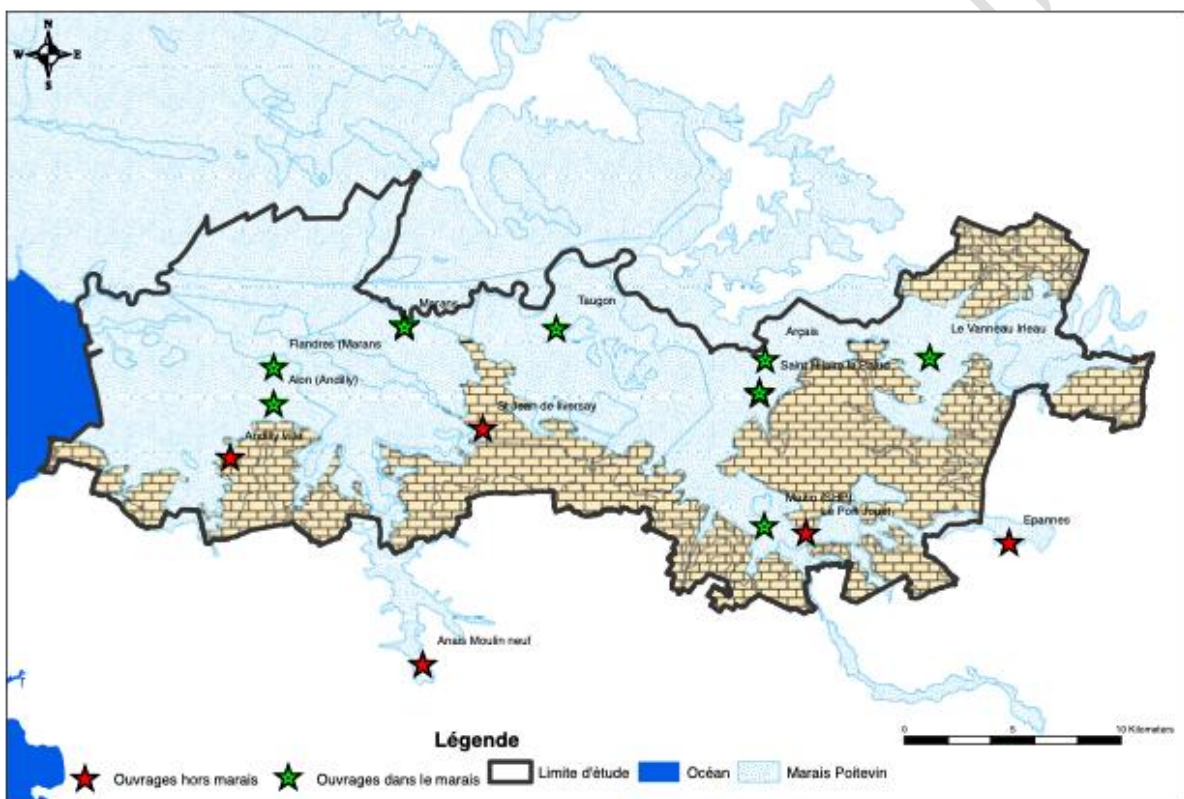
Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Vincent et al., 2022)

204 2. Méthodologie

209 2.1. Implantation des forages dans le Marais Poitevin

210 Afin de caractériser la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Marais Poitevin et
211 d'en évaluer l'aptitude à l'irrigation, un dispositif d'échantillonnage a été mis en place à
212 travers la réalisation de 19 forages répartis sur l'ensemble de la zone d'étude (figure 2). Ces
213 ouvrages ont été réalisés, en mode destructif, à l'aide d'une foreuse à tarière hélicoïdale (Ø 150
214 mm) munie de vis sans fin, assemblées par clavettes, permettant d'atteindre la profondeur
215 souhaitée tout en préservant l'intégrité des horizons traversés. Parmi ces forages, 8 sont
216 localisés sur deux sites expérimentaux représentatifs du gradient ouest-est de la zone d'étude.
217 Le premier est situé à Marans en limite occidentale et le second à Saint-Hilaire-la-Palud
218 (SHP), en bordure orientale. 4 de ces ouvrages (Marans F1, Marans F4, SHP F1 et SHP F4)
219 sont aménagés de manière à capter les eaux de l'Oxfordien supérieur, confiné sous les dépôts
220

221 quaternaires. A noter que le forage Marans F1 était à sec le jour de la campagne
 222 d'échantillonnage et n'a pu être intégré aux analyses hydrochimiques. 10 forages
 223 supplémentaires (SHP F2, SHP F3, Marans F2, Marans F3, Andilly Alon, Marans Flandre,
 224 Arçais, Le Vanneau, Mazin et Taugon) sont implantés au sein même du Marais Poitevin et
 225 captent les eaux des formations superficielles du Quaternaire. Les analyses réalisées sur les
 226 eaux des forages Marans F2 et Marans F3 ayant révélé des résultats strictement similaires,
 227 vraisemblablement en raison de leur proximité spatiale immédiate (3,65 m), ces deux
 228 ouvrages ont été regroupés sous la dénomination commune « Marans F2-3 » dans les
 229 tableaux des résultats et des figures. En complément, 5 points de captage supplémentaires ont
 230 été sélectionnés en amont immédiat du Marais Poitevin, dans les zones agricoles exploitées,
 231 afin d'évaluer les caractéristiques des eaux de l'Oxfordien supérieur en contexte extra-marais.
 232 Il s'agit de puits d'exploitants agricoles situés dans les communes de Port-Jouet, St Jean de
 233 Liversay, Épannes, Andilly ville et Anais Moulin neuf.
 234



235
 236 Figure 2 : Disposition des ouvrages sur la zone d'étude dans la partie sud du Marais
 237 Poitevin(Braphond et al., 2023)

238 2.2.Échantillonnage et mesures des paramètres physico-chimiques

239
 240 La présente étude repose sur une campagne d'échantillonnage conduite en février 2007 durant
 241 laquelle 17 échantillons d'eau souterraines ont été prélevés sur des ouvrages de captage
 242 représentatifs des principales unités géologiques du Marais Poitevin. Les prélèvements ont
 243 été réalisés à l'aide d'une pompe électrique portable immergée de 2 pouces alimentée par un
 244 groupe électrogène de 4 kVa et régulée par un convertisseur de fréquence assurant un débit
 245 constant. Chaque ouvrage a été préalablement purgé de façon à renouveler au moins trois
 246 volumes de colonne d'eau, garantissant ainsi la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de
 247 l'aquifère environnant. Les échantillons ont été recueillis à l'aide de tubulures en
 248 polyéthylène haute densité dans des flacons en polyéthylène stériles, préalablement rincés à
 249 l'eau du site. Deux types de conservations ont été appliqués. Les échantillons destinés à

250 l'analyse des cations ont été acidifiés in situ à l'aide d'acide nitrique ultrapure (pH < 2), afin
 251 de prévenir toute précipitation ou adsorption sur les parois. Ceux destinés à l'analyse des
 252 anions ont été conservés sans acidification. L'ensemble des échantillons a été filtré sur site à
 253 l'aide de filtres à membrane Millipore de porosité 0,45 µm et 0,22 µm, afin d'éliminer tous les
 254 éléments solides restés en suspension. Les flacons ont ensuite été hermétiquement
 255 scellés, étiquetés et conservés dans des glacières à température contrôlée (2°C < T < 8°C), puis
 256 acheminés vers le laboratoire dans un délai de moins de 48 heures.

257 Les paramètres physico-chimiques suivants ont été directement mesurés sur le terrain. Ce
 258 sont les teneurs en HCO₃⁻, la conductivité électrique, la température, le pH, le potentiel
 259 d'oxydoréduction, l'oxygène dissous et les solides totaux dissous (TDS). Les teneurs en
 260 HCO₃⁻ ont été déterminées par la méthode de titrage de Granen utilisant du HCl 0,1 N. La
 261 conductivité électrique, le pH et la température ont été mesurés au moyen d'un appareil
 262 multiparamètres WTW pH/Cond 340 i régulièrement calibré à l'aide de tampons standards
 263 pour les électrodes pH (pH 4 et 7). Les mesures d'oxygène dissous, le potentiel redox et les
 264 solides totaux dissous (TDS) ont été réalisées à l'aide de l'appareil U-22XD de chez Horiba.

265 Les plages de mesure des équipements sont les suivants. Pour la conductivité électrique, la
 266 plage de mesure varie de 0 à 50000 mS/cm avec une résolution de 1 mS/cm. La plage de
 267 mesure de la température va de -5,0 à +105°C avec une résolution de 1°C. Celle du pH va de
 268 -2,00 à +19,99 upH avec une résolution de 0,01 unité pH. La plage de mesure du potentiel
 269 d'oxydoréduction va de -1999 à +1999 mV avec une résolution de 1mV. Celle de l'oxygène
 270 dissous va de 0 à 19,9 mg/L avec une résolution de 0,2 mg/L. quant aux solides totaux
 271 dissous, la plage de mesure va de 0 à 65 g/L avec une précision de 1g/L.

272 L'ensemble des analyses chimiques a été réalisé au laboratoire d'hydrogéologie de
 273 l'Université d'Avignon, dans des conditions garantissant la traçabilité et la fiabilité des
 274 résultats. Les anions des eaux souterraines du Marais Poitevin ont été quantifiés par
 275 chromatographie ionique (CI) sur un Dionex ICS 1000 avec une précision analytique estimée
 276 à ± 5 %. Les cations ont été déterminés par spectrométrie d'absorption atomique à flamme
 277 sur un Varian SpectraAA-640 avec une précision < ± 10 %. Toutes les concentrations ioniques
 278 ont été exprimées en milliéquivalents par litre (meq/L), selon les exigences des calculs
 279 ultérieurs.

281 2.3.Évaluation de la qualité des analyses effectuées

282
 283 Avant de discuter les résultats de toute analyse chimique, il convient d'évaluer la fiabilité des
 284 dosages effectués. La méthode utilisée est appelée balance ionique ou balance
 285 d'électroneutralité (ε) (Matthess, 1982 ; Singhal et Gupta, 2010). Elle est exprimée sous la
 286 forme d'un écart relatif par la formule 1

$$287 \quad \varepsilon = \frac{\sum^+ \text{Cations} - \sum^- \text{Anions}}{\sum^+ \text{Cations} + \sum^- \text{Anions}} \times 100 \quad 1$$

288
 289 Cette marge de déséquilibre doit être interprétée comme un biais induit lors de l'analyse. En
 290 règle générale, les résultats d'analyses sont appréciés selon la classification ci-après.

291	-1% < ε < +1%	Fiabilité des résultats d'analyses excellente
292	-5% et -1% < ε < +1% et +5%	Fiabilité des résultats d'analyses acceptable
293	-10% et -5% < ε < +5% et +10%	Fiabilité des résultats d'analyses médiocre
294	ε < -10% ou ε > +10%	Fiabilité des résultats d'analyses douteuse

295 D'après cette classification, l'écart admis est estimé classiquement à $-5\% < \varepsilon < +5\%$. La
296 qualité des analyses a donc été rigoureusement contrôlée par l'établissement d'un bilan
297 ionique pour chaque échantillon et acceptée lorsque que l'erreur relative était inférieure à
298 $\pm 5\%$

300 2.4.Étude deshydrofaciès des eaux souterraines

301

302 La représentation graphique des faciès hydrochimiques a été réalisée au moyendu diagramme
303 de Piper (Piper 1944), permettant une visualisation synthétique des types d'eau dominants.

304 Le logiciel utilisé dans cette étude pour la représentation de ce diagramme est la version 8.1
305 du programme informatique « DIAGRAMMES » du laboratoire d'hydrogéologie de
306 l'Université d'Avignon (Simler, 2024)

307

308 2.5.Paramètres utilisés pour l'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation

309

310 Afin d'évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines du Marais Poitevin, une approche
311 par une étude multiparamètres a été retenue. Cette démarche repose sur l'analyse quantitative
312 de plusieurs indicateurs physico-chimiques fondés sur les concentrations en certains ions
313 spécifiques. Ainsi, les paramètres étudiés sont, le rapport d'absorption du sodium (SAR), le
314 pourcentage du sodium soluble (SSP), le rapport d'absorption du magnésium (MAR), l'indice
315 de perméabilité (IP), le rapport de Kelly (KR), la dureté totale (DT), les solides totaux dissous
316 (TDS) et la conductivité électrique (CE).

317 La teneur en Na^+ d'une eau d'irrigation constitue un facteur critique, en raison de son rôle
318 déterminant dans la dégradation structurale et texturale des sols par dispersion des argiles et
319 réduction de la perméabilité. Une forte concentration de Na^+ dans l'eau du sol entraîne
320 l'échange des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} adsorbés sur le complexe argilo-humique par le
321 Na^+ compromettant ainsi le mouvement de l'eau et de l'air dans les horizons pédologiques
322 (Collins et Jenkins, 1996). Le risque associé est évalué par le SAR, exprimé selon la formule
323 de l'équation 2 du tableau 1 où les concentrations ioniques sont rapportés en $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}.\text{L}^{-1}$ (Singhal
324 et Gupta, 2010). Il est obtenu par un rapport relatif entre l'ion Na^+ et les ions Ca^{2+} et Mg^{2+}
325 présent dans l'eau. Quatre classes de qualité d'eau sont ainsi définies (Domenico et al, 1990 ;
326 Ayers et Westcot, 1985 ; Wilcox, 1955) : excellentes ($\text{SAR} < 10$) ; bonnes ($10 - 18$) ;
327 admissibles ($18 - 26$) et mauvaises ou inadaptées ($\text{SAR} > 26$).

328 Le pourcentage de sodium soluble (SSP), calculé selon la formule 3 du tableau 1, complète
329 l'évaluation en rapportant les teneurs en Na^+ et K^+ à l'ensemble des bases
330 échangeables (Wilcox, 1955). L'interprétation repose sur cinq classes, allant de l'excellence
331 ($\text{SSP} < 20\%$) à l'inaptitude ($\text{SSP} > 80\%$) en passant par bonne ($20 - 40\%$), admissible ($40 -$
332 60%) et douteuse ($60 - 80\%$) (Rawat et al, 2018).

333 Le rapport de Kelley (KR) (Kelly, 1940) évalue également la tendance sodique de l'eau, avec
334 un seuil critique fixé à $\text{KR} > 1$, indicatif d'un risque d'alcalinisation (formule 6 du tableau 1).
335 L'indice de perméabilité (IP) déterminé selon la formule 5 du tableau 1 (Doneen,
336 1964) mesure l'impact potentiel des concentrations en Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- sur la
337 capacité de percolation de l'eau dans les sols. Trois classes de perméabilité sont ainsi
338 définies : $\text{IP} > 75\%$ (eau convenable), $25 < \text{IP} < 75\%$ (au bonne) et $\text{IP} < 25\%$ (eau
339 inappropriée) (Srinivasamoorthy et al, 2014).

340 Le rapport d'absorption du magnésium (MAR) permet de diagnostiquer l'effet du Mg^{2+} sur la
341 stabilité du sol. Lorsque MAR dépasse 50%, l'eau est considérée comme pouvant induire une
342 alcalinisation des sols, altérant ainsi leur fertilité (Kumar et al., 2007 ; Rawat et al.,

2018;Paliwal, 1972; Elango et al., 2003).Ce paramètre est calculé à partir de la formule 4 du tableau 1.

La dureté totale (DT), indicateur de la concentration globale en Ca^{2+} et Mg^{2+} , est calculée selon la formule empirique 7 du tableau 1, dans laquelle les teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimées en mg/L et les facteurs 2,5 et 4,1 sont le rapport entre la masse de la formule $CaCO_3$ et la masse atomique du calcium et du magnésium respectivement. Les classes définies par Sawyer et Mc Carty (1967) sont les suivantes : eau douce (< 75 mg/L de $CaCO_3$), modérément dure (75 - 150 mg/L de $CaCO_3$), dure (150 - 300 mg/L de $CaCO_3$) et très dure (> 300 mg/L de $CaCO_3$).

Les solides totaux dissous(TDS)sont un indicateur global de la minéralisation des eaux. Il est déterminé soit par sommation des concentrations ioniques mesurées, soit par évaporation d'un volume connu d'échantillon (Fetter, 2001). Les eaux sont classées en trois catégories : bonnes (TDS < 450 mg/L), modérées (450 -2000 mg/L) et dangereuses (TDS > 2000 mg/L).

Enfin, la conductivité électrique (CE), qui est égale à l'inverse de la résistance électrique sur un centimètre cube d'eau (Charles, 2002 ; Hem, 1985), mesurée à 25°C, traduit la charge ionique totale de l'eau et constitue un paramètre clé pour évaluer le risque de salinisation du sol. Selon la classification de Wilcox (1955), quatre classes de risque sont établies : faible (CE <250 μ S/cm), moyen (250 - 750 μ S/cm), élevé (750 - 2250 μ S/cm) et très élevé (CE >2250 μ S/cm). Une conductivité excessive limite la disponibilité de l'eau pour les plantes en créant une contrainte osmotique, réduisant ainsi le rendement agricole (Ayers et Westcot, 1985).

Chaque paramètre a été déterminé à partir des données analytiques obtenues lors de la campagne d'échantillonnage de février 2007, et leur interprétation croisée a permis une évaluation fine et exhaustive de la qualité des eaux souterraines du Marais Poitevin en vue de leur utilisation à des fins agricoles.

Tableau 1 : Formules empiriques standards permettant d'évaluer l'aptitude des eaux à l'irrigation

Abréviation	Nom du Paramètre	Formule empirique standard	N°	Unité	Références bibliographiques
SAR	Rapport d'absorption du sodium	$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}}$	2	(meq/l) ^{1/2}	Richards (1954) ; Ayers and Westcot (1985)
SSP	Pourcentage du sodium soluble	$SSP = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)} \times 100$	3	%	Wilcox (1955), Todd (1980)
MAR	Rapport d'absorption du magnésium	$MAR = \frac{(Mg^{2+})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100$	4	%	Paliwal (1972)
IP	Indice de perméabilité	$IP = \frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-})}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \times 100$	5	%	Doneen (1964) ; Siamak et Srikantaswamy (2009)
KR	Rapport de Kelly	$KR = \frac{Na^+}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})}$	6		Kelly (1940)
DT	Dureté totale	$DT = 2.5(Ca^{2+}) + 4.1(Mg^{2+})$	7	mg/l	Sawyer and Mc Carty, (1967)

372

373

374 3. Résultats

375 3.1. Présentation des résultats

376 a. Les eaux souterraines du quaternaire dans le Marais Poitevin

377 Les températures des eaux des formations du quaternaire dans le Marais Poitevin sont assez
378 homogènes et varient de 9,8°C à Taugon à 14,5°C sur le site expérimental de Marans. La
379 température de ces eaux reflète celle de la saison hivernale avec une valeur moyenne de
380 13,2°C (n = 7 ; $\sigma = 0,9$; $\sigma/m = 12$ %). Ces eaux sont neutres avec des valeurs de pH qui
381 varient de 6,76 à 7,75 (m=7,2 ; n=9 ; $\sigma = 0,4$; $\sigma/m = 6$ %). Elles sont modérément à
382 fortement minéralisées avec des valeurs de conductivité qui vont de 910 mS.cm⁻¹ à Taugon à
383 37100 mS.cm⁻¹ sur le site expérimental de Marans (m = 8063mS.cm⁻¹ ; n = 9 ; $\sigma = 11640$;
384 $\sigma/m = 144$ %). Les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction vont de -169 mV sur le site
385 expérimental de Marans à 218 mV à Andilly Alon (n = 9 ; $\sigma = 137$; $\sigma/m = 858$ %). Quant
386 aux éléments totaux dissous (TDS), les valeurs obtenues sont comprises entre 600mg/L et
387 22000mg/L.

388 Les teneurs en bicarbonates mesurées dans les échantillons des eaux du Quaternaire varient
389 de 5,72méq.L⁻¹ dans les eaux de Taugon à 353,10méq.L⁻¹ dans celles du site expérimental de
390 Marans. Le seul ouvrage du Quaternaire présentant une faible quantité de calcium se situe à
391 Le Vanneau (1,70méq.L⁻¹). Hormis celui-ci, les teneurs rencontrées dans les eaux des autres
392 ouvrages du Quaternaire fluctuent entre 5,17 méq.L⁻¹ à Marans Flandres et 21,15méq.L⁻¹ à
393 Saint Hilaire la Palud. Les teneurs en magnésium des eaux des formations du Quaternaire
394 sont comprises entre 1,51méq.L⁻¹ à Taugon et 72,33méq.L⁻¹ sur le site expérimental de
395 Marans. Contrairement au calcium et au magnésium, les teneurs en sodium obtenues sont très
396 élevées dans les eaux des formations du Quaternaire. Ces valeurs vont de 1,14méq.L⁻¹ dans les
397 eaux des formations quaternaires de Mazin à 288,39méq.L⁻¹ dans celles des formations
398 quaternaires du site expérimental de Marans. Les teneurs en potassium les plus élevées se
399 rencontrent dans les eaux des sites expérimentaux avec des valeurs qui oscillent entre
400 0,13méq.L⁻¹ à Taugon et 6,09méq.L⁻¹ sur le site expérimental de Marans (Tableau 2). Les
401 valeurs moyennes des ions majeurs permettent de déduire que l'abondance des cations et des
402 anions dans les eaux de cette partie du Marais Poitevin est la suivante : Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺
403 et Cl⁻ > HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻. Par conséquent, les Na⁺ et Cl⁻ sont les ions dominants dans les
404 eaux souterraines du Quaternaire.

405

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

407 Dans les formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire, les températures
408 des eaux souterraines mesurées varient de 13,7 °C sur le site expérimental de Saint Hilaire la
409 Palud à 14,5 °C sur celui de Marans (m= 14,2 °C ; n = 3 ; $\sigma = 0,4$; $\sigma/m = 3$ %). La
410 conductivité de ces eaux montre une très forte minéralisation matérialisée par des valeurs
411 allant de 22500 mS.cm⁻¹ à Saint Hilaire la Palud à 36100 mS.cm⁻¹ mesurée sur le forage F4
412 sur le site expérimental de Marans (m= 29533 mS.cm⁻¹ ; n = 3 ; $\sigma = 5562$; $\sigma/m = 18$ %). Ces
413 eaux sont légèrement acides avec des valeurs de pH qui vont de 6,7 à Marans à 6,93 à Saint
414 Hilaire la Palud (m = 6,80 ; $\sigma = 0,09$; n = 3 ; $\sigma/m = 1$ %). Le potentiel d'oxydo-réduction de
415 ces eaux varie de -351 à +138 mV sur le site expérimental de Marans (n = 3 ; $\sigma = 203$; σ/m
416 = 256 %). Les éléments totaux dissous (TDS) ont des teneurs qui sont comprises entre
417 2940mg/L et 14000mg/L. Les teneurs en bicarbonates mesurées dans les échantillons des eaux
418 des formations de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin varient de 8,16méq.L⁻¹ dans

419 les eaux du site expérimental de Saint Hilaire la Palud à 16,52 méq.L⁻¹ dans celles du site
420 expérimental de Marans. Les teneurs en calcium rencontrées dans les eaux des ouvrages de
421 l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin fluctuent entre 26,46 méq.L⁻¹ et 33,78 méq.L⁻¹ à
422 Marans. Les teneurs en magnésium des eaux des formations de l'Oxfordien supérieur
423 sont comprises entre 90,93 méq.L⁻¹ à Saint Hilaire la Palud et 92,90 méq.L⁻¹ sur le site
424 expérimental de Marans. Comme dans le cas des eaux des formations du Quaternaire, les
425 eaux des formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le Quaternaire représentent des
426 valeurs de sodium assez élevées avec des teneurs qui vont 103,83 méq.L⁻¹ à Saint Hilaire la
427 Palud à 248,37 méq.L⁻¹ dans les eaux des formations de l'Oxfordien supérieur à Marans. Les
428 teneurs en potassium les plus élevées se rencontrent dans les eaux du site expérimental de
429 Marans avec une valeur maximum mesurée à 3,86 méq.L⁻¹ (Tableau 2). Les valeurs moyennes
430 des ions majeurs permettent de déduire que l'abondance des cations et des anions dans les
431 eaux de cette partie du Marais Poitevin est la suivante : Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > K⁺ et Cl⁻ > HCO₃⁻ >
432 SO₄²⁻ > Br⁻. Contrairement aux eaux précédentes, il y'a plus de Mg²⁺ que de Ca²⁺ et de Br⁻ que
433 de NO₃⁻ dont les teneurs sont en dessous du seuil de détection. Comme dans les eaux
434 précédentes, les Na⁺ et Cl⁻ sont les ions dominants dans les eaux souterraines de l'Oxfordien
435 supérieur sous couverture Quaternaire.

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

437 Les températures des eaux mesurées dans les formations de l'Oxfordien supérieur en dehors
438 du Marais Poitevin varient de 13,6 °C à 14,8 °C (m = 14,2 °C ; n = 5 ; σ = 0,4 ; σ/m = 2 %).
439 Cette plage de température est très proche de celle rencontrée dans les formations du
440 Quaternaire et de l'Oxfordien supérieur dans le Marais Poitevin. Les mesures de conductivité
441 obtenue montrent que ces eaux sont faiblement minéralisées par rapport aux deux groupes
442 d'eau ci-dessus mentionnés avec des valeurs qui oscillent entre 731 mS.cm⁻¹ et 937 mS.cm⁻¹
443 (m = 805 mS.cm⁻¹ ; n = 5 ; σ = 75 ; σ/m = 9 %). Ces eaux sont neutres avec des valeurs de pH
444 qui vont de 6,9 à Port Jouët à 6,96 à Anais moulin neuf (m = 6,93 ; n = 5 ; σ = 0,02 ; σ/m =
445 0,003 %). Le potentiel d'oxydo-réduction mesuré donne des valeurs qui vont de 80 mV à Port-
446 Jouët à 138 mV à Anais Moulin Neuf (n = 9 ; σ = 54,3 ; σ/m = 37 %). Les valeurs en éléments
447 totaux dissous (TDS) ont des teneurs qui sont comprises entre 470 mg/L et 600 mg/L. Les
448 teneurs en bicarbonates mesurées sur les eaux des échantillons de l'Oxfordien supérieur hors
449 marais varient de 5,20 méq.L⁻¹ dans les eaux d'Épannes à 6,33 méq.L⁻¹ dans celles de Saint
450 Jean-de-Liversay. Les teneurs en calcium mesurées dans les eaux des ouvrages de
451 l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin fluctuent entre 6,34 méq.L⁻¹ à Andilly ville
452 et 7,79 méq.L⁻¹ à Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en magnésium des eaux des formations
453 de l'Oxfordien supérieur hors marais sont comprises entre 0,33 méq.L⁻¹ à Épannes et
454 2,21 méq.L⁻¹ à Anais Moulin Neuf. Les valeurs de sodium rencontrées dans ces eaux vont
455 0,45 méq.L⁻¹ à Port-Jouët à 1,01 méq.L⁻¹ à Saint Jean-de-Liversay. Les teneurs en potassium les
456 plus élevées se rencontrent dans les eaux de Andilly Ville avec une valeur maximum mesurée
457 à 1,06 méq.L⁻¹ (Tableau 2). Les valeurs moyennes des ions majeurs permettent de déduire que
458 l'abondance des cations et des anions dans les eaux de cette partie du Marais Poitevin est la
459 suivante : Ca²⁺ > Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺ et HCO₃⁻ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻. Ces eaux diffèrent complètement
460 des précédentes avec le Ca²⁺ et les HCO₃⁻ qui sont les ions dominants.

461
462
463
464
465
466
467

468
469
470
471
472
473

Tableau 2 :Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du Marais Poitevin et leurs teneurs en éléments chimiques

Forage	T°C	χ 25°C mS/cm	pH	Eh mV	O ₂ mg/L	TDS g/L	SO ₄ ²⁻ méq/L	HCO ₃ ⁻ méq/L	F ⁻ méq/L	Cl ⁻ méq/L	Br ⁻ méq/L	NO ₃ ⁻ méq/L	Ca ²⁺ méq/L	Sr ²⁺ méq/L	Mg ²⁺ méq/L	Na ⁺ méq/L	K ⁺ méq/L
Eaux Souterraines de l'aquifère du Quaternaire dans le Marais Poitevin																	
Andilly Alon	13,70	1189,00	6,94	218,00	6,50	0,80	1,02	7,12	0,01	1,67	0,01	2,66	9,43	0,01	1,60	1,25	1,24
Taugon	9,80	910,00	7,75	162,00	11,20	0,60	2,83	5,72	0,08	1,01	0,00	0,18	6,74	0,01	1,51	2,17	0,13
Mazin	10,80	1680,00	6,82	48,00	2,20	1,10	5,79	12,36	0,02	1,68	0,01	0,01	18,58	0,02	1,65	1,14	0,22
Le Vanneau	14,20	1289,00	7,43	-111,00	4,70	0,90	0,14	10,92	0,17	2,71	0,01	<	1,70	0,06	4,37	6,55	0,63
Arçais	12,50	2370,00	6,99	30,00	11,20	1,70	2,56	12,40	0,02	9,26	0,02	0,73	8,88	0,01	4,14	11,51	0,54
Marans Flandres	12,20	10780,00	7,46	-155,00	4,30	8,00	6,15	12,96	0,10	85,74	0,17	0,21	5,17	0,02	14,90	74,99	2,20
Marans F2-3	14,50	37100,00	6,76	-169,00	1,60	22,00	12,69	353,10	0,23	356,08	0,68	<	10,38	0,60	72,33	288,39	6,09
SHP F3	12,60	5850,00	6,81	-41,00	1,00	3,90	29,33	12,52	0,06	23,73	0,05	<	21,15	0,07	14,00	32,32	1,10
SHP F2	12,50	11400,00	7,71	171,00	5,20	7,93	16,75	11,12	<	84,20	0,17	<	11,78	0,07	13,03	86,26	2,60
Eaux Souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur sous couverture Quaternaire dans le Marais Poitevin																	
Marans F1	14,50	30000,00	6,79	138,00	3,10	14,00	13,85	8,80	0,43	291,06	0,57	<	33,78	1,80	91,58	182,21	3,20
Marans F4	14,50	36100,00	6,70	-351,00	2,70	2,94	7,34	16,52	0,50	355,08	0,69	<	26,46	2,78	92,90	248,37	3,86
SHP F4	13,70	22500,00	6,93	-25,00	4,90	5,38	12,19	8,16	0,48	211,80	0,41	<	30,77	2,74	90,93	103,83	2,10
Eaux Souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin																	
Port Jouet	13,90	735,00	6,90	80,00	1,10	0,48	0,50	5,24	0,02	0,69	0,00	0,62	7,04	0,02	0,50	0,45	0,05
Epannes	13,60	731,00	6,92	214,00	6,10	0,47	0,46	5,20	0,01	0,80	0,00	1,12	7,38	0,01	0,33	0,47	0,06
St Jean de Liversay	14,50	937,00	6,92	90,00	7,90	0,60	0,82	6,33	0,02	1,21	0,00	1,30	7,79	0,01	0,49	1,01	0,50
Andilly Ville	14,80	811,00	6,93	197,00	4,60	0,55	0,85	5,88	0,01	0,90	0,00	0,90	6,34	0,01	0,54	0,87	1,06
Anais Moilin Neuf	14,20	809,00	6,96	138,00	10,00	0,53	0,75	6,16	0,04	0,98	0,00	0,80	6,46	0,05	2,21	0,62	0,05

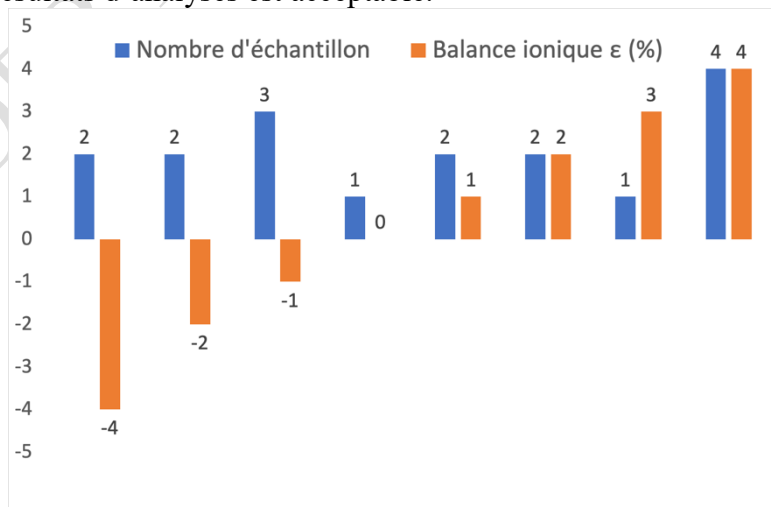
474
475
476
477
478
479
480
481

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

T : température ; χ : conductivité électrique ; pH : potentiel d'hydrogène ; Eh : potentiel d'oxydo-réduction ; O₂ : oxygène dissous ; TDS : solides totaux dissous ; SO₄²⁻ : sulfates ; HCO₃⁻ : bicarbonates ; F⁻ : fluorures ; Cl⁻ : chlorures ; Br⁻ : bromures ; NO₃⁻ : nitrates ; Ca²⁺ : calcium ; Sr²⁺ : strontium ; Mg²⁺ : magnésium ; Na⁺ : sodium ; K⁺ : potassium.

3.2. Évaluation de la qualité des analyses effectuées sur les eaux du Marais Poitevin

482 Le contrôle de la qualité des résultats d'analyses par la balance ionique a été appliqué à toutes
483 les analyses réalisées. Les résultats obtenus montrent que 100 % des 17 analyses réalisées
484 présentent une balance ionique $-5\% < \epsilon < +5\%$ (figure 3). Selon la classification, la
485 fiabilité de ces résultats d'analyses est acceptable.



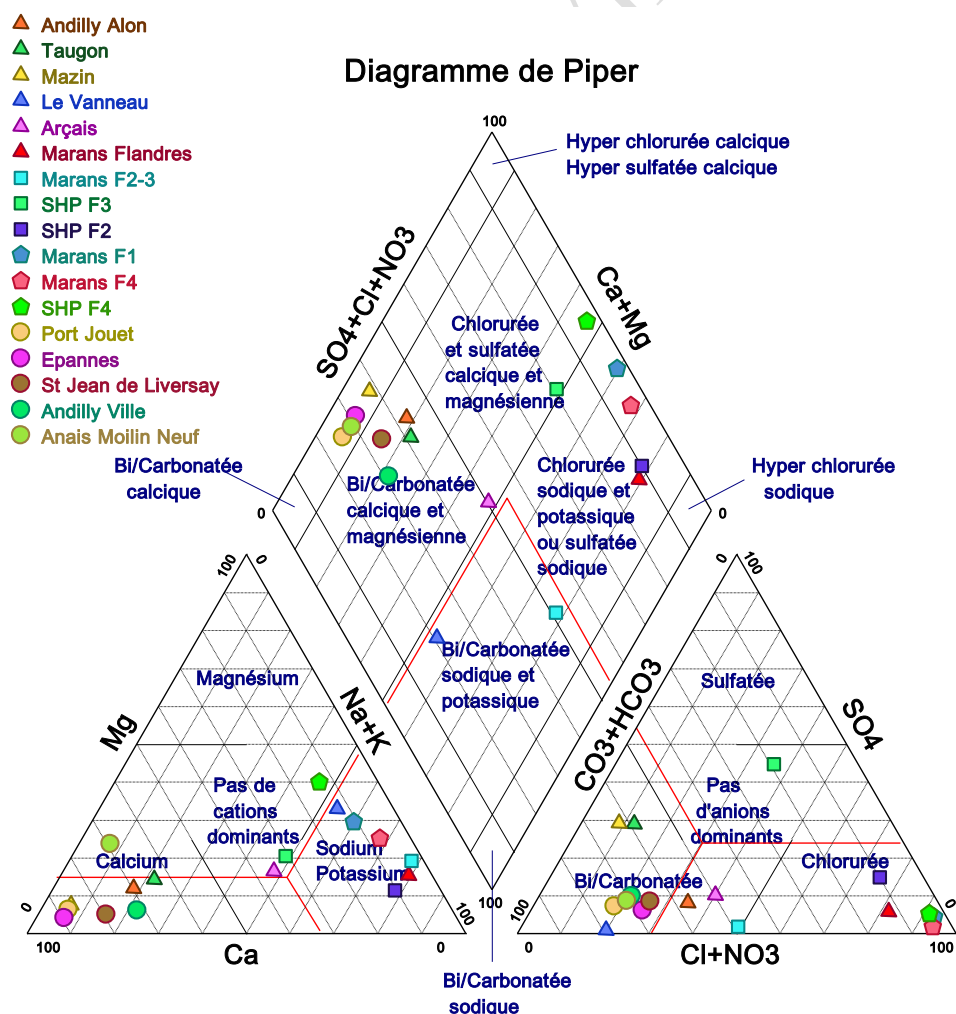
486
487
488
489

Figure 3 : Évaluation de la fiabilité des résultats d'analyses chimiques des échantillons des eaux souterraines du Marais Poitevin

490
491
492
493

3.3 Étude des hydrofaciès des eaux souterraines du Marais Poitevin

494 Les eaux prélevées sur le site expérimental de Marans présentent un hydrofaciès $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$
495 indépendamment de l'aquifère (Oxfordien supérieur ou Quaternaire). Celles prélevées sur le
496 site expérimental de Saint Hilaire la Palud ont, contrairement aux eaux précédentes, des
497 hydrofaciès différents en fonction des aquifères. Ainsi, les eaux échantillonnées dans
498 l'ouvrage SHP F2 qui capte les formations du Quaternaire présentent un hydrofaciès $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$
499 . A l'inverse, celles prélevées dans le forage SHP F3 qui capte le même aquifère que le forage
500 SHP F2 présentent un hydrofaciès qui est plutôt $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$. Les eaux échantillonnées dans
501 l'ouvrage SHP F4 qui capte les formations de l'Oxfordien supérieur confinées sous le
502 Quaternaire dans le Marais Poitevin sont de nature $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$. Les eaux prélevées dans les
503 ouvrages du Quaternaire en dehors des sites expérimentaux présentent des hydrofaciès
504 différents. Les eaux prélevées à Mazin, Andilly Alon et Taugon sont $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$, celles
505 échantillonnées à Marans Flandre sont $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, celles prélevées à Arçais et à Le Vanneau
506 sont $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$. Les eaux prélevées dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur
507 en dehors du Marais Poitevin présentent un hydrofaciès unique qui est $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ (figure
508 4).
509
510



512

513 Figure 4 : Représentation sur le diagramme de Piper des résultats des analyses des eaux
514 souterraines du Marais Poitevin et des eaux souterraines en dehors du Marais Poitevin.

515 **3.4. Détermination de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines du Marais Poitevin**

516 **a. La dureté totale (DT)**

517 Les valeurs de dureté totale obtenues sur les eaux souterraines du Quaternaire dans le Marais
518 Poitevin varient de 302,96 mg/L CaCO₃ à Le Vanneau à 4123,90 mg/L CaCO₃ sur le site
519 expérimental de Marans. En dehors des eaux de Le vanneau qui sont à la limite entre les eaux
520 dures et très dures, toutes les eaux souterraines rencontrées dans cette partie du Marais
521 peuvent être qualifiées de très dures.

522 Les valeurs de dureté totale des eaux souterraines des formations de l'Oxfordien supérieur
523 confinées sous celles du Quaternaire varient entre 5954,65 mg/L CaCO₃ et 6255,80 mg/L
524 CaCO₃ sur le site expérimental de Marans. Ces eaux sont à ranger dans la catégorie des eaux
525 très dures.

526 Les eaux souterraines des formations de l'Oxfordien supérieur localisées en dehors du Marais
527 Poitevin, ont des valeurs de dureté totale qui oscille entre 344,81 mg/L CaCO₃ à Andilly ville
528 et 433,63 mg/L CaCO₃ à Anais moulin neuf. Toutes ces eaux sont très dures avec cependant
529 des valeurs qui sont proches de la borne supérieure des eaux dures (tableau 3 et 4).

530

531 **b. Détermination de l'aptitude à l'irrigation des eaux du Marais Poitevin à l'aide des** 532 **paramètres (SAR, SSP, MAR, KR et IP)**

533 • **Eaux du Quaternaire dans le Marais Poitevin**

534 Les valeurs de SAR obtenues sur les eaux des formations du Quaternaire varient entre 0,53 à
535 Andilly Alon et 44,85 au niveau du site expérimental de Marans. Celles de SSP obtenues
536 vont de 6,30% à Mazin à 79,36% à Marans Flandres. Quant à celles de KR, les valeurs
537 calculées oscillent entre 0,06 à Mazin et 3,49 sur le site expérimental de Marans. Les valeurs
538 de MAR varient de 14, 54 % à Andilly Alon à 87,45 % à Marans. Enfin, les valeurs de IP
539 varient de 21,78 % à Mazin à 82,78 % à Marans. Dans le cas de cet aquifère, les eaux
540 prélevées au niveau de Le Vanneau, du site expérimental de Marans, à Marans Flandre et sur
541 le forage 2 du site expérimental de Saint Hilaire la Palud ne sont pas aptes pour l'irrigation
542 avec des valeurs de paramètres proches ou au-dessus des seuils critiques (tableau 3 et 4).
543 Hormis ces dernières, les autres sont utilisables pour l'irrigation. Toutefois, les valeurs
544 élevées de conductivité électrique de ces eaux laissent entrevoir un risque très important
545 qu'elles favorisent une salinisation des sols à long terme (tableau 2, 3 et 4).

546 • **Eaux de l'Oxfordien supérieur sous couverture du Quaternaire dans le Marais** 547 **Poitevin**

548 Les valeurs du SAR, calculées à partir d'échantillons d'eau prélevés dans cet aquifère
549 oscillent entre 13,31 au niveau du Site expérimental de Saint Hilaire la Palud et 32,15 au
550 niveau de celui de Marans. Celles de SSP obtenues vont de 46,54 % à Saint Hilaire la Palud à
551 67,88 % à Marans. Quant à celles de KR, les valeurs calculées sont comprises entre 0,85 à
552 Saint Hilaire la palud et 2,08 à Marans. Les valeurs de MAR oscillent entre 73, 05 % et 77,83
553 % à Marans. Enfin, les valeurs de IP varient de 47,31 % à Saint Hilaire la Palud à 68,65 % à
554 Marans. Les paramètres obtenus sur les eaux souterraines de cet aquifère permettent
555 d'affirmer que seules celles du site expérimental de Saint Hilaire la Palud sont utilisables pour
556 l'irrigation. Toutefois, la conductivité électrique excessivement élevée de ces eaux les

557 rendent quasiment inadaptées pour l'irrigation à cause d'un risque trop élevé de possible
558 salinisation des sols (tableau 2, 3 et 4).

559 • **Eaux de l'Oxfordien supérieur en dehors du Marais Poitevin**

560

561 Les valeurs du SAR, calculées à partir d'échantillons d'eau prélevés dans cet aquifère
562 s'échelonnent de 0,23 à Port Jouet à 0,50 à St Jean de Liversay. Les valeurs de SSP obtenues
563 vont de 6,27 % à Port Jouet à 21,95 % à Andilly ville. Quant à celles de KR, les valeurs
564 calculées sont comprises entre 0,06 à Port Jouet et Épannes et 0,13 à Andilly ville. Les
565 valeurs de MAR oscillent entre 4,34 % à Épannes et 25,44 % à Anais moulin neuf. Enfin, les
566 valeurs de IP varient de 33,37 % à Anais moulin neuf à 42,51 % à Andilly ville. Les
567 paramètres des eaux souterraines de cet aquifère permettent d'affirmer qu'elles sont toutes
568 utilisables pour l'irrigation malgré des valeurs de conductivité élevées (tableau 2, 3 et 4).

569

570 **Tableau 3 : Résultats du calcul des paramètres (SAR, SSP, DT, MAR, IP et KR) des eaux**
571 **souterraines du Marais Poitevin**

572

Forage	SAR	SSP (Na) %	DT mg/L	MAR %	IP %	KR
Eaux souterraines de l'aquifère du Quaternaire dans le Marais Poitevin						
Andilly Alon	0,53	18,41	552,45	14,54	31,90	0,11
Taugon	1,07	21,86	413,19	18,34	43,78	0,26
Mazin	0,36	6,30	1013,41	8,17	21,78	0,06
Le Vanneau	3,76	54,18	302,96	71,97	78,08	1,08
Arçais	4,51	48,07	650,98	31,80	61,28	0,88
Marans Flandres	23,67	79,36	1001,76	74,22	82,67	3,74
Marans F2-3	44,85	78,07	4123,90	87,45	82,78	3,49
SHP F3	7,71	48,74	1756,91	39,83	53,15	0,92
SHP F2	24,49	78,17	1239,44	52,53	80,66	3,48
Eaux souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur sous couverture du Quaternaire dans le Marais Poitevin						
Marans F1	23,01	59,66	6255,80	73,05	60,20	1,45
Marans F4	32,15	67,88	5954,65	77,83	68,65	2,08
SHP F4	13,31	46,54	6071,75	74,72	47,31	0,85
Eaux souterraines de l'aquifère de l'Oxfordien supérieur en dehors du Quaternaire dans le Marais Poitevin						
Port Jouet	0,23	6,27	377,63	6,69	34,29	0,06
Épannes	0,24	6,42	386,44	4,34	33,60	0,06
St Jean de Liversay	0,50	15,48	414,98	5,93	37,95	0,12
Andilly ville	0,47	21,95	344,81	7,89	42,51	0,13
Anais Moulin Neuf	0,30	7,13	433,63	25,44	33,37	0,07

573

574 SAR : rapport d'absorption du sodium ; SSP : pourcentage de sodium soluble ; DT : dureté totale ; MAR : rapport
575 d'absorption du magnésium ; IP : indice de perméabilité ; KR : le rapport de Kelly

576

577 **Tableau 4 : Classification des eaux souterraines du Marais Poitevin en fonction de leur**
578 **aptitude à l'irrigation**

579

Paramètres	Plages de valeurs	Classes	Nombre d'échantillons	Pourcentage (%) d'échantillons
SAR (Wilcox, 1955)	< 10	Excellente	11	64,70
	10 - 18	Bonne	1	5,88
	18 - 26	Admissible	3	17,64
	> 26	Inadaptée	2	11,76
SSP (Wilcox, 1955)	< 20	Excellente	6	35,29
	20 - 40	Bonne	2	11,76
	40 - 60	Admissible	5	29,41
	60 - 80	Douteuse	4	23,53
MAR (Paliwal, 1972)	> 80	Inadaptée	0	0
	< 50	Adaptée	10	58,82
IP (Doneen, 1964)	> 50	Inadaptée	7	41,18
	< 25	Class III (inadaptée)	1	5,88
	25 - 75	Class II (bonne)	12	70,59
KR (Kelley, 1940)	> 75	Class I (excellente)	4	23,53
	< 1	Adaptée	11	64,70

	> 1	Inadaptée	6	35,29
DT (Sawyer et Mc Carty, 1967)	< 75	Douce	0	0
	75 - 150	Modérée	0	0
	150 - 300	Dure	0	0
	> 300	Très dure	17	100
CE ou risque de salinisation des sols (Wilcox, 1955)	< 250	Faible	0	0
	250 - 750	Moyen	0	0
	750 - 2250	Élevé	0	0
	> 2250	Très élevé	17	100
TDS (Ayers and Westcot, 1985)	< 450	Meilleure	0	0
	450 - 2000	Modérée	10	58,82
	> 2000	Dangereuse	7	41,18

580
581
582
583
584

SAR : rapport d'absorption du sodium ; SSP : pourcentage de sodium soluble ; MAR : rapport d'absorption du magnésium ; IP : indice de perméabilité ; KR : le rapport de Kelly ; DT : dureté totale ; CE : conductivité électrique, TDS : solides totaux dissous

585 4. Discussion

586 L'analyse hydrochimique des eaux souterraines prélevées dans la région du Marais Poitevin
587 révèle une prédominance du faciès chimique de type $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$, caractéristique des aquifères
588 influencés par des apports d'origine marine. Toutefois, dans les formations quaternaires, cette
589 typologie s'enrichit de variantes notables, à savoir des eaux $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$, $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$,
590 et $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, traduisant une diversité géochimique liée à l'hétérogénéité des substrats
591 traversés. En revanche, les aquifères calcaires situés hors du Marais Poitevin présentent une
592 homogénéité marquée avec une domination exclusive du faciès $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$.

593 Sur l'ensemble de la zone d'étude, quatre grands hydrofaciès ont été identifiés. Parmi ceux-
594 ci, les types $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ (47 %) et $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ (35 %) s'imposent comme majoritaires, tandis
595 que les faciès $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ (12 %) et $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$ (6 %) apparaissent comme minoritaires.
596 Cette distribution hydrochimique résulte de processus de dissolution des carbonates des
597 formations encaissantes (Anongba et al., 2023), ainsi que d'une influence marine résiduelle
598 (Anongba et al., 2023 ; 2024), particulièrement perceptible dans la partie marais desséché et
599 dans les formations de l'Oxfordien supérieur sous couverture quaternaire.

600 L'indice de dureté totale (DT), selon la classification de Sawyer et McCarty (1967), situe les
601 eaux du Marais Poitevin dans la catégorie des eaux très dures, une caractéristique
602 intrinsèquement liée à la lithologie calcaire dominante (Schoeller, 1962). Cette forte
603 minéralisation peut induire des dépôts de carbonates dans les réseaux d'irrigation,
604 compromettant leur bon fonctionnement.

605 Le pH, paramètre fondamental pour l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation, affiche
606 des valeurs proches de la neutralité pour l'ensemble des échantillons, s'inscrivant dans
607 l'intervalle optimal de solubilité des micronutriments (Couture, 2004). Bien que la plage
608 idéale soit comprise entre 5,5 et 6,5, Ayers et Westcot (1985) admettent une extension
609 possible jusqu'à 8,4. Cette neutralité relative s'explique par la nature calcaire des formations
610 géologiques (Anongba, 2007).

611 En revanche, la conductivité électrique (CE) très élevée de ces eaux traduit une salinité
612 importante, pouvant constituer une menace sérieuse pour la durabilité des systèmes agricoles
613 irrigués. En effet, une accumulation excessive de sels solubles dans la zone racinaire est
614 susceptible d'induire une contrainte osmotique, restreignant l'absorption hydrique par les
615 racines et provoquant une sécheresse physiologique (Munns & Tester, 2008 ; Hanana et al.,
616 2011 ; Kpinkoun et al., 2019).

617 Malgré cette contrainte saline, plusieurs paramètres d'aptitude à l'irrigation (SAR, SSP,
618 MAR, KR, IP, TDS) indiquent que certaines eaux demeurent partiellement compatibles avec
619 un usage agricole, selon les seuils admis par les classifications internationales. Ainsi, d'après

620 l'indice SAR de [Wilcox \(1955\)](#), 64,7 % des échantillons sont jugés excellents, 5,88 % bons,
621 et 17,64 % acceptables pour l'irrigation. Seuls 11,76 % sont considérés comme inadaptés.
622 Les résultats fondés sur le SSP ([Wilcox, 1955](#) ; [Todd, 1980](#)) révèlent que 39,25 % des eaux
623 sont excellentes, 11,76 % bonnes, 29,41 % admissibles, tandis que 23,53 % sont douteuses.
624 Selon le MAR ([Paliwal, 1972](#)), 58,82 % des eaux sont favorables, contre 41,18 % qui ne le
625 sont pas. L'indice de [Kelly \(1963\)](#) (KR) confirme cette tendance, avec 64,70 % d'eaux
626 admissibles pour l'irrigation. Pour l'indice IP ([Doneen, 1964](#)), 23,53 % sont
627 classées excellentes, 70,59 % bonnes et 5,88 % inadaptées.
628 En termes de TDS, selon [Ayers et Westcot \(1985\)](#), aucune eau n'est jugée optimale.
629 Toutefois, 58,82 % présentent un risque modéré, et 41,18 % un risque élevé de salinisation des
630 sols.
631 À la lumière de ces résultats, il apparaît que les eaux des formations quaternaires internes du
632 Marais Poitevin à Le Vanneau, Marans, Saint-Hilaire-la-Palud ainsi que celles de l'Oxfordien
633 supérieur confinées sous les formations quaternaires, présentent un risque sévère d'alcalinisation
634 et de salinisation, rendant leur usage pour l'agriculture peu recommandable, conformément
635 aux critères établis par [Ayers & Westcot \(1985\)](#). Leur usage pourrait favoriser la dispersion des
636 argiles et l'imperméabilisation des horizons superficiels, induisant une asphyxie
637 racinaire ([Ayers & Westcot, 1985](#) ; [Wilcox, 1955](#) ; [Domenico et al., 1990](#)).
638 À l'inverse, les eaux issues des formations de l'Oxfordien supérieur localisées en dehors du
639 Marais Poitevin (Port Jouet, Andilly, Épannes, Saint Jean de Liversay, Anais), ainsi que celles
640 des formations quaternaires de Taugon, Mazin et Arçais, présentent une aptitude relative à
641 l'irrigation, malgré une vigilance requise en raison d'une conductivité électrique élevée,
642 susceptible d'engendrer à long terme une accumulation saline dans les sols ([Suarez, 2001](#)).
643 Cependant, à l'exception notable des eaux de Taugon, les valeurs très élevées de conductivité
644 électrique de celles des formations du quaternaire ci-dessus mentionnées ($CE > 1189$ mS/cm)
645 incitent à la prudence quant à leur utilisation. En effet, avec de telles valeurs de conductivité
646 électrique, le risque d'une salinisation des sols est réel. [Hindeya et al. \(2024\)](#) estiment que de
647 telles eaux sont susceptibles d'engendrer à long terme une accumulation de sel dans les zones
648 racinaires, pouvant ainsi compromettre la disponibilité de l'eau pour les cultures.
649 Par conséquent, seules les eaux issues des formations calcaires de l'Oxfordien supérieur
650 localisées en dehors du Marais Poitevin peuvent être considérées comme
651 globalement satisfaisantes pour l'irrigation. Leur utilisation requiert toutefois des précautions :
652 sélection de cultures tolérantes à la salinité et exploitation sur sols bien drainés afin d'éviter les
653 processus de sodification, responsables d'une dégradation à long terme de la structure
654 pédologique par une salinisation irréversible. Ce phénomène a été observé par [Kahlow et al. \(2005\)](#)
655 au Penjab, où des eaux hautement minéralisées, ont été utilisées pour l'irrigation, ce qui
656 a favorisé à terme une salinisation irréversible des terres agricoles.
657 Enfin, les eaux de Taugon, bien que localisées dans les formations quaternaires, présentent
658 une composition chimique favorable à l'irrigation attribuable à une alimentation directe de ces
659 dernières par les aquifères calcaires localisés en dehors du marais ([Anongba, 2007](#)). Ce cas
660 particulier illustre l'importance de la géohydrodynamique locale dans l'évaluation de
661 l'aptitude à l'irrigation des eaux du Marais Poitevin.
662

5. Conclusion

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines du Marais Poitevin et de ses environs, à travers une approche hydrochimique et agronomique intégrée, met en évidence une diversité de faciès chimiques traduisant des conditions hydrogéologiques contrastées. Les eaux majoritairement de type $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ dans les formations quaternaires et de l'Oxfordien supérieur confinées sous couverture quaternaire, et $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ dans les formations calcaires de l'Oxfordien supérieur en dehors du marais, témoignent d'influences multiples, à la fois géogéniques (dissolution des carbonates) et marines (intrusion saline).

Bien que les indices de qualité (SAR, SSP, MAR, KR, IP) montrent qu'une part significative des eaux peut être utilisée pour l'irrigation, les valeurs élevées de conductivité électrique (CE) et de TDS soulignent un risque non négligeable de salinisation des sols. Ce risque, s'il n'est pas maîtrisé, peut gravement altérer la productivité agricole à long terme en compromettant l'absorption hydrique et minérale par les cultures.

Ainsi, seules les eaux issues des formations calcaires de l'Oxfordien supérieur situées hors du Marais Poitevin peuvent être considérées comme satisfaisantes pour une irrigation durable, à condition d'être utilisées sur des sols bien drainés, en tenant compte de la tolérance des cultures à la salinité. Quant aux eaux des formations quaternaires à l'intérieur du Marais Poitevin, elles nécessitent une gestion plus rigoureuse et ne devraient être mobilisées que de manière ciblée et conditionnelle en tenant compte de l'hydrodynamisme local pouvant permettre de disposer d'eau de qualité acceptable pour un usage agricole comme à Taugon. Ces eaux doivent toutefois, comme c'est le cas pour celles hors marais, être utilisées sur des sols équipés de drainages performants et pour des espèces végétales halotolérantes.

Cette étude confirme la nécessité d'une approche pluridisciplinaire et territorialisée dans l'évaluation des ressources en eau à usage agricole, combinant analyses géochimiques, critères agronomiques et aménagements hydroagricoles. Elle appelle également à une surveillance régulière de la qualité des eaux souterraines dans des zones comme celle des marais, afin d'anticiper toute dynamique de dégradation des sols.

Références bibliographiques

Ado M. N., 2017. Évaluation in situ et en conditions contrôlées de la phyto-désalinisation des Vertisols irrigués. Cas d'étude du périmètre rizicole de Kollo (Niger) dans la vallée du fleuve Niger, Thèse de doctorat, Université Bretagne Loire, 235p.

Amouri A. A., 2016. Caractérisation moléculaire et biochimique en condition de stress salin de *Medicago truncatula* Gaertner, Thèse de doctorat, Université d'Oran, 173p.

Anongba Braphond Rodrigue Vincent Benjamin, Traore Abou et Tohouri Privat., 2024 : Origine et temps de résidence des eaux souterraines de la partie sud du Marais Poitevin (Nouvelle-Aquitaine-France) et de son substratum carbonaté de l'Oxfordien Supérieur par utilisation couplée d'isotopes Stables et radioactifs. *Int. J. of Adv. Res.* (Jan). 231-249] (ISSN 2320-5407). <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/18113>

Anongba Braphond, R.V.B., Privat, T., Issa S. S. & Germain, A. M., 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>

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.

Ayers R.S. et Westcot D.W., 1985 : Water quality for agriculture. FAO irrigation and drainage paper 29 rev 1. Food and agriculture organization of the United Nations, Rome, Italy, 174p.

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.

Binet Éric., Escafre Alain., Fournié Françoise., 2009 : Évaluation à mi-parcours de la mise en Œuvre du plan d'action gouvernemental pour le Marais Poitevin 2003-2012. Rapport. Ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire. Ministère de l'agriculture et de la Pêche. CGEDD/005928-02. CGAAER/1842. 124 p.

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.

Camuzard J.P. (2000) : Les sols marqueurs de la dynamique des systèmes géomorphologiques continentaux. Thèse de doctorat de l'Université de Caen. Volume I pp53-129.

Challita et Moujabber, 2004 :Effet de la salinité sur le rendement de la culture de poivron (*Capsicum annum* L.).Extrait de : Annales de recherche scientifique n°5, 115-127p.

Chambre d'agriculture 17/79 et Coop de l'eau 79., 2018 : Projet agricole de territoire pour l'adaptation au changement climatique du bassin de la Sèvre Niortaise et pour une agriculture durable. Projet des réserves de substitution du bassin de la Sèvre Niortaise. Contribution de la chambre d'agriculture 79 et de la coopérative de l'eau 79. 36p.

Charles R.F., 2002:Groundwater science. United Kingdom: Academic Press, An imprint of Elsevier Science: London eBook ISBN: 9780080495033.

Collins R. et Jenkins A., 1996: The impact of agricultural land use on stream chemistry in the middle hills of the Himalayas, Nepal. *Journal of hydrology*. 185 (1-4): 71-86. DOI: 10.1016/0022-1694(95)03008-5.

Couture I., 2004 : Analyse d'eau pour fin d'irrigation. MAPAQ Montérégie-Est/AGRI-VISION 2003-2004, 8p.

Domenico, P. A. and Schwartz F. W. 1990.Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons, New York

Doneen L.D., 1964: Notes on water quality in agriculture. Published as Water Science and engineering. Paper 4001, Department of Water Science and Engineering, University of California, Davis.

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

Elango L., Kannan R. and Senthil Kumar M., 2003: Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuram district, Tamil Ndu, India. *Environmental geosciences*. 10(4): 157-166. DOI: 10.1306/eg100403011.

Fetter C.W., 2001: Applied Hydrogeology. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.

Fustec E., Lefeuvre J.C., 2000 : Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris, 426 p.

Grünberger O., 2015 : Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. HDR, École doctorale SIBAGHE, Université de Montpellier, 133p.

Hamdoud N., 2012.Effet du stress salin sur la croissance et la physiologie de la féverole (*Vicia faba* L.).Mémoire de Master en sciences Agronomique, école nationale supérieure Agronomique El-harrachalger, 59p.

Hanana M., Hamrouni L., Cagnac O., Blumwald E., 2011: Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. *Dossiers environnement* 19. 121 – 141.

Hantzpergue P., 1988 : Notice de la carte géologique de la feuille de Marans au 1/50 000, Orléans. Xp.

Hem J.D., 1985: Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US Geological Survey Water-Supply Paper 2254. <https://doi.org/10.3133/wsp2254>.

HindeyaGebru, TesfamichaelGebreyohannes et ErmiasHagos : 2024. Evaluation of groundwaters quality for irrigation purposes and impact of irrigation on water in Golina River Basin, Northern Ethiopia. Momona Ethiopian journal of science (MEJS), Volume 16, numéro 1, pp 144-166. <http://dx.doi.org/10.4314/mejs.v16i1.8>

INSEE2016 : Rapport d'activité Insee 2015. 53p.

<https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=rapport+insee+2015+pdf&ie=UTF-8&oe=UTF-8>

Junk, W.J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, S. A., Mitsch, W. J., and Robarts, R. D., 2013: Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate. *Aquatic sciences*, 75(1), 151-167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>

Kahlowan, M. A., Ashraf, M., & Hussain, M. (2005). Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. *Agricultural Water Management*, 76(1), 24–35.

Kelly W.P., 1940: Permissible composition and concentration of irrigation water. *Proceedings of the American society of civil engineers*. 66: 607-613

Kpinkoun J.K., Zanklan S.A., Françoise A.K., Armel C.G., David M., Kinsou E., Christophe B.G., 2019 : Évaluation de la résistance à la salinité du stade jeune plant de quelques cultivars de piment (*Capsicum* spp.) du Bénin. *Journal of Applied Biosciences*, pp 13561 - 13573

Kubiena W.L., 1953: the soils of Europe, Thomas Murby, London, 314 p., 26 pl., bibl.

Kumar M., Kumari K., Ramanathan A. and Saxena R., 2007: a comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated district of Punjab, India. In *Environmental Geology* 53(3):553-574 DOI: 10.1007/s00254-007-0672-3.

Lobna Z, Gharbi F, Rezgui F, Salwa R, Hassan N et Mohamed N. R., 2007. Effets du stress salin sur la croissance et sur les mécanismes de photo protection chez la tomate, *Annales de l'INRGREF*, Numéros spécial 11, 189-202p.

Marlet S., et Job J.O., 2006 : Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R. *Traité d'irrigation*. Seconde Edition Tec & Doc Lavoisier, 28p. ISBN-13 : 978-2743009106.

Matthess G., 1982: The property of groundwater. Department of environmental science, John Wiley and sons Inc. New-York. 406p.

Mazeau M., 1979 : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Jurassique supérieur entre Courçon et Saint-Jean-d'Angély (Charente-Maritime). Thèse de Doctorat n° 1350. Université de Bordeaux I, 158p., 36pl., 4pl. h. t.

Mehdi J., 2008. Adaptation des plantes au stress salin: Caractérisation de transporteurs de sodium et de potassium de la famille HKT chez le riz, thèse de doctorat, Université Montpellier II, 127p.

- Mitsch W.J. et Gosselink J.G., 2000: Wetlands, third ed. Van Nostrand Reinhold, New-York.
- Moussa I.B., 2018: Pratiques paysannes de gestion de la salinité du sol dans le périmètre irrigué de Sébéri (Kollo). Mémoire de fin de cycle de la licence générale ès sciences agronomiques, Université Abdou Moumouni, Faculté d'agronomie, 21p.
- Munns R. et Tester M., 2008: Mechanisms of salinity tolerance. Annual reviews of Plant Biology 59, 651 – 681.
- Nijs R., 1978 : Les sols du marais Poitevin, Ann. de la Soc. des Sc. nat. de la Charente Maritime, vol VI, fasc. 5, Muséum histoire naturelle, La Rochelle.
- Paliwal K.V., 1972: Irrigation with saline water. IARI. New Delhi Monogram N° 2 (New series): New Delhi 198.
- Piper A.M., 1944: A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. Eos, Transactions American Geophysical Union, n° 25, pp. 914-928.
- Rawat K.S., Singh S.K., Gautam S.K., 2018: Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study. Applied Water Science 8:233 DOI: 10.1007/s13201-018-0866-8.
- Richards L.A., 1954: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA and IBH Pub. Coy Ltd, New Delhi, India. Agric. Handbook 60:98-99.
- Safège ingénieurs conseils., 2004 : Rapport état des lieux. Schéma d'Aménagement et de gestion des eaux de la Sèvre Niortaise et du Marais Poitevin. 523p.
- 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° cycle, pédologie. Université de Poitiers 144 p.
- Sawyer C. and Mc Carty P., 1967: Chemistry for sanitary engineers. 2nd edition, Mc Graw-Hill: New-York.
- Schoeller H., 1962: Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources. 187 fig. Paris : Masson et Cie, Éditeurs 642 p.
- Siamak G. and Srikantaswamy S., 2009: analysis of agricultural impact on the Cauvery river water around KRS dam. World Appl. Sci. J. 6(8): 1157-1169.
- Simler R., 2024 : Logiciel DIAGRAMMES. Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon. URL:<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>.
- Singhal B.B.S., Gupta R.P., 2010: Applied hydrogeology of fractured rocks: second edition. DOI:10.1007/978-90-481-8799-7
- Srinivasamoorthy K., Gopinath M., Chidambaram S., Vasanthavigar M. et Sarma V.S., 2014: Hydrochemical Characterization and quality appraisal of groundwater from pungar sub basin.

Tamilnadu, India. Journal of King Saud University – Science 26(1): 37-52 DOI: 10.1016/j.jksus.2013.08.001.

Suarez, D. L., 2001: Impact of Agriculture on Groundwater Salinity. Transactions of the ASAE, 44(2), 431–436.

Todd D.K., 1980: Groundwater Hydrology (second edition) John Wiley and sons. New-York p 535.

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 (PoitouCharentes-France). *European Scientific Journal, ESJ*, 18(40), 211.

<https://doi.org/10.19044/esj.2022.v18n40p211>

Welsch J. (1916) : Le Marais Poitevin. Annales de Géographie., tome XXV. Pp326-346.

Wilcox L. V., 1955. Classification and use of irrigation water. US Geological Department Agri.Circ. 969: 19.

Yanis Suire, 2004 : L’homme et l’environnement dans le Marais Poitevin, seconde moitié du XVIe début du XXe siècle. Thèse de doctorat. 4 vol. Université Paris 4 (Université Paris-Sorbonne). 1359 p.

Yassin HousseinAbdi., 2023 : La côte continentale du Pertuis Breton, du début du XVIIIe siècle à la fin du second empire : évolution et aménagement du littoral depuis la Tranche-sur-Mer jusqu’au nord de la Rochelle. Thèse de doctorat Histoire et civilisation. École Doctorale Euclide, Université de la Rochelle. 435 p.